

ISSN 2664-262X

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

Збірник наукових праць
За загальною редакцією М.І. Черновола
Заснований у 1997 році

В и п у с к 2(33)

Кропивницький • 2019

ISSN 2664-262X

Ministry of Education and Science of Ukraine
Central Ukrainian National Technical University

**CENTRAL UKRAINIAN SCIENTIFIC BULLETIN.
TECHNICAL SCIENCES**

Collected Works
Under the general editorship of M. Chernovol
Founded in 1997

Issue 2(33)

Кропывнытский • 2019

У науковому віснику представлені статті, присвячені проблемам проектування та експлуатації сільськогосподарської техніки, технології виробництва, експлуатації і ремонту засобів транспорту, транспортних технологій і логістики, будівництва, матеріалознавства, електротехнічних комплексів, енергозбереження, ІТ-технологій, роботизації, автоматизації в промисловості та сільському господарстві. Наведені практичні рекомендації до використання результатів досліджень у галузях народного господарства.

Науковий вісник є фаховим виданням, в якому публікуються основні результати наукових досліджень професорсько-викладацького складу, аспірантів та докторантів університету, а також науковців інших навчальних закладів та промислових підприємств України.

Збірник розрахований на наукових, науково-технічних працівників різних галузей науки та техніки, ЗВО, здобувачів вчених ступенів і звань.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 23 грудня 2019 року № 4.

Головний редактор: д-р техн. наук, проф. Черновол М.І.

Редакційна колегія: Аулін В.В., д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Кузик О.В., канд. техн. наук (відповідальний секретар за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Осадчий С.І., д-р техн. наук, проф. (заступник головного редактора за галузями: 12 «Інформаційні технології», 14 «Електрична інженерія», 15 «Автоматизація та приладобудування», 17 «Електроніка та телекомунікації»); Березюк І.А., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 12 «Інформаційні технології», 14 «Електрична інженерія», 15 «Автоматизація та приладобудування», 17 «Електроніка та телекомунікації»); Белоцерковський М.А., д-р техн. наук, проф. (Білорусь); Боков В.М., канд. техн. наук, доц.; Варума Аріфа, Dr PhD (Нігер); Віхрова Л.Г., канд. техн. наук, проф.; Гамалій В.Ф., д-р ф.-м. наук, проф.; Гасенко А.В., канд. техн. наук, доц.; Жорнік В.І., д-р техн. наук (Білорусь); Зоценко М.Л., д-р техн. наук, проф.; Іващук В.В., д-р техн. наук, доц.; Кириченко А.М., д-р техн. наук, проф.; Клименко В.В., д-р техн. наук, проф.; Немировський Я.Б., д-р техн. наук; Павленко І.І., д-р техн. наук, проф.; Сало В. М., д-р техн. наук, проф.; Смірнов О.А., д-р техн. наук, проф.; Солових Є.К., д-р техн. наук, проф.; Сторчак М.Г. д-р техн. наук, ст. наук. співр. (Німеччина); Філімоніхін Г.Б., д-р техн. наук, проф.

Адреса редакційної колегії: 25030, м. Кропивницький, проспект Університетський, 8,
Центральноукраїнський національний технічний університет, тел.: +380 (522) 390-472, +380 (522) 390-437, +380 (522) 55-10-49.

Офіційний сайт: <http://mapiea.kntu.kr.ua/>

Автори опублікованих матеріалів несуть відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей, а також за те, що матеріали не містять даних, які не підлягають відкритій публікації. Редакція може публікувати статті в порядку обговорення, не поділяючи точки зору автора.

Науковий вісник заснований у 1997 році.

Включений до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук в галузі технічних наук (постанови Президії ВАК України від 9 червня 1999 року №1-05/7, від 14 жовтня 2009 року № 1-05/4; накази Міністерства освіти і науки України від 29 грудня 2014 року № 1528, від 07 листопада 2018 року № 1218).

Науковий вісник зберігається в загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка наукова» Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського та представлений у міжнародних наукометричних базах даних *Google Scholar, ResearchBib, CrossRef, Index Copernicus*

Реєстраційне свідоцтво: серія КВ № 23513-13353 ПР від 13.07.2018 р.

ISSN 2664-262X (p)

DOI: 10.32515/2664-262X

МАШИНИ І ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 621.891:631.31

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).3-16](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).3-16)

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **А.А. Тихий**, доц., канд. техн. наук, **С.О. Карпушин** доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: AulinVV@gmail.com*

Д.А. Дерев'янку, проф., д-р техн. наук

Житомирський національний агроекологічний університет, м. Житомир, Україна

Підвищення енергоефективності обробітку ґрунту зменшенням процесів його налипання на поверхні робочих органів

Розглянуто фізичну сутність процесу взаємодії системи "робочий орган ґрунтообробної машини - ґрунт" в різних умовах її роботи, що дає можливість з'ясувати методи зниження енергозатрат при обробітку ґрунту. Виявлено залежність тягового опору робочих органів ґрунтообробних машин від умов їх роботи. Визначено, що процес налипання ґрунту на їх робочі поверхні є однією з причин підвищення тягового опору. Проведено аналіз сучасних методів та методик щодо зменшення величини налипання ґрунту на робочі поверхні розпушувачів. Врахована природа налипання частинок ґрунту на різальні елементи та поверхню робочих поверхонь розпушувача з точки зору дослідження на макро - та мікрорівні. Для дослідження налипання ґрунту обрано серійний робочий орган з матеріалу сталь Hardox 400, з покриттям Kocetal K300 та з покриттям в складі композиції на основі високомолекулярного поліетилену та базальтового волокна. Отримані залежності горизонтальної складової сили тягового опору розпушувача від швидкості його руху, абсолютної вологості ґрунту, від розміру частинок суглинистого ґрунту та від глибини обробітку.

робочий орган ґрунтообробної машини, тяговий опір, вологість, налипання ґрунту, коефіцієнт тертя ґрунту, гідрофобні покриття

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **А.А. Тихий**, доц., канд. техн. наук, **С.А. Карпушин**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Д.А. Дерев'янку, проф., д-р техн. наук

Житомирський національний агроекологічний університет, м. Житомир, Україна

Повышение энергоэффективности обработки почвы уменьшением процессов ее налипания на поверхности рабочих органов

Рассмотрена физическая суть процесса взаимодействия системы "рабочий орган почвообрабатывающей машины - почва" в разных условиях ее работы, что дает возможность определить методы снижения энергозатрат при обработке почвы. Выявлена зависимость тягового сопротивления рабочих органов почвообрабатывающих машин от условий их работы. Определено, что процесс налипания почвы на их рабочие поверхности является одной из причин повышения тягового сопротивления. Проведен анализ современных методов и методик по уменьшению величины налипания почвы на рабочие поверхности рыхлителей. Учтена природа налипания частиц почвы на режущие элементы и поверхность рабочих поверхностей рыхлителя с точки зрения исследования на макро - и микроуровне. Для исследования налипания почвы выбран серийный рабочий орган из материала сталь Hardox 400, с покрытием Kocetal K300 и с покрытием в составе композиции на основе высокомолекулярного полиэтилена и базальтового волокна. Полученные зависимости горизонтальной составляющей силы тягового сопротивления рыхлителя от скорости его движения, абсолютной влажности почвы, от размера частиц суглинистой почвы и от глубины обработки.

робочий орган почвообрабатывающей машини, тягове опір, вологість, налипання ґрунту, коефіцієнт тертя ґрунту, гідрофобні покриття

© В.В. Аулін, А.А. Тихий, С.О. Карпушин, Д.А. Дерев'янку, 2019

Постановка проблеми. Створення ресурсозберігаючих та енергоощадних технологій залишається одним з пріоритетних напрямків сучасних наукових досліджень технологій ґрунтообробних та землерийних машин. Тяговий опір робочих органів ґрунтообробних машин (РОГМ) є важливим енергетичним показником їх роботи, який обмежує продуктивність агрегату і визначає витрати енергії на обробіток ґрунту. Виявлено, що тяговий опір РОГМ істотно залежить як від швидкості руху, так і від глибини обробітку ґрунту. Особливо суттєвим цей вплив спостерігається при роботі глибокорозпушувачів ґрунту, їх тяговий опір на глибині 0,25...0,30 становить 10 кН, що є перешкодою досягнення високої продуктивності агрегату. Тому пошук шляхів розв'язання проблеми спрямованої на зниження тягового опору РОГМ, є безумовно актуальним, особливо при розробці їх нових енергоефективних конструкцій РОГМ.

Аналіз експериментальних досліджень сучасних провідних вітчизняних та зарубіжних науковців можна прийти до висновку, що недостатньо уваги приділяється фізичній сутності процесу взаємодії системи "РОГМ-ґрунт" в різних умовах її роботи. Врахування цих умов дає можливість зниження енергозатрат при обробітку ґрунту, необхідно розглянути залежність тягового опору РОГМ від умов їх роботи. Особливо це стосується передусім налипання ґрунту на робочі поверхні РОГМ (Рис.1), як однією з причин підвищення їх тягового опору. Недостатньо враховується природа налипання частинок ґрунту на різальні елементи (РЕ) та поверхню РОГМ з точки зору дослідження на макро - та мікрорівні.



Рисунок 1 – Налипання ґрунту на поверхню розпушувача

Джерело: розроблено авторами

Механічні способи усунення налипання ґрунту на робочі поверхні РОГМ, розроблені в різні часи в Україні та за кордоном свідчать, що кожен з них має свої переваги і недоліки. Зазначимо, що дослідження проведені в даному напрямку стосувалися передусім боротьби з процесом налипання ґрунту на робочі поверхні глибокорозпушувачів. Виявлено, що серед численних спроб знизити тертя в системі "РОГМ-ґрунт" можна відзначити наступні: змащення водою з зовнішнього джерела; змащення водою, отриманої з ґрунту в результаті електроосмосу; зменшення налипання ґрунту в результаті видалення води електроосмосом; повітряне мастило; застосування вібрації; заміна пасивних робочих поверхонь активними; зміна геометричної форми поверхні робочого органу; застосування різних матеріалів в якості покриттів на робочі поверхні.

Для усунення процесу налипання ґрунту на РОГМ різними дослідниками пропонувалася велика кількість різноманітних пластичних матеріалів, переважно для

плугів. Запропоновано наносити покриття на робочі поверхні РОГМ, в місцях найбільшого налипання ґрунту, такими полімерними матеріалами, як поліетилен (високого і низького тиску), капрон, поліамід, різного роду смоли, полімерні композиційні матеріали на основі високомолекулярного поліетилену та базальтового волокна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У середовищі ґрунту, що містить полярні і неполярні молекули, виникає взаємодія, обумовлена електростатичним притяганням між диполями полярних молекул і наведеними (індукованими) диполями неполярних молекул. Останні виникають в результаті поляризації під дією електричних полів диполів, що оточують полярну молекулу. Це ефект виникнення індукційної складової сил Ван-дер-Ваальса. Енергія індукційної взаємодії зростає зі збільшенням електричного моменту диполя, але не залежить від температури, оскільки наведення диполів визначається напруженістю всього електричного поля і відбувається при будь-якій просторовій орієнтації молекул.

Водяне мастило, електроосмос, аеродинамічне змащення обумовлює створення граничних плівок. Відомо, що один з найбільш поширених способів змащення частинок ґрунту - це змащення водою. Для зниження тягового опору РОГМ і поліпшення його роботи французька фірма "Kuhn" запропонувала подавати воду на робочу поверхню РОГМ. За даними фірми, застосування цього способу при роботі плуга на зволжених ґрунтах, знижується тяговий опір на 35% [1]. Крім подачі в зону контакту ґрунту з лемішно-відвальною поверхнею чистої води, досліджували також подачу водополімерної суміші, що поліпшувало оборот пласта [2,3]. В окремих випадках зниження тягового опору становило 30% і більше, а в середньому - на 20%, при витраті суміші 110 ... 115 л/га. Аналіз ґрунту після випробувань показав, що застосовувані полімери нешкідливі, біодеградують в ґрунті, розчиняючись у воді.

Зазначені технічні рішення схожі між собою і полягають в подачі води або спеціальних водних розчинів в зону контакту ґрунту з лемішно-відвальною поверхнею, або через отвори в відвалі і лемеші, розташовані в області їх стику [4]. Проведена економічна оцінка доводить, що обробка плугами з водяним мащенням великих земельних масивів є недоцільною, оскільки вимагає підвезення великої кількості води і великих витрат часу.

Крім безпосереднього введення води між пластом ґрунту і відвалом, отримати мащення можна і за допомогою електроосмосу. Г.С. Беліком [5] досліджені можливості використання електроосмосу ґрунту при оранці для усунення налипання ґрунту на плужних відвалах шляхом створення тонкошарової водяної плівки перенесенням води з ґрунту на поверхню відвалу. Виявлено, що застосування електроосмосу дає ефект при високій вологості ґрунту 24 ... 26% і швидкостях руху плуга, що не перевищують 0,2 ... 0,3 м/с. За даних умов спостерігалось зниження тягового опору плуга на 14% і зменшення в 20 ... 60 разів по вазі, налиплого шару ґрунту. В роботі [6,11] досліджували вплив електроосмосу на зниження коефіцієнта тертя ґрунту по сталі, при різних показниках вологості. Польові випробування оранки з використанням електроосмосу при напрузі на електродах 120 В і вологості 25,5% дали зниження тягового опору плуга на 14,3%. Налипання ґрунту на сталь зменшується в кілька десятків разів, а при напрузі на електродах 500 В - взагалі не спостерігалось. Проте складність апаратури перетворення струму та потужність генератора постійного струму для створення електроосмосу на корпусах плуга практично компенсує результат зниження тягового опору.

Розглянуто і спосіб аеродинамічного змащення, коли повітря під тиском подається на робочі поверхні через отвори в відвалі і лемеші. Газовий прошарок, що при цьому утворюється, повинен усунути тертя ковзання ґрунту по металу, в результаті

чого істотно зменшується тяговий опір [7]. Проте аеродинамічне змащення не знайшло масового застосування в силу конструктивної складності виготовлення робочих органів з аеродинамічним змащенням та великої трудомісткості при постановці і знятті додаткового обладнання в процесі експлуатації.

Для протидії налипанню і зниження тягового опору РОГМ використовували і вібраційні явища [8]. Встановлено, що вібрація знижує тяговий опір на 40 ... 65% при амплітуді коливання 5 мм і частоті 20 Гц і малою поступальною швидкістю до 0,6 м / сек. Зменшення частоти коливань до 10 Гц викликає менший ефект в зниженні тягового опору 10 ... 30%, по відношенню до тягового опору невіброуючого РОГМ, та вимагає додаткової потужності на вібропривід корпусів.

Для зниження тягового опору та зменшення процесу налипання ґрунту були випробувані РОГМ з гальванічними покриттями - нікелювання, хромування [9]. Запропоновані покриття знижують налипання поверхонь до 30% за рахунок гідрофобних властивостей, але недостатня їх зносостійкість, мала товщина та висока вартість технології нанесення не дозволяє їх широко використовувати. Аналізуючи існуючі способи боротьби з налипанням, найбільш перспективним є застосування полімерних композиційних матеріалів в якості покриття робочих органів.

В роботі [10] наведено результати проведених досліджень по використанню пластмас в якості покриттів робочих поверхонь РОГМ. Лабораторні дослідження в середовищі глини показали, що при вологості 21,1%, тефлон має коефіцієнт тертя 0,25, рулон (чотирифтористий етилен з наповнювачем) - 0,44, поліетилен високого тиску - 0,78, сталь - 2. Тяговий опір корпусу плугу з пластмасовим покриттям на 23% менший від сталевого, а налипання глини взагалі відсутнє. Корпус плуга з поліетиленовим покриттям теж не залипає.

Покриття РОГМ синтетичним матеріалом марки Worblex-PE 7473 (поліетилен низького тиску фірми Gulrid – Worbla AG) [11] дало зниження тягового опору плуга на пухких піщаних ґрунтах на 5,6 ... 12,7%, на середніх - 2,7 ... 5,4%. Це спостерігалось в інтервалі швидкостей руху 1,67...2,77м/с. Витрата палива при цьому також знижується на 9,9...11% (піщаний ґрунт), та на 6,1 ... 7,0% (середньосуглинистий ґрунт). Дані отримані для плугів зі сталевими корпусами. Визначено зниження експлуатаційних витрати на 2%, а витрати палива - на 7%. Напрацювання плуга з пластмасовими покриттями становить близько 120 га.

В роботі [12] висвітлені результати проведених експериментальних досліджень по оранці липких ґрунтів за допомогою плугів, на відвали яких нанесена тонка пластмасова плівка. Налипання ґрунту при цьому не спостерігали. Виявлено, що з числа випробуваних матеріалів найбільшу довговічність мають тефлон (90 ... 120 га) і суміш келона - С з деякими похідними тефлону (150 га).

Тяговий опір відвалів плужних корпусів з Kocetal K300 покриттям, згідно досліджень проведених в роботі [2,13], у порівнянні зі звичайними сталевими відвалами знижується приблизно на 23% на корпус і приблизно на 20% на плуг в цілому. Крім того відзначаються більш високі агротехнічні показники (на 10 ... 15%) по кришенню ґрунту, глибині закладення рослинних залишків та за поверхневою брилісткістю ріллі. Чотирикорпусний навісний плуг загального призначення з Kocetal K300 покриттями на відвалах виробляє до моменту наскрізного протирання покриттів 120 га. Відвал корпусу плуга, при цьому виготовлений з поліетилену низького тиску марки П4009. Випробування показали, що корпус плуга ПН-8-35 з таким відвалом дозволяє підвищити продуктивність на 0,1 га/год і знизити витрату палива на 0,8 кг/га у порівнянні зі звичайними металевими корпусами.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення показників енергоефективності робочих органів ґрунтообробних машин за рахунок покращення

гідрофобних характеристик поверхні та зменшення величини тягового опору від налипання ґрунту.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводили на дослідних ділянках поля ТОВ "Екосем" с. Новопавлівка Кіровоградського району Кіровоградської області та в лабораторії Центральноукраїнського національного технічного університету згідно ДСТУ ISO 8947:2012 "Сільськогосподарські машини". Дослідженню підлягали РОГМ глибокорозпушувача Alrego Super Cracker KF 7-400 з наступними параметрами: кількість робочих органів 7; відстань між ними 570 мм; робоча глибина обробітку до 650 мм; робоча ширина захвату 3900 мм; транспортна ширина 3770 мм; вага 1650. Під час випробувань використовувався трактор New Holland T8-390 з максимальною потужністю 286 кВт. Для визначення величини тягового опору вибрано S-подібний тензодатчик "Тензо М С2" (рис. 2а). Синхронізація по часу роботи вимірювальних каналів тензодатчика здійснюється за допомогою модуля ME-020. В якості реєструючої апаратури використовували вимірювальний комплекс МІС 400D, встановлений в кабіні трактора (рис. 2б.), що призначений для перетворення різниці тисків між трактором та розпушувачем ґрунту у вихідний уніфікований сигнал взаємної індуктивності з лінійною залежністю з можливістю передачі вимірюваних величин на ПК.



а



б

Рисунок 2 – Пристрій для вимірювання тягового опору: а - Тензо М С2; б- МІС 400D

Джерело: розроблено авторами

Для порівняння зміни величини тягового опору розпушувача було обрано серійний робочий орган з матеріалу сталь Hardox 400, з покриттям Kocetal K300 та з покриттям в складі композиції на основі високомолекулярного поліетилену та базальтового волокна (ВПБВ) (рис.3).



а)



б)

Рисунок 3 – Матеріали для покриття РОГМ: а- Kocetal K300; б- ВПБВ

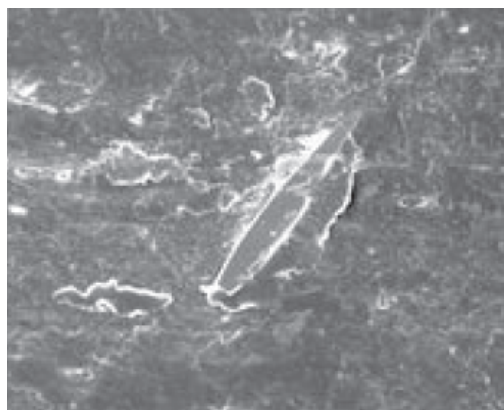
Джерело: розроблено авторами

Визначення величини налиплого ґрунту (середньосуглинистий чорнозем *Нapліс Chernozems* за міжнародною класифікацією WRB) проводили ваговим методом. Вологість ґрунту по горизонтах 0...10, 10...20 і 20...30 см контролювали електронним аналізатором вологості "Sartorius MA30-000V3".

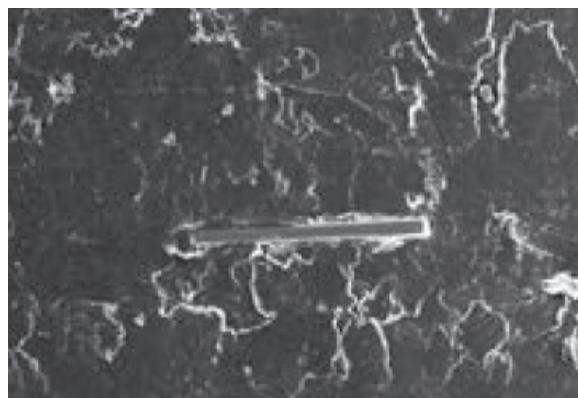
Результати досліджень. За результатами досліджень були визначені адгезійні властивості ґрунту (центральноукраїнський середньосуглинистий чорнозем, *Нapліс Chernozems* за міжнародною класифікацією WRB) при взаємодії з різними матеріалами робочого органу розпушувача. В результаті встановлено, що питома сила зчеплення полімерних та сталевих з різною чистотою поверхні з ґрунтом, в міру збільшення його вологості, зростає досягаючи максимуму при вологості $W = 30 \dots 32\%$, а потім спадає. З досліджених матеріалів найбільш інтенсивно спостерігається налипання на сталі з чистотою поверхні $\nabla 4$, а найменше – на матеріал *Kocetal K300*.

Встановлено, що абсолютна величина сили прилипання ґрунту досягає максимального значення у необробленій сталевій поверхні, а мінімального – у поліетилену, зменшення у 2,0 рази. Для матеріалу *Kocetal K300*, група коцеталів з додаванням скловолокна, ця сила зменшується у 2,25 рази. Виявлено, що сила прилипання з підвищенням вологості поступово збільшується, потім переходить через максимум, при вологості $30 \dots 36\%$, а після чого зменшується. Виявлено, що матеріал *Kocetal K300* має вологовідштовхувальні (гідрофобні) властивості, що є основним чинником для усунення процесу налипання ґрунту. Визначення відносної зносостійкості пластмас, проведене на базі лабораторії зносостійкості та надійності машин Центральноукраїнського національного технічного університету показало, що матеріал *Kocetal K300* – в 4 рази більш стійкий, ніж поліетилен, а створена композиція на основі високомолекулярного поліетилену та базальтового волокна (ВПБВ), має зносостійкість у 1,5 ... 2,0 рази вищу ніж *Kocetal K300*.

При використанні в якості покриття *Kocetal K300*, полімерна матриця менш пов'язана з волокном і при терті йде відшарування волокон разом з прилеглим полімером, приводячи до зниження зносостійкості такого композиту. Зазначимо, що у випадку використання ВПБВ процес тертя протікає на поверхні волокон, локалізованих по шляху тертя, а тому в результаті посилення адгезійної взаємодії між матеріалом базальтового волокна і полімером практично не зареєстровано частинок зносу (рис. 4а і 4б).



а



б

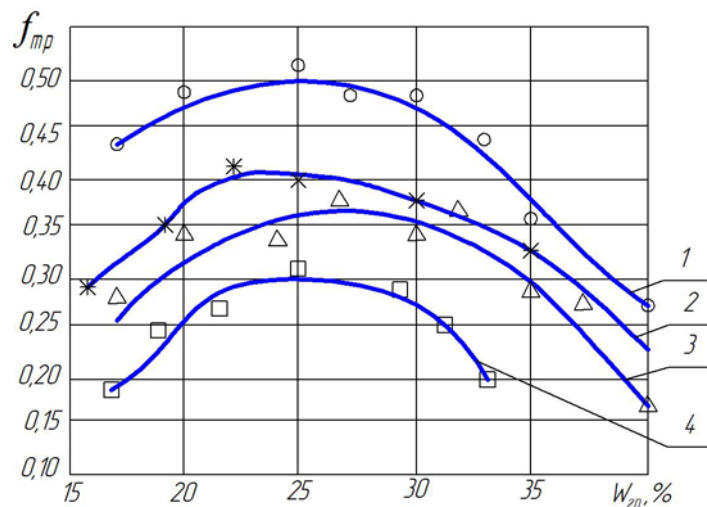
Рисунок 4 – Адгезійні випробування покриттів, нанесених на поверхнях зразків:
а- *Kocetal K300*; б- ВПБВ

Джерело: розроблено авторами

Зазначені результати досліджень взаємодії різних полімерних матеріалів з ґрунтом при покритті ними робочих поверхонь ґрунтообробних знарядь, показали

високу ефективність їх застосування для усунення налипання і зниження коефіцієнта тертя.

Результати дослідження залежності коефіцієнта тертя ґрунту від вологості наведені на рис.5.



1- глинистий чорнозем по поліетилену; 2 – суглинистий чорнозем по поліетилену;
3 - глинистий чорнозем по ВПБВ; 4 - суглинистий чорнозем по ВПБВ

Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта тертя ґрунту по поверхні РОГМ від її вологості

Джерело: розроблено авторами

Отримані експериментальні дані свідчать, що коефіцієнт тертя змінюється в широких межах для різних типів ґрунтів і матеріалів РОГМ: для глинистого чорнозему: $f_{тр.}=0,52...0,27$ – покриття поліетилен, $f_{тр.}=0,37...0,17$ – покриття ВПБВ; для суглинистого чорнозему $f_{тр.}=0,42...0,23$ – для покриття поліетилен, $f_{тр.}=0,30...0,18$ – для покриття ВПБВ.

Виявлено, що в інтервалі швидкостей 0,5 ... 3,0 м/с, абсолютна величина коефіцієнта тертя змінюється несуттєво і практично можна вважати її постійною. Визначено також, що питомий тиск в зоні контакту і механічний склад ґрунту істотно впливають на величину коефіцієнта тертя.

Вимірюваннями встановлено, що вологість ґрунту по горизонтах 0...5 і 5...10 см, відповідно дорівнюють 24,3 і 26,8%.

Проведеними дослідженнями виявлено, що серійні глибокорозпушувачі, виготовлені зі сталі, найбільш схильні до налипання ґрунтом. Максимальна маса налиплого на них ґрунту, при даній вологості, становить порядку 0,7 кг (табл. 1).

Аналогічний процес відбувається з глибокорозпушувачем з пентопластовим покриттям на робочих поверхнях, на яких маса налиплого ґрунту складає 0,557 ... 0,513 кг. Таке значне налипання розпушувача з пентопластовим покриттям можна пояснити гідрофільністю пентопласта. Зі збільшенням швидкості руху процес налипання на робочих поверхнях розпушувачів зменшується.

Можна бачити, що максимальний ступінь налипаємості ґрунту на РОГМ з покриття пентопласту у 1,33 разів, з покриттям Косетал К300 у 2,75 рази, а з покриттям ВПБВ – у 4,17 разів менше ніж серійних без покриття. Зі збільшенням швидкості руху на всіх матеріалах РОГМ ступінь налипаємості ґрунту зменшується. На серійних розпушувачах налиплий шар ґрунту утворює нарід конусоподібної форми, що в результаті приводить до зміни робочої форми розпушувача в процесі тертя та зношування об ґрунт. Визначено також, що зі збільшенням вологості ґрунту його налипання на робочих поверхнях серійних розпушувачів збільшується, і при вологості

28 ... 30% вони практично стають непрацездатними. З наведених даних випливає, що істотно зменшується інтенсивність процесу налипання ґрунту на робочі поверхні розпушувача з покриттям ВПБВ при підвищеній вологості ґрунту.

Таблиця 1 – Зміна показника налипання ґрунту на робочі поверхні глибокорозпушувача від швидкості руху РОГМ та нанесених покриттів, а також статистичні характеристики вимірювання

Розпушувачі з покриттям	Показник налипання та статистичні характеристики	<i>v</i> , м/с				
		1,8	2,2	2,7	3,1	3,5
Серійний без покриття	m, ср	0,639	0,629	0,624	0,596	0,578
	± Δm	0,036	0,035	0,034	0,031	0,039
	± σ	5,89	5,79	5,71	5,58	6,92
	<i>v</i> , %	0,011	0,011	0,010	0,011	0,011
З покриттям Пентопласт	m, ср	0,557	0,552	0,536	0,527	0,513
	± Δm	0,031	0,034	0,031	0,032	0,034
	± σ	5,81	6,32	5,84	6,23	6,34
	<i>v</i> , %	0,012	0,012	0,011	0,011	0,011
З покриттям Косетал К300	m, ср	0,232	0,214	0,186	0,164	0,142
	± Δm	0,011	0,011	0,010	0,0089	0,0078
	± σ	5,32	6,01	5,26	5,41	5,51
	<i>v</i> , %	0,003	0,0035	0,002	0,0032	0,0017
З покриттям ВПБВ	m, ср	0,153	0,136	0,0131	0,123	0,112
	± Δm	0,006	0,0064	0,0075	0,0063	0,004
	± σ	4,53	4,96	6,04	5,34	4,72
	<i>v</i> , %	0,002	0,0025	0,002	0,0025	0,0015

Фізичні процеси в ґрунтах свідчать, що в них постійно циркулюють електричні струми природного походження, а також електричні поля атмосфери [1, 14]. Кожний тип ґрунту володіє електричним потенціалом, що має певне значення, яке змінюється в часі. За величиною електричний потенціал ґрунту залежить від множини різних факторів: механічний склад, водний режим, температура ґрунту, вміст органічної речовини і т. д.. Електричний потенціал змінюється і при обробі ґрунту різними сільськогосподарськими знаряддями. Так в процесі роботи РОГМ в ґрунті виникає електричний потенціал. При використанні полімерного матеріалу в якості покриттів на робочі поверхні розпушувачів, істотну роль у виникненні електричного потенціалу відіграють процеси обумовлені тертям і поляризацією контактуючих поверхонь в процесі взаємодії з ґрунтом.

Електричний заряд, виникаючий в зонах контакту при терті на полімері змінюється в часі і може нейтралізуватися іонами з навколишнього простору. Згідно електромолекулярної теорії взаємодії води і ґрунту механізм виникнення процесу прилипання і існування його максимуму пояснюються утворенням подвійного електричного шару на поверхні частинок ґрунту [15,16].

Результати досліджень виникнення і зміни електричного потенціалу в ґрунті при роботі глибокорозпушувачів з різними полімерними покриттями показали, що для одних і тих фізико-механічних характеристик ґрунту при однаковій швидкості руху РОГМ з ВПБВ покриттям має позитивний потенціал відносно нульової точки значення, і змінюється в межах (+ 50, + 100) мВ. У разі використання полімерного матеріалу

покриття Kocetal K300 знак потенціалу залишився незмінним, однак значення його меж знизилось до величини (+30, +50) мВ. Для глибокорозпушувачів з пентопластовим покриттям, потенціал змінювався в діапазоні нульового значення в межах (+20, +30) мВ. Для серійних (без покриття) РОГМ потенціал мав у всіх дослідах від'ємне значення в межах (-50, - 30) мВ. Також виявлено, що величина потенціалу залежить від сили тиску на поверхню РОГМ.

Аналіз результатів процесу налипання ґрунту на поверхні глибокорозпушувача, наведених в таблиці 1, дав можливість для подальших досліджень використовувати в якості покриття на робочі поверхні РОГМ матеріали Kocetal K300 та ВПБВ. Це передусім дослідження залежності горизонтальної складової сили тягового опору розпушувача від швидкості його руху (рис. 6)

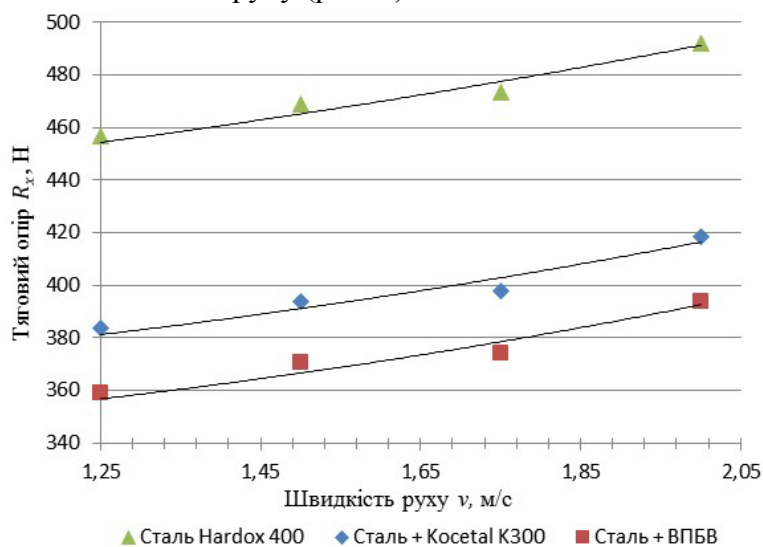


Рисунок 6 – Залежність горизонтальної складової сили тягового опору від матеріалу розпушувача та швидкості руху

Джерело: розроблено авторами

Регресійний аналіз даних дав можливість побудувати рівняння регресії горизонтальної складової сили тягового опору від швидкості руху розпушувача ґрунту: для Сталь Hardox 400 - $R_x = 11,87v^2 + 10,698v + 422,42$, $R^2 = 0,9815$; Сталь Hardox 400+ Kocetal K300 - $R_x = 14,666v^2 - 0,6415v + 359,06$, $R^2 = 0,978$; Сталь Hardox 400+ВПБВ - $R_x = 17,077v^2 - 7,7503v + 339,76$, $R^2 = 0,9778$.

З результатів проведених досліджень на рис. 6, видно, що з підвищенням швидкості руху горизонтальна складова тягового опору зростає прямо пропорційно за квадратичною залежністю. Максимальне значення тягового опору розпушувача виготовленого зі сталі Hardox 400 при швидкості руху 2,28 м/с, а мінімальне - 457 Н - швидкості 1,25 м/с. При використанні в якості покриття на робочій поверхні сталі матеріалу Kocetal K300 максимальне значення тягового опору склало 418 Н, при швидкості 2,28 м/с, а мінімальне - 363 Н, при швидкості 1,27 м/с. Максимальна величина тягового опору при використанні в якості покриття на робочій поверхні розпушувача матеріалу ВПБВ, склала 394 Н; при швидкості 2,28 м/с, а мінімальне - 359 Н; при швидкості 1,27 м/с.

Згідно електромолекулярної теорії, робота необхідна для подолання сили прилипання, витрачається на поділ протилежних зарядів подвійного електричного шару [16]. Процес прилипання ґрунту до різних матеріалів виникає з появою в ній крихко зв'язаної води. Вода, що міститься в граничних прошарках разом з сорбційною і

осмотичною зв'язаною водою має молекулярну природу. З'ясовано, що структура ґрунту, граничні шари і діючий тиск визначають активність тонких водних прошарків і змочуваних плівок. При цьому спостерігається зміна в'язкості та діелектричної проникності в граничних шарах, які в свою чергу впливають на електрокінетичні явища в капілярах і порах. При невеликій кількості цієї води гідратовані молекули міцно утримуються електростатичним полем частинок, і прилипання ґрунту в цьому випадку відсутнє. Зі збільшенням кількості крихко зв'язаної води, міцність зв'язків віддалених диполів води з частинками ґрунту зменшується, але міцність їх зв'язків підвищується в зоні контакту з матеріалом, що і викликає збільшення сили прилипання та підвищення тягового опору РОГМ. Міцність зв'язків з контактною поверхнею буде тим вище, чим більше її замокання.

Залежність горизонтальної складової тягового опору РОГМ наведена на рис. 7.

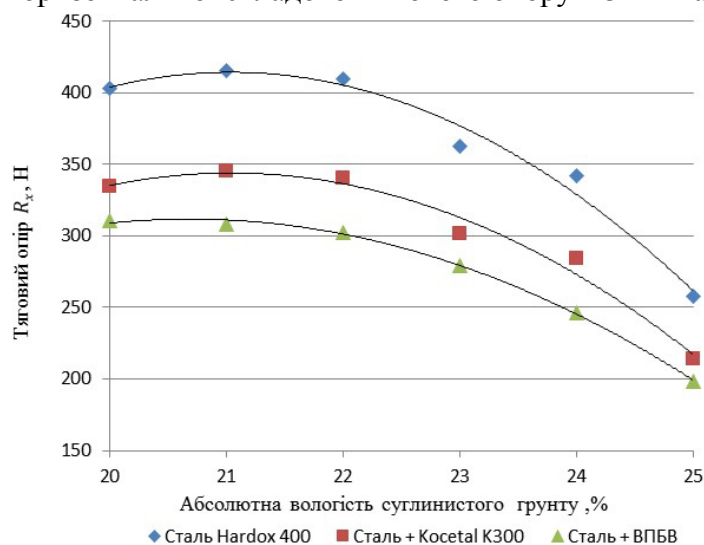


Рисунок 7 – Залежність горизонтальної складової тягового опору розпушувача від абсолютної вологості ґрунту

Джерело: розроблено авторами

Регресійний аналіз даних дав можливість побудувати рівняння регресії горизонтальної складової сили тягового опору від абсолютної вологості ґрунту: для Сталь Hardox 400 - $R_x = -9,7321w^2 + 409,55w - 3894,2$, $R^2 = 0,9778$; Сталь Hardox 400+ Kocetal K300 - $R_x = -8,0777w^2 + 339,92w - 3232,2$, $R^2 = 0,978$; Сталь Hardox 400+ВПБВ - $R_x = -6,0382w^2 + 249,81w - 2271,9$, $R^2 = 0,9986$.

Можна бачити, що максимальному значенню тягового опору 416 Н, (рис. 7) відповідає розпушувач виготовлений зі сталі Hardox 400, при вологості 21%, а мініимальному значенню 259 Н, при вологості 25%. При використанні покриття матеріалом Kocetal K300 максимальне значення тягового опору склало 346 Н, при вологості 21%, мінімальне 215 Н, при вологості 1,25%. Характер кривої з покриттям робочої поверхні матеріалом ВПБВ відрізняється більш плавним зниженням величини тягового опору в сторону збільшення вологості з максимальним значенням 310, при вологості 20% і мініимального 200 Н при вологості 25%.

Крім цього, що в діапазоні абсолютної вологості 20-25% суглинистого ґрунту горизонтальна складова тягового опору має параболічну залежність для всіх досліджуваних матеріалів РОГМ, приймаючи максимум при вологості 21%, крім розпушувача з покриттям ВПБВ. Подальше збільшення значень абсолютної вологості призводить до зменшення тягового опору.

На рис. 8. представлена залежність тягового опору розпушувача від розміру частинок ґрунту при роботі на суглинному ґрунті, при його абсолютній вологості 21%.

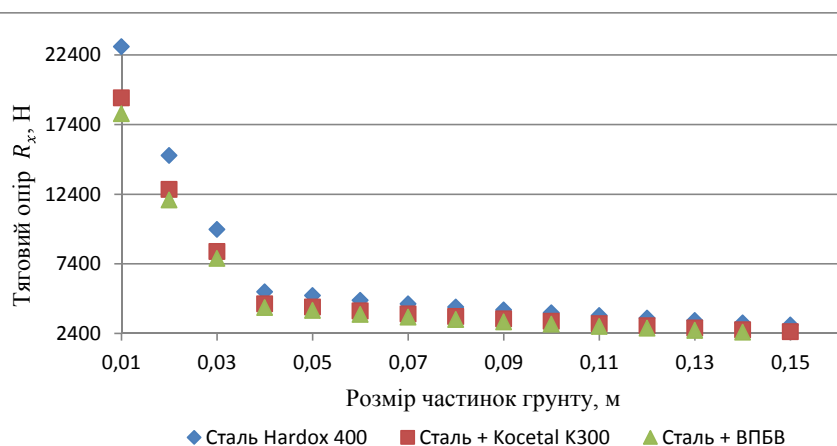


Рисунок 8 – Залежність горизонтальної складової тягового опору від розміру частинок суглинного ґрунту

Джерело: розроблено авторами

Тяговий опір розпушувача при роботі на глибині 20 см і шириною захвату корпусу 0,35 м змінюється за параболічною залежністю, маючи максимальне значення при розмірі частинок ґрунту 0,01 м. Дану криву можна розбити на дві ділянки. В інтервалі розміру частинок ґрунту 0,01 ... 0,06 м спостерігається інтенсивне зменшення тягового опору. У той же час в інтервалі розміру частинок ґрунту 0,06 ... 0,20 простежується також зменшення тягового опору, але з менш інтенсивним характером.

Проведені дослідження розподілу енергозатрат при обробці ґрунту розпушувачем на різній глибині (рис.9). Регресійний аналіз даних дав можливість побудувати рівняння регресії горизонтальної складової сили тягового опору від глибини обробки суглинного ґрунту: для Сталь Hardox 400 - $R_x = 314744h^2 - 89704h + 15893, R^2 = 0,9906$; Сталь Hardox 400+ Kocetal K300 - $R_x = 264949h^2 - 75445h - 13342, R^2 = 0,9901$; Сталь Hardox 400+ВПБВ - $R_x = 248647h^2 - 70866h + 12556, R^2 = 0,9906$.

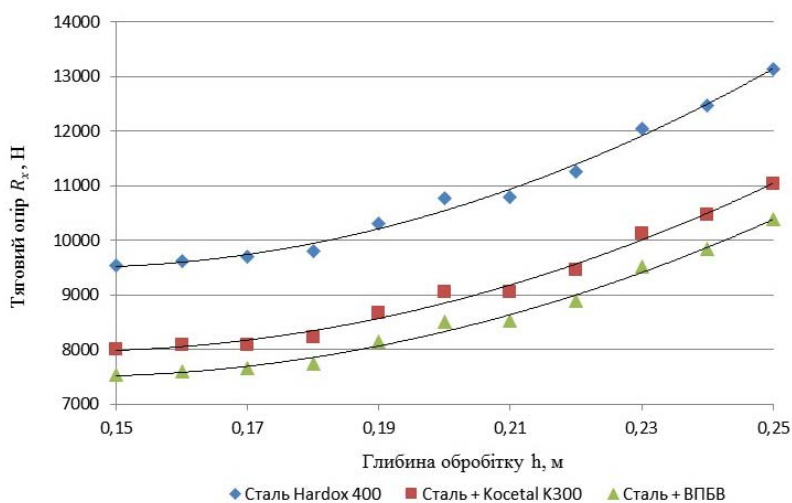


Рисунок 9 – Залежність горизонтальної складової тягового опору розпушувача від глибини обробки суглинного ґрунту

Джерело: розроблено авторами

Виявлено, що зміна глибини обробітку суттєво впливає на характер та величину тягового опору розпушувача. При збільшенні глибини ходу розпушувача з 0,15 до 0,25 м, зростає щільність ґрунту за прямопропорційною залежністю та величина тягового опору. Спостерігається різна залежність тягового опору від матеріалу, представлена у вигляді рівнянь регресії.

Висновки.

1. Встановлено, що при взаємодії полімерного матеріалу ВПБВ, нанесеного на робочу поверхню розпушувача, з ґрунтом, виникає електричний заряд, який має суттєвий вплив на зменшення процесу прилипання та зниження тягового опору.

2. Отримані значення потенціалу і його зв'язок з процесом налипання ґрунту. Результати вказують на залежність налипання ґрунту на поверхні з полімерними покриттями не тільки від гідрофільності матеріалів (ВПБВ, Kocetal K300), але і електричного потенціалу, що виникає в зоні контакту і який сприяє розділенню електричних зарядів, тим самим усуненню прилипання ґрунту, а отже зниженню тягового опору.

3. Виявлено зрушення в більшу сторону (для полімерних матеріалів) максимального значення вологості, при якому спостерігаються мінімальні значення сили прилипання ґрунту до робочих поверхонь розпушувача та коефіцієнту тертя.

4. Отримано залежності зміни горизонтальної складової тягового опору розпушувача від коефіцієнта тертя полімерного матеріалу по ґрунту, від вологості ґрунту, швидкості руху РОГМ, розмірів частинок ґрунту та глибини його обробітку.

Список літератури

1. Aulin V., Lyashuk O., Tykhyi A., Karpushyn S., Denysiuk N. Influence of rheological properties of a soil layer adjacent to the working body cutting element on the mechanism of soil cultivation Acta Technologica Agriculturae 4 Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae. 2018. pp. 153-159. <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0028>
2. Аулін В.В., Тихий А.А. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості і надійності робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами: монографія. Кропивницький: Вид. Лисенко В.Ф. 2017. 279 с.
3. Аулін В.В., Тихий А.А. Динамика износа режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих машин при взаимодействии с почвой. *Motrol. Commision of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2016. Vol.18. №2. С. 41-48.
4. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: монографія. Кіровоград: Вид. Лисенко В.Ф.. 2014. 370 с.
5. Аулін В.В., Настоящий В.А., Тихий А.А. Вибіркове зношування робочих органів ґрунтообробних та землерийних машин як відображення стохастичної природи їх взаємодії з частинками ґрунту. *Зб. наук. праць Укр. держ. академії заліз. транспорту*. 2014. Вип. 148. С.25-33.
6. Аулін В.В., Тихий А.А. Вплив зміни стану та властивостей ґрунту на знос робочих органів, що працюють на різній глибині. *Проблеми трибології (Problems of tribology)*. Хмельницький: ХНУ. 2013. №1. С.120-126.
7. Аулін В.В. Стан самоорганізації середовища ґрунту та закономірності зносу робочих органів ґрунтообробних машин. *Проблеми трибології (Problems of tribology)*. Хмельницький: ХНУ. 2013. №1. С.114-119.
8. Аулін В.В. Трибофізичне обґрунтування зміни напружено-деформованого стану ґрунту під час дії РОГМ. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2012. Вип.42, ч. I. С. 13-20.
9. Аулін В.В., Тихий А.А., Карпушин С.О. Самозагострювання різальних елементів ґрунтообробних і землерийних машин в умовах зміцнення їх робочих поверхонь. *Вестник Харьковского нац. автомобильно-дорожного университета: сб. науч. трудов*. 2012. Вып. 57. С. 188-194.
10. Мамбеталин К.Т. Почва и ее тайны / К.Т. Мамбеталин. Челябинск, 2000. 100 с.
11. Кушнарев А.С., Кочев В.И. Механико-технологические основы обработки почвы. Киев: Урожай, 1989. 144 с.

12. Капов С.П., Мударисов С.Г. Основные принципы построения модели разрушения почвенной среды. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2005. №6. С.30-32.
13. Huang, W. – Liu, D.Y. – Zhao, B.Y. – FENG, Y.B. – XIA, Y.C. Study on the rheological properties and constitutive model of shenzhen mucky soft soil. *In Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2014 vol. 7, no. 3 pp. 55–61.
14. Teamrat, A.G., Dani, O.R. Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses. *In Soil Science Society of America Journal*, 2001.vol. 65, no.3, pp. 624–637.
15. Ľavodová, M. – Kalincová, D. – Kotus, M. – Pavlík, L. The Possibility of Increasing the Wearing Resistance of Mulcher Tools. *In Acta Technologica Agriculturae*, 2018.vol. 21, no. 2. pp. 94–100.
16. Tolnai, R. – Čičo, P. – Kováč, I. Impact strength of steels as a criterion of material resistance. *In Acta Technologica Agriculturae*. 2006.vol. 9, no. 1, pp. 17–19.

References

1. Aulin, V., Lyashuk, O., Tykhyi, A., Karpushyn, S. & Denysiuk, N. (2018). Influence of rheological properties of a soil layer adjacent to the working body cutting element on the mechanism of soil cultivation *Acta Technologica Agriculturae* 4 Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae. pp. 153-159. <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0028> [in English].
2. Aulin, V.V. & Tykhyi, A.A. (2017). *Tribofizichni osnovi pidvishennya znosostykosti i nadijnosti robochih organiv gruntoobrobnykh mashin z rizalnymi elementami: monografiya [Tribophysical bases of increasing wear resistance and reliability of working parts of soil cultivating machines with cutting elements, monograph]*. Kropivnickij: Vid. Lisenko V.F. [in Ukrainian].
3. Aulin, V.V. & Tikhii, A.A. (2016). Dinamika iznosa rezhushih elementov robochih organov pochvoobrabatyvayushih mashin pri vzaimodejstvii s pochvoj [Dynamics of wear of cutting elements of working parts of soil-cultivating machines while interacting with soil]. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol.18, 2*, 41-48 [in Russian].
4. Aulin, V.V. (2014). *Fizichni osnovi procesiv i staniv samoorganizaciyi v tribotekhnichnih sistemah: monografiya [Physical bases of processes and conditions of self-organization in tribo-technical systems: monograph]*. Kropyvnytskyi [in Ukrainian].
5. Aulin, V.V., Nastoyashii, V.A. & Tihii, A.A. (2014). Vibirkove znoshuvannya robochih organiv gruntoobrobnykh ta zemlerijnykh mashin yak vidobrazhennya stohastichnoyi prirodi yih vzayemodiyi z chastinkami gruntu [Selective wear of operating element of tillage and excavation machines as a reflection of the stochastic nature of their interaction with soil particles]. *Zb. nauk. prac Ukr. derzh. akademiyi zalozn. transportu - Collection of scientific works of Gov. academy of railway transport. Issue. 148*. pp.25-33 [in Ukrainian]
6. Aulin, V.V. & Tihii, A.A. (2013). Vplyv zmini stanu ta vlastivostej gruntu na znos robochih organiv, sho pracuyut na riznij glibini [Influence of change of soil condition and properties on wear of operating elements working at different depth]. *Problemy trybologii - Problems of tribology, 1*, 120-126 [in Ukrainian].
7. Aulin, V.V.(2012). Stan samoorganizatsii seredovyscha gruntu ta zakonimnosti znosu robochykh organiv gruntoobrobnykh mashyn. [State of self-organization of soil environment and patterns of wear of operating elements of tillage machines]. *Problemi tribologii – Problems of tribology, 1*, 114-119 [in Ukrainian].
8. Aulin, V.V. (2012). *Trybofizyczne obgruntuvannya zminy napruzhenno-deformovanoho stanu gruntu pid chas dii ROHM [Tribophysical justification for the change of the stress-strain state of the soil during the action of ROGM]. Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil'skohospodars'kykh mashyn: zahal'noderzh. mizhvid. nauk.-tehn. zb. – National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines, Vol.42*, 13-20 [in Ukrainian].
9. Aulin, V.V., Tykhyi, A.A. & Karpushyn, S.O. (2012). Samozahostriuvannya rizalnykh elementiv gruntoobrobnykh i zemlerijnykh mashyn v umovakh zmitsnennia yikh robochykh poverkhon [Self-sharpening of cutting elements of soil tillage and excavation machines in conditions of strengthening of their working surfaces]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho avtomobil'no-dorozhn'oho universytetu – Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University, Vol. 57*, 188-194 [in Ukrainian].
10. Mambetalyn, K.T. (2000) *Pochva i ee tainy [Soil and its secrets]*. K.T. Mambetalyn. Cheliabinsk [in Russian].
11. Kushnarev A.S., Kochev, V.Y. (1989). *Mekhaniko-tekhnologicheskiye osnovy obrabotky pochvy [Mechanical and technological bases of soil tillage]*. Kyev: Urozhai [in Russian].

12. Капов, S.P. & Mudarysov, S.H. (2005). Osnovnye pryntsypy postroyeniya modeli razrusheniya pochvennoi sredy [Basic principles of construction of model of destruction of soil environment]. *Traktory y selskokhoziaistvennyye mashyny- Tractors and agricultural machinery, Vol 6*, 30-32 [in Russian].
13. Huang, W. – Liu, D.Y. – Zhao, B.Y. – FENG, Y.B. – XIA, Y.C. (2014). Study on the rheological properties and constitutive model of shenzhen mucky soft soil. *In Journal of Engineering Science and Technology Review, vol. 7, no. 3*, pp. 55–61 [in English].
14. Teamrat, A.G., Dani, O.R. (2001). Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses. *In Soil Science Society of America Journal, vol. 65, no.3*, pp. 624–637. [in English].
15. Ľavodová, M. – Kalincová, D. – Kotus, M. – Pavlík, L. (2018) The Possibility of Increasing the Wearing Resistance of Mulcher Tools. *In Acta Technologica Agriculturae, vol. 21, no. 2*, pp. 94–100 [in English].
16. Tolnai, R. – Čičo, P. – Kováč, I. (2006) Impact strength of steels as a criterion of material resistance. *In Acta Technologica Agriculturae, vol. 9, no. 1*, pp. 17–19 [in English].

Viktor Aulin, Prof., DSc., **Andriy Tykhyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Karpushyn**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Dmytro Derevjnko, Prof., DSc.

Zhytomyr National Agroecological University, Zhytomyr, Ukraine

Improving the Energy Efficiency of Soil Cultivation by Reducing the Processes of its Sticking to the Surface of Operating Elements

The physical essence of the process of interaction of the system "operating element of a soil tilling machine – soil" in different conditions of its operation has been considered. It gives the opportunity to find out methods of reducing energy consumption during soil cultivation. The dependence of traction resistance of the operating elements of tillage machines on the conditions of their operation was revealed. It is determined that the process of sticking soil on the surfaces of operating elements is one of the reasons for the increase of traction resistance. The analysis of modern methods and techniques to reduce the amount of soil sticking on the working surfaces of the tillers was carried out. The nature of the adhesion of soil particles to the cutting elements and the surface of the working surfaces of the tillers is taken into account from the point of view of the study at the macro and micro levels.

To study the process of soil sticking, a serial Hardox 400 steel operating element, coated with Kocetal K300 and high molecular weight polyethylene and basalt fibre was selected.

The values of changes of soil sticking index on the working surface of the deep tillers from the speed of movement of the operating element of tilling machine and the applied coatings of different materials, and the statistical characteristics of the measurements were obtained. The nature of the dependence and the magnitude of the horizontal component of the force of traction resistance of the tiller on the speed of its movement, the absolute humidity of soil, the particle size of the loamy soil and on the depth of its cultivation were determined.

operating element of tilling machine, traction resistance, humidity, soil sticking, soil friction coefficient, hydrophobic coatings

Одержано (Received) 03.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 10.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

І.А. Велит, доц., канд. техн. наук, **Я.В. Неділько**, магістр, **Р.С. Дорохін**, магістр
Полтавська державна аграрна академія, м.Полтава, Україна
e-mail: velit_ira@ukr.net

Зернодробарки для малих свиновідгодівельних ферм

Проаналізовано використання зернодробарок для подрібнення зерна на свиновідгодівельних фермах, різноманіття напрямів вдосконалення агрегатів. На даний час ведеться удосконалення технічних характеристик зернодробарок для подрібнення кормового матеріалу. Запропонована конструктивно-технологічна схема зернодробарки ударної дії. Проаналізовано використання зернодробарок центробіжно-ударної дії в потоково-технологічних лініях приготування кормів.

мала свиновідгодівельна ферма, зернодробарка ударної дії, енергоекономічна, зерно

И.А. Велит, доц., канд. техн. наук, **Я.В. Недилько**, магистр, **Р.С. Дорохин**, магистр
Полтавская государственная аграрная академия, г. Полтава, Украина

Зернодробилки для небольших свинооткормочных ферм

Проаналізовано використання зернодробилок для измельчення зерна на свинооткормочних фермах, різноманіття напрямів удосконалення агрегатів. В настоящее время ведется совершенствование технических характеристик зернодробилок для измельчения кормового материала. Предлагается конструктивно-технологическая схема зернодробилки ударного действия. Проаналізовано використання зернодробилок центробіжно-ударного действия в поточно-технологических линиях приготовления кормов.

небольшая свинооткормочная ферма, зернодробилка ударного действия, энергоэкономична, зерно

Постановка проблеми. Для успішного функціонування малої свиновідгодівельної ферми потрібно забезпечити стійку кормову базу для тварин. Особливого значення на сучасному етапі розвитку тваринництва в країні набуває оснащення малих господарських формувань малогабаритними засобами механізації для приготування комбікормів з високими техніко-економічними і якісними показниками.

При використанні подрібненого зерна як корму тваринам, необхідно враховувати, що при високому ступені здрибнювання з наступними операціями транспортування, перевантаження і видачі в сухому вигляді здрибнена маса порошокить. У цьому випадкові збільшуються втрати дорогого корму, а пил негативно впливає на здоров'я тварин, особливо молодяку. Переподрібнення зерна веде до додаткових витрат електроенергії.

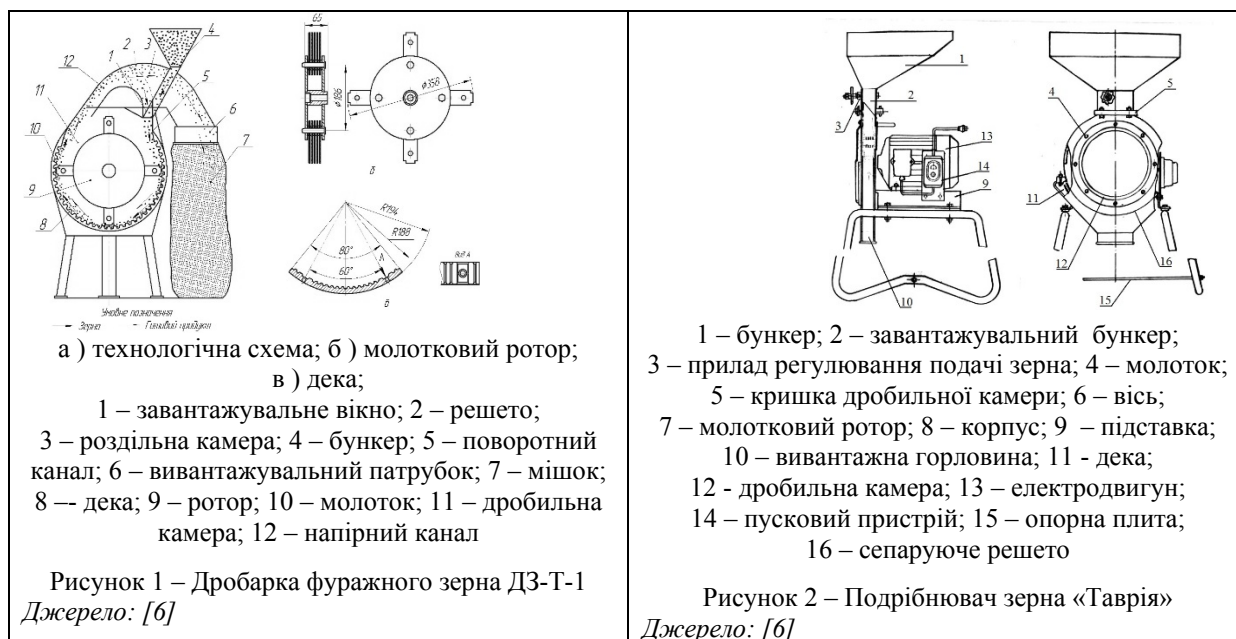
Аналіз актуальних досліджень і публікацій. Для вирощування свиней на м'ясо на малих свиновідгодівельних фермах необхідно використовувати обладнання, яке задовольняє за продуктивністю, за якістю роботи, універсальністю застосування.

Виробництво тваринницької продукції на малих господарствах в 50-60 роки гальмувалося через відсутність засобів механізації для цих ферм промислового виробництва. В період 80–90 роках створюється велика кількість машин для подрібнення і переробки кормів всіх видів господарств. В цей період була розроблена система машин для приватного сектору виробництва м'яса [1].

Огляд літературних даних свідчить про різноманіття напрямів вдосконалення зернодробарок, це свідчить що на даний час ведеться удосконалення технічних характеристик агрегатів для подрібнення кормового матеріалу [2,3,4].

Розроблені спеціальні зернопереробні машини: подрібнювач зерна молотковий «Таврія»; мікродробарка вальцеводекова з електроприводом МКД-Ф-1 та з вітроприводом МКДВ; молоткова дробарка ДЗ-Т-1; універсальні подрібнювачі: дробарка зерна і коренеплодів ДЗК-1; подрібнювач зерна і коренеплодів ИЗК-1; подрібнювач 5158; дробарка зерна і трави ДЗТ-1. З комбінованих машин розроблено та поставлено на виробництво машину сільського побуту МСБ-1; подрібнювач кормів АРС-Т-300, машину побутову Э-270. Машина МСБ-1 була однією з перших багатоопераційних машин, що випускалася промисловістю для задоволення всебічних потреб з переробки кормів в особистому підсобному господарстві. Машина може виконувати операції з подрібнення зерна, коренебульбоплодів, соломи і інших грубостеблових кормів, луценню зерен кукурудзи із початків, фугуванню площин пиломатеріалів, заточуванню інструменту [5]. Незважаючи на таку багатоопераційність, машина оснащувалася двигуном малої потужності – 0,6 кВт або 1,1 кВт. При цьому значна частина потужності втрачалася в механізмах передач і продуктивність машини, наприклад на подрібнення зерна, складала лише 10 кг/год. Подрібнювач АРС-Т-300 є удосконаленим варіантом МСБ-1 і виконує ті ж самі операції. Побутова машина Э-270 використовується для подрібнення основних видів кормів (зерна, коренебульбоплодів і стеблових матеріалів), а також може оснащуватися знімною пилкою-рубанком. Її продуктивність на зерні збільшена до 60 кг/год.

Технічні характеристики машин наведені в табл. 1. Зіставлення показників роботи дробарок з вимогами, пред'явленими до машин цього типу показує, що найбільш ефективними є дробарки ДЗ-Т-1 і «Таврія» (рис. 1, рис. 2).



Їх продуктивність, близька до необхідної (недостатня продуктивність у разі використання дробарок для подрібнення зерна на відгодівельних свинофермах потужністю 1000 голів у рік може бути компенсована збільшенням тривалості роботи машин на добу – для створення запасу корму).

Таблиця 1 – Технічні характеристики подрібнювачів зерна

Показники	ДЗ-Т-1	ЭЗД-Т-1 «Илек»	«Таврія»	МКД-Ф-1-2	МКД-Ф-1-1	МКДВ
Продуктивність, т/ч	40...100	40...60	70..130	60...100	35...60	6...50
Середній розмір частинок подрібноного продукту, мм	1,0...2,6	Не більше ніж 2,6	Не більше ніж 2,6	1,1...1,6	1,1...1,6	1,1...1,6
Вага, кг	45	23	50	26,8	20,8	120
Габарити, мм	620	470	575	435	420	4200
- довжина						
- ширина	450	300	560	280	280	6200
- висота	980	740	1125	475	525	3200
Місткість завантажувального бункера, дм ³	8	20	18	12	12	12
Електродвигун:	4АМАТ-802А	АОЛБ-22-2	АОЛБ-32-2	АОЛБ-32-4	«Бештау-ИМБ	-
- тип						
- потужність на валу, кВт	1,1	0,27	0,60	0,40	0,26	-
- потужність мережі, кВт	1,6	0,45...0,5	0,9...1,0	0,6	0,45	-
- частота обертання, хв. ⁻¹	2840	2890	2920	1440	1440	75...145 ^х
- напруга в мережі, В	220	220	220	220	220	-
- лінійна швидкість обертання по кінцях молотків, м/с	55	27,3	59,8	5,3	5,3	0,2...1,2
Якість отриманого продукту	кероване	некероване	кероване	часткове	регульоване	кероване
Кількість обслуговуючого персоналу, чол.	1	1	1	1	1	1

Примітка: х/ - швидкість обертання вітрового колеса під навантаженням.

Джерело: розроблено автором

Крім того, зазначені дробарки забезпечують регулювання крупності помелу, вони більш універсальні порівняно з іншими моделями.

Застосування решета з діаметрами отворів 4 мм у дробарці ДЗ-Т-1 забезпечує отримання найбільш дрібного помелу зерна, придатного для згодовування свинопоголів'я. Одним комплектом правильно загартованих молотків при використанні чотирьох робочих граней можна подрібнити не менше ніж 50 т зерна.

До інших переваг дробарки ДЗ-Т-1 можна віднести: стабільність процесу подрібнення різних видів зерна протягом тривалого періоду експлуатації; простоту конструкції та надійність у роботі. До недоліків дробарки ДЗ-Т-1 можна віднести використання конденсаторного електродвигуна, що не витримує перевантажень і тривалої безперервної роботи й потребує періодичних зупинень для охолодження.

У подрібнювача зерна «Таврія» регулювання крупності подрібнення зерна здійснюють зміною прохідного перерізу отворів сепаратора шляхом переміщення решіт відносно один одного. Якщо крупність подрібнення не відповідає необхідній, послаблюють розташовані на обичайці корпусу болти кріплення сепаруючих решіт і, трохи змістивши одне решето щодо іншого, затискають болти знову.

Повторивши пробне подрібнення зерна, приступають до роботи на подрібнювачі, якщо якість помелу буде задовольняти необхідну, або, виконавши зазначені вище дії, знову змінюють прохідний перетин отворів сепаратора, поки не буде досягнутий необхідний ступінь подрібнення зерна. Таке порівняно складне регулювання якості подрібнення є істотним недоліком «Таврії». Технічні характеристики подрібнювачів зерна приведені в табл. 1. Подрібнювач «Таврія» забезпечує надійність виконання процесу подрібнення всіх видів зерна протягом тривалого періоду експлуатації. [6]. Зернодробарки входять в склад інших агрегатів, що дає суттєву економію на транспортні витрати на доставку зерна, можливість приготування корму безпосередньо в місцях зберігання сировини або відгодівлі тварин, можливість надавати послуги з виробництва комбікормів у інших господарствах.

Зернодробарки невеликої потужності для фермерських господарств використовуються також і в країнах – Німеччині, Польщі, Болгарії й ін. В одних випадках вони входять до складу комбікормових агрегатів, як, наприклад, у Німеччині, де фірма «Awila» виготовляє гаму комбікормових агрегатів продуктивністю від 0,25 до 5 т/г. В інших випадках використовуються як самостійні машини в особистих підсобних господарствах і на малих фермах. Прикладом того може служити зернодробарка ФЧ-400 (Болгарія), яка при подрібненні зерна кукурудзи вологістю 10-15% забезпечує продуктивність на решеті з отворами діаметрів 4 мм – 250 кг/год., 6 мм – 400 кг/год. Маса дробарки (без привода) – 38 кг, потужність встановленого електродвигуна – 3 кВт. Німецька компанія «Neuero Farm- und Fördertechnik GmbH» виготовляє та удосконалює обладнання для українських сільгоспвиробників (рис.3).



Рисунок 3 – Молоткова дробарка зерна RVO 853

Джерело: [7]

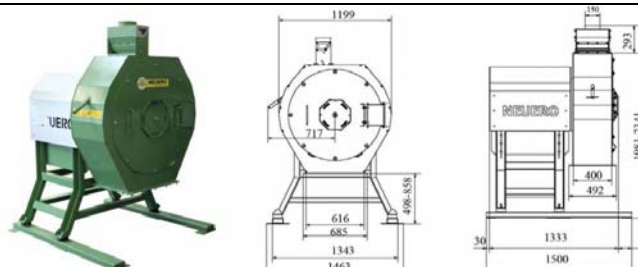


Рисунок 4. – Молоткова зернодробарка RVO 1045

Джерело: [7]

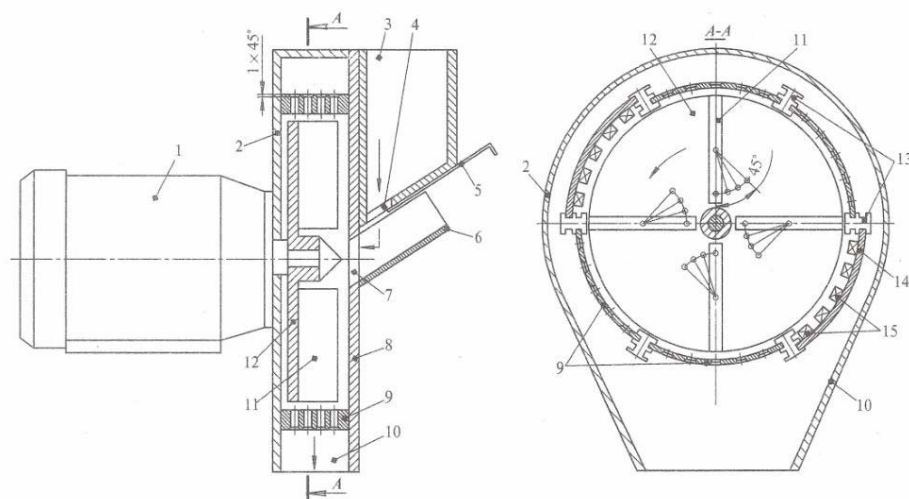
Фірма пропонує промислову дробарку RVO 853. Дана модель має потужність мотора 22 кВт і продуктивність більше 5 т / год. Дробарка дозволяє якісно подрібнювати не тільки зернові компоненти комбікорму і шроту, а й з успіхом подрібнює такі специфічні продукти як пелет з лущиння соняшнику, горох і інші продукти.

Молоткова зернодробарка RVO 1045 (рис.4) виготовляється в Німеччині, характеризуються простотою конструкції і надійністю. Відноситься до серії високопродуктивних дробарок зерна.

Дана дробарка характеризується низьким рівнем витрат електроенергії і високою продуктивністю. При потужності двигуна 45 кВт, продуктивність дробарки становить 11500 кг/год по пшениці. Це досягається завдяки великій площі сит.

Постановка завдання. Мета даної роботи полягає в тому, щоб обґрунтувати вибір обладнання в технології процесу приготування кормів на свиновідгодівельній фермі, обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри зернодробарки центробіжно-ударної дії.

Виклад основного матеріалу. На даний час набули широкого використання зернодробарки центробіжно-ударної дії. Така дробарка компактна, проста в використанні, енергоекономічна. Може використовуватись на малих свиновідгодівельних фермах. Робочі органи для подрібнення зерна є металеві молотки. Схема зернодробарки центробіжно-ударної дії показана на рисунку 5 [8].



1 – електродвигун, 2 – корпус, 3 – бітер, 4 – отвір, 5 – рухомий шибер, 6 – похилий жолоб, 7 – отвір, 8 – кришка, 9 – сито, 10 – розвантажувальний патрубок, 11 – плоскі молотки, 12 – ротор, 13 – фіксатор, 14 – плита, 15 – відбійні елементи

Рисунок 5 – Зернодробарка центробіжно-ударної дії

Джерело: розроблено автором

Відмінною особливістю зернодробарки є те, що подрібнення відбувається молотками, жорстко закріпленими на крильчатці ротора. Зерно отримує перші удари і відкидається до периферії в кільцеві канали дек, б'ючись об деки і решето. Таким чином, матеріал, піддається багаторазовим руйнуванням ударами молотків і за рахунок центробіжних сил при сталому процесі по всій внутрішній поверхні дробильної камери утворює обертовий шар. Під впливом активних робочих органів – молотків і пасивних – відбійних елементів, а також решета відбувається руйнування і подрібнення матеріалу. Готовий продукт виводиться з дробильної камери через решето.

Пропонована конструктивно-технологічна схема зернодробарки ударної дії має низку переваг перед існуючими конструкціями дробарок. Відбійні елементи, виконані

на плитах, дозволяють зменшити швидкість руху матеріалу, що подрібнюється за рахунок загальмування повітряно-продуктового шару в дробильній камері. Це досягається тим, що в кільцевих каналах за рахунок рифлення торцевих поверхонь плит спостерігається вихровий ефект, який змінює траєкторію руху частинок зі збільшенням осевої складової швидкості, зменшуючи окружну швидкість повітряно-продуктового шару, збільшуючи швидкість і кількість зіткнень молотків, що подрібнюють матеріалу. Жорстке закріплення молотків до ротора підвищує ефективність процесу дроблення і коефіцієнт корисної дії дробильної машини в цілому [36].

Для визначення енергоємності процесу подрібнення були проведені дослідження подрібнення зерна ячменя при середньому діаметрі зерна 2,6 мм, вологості 14%. Подача зерна в дробильну камеру здійснювалась при різних обертах вала ротора та при різних подачах матеріалу. Результати досліджень показані на рис. 6.

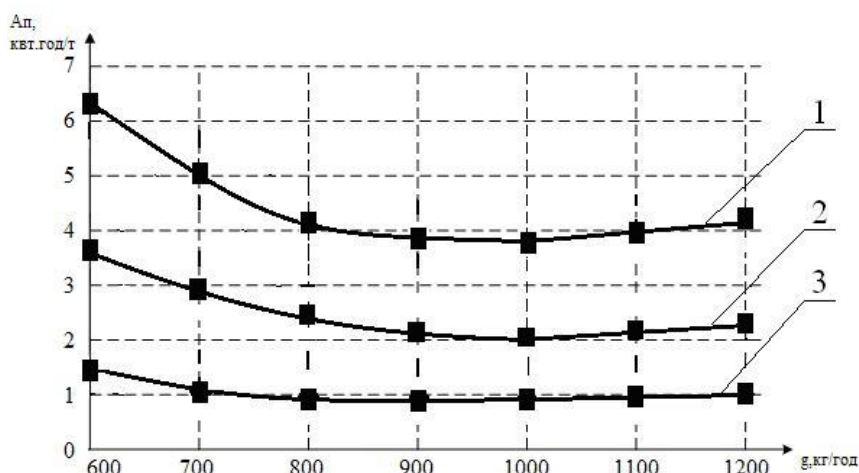


Рисунок 6 – Залежність питомої енергоємності (A_p) зернодробарки центробіжно-ударної дії від подачі зерна (q) для переробки при різних обертах вала ротора

Джерело: розроблено автором

Результати досліджень показали (рис.6), що найменша питома енергоємність зернодробарки центробіжно-ударної дії при подачі ячменю 800...1200 кг/год становить від 0,9 кВт· год/т при обертах вала ротору 1000 об / хв до 3,9 кВт тод / т при 2000 об / хв [37].

Аналіз залежностей питомої енергоємності від обертів вала ротора дробарки показав, що при режимі подрібнення (частота обертання вала ротора $n = 2000$ об/хв., подача зерна на подрібнення 800... 1200 кг / г од) модуль помелу склав $M = 1,8$ мм, питома енергоємність – $A_p = 3,80...4,20$ кВт·год / т. При частоті обертання вала ротору $n = 1500-1600$ об/хв модуль помелу становить $M = 2,7$ мм, збільшується, а питома енергоємності зменшується, $A_p = 2,0...2,7$ кВт·год/т, при цьому збільшується пилоподібна фракція (до 11%). При частоті обертання вала ротора ($n = 1000$ об / хв) відбувається подальше зменшення питомої енергоємності $A_p=0,84...0,93$ кВт·год/т, $M=2,64$ мм. Збільшується пилоподібна фракція (до 19%).

З отриманих результатів вибраний режим роботи зернодробарки центробіжно-ударної дії при частоті обертання вала ротора $n = 2000$ об / хв., подачі зерна на подрібнення 800... 1200 кг / год, питома енергоємність A_p дорівнює 4,2 кВт·год / т.

Висновки. Проведений аналіз параметрів зернодробарок за критеріями ресурсовитрат показав про недоцільність використання зернових подрібнювачів продуктивністю менше 300-400 кг/год. Аналізуючи хронологію напрямів розробки і випуску машин для подрібнення зерна в малих господарствах прослідковується

тенденція використання зернодробарок продуктивністю 700-1000 кг/год. Цьому сприяє процес укрупнення площ землі і розмірів тваринницьких ферм. Використання зернодробарок центробіжно-ударної дії в потоково-технологічних лініях приготування кормів дає можливість зменшити питому енергоємність до 4,2 кВт·год / т, отримувати крупність продукту згідно зоотехнічних вимог при модулі помелу $M = 1,8$ мм.

Список літератури

1. Сторожук Л.О. Історія розвитку в Україні техніки для переробки зернового корму в індивідуальних підсобних господарствах. *Історія науки і біографістика*. 2007. №1. С. 42–50.
2. Технологическое оборудование предприятий отрясли. (Зерноперерабатывающие предприятия) / А.Б. Деменский и др. Москва : ДеЛи принт. 2006. 816с.
3. Акименко А.В., Сундеев А.А., Воронин В.В. Совершенствование процесса измельчения фуражного зерна. *Хранение и переработка зерна*. 2011. №2. С.45 – 47.
4. Велит І.А., Бондаренко О.Д. Агрегат для площення зерна в потоково-технологічних лініях кормоприготувального відділення молочної ферми. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2018. Вип. 48. С.164-170.
5. Перминов В.Н., Лопатин Л.А., Баранов Н.Ф. Обзор конструкции дробилок фуражного зерна. Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики. Наука – Технология – Ресурсосбережение: материалы X й Международной научно-практической конф. «Сборник научных трудов посвященный 65-летию со дня образования инженерного факультета Вятской ГСХА. Киров: Вятская ГСХА. 2017. Вып.18. С.208–213.
6. Суржикова В.Г. Оборудования для малых ферм. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 1989. № 6. С.18.
7. Высокопроизводительные дробилки зерна. URL: <https://ua.all.biz/img/ua/catalog/3123342.png> (дата обращения: 19.09.2019)
8. Колобов М.Ю., Сахаров С.Е. Зернодробилки центробежно-ударного действия. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2012. №4. С.17-18.

Referencis

1. Storozhuk, L.O. (2007). Istoriya rozvytku v Ukrayini tekhniky dlya pererobky zernovoho kormu v indyvidualnykh pidsobnykh hospodarstvakh [History of development in Ukraine of techniques for processing grain feed in individual farms]. *Istoriya nauky i biohrafistyka – History of Science and Biographical Studies*. 1. 42–50 [in Ukrainian].
2. Hlebov, L.A., Demenskiy, A.B., Vedenev, V.F., Temyrov, M.M. & Ohurtsov, YU.M. (2006). *Tekhnologicheskoe oborudovanye predpriyatyy ottryasly. (Zernopererabatyvayushchye predpriyatyya) [The technological equipment of the enterprises has been shaken off. (Grain processing enterprises)]*. Moscow: DeLyprynt [in Russian].
3. Akymenko, A.V., Sundeev, A.A. & Voronyn, V.V. (2011). Sovershenstvovanye protsessy yzmelchenyya furazhnogo zerna [Improving the process of grinding fodder grain]. *Khraneniye y pererabotka zerna – Storage and processing of grain*. 2. 45 – 47 [in Russian].
4. Velyt, I.A. & Bondarenko, O.D. (2018). Ahrehat dlya plyushchennyya zerna v potokovo-tekhnolohichnykh liniyakh kormopryhotovalnoho viddilennyya molochnoyi fermy [A unit for grain flattening in the flow-technological lines of the dairy farm feed preparation department] *Zahalnodержavnyy mizhvidomchy y naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. Konstruyuvannya, vyrobnystvo ta ekspluatatsiya silskohospodarskykh mashyn – National interagency scientific and technical collection. Design, production and operation of agricultural machines*, 48, 164-170 [in Ukrainian].
5. Permynov, V.N., Lopatyn, L.A. & Baranov, N.F. (2017). Obzor konstruksyy drobylok furazhnogo zerna Uluchsheniye ekspluatatsyonnykh pokazateley selskokhozyaystvennoy énerhetyky. Materyaly X Mezhdunarodnoy nauchno-praktychnoy konferentsyy «*Nauka – Tekhnolohyya – Resursosberezheniye: Sbornyk nauchnykh trudovposvyashchennyy 65-letyusy dnya obrazovanyya inzhenernoho fakul'teta Vyat'skoy HSKHA*. Kyrov: Vyat'skaya HSKHA, Vol.18, 208–213 [in Russian].
6. Surzhykova, V.H. (1989). Oborudovanyya dlya malyykh ferm [Equipment for small farms] *Mekhanizatsyya y élektryfikatsyya selskoho khozyaystva – Mechanization and electrification of agriculture*. 6. 18 [in Russian].
7. Vysokoproizvoditel'nyye drobilki zerna. [High performance grain crushers]. Retrived from: <https://ua.all.biz/img/ua/catalog/3123342.png> [in Russian].

8. Kolobov, M.YU., Sakharov, S.E. (2012). Zernodrobilki tsentrobezhno – udarnogo deystviya (Zernodrobilki centrifugal - shock action). *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva – Mechanization and electrification of agriculture*, 4, 17-18 [in Russian].

Iryna Velit, assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yaroslav Nedilko**, Master student, **Roman Dorohin**, Master student
Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine

Crushers for Small Pig Farms

The purpose of this work is to substantiate the selection of equipment in the technology of the process of feed preparation on a small pig farm, using a centrifugal impact crusher.

For the successful operation of a small pig farm, it is necessary, first of all, to provide a stable feed for animals, a sufficient level of energy and protein nutrition, the use of diets, balancing on all the essential nutrients and biologically active elements. To facilitate the preparation of feed for feeding on pig farms and improve their assimilation by the body of animals use small-sized grinders of grain components, which satisfy the productivity, quality of work, versatility of use.

The working body of the crusher for grinding is a hammer. To it the grain falls under the action of its own mass by gravity. The size of the grinding is regulated by variable sieves. When using crushed grain as animal feed, it must be borne in mind that at a high degree of crushing with the subsequent operations of transportation, overloading and delivery in the dry form, the crushed mass will powder. In this case, the loss of expensive feed increases, and the dust adversely affects the health of animals, especially young animals. The article presents an overview of the literature data on the use of grain mills for grain grinding, the variety of directions for improving aggregates, which indicates that the technical characteristics of grain mills for grinding feed material are being improved. The analysis of the parameters of the grain mills by the criteria of resource consumption showed that the use of grain shredders with a productivity of less than 300-400 kg / h is inappropriate. Analyzing the chronology of the directions of development and production of machines for grinding grain in small farms the tendency of using grain mills with a productivity of 700-1000 kg / h is traced. This is facilitated by the process of land consolidation and the size of livestock farms. Grain crushers are part of other units, which gives significant savings on transportation costs for grain delivery, the ability to prepare feed directly in the storage of raw materials or fattening animals, the ability to provide feed production services in other farms

The proposed structural and technological scheme of the impact crusher has several advantages over existing crusher structures. The deflecting elements made on the plates, allow to reduce the speed of movement of the material, which is crushed by slowing the air-product layer in the crushing chamber. The rigid attachment of the hammers to the rotor increases the efficiency of the crushing process and the efficiency of the crushing machine as a whole.

The use of centrifugal-impact grain mills in feed processing lines allows to reduce the specific energy consumption up to 4.2 kW · h / t, to obtain the size of the product according to the zootechnical requirements with the milling module $M = 1.8$ mm.

small pig-breeding farm, impact crusher, energy-efficient, grain

Одержано (Received) 11.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 16.12.2019
Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

Ів.Б. Гевко, проф., д-р техн. наук, **В.З. Гудь**, канд. техн. наук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

e-mail: vic_g@ukr.net

Синтез гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів

При проведенні морфологічного синтезу визначено відповідну кількість складових елементів конструкцій конвеєрів та зв'язків між ними, які визначають їх певні конструктивні ознаки. На основні виконаного аналізу складено морфологічну матрицю з морфологічними ознаками елементів генерованих конструкцій гвинтових конвеєрів. Згенеровано значну кількість працездатних конструкцій гвинтових конвеєрів з окремими типами функціональних операцій чи призначенням. Також розроблено класифікацію гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів.

синтез, гвинтовий конвеєр, морфологічний аналіз

Ів.Б. Гевко, проф., д-р техн. наук, **В.З. Гудь**, канд. техн. наук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, г. Тернополь, Україна

Синтез винтових конвейєров с возможностями технологического преобразования и мобильного изменения траектории перегрузки материалов

При проведении морфологического синтеза определено соответствующее количество составляющих элементов конструкций конвейєров и связей между ними, которые определяют их определенные конструктивные признаки. На основе выполненного анализа составлено морфологическую матрицу с морфологическими признаками элементов генерируемых конструкций винтовых конвейєров. Создано значительное количество трудоспособных конструкций винтовых конвейєров с отдельными типами функциональных операций или назначений. Также разработана классификация винтовых конвейєров с возможностями технологического преобразования и мобильного изменения траектории перегрузки материалов.

синтез, винтовой конвейєр, морфологический анализ

Постановка проблеми. З допомогою гвинтових транспортно-технологічних механізмів здійснюють транспортування, змішування, збирання, сортування, витискання, подрібнення та інші функціональні операції. До них відносяться гвинтові транспортери, які з давньогрецьких часів є найпоширенішими механічними засобами транспортування. При перевантаженні матеріалів у гвинтових конвеєрах можна здійснювати одночасно з цим процесом такі операції, як змішування, подрібнення, сепарацію, калібрування, пресування і витискання. Ці питання на даний час поглиблено досліджуються й існує значна кількість невивчених моментів, пов'язаних з визначенням технологічних і функціонально-експлуатаційних характеристик зазначених процесів і конструкцій конвеєрів. Відтак проблема створення і ефективного вибору гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробці конструкцій, дослідженню процесів транспортування та виконання функціональних операцій гвинтовими конвеєрами, розрахунку і встановлення їх параметрів присвячені роботи Х. Германа [1], А.М. Григор'єва [2], Б.М. Гевка [4], Р.М. Рогатинського [8, 9] та багатьох інших.

Розробці методик та методів генерування та синтезу машинобудівних конструкцій присвячені праці А.І. Половінкіна [7], Ю.М. Кузнецова [3], В.М. Одріна [5] тощо. Проте розробка ефективних конструкцій гвинтових конвеєрів з можливістю виконання супутніх технологічних операцій на сьогодні широко досліджується і потребує подальшого пошуку.

Постановка завдання. Метою статті є проведення синтезу методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів.

Виклад основного матеріалу. Як було визначено в [4], на даний час виділяють 18 основних функціональних операцій, які реалізуються гвинтовими транспортно-технологічними механізмами, а також 7 основних функціональних операцій, що здійснюються гвинтовим конвеєром з розширеними технологічними можливостями, до яких відносять: повздовжнє транспортування, змішування, дозування, калібрування, нагнітання, пресування і подрібнення. З метою створення прогресивних конструкцій гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів проведено генерування ідей з використанням методу синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу [10].

У результаті проведеного аналізу впливу різних факторів на процеси технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів гвинтовими конвеєрами за використання структурно-схемного синтезу із застосуванням морфологічного аналізу було визначено відповідну кількість складових елементів конструкцій конвеєрів та зв'язків між ними, які визначають їх певні конструктивні ознаки. На основі виконаного аналізу складено морфологічну матрицю у вигляді таблиці 1, з морфологічними ознаками елементів генерованих конструкцій гвинтових конвеєрів та зв'язків між ними. До складу кожної морфологічної ознаки внесено альтернативи без критичного аналізу. Обрані наступні основні морфологічні ознаки: привід, шнек, який складається з жолоба та гвинтового робочого органа, механізм завантаження, механізм пересипу, механізм розвантаження та опорно-руховий механізм. Пружні, запобіжні та пружно-запобіжні муфти у якості ознак до морфологічної матриці не вносяться, бо вони автоматично входять в склад приводів до ознак 1.1 – 1.4, а вібраційні муфти до ознаки привода 1.5.

Класичну морфологічну модель конструктивних ознак та елементів гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів (табл. 1) можна представити у вигляді морфологічної матриці (1), що утворена шляхом числового позначення відповідних альтернатив розміщених у стовпцях морфологічної таблиці [5]:

$$N = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_j = \prod_{j=1}^n K_j, \quad (1)$$

де n – характеристика;

K_j – число альтернатив характеристики.

$$N_{ik} = \left| \begin{array}{c} 1.1 \\ 1.2, 2.13.1 \\ 1.3, 2.23.2 \\ 1.4, 2.33.3 \\ 1.5 \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2, 5.16.1 \\ 4.3, 5.26.2 \\ 4.3, 5.26.2 \\ 4.3, 5.26.2 \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 7.1 \\ 7.2 \\ 7.3 \\ 7.3 \\ 7.3 \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 8.4 \\ 8.5 \\ 8.6 \\ 8.6 \\ 8.7 \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 9.1 \\ 9.2 \\ 9.3 \\ 9.3 \\ 9.3 \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 11.1122 \\ 11.2123 \\ 11.3124 \\ 11.3124 \\ 11.3124 \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 13.1 \\ 13.2 \\ 13.2 \\ 13.2 \\ 13.2 \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 14.1151 \\ 14.2152 \\ 14.3153161 \\ 14.4154162 \\ 14.5155 \\ 14.6156 \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 17.1 \\ 17.2 \\ 17.3 \\ 17.4 \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 18.1 \\ 18.2 \\ 18.3 \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 19.1 \\ 19.2 \\ 19.3 \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 20.1 \\ 20.2 \end{array} \right| = 1,5 \cdot 10^{10}.$$

Таблиця 1 – Морфологічна таблиця конструктивних ознак та елементів гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів

1. Тип	Привід		Шнек				13. Можливість зміни довжини траси перевантаження	Механізм завантаження			17. Механізм пересипу	18. Механізм розвантаження	Опорно-руховий механізм						
	2. Вид руху	3. Кількість	Жолоб		Гвинтовий робочий орган			14. Підйом	15. Бункер	16. Насадка			19. Тип	20. Вид					
			Конструкція жолоба	Кількість	Конструкція гвинта	Кількість													
1.1. Електропривід	2.1. Безперебійний	3.1. Один	4.1. Суцільна	5.1. Циліндрична	6.1. Суцільна	7.1. Один	8.1. Бузкопосна	9.1. Безпальна	10.1. Суцільна	11.1. Один	12.1. Без елементів	13.1. Без можливості зміни довжини траси	14.1. 3 паралельним розташуванням до шнека	15.1. 3 регульованим завантаженням	16.1. 3 регульованим завантаженням	17.1. Немає	18.1. Один розвантажувальний отвір	19.1. Коші	20.1. Без можливості зміни опорної кути
1.2. Пневмо-привід	2.2. Циліндричний	3.2. Два	4.2. Факелна (зв'язуюча)	5.2. Факелна	6.2. Сегментна	7.2. Два	8.2. Шпорова	9.2. 3 валом	10.2. Сегментна	11.2. Двухвальна	12.2. 3 розрізачами	13.2. 3 довжини траси перевантаження	14.2. 3 перпендикулярним розташуванням до шнека	15.2. 3 регульованим завантаженням	16.2. 3 регульованим завантаженням	17.2. Графіт	18.2. Два розвантажувальні отвори	19.2. Коші	20.2. 3
1.3. Двигун	2.3. Двигун	3.3. Кілька	4.3. Низькошвидкісне, 3 швидкісний	5.3. Факелна	6.3. Факелна	7.3. Кілька	8.3. Гофрована	9.3. Частково безпальна	10.3. Частково безпальна	11.3. Кілька	12.3. 3 розрізачами	13.3. 3 довжини траси перевантаження	14.3. Одновальним до шнека	15.3. 3 регульованим завантаженням	16.3. 3 регульованим завантаженням	17.3. 3 різними способами	18.3. Деякі	19.3. Опорний	20.3. Шнек
1.4. Гідропривід	2.4. Гідропривід	3.4. Кілька	4.4. Ступінчастий	5.4. Факелна	6.4. Факелна	7.4. Кілька	8.4. Конусна	9.4. Частково безпальна	10.4. Частково безпальна	11.4. Кілька	12.4. 3 розрізачами	13.4. 3 довжини траси перевантаження	14.4. Одновальним до шнека	15.4. 3 регульованим завантаженням	16.4. 3 регульованим завантаженням	17.4. 3 різними способами	18.4. Деякі	19.4. Опорний	20.4. Шнек
1.5. Вібропривід	2.5. Вібропривід	3.5. Кілька	4.5. Ступінчастий	5.5. Факелна	6.5. Факелна	7.5. Кілька	8.5. Лопатевата	9.5. Частково безпальна	10.5. Частково безпальна	11.5. Кілька	12.5. 3 розрізачами	13.5. 3 довжини траси перевантаження	14.5. 3 розрізачами	15.5. 3 регульованим завантаженням	16.5. 3 регульованим завантаженням	17.5. 3 різними способами	18.5. Деякі	19.5. Опорний	20.5. Шнек

Джерело: розроблено автором

Кількість альтернатив конструкцій гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів, які отримані при використанні класичного морфологічного методу синтезу, є дуже велика. Відповідно відбір раціональних конструкцій таких конвеєрів експертною оцінкою шляхом перебору альтернативних варіантів є надто складним, тривалим і дорогим рішенням.

З метою підвищення ефективності генерованих альтернатив та скорочення їх кількості було використано метод синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу, який передбачає розбивку окремих груп на підгрупи. При застосуванні даного методу морфологічного аналізу кількість варіантів визначалася по формулі [10]:

$$N = \sum_{z=1}^l \sum_{x=1}^q \prod_{i=1}^m K_i, \quad (2)$$

де z – ієрархічний рівень;

l – кількість ієрархічних рівнів;

x – певна підгрупа відповідного ієрархічного рівня;

q – кількість підгруп відповідного ієрархічного рівня;

K_i – альтернатива конструктивної ознаки елемента певної підгрупи відповідного ієрархічного рівня;

m – кількість альтернатив конструктивної ознаки елементів певної підгрупи відповідного ієрархічного рівня.

Моделі механічної системи «Гвинтовий конвеєр з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів», згідно запропонованого групування, представлено на рис. 1.

Загальна кількість генерованих варіантів гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів при використанні методу синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу становитиме:

$$N_{\text{ік}} = \begin{array}{c} |1.1| \\ |1.2| \\ |1.3| \\ |1.4| \\ |1.5| \end{array} + \begin{array}{c} |2.1| \\ |2.2| \\ |2.3| \end{array} + \begin{array}{c} |3.1| \\ |3.2| \\ |3.3| \end{array} + \begin{array}{c} |4.1| \\ |4.2| \\ |4.3| \end{array} + \begin{array}{c} |5.1| \\ |5.2| \end{array} + \begin{array}{c} |6.1| \\ |6.2| \end{array} + \begin{array}{c} |7.1| \\ |7.2| \\ |7.3| \end{array} + \begin{array}{c} |8.1| \\ |8.2| \\ |8.3| \\ |8.4| \\ |8.5| \\ |8.6| \\ |8.7| \\ |8.8| \\ |8.9| \\ |8.10| \end{array} + \begin{array}{c} |9.1| \\ |9.2| \\ |9.3| \end{array} + \begin{array}{c} |10.1| \\ |10.2| \end{array} + \begin{array}{c} |11.1| \\ |11.2| \\ |11.3| \end{array} + \begin{array}{c} |12.1| \\ |12.2| \\ |12.3| \\ |12.4| \\ |12.5| \end{array} + \begin{array}{c} |13.1| \\ |13.2| \end{array} + \begin{array}{c} |14.1| \\ |14.2| \\ |14.3| \\ |14.4| \\ |14.5| \\ |14.6| \end{array} + \begin{array}{c} |15.1| \\ |15.2| \\ |15.3| \\ |15.4| \\ |15.5| \\ |15.6| \end{array} + \\ + \begin{array}{c} |16.1| \\ |16.2| \end{array} + \begin{array}{c} |17.1| \\ |17.2| \\ |17.3| \\ |17.4| \end{array} + \begin{array}{c} |18.1| \\ |18.2| \\ |18.3| \end{array} + \begin{array}{c} |19.1| \\ |19.2| \\ |19.3| \end{array} + \begin{array}{c} |20.1| \\ |20.2| \end{array} = 72$$

Це у $2,1 \cdot 10^8$ разів менше, ніж при використанні класичного методу синтезу, що дозволяє швидко здійснити перебір варіантів і відібрати найбільш раціональні конструкції гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів.

Проте, як було визначено в [9], існують 7 основних функціональних операцій, які виконуються гвинтовим конвеєром з розширеними технологічними можливостями, а саме повздовжнє транспортування, змішування, калібрування, дозування, нагнітання, пресування і подрібнення. Функціональні операції нагнітання та пресування, а також вичавлювання, здійснюються з допомогою аналогічних гвинтових конвеєрних засобів, а тому їх доцільно об'єднати, як і до операції калібрування додати операцію сепарування. Також для гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії слід додати ще 3 основні функціональні ознаки за призначенням: можливість зміни довжини траси перевантаження матеріалу, можливість зміни кута нахилу шнека при перевантаженні матеріалу та можливість одночасного забору з різних місць чи його перевантаження одночасного у різні місця.

$N_{ГК}$		$N_{ГК} = \sum_{z=1}^l \sum_{x=1}^q \prod_{i=1}^m K_i = 72.$
I(1) II(1) III(1) IV(1) V(1) VI(1) VII(1) VIII(1)		I(1)6 ₁ , I(1)6 ₂ II(1)7 ₁ , II(1)7 ₂ , II(1)7 ₃ III(1)9 ₁ , III(1)9 ₂ , III(1)9 ₃ IV(1)10 ₁ , IV(1)10 ₂ V(1)11 ₁ , V(1)11 ₂ , V(1)11 ₃ VI(1)12 ₁ , VI(1)12 ₂ , VI(1)12 ₃ , VI(1)12 ₄ , VI(1)12 ₅ , VI(1)12 ₆ VII(1)13 ₁ , VII(1)13 ₂ VIII(1)20 ₁ , VIII(1)20 ₂
I(2) II(2) III(2) IV(2) V(2) VI(2)		I(2)4 ₁ , I(2)4 ₂ II(2)5 ₁ , II(2)5 ₂ III(2)8 ₁ , III(2)8 ₂ , III(2)8 ₃ , III(2)8 ₄ , III(2)8 ₅ , III(2)8 ₆ , III(2)8 ₇ , IV(2)8 ₈ , IV(2)8 ₉ , IV(2)8 ₁₀ V(2)17 ₁ , V(2)17 ₂ , V(2)17 ₃ , V(2)17 ₄ VI(2)18 ₁ , VI(2)18 ₂ , VI(2)18 ₃
I(3) II(3) III(3) IV(3) V(3) VI(3) VII(3)		I(3)1 ₁ , I(3)1 ₂ , I(3)1 ₃ , I(3)1 ₄ , I(3)1 ₅ II(3)2 ₁ , II(3)2 ₂ , II(3)2 ₃ III(3)3 ₁ , III(3)3 ₂ , III(3)3 ₃ IV(3)14 ₁ , IV(3)14 ₂ , IV(3)14 ₃ , IV(3)14 ₄ , IV(3)14 ₅ , IV(3)14 ₆ V(3)15 ₁ , V(3)15 ₂ , V(3)15 ₃ , V(3)15 ₄ , V(3)15 ₅ VI(3)16 ₁ , VI(3)16 ₂ VII(3)19 ₁ , VII(3)19 ₂ , VII(3)19 ₃

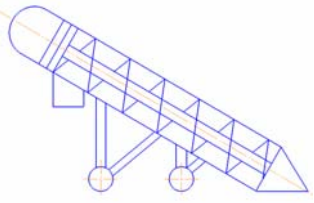
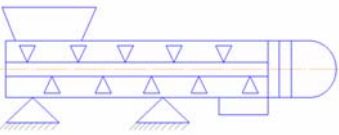
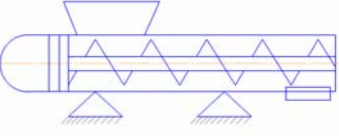
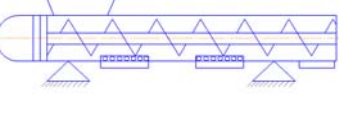
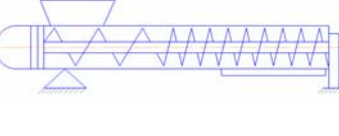
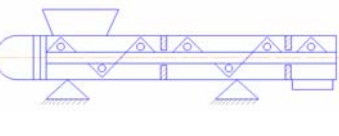
I - VIII – підгрупи ієрархічного рівня; (1) - (3) – відповідні ієрархічні рівні

Рисунок 1 – Модель механічної системи «Гвинтовий конвеєр з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів»

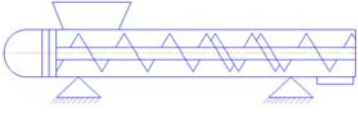
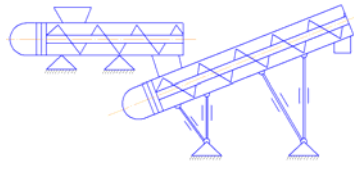
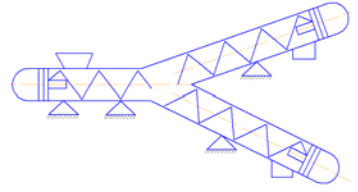
Джерело: розроблено автором

Відтак при генеруванні конструкцій гвинтових конвеєрів з конкретним функціональним призначенням чи їх поєднанням ми розділили конструктивні ознаки та елементи з морфологічної таблиці 1 у відповідності до кожного призначення (табл. 2).

Таблиця 2 – Відповідність конструктивних ознак та елементів основним функціональним операціям чи призначенням проєктованих гвинтових конвеєрів

№	Функціональні операції чи призначення	Приклади схем з конструктивними елементами	Кодовані конструктивні ознаки та елементи з табл. 1	Основні оптимізаційні параметри*
1	Повздожнє переміщення		1.1-1.4; 2.1; 3.1; 4.1; 5.1; 5.2; 6.1; 6.2; 7.1; 8.1; 8.2; 8.5; 8.9; 9.1-9.3; 10.1; 10.2; 11.1; 12.1; 13.1; 14.1-14.6; 15.1-15.6; 16.1; 16.2; 17.1-17.4; 18.1; 19.1-19.3; 20.1; 20.2	$Q \rightarrow \max;$ $C \rightarrow \min$
2	Змішування		1.1; 1.5; 2.1-2.3; 3.1; 3.2; 4.1; 4.2; 5.1; 5.2; 6.1; 6.2; 7.1; 7.2; 8.3; 8.6-8.8; 9.1-9.3; 10.1; 10.2; 11.1-11.3; 12.1-12.3; 13.1; 14.1-14.6; 15.1-15.6; 16.1; 16.2; 17.1-17.4; 18.1; 19.2; 19.3; 20.1; 20.2	$Q \rightarrow \max;$ $K_o \rightarrow \max;$ $C \rightarrow \min$
3	Дозування		1.1; 1.2; 1.4; 2.2; 3.1; 4.1; 5.1; 5.2; 6.1; 7.1; 8.1; 8.2; 9.2; 10.1; 11.1; 12.1; 13.1; 15.1; 15.2; 15.6; 17.1; 18.1; 19.3; 20.1	$dQ/dt \rightarrow \max;$ $Q \rightarrow \max;$ $C \rightarrow \min$
4	Калібрування, сепарування		1.1; 1.5; 2.1-2.3; 3.1; 3.2; 4.3; 5.1; 5.2; 6.1; 6.2; 7.1-7.3; 8.1; 8.2; 9.2; 10.1; 11.1; 12.1-12.3; 13.1; 14.1-14.6; 15.1-15.6; 16.1; 16.2; 17.1; 18.2; 18.3; 19.1-19.3; 20.1; 20.2	$P(d_i \leq d_1 \leq d_{i+1}) \rightarrow \max;$ $Q \rightarrow \max;$ $C \rightarrow \min$
5	Нагнітання, пресування, вичавлювання		1.1; 1.2; 1.4; 1.5; 2.1-2.3; 3.1; 3.2; 4.1-4.3; 5.1; 5.2; 6.1; 6.2; 7.1; 8.2-8.4; 8.8-8.10; 9.2; 9.3; 10.1; 10.2; 11.1-11.3; 12.1; 12.4; 12.5; 13.1; 14.1-14.6; 15.1-15.4; 15.6; 16.1; 16.2; 17.1; 18.1-18.3; 19.1-19.3; 20.1; 20.2	$P \rightarrow \max;$ $Q \rightarrow \max;$ $C \rightarrow \min$
6	Подрібнення		1.1-1.5; 2.1-2.3; 3.1; 3.2; 4.1-4.3; 5.1; 5.2; 6.1; 6.2; 7.1; 8.2; 8.4; 8.10; 9.2; 10.1; 10.2; 11.1; 12.1; 12.4; 12.5; 13.1; 15.1; 15.2; 15.6; 17.1; 18.1-18.3; 19.1-19.3; 20.1; 20.2	$Q \rightarrow \max;$ $K_r \rightarrow \max;$ $C \rightarrow \min$

Продовження таблиці 2

7	Зміна довжини траси		1.1-1.4; 2.1; 3.1; 4.1; 4.2; 5.1; 5.2; 6.2; 7.2; 7.3; 8.1; 8.2; 9.2; 10.2; 11.2; 11.3; 12.1; 13.2; 14.1-14.6; 15.1-15.6; 16.1; 16.2; 17.1; 18.1; 19.1-19.3; 20.1; 20.2	L → max; Q → max; C → min
8	Зміна кута нахилу перевантаження		1.1-1.4; 2.1; 3.1; 3.2; 4.1-4.3; 5.1; 5.2; 6.1; 6.2; 7.1-7.3; 8.1-8.10; 9.2; 9.3; 10.1; 10.2; 11.1-11.3; 12.1-12.5; 13.1; 14.1-14.6; 15.1-15.6; 16.1; 16.2; 17.1-17.4; 18.1; 19.1-19.3; 20.2	α → max; Q → max; C → min
9	Багатотрасове переміщення		1.1-1.4; 2.1; 3.1-3.3; 4.1; 5.1; 5.2; 6.1; 6.2; 7.2; 7.3; 8.1; 8.2; 8.5; 8.9; 9.1-9.3; 10.1; 10.2; 11.2; 11.3; 12.1; 13.1; 14.1-14.6; 15.1-15.6; 16.1; 16.2; 17.2-17.4; 18.1-18.3; 19.1-19.3; 20.1; 20.2	n → оптимум; Q → max; C → min

* Q – продуктивність; C – сукупні витрати; K_o – однорідність змішування; dQ/dt – точність; $P(d_i \leq d_{i+1})$ – належність до фракції; P – тиск; K_n – однорідність подрібнення; L – видовження шнека; α – кут нахилу шнека; n – кількість віток конвеєра

Джерело: розроблено автором

Провівши розрахунки ми визначили, що кількість варіантів гвинтових конвеєрів з окремими типами функціональних операцій чи призначенням значно різняться. Так, найбільше генерованих варіантів отримали конструкцій гвинтових конвеєрів, які можуть забезпечити зміну кута нахилу перевантаження вантажів – 63, а найменше – конструкцій гвинтових конвеєрів, з допомогою яких здійснюється лише дозування – 24. Тобто відхилення по кількості генерованих варіантів за призначенням становить 2,625 рази.

Слід відзначити, що окремі технологічні операції чи функціональні ознаки за призначенням, які притаманні гвинтовими конвеєрами з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії, можна об'єднувати. Це дозволить отримати багатофункціональні конструкції конвеєрів, наприклад: повздовжнє переміщення, змішування і дозування чи зміна довжини траси і сепарування тощо. Такі конструкції є значно універсальніші у порівнянні з традиційними і можуть в подальшому отримати широке застосування на практиці.

Використовуючи даний синтез було розроблено і досліджено значну кількість працездатних конструкцій гвинтових конвеєрів з окремими типами функціональних операцій чи призначенням, які у порівнянні з традиційними гвинтовими транспортерами є багатофункціональними і ефективними [6]. Також розроблено класифікацію гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів, яку представлено на рис.2.



Рисунок 2 – Класифікація гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів за конструктивними ознаками
 Джерело: розроблено автором

Висновки. Проведено структурний синтез гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів за конструктивними ознаками методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу й згенеровано певну кількість їх варіантів за 9 типами.

Також визначено, що окремі технологічні операції чи функціональні ознаки за призначенням, які притаманні гвинтовими конвеєрами з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії, можна об'єднувати в одній конструкції, що дозволить отримати багатофункціональні конструкції конвеєрів.

Розроблено класифікацію гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів за конструктивними ознаками.

Список літератури

1. Герман Х. Шнековые механизмы в технологии ФРГ. Перев. с нем. Л. : Химия, 1975. 230 с.
2. Григорьев А. М., Преображенський П. А. Гибкие шнеки. Киев: Знание, 1967. 98 с.
3. Кузнецов Ю. М., Скляр Р. А. Прогнозування розвитку технічних систем / під заг. ред. Ю. М. Кузнецова. Київ: ТОВ «ЗМОК». ПП «ГНОЗІС», 2004. 323 с.
4. Механізми з гвинтовими пристроями / Б.М. Гевко та ін. Львів: Світ, 1993. 208 с.
5. Одрин В. М., Картавов С.С. Морфологический анализ систем: Построение морфологических матриц. Киев: Наукова думка, 1977. 183 с.
6. Перспективні гвинтові конвеєри: конструкції, розрахунок, дослідження / Рогатинський Р. М та ін. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 212 с.
7. Половинкин А. И. Основы инженерного творчества: учеб. пособие для студентов вузов. Москва: Машиностроение, 1988. 368 с.
8. Рогатинський Р., Гевко І., Рогатинська Л. Оптимізація параметрів гвинтових транспортно-технологічних систем. Вісник ТНТУ. 2013. № 1 (69). С. 116–125.
9. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дячун А. Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів: монографія. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. 280 с.
10. Синтез телескопічних гвинтових конвеєрів / Ів. Б. Гевко, Гудь В. З., Шуст І. М., Мельничук А. Л. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. «Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві». 2016. Вип. № 168. С. 85-91.

References

1. Herman, K.H. (1975). *Shnekovye mekhanizmy v tekhnolohyy FRH [Screw mechanisms in the technology of Germany]*. L : Khymyya [in Russian].
2. Hryhor'ev, A. M. & Preobrazhens'kyi, P. A. (1967). *Hybkye shneky [Flexible augers]*. Kiev : Znanye [in Russian].
3. Kuznetsov, YU. M. (Eds.) (2004). *Prohnozuvannya rozvytku tekhnichnykh system [Forecasting the development of technical systems]*. Kyiv: TOV «ZMOK». – PP «HNOZIS» [in Ukrainian].
4. Hevko B.M. et al. (1993). *Mekhanizmy z hvyntovymy prystroyamy [Mechanisms with screw devices]*. L'viv : Svit [in Ukrainian].
5. Odryn, V.M. (1977). *Morfologicheskyy analiz system: Postroyeniye morfologicheskyykh matryts [Morphological analysis of systems: Construction of morphological matrices]*. Kyiv : Naukova dumka [in Russian].
6. Rohatyn's'kyi, R.M. et al. (2019). *Perspektyvni hvyntovi konveyery: konstruktsiyi, rozrakhunok [Prospective screw conveyors: designs, calculation, research]*. Ternopil': FOP Palyanytsya V. A. [in Ukrainian].
7. Polovynkyn A. Y. (1988). *Osnovy ynzhenernoho tvorchestva [Fundamentals of Engineering]* Moskow : Mashynostroeniye. [in Russian].
8. Rohatyn's'kyi, R., Hevko, I. & Rohatyn's'ka, L. (2013). Optymizatsiya parametriv hvyntovykh transportno-tekhnolohichnykh system [Optimization of parameters of screw transport and technological systems]. *Visnyk TNTU – Scientific journal of the TIMI, № 1 (69)*, 116–125 [in Ukrainian].
9. Rohatyn's'kyi, R.M., Hevko, I.B. & Dyachun, A.YE. (2014). *Naukovo-prykladni osnovy stvorennia hvyntovykh transportno-tekhnolohichnykh mekhanizmiv [Scientific-applied bases of creation of screw transport-technological mechanisms]*. Ternopil': TNTU imeni Ivana Puliuia [in Ukrainian].
10. Hevko, Iv. B., Hud', V. Z., Shust, I. M. & Mel'nychuk, A. L. (2016). Syntez teleskopichnykh hvyntovykh konveyeriv [The synthesis telescopic screw conveyors]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. «Resursozberihayuchi tekhnolohiyi, materialy ta obladnannya u remontnomu vyrobnytstvi» – Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Peter Vasylenko «Resource-saving technologies, materials and equipment in repair production», Vol.168, 85-91 [in Ukrainian].*

Ivan Hevko, Prof., Dsc., Viktor Hud, PhD., tech. sci.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Synthesis of Screw Conveyors with the Possibilities of Technological Transformation and Mobile Change of the Trajectory of Material Overload

The purpose of the article is to carry out the synthesis by the method of hierarchical grouping by means of morphological analysis of screw conveyors with the possibilities of technological transformation and mobile change of the trajectory of material overload.

The appropriate number of constituent elements of the conveyor structures and the relationships between them that determine their particular design features are determined. The basic analysis is based on a morphological matrix with the morphological features of the elements of the generated constructions of the screw conveyors and the connections between them. A considerable number of functional screw conveyor structures with separate types of functional operations or purpose, which are multifunctional and efficient compared to traditional screw conveyors, have been developed and investigated. The classification of screw conveyors with the possibility of technological transformation and mobile change of the trajectory of material overload is also developed.

Structural synthesis of screw conveyors with the possibilities of technological transformation and mobile change of the trajectory of material overload by structural hierarchical grouping was performed by means of morphological analysis and a certain number of their variants was generated according to 9 types.

It is also determined that individual technological operations or functional features, which are inherent in screw conveyors with the possibility of technological transformation and mobile trajectory change, can be combined into one design, which will allow to obtain multifunctional designs of conveyors.

synthesis, screw conveyor, morphological analysis

Одержано (Received) 17.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 19.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

УДК 631.362:665.335.5

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).34-43](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).34-43)**В.В. Дідур**, доц., канд. техн. наук,*Уманський національний університет садівництва, м. Умань, Україна***А.Б. Чебанов**, канд. техн. наук, **В.А. Дідур**, проф., д-р техн. наук., **О.П. Назарова**, доц., канд. техн. наук, **О.Л. Верещага**, інж.*Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь, Україна**e-mail: didurva@gmail.com*

Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів шнекового преса для віджимання мезги насіння рицини (на прикладі одного витка шнекового вала)

Конструктивно-технологічними параметрами, які впливають на кількість отриманої олії після пресування є вільний об'єм між пресуючими витками шнекового преса, температура в зерному просторі, величина зазору між зерними пластинами преса. Для проведення досліджень пресування мезги насіння використаний метод розгорнутого каналу. Максимальна кількість олії забезпечується при оптимальних конструктивно-технологічних параметрів розгорнутого каналу, знаходження яких потребує використання методики математичного планування експерименту. В якості прикладу, планування, подальше проведення та обробка експерименту, здійснено для одного пресуючого витка шнекового вала. На прикладі цього пресуючого витка будуть побудовані подальші дослідження для інших витків шнекових пресів.

насіння рицини, мезга, пресування, шнековий вал, розгорнутий канал, пресуючий виток, відносна маса олії

В.В. Дідур, доц., канд. техн. наук*Уманський національний університет садівництва, г. Умань, Україна***А.Б. Чебанов**, канд. техн. наук, **В.А. Дідур**, проф., д-р техн. наук., **О.П. Назарова**, доц., канд. техн. наук, **О.Л. Верещага**, інж.*Таврический государственный агротехнологический университет, г. Мелитополь, Украина*

Оптимизация конструктивно-технологических параметров шнекового преса для отжима мезги семян клещевины (на примере одного витка шнекового вала)

Конструктивно-технологическими параметрами, которые влияют на количество полученного масла после прессования являются свободный объем между прессующими витками шнекового преса, температура в зерном пространстве, величина зазора между зерными пластинами преса. Для проведения исследований прессования мезги семян использован метод развернутого канала. Максимальное количество масла обеспечивается при оптимальных конструктивно-технологических параметрах развернутого канала, нахождение которых требует использования методики математического планирования эксперимента. В качестве примера, планирование, дальнейшее проведение и обработка эксперимента, сделано для одного прессующего витка шнекового вала. На примере этого прессующего витка будут построены дальнейшие исследования для других витков шнековых пресов.

насіння рицини, мезга, пресування, шнековий вал, розгорнутий канал, пресуючий виток, відносна маса олії

Постановка проблеми. Олійні культури мають важливе народногосподарське значення, оскільки є джерелом отримання цінних продовольчих і технічних продуктів. Серед олійних культур важливе місце на півдні України займає рицина, основний продукт переробки якої є касторова олія, яка використовується в хімічній,

електротехнічній, медичній, авіаційній та інших галузях промисловості [1-3]. Слід зазначити, що касторова олія може використовуватися для виготовлення біопалива [4-7]. Якість і кількість готової продукції при переробці рицини в значній мірі залежить від прийнятої технології. В технології переробки рицини важливе місце посідає операція віджимання олії шляхом пресування мезги.

Одним із важливих факторів, що впливає на глибину пресування мезги є тиск, що розвивається в зері при роботі пресу. Цей тиск створюється постійним напором площин шнекових витків і опором матеріалу (мезги), що пресується. Причому, збільшення тиску за довжиною шнекового валу в сучасних конструкціях пресів здійснюється за рахунок зменшення вільного об'єму між шнековими витками. Характер зміни вільного об'єму витків за довжиною шнекового валу характеризує обґрунтованість його конструкції і розмірів витків та зерного барабану. В. А. Масліковим [8] для кожного пресуючого витка існуючих шнекових пресів розраховано ступінь стиснення, що показує відношення першопочаткового вільного об'єму каналу пресу до вільного об'єму між наступним шнековим витком, та виведено закономірність змінення вільного об'єму витків. Тобто, між вільним об'ємом витків та його порядковим номером є математична залежність. Отримана залежність дозволяє розрахувати, скільки витків повинно бути на шнековому валу для створення визначеного ступеню стиснення або знайти вільний об'єм кожного витка на шнековому валу. Але, автор [8] тільки констатує закономірність змінення вільного об'єму витків для конкретного типу шнекового пресу (тип преса ФП), що не дає можливості оцінити вихід олії та кінцеву олійність жмиху при зміні конструктивних параметрів (вільний об'єм між шнековими витками) окремих шнекових витків та матеріалу, що пресується. У зв'язку з цим, постає актуальна проблема оптимізації конструктивних параметрів шнекового преса шляхом зміни вільного об'єму окремо для кожного пресуючого витка та виведення математичної закономірності, яка надасть можливість розрахувати конструктивно-технологічні параметри пресу будь-якої продуктивності з найбільшим виходом олії із насіння рицини.

Окрім тиску, що розвивається в зері, на глибину віджиму олії впливає температура самого процесу пресування та величина зазору між зерними пластинами. На холодному, не розігрітому пресі не можливо забезпечити формування міцної жмихової ракушки і необхідну глибину віджиму. Висока температура в зерному просторі під час віджиму олії визиває підгоряння поверхні жмиху, що сприяє денатурації білків та підвищенню його олійності, а відповідно, і зменшенню продуктивності. Величина зазору між зерними пластинами повинна забезпечити витікання віджатої олії та не пропускати частинок мезги.

Але, максимальна кількість олії з насіння рицини буде забезпечуватися тільки при оптимальних значеннях конструктивно-технологічних параметрах пресування мезги насіння рицини. Для визначення таких значень, виникає актуальне завдання щодо використання методики математичного планування експерименту при проведенні досліджень.

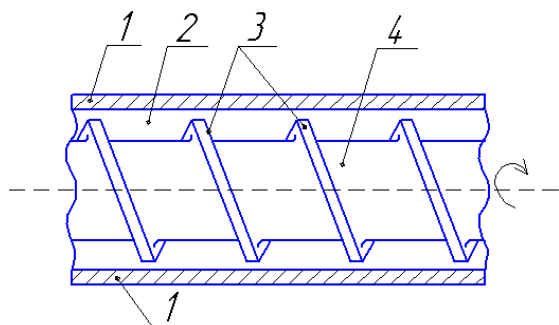
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним завданням планування експерименту є знаходження статистичної математичної моделі об'єкту дослідження у вигляді полінома (рівняння регресії). Загальний хід побудови і подальшого дослідження математичної моделі встановлено вченими такими як Бондарь А.Г [9], Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рошин П.М [10] та зводиться до наступного:

- попереднього дослідження об'єкту;
- вибору критеріїв оптимізації, впливовості чинників;
- побудови статистичної математичної моделі та оцінки її адекватності і відтворюваності;

- використання моделі для оптимізації досліджуваного процесу.

Постановка завдання. Підвищення ефективності процесу віджимання олії із насіння рицини шляхом проведення оптимізації конструктивно-технологічних параметрів шнекового пресу.

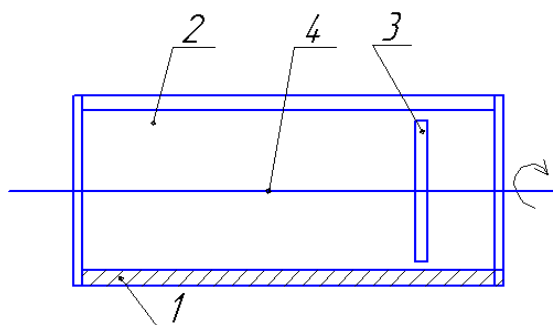
Методика експериментальних досліджень. Дослідження одного пресуючого витка на шнековому пресі викликає деякі труднощі. Окрім цього, конструктивна зміна вільного простору між пресуючими витками призводить до значних матеріальних витрат, так як для проведення досліджень необхідна велика кількість шнекових пресів з різними конструктивними параметрами. Такі дослідження можна провести, застосувавши метод розгорнутого каналу, що надасть можливість змінювати конструктивні параметри шнекових пресів різних конструкцій в широких межах на одній експериментальній установці. Сутність методу полягає у наступному. Розгорнемо шнековий прес (рис. 1) на площину, замінивши відповідно хід мезги у гвинтовому каналі на хід у прямокутному каналі з рухомою бічною стінкою. Таким чином, кільцевий проміжок 2 між окремими двома пресуючими витками 3 шнека 4 (рис. 1) відображає повністю весь канал преса прямокутної форми 2 в розгорнутому вигляді (рис. 2). Пресуючий виток шнекового преса 3 (рис. 1) в розгорнутому вигляді відображає рухливу бічну стінку у вигляді поршня 3 (рис. 2). Зеерний циліндр 1 шнекового преса (рис. 1) в розгорнутому вигляді замінений зеерною планкою 1, що знаходиться знизу прямокутника (рис. 2). Таким чином, за допомогою такого розгорнутого каналу можна досліджувати окремо пресуючі витки шнекових пресів.



1 – зеерний циліндр; 2 – кільцевий проміжок;
3 – пресуючі витки шнеку; 4 – шнек

Рисунок 1 – Схема шнекового пресу

Джерело: розроблено авторами



1 – зеерна планка; 2 – канал пресу;
3 – поршень; 4 – вал

Рисунок 2 – Розгорнутий вигляд шнекового пресу прямокутної форми

Джерело: розроблено авторами

Показниками ефективності при віджиманні мезги насіння рицини в такому розгорнутому каналі будуть відносна маса олії і відносна маса фузи, які можна представити у вигляді наступних критеріїв:

$$\mu = \frac{m_o}{m_{зад}} \rightarrow \max ; \quad (1)$$

$$\eta = \frac{m_\phi}{m_{зад}} \rightarrow \min , \quad (2)$$

де μ – відносна маси олії;

η – відносна маси фузи;

m_o – маса олії після пресування мезги у розгорненому каналі, гр.;

$m_{зад}$ – маса мезги перед пресуванням, гр.;

m_ϕ – маса фузи після пресування мезги в розгорнутому каналі, гр.

Аналізуючи залежності (1) та (2), приходимо до висновку, що при віджиманні мезги насіння рицини необхідно отримати максимальну відносну масу олії та мінімальну відносну масу фузи. Але, в процесі досліджень може виникнути протилежна ситуація: буде отримано мінімальну відносну масу фузи при мінімальній відносній масі олії. Тобто, збільшиться олійність вихідного шроту, що є не припустимим. Тому, в дослідженнях приймаємо критерій (1), як основний, а критерій (2) як додатковий. Таким чином, при забезпеченні максимальної відносної маси олії бажано, щоб відносна маса фузи була мінімальною.

Конструкції різних шнекових пресів, що використовуються в промисловості, сильно відрізняються один від одного. Але, основний конструктивний параметр, який характеризує всі типи пресів – це вільний об'єм між окремими пресуючими витками та зерним циліндром (рис.1), який постійно зменшується від першого до останнього пресуючого витка, так як зменшуються кільцевий проміжок 2 (рис. 1) за рахунок збільшення діаметру самого шнеку або зменшення діаметру зерного циліндру 1. Для того, щоб визначити оптимальний вільний об'єм у кожному витку шнекового вала при пресуванні мезги насіння рицини не прив'язуючись до конкретного типу шнекового пресу, при дослідженнях необхідно ввести відносні величини, через які можна вийти на потрібні конструктивні розміри шнекового пресу. Такою відносною величиною є ступінь стиснення мезги на кожному пресуючому витку, яка визначається за формулою

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_n}, \quad (5)$$

де V_1 – першопочатковий об'єм матеріалу, що досліджується см^3 ;

V_n – кінцевий об'єм матеріалу, що обумовлений визначеним тиском см^3 .

Величина V_1 характеризує вільний об'єм зерної камери на першому пресуючому витку. Величина V_n характеризує вільний об'єм зерної камери у наступних пресуючих витках. Відповідно, при встановлених розмірах (довжини, ширини та висоти) експериментального розгорнутого каналу величина $V_1 = \text{const}$. Для забезпечення необхідного ступеня стиснення, змінюється величина V_n шляхом зміни ходу поршня 3 (рис.2), який зменшує довжину розгорнутого каналу при незмінній ширині та висоті каналу.

На процес пресування мезги окрім ступеню стиснення мезги впливають температура мезги всередині каналу та зазор в зерних пластинах розгорнутого каналу. Зазор в зерних пластинах змінюється встановленням пластин з іншим зазором. Температура всередині каналу забезпечується додатковим підігріванням ТЕНОм, що встановлюється зверху каналу. Змінення температури буде забезпечено за допомогою зміни потужності ТЕНу, що буде реалізовуватися підключенням в електричне коло ТЕНу додаткового приладу ЛАТРа. Контроль температури забезпечується за допомогою термореле.

Максимальна відносна маса олії забезпечується при оптимальному співвідношенні конструктивних параметрів розгорнутого каналу (рис.2) між собою (ступінь стиснення, температура каналу та зазор в зерних пластинах), що неможливо при розрізненому вивченні їх впливу. У зв'язку з цим, виникає необхідність у використанні методики математичного планування експерименту.

В якості прикладу, планування, подальше проведення та обробка експерименту, здійснено для третього пресуючого витка шнекового вала. На прикладі цього пресуючого витка побудуємо подальші дослідження для інших витків шнекових пресів

Порядок проведення дослідів був наступним. Для трифакторного експерименту згідно стандартної матриці [11] на експериментальному розгорнутому каналі фіксували одне із значень факторів на нижньому або верхньому рівні (табл.1). Потім, попередньо підготовлену мезгу після проведеної волого-теплової обробки [12] поміщали до розгорнутого каналу з постійно однаковою масою та здійснювалося її пресування. За одержаними даними після пресування мезги визначали критерій оптимізації – відносну кількість олії.

При кодуванні факторів використовувалася наступна формула:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta_i}, \quad (3)$$

де x_i – кодоване значення фактору;

X_i - значення фактору на i - рівні;

X_{i0} – значення фактору на нульовому рівні;

Δ_i – інтервал варіювання.

Кожний фактор варіюється на верхньому (+) та нижньому (-) рівнях.

Для визначення ступеню впливу факторів на критерій оцінки необхідно шляхом експериментальних досліджень встановити залежність між ними, що досягається шляхом апроксимації. Найбільш точним методом апроксимації є метод поліноміального опису процесу за допомогою рівняння регресії, яке в загальному випадку має вигляд:

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_3 + b_3x_4 + b_{12}x_1x_3 + b_{13}x_1x_4 + b_{23}x_3x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_3^2 + b_{33}x_4^2, \quad (4)$$

де b_i - коефіцієнт регресії i -го фактора.

Значення факторів, наведених в таблиці 1 кодували і, згідно з відомими методиками, знаходили коефіцієнти регресії b_i , які і визначають ступінь впливу зазначених факторів на критерій оптимізації $y(\mu)$.

Таблиця 1 – Результати кодування факторів

Фактор	Кодоване позначення	Інтервал варіювання	Рівні варіювання					
			Натуральні			Кодовані		
			Верхні	Нульові	Нижні	Верхні	Нульові	Нижні
Значення ступеню стиснення, ε	x_1	\pm	2,09	1,94	1,79	1	0	-1
Зазор в зерних планках δ , мм	x_2	\pm	1,50	1,25	1,00	1	0	-1
Температура каналу, t , °C	x_3	\pm	105,00	90,00	75,00	1	0	-1

Джерело: розроблено авторами

Перевірку відтворюваності дослідів здійснювали за критерієм Кохрена. Умова відтворюваності має вигляд

$$G^P = \frac{S_{U \max}^2}{\sum S_U^2} \leq G(0,05; n; f_u), \quad (5)$$

де $G(0,05; n; f_u)$ - табличне значення критерію Кохрена;

$S_{U_{\max}}^2$ - найбільша із дисперсій;

0,05 - означає 5%-й рівень значимості;

n - число незалежних оцінок дисперсій (кількість дослідів);

$f_u = m_0 - 1$ - число ступенів вільності;

m_0 - число повторностей.

Дисперсії результатів дослідів розраховували за виразом:

$$S_u^2 = \frac{1}{m_0 - 1} \cdot \sum_{i=1}^{m_0} (Y_{Ui} - \bar{Y}_U)^2, \quad (6)$$

де i - номер повторності;

Y_{Ui} - значення вихідного параметру в i -й повторності;

\bar{Y}_U - середнє значення вихідного параметру у U -му досліді.

Дисперсію відтворюваності (помилку дослідів) визначали як середнє арифметичне значення дисперсій, що спостерігалася у всіх дослідях:

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n S_u^2, \quad (7)$$

Коефіцієнти математичної моделі визначали за формулами

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{U=1}^n \bar{Y}_U; \quad b_i = \frac{1}{n} \sum_{U=1}^n (x_{iU} \cdot \bar{Y}_U); \quad b_i = \frac{1}{n} \sum_{U=1}^n (x_{iU} \cdot x_{jU} \cdot \bar{Y}_U), \quad (8)$$

де x_{iU} - значення i -го кодового фактора в рядку матриці в U -му досліді;

x_{jU} - значення j -го кодового фактора в рядку матриці в U -му досліді.

Адекватність статистичної математичної моделі перевіряли за допомогою критерію Фішера (F -критерію). При умові адекватності моделі її можна використовувати при наступних дослідженнях.

Адекватність має місце, якщо

$$F^P = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} < F(0,05; f_{ad}; f_y), \quad (9)$$

де F^P - розрахункове значення коефіцієнту Фішера;

$F(0,05; f_{ad}; f_y)$ - табличне значення коефіцієнту Фішера для 5%-го рівня значимості;

f_{ad} - число ступенів вільності дисперсії адекватності;

f_y - число ступенів вільності дисперсії відтворення;

S_{ad}^2 - дисперсія адекватності;

S_y^2 - дисперсія відтворюваності дослідів.

Число ступенів вільності дисперсії адекватності визначається за рівнянням

$$f_{ad} = n - k - 1, \quad (10)$$

де k - кількість факторів

Число ступенів вільності дисперсії відтворення розраховується як

$$f_y = n(m_0 - 1), \quad (11)$$

Дисперсія S_{ad}^2 обчислюється за формулою

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{n-k-1} \cdot \sum_{U=1}^n (Y_{Ui} - \bar{Y}_U)^2, \quad (12)$$

де Y_{Ui} – розрахункове значення відгуку в i -му досліді, яке визначається шляхом підстановки знайдених коефіцієнтів до лінійної частини обраного поліному.

Встановлення значимості коефіцієнтів регресії проводили за критерієм Стьюдента. Коефіцієнт вважався значущим, якщо виконувалася умова:

$$|b_a| \geq \Delta b_a, \quad (13)$$

де $|b_a|$ – розраховані коефіцієнти поліному;

Δb_a – довірча границя

Довірчу границю визначали за рівнянням

$$\Delta b_a = t(0,05; f_y) \cdot \sqrt{\frac{S_y^2}{n}}, \quad (14)$$

де $t(0,05; f_y)$ – коефіцієнт Стьюдента при 5%-му рівні значущості та числі ступенів вільності дисперсії відтворюваності, яке обирали за таблицями.

Коефіцієнт регресії визнавали статистично значимим величині довірчого інтервалу, якщо його абсолютне значення дорівнювало або перевищувало його. Якщо виконувалась нерівність $|b_i| < \Delta b_a$, відповідний фактор аналізували щодо вибору іншого інтервалу варіювання, якщо це можливо. При цьому всі необхідні досліді повторювали і, якщо після аналізу відповідний коефіцієнт знову відповідав попередній умові, робили висновок про значущість впливу фактора x_i на критерій Y_i (масу олії).

Результати досліджень. Визначаються дисперсії відтворюваності за критерієм Кохрена $G_p=0,028 < G_m=0,5157$ ($\alpha = 0,05; 1,8$), що вказує: відтворюваність дослідів добра.

За критерієм Стьюдента визначаються коефіцієнти поліноміальної регресії. Для кожного коефіцієнту регресії з урахуванням середньоквадратичного відхилення визначаються розрахункові значення критерія Стьюдента [9]. Порівнюються теоретичне та табличне значення за критерієм Стьюдента.

В результаті розрахунків отримані моделі другого порядку для розрахунку відносної маси олії при віджиманні з насіння ріцини в розгорнутому каналі від конструктивних факторів:

$$y = 5,3084 - 5,622x_1 - 0,0382x_2 + 0,001x_3 + 1,733x_1x_2 - 0,0007x_1x_3 + 0,00148x_2x_3 + 0,916x_1^2 - 1,52x_2^2 - 0,000001x_3^2. \quad (15)$$

Аналіз моделі другого порядку (15) показує, що вплив факторів на відносну масу олії різний.

Для визначення адекватності моделі, порівняно критичне та розрахункове значення критерію Фішера. Перевірка показала адекватність рівняння регресії (15) $F_p = 1,73 < F_m = 3,11$. Отримана нелінійна модель адекватна та може використана при побудові області оптимуму.

Розкодована модель має вигляд:

$$Y(\mu) = 0,0206\alpha^2 - 0,095\delta^2 - 0,0000026t^2 + 0,065\alpha \cdot \delta + 0,00148t \cdot \delta - 0,00155\alpha \cdot t + 0,00525\alpha - 0,0382\delta + 0,00217t + 0,000184, \quad (16)$$

На основі вирішених систем рівнянь з приватними похідними, отримані точки оптимуму.

Розкодований центр оптимуму має наступні значення: значення ступеню стиснення $\varepsilon = 2,09$; зазор в зерних планках $\delta = 1,2$ мм; температура каналу, $t = 104$ °С.

Відповідно, оптимальне значення ступеня стиснення на третьому витку шнекового вала повинно бути $\varepsilon = 2,09$. Для забезпечення цієї величини ступеню стиснення, зазор в зерних планках повинен складати $\delta = 1,22$ мм, а температура каналу $t = 104$ °С. При цих значеннях, відносна маса олії складає $\mu = 0,125$.

Рівняння регресії при першому фіксованому факторі ($\alpha = 2,09$) має вигляд:

$$Y(m) = -0,095\delta^2 - 0,0000026t^2 + 0,09765\delta + 0,00148t \cdot \delta - 0,0010695t + 0,09765\delta + 0,10114, \quad (17)$$

Наведені данні демонструються на рис. 3, де представлено поверхню відгуку (а) і лінії рівнів (б) рівняння регресії (17) при першому фіксованому факторі ($\varepsilon = 2,09$) представлені на рис. 3.

Як бачимо, на рис. 3а при оптимальних параметрах температура каналу ($t = 104$ °С) та зазору в зерних планках ($\delta = 1,22$ мм), відносна маса олії досягає максимального значення ($\mu = 0,125$) та показано найбільш темним кольором. Це ж саме і демонструє рис. 3б (показано темним коліром), на якому відображено чисельні значення відносної маси олії.

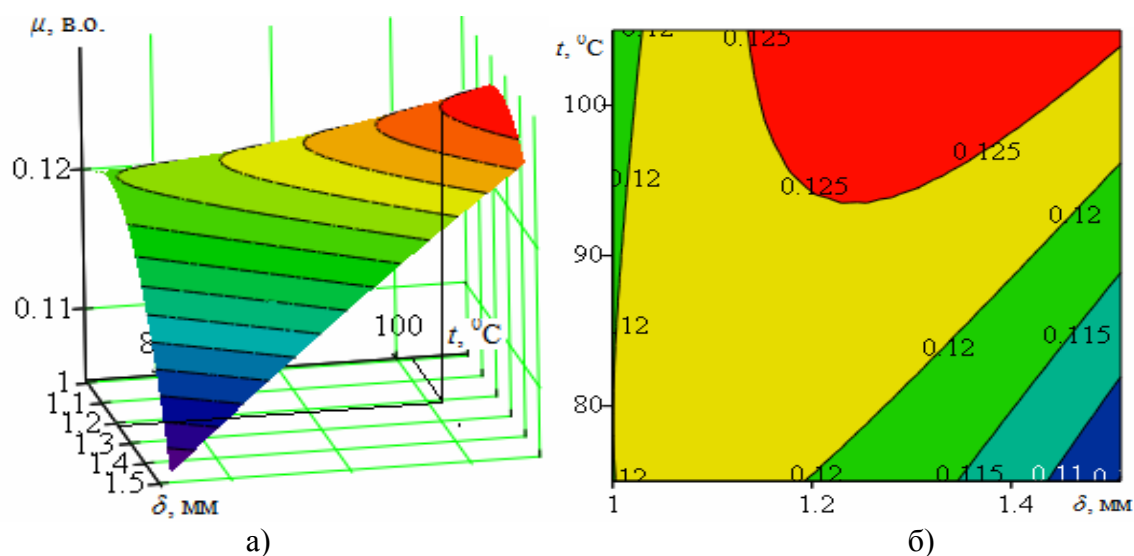


Рисунок 3 – Поверхня відгуку (а) і лінії рівнів (б) функції відгуку (при $\alpha = 2,09$)

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Розроблена методика оптимізації конструктивно-технологічних параметрів шнекового преса шляхом використання розгорнутого каналу, що дозволить при наявності аналогічних показників по інших витках встановити загальний характер зміни ступеню стиснення за довжиною шнекового вала

В результаті виконаного повнофакторного експерименту для процесу віджиму олії із мезги насіння рицини на одному витку шнекового вала визначено наступні оптимальні параметри для віджимання олії з олійної сировини: ступінь стиснення $\varepsilon = 2,09$; зазор в зерних планках $\delta = 1,22$ мм; температура каналу, $t = 104$ °С.

Список літератури

1. Barnes D. J., Baldwin B. S., Braasch D. A. Degradation of ricin in castor seed meal by temperature and chemical treatment. *Industrial Crops and Products*. 2009. Vol. 29, № 2-3. P. 509-515. DOI: 10.1016/j.indcrop.2008.09.006.
2. Mutlu H., Meier M. A. Castor oil as a renewable resource for the chemical industry. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2010. Vol. 112, № 1. P. 10-30. DOI:10.1002/ejlt.2009.00.138.
3. Malajowicz J., Kusmirek S. Characteristics and possibilities of industrial use of castor oil. *Przemysl Chemiczny*. 2016. Vol. 95, № 9. P. 1756-1760. DOI: 10.15199/62.2016.9.20.
4. Deb A., Ferdous J., Ferdous K., Uddin M. R., Khan M. R., Rahman M. W. Prospect of castor oil biodiesel in Bangladesh: Process development and optimization study. *International Journal of Green Energy*. 2017. Vol. 14, №12. P. 1063-1072. DOI: 10.1080/15435075.2017.1357558.
5. Zhu Q. L., Gu H., Ke Z. Congeneration biodiesel, ricinine and nontoxic meal from castor seed. *Renewable Energy*. 2018. Vol. 120. P. 51-59. DOI: 10.1016/j.renene.2017.12.075
6. Hadiyanto H., Yuliandaru I., Hapsari R. Production of Biodiesel from Mixed Waste Cooking and Castor Oil. In *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 156. № 03056 DOI: 10.1051/mateconf/201815603056.
7. Conejero M. A., César A. D. S., Batista A. P. The organizational arrangement of castor bean family farmers promoted by the Brazilian Biodiesel Program: A competitiveness analysis. *Energy Policy*. 2017. Vol. 110. P. 461-470. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.08.036.
8. Масликов В.А. Технологическое оборудование производства растительных масел. Москва: Пищевая промышленность, 1974. 439 с.
9. Бондарь А.Г., Статюха Г.А. Планирование эксперимента в химической технологии. Киев: Вища школа, 1976. 180 с.
10. Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рощин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. 2-е изд. Ленинград, 1980. 168 с.
11. Підручник дослідника. Навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей / Васильковський О.М., Лещенко С.М., Васильковська К.В., Петренко Д.І. Кіровоград, 2016. 204 с.
12. Дідур В.В., Дідур В.А., Чебанов А.Б., Асеев А.А. Оптимізація параметрів вологотеплової обробки м'ятки при виділенні олії із насіння рицини. Науковий вісник ТДАТУ. 2018. Вип. 8, Т. 2. С. 3-8. DOI: 10.31388/2220-8674-2018-2-14

References

1. Barnes, D. J., Baldwin, B. S., & Braasch, D. A. (2009). Degradation of ricin in castor seed meal by temperature and chemical treatment. *Industrial Crops and Products*, 29(2-3), 509-515 [in English].
2. Mutlu, H., & Meier, M. A. (2010). Castor oil as a renewable resource for the chemical industry. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(1), 10-30 [in English].
3. Malajowicz, J., & Kusmirek, S. (2016). Characteristics and possibilities of industrial use of castor oil. *Przemysl Chemiczny*, 95(9), 1756-1760 [in English].
4. Deb, A., Ferdous, J., Ferdous, K., Uddin, M. R., Khan, M. R., & Rahman, M. W. (2017). Prospect of castor oil biodiesel in Bangladesh: *Process development and optimization study*. *International Journal of Green Energy*, 14(12), 1063-1072 [in English].
5. Zhu, Q. L., Gu, H., & Ke, Z. (2018). Congeneration biodiesel, ricinine and nontoxic meal from castor seed. *Renewable Energy*, 120, 51-59 [in English].
6. Hadiyanto, H., Yuliandaru, I., & Hapsari, R. (2018). Production of Biodiesel from Mixed Waste Cooking and Castor Oil. In *MATEC Web of Conferences (Vol. 156, p. 03056)*. *EDP Sciences* [in English].
7. Conejero, M. A., César, A. D. S., & Batista, A. P. (2017). The organizational arrangement of castor bean family farmers promoted by the Brazilian Biodiesel Program: A competitiveness analysis. *Energy Policy*, 110, 461-470 [in English].
8. Maslikov, V.A. (1974). *Tekhnologicheskoye oborudovaniye proizvodstva rastitelnykh masel [Technological equipment for the production of vegetable oils]*. Moscow: Food industry [in Russian].
9. Bondar, A.G. & Statyuha, G.A. (1976). *Planirovaniye eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii. [Chemical engineering experiment planning]*. Kiev: Graduate school [in Russian].
10. Melnikov, S.V., Aleshkin, V.R. & Roshin, P.M. (1980). *Planirovaniye eksperimenta v issledovaniyakh selskokhozyaystvennykh protsessov [Planning an experiment in agricultural research]*. L. [in Russian].
11. Vasilkovsky, O.M., Leshenko, S.M., Vasilkovska, O.M. & Petrenko, D.I. (2016). *Pidruchnik doslidnika. Navchalniy posibnik dlya studentiv agrotekhnichnih spetsialnostey [Researcher's textbook. Textbook for students of agricultural specialties]*. Kirovograd [in Ukrainian].

12. Didur, V.V., Didur, V.A., Chebanov, A.B. & Aseev, A.A. (2018). *Optimizatsiya parametriv vologoteplovoyi obrobki m'yatki pri vidilenni oliyi iz nasinnya ritsini [Optimization of the parameters of water heat treatment of the mark when separating oil from castor seeds]*. Scientific bulletin TDATU [in Ukrainian].

Volodimir Didur, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

Andrii Chebanov, PhD tech. sci., **Volodimir Didur**, Prof., DSc., **Olga Nazarova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksiy Vereshaga**, engineer

Tavria State Agro technological University, Melitopol, Ukraine

Optimization of Design and Technological Parameters of Auger Press for Squeezing of a Castor Seed Brain (on the Example of One Coil of a Screw Shaft)

The quality and quantity of finished products when castor is processed depends largely on the technology adopted. In the castor processing technology, an important role is given to the operation of squeezing oil by pressing the cereal. Structural and technological parameters that affect the amount of oil obtained after pressing are the free volume between the pressing coils of the auger press, the temperature in the space of the zeros, the size of the gap between the zeros of the press plates.

The purpose of the article is to increase the efficiency of the process of squeezing oil from castor seeds by optimizing the design and technological parameters of the screw press.

In order to optimize the design and technological parameters of the auger press, it is advisable to consider experimental studies of the pressing of the castor bean seed on each individual press of a screw shaft. For the purpose of such studies, the expanded channel method was used. The maximum amount of oil is ensured at the optimum structural and technological parameters of the expanded channel, the finding of which requires the use of the method of mathematical planning of the experiment.

As an example, the design, subsequent conduct and processing of the experiment was carried out for one pressing coil of a screw shaft. On the example of this pressing coil, further studies will be made for other coils of auger presses.

The main criterion for optimization is the relative mass of oil. Optimal parameters of pressing of the castor seed brain for the third coil of the screw shaft were determined: compression ratio $\alpha=2.09$; gap in the nail bars $\delta=1,22\text{mm}$; the temperature of the brain inside the channel $t=104^\circ\text{C}$.

castor seeds, kernel, pressing, auger shaft, expanded channel, extruder, relative mass of oil

Одержано (Received) 19.11.2019

Прорецензовано (Reviewed) 28.11.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

УДК 629.7.07

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).43-49](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).43-49)

В.Ю.Єрмаков, асп., **О.В. Ізвалов**, канд. техн. наук

Льотна академія Національного авіаційного університету, м.Кропивницький, Україна

e-mail: vladik.yermakov@gmail.com, e-mail: izvalov.klanau@gmail.com

Аналіз сучасних досліджень безпілотних літальних апаратів

В статті проаналізовані дослідження безпілотних літальних апаратів за останні 10 років. Дослідження згруповані за напрямками, що відображено діаграмою Ейлера. Для кожного напрямку надано декілька прикладів у вигляді стислого змісту наукових праць докторів філософії з різних країн.
безпілотні літальні апарати, сфери використання, безпека БПЛА, дрони, аналіз досліджень

В.Ю. Єрмаков, асп., **А.В. Извалов**, канд. техн. наук

Летная академия Национального авиационного университета, г.Кропивницкий, Украина

Анализ современных исследований беспилотных летательных аппаратов

© В.Ю.Єрмаков, О.В. Извалов, 2019

В статті проаналізовані дослідження безпілотних летальних апаратів за останні 10 років. Дослідження сгруповані по напрямках, що зображено діаграмою Ейлера. Для кожного напрямку надано декілька прикладів у вигляді стислої змісту наукових праць докторів філософії з різних країн.

безпілотні летальні апарати, сфери використання, безпека БПЛА, дрони, аналіз досліджень

Постановка проблеми. Стрімкий технологічний розвиток впродовж десятиріччя 2009-2019 років призвів до значного прогресу у галузі безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Залучення БПЛА дозволяє вирішувати широке коло задач ефективніше, швидше та більш безпечно у порівнянні з використанням інших засобів та методів. На протязі останніх років у найбільш технологічно розвинутих країнах світу все частіше використовуються дрони у сільському господарстві, доставці вантажів, розвідці, картографуванні, технічному обслуговуванні, діагностиці інших видах діяльності. Одночасно з'являються нові сфери застосування БПЛА та пов'язані з ними дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Постає необхідність у аналізі та систематизації поточних досліджень у галузі БПЛА. При підготовці даної публікації було проведено аналіз 22 дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії (PhD) з різних країн світу за останні 10 років.

Постановка завдання. Метою цього аналізу є виявлення найбільш актуальних напрямів досліджень та найгостріших питань. Виявилось, що можна виділити п'ять основних напрямів: нові сфери застосування БПЛА, правові аспекти оперування БПЛА, навігація БПЛА, технічне оснащення БПЛА та безпека руху БПЛА. Розподілення певних досліджень до напрямів добре демонструє діаграма Ейлера (рис. 1).

Виклад основного матеріалу. На діаграмі відображені кола, кожне коло відповідає до певного напрямку наукових праць. Цифрами відображено кількість досліджень які відносяться до цих напрямів, на перетині кіл – кількість досліджень які мають відношення відразу до декількох напрямів. В такому вигляді помітно, що значна кількість досліджень відносяться відразу до декількох напрямів.

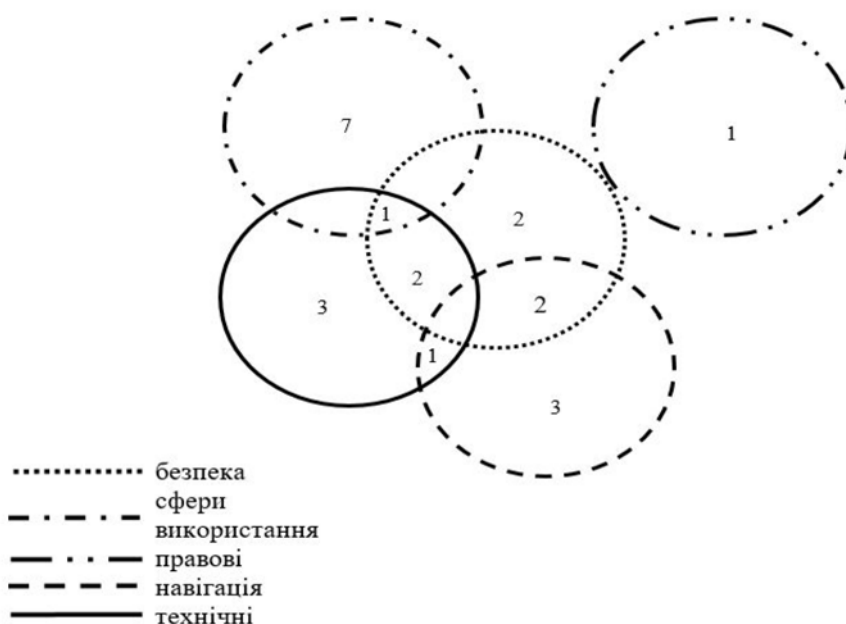


Рисунок 1 – сучасні напрямки дослідження БПЛА та кількості проаналізованих дисертацій
 Джерело: розроблено автором

Нові сфери використання БПЛА

Розберемо кожен напрям більш детально, починаючи з найбільшого по кількості досліджень напряму, нових сфер використання БПЛА. Цей напрям є найбільшим за кількістю досліджень, оскільки сфери застосування дронів постійно розширюються. Дрони можуть використовуватися для спостереження як за певними ділянками ґрунту так і за збитками спричиненими стихійними лихами, виконувати доставку, сканувати та аналізувати. Все це полегшує повсякденне життя людини та підвищує безпеку при виконанні певних задач.

Серед проаналізованих досліджень даної групи одним із найцікавіших є дослідження Nazim Shakhatreh під назвою “Wireless Coverage Using Unmanned Aerial Vehicles” [1]. Автор пропонує вирішення проблем які виникають під час використання БПЛА для забезпечення бездротового покриття, під час надзвичайних ситуацій. Тоді кожен безпілотник служить в якості антенної бездротової базової станції. Але БПЛА мають потребу періодично повертатися до зарядної станції для підзарядки через обмежену ємність батареї. На основі аналізу проблеми мінімізації кількості БПЛА необхідних для безперервного охоплення даної географічної області, враховуючи потребу до підзарядки та розбиття графіку покриття на цикли, розроблено ефективний алгоритм вирішення проблеми. Також в другій та третій частині дослідження запропоновано використовувати БПЛА для бездротового покриття в приміщенні. Представлено два способи розміщення БПЛА, з одного боку будівлі та з двох сторін. Використовуючи теорію пакування кола, визначається розташування безпілотників таким чином, що сумарна площа покриття є максимальною.

В дослідженні під назвою “UAV-based urban structural damage assessment using object-based image analysis and semantic reasoning” [2] йде мова про використання БПЛА для зйомки та оцінки структурного збитку після стихійного лиха. Дрони можуть виявляти повністю пошкоджені конструкції за допомогою індикатора лиха. Ця стаття присвячена оцінці збитку на основі мульти-перспективних, накладених зображень з дуже високою роздільною здатністю, отриманих за допомогою безпілотних літальних апаратів. Тривимірна оцінка (3-D point-cloud) всієї будівлі поєднується з детальним аналізом зображень (OBIA - Object-based Image Analysis) фасадів та криш. Це дослідження спрямоване не на автоматичну оцінку збитку, а на створення методології, яка підтримує часто багатозначну класифікацію проміжних рівнів шкоди з метою отримання комплексних оцінок збитку для кожної будівлі. Дрон ідентифікує повністю пошкоджені структури в тривимірному просторі, (3-D point-cloud) а для всіх інших випадків надає індикатори ушкодження на основі OBIA, які будуть використовуватися аналітиками пошкодження в якості допоміжної інформації.

В Норвегії актуальним є дослідження щодо використання БПЛА для моніторингу та оцінки морських ресурсів “Unmanned aerial vehicles for marine mammal surveys in arctic and sub-arctic regions”[3]. Зміни в кліматі й вплив людини на навколишнє середовище чинить вплив на морське середовище, тому виникає необхідність вести моніторинг та оцінку морських ресурсів. Дослідження, що проводяться в рамках цієї докторської програми описують три компоненти, які включають три етапи оцінки корисності систем БПЛА для досліджень морських ссавців в арктичних і субарктичних регіонах. Представлена робота підкреслює складність програм моніторингу та показує, наскільки технічний прогрес цінний не тільки для вчених-екологів, а й для керівників галузі і регулюючих органів.

Правові аспекти оперування БПЛА

Дослідження в правовому напрямку допомагає створювати та регулювати закони щодо використання БПЛА. Marcin Moj у своєму дослідженні “The legal status of civil

unmanned aircraft and limitations associated with the performance of flights by civil unmanned aircraft”[4] дає відповідь на питання: як і чому правові норми обмежують доступ БЛА до повітряного простору, як вони повинні виглядати, які питання повинні визначати правові рішення, що складають правила експлуатації безпілотних об'єктів. У дослідженні коротко представлена історія розвитку безпілотної авіації та широкий спектр застосування безпілотних об'єктів, а також приклади їх використання, переваги та недоліки використання БПЛА. У законодавчих рішеннях у секторі безпілотних літальних апаратів найчастіше описується лише режим роботи БЛА у візуальній лінії зору оператора, проте в дослідженні представлені більш прогресивні методи проведення польотів, які в майбутньому також повинні бути враховані в роботі законодавства. Структура повітряного простору зумовлює його складність, що наочно можна бачити на прикладі зон обмеження польотів цивільних літаків. Ці обмеження зазвичай стосуються також цивільних БПЛА. У роботі були описані зони, які викликають найбільші обмеження для польотів БПЛА.

Навігація БПЛА

Метою навігаційних досліджень є вдосконалення повітряного руху дронів, формування польоту та управління дронами під час цього польоту. Дослідження в цій категорії спрямовані на запобігання зіткнень, формування коаліції безпілотників в вільному польоті, створення “дорожніх карт” та алгоритмів, проектування та аналіз польотів, використання різноманітних візуальних маркерів та шаблонів.

Чудовим прикладом є дослідження Joel George Manathara під назвою “Collision avoidance and coalition formation of multiple unmanned aerial vehicles in high density traffic environments”[5]. В цьому дослідженні автор розглядає проблему уникнення зіткнень між БПЛА з високою щільністю трафіку. Алгоритми для обробки конфліктів були розроблені із використання принципів попередження зіткнень при керуванні ракетами та верифіковані шляхом комп'ютерного моделювання. За допомогою реалістичних моделей БПЛА було показано що алгоритми розроблені в цій роботі мають хороші показники уникнення зіткнень у середовищах з високою щільністю трафіка. Також в дослідженні розглянуто проблему формування коаліції між кількома БПЛА для місії розшуку та переслідування, було розроблено двоступеневий алгоритм поліноміального часу, який дає субоптимальне але обчислювально ефективне та просте вирішення проблеми формування коаліції.

А в роботі “Vision-based automatic landing of a rotary UAV”[6] описується підхід до управління невеликою мультироторною безпіотною антеною системою (БАС) при посадці на рухому платформу. Схема посадки заснована на розташуванні візуальних маркерів на платформі посадки та її розпізнаванні дроном. Після того, як бортова камера виявляє шаблон об'єкта, внутрішній алгоритм управління відправляє візуальні серво-команди для вирівнювання мультиротора з цілями. Цей метод менш складний в обчислювальному відношенні, оскільки він використовує виявлення об'єктів на основі кольору та може бути застосований до геометричного шаблону замість залучення алгоритмів відстеження об'єкта. Наступна його перевага, полягає у відсутності потреби обчислювати відстань до об'єктів. Метод при своїй безперервній роботі враховує зміну координат БПЛА і коливання платформи, що необхідно для посадки в реальному часі на рухому ціль, таку як корабель. Диспетчер дискретних подій, що працює паралельно з внутрішнім контролером, призначений для автоматичної посадки многороторного БПЛА на рухому ціль. Нарешті, цей метод був апробований в серії експериментів в реальному часі з посадкою квадрокоптера в приміщеннях і на відкритому повітрі як на статичних, так і на рухомих платформах. Розроблена система-прототип продемонструвала можливість посадки в межах 25 см від бажаної точки приземлення.

Технічне оснащення БПЛА

Технічні дослідження пов'язані зі змінами в конструкції та програмному забезпеченні як для певних типів безпілотників так і для окремих моделей. В таких дослідження міститься детальний аналіз конструкції дронів або окремих їх частин, з метою вдосконалення дронів для безпечного та найбільш простого їх використання. В проаналізованих дослідження зустрічалися, наприклад, зміни в конструкції крила, використання більш відповідного програмного забезпечення та модифікації елементів живлення.

Проектування малого безпілотника використовуючи сонячну батарею розглянуто в дисертації Christopher J. Hartney під назвою “Design of a small solar-powered unmanned aerial vehicle” [7]. Метою дисертації є проектування безпілотника, який має розмах крил не більше 7 м, масу не більше 10 кг, є здатним переносити вантаж до 2,27 кг, та має загальну тривалість польоту не менше 24 годин. В ході дослідження було виконане порівняльне вивчення та аналіз схожих за типом безпілотників. Оскільки безпілотник буде призначений для певних місій, а саме вивчення лісових пожеж в Каліфорнії, він повинен мати необхідне обладнання включаючи систему глобального позиціонування (GPS) та камери. Поштовхом до використання сонячної батареї є вимога екологічності. Враховуючи поточне прагнення до більш екологічного середовища, використання невеликих дронів на сонячних батареях є актуальним питанням, яке заслуговує уваги.

У дослідженні “Synthesis and Validation of Flight Control for UAV” [8] детально розглядається проблема надійності дронів ще під час моделювання та випробувань, оскільки попит на надійні і недорогі системи БПЛА зростає. Це особливо актуально для невеликих міні-БПЛА, де більшість систем, як і раніше, використовуються в якості прототипів через недостатню надійність. Удосконалення моделювання, випробувань і управління польотом для невеликих безпілотних літальних апаратів підвищило б їх надійність під час автономного польоту. Дана дисертація критикує механічне перенесення традиційного підходу до моделювання, випробування та впровадження з пілотованих літаків до БПЛА. Доводиться, що такий підхід вимагає великих витрат часу і ресурсів. Натомість, розробляється інтегрована структура з систематичними процедурами для синтезу і контролю роботи БПЛА. Це допоможе в сертифікації системи БПЛА і забезпечує швидкий цикл розробки від моделювання до реальних випробувань та впровадження. Ефективність цього підходу демонструється застосуванням розробленої основи для невеликої системи БПЛА, яка була розроблена в Університеті Міннесоти.

Безпека руху БПЛА

Тема безпеки в тому чи іншому вигляді зустрічається у більшій частині проаналізованих досліджень. Саме тому цей напрямок є найважливішим серед усіх. Хоча більшість досліджень лише певною частиною відносяться до напрямку безпеки, виділяється дослідження автора Nils Rodday під назвою “Exploring security vulnerabilities of Unmanned Aerial Vehicles” [9] У цьому дослідженні автор дослідив рівень безпеки, що застосовується до каналів зв'язку професійного БПЛА. Крім того, безпілотники досліджувалися на виявлення вразливості в системі безпеки, виконувалася атака “Man-in-the-Middle” і вводилися команди керування для взаємодії з безпілотниками. Також були запропоновані відповідні заходи для покращення поточного рівня безпеки. Результати дослідження підвищують обізнаність серед широкої громадськості, що використовують БПЛА, серед наукового співтовариства, показуючи необхідність подальшого дослідження в цій сфері, та серед виробників, показуючи важливість впровадження більш високого рівня безпеки в своїх пристроях.

Висновки. Великий попит на безпілотники спричиняє бажання та необхідність їх вивчення та створення наукових праць в різноманітних галузях. Найбільш популярними на сьогодні є праці які стосуються нових сфер використання дронів, оскільки у даному напрямку має місце широкий спектр для досліджень та втілення нових ідей. Проте інші напрями не перестають бути актуальними. Навігаційні та технічні наукові дослідження мають вагомий внесок в технологічний розвиток сучасних безпілотників. Правові дослідження допомагають правильно розуміти та використовувати закони щодо використання безпілотників. Дослідження щодо безпеки використання тісно пов'язані з іншими дослідженнями, оскільки безпека має дотримуватися в кожній сфері.

Список літератури

1. Hazim Shakhathreh. *Wireless Coverage Using Unmanned Aerial Vehicles*. 2017. URL: <https://ece.njit.edu/sites/ece/files/2017%205%2017%20Shakhathreh.pdf> (дата звернення:14.11.2019)
2. J. Fernandez Galarreta, N. Kerle, M. Gerke. *UAV-based urban structural damage assessment using object-based image analysis and semantic reasoning*. 2015. Нідерланди. URL: <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/15/1087/2015/nhess-15-1087-2015.pdf> (дата звернення: 10.11.2019)
3. Ana Sofia Aniceto. *Unmanned aerial vehicles for marine mammal surveys in arctic and sub-arctic regions*. 2015. Норвегія. URL: <http://www.arcex.no/phd-thesis-unmanned-aerial-vehicles-for-marine-mammal-surveys-in-arctic-and-sub-arctic-regions/> (дата звернення: 29.10.2019)
4. Marcin Moj. *The legal status of civil unmanned aircraft and limitations associated with the performance of flights by civil unmanned aircraft*. Польща. URL: <https://depotuw.ceon.pl/bitstream/handle/item/2084/Streszczenie%20i%20s%C5%82owa%20kluczowe%20ANG.pdf?sequence=3> (дата звернення: 05.11.2019)
5. Joel George Manathara. *Collision avoidance and coalition formation of multiple unmanned aerial vehicles in high density traffic environments*. 2011. Індія. URL: <https://jgmanathara.files.wordpress.com/2013/02/joelphdthesis.pdf> (дата звернення:04.11.2019)
6. Iryna Borshchova. *Vision-based automatic landing of a rotary UAV*. 2017. Канада. URL: <https://research.library.mun.ca/12868/1/thesis.pdf> (дата звернення:12.11.2019)
7. Christopher J. Hartney. *Design of a small solar-powered unmanned aerial vehicle*. 2011. URL: <http://www.sjsu.edu/people/nikos.mourtos/docs/Hartney.Su11.pdf> (дата звернення:02.11.2019)
8. Yew Chai Paw. *Synthesis and Validation of Flight Control for UAV*. 2009. URL: https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/58727/Paw_umn_0130E_10834.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата звернення:02.11.2019)
2. Nils Rodday. *Exploring security vulnerabilities of Unmanned Aerial Vehicles*. 2015. Нідерланди. URL: <https://www.jbisa.nl/download/?id=17706129> (дата звернення:09.11.2019)

References

1. Hazim Shakhathreh (2017). *Wireless Coverage Using Unmanned Aerial Vehicles*. Retrieved from: <https://ece.njit.edu/sites/ece/files/2017%205%2017%20Shakhathreh.pdf> [in English].
2. J. Fernandez Galarreta, N. Kerle, M. Gerke (2015). *UAV-based urban structural damage assessment using object-based image analysis and semantic reasoning*. Netherlands. Retrieved from: <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/15/1087/2015/nhess-15-1087-2015.pdf> [in English].
3. Ana Sofia Aniceto (2015). *Unmanned aerial vehicles for marine mammal surveys in arctic and sub-arctic regions*. Norway. Retrieved from: <http://www.arcex.no/phd-thesis-unmanned-aerial-vehicles-for-marine-mammal-surveys-in-arctic-and-sub-arctic-regions/> [in English].
4. Marcin Moj. *The legal status of civil unmanned aircraft and limitations associated with the performance of flights by civil unmanned aircraft*. Poland. Retrieved from: <https://depotuw.ceon.pl/bitstream/handle/item/2084/Streszczenie%20i%20s%C5%82owa%20kluczowe%20ANG.pdf?sequence=3> [in English].
5. Joel George Manathara (2011). *Collision avoidance and coalition formation of multiple unmanned aerial vehicles in high density traffic environments*. India. Retrieved from: <https://jgmanathara.files.wordpress.com/2013/02/joelphdthesis.pdf> [in English].
6. Iryna Borshchova (2017). *Vision-based automatic landing of a rotary UAV*. Canada. Retrieved from: <https://research.library.mun.ca/12868/1/thesis.pdf> [in English].

7. Christopher, J. Hartney (2011). *Design of a small solar-powered unmanned aerial vehicle*. Retrieved from: <http://www.sjsu.edu/people/nikos.mourtos/docs/Hartney.Su11.pdf> [in English].
3. Yew Chai Paw (2009). *Synthesis and Validation of Flight Control for UAV*. Retrieved from: https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/58727/Paw_umn_0130E_10834.pdf?sequence=1&isAllowed=y [in English].
9. Nils, Rodday (2015). *Exploring security vulnerabilities of Unmanned Aerial Vehicles*. Netherlands. Retrieved from: <https://www.jbisa.nl/download/?id=17706129> [in English].

Vladyslav Yermakov, postgraduate, **Oleksii Izvalov**, PhD tech. sci.
Flight Academy of National Aviation University, Kropyvnytskyiy, Ukraine

Analysis of Modern UAV Research

In the all the spheres, unmanned aerial vehicles (drones) have become much more accessible over the past years and have received a lot of scientific interest. There is a great number of scientific publications and it is necessary to organize them and give a general description for each area, that was highlighted in progress of analysis.

This paper considers several scientific studies, which were divided in five groups by research direction. Each direction has its own aim and is intended to solve certain problems. The current paper highlights several studies as examples for each group. Each group is briefly characterized and examples of the studies reviewed. The following groups should be highlighted: Innovations in the area of use; Navigation of drones; Engineering of drones; Legislative aspects; and Safety. Innovations in the area of use is the largest direction by the number of studies, as the scope of drones is very wide and increasing every year. Drones can be used to monitor, deliver, scan and analyze. Legislative research helps create and regulate UAV laws. The purpose of navigation research is to improve the air traffic of drones, the formation of flight and the management of drones during this flight. Studies in this category are aimed at collision avoidance, forming a coalition of drones in free flight, creating "road maps" and algorithms. Technical studies are related to changes in design and software for several types of drones and individual models. Studies about Safety are common in all previous areas. Safety is an essential group for the use, improvement and development of drones.

The huge demand for drones causes the raise in the scientific interest to them and constantly grows new research examples in a wide variety of fields. Analyzing existing research gives the reader a better understanding of usage of drones and current scientific frontier. It helps to understand where more research needs to be done, what are the most relevant industries for drones in the modern world.

drones, unmanned aerial vehicle, area of use, drones safety, research analysis

Одержано (Received) 19.11.2019

Прорецензовано (Reviewed) 28.11.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

ЗАСОБИ ТРАНСПОРТУ. ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС. ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЛОГІСТИКА

УДК 531.43:621.891

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).50-64](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).50-64)

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Гриньків**, ст. наук. співр., канд. техн. наук, докторант
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: AulinVV@gmail.com

Модель надійності деталей транспортних машин за процесами реалізації триботехнологій їх припрацювання і відновлення

Обґрунтована необхідність побудови фізичних та математичних моделей надійності з врахуванням випадкових процесів та кількості локальних областей при зношуванні та відновленні з використанням триботехнологій припрацювання та відновлення. Дана модель поверхневого шару деталі з k підшарів. Розглянуто поведінку системи "поверхневий шар" з точки зору надійності, як поведінку системи сукупностей взаємозалежних локальних областей контактів. Стохастична модель надійності деталі зведена до системи поверхневих шарів з випадковими локальними областями контактів спряжених деталей. Наведено граф станів псевдосистеми "поверхневий шар" при різних умовах. Отримано систему стохастичних диференціальних рівнянь для розгляду процесів деградації та відновлення псевдостанів та наведено часткові її розв'язки.

надійність, триботехнологія припрацювання, триботехнологія відновлення, фізична модель надійності, поверхневий шар, транспортні машини

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Гриньків**, ст. наук. співр., канд. техн. наук, докторант

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Модель надежности деталей транспортных машин за процессами реализации триботехнологий их приработки и восстановления

Обоснована необходимость построения физических и математических моделей надежности с учетом случайных процессов и количества локальных областей при износе и восстановлении с использованием триботехнологий приработки и восстановления. Данная модель поверхностного слоя детали из k подслоев. Рассмотрены поведение системы "поверхностный слой" с точки зрения надежности, как поведение системы совокупностей взаимосвязанных локальных областей контактов. Стохастическая модель надежности детали сведена к системе поверхностных слоев со случайными локальными областями контактов сопряженных деталей. Приведен граф состояний псевдосистемы "поверхностный слой" при различных условиях. Получена система стохастических дифференциальных уравнений для рассмотрения процессов деградации и восстановления псевдосостояний и приведены частичные ее решения.

надежность, триботехнологии приработки, триботехнологии восстановления, физическая модель надежности, поверхностный слой, транспортные машины

Постановка проблеми. Результати досліджень надійності систем і агрегатів транспортних машин в цілому за закономірностями тертя, зношування і відновлення деталей при реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення [1-3] свідчать, що зміни, які спостерігаються в їх поверхневих шарах, являються стохастичними. При

цьому процесі тертя зношування та відновлення, що протікають в локальних областях контактів, мають випадкову природу [4-6]. Зазначене вимагає при побудові фізичних та математичних моделей надійності враховувати випадкові варіації зазначених процесів та кількість локальних областей на робочих поверхнях деталей. Для побудови стохастичної фізичної моделі надійності спряжень деталей систем і агрегатів транспортних машин необхідно використати теоретичні обґрунтування процесів тертя, зношування та відновлення при використанні конкретних триботехнологій припрацювання (ТТП) та відновлення (ТТВ) [7-9], математичний апарат [10-12] та фізичні основи теорії надійності [13-16].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Самоорганізовані процеси тертя дозволяють розробити методи, способи і засоби відновлення зношених робочих поверхонь спряжень деталей дизелів транспортних машин, в тому числі без їх розбирання, тобто технологій триботехнічного припрацювання і відновлення [2, 16-19]. Ця сторона процесів тертя в зазначених триботехнологіях остаточно не обґрунтована [20-24], проведено достатній обсяг експериментальних досліджень, але остаточно не створена трибофізична теорія протікаючих процесів керування ними, вплив їх на надійність спряжень деталей систем і агрегатів, і транспортних машин в цілому. Не з'ясовані також умови пристосування та регенерації поверхонь тертя [2, 23, 25-30], що потребує додаткових ретельних досліджень.

Серед зазначених питань на увагу заслуговують дослідження умов реалізації процесів самоорганізації [31-33] та саморегуляції процесів зношування [34-35], які дають новий імпульс розвитку практичних методів підвищення зносостійкості деталей і РО СГТ, змінюють погляди на механізм тертя і зношування. Експериментально доведено, що сервовітні плівки можуть утворюватися при використанні присадок, які містять не тільки мідь, але і інші матеріали. Для цього необхідно ввести компоненти присадки в мастильний матеріал або робоче (технологічне) середовище. Цей принцип покладено в основу розробки та застосування металоплакуючих присадок [25-27]. Доцільними в цьому напрямку є системно-спрямований підхід та синергетична концепція [2,3,14,16], які містять в собі загальні закономірності керування процесами і станами самоорганізації в ТТС різного роду. При цьому дослідження дисипації і синергізму при терті є перспективними в практичній реалізації, оскільки з'являється можливість розробки і застосування методів і засобів, що дозволяють в процесі експлуатації без розбирання вузлів і агрегатів, здійснювати відновлення й ефективно підвищувати зносостійкість ТТС. Це так звані інтелектуальні технології самовідновлення (smart-self technology), що входять в технології триботехнічного відновлення (ТТВ).

Регенерацію зношених деталей можна здійснювати ТТВ в різних робочих (технологічних) середовищах [19-24]. Застосування інтелектуальних технологій самовідновлення дозволяє знизити витрати на паливно-мастильні матеріали (ПММ) та запасні частини, скоротити тривалість усунення відмов, зменшити втрати в результаті простою техніки в період ремонту.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розроблення фізичної моделі надійності спряжень деталей систем і агрегатів транспортних машин при реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення.

Виклад основного матеріалу. З фізичної точки зору усі процеси під час контактної взаємодії спряжень деталей, відбуваються в матеріалах їх поверхневих шарів [1,2,16,36,37]. Модельне уявлення поверхневого шару деталі, який підлягає процесам тертя, зношування та відновлення в трибоспряженнях деталей під час експлуатації систем і агрегатів транспортних машин представлено на рис. 1.

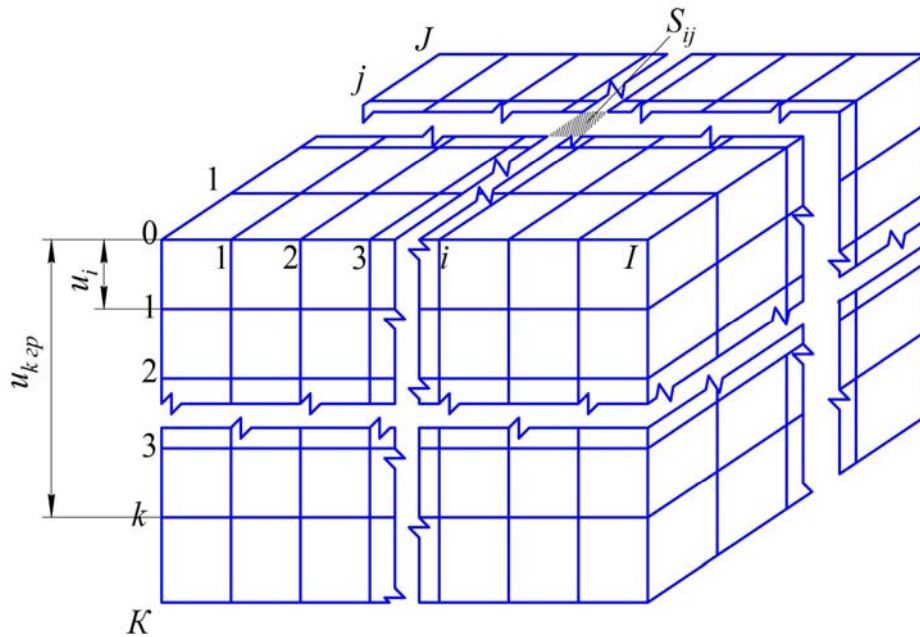


Рисунок 1 – Схема моделі поверхневого шару деталі, який складається з k підшарів, $k = \overline{0, K}$, що містять ij випадкових локальних областей: $i = \overline{0, I}$; $j = \overline{0, J}$

Джерело: розроблено авторами

Нехай поверхневий шар містить k підшарів. Початкова поверхня деталі $k = 0$, а в цілому поверхневий шар – $k = K$. При цьому знос шарів становить u_k , а граничний знос – $u_{k,сп}$. В процесі відновлення поверхні деталі за конкретною триботехнологією припрацювання та відновлення відповідно дорівнюють h_k і $h_{k,сп}$. Робочі поверхні після зношування являють собою сукупність локальних контактних областей S_{ij} , $i = \overline{0, I}$; $j = \overline{0, J}$, а їх загальна площа тертя дорівнює S_{ijl} , $l = \overline{0, L}$. Виходячи з цього початкова площа поверхні деталі S_{ij0} , а для критичного стану зносу S_{ijL} . Для площ локальних контактних областей вибирається з них початкова S_{00} , а потім поточні – $S_{ij}(S_{01}, S_{02}, \dots, S_{11}, \dots, S_{ij}, \dots, S_{ij})$ і відповідно об'єм контактної області зношеного шару

дорівнює $V_{oijk} = S_{ijk} \cdot u_k$, k -шару – $V_{ok} = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J S_{ijk} \cdot u_k$, а загальний зношений об'єм

становить $V_{\omega} = \sum_{k=0}^K V_{ok}$. Для процесів відновлення відповідно маємо: $V_{rijk} = S_{ijk} \cdot h_k$,

$$V_{rk} = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J S_{ijk} \cdot h_k, \quad V_r = \sum_{k=0}^K V_{rk}.$$

Розгляд процесів зношування та відновлення деталі при застосуванні триботехнологій відновлення, передбачає ряд наступних припущень:

– всі локальні області контактів мають випадковий характер як по кількості, так і по площі;

– швидкості зношування та відновлення певного поверхневого шару є випадковими величинами, які знаходяться у визначеному інтервалі та є співрозмірними;

– інтенсивності зношування та відновлення локальної області контакту для даної поверхні деталі є постійними величинами, але мають інтервали вимірювання які змінюються випадковим чином в певних межах;

– деталь зношується на величину u_k , а відновлюється – на h_k , якщо всі локальні області шарів її поверхні зношуються на цю ж саму величину;

– знос ij -ої локальної області поверхневого шару деталі на величину u_k приводить до зміни інтенсивності зношування суміжних локальних областей;

– відновлення ij -ої локальної області поверхневого шару деталі на величину h_k приводить до зміни інтенсивності відновлення суміжних локальних областей.

Виходячи із фізичного уявлення про надійність зношеної і відновлюваної деталей, їх відповідність певним рівням показників еволюційної надійності, можна описати двома взаємозв'язаними моделями:

– модель системи "поверхневий шар";

– модель системи "деталь".

Поведінку системи "поверхневий шар", з точки зору надійності, розглядають як поведінку системи сукупностей взаємозалежних локальних областей контактів. При цьому локальні області контактів трибоспряжень деталей мають наступні властивості:

– одна з них є основною, а решта супутніми нерівнонадійними локальними областями, що знаходяться під навантаженням \vec{N} ;

– відмова системи "поверхневий шар" спостерігається при відмові усіх локальних областей ij , $i = \overline{0, I}$; $j = \overline{0, J}$, коли величини їх зношування набувають деякого граничного значення $u_{k_{cp}}$, характерного для даного матеріалу деталі і умов її функціонування;

– відновлення системи "поверхневий шар" спостерігається при відновленні усіх локальних областей ij , $i = \overline{0, I}$; $j = \overline{0, J}$, коли їх відновлення набуває деяких граничних значень $h_{k_{cp}}$, характерних для даної триботехнології;

– інтенсивність відмов системи "поверхневий шар" змінюється при виході з ладу будь-якої з локальних областей контактів;

– інтенсивність відновлення поверхневого шару змінюється при відновленні будь-яких з локальних областей контактів.

Поведінка системи "деталь" описується сукупною поведінкою поверхневих шарів як потоку, що переводить систему із стану в стан, і визначається ймовірністю переходу системи станів поверхневого шару при його зношуванні та відновлюванні [14-16]. Граф систем "поверхневий шар" і "деталь" для процесів зношування представлено на рис. 2, а для процесів відновлення на рис. 3.

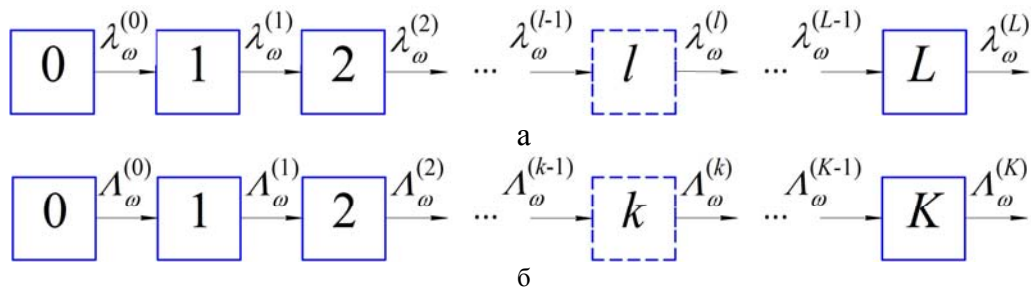


Рисунок 2 – Графи зміни станів як фізичні моделі зношування систем "поверхневий шар" (а) і "деталь" (б)

Джерело: розроблено авторами

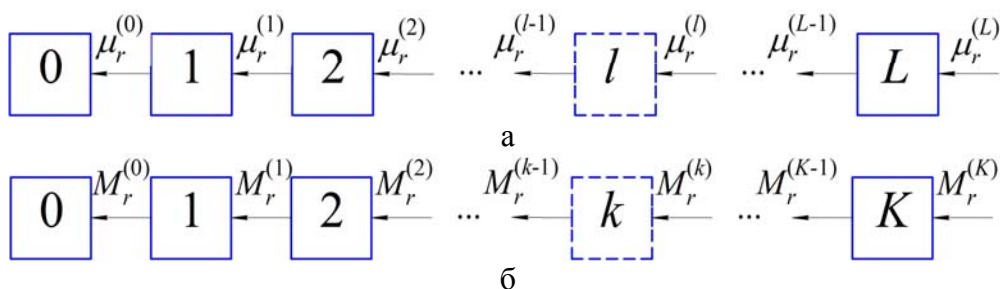


Рисунок 3 – Графи зміни станів як фізичні моделі відновлення систем "поверхневий шар" (а) і "деталь" (б)

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, стохастична модель надійності деталі зводиться до розгляду системи поверхневих шарів, елементами в яких є випадкові локальні області контактів спряжених деталей, що беруть участь в процесах тертя та зношування за певною триботехнологією з формуванням відновлювальної плівки на поверхнях деталей трибоспряження.

Розглядаючи систему "поверхневий шар" деталі, передусім будемо вважати, що сукупність її станів дискретна, а проміжок часу протягом якого відбувається процес зношування є безперервним. Система "поверхневий шар" деталі складається з ij елементів, що являють собою локальні області контактів, інтенсивності відмов яких залежить від часу і від їх кількості, що не відмовили на даний момент часу. Під відмовою локальних областей контактів поверхневого шару будемо розуміти досягнення в них такої величини зношування, яка є більшою або рівною граничній його величині. Для побудови моделі надійності системи "поверхневий шар" використаємо метод псевдостанів [10-12]. Під псевдостаном такої системи будемо розуміти такий стан S системи в якому зношується ij локальних областей контакту з ймовірністю P_k в момент часу t . Якщо кількість локальних областей контактів становить $l=0$, то спостерігається відмова систем "поверхневий шар", яка перейде у ювенільний поглинаючий стан. Граф станів псевдосистеми "поверхневий шар" при зношуванні і відновленні наведено на рис. 3.

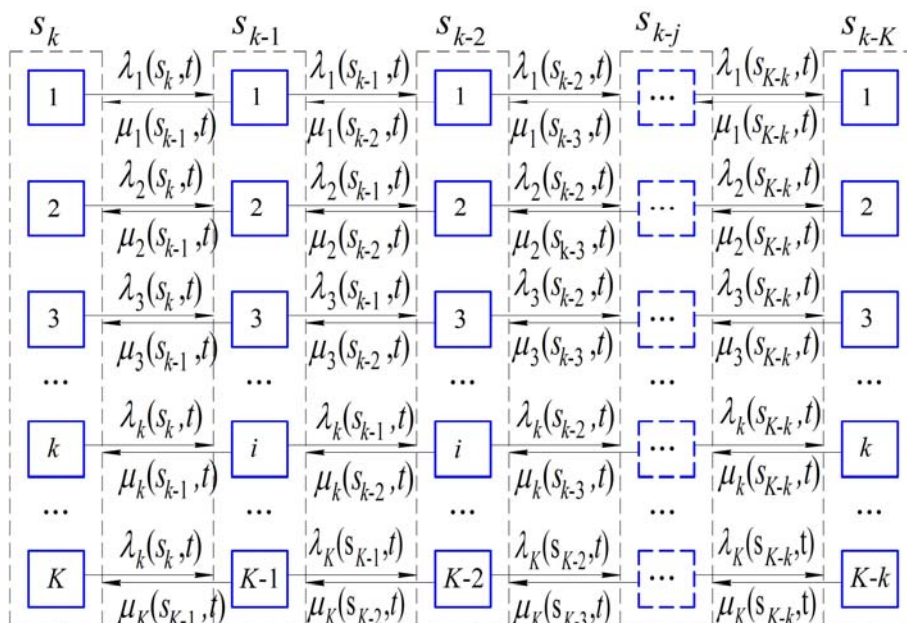


Рисунок 3 – Фрагменти графів станів псевдосистеми "поверхневий шар"

Джерело: розроблено авторами

Можна бачити, що в псевдостані $S_l \in l$ робочих локальних областей контактів, які мають свою інтенсивність відмов $\lambda_k(S_k, t)$ і інтенсивність відновлювання $\mu_k(S_k, t)$, $k = \overline{1, K}$. Будь-яка з k локальних областей контактів може перевести систему "поверхневий шар" в стан S_{k-1} . З плином часу це може бути стан S_{k-2} , S_{k-3} і т.д. до S_{k-K} .

Для опису поведінки такої системи можна скласти систему стохастичних диференціальних рівнянь Колмогорова:

$$\begin{cases} \frac{dP_c(t)}{dt} = -\sum_{i=1}^a (\lambda_i(S_c, t) \cdot P_\omega(t)) + \sum_{j=1}^b (\mu_j(S_c, t) \cdot P_r(t)); \\ \frac{dP_k(t)}{dt} = \sum_{i=1}^{a+1} (\lambda_i(S_{k+1}, t) \cdot P_{a+1}(t)) - \sum_{i=1}^a (\lambda_i(S_k, t) \cdot P_k(t)) - \sum_{j=1}^{b+1} (\mu_j(S_{b+1}, t) \cdot P_{b+1}(t)) + \sum_{j=1}^b (\mu_j(S_b, t) \cdot P_b(t)), \end{cases} \quad (1)$$

де $P_k(t)$ – ймовірність знаходження псевдосистеми в S_k стані; $\lambda_k(S_k, t)$ – інтенсивність відмови k -ої локальної області контакту, $k = \overline{1, K}$, в залежності від псевдостану системи S_k і часу t .

Зазначимо, що в початковий момент часу $t=0$ всі локальні області контактів шару знаходяться в робочому стані: $p_K(t=0)=1$; $p_k(t=0)=0$ при $k < K$.

Згідно граничної теореми для сумарного потоку система стохастичних диференціальних рівнянь може бути спрощена, якщо вважати що $\sum_{k=1}^K (\lambda_k(S_k, t) = \Lambda(S_k, t)$,

де $\Lambda(S_k, t)$ – сумарний потік відмов, який переводить систему із стану S_k в стан S_{k-1} , $k=K, \dots, 0$. Враховуючи це, система (1) набуває вигляду:

$$\begin{cases} \frac{dP_r(t)}{dt} = -\Lambda_\omega(S_k, t) \cdot P_k(t) + M_r(S_k, t) \cdot P_r(t); \\ \frac{dP_\omega(t)}{dt} = \Lambda_\omega(S_{k+1}, t) \cdot P_{k+1}(t) - \Lambda_\omega(S_k, t) \cdot P_{\omega k}(t) - M_r(S_{k+1}, t) \cdot P_{k+1}(t) + M_r(S_{k+1}, t) \cdot P_{\omega k}(t), \end{cases} \quad (2)$$

де $\Lambda_\omega(S_k, t)$ – сумарний потік відмов, який переводить систему із стану S_k в стан S_{k-1} ; $\Lambda(S_{k+1}, t)$ – сумарний потік відмов, який переводить систему із стану S_{k+1} в стан S_k ; $\Lambda(S_k, t)$ – сумарний потік відмов, який переводить систему із стану S_k в стан S_{k-1} .

Використання сумарного потоку станів поверхневого стану деталей дозволяє перейти до розгляду процесів деградації псевдостанів системи "поверхневий шар" і її відмови. Поведінка такої системи описується системою стохастичних диференціальних рівнянь (2), розв'язок якої визначається видами функцій $\Lambda(S_k, t)$ і $M_r(S_k, t)$. Якщо ця функція задана в загальному вигляді, то розв'язок системи є проблематичним. Разом з тим існує ряд часткових розв'язків, які можна використати в аналізі поведінки системи "поверхневий шар" деталі.

Аналізуючи процеси зношування робочих поверхонь спряжень систем і агрегатів деталей сільськогосподарської та транспортної техніки, можна виділити наступні випадки, які поширені на практиці:

– стаціонарне зношування, коли швидкість зношування поверхневого шару є постійною величиною і не залежною від часу і кількості робочих локальних областей контактів підшарів;

– нестационарне зношування, яке в свою чергу містить декілька випадків, у відповідності до інтенсивності зношування локальних областей контактів: не залежить від того скільки з них є робочі, а залежить тільки від тривалості процесів зношування; не залежить від часу, а залежить від робочої кількості локальних областей контактів; залежить як від тривалості зношування, так і від кількості робочих локальних областей контактів. Аналогічні випадки і для процесів відновлення при реалізації ТТП і ТТВ.

Розглянемо процес стаціонарного зношування поверхневого шару деталі. Оскільки швидкість зношування, а отже і сумарний потік відмов локальних областей контактів поверхневого шару, є сталою величиною, не залежною від часу і кількості робочих локальних областей шару, то маємо: $\Lambda(S_k, t) = \text{const} = \Lambda$. При цьому система стохастичних диференціальних рівнянь станів поверхневого шару при наявності процесів зношування набуває вигляду:

$$\begin{cases} \frac{dP_{ок}(t)}{dt} = -\Lambda_K \cdot P_{ок}(t); \\ \frac{dP_{ок}(t)}{dt} = \Lambda_k \cdot P_{\omega(k+1)}(t) - \Lambda_k \cdot P_{\omega(k)}(t). \end{cases} \quad (3)$$

При наявності процесів відновлення система рівнянь має вигляд

$$\begin{cases} \frac{dP_k(t)}{dt} = -\Lambda_K \cdot P_{ок}(t) + M_{rK} \cdot P_K(t); \\ \frac{dP_k(t)}{dt} = \Lambda_k \cdot P_{\omega(k+1)}(t) - \Lambda_k \cdot P_{\omega(k)}(t) - M_k P_{r(k+1)} + M_k P_{r(k)}(t). \end{cases} \quad (4)$$

Систему рівнянь (3) можна розв'язати при початкових умовах: $P_k(t=0) = 1$; $P_k(t=0) = 1$ при $k < K$. Враховуючи початкові умови, маємо наступні рішення для системи "поверхневий шар" при наявності процесів зношування:

$$\begin{cases} P_K(t) = \exp(-\Lambda t); \\ P_k(t) = \frac{(\Lambda t)^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\Lambda t); \\ P_0(t) = 1 - \sum_{k=1}^K \frac{(\Lambda t)^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\Lambda t). \end{cases} \quad (5)$$

З урахуванням процесів відновлення система розв'язків (5) набуває вигляду:

$$\begin{cases} P_K(t) = \exp(-\Lambda t) - \exp(-Mt); \\ P_k(t) = \frac{(\Lambda t)^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\Lambda t) - \frac{(Mt)^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-Mt); \\ P_0(t) = 1 - \sum_{k=1}^K \frac{(\Lambda t)^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\Lambda t) + \sum_{k=1}^K \frac{(Mt)^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-Mt). \end{cases} \quad (6)$$

Зазначимо, що при цьому математичне очікування і дисперсія k -го стану системи "поверхневий шар" будуть рівні між собою в процесах зношування та відновлення:

$$M(K-k) = D(K-k) = \Lambda t = Mt. \quad (7)$$

Розглянемо нестационарне зношування системи "поверхневий шар", яке містить в собі три випадки. Проаналізуємо кожен із цих випадків.

У першому випадку інтенсивність зношування та відновлення локальних областей контактів поверхневого шару не залежить від робочої їх кількості, а є лише функцією часу. Сумарний потік відмов системи "поверхневий шар" також є тільки функцією часу і не залежить від стану S_k системи. Система стохастичних диференціальних рівнянь (2) при цьому має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dP_K(t)}{dt} = -\Lambda(t) \cdot P_K(t) + M(t)P_K(t); \\ \frac{dP_k(t)}{dt} = \Lambda(t) \cdot P_{k+1}(t) - \Lambda(t) \cdot P_k(t) - M(t)P_{k+1} + M(t)P_k(t). \end{cases} \quad (8)$$

Для початкових умов: $P_K(t=0) = 1$; $P_k(t=0) = 1$; при $k < K$. Згідно граничної теореми сумарного потоку, сумарна інтенсивність відмов $\Lambda(t)$ та відновлення $M(t)$ системи "поверхневий шар" являє собою нестационарний потік Пуассона. Розв'язком системи стохастичних диференціальних рівнянь (8) буде система випадкових функцій:

$$\begin{cases} P_K(t) = \exp(-\alpha(t)) - \exp(-\beta(t)); \\ P_k(t) = \frac{(K(t))^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\alpha(t)) - \frac{(M(t))^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\beta(t)); \\ P_0(t) = 1 - \sum_{k=1}^K \frac{(K(t))^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\alpha(t)) + \sum_{k=1}^K \frac{(M(t))^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\beta(t)), \end{cases} \quad (9)$$

де $\alpha(t) = \int_0^t \Lambda(t) dt$ – параметр закону зміни потоку відмов зношування;

$\beta(t) = \int_0^t M(t) dt$ – параметр закону зміни потоку відмов системи "поверхневий шар".

У другому випадку інтенсивності зношування та відновлення локальних областей контактів в системі "поверхневий шар" не залежать від кількості з них працюючих в заданий момент часу. Якщо інтенсивність відмов $\lambda_k(S_k)$ та відновлень $\mu_k(S_k)$ локальних областей контактів спряжених робочих поверхонь деталей, при k працюючих, подається через інтенсивність відмов $\lambda_K(S_K)$ та відновлень $\mu_K(S_K)$ локальних областей контактів в початковий момент часу, то маємо:

$$\lambda_K(S_K) = K\lambda_k(S_k); \quad \mu_K(S_K) = K\mu_k(S_k). \quad (10)$$

Враховавши зазначене в стохастичній диференціальній системі рівнянь (1), отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{dP_K(t)}{dt} = -\sum_{k=1}^K n\lambda_k(S_k) \cdot P_K(t) + \sum_{k=1}^K K\mu_k(S_k) \cdot P_K(t); \\ \frac{dP_k(t)}{dt} = \sum_{k=1}^{k+1} (k+1)\lambda_k(S_{k+1}) \cdot P_{k+1}(t) - \sum_{k=1}^k k\lambda_k(S_k) \cdot P_k(t) - \sum_{k=1}^{k+1} (k+1)\mu_k \cdot P_{k+1}(t) + \sum_{k=1}^k k\mu_k(S_k) \cdot P_k(t). \end{cases} \quad (11)$$

Підсумовуючи потік відмов та відновлень системи "поверхневий шар", система стохастичних диференціальних рівнянь (11) набуває вигляду:

$$\begin{cases} \frac{dP_k(t)}{dt} = -K\Lambda \cdot P_k(t) + K\mu \cdot P_k(t); \\ \frac{dP_k(t)}{dt} = (k+1)\Lambda \cdot P_{k+1}(t) - k\Lambda \cdot P_k(t) - (k+1)M \cdot P_{k+1}(t) - kM \cdot P_k(t), \end{cases} \quad (12)$$

де Λ – сумарний потік відмов, а M – сумарний потік відновлень, в початковий момент часу в стані системи "поверхневий шар" S_k , $K\Lambda = \Lambda_K$, $KM = M_K$. При цьому система рівнянь (12) має розв'язок:

$$\begin{cases} P_k(t) = \exp(-K\Lambda t) - \exp(-KMt); \\ P_{K-k}(t) = \frac{\Lambda^k K!}{(K-k)! \Lambda^k} \frac{1}{\sum_{l=0}^k \prod_{h=0}^k (i-h)/(i-l)} \frac{\exp((K-k)\Lambda t)}{\sum_{l=0}^k \prod_{h=0}^k (i-h)/(i-l)} - \frac{M^k K!}{(K-k)! M^k} \frac{1}{\sum_{l=0}^k \prod_{h=0}^k (i-h)/(i-l)} \frac{\exp((K-k)Mt)}{\sum_{l=0}^k \prod_{h=0}^k (i-h)/(i-l)}; \\ P_0(t) = 1 - \sum_{k=0}^{k-1} P_{K-k}(t) + \sum_{k=0}^K P_{K-k}(t). \end{cases} \quad (13)$$

Для даного розв'язку математичне очікування і дисперсія знаходяться за формулами:

$$M(k) = \sum_{k=1}^K k P_k(t); \quad D(k) = \sum_{k=1}^K k^2 P_k(t) - \left(\sum_{k=1}^K k P_k(t) \right)^2. \quad (14)$$

У третьому випадку інтенсивність зношування і відновлення локальних областей контактів системи "поверхневий шар" являються функціями часу і кількості з них працюючих. При цьому сумарний потік їх відмов та відновлення подається через сумарний потік відмов у початковий момент часу:

$$\Lambda(S_k, t) = \frac{\Lambda(S_K) + at}{1 + at}, \quad M(S_k, t) = \frac{M(S_K) + at}{1 + at}, \quad (15)$$

де $\Lambda(S_k, t)$, $M(S_k, t)$ – сумарна інтенсивність потоку відмов системи "поверхневий шар" в початковий момент часу в стані S_k ;

a – величина, що є сталою для даних умов і визначається значенням функції двох змінних $\Lambda(S_k, t)$, $M(S_k, t)$.

При цьому розв'язок системи рівнянь (2) набуває вигляд, що характеризує закономірності процесу Пойа для деградації і відновлення системи "поверхневий шар":

$$\left\{ \begin{array}{l} P_K(t) = (1 + \Lambda(S_K)at)^{-\frac{1}{a}} - (1 + M(S_K)at)^{-\frac{1}{a}}; \\ P_K(t) = (\Lambda(S_K)t)^{K-k} (1 + \Lambda(S_K)at)^{-(K-k)-\frac{1}{a}} \frac{(1+a)(1+2a)\dots(1+(K-k-1)a)}{(K-k)!} - \\ - (M(S_K)t)^{K-k} (1 + M(S_K)at)^{-(K-k)-\frac{1}{a}} \frac{(1+a)(1+2a)\dots(1+(K-k-1)a)}{(K-k)!}; \\ P_0(t) = 1 - \sum_{k=1}^K (\Lambda(S_K)t)^{K-k} (1 + \Lambda(S_K)at)^{-(K-k)-\frac{1}{a}} \frac{(1+a)(1+2a)\dots(1+(K-k-1)a)}{(K-k)!} + \\ + \sum_{k=1}^K (M(S_K)t)^{K-k} (1 + M(S_K)at)^{-(K-k)-\frac{1}{a}} \frac{(1+a)(1+2a)\dots(1+(K-k-1)a)}{(K-k)!} \dots \end{array} \right. \quad (16)$$

Висновки:

1. Початкове задання системи "поверхневий шар" із залежними локальними областями контактів зводиться до процесів її деградації (зношування і відмов), а також відновлення шляхом використання граничної теореми потоків.

2. В залежності від вигляду функції інтенсивності сумарного потоку відмов і відновлення наведені часткові рішення систем стохастичних диференціальних рівнянь Колмогорова.

3. Отримані розв'язки не можуть задовольнити існуюче різноманіття умов функціонування трибоспрязень деталей машин та залежностей швидкості зношування і відновлення їх робочих поверхонь з більш складним виглядом. У загальному вигляді систему диференціальних рівнянь доцільно розв'язувати чисельними методами.

4. Виявлено, що ефективним є аналіз часткових випадків, особливо коли розглядаються стохастичні процеси з безперервним перебігом часу і дискретними станами системи.

5. Викликає інтерес і випадкові процеси з дискретним перебігом часу і станами та ефективність їх розв'язання є використанням математичного апарату ланцюгів Маркова.

Список літератури

1. Замота Т.Н., Аулін В.В. Управление процессами приработки основных сопряженных деталей машин при изготовлении и ремонте: Монография. Кировоград: изд. Лысенко В.Ф., 2015, 303 с.
2. Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення: монографія / Аулін В.В. та ін.; за ред. В.В. Ауліна. Кропивницький: Лисенко В. Ф. 2016. 303 с.
3. Аулін В.В., Лисенко С.В., Замота Т.М. Зменшення механічних втрат в основних спряженнях деталей дизелів МСГТ і АТТ триботехнологіями відновлення. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Сер.: Техніка та енергетика АПК.* 2017. Вип.262. С.211-227.
4. Трибологические переходы при приработке поверхностей трения сопряженных деталей / Аулін В.В. и др. *Проблеми трибології.* 2017. № 4. С. 87-96.
5. Можливості технологій триботехнічного відновлення для підвищення зносостійкості і довговічності спряжень деталей транспортних засобів / Аулін В.В. та ін. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: науковий журнал.* 2018. №1(10). С. 5-11.
6. Аулін В.В., Лисенко С.В. Фізико-технологічні засади підвищення надійності трибосистем дизелів мобільної сільськогосподарської техніки. *Вісник ЖНАЕУ: науково-теоретичний збірник.* 2014. вип. № 2 (45), т.4, ч.ІІ. С. 56-68.
7. Аулін В.В., Замота Т.Н., Лысенко С.В. Повышение эксплуатационной износостойкости деталей

- машин их триботехническим восстановлением и управлением процессами приработки. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2016. Vol.18. No.2. P. 89-96.
8. Аулин В.В., Замота Т.Н. Развитие площади пятна контакта при макроприработке поверхностей трения. *Проблеми трибології*. 2012. №1. С.9-13.
 9. Аулин В.В., Замота Т.Н., Лысенко С.В. Повышение долговечности мобильной сельскохозяйственной и автотранспортной техники триботехнологиями приработки основных сопряжений деталей двигателей. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. №8. С. 55-68.
 10. Сорокатый Р.В., Кузьменко А.Г. Определение параметров модели процессов изнашивания представленных в виде цепи Маркова. *Проблемы трения и изнашивания*. 1995. №1. С. 14-20.
 11. Сорокатый Р.В. Метод трибоэлементов. монография. Хмельницкий: ХНУ, 2009. 242 с.
 12. Sorokatyj, R.V. Modeling the behavior of tribosystems using the method of triboelements. *Trenie i Iznos*. 2002. №23 (1), pp. 16-22.
 13. Аулін, В.В., Лисенко С.В., Білик А.П. Трибофізичне та фізико-технологічне обґрунтування комбінованого функціонально-спрямованого зміцнення та модифікування деталей і робочих органів СГТ. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2014. Вип. 44. С. 92-103.
 14. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: монографія. Кіровоград: Вид. Лисенко В.Ф., 2014. 370 с.
 15. Масштабно-рівневий підхід до аналізу процесів в матеріалах трибоспрямлень деталей мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки / Аулін В.В., Лисенко С.В., Великодний Д.О., Гупка А.Б. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2017. Вип.47,ч.І. С.52-59.
 16. Аулін В. В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки: дис. ... д-ра. техн. наук : 05.02.04 / КНТУ. Кіровоград, 2014. 447 с.
 17. Алексеев В.П. Электрохимико-механическая макроприработка деталей: монография. Луганск: Элтон-2, 2011. 204 с.
 18. Аулін В.В. Основні синергетичні компоненти прояву різних форм самоорганізації в триботехнічних системах. Зб. м-лів міжнар. наук.-практ. конф. "Ольвійський форум - 2012", Ялта., 2012. т. 12. С.60-62.
 19. Аулін В.В., Кузик О.В. Системно-спрямований підхід та синергетична концепція реалізації процесів і станів самоорганізації матеріалів елементів, робочих та технологічних середовищ триботехнічних систем. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту.* 2014. Вип. 27. С.78-87.
 20. Аулин В.В., Лысенко С.В. Технологии триботехнического восстановления изношенных поверхностей деталей с использованием композиционного масла и воздействия физических полей. *Проблемы автомоб.-дорожного комплекса России: Эксплуатация и развитие автомоб. транспорта: м-лы X междунар.заочн.науч.-техн. конф. 21 ноября 2013 г.* Пенза: ПГУАС, 2013. С.7-16.
 21. Аулін В.В. Методологія розв'язання проблеми підвищення зносостійкості деталей і робочих органів сільськогосподарської техніки. *Вісник ЖНАЕУ*. 2014. Вип. № 2 (45), т.4, ч.ІІ. С. 80-91.
 22. Аулін В.В., Лисенко С.В., Лисенко В.М. Триботехнічне відновлення протягом строку служби дизелів. *Проблеми трибології (Problems of tribology)*. 2007. №2 (44). С. 60-62.
 23. Кравец И.А. Ремонтная регенерация трибосистем. Тернополь: Бережанский агротехн. ин-т, 2003. 284 с.
 24. Войтов В.А., Стадниченко Н.Г., Джус Р.Н., Стадниченко В.Н. Технологии триботехнического восстановления. Обзор и анализ перспектив. *Проблеми трибології*. 2005. №2. С. 86-94.
 25. Сафонов Б.П., Трещёв С.Г., Лукиенко Л.В., Сазонов В.Д. О применении триботехнических составов для повышения ресурса тяжело нагруженных деталей машин. *Вестник машиностроения*. 2003. №6. С. 39-43.
 26. Войтов В. А., Білик А.П., Сторожук В.В. Реологічні дослідження мікроструктурних змін захисного покриття, яке утворене за допомогою триботехнічної відновлювальної суміші ТВС„Комбат”. *Проблеми трибології*. 2008. № 1. С. 34-38.
 27. Стадніченко М.Г. та ін. Оцінка ефективності використання технологій триботехнічного відновлення для подовження ресурсу засобів наземного забезпечення дій авіації. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2012. № 1. С. 32-34.
 28. Aulin V. et al. Wear resistance increase of samples tribomating "Steel 45-cast iron SCH20" with geo modifier KGMF-1. *Problems of tribology*. 2019. Vol. 92, no. 2. С. 55-60.
 29. Aulin V. et al. Regularities of dynamics of change in tribotechnical characteristics of coatings formed by

- tribotechnologies of restoration. *Problems of tribology*. 2019. Vol. 91, no. 1. С. 73-80.
30. Aulin V. et al Wear resistance increase of samples tribomating in oil composite with geo modifier KGMF-1. *Tribology in Industry*. 2019. Vol. 41. №. 2. P. 156-165.
 31. Аулін В.В. та ін. Напружено-деформований стан поверхневого шару деталей при реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення. *Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Вип. 1(32). С.103-113.
 32. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Голуб Д.В. Синергетика підвищення надійності машин використанням моделей марківських процесів. *Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь*: зб. тез V Всеукр. наук.-практ. конф., 28-29 бер. 2019 р. Житомир: ЖАТК, 2019. С. 242-245.
 33. Аулін В.В. Системно-спрямований підхід до розробки технологій безрозбірного відновлення спряжень деталей. Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції "Крамаровські читання", 21-22 лют. 2019 р., м. Київ: НУБіП, 2019. С. 94-96.
 34. Аулін В.В. Можливості технологій триботехнічного відновлення для підвищення зносостійкості і довговічності спряжень деталей транспортних засобів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2018. №1(10). С. 5-11.
 35. Аулін В. В., Лисенко С.В., Кузик О.В., Жилова І.В. Фізико-мезомеханічний підхід до виявлення характеру зношування спряжень деталей сільськогосподарської і автотранспортної техніки. *Проблеми трибології*. 2017. № 4. С. 82-86.
 36. Aulin V. et al. Exploring a possibility to control the stressed-strained state of cylinder liners in diesel engines by the tribotechnology of alignment. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2019. № 3(12). С. 6-16.
 37. Аулін В.В., Лисенко С.В., Замота Т.М. Зменшення механічних втрат в основних спряженнях деталей дизелів МСГТ і АТТ триботехнологіями відновлення. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Сер.: Техніка та енергетика АПК*. 2017. Вип. 262. С. 211-227.

References

1. Zamota, T.N., Aulin, V.V. (2015). *Upravlenie protsessami prirabotki osnovnykh sopryazheniy detaley mashin pri izgotovlenii i remonte [Management of the running-in processes of the main interfaces of machine parts in the manufacture and repair]*. Kirovograd: izd. Lyisenko V.F. [in Russian].
2. Aulin, V.V. at all. (2016). *Trybofizychni osnovy pidvyshchennia nadiinosti mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniki trybotekhnichnoho vidnovlennia: monohrafiia [Tribophysical fundamentals of increasing the reliability of mobile agricultural and motor vehicles with tribotechnical recovery technologies: monograph]*. Kropyvnytskyi: Lysenko V.F. [in Ukrainian].
3. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Zamota, T.M. (2017). *Zmshennia mekhanichnykh vtrat v osnovnykh spriazhenniakh detalei dyzeliv MSHT i ATT trybotekhnolohiiamy vidnovlennia [Reduction of mechanical losses in the main conjugations of the details of the MSCM and MV diesels with tribotechnology of restoration]*. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Ser.: Tekhnika ta enerhetyka APK – Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Ser.: APC Engineering and Energy, Issue 262, 211-227* [in Ukrainian].
4. Aulin, V.V. at al. (2017). *Tribologicheskie perehody pri prirabotke poverhnostej treniya sopryazhenij detalej [Tribological transitions in the fitting of friction surfaces of joints of parts]*. *Problemy trybolohii - Problems of tribology, № 4, 87-96* [in Russian].
5. Aulin, V.V. et al. *Mozhlyvosti tekhnolohii trybotekhnichnoho vidnovlennia dlia pidvyshchennia znosostiikosti i dovhovichnosti spriazhen detalei transportnykh zasobiv [Possibilities of tribotechnical restoration technologies to improve the durability and durability of the conjugations of vehicle parts]*. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti: naukovyi zhurnal – Modern technologies in mechanical engineering and transport: scientific journal, №1(10), 5-11* [in Ukrainian].
6. Aulin, V.V., Lysenko, S.V. (2014). *Fizyko-tekhnolohichni zasady pidvyshchennia nadiinosti trybosystem dyzeliv mobilnoi silskohospodarskoi tekhniki [Physico-technological principles of increasing the reliability of tribosystems of diesels of mobile agricultural machinery]*. *Visnyk ZhNAEU: naukovoteoretychnyi zbirnyk - ZhNAEU Bulletin: scientific and theoretical collection, issue. № 2(45), T. 4, part II. 56-68* [in Ukrainian].
7. Aulin, V.V., Zamota, T.N., Lysenko, S.V. (2016). *Povyshenie ekspluatacionnoy iznosostoykosti detaley mashin ih trybotekhnicheskim vosstanovleniem i upravleniem protsessami prirabotki [Improving the operational wear resistance of machine parts by their tribotechnical restoration and management of*

- running-in processes]. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol.18, No.2*, 89-96 [in Russian].
8. Aulin, V.V., Zamota, T.N. (2012). Razvitie ploschadi pyatna kontakta pri makroprirobotke poverhnostey treniya [The development of the area of the contact spot during macroprocessing of friction surfaces]. *Problemi tribologii – Problems of tribology, №1*, 9-13 [in Russian].
 9. Aulin, V.V., Zamota, T.N., Lysenko, S.V. (2017). Povyshenie dolgovechnosti mobil'noy sel'skohozyaystvennoy i avtotransportnoy tehniky tribotekhnologiyami prirobotki osnovnykh sopryazheniy detaley dvigateley [Improving the longevity of mobile agricultural and motor vehicles with tribotechnologies of running-in of the main interfaces of engine parts]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv – Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes, №8*, 55-68 [in Russian].
 10. Sorokatyj, R.V., Kuzmenko, A.G. (1995). Opredelenie parametrov modeli processov iznashivaniya predstavlenykh v vide cepi Markova [Determination of the parameters of the wear process model presented in the form of a Markov chain]. *Problemy treniya i iznashivaniya – Friction and Wear Problems. №1*, 14-20 [in Russian].
 11. Sorokatyj, R.V. (2009). *Metod triboelementov. monografiya [The method of triboelements. monograph]*. Hmel'nickij: HNU. 242 s. [in Russian].
 12. Sorokatyj, R.V. (2002). Modeling the behavior of tribosystems using the method of triboelements. *Trenie i Iznos, №23 (1)*, 16-22 [in English].
 13. Aulin, V.V., Lysenko S.V., Bilyk A.P. (2014). Trybofizychni ta fizyko-tekhnologichne obgruntuvannya kombinovanoho funktsionalno-spriamovanoho zmitsnennia ta modyfikuvannya detalei i robochykh orhaniv SHT [Tribophysical and physico-technological substantiation of combined functionally directed strengthening and modification of parts and working bodies of the SGT]. *Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn: Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovy-tekhnichniy zbirnyk – Design, production and operation of agricultural machines: National interagency scientific and technical collection, Vol. 44*, 92-103 [in Ukrainian].
 14. Aulin, V.V. (2014). *Fizychni osnovy protsesiv i staniv samoorhanizatsii v trybotekhnichnykh systemakh: monografiia [Physical bases of processes and states of self-organization in tribotechnical systems: monograph]*. Kirovohrad: Vyd. Lysenko V.F. [in Ukrainian].
 15. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Velykodnyi, D.O. & Hupka, A.B. (2017). Masshtabno-rivnevyy pidkhid do analizu protsesiv v materialakh trybospriazhen detalei mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniki [A scale-level approach to the analysis of processes in tribal materials of details of mobile agricultural and motor vehicles] *Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovy-tekhnichniy zbirnyk. Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn – National interagency scientific and technical collection. Design, production and operation of agricultural machines, Issue 47, Part II*, 52-59 [in Ukrainian].
 16. Aulin, V.V. (2014). Trybofizychni osnovy pidvyshchennia znosostiikosti detalei ta robochykh orhaniv silskohospodarskoi tekhniki [Tribophysical bases of increase of wear resistance of details and working bodies of agricultural machinery]: dys. ... d-ra. tekhn. nauk : 05.02.04 / KNTU. Kirovohrad. 447 s [in Ukrainian].
 17. Alekseev, V.P. (2011). *Elektrokhimiko-mekhanicheskaya makroprirobotka detalej: monografiya [Electrochemical-mechanical macroprocessing of parts: monograph]*. Lugansk: Elton-2 [in Russian].
 18. Aulin, V.V. (2012). Osnovni synerhetychni komponenty proiavu riznykh form samoorhanizatsii v trybotekhnichnykh systemakh [The main synergistic components of manifestation of various forms of self-organization in tribotechnical systems]. *Zb. m-liv mizhnar. nauk.-prakt. konf. "Olviyskiy forum - 2012" – Coll. materials international. Research Practice Conf. "Olvia Forum 2012"*, Yalta. t. 12. 60-62 [in Ukrainian].
 19. Aulin, V.V. & Kuzyk, O.V. (2014). Systemno-spriamovanyi pidkhid ta synerhetychna kontseptsiiia realizatsii protsesiv i staniv samoorhanizatsii materialiv elementiv, robochykh ta tekhnologichnykh seredovyshch trybotekhnichnykh system [System-oriented approach and synergetic concept of realization of processes and states of self-organization of materials of elements, working and technological environments of tribotechnical systems]. *Zb. nauk. prats KNTU/ Tekhnika v s/h vyrobnytstvi, haluzeve mashynobud., avtomatyzatsiia – Coll. Sciences. of KNTU / Engineering in agricultural production, industry machine building., automation*, Vol. 27, 78-87 [in Ukrainian].
 20. Aulin, V.V. & Lysenko, S.V. (2013). Tehnologii tribotekhnicheskogo vosstanovleniya iznoshennykh poverhnostej detalej s ispolzovaniem kompozitsionnogo masla i vozdejstviya fizicheskikh polej [Technologies for tribotechnical restoration of worn surfaces of parts using composite oil and exposure to physical fields]. *Problemy avtomob.-dorozhnogo kompleksa Rossii: Ekspluatatsiya i razvitie avtomob. transporta – Problems of the automobile-road complex of Russia: Operation and development of*

- automobile. Transport: m-ly X mezhdunar.zaochn.nauch.-tehn. konf. 21 noyabrya 2013 g. Penza: PGUAS, S.7-16 [in Russian].*
21. Aulin, V.V. (2014). Metodolohiia rozviazannia problemy pidvyshchennia znosostiikosti detalei i robochykh orhaniv silskohospodarskoi tekhniki [Methodology for solving the problem of increasing the wear resistance of parts and working bodies of agricultural machinery]. *Visnyk ZhNAEU – Bulletin of ZhNAEU, Vol. № 2 (45), t.4, ch.II*, 80-91 [in Ukrainian].
 22. Aulin, V.V., Lysenko, S.V. & Lysenko, V.M. (2007). Trybotekhnichne vidnovlennia protiahom stroku sluzhby dyzeliv [Tribotechnical restoration during the diesel service life]. *Problemy trybolohii – Problems of tribology, №2 (44)*, 60-62 [in Ukrainian].
 23. Kravec, I.A. (2003). Reparativnaya regeneraciya tribosistem [Reparative regeneration of tribosystems]. Ternopol: Berezhanskij agrotehn. in-t [in Russian].
 24. Vojtov, V.A., Stadnichenko, N.G., Dzhus, R.N. & Stadnichenko, V.N. (2005). Tehnologii tribotekhnicheskogo vosstanovleniya. Obzor i analiz perspektiv [Tribotechnical recovery technologies. Overview and analysis of prospects]. *Problemi tribologiyi – Problems of tribology, №2*, 86-94 [in Russian].
 25. Safonov, B.P., Treshyov, S.G., Lukienko, L.V., Sazonov, V.D. (2003). O primenenii tribotekhnicheskikh sostavov dlya povysheniya resursa tyazhelo nagruzhennykh detalej mashin [On the use of tribological compositions to increase the resource of heavily loaded machine parts]. *Vestnik mashinostroeniya – Bulletin of mechanical engineering, №6*, 39-43 [in Russian].
 26. Voitov, V.A., Bilyk, A.P. & Storozhuk, V.V. (2008). Reolohichni doslidzhennia mikrostrukturnykh zmin zakhysnoho pokryttia, yake utvorene za dopomohoiu trybotekhnichnoi vidnovliuvanoi sumishi TVS, „Kombat” [Rheological studies of the microstructural changes of the protective coating, which is formed with the help of a tribotechnical restorative mixture of the TVS, „Kombat”]. *Problemy trybolohii – Problems of tribology, № 1*, 34-38 [in Ukrainian].
 27. Stadnichenko, M.H. et al. (2012). Otsinka efektyvnosti vykorystannia tekhnolohii tribotekhnichnoho vidnovlennia dlia podovzhenia resursu zasobiv nazemnoho zabezpechennia dii aviatsii [Assessment of the efficiency of the use of tribotechnical recovery technologies to extend the aviation ground support resources]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy – Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine, № 1*, 32-34 [in Ukrainian].
 28. Aulin, V. et al. (2019). Wear resistance increase of samples tribomating "Steel 45-cast iron SCH20" with geo modifier KGMF-1. *Problems of tribology, Vol. 92, no. 2*, 55-60 [in English].
 29. Aulin, V. et al. (2019). Regularities of dynamics of change in tribotechnical characteristics of coatings formed by tribotechnologies of restoration. *Problems of tribology, Vol. 91, no. 1*, 73-80 [in English].
 30. Aulin, V. et al. (2019). Wear resistance increase of samples tribomating in oil composite with geo modifier KGMF-1. *Tribology in Industry, Vol. 41. №. 2*, P. 156-165 [in English].
 31. Aulin, V.V. et al. (2019). Napruzhenno-deformovanyi stan poverkhnevoho шарu detalei pry realizatsii trybotekhnolohii prypratsiuvannia i vidnovlennia [Stress-deformed state of the surface layer of parts in the implementation of tribotechnology of working out and restoration]. *Tsentrалnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Engineering sciences, Vyp. 1(32)*, 103-113 [in Ukrainian].
 32. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V., Lysenko S.V., Holub, D.V. (2019). Synerhetyka pidvyshchennia nadiinosti mashyn vykorystanniam modelei markivskykh protsesiv [Synergetics of increasing machine reliability using models of Markov processes]. *Perspektyvy i tendentsii rozvytku konstrukttsii ta tekhnichnoho servisu silskohospodarskykh mashyn i znariad – Prospects and tendencies of development of designs and technical service of agricultural machines and implements: zb. tez V Vseukr. nauk.-prakt. konf.*, 28-29 ber. 2019 r. Zhytomyr: ZhATK, S. 242-245 [in Ukrainian].
 33. Aulin, V.V. (2019). Systemno-spriamovanyi pidkhid do rozrobky tekhnolohii bezrozbirnoho vidnovlennia spriazhen detalei [System-oriented approach to the development of indiscriminate repair of joints of parts]. *Zbirnyk tez dopovidei VI Mizhnarodnoi naukovy-tekhnichnoi konferentsii "Kramarovski chytannia" – Proceedings of the 6th International Scientific and Technical Conference "Kramarovski Readings"*, 21-22 liut. 2019 r., m. Kyiv: NUBiP, S. 94-96 [in Ukrainian].
 34. Aulin, V.V. (2018). Mozhlyvosti tekhnolohii trybotekhnichnoho vidnovlennia dlia pidvyshchennia znosostiikosti i dovhovichnosti spriazhen detalei transportnykh zasobiv [Possibilities of tribotechnical restoration technologies to improve the durability and durability of the coupling of vehicle parts]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti – Modern technologies in mechanical engineering and transport, 1(10)*, 5-11 [in Ukrainian].
 35. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Kuzyk, O.V. & Zhylova, I.V. (2017). Fyzyko-mezomekhanichni pidkhid do vyjavlennia kharakteru znoshuvannia spriazhen detalei silskohospodarskoi i avtotransportnoi tekhniki [Physico-mesomechanical approach to detecting the nature of the wear of the coupling of agricultural and

- motor vehicle parts]. *Problemy trybolohii – Problems of tribology*, 4, 82-86 [in Ukrainian].
36. Aulin V. et al. (2019). Exploring a possibility to control the stressed-strained state of cylinder liners in diesel engines by the tribotechnology of alignment. *East European Journal of Advanced Technology*, 3(12), 6-16 [in English].
37. Aulin, V.V., Lysenko, S.V. & Zamota, T.M. (2017). Zmenshennia mekhanichnykh vtrat v osnovnykh spriazhenniakh detalei dyzeliv MSHT i ATT trybotekhnolohiiamy vidnovlennia [Reduction of mechanical losses in the main interconnections of details of diesel engines MSGT and ATT by tribotechnology of restoration]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Ser.: Tekhnika ta enerhetyka APK – Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Ser. : APC Engineering and Energy*, 262, 211-227 [in Ukrainian].

Viktor Aulin, Prof., DSc., **Sergey Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrey Grinkiv**, Senior Researcher, PhD tech. sci., Doctoral student

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The Reliability Model of Parts of Transport Vehicles for the Implementation of Tribological Technologies for Their Running-in and Recovery

The necessity of building physical and mathematical models of reliability with the consideration of random processes and the number of local areas during wear and restoration using tribotechnologies of working out and restoration is substantiated. The change of states of systems of a surface layer and a part as a whole is presented in the form of graphs for cases of research of processes of wear and restoration and their consideration as systems. Technical states are represented as discrete sets. A pseudostate method was used to build the reliability model and a graph was developed that combined processes of wear and restoration of surface layers of parts.

The surface model of the workpiece consists of k sublayers. The behavior of the surface layer system is considered in terms of reliability as the behavior of a system of sets of interdependent local contact areas. The stochastic model of part reliability is reduced to a system of surface layers with random local contact areas of conjugated parts. The graph of the pseudostates of the surface layer system under different conditions is given. A system of stochastic differential equations is obtained to consider the processes of degradation and reconstruction of pseudostates and give partial solutions to it.

Three partial cases of non-stationary wear and restoration of the surface layer system are considered: the intensity of these processes in the local contact areas of the surface layer do not depend on their working quantity, but are only a function of time; the intensity of wear and tear in local contact areas is independent of the number of them working at a given time; the wear and tear intensity is a function of time and number of working contacts.

It is determined that the efficiency of the process of solving problems, reflected in partial cases, is significantly increased when using the mathematical apparatus of Markov chains.

reliability, tribological technologies of running-in, tribotechnologies of restoration, physical model of reliability, surface layer, transport machines

Одержано (Received) 03.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 10.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

УДК 629.33

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).65-75](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).65-75)

В.В. Аулин, проф., д-р техн. наук, **Т.Н. Замота**, доц., д-р техн. наук, **А.В. Гриньків**, ст. наук. співр., канд. техн. наук, докторант, **С.В. Лысенко**, доц., канд. техн. наук, **О.В. Крупица**, соискатель, **К.К. Панайотов**, доц., канд. техн. наук

Центральнoукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна

e-mail: Zamota71@gmail.com

Обоснование использования современных подходов для усовершенствования диагностирования систем и агрегатов автомобиля

Рассмотрены современные методы диагностики технического состояния автомобилей. Особое внимание уделено системе зажигания. Система зажигания считается одной из самых сложных систем автомобиля, на долю которой традиционно приходится большой процент неисправностей и нарушений регулировок. Неисправность системы зажигания значительно ухудшает работу автомобиля, что увеличивает расход топлива, и снижает мощность двигателя. В двигателях внутреннего сгорания процесс поиска и анализа неисправностей осуществляется с помощью визуального наблюдения за осциллограммами напряжения в первичной и вторичной цепи. В современных диагностических системах возможна реализация всех вышеуказанных подходов диагностирования неисправности за счет использования интеллектуальных программно-аппаратных комплексов (интеллектуальных датчиков) для мониторинга, контроля и управления. Подобные средства вычислительной техники обладают универсальностью, так как в них есть возможность изменение программного обеспечения, что позволяет управлять процессом их работы и функциональными возможностями.

система зажигания, неисправности, диагностирование, интеллектуальная система технического обслуживания

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **Т.Н. Замота**, доц., д-р техн. наук, **А.В. Гриньків**, ст. научн. сотр., канд. техн. наук, докторант, **С.В. Лысенко**, доц., канд. техн. наук, **О.В. Крупица**, здобувач, **К.К. Панайотов**, доц., канд. техн. наук

Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Система запалювання, несправності, діагностування, інтелектуальна система технічного обслуговування

Розглянуто сучасні методи діагностики технічного стану автомобіля. Особливу увагу зосереджено на системі запалювання. Система запалювання вважається однією з найскладніших систем автомобіля, на частку якої традиційно припадає великий відсоток несправностей та порушень регулювань. Несправність системи запалювання значно погіршує роботу автомобіля, що збільшує витрату палива і знижує потужність двигуна. У бензинових двигунах внутрішнього згорання процес пошуку та аналізу несправностей здійснюється за допомогою візуально спостереження за осцилограмами напруги в первинному і вторинному ланцюзі. У сучасних діагностичних системах можлива реалізація всіх зазначених підходів, для діагностування несправності за рахунок використання інтелектуальних програмно-апаратних комплексів (інтелектуальних датчиків) для моніторингу, контролю і управління. Подібні засоби обчислювальної техніки володіють універсальністю, так як в них є можливість зміна програмного забезпечення, що дозволяє управляти процесом їх роботи і функціональними можливостями.

система запалювання, несправності, діагностування, інтелектуальна система технічного обслуговування

Постановка проблемы. В процессе эксплуатации автомобиля сопряжения деталей систем и агрегатов подвергаются естественному износу; возникают условия для ухудшения работы и наступления катастрофического изнашивания. Основным условием надежной и долговечной работы автомобиля является грамотная эксплуатация, своевременное выявление и устранение эксплуатационных неисправностей, которое возможно при диагностировании технического состояния.

Диагностирование является элементом технического обслуживания и текущего ремонта и предназначено для обнаружения скрытых неисправностей в системах и агрегатах автомобиля без дополнительной их разборки. Техническая диагностика состоит из теории, методов и средств определения технического состояния автомобиля с целью его безопасной эксплуатации, проверки соответствия показателей эксплуатационных свойств нормативным значениям, определения неисправностей, оценки стоимости автотранспортного средства (АТС) и восстановительных работ при устранении дефектов [1].

На основе технической диагностики формулируются методы повышения эффективности эксплуатации автомобилей, снижения затрат на техническое обслуживание и ремонт. Поскольку система зажигания считается одной из самых сложных систем, на долю, которой традиционно приходится большой процент неисправностей и нарушений регулировок, то диагностике состояния этой систем следует уделить больше внимания. Неисправность системы зажигания значительно ухудшает работу автомобиля, что увеличивает расход топлива, и снижает мощность двигателя. В бензиновых двигателях внутреннего сгорания процесс поиска и анализа неисправностей осуществляется с помощью визуального наблюдения за осциллограммами напряжения в первичной и вторичной цепи.

При очевидных достоинствах существующих средств и методов диагностики, они имеют ряд недостатков. Это прежде всего зависимость от квалификации и профессионализма оператора-диагноста, а так же получение информации в момент технического обслуживания [2,3].

На сегодняшний день используются встроенные и внешние средства диагностирования узлов, систем и агрегатов автомобилей. Они позволяют диагностировать автомобиль в процессе эксплуатации. Сочетание встроенных и внешних средств диагностирования значительно повышает уровень достоверности получаемой информации, что улучшает качество технического обслуживания и ремонта.

Компьютерная диагностика автомобиля дает возможность производить тестирование различных электронных систем и исполнительных механизмов автомобиля, влияющих на работу бортовых систем, а также выявить неисправности, связанных с их работой. На основании полученных данных составляются диагностические карты неисправностей узлов, систем и агрегатов для последующего ремонта и устранения неполадок, связанных с автомобильным электрооборудованием и исполнительными системами [4]. Станции технического обслуживания автомобилей используют различные диагностические адаптеры, дилерские сканеры и приборы дилерского уровня, предназначенные для диагностики определенной марки или моделей автомобилей.

Традиционно широкое применение находят численные методы обработки полученных данных по техническому состоянию систем и агрегатов с целью моделирования протекающих в них процессов, проектирования прототипов различных узлов, систем и агрегатов, а также прогнозирования эксплуатационных неполадок. Применение численных методов обнаружения и диагностики неисправностей привело к выделению целого ряда подходов к проведению диагностических операций:

– базирующийся на математическом моделировании диагностируемой системы;

– основанных на базе диагностических данных;
– используемых накопленные знания о типовых неисправностях и методах их влияния.

В современных диагностических системах возможна реализация всех вышеуказанных подходов для диагностирования неисправности за счет использования интеллектуальных программно-аппаратных комплексов (интеллектуальных датчиков) для мониторинга, контроля и управления. Подобные средства вычислительной техники обладают универсальностью, так как в них заложена возможность изменения программного обеспечения, что позволяет управлять процессом их работы и функциональными возможностями.

Анализ предыдущих исследований и публикаций. Согласно многочисленным литературным источникам и отзывам технических специалистов [5,6,7,8] эффективный алгоритм проведения компьютерной диагностики автомобиля состоит из следующих этапов:

- сбор данных о технической эксплуатации автомобиля до момента проверки;
- определение имеющихся и сохранённых ошибок;
- просмотр потока данных (Data Stream);
- логирование данных "в движении";
- сравнение полученных данных в ходе диагностики с требованиями технических условий на эксплуатацию и ремонт автомобиля;
- проведение испытаний узлов, систем и агрегатов после технического обслуживания и ремонта;
- применение специализированных средств диагностики (осциллографа, омметра, газоанализатора и т.д.), если предыдущие этапы компьютерной диагностики обнаружили неисправность, но не удалось определить ее причину.

Существующая система диагностирования технического состояния автомобиля имеет ряд недостатков, может приводить к субъективным выводам о необходимости вида технического обслуживания, перечня работ и оптимального момента их проведения.

Что касается системы зажигания двигателя, то она является многопараметрической и к основным управляемым параметрами можно отнести температуру двигателя (скорость её изменения), структуру топливовоздушной смеси λ и другие. Зависимость скорости изменения температуры нагревания двигателя внутреннего сгорания от нагрузки и частоты вращения коленчатого вала, отображена на рис. 1, а для структуры топливовоздушной смеси (λ) – показана на рис. 2 [9, 10, 11].



Рисунок 1 – Функциональная зависимость скорости изменения температуры от частоты вращения коленчатого вала и двигателя от нагрузки

Источник: [9, 10]

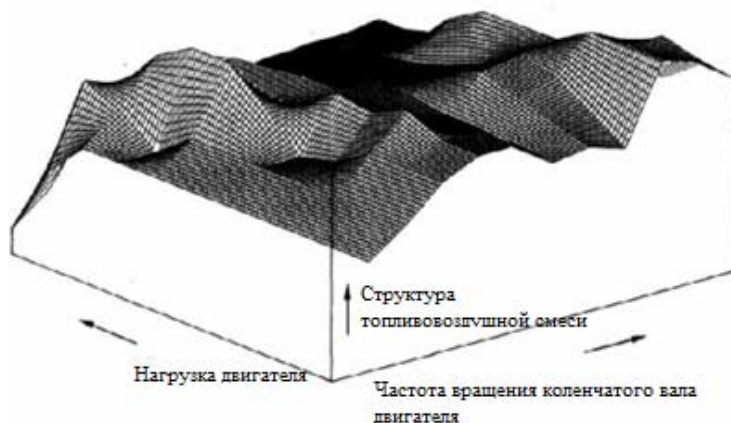


Рисунок 2 – Функциональная зависимость структуры топливоздушнoй смеси от частоты вращения коленчатого вала и нагрузки

Источник: [9, 10]

Важным управляющим фактором для работы системы зажигания, является угол опережения зажигания (УОЗ). Он зависит как от частоты вращения коленчатого вала, так и от температуры двигателя и нагрузки на него. Многофакторность зависимостей угла опережения зажигания представлена в виде характеристической карты, представленной на рис. 3 и 4.

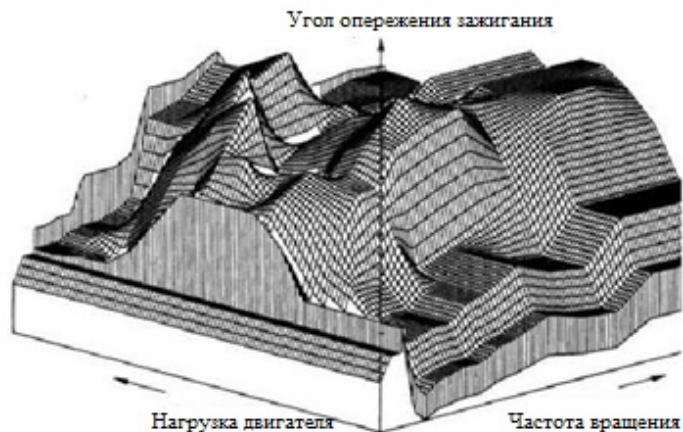


Рисунок 3 – Функциональная зависимость угла опережения зажигания от частоты вращения двигателя и его нагрузки

Источник: [9, 10]

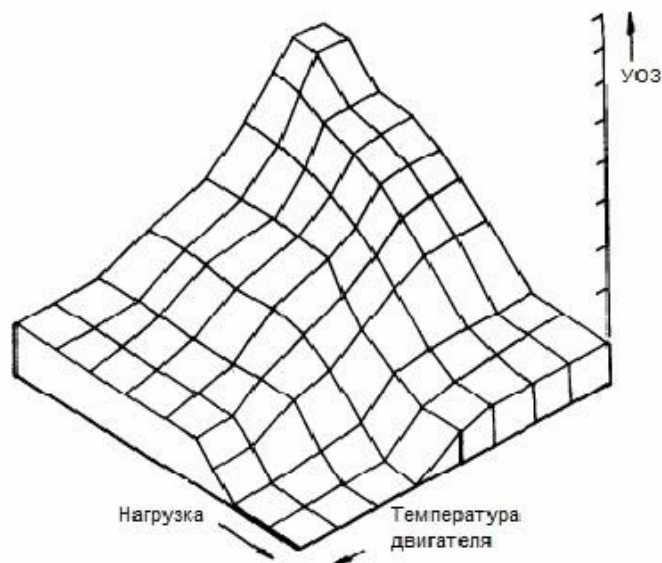


Рисунок 4 – Функциональная зависимость угла опережения зажигания от температуры двигателя и нагрузки

Источник: [9, 10]

Анализируя вышеуказанные рисунки можно прийти к выводу, что показные на них зависимости многомерны и сложны, и обработка этих функциональных зависимостей требует применения мощных вычислительных ресурсов [12, 13].

Постановка задачи. Целью данной работы является исследование современных подходов к диагностированию систем и агрегатов автомобиля и выявление направления их усовершенствования вообще и для системы зажигания в частности.

Изложение основного материала. Чтобы более эффективно использовать диагностику, базирующуюся на подходе с помощью совокупности методов математического моделирования, необходимы знания физических процессов, протекающих в элементах диагностируемой системы. Это свидетельствует о необходимости использования их киберфизических закономерностей. Также необходимы математические модели, характеризующие эти процессы, и наличие оптимального числа физических датчиков для мониторинга состояния узлов систем и агрегатов, которые подлежат диагностике. Как следствие вышеперечисленные условия ограничивают применение подхода с математическим моделированием диагностируемой системы. Его применение реально для случаев с небольшим количеством возможных состояний, а также с малым количеством входных и выходных данных. Применение подхода математического моделирования диагностируемой системы в чистом виде для систем зажигания затруднено сложностью расчета электромагнитного поля, которое генерируется компонентами системы зажигания вблизи двигателя внутреннего сгорания и корпуса автомобиля

В ситуациях, когда получение точной математической модели диагностируемой системы невозможно из-за ее сложности или недопустимо по причине защиты интеллектуальной собственности, возможно использование подхода, основанного на базе диагностических данных. В этом случае полученные эмпирические данные при диагностировании систем и агрегатов, работающих как в нормальных условиях, так и при наличии неисправности, являются главным источником информации. В качестве примера применения методов подхода, основанного на базе диагностических данных, можно привести использование статистических методов анализа данных, полученных в

процессе различных режимов работы диагностируемых систем и агрегатов, а также компьютерных алгоритмов (методов опорных векторов, нейронных сетей, нечеткой логики, генетических алгоритмов). Возможности диагностики интеллектуально-информационных систем, основанных на таких алгоритмах, очень разнообразны и ограничены только минимальным количеством доступных данных диагностических параметров.

В тех случаях, когда есть реальная возможность установления причинно-следственных связей, применим подход использующий накопленные знания о типовых неисправностях и методах их влияния. В этом случае используют экспертные системы, которые основаны на результатах эмпирического анализа. Накопленные знания формализуются в виде графических моделей, что дает возможность повысить уровень абстракции при проведении диагностики. При таком подходе у диагностируемой системы есть возможность определить сразу несколько возможных причин той или иной неисправности, и присвоить ей определенную вероятность. Такой подход вызывает определенный интерес, однако он, не нашел широкого применения из-за недостаточной изученности причинно-следственных связей особенно в электромагнитной совместимости узлов систем автомобиля.

Внедрение и использование интеллектуальных программно-аппаратных комплексов основано на переработке измерительной данных с помощью средств вычислительной техники. Это предоставляет новые функциональные возможности по анализу и обработки информации.

Управление системой зажигания – это многоступенчатая, сложная задача. При увеличении частоты вращения коленчатого вала и нагрузки на двигатель с динамическим тепловоздушным обменом, рабочая смесь переходит в состояние турбулентности, что приводит к срыву дугового разряда в свече зажигания. Для надежного зажигания смеси требуется увеличение энергии искры. Чтобы управлять энергией искры необходимо корректировать ток накопления, который является характеристикой системы управления двигателем. Характеристическая карта, записанная в постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) электронного блока управления сложна (рис. 1-4), статична и не отражает процесса износа деталей, а также реальные эксплуатационные характеристики двигателя. В связи с чем работа электромагнитной системы зажигания автомобиля с течением времени ухудшается. Чтобы устранить эти негативные процессы, необходимо провести математическое моделирование процессов дугообразования в свече зажигания и сравнить модель с экспериментальными характеристиками, полученными в ходе исследования системы зажигания.

Интеллектуальная система управления и информирования, получает информацию с множества входных датчиков, по соответствующему алгоритму обрабатывает ее и посылает управляющие воздействия на исполнительные или информационные устройства. Указанное позволяет оптимизировать основные параметры систем и агрегатов автомобиля для различных режимов эксплуатации.

Для обработки входных данных от датчиков автомобиля в режиме реального времени целесообразно в интеллектуальных системах управления и информирования использовать микропроцессоры. Кроме аппаратного обеспечения интеллектуальная система управления и информирования должна содержать программный код и данные, которые хранятся в ПЗУ. Это дает возможность микропроцессор перепрограммировать, загружать обновления или изменять функциональность программы.

Основным назначением интеллектуальной системы управления и информирования является диагностирование системы зажигания двигателя, и

выработка регулирующих сигналов для управления углом опережения зажигания, чтобы во всех режимах работы обеспечить необходимый крутящийся момент и выходную мощность.

Интеллектуальная система управления и информирования должна представлять собой совокупность мехатронных узлов и механизмов (рис.5), управляемых микропроцессором на основании данных, полученных с датчиков.

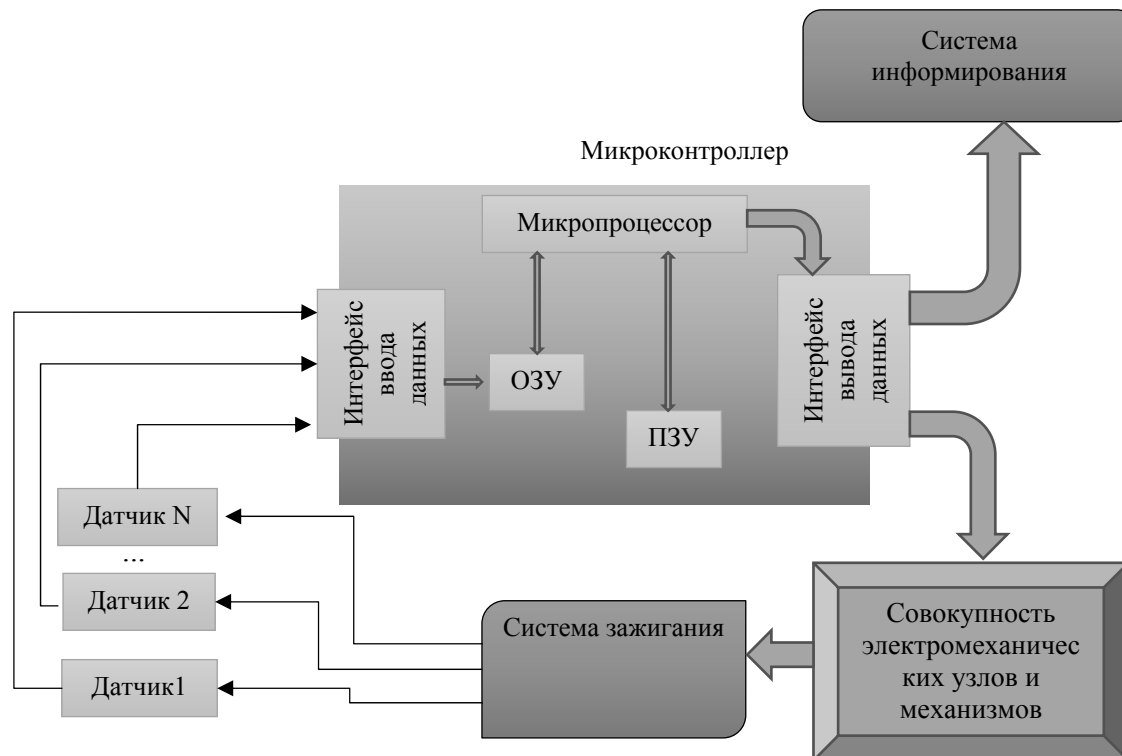


Рисунок 5 – Интеллектуальная система управления и информирования (диагностирования)

Источник: разработано авторами

Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) предназначено для отслеживания состояния системы зажигания (нагрузки на двигатель, температуры, скорости и т.д.) а ПЗУ выполняет функцию хранения программ для работы в различных режимах. Информация об отказе или частичной работе мехатронных узлов выводится на систему информирования.

На интерфейс ввода данных интеллектуальной системы управления и информирования поступают с датчиков аналоговые сигналы, которые преобразуются в цифровые сигналы. Эта измерительная информация поступает в ОЗУ, и затем в микроконтроллер. После анализа и обработки измерительной информации микроконтроллером, при помощи программного обеспечения и данных, хранящихся в ПЗУ, микропроцессор посылает обработанную информацию на интерфейс вывода данных. В случае необходимости информация преобразуется в аналоговый сигнал, который идет на исполнительное устройство или систему диагностических сообщений.

В процессе эксплуатации автомобиля формирование диагностической информации основано на анализе данных, получаемых с помощью встроенной бортовой компьютерной системы и органолептических методов. При обнаружении сигнала об отказе проводится проверка диагностическим сканером. Полученная информация формирует перечень необходимых работ по устранению неисправностей при техническом обслуживании и ремонте. Если вышеперечисленные методы не

позволяют решить возникшую проблему, то прибегают к более углубленной диагностике с применением специальных средств и методик. Алгоритм проведения полной диагностики автомобиля представлен на рис. 6.

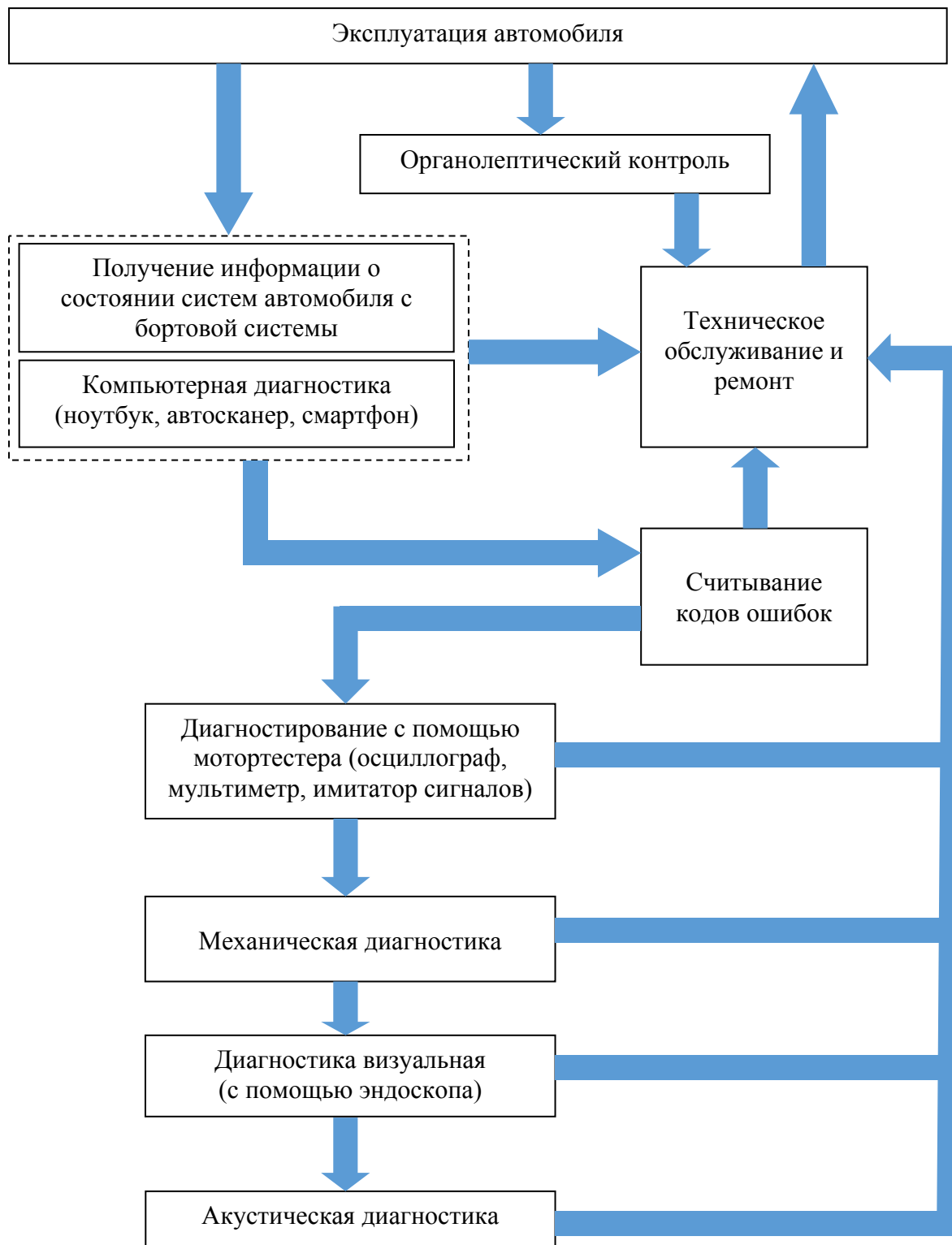


Рисунок 6 – Разработанный алгоритм проведения полной диагностики автомобиля
 Источник: разработано авторами

Проблемой существующих систем диагностирования автомобиля является то, что получить достоверную информацию от всех ресурсоопределяющих систем и агрегатов не представляется возможным. Применяемая компьютерная диагностика, бортовая система контроля дают периодические данные о наличии так называемых "ошибок". Окончательное принятие решения о необходимом виде и объеме технического обслуживания и ремонта, его своевременности зависит от квалификации технического работника, что может быть не совсем объективным.

Значительный поток информации о техническом состоянии автомобиля приходится на органолептические методы, что в свою очередь снижает шанс получить достоверную информацию об основных системах и агрегатах автомобиля. Бортовая система современного автомобиля не позволяет получить полноценные данные от всех работающих узлов и агрегатов. Совместное использование бортовой системы и органолептических методов не всегда позволяет своевременно определить момент ухудшения технического состояния автомобиля и своевременно устранить поломку. Ситуацию может исправить увеличением количества датчиков в критически важных узлах, это увеличит объективный (на основе компьютерной диагностики) контроль.

Выводы:

1. Нарушение работы системы зажигания автомобиля может увеличивать расход топлива, и снижать мощность двигателя. Поэтому своевременная диагностика является важной составляющей в процессе эксплуатации.

2. В стендовых условиях легко выявляются неисправные детали. Однако при наличии частично годных мехатронных узлов, которые дают сбой или отказ в работе только при определённых параметрах работы, наиболее тяжело диагностируются.

3. Внедрение интеллектуальной системы управления и диагностирования автомобиля решила бы задачу определения частично годных мехатронных узлов автомобиля.

4. Чтобы повысить процент диагностической информации с помощью объективного (на основе компьютерной диагностики) контроля необходимо усовершенствовать существующую систему диагностирования. По данным учета потока отказов систем и агрегатов автомобилей и сопоставления его с возможностью бортовой системы контроля, необходимо установить дополнительные датчики (датчики Холла для измерения угловых зазоров; температурные датчики для контроля перегрева узлов и агрегатов; датчики для определения диэлектрической проницаемости масел в картерах двигателя, КПП и мостов, и т. п.) на системы со значительным потоком отказов и недостаточной диагностируемостью.

5. По анализу полученной информации возможно прогнозирование остаточного ресурса и делается вывод о необходимости конкретного вида технического обслуживания или ремонта.

6. Необходимо разработать четкую методику диагностирования конкретной неисправности систем и агрегатов автомобиля с учетом дополнительной системы датчиков для снижения влияния уровня квалификации персонала на принимаемые решения по выбору требуемых операций технического обслуживания и ремонта.

Список литературы

1. Пестриков В.М., Евкарпиев В.Е. Особенности диагностики современных автотранспортных средств. *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2014. №4(30). С. 14-19.
2. Аулін В.В., Гриньків А.В. Розробка методики вибору інформативних систем і агрегатів засобів транспорту та діагностичних параметрів їх технічного стану. *Раціональне використання енергії в техніці: зб. тез доповідей XIII Міжнар. наук. конф. 17-19 травня 2017 р. К.: НУБіПУ. 2017. С.57-59.*

3. Груздов Г.Н. и др. Аналитические исследования эксплуатации автотранспортных средств: монография. Москва: РУСАЙНС, 2015. 144с.
4. Предко А.В., Грицук Ю.В., Грицук И.В., Волков В.П. Мониторинг, диагностирование и прогнозирование параметров технического состояния транспортных средств в условиях ITS. *Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования*. Сборник научных трудов по материалам ежегодных конференций. 27–28 апреля 2015 г. Воронеж. 2015. Вып. 2. С. 126–131.
5. Макарова И.В., Хабибуллин Р.Г., Беляев Э.И. Повышение коэффициента технической готовности парка автомобильной техники средствами интеллектуализации транспортной системы. *Фундаментальные исследования*. 2013. № 10-2. С. 282-287.
6. Интенсивность нарастания поломок исследуемых автомобилей в зависимости от пробега. Немецкая компания по независимой диагностике автомобилей DEKRA. URL: <https://www.used-car-report.com/en/> (Дата обращения: 07.03. 2019).
7. Аулин В.В., Замота Т.Н., Гринькив А.В., Караичев А.А. Характерные отказы и структура диагностической информации о техническом состоянии автомобилей NISSAN X-TRAIL. *Іноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту: збірник наукових матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції*, 14-15 листопада 2018 року. Кропивницький, 2018. – С. 256 - 264.
8. Аулин В.В., Замота Т.Н., Гринькив А.В., Караичев А.А. Повышение эффективности получения достоверной диагностической информации о техническом состоянии автомобилей NISSAN X-TRAIL. (В печати).
9. Зельман М.А. Метрологические основы технических измерений. Москва: Изд-во стандартов, 1991. 121 с.
10. Самарский А. А. Введение в численные методы. Москва: Лань, 2005. 288с.
11. Сергеев А.Г. Метрологическое обеспечение автомобильного транспорта. Москва: Транспорт, 1988. 369 с.
12. Коровкин Н.В., Селина Е.Е. Моделирование волновых процессов в распределенных электромагнитных системах. СПб.: СПбГТУ, 1992. 264 с.
13. Кругов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания. Москва: Машиностроение, 1998. 34 с.

References

1. Pestrikov, V.M. & Evkarpiev, V.E. (2014). Osobennosti diagnostiki sovremennyih avtotransportnyh sredstv [Diagnostic features of modern vehicles]. *Tehniko-tehnologicheskie problemy servisa – Technical and technological problems of service, №4(30)*, 14-19 [in Russian].
2. Aulin, V.V. & Hryniv, A.V. (2017). Rozrobka metodyky vyboru informatyvnykh system i ahrehativ zasobiv transportu ta diahnostychnykh parametriv yikh tekhnichnoho stanu [Development of a methodology for selecting information systems and aggregates of vehicles and diagnostic parameters of their technical condition]. *Ratsionalne vykorystannia enerhii v tekhnitsi: zb. tez dopovidei XIII Mizhnar. nauk. konf. – Rational use of energy in engineering: Coll. of abstracts of the XIII International. Sciences. Conf.* Kyiv: NUBiPU. 2017. S.57-59 [in Ukrainian].
3. Gruzdov, G.N. et al. (2015). *Analitycheskie issledovaniya ekspluatatsii avtotransportnyh sredstv: monografiya [Analytical studies of the operation of motor vehicles: monograph]*. Moskva: RUSAYNS, 144 s [in Russian].
4. Predko, A.V., Gritsuk, Yu.V., Gritsuk, I.V. & Volkov, V.P. (2015). Monitoring, diagnostirovanie i prognozirovanie parametrov tehniceskogo sostoyaniya transportnyh sredstv v usloviyah ITS [Monitoring, diagnosis and forecasting of the technical condition of vehicles in ITS conditions]. *Alternativnyie istochniki energii v transportno-tehnologicheskom komplekse: problemy i perspektivy ratsionalnogo ispolzovaniya. Sbornik nauchnyh trudov po materialam ezhegodnyh konferentsiy - Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects of rational use. Collection of scientific papers on the materials of annual conferences*. Voronezh, Vol. 2, 126–131 [in Russian].
5. Makarova, I.V., Habibullin, R.G. & Belyaev, E.I. (2013). Povyishenie koeffitsienta tehniceskoy gotovnosti parka avtomobilnoy tehniki sredstvami intellektualizatsii transportnoy sistemyi [Increasing the coefficient of technical readiness of the fleet of vehicles by means of intellectualization of the transport system]. *Fundamentalnye issledovaniya- Basic research, № 10-2*, 282-287 [in Russian].
6. Intensivnost narastaniya polomok issleduemyyh avtomobiley v zavisimosti ot probega (2019) [The intensity of the increase in breakdowns of the investigated cars, depending on the mileage]. *Nemetskaya kompaniya po nezavisimoy diagnostike avtomobiley DEKRA - German company for independent car*

- diagnostics DEKRA*. URL: <https://www.used-car-report.com/en> [in German].
7. Aulin, V.V., Zamota, T.N., Grinkiv, A.V. & Karaichev, A.A. (2018). Harakternyye otkazy i struktura diagnosticheskoy informatsii o tehničeskom sostoyanii avtomobiley NISSAN X-TRAIL [Typical failures and structure of diagnostic information on the technical condition of NISSAN X-TRAIL vehicles]. *Inovatsiini tekhnolohii rozvytku ta efektyvnosti funktsionuvannia avtomobilnoho transportu: zbirnyk naukovykh materialiv Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii - Innovative technologies for the development and efficiency of road transport: a collection of scientific materials of the International Scientific and Practical Conference*. Kropyvnytskyi, (pp.256 – 264) [in Russian].
 8. Aulin, V.V., Zamota, T.N., Grinkiv, A.V. & Karaichev, A.A. (2019). Povyshenie effektivnosti polucheniya dostovernoy diagnosticheskoy informatsii o tehničeskom sostoyanii avtomobiley NISSAN X-TRAIL [Povyshenie effektivnosti polucheniya dostovernoy diagnosticheskoy informatsii o tehničeskom sostoyanii avtomobiley NISSAN X-TRAIL]. (V pečati) [in Russian].
 9. Zelman, M.A. (1991). *Metrologicheskie osnovy tehničeskih izmereniy [Metrological foundations of technical measurement]*. Moskow: Izd-vo standartov [in Russian].
 10. Samarskiy A. A. (2005). *Vvedenie v chislennyye metody [Introduction to numerical methods]*. Moskow: Lan [in Russian].
 11. Sergeev, A.G. (1998). *Metrologicheskoe obespechenie avtomobilnogo transporta [Metrological support of automobile transport]*. Moskow: Transport [in Russian].
 12. Korovkin, N.V. & Selina, E.E. (1992). *Modelirovanie volnovykh protsessov v raspredelennykh elektromagnitnykh sistemah [Modeling wave processes in distributed electromagnetic systems]*. SPb.: SPbGTU [in Russian].
 13. Krugov, V.I. (1998). *Avtomaticheskoe regulirovanie i upravlenie dvigateley vnutrennego sgoraniya [Automatic regulation and control of internal combustion engines]*. Moskow: Mashinostroenie [in Russian].

Viktor Aulin, Prof., DSc., **Taras Zamota**, Assoc. Prof., DSc., **Andriy Grinkiv**, Senior Researcher, PhD tech. sci., Doctoral student, **Sergiy Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleg Krupitsa**, applicant, **Kostiantyn Panayotov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The Rationale for the Use of Modern Approaches to Improve the Diagnosis of Vehicle Systems and Assemblies

The ignition system is considered one of the most complex systems, which traditionally accounts for a large percentage of malfunctions and violations of regulations. Failure of the ignition system significantly impairs the operation of the car, which increases fuel consumption, and reduces engine power. In gasoline internal combustion engines, the process of fault finding and analysis is carried out by visually observing the voltage waveforms in the primary and secondary circuit. In modern diagnostic systems, it is possible to implement all of the above approaches for diagnosing a fault through the use of intelligent software and hardware systems (intelligent sensors) for monitoring and control. Such computer tools are versatile, as they have the ability to change the software that allows you to control the process of their work and functionality.

The diagnostic system is considered as an intelligent control and information system. Its main purpose is to diagnose the engine ignition system in order to provide the necessary torque and power output. It is a set of mechatronic units and mechanisms controlled by a microprocessor according to data received from sensors.

During the operation of the vehicle, the formation of diagnostic information is based on the analysis of the data of the integrated on-board system and organoleptic methods. An algorithm has been developed for conducting a complete vehicle diagnostics. It is proved that obtaining reliable information from resource-determining systems and units is not possible. Computer diagnostics and an on-board monitoring system provide periodic data on the presence of deviations of diagnostic parameters. The joint use of the on-board system and organoleptic methods cannot always timely determine the moment of deterioration of the technical condition of the car and eliminate malfunctions in systems and assemblies.

It was determined that in order to enhance the objectivity of monitoring the technical condition of the car, it is necessary to place sensors in critical nodes that provide the necessary information and develop a clear method for diagnosing a specific malfunction of systems and assemblies.

ignition system, malfunctions, diagnostics, intelligent maintenance system

Одержано (Received) 05.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 11.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

UDC 656.13:658

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).76-90](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).76-90)**Andrei Markevich**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.*Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, P.R. China, e-mail: andrii.markevych@gmail.com***Mykola Moroz**, Prof., DSc., **Olena Moroz**, Assoc. Prof., PhD econ. sci.*Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy national university, Kremenchuk, Ukraine
e-mail: mykolai.moroz@gmail.com***Oleksii Vasytkovskyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
e-mail: olexa74@ukr.net*

Results of Social-Transport Monitoring of Passenger Transportation Kremenchuk City

The article presents the results of social and transport survey of the population, which include indicators of the survey of families and users of transport, the purpose and methods of travel on routes, a comparison of the movement of passengers by districts, the satisfaction of the population with the work of transport. Passenger transport users were interviewed at Kremenchuk bus stops and online. It allows to predict the traffic of the population, to form organizational and economic decisions and to provide high efficiency and quality of passenger transportation.

passenger transport, social transport survey, transportation efficiency, monitoring, passenger flow

А.Г. Маркевич, доц., канд. техн. наук*Ланьчжоуский транспортный университет, г. Ланьчжоу, Китай***Н.Н. Мороз**, проф., д-р техн. наук, **А.В. Мороз**, доц., канд. экон. наук*Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг, Украина***А.М. Васильковський**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

Результаты социально-транспортного мониторинга пассажирских перевозок г. Кременчуг

В статье приведены результаты социально-транспортного опроса населения, которые содержат показатели опроса семей и пользователей транспорта, цель и способы поездки по маршрутам, сравнения движения пассажиров по районам, удовлетворенность населения работой транспорта. Пользователи пассажирского транспорта были опрошены на автобусных остановках города Кременчуга и в Интернете. Это позволяет прогнозировать транспортное движение населения, формировать организационные и экономические решения и обеспечивать высокую эффективность и качество пассажирских перевозок.

пассажирский транспорт, социально-транспортное опроса, эффективность перевозок, мониторинг, пассажиропоток

Formulation of the problem. Kremenchuk is a town of regional subordination. It is an administrative, industrial and cultural centre of Poltava region. It is situated in the moderate continental climate zone in the Dnipro lowlands and in the middle reaches of the Dnipro River on its both banks at the distance equals to 115 km from the regional center of Poltava and 290 km from the capital of Ukraine, Kyiv, at a trunk railways crossing which leads to a powerful railway junction. The territory of the town is 9600 ha while its population is about 230 thousand people.

The surveys are known (comparing with ordinary census) to be an effective method of attracting the population's attention to the local problems, so the use of their results' analysis

concerning the passenger traffic flow is the purpose of this work [3-5, 7-10]. The survey under consideration was aimed to study the aspects concerning the market and services supply provided by public transport in the fixed-route mode and in the minibus mode as well. There were three groups of the surveyed involved: family members, passengers and vehicles owners.

Analysis of recent research and publications. Social assessment or sociological transport survey of the population (STSP) is a system research of different social processes and factors of passenger transport which have a negative influence on the social development results [2, 6, 14].

STSP is used for the following purposes: to define the prominent participants of the transportation process and arrange their active participation while selecting the project for the passenger transportation improvement; [6] to ensure that the proposed changes are appropriate for all the parties involved; [7] to assess the social impact of investment projects on urban passenger transportation and, if any potential negative facts are identified, to find out the way for their overcoming, to assess in advance the level of public transport services for the population [1, 7, 14]. The paper highlights the particular features, methodology and results obtained of sociological transport survey of the population in the town of Kremenchuk.

Statement of the task. The research aims to develop the algorithm of sociological transport survey of the population taking into account the survey points concerning family members and transport users, the aim and the means of travelling, description of complete routes, comparison of the passenger flow according to the districts, public satisfaction with the quality of transportation service, the priority of using fixed-route taxis.

Outline of the main material. The survey mentioned was carried out in the town of Kremenchuk according to the provisions of Gloria Devis's paper "Social Assessment: Integrated Participation and Social Analysis" [11-13]. The researches similar to this one concerning the prediction of public transportation needs in cities were conducted for the first time in the 80s of the XXth century in the cities of Moscow and Omsk and the relevant method of sociological transport survey of the population was developed to solve the existing social transport problem by the Institute of Social Research of the Academy of Sciences of the USSR [8, 10, 11].

The survey in the town of Kremenchuk was carried out involving sociologists and software engineers who analyzed the information obtained (1200 surveys totally) due to especially created software. During the survey the following actions were taken: the survey was carried out in 120 families by using the random number method in housing estates considering to the percentage of the population. The survey consisted of the following questions: the number of the family members; the number of those being employed; the family income; the number of schoolchildren; the availability of transport and its use; the fares of public transport and private transport as well; satisfaction with the quality of public transport services provided; family expenses for commodities like purchasing food, etc.

The survey was carried out by four groups consisted of three surveyors and the head of the group who checked the form fillings and performed a duplicate check randomly. The forms were coded which made it possible to provide a feedback and control their filling in quality.

The survey was carried out during a weekend and a weekday (Saturday, Sunday and Monday) in order to provide maximum presence of people at home.

Passenger survey was carried out at transport stops during of the day. The surveyors approached people waiting for the means of transportation at the stops and asked them questions concerning the period of waiting, the trip duration, the means of transport used, the fare and purpose of the trip, satisfaction with the quality of the transportation services provided, the family income and willingness to pay for the service.

Three groups consisting of three surveyors each carried out the survey at stops in different parts of the town. Each group covered the area equals to about a third of the town territory. The groups were instructed to select the stops (either major or minor) independently and to carry out the surveys at different times. Totally, 520 people were surveyed chosen in the different town districts.

The attention of the heads of the groups was focused on the traffic flow intensity and its congestion. The passengers who were waiting for transport were counted thrice within the interval of five minutes. Besides, the total number of people at the stops and the number of men and women in particular were recorded. In total, 27 stops were surveyed and 273 assessments were performed. Additionally, the heads of the groups counted the number of vehicles approached the stop or passed by without stopping for the reason of being crowded. Subsequently, 118 assessments were made.

Additionally, the survey group carried out an informal interview and had talks with family members, passengers, representatives of transport operators and private transport owners.

The main conclusion of the survey is in the fact that in most cases people are not satisfied with the quality of public transportation services and so, no matter how the questions were asked, 65% of respondents admitted being dissatisfied.

The reasons of such situation are the following: insufficient number of vehicles on the route, their unsatisfactory maintenance and operation, along with the absence of the essential road infrastructure. However, particular dissatisfaction concerning the minibus service quality was expressed in connection with high fare rate comparing with low quality of the service provided.

Thereby, the results of the work are to be concentrated on the problems of the public transportation service improvement as its quality should be aligned with the fare rate. Another problem worth paying attention is the development of optimal route system which can satisfy public demand for transportation. It encouraged carrying out a complex assessment of passenger traffic flow at the town fixed routes.

STSP algorithm is the following:

a) survey concerning family members and passengers:

On average, a surveyed family consists of 2.5 people, where the one is employed.

Approximately 65% of the families surveyed are Ukrainians; 25% of those are Russians and representatives of other ethnic groups. Most families (75.9%) live in their apartments while 14.1 % own or rent a detached house. In accordance with inauthoritative sources, an average family income is 857 Ukrainian Hryvnias and almost 65% of that is spent on food. Although just about 20% of the income is left for other expenses, about 38% of the families surveyed own cars. This relatively large index value may be caused by the fact of using loans.

The family survey was concentrated on employed people, so it was separated into a particular observation. For example, the number of the men employed in the family does not greatly exceed the number of the women employed; they are 54.7% and 43.5% respectively. In the family the employed man income exceeds the employed woman income by 30% on average. Besides, a man works longer hours a week, spends more on transport, commutes further, but he is more satisfied with the quality of transport service than a woman.

People who walk to work or other places or go by cars were not surveyed. It might be predictable that people who do not use public transport, on average, have higher income than those who are public transport passengers. This way, the enhancement of the municipal passenger public transport (MPPT) work will be essential for those with lower income level. The women public transport (PT) users' income is by 30% lower that the men income.

b) the purpose of the trip and the means of transportation:

PT users surveys showed up that citizens of Kremenchuk use public transport mainly to get to work (54% of the users surveyed), to meet up with friends (15%), to do the shopping (8%), to get to the place of study or recreation (13%) and to get back home afterwards (40%).

As the employed are a considerable group of PT users, their needs were under thorough analysis. The family survey data found out that 20% employed among 30.2% of all the surveyed families walk to work. Average walk lasts for 16 to 19 minutes, which is 15 minutes less than average transport trip period (34 minutes). It confirms the data from inauthoritative sources concerning the fact that a lot of people prefer to work closer to their homes.

Almost 20% of all the families surveyed admitted that at least one employed family member uses only a personal car or combines it with other means of transport. Among the people surveyed, 13.8% confirmed that they use their cars partially going to work, while 10.2% entirely prefer private way of transportation.

Employed population relies on the public transport operation efficiency in a great measure. Predominantly, 60.3% of the employed people use trolleybuses or minibuses. Indisputable, minibuses are not used more often than trolleybuses. At the same time, about 65% of the employed prefer a trolleybus in their way at least on a fractional basis. More than 60% use minibuses going to work and only 38% prefer minibuses exceptionally.

Comparing the means of transport and employed women and men preferences, it is possible to define that the vast majority of women walk to work. Women use private cars much less. Simultaneously, employed women demonstrated greater dependence on public transport comparing with men. A considerable part (above 50%) of the employed in each group prefers trolleybuses and minibuses.

The analysis related to doing the shopping confirms high dependence on public transport: 75.1% of purchasers travel by trolleybuses or minibuses, while 48.1% use buses only. At the same time, purchasers walk more often than the employed (taking into account the fact that it is hard to cope with the bags in a crowded vehicle). 30% of surveyed family member respondents do the shopping on foot and do not use either public or private transport comparing with the corresponding index which is up to 20% among those who use PT going to work.

In the following way, the family survey data analysis showed that people use public transport in a significant degree for different purposes. Important role of minibuses comparing with trolleybuses is highlighted. These conclusions are confirmed by the results of user survey when passengers on the stops were interviewed concerning the means of transport they were waiting for. The analysis demonstrated that 30% of the surveyed as a rule wait for minibuses and prefer this way of transportation.

While determining the demand for the means of transport the employed family members prefer, the attention was concentrated on social characteristics of groups of transport users according to their preferences among means of transportation commuting to the working place. As mentioned above, about 20% of the employed surveyed walk to work.

This group consists predominantly of women (63% of all the foot passengers) comparing with the group of users who live near their homes (54.3% of employees work in their neighbourhood). The result is confirmed by the fact it takes shorter time for foot passengers to walk a shorter route than transport users to go (19 minutes versus 35 minutes). Foot passengers are also indicated as those with a lower monthly income comparing with those who use transport.

Thereby, three factors have the considerable meaning to make a decision to walk to work which are: a relatively close location of the working place, deficiency of money to use public or private transport in a regular way and a considerable traffic flow interval. It might be that some foot passengers, especially those who do not use public transport considering

financial problems or transport unserviceability, will join the group of users when transport starts operating more regularly and prices become more reasonable. More than 80% of the foot passengers surveyed pointed out that municipal transport operation needs improvement.

As mentioned above, about 38% of the employed use private vehicles to get to work. The analysis demonstrates that men use private vehicles the most (83%). Besides, these users have a larger monthly income than foot passengers and passengers of other means of transport.

It is found out that the choice of means of transport is stipulated by people's income. Users of trolleybuses (19% of the employed) have a considerably lower income comparing with others. It is inquisitorial that people waiting for a minibus have the highest income index. They take a trolleybus if it is the first one to arrive, but also they can afford a more expensive minibus.

c) description of the trip concerning the routes:

The surveyed, as a rule, walk to a bus stop getting to work, to a market, etc. On average, it takes a passenger 9.2 minutes, 51% of the users spend about 10 minutes or so doing this and only 11% walk more than 20 minutes.

According to the survey results, the intervals of public transport running and, therefore, the waiting time and vehicles fillability depends on the day of the week and the time of the day.

The heads of the groups processed the transport movement intervals: during 15 minute intervals they fixed the number of vehicles and their types while morning (6.30 to 9.30) and evening rush-hours (16.30 – 19.00), and during the passenger flow decrease and at weekends as well. The analysis proved that in the morning rush-hours the number of buses and trolleybuses is thrice as intensive as in the evening rush-hours. An average minibuses movement interval during rush-hours is 3 to 4 times as intensive as in the passenger flows decrease.

It is defined that average waiting time while passenger flows decrease is less than in the evening rush-hours (11 minutes versus 14). This way, the transport movement interval is satisfactory while the morning rush-hours and it incrementally worsens till the end of the day, and later on in the evening rush-hours it declines greatly, which does not satisfy the transportation demand.

Gender comparison highlights that women have to wait for transport a bit longer than men (15 minutes compared with 12 minutes). It is due to the fact that women use the transport more than men with their extra work activity during the passenger flows decrease, when the traffic intensity falls down.

Taking into account the family monthly income indices and comparing them with monthly transport expenses, it makes it possible to conclude that those surveyed with lower income spend a noticeably larger income part on public transport comparing with those whose income is rather high.

Concurrently, passengers with lower income prefer to buy bus passes and to use electric transport which is cheaper. Despite the fact of using cheaper transport and bus passes, their income is lower and the transport expenses percentage is higher.

d) comparison of employees flow in districts:

There are some districts in the town of Kremenchuk. Townspeople on a large scale work in the central part of the town while living in remote residential areas. For better understanding of the employees flow schemes, the study was carried out. It was found out that 24% of all the employees work in the district they live in. While 70% of them are foot passengers, 30% of the surveyed use different kinds of transport.

Vast majority of the employees (76%) have to commute to other districts. The most densely part of the town is its centre, that is, Svobody Avenue, Kyivska street, where cultural and administrative institutions, consumer services facilities and other establishments are located which make the passenger flows overcrowded by 45%. Among the other densely districts are

Molodizhnyi housing estate, Port (23.3%); I, II and III Zanasyp residential areas, Rakivka (in particular, detached houses sector) (14%); railway station and bus station (20.3%). The fact that a considerable part of the townspeople uses public transport for 2 or 4 stops should attract special attention as this way the vehicles are overloaded significantly. It vitally important for the central part of the town as it is the territory where buses and electric transport are in use.

Paying attention to the fact that electric transport is considered to be the cheapest means of transport and keeping in mind that its routes, as a rule, run through the town center, this means of transport is considerably used for street trade of goods and food. As the survey shows, the majority of people (68.9%) consider it unpractical to place consumer services and commercial enterprises in the center and only 20.3% (mainly the store-keepers themselves) are of different views. The surveyed do not have the particular position concerning this question. Besides, being asked about the unsatisfactory transport operation and its connection to markets location, most of them (60.7%) admitted their negative effect.

e) satisfaction of the population with the quality of transport services:

While being surveyed, people were asked whether they were satisfied with the quality of modern state of transport service or not. The results found out that 59% of the employed in the families and 87.4% of MPPP users admitted its unsatisfactory state. Women revealed more dissatisfaction than men. Women's critical attitude towards MPPT service quality is not extraordinary as they spend more time at the stops.

Being not always satisfied with the transport service quality, the surveyed were proposed to mention the improvements they would like to obtain. A respondent gave his/her own answer or was limited by three options. Afterwards the similar answers were grouped according to a topic peculiarity. In both surveys conducted the measures mentioned the offers to raise the frequency of the period's buses run, to opt for buses which are more commodious and comfortable. Other offers were as follows: "new extra routes", "better sanitary conditions for buses". These observations were completed by informal interviews with the users.

Some offers were not expressed in the same order: "make buses (trolleybuses) run more often", "make traffic intervals shorter", "more commodious buses", "fare payment monitoring", "buying tickets in advance", "extra routes", "scoping of distant neighbourhoods", "better way to get to the market".

These observations can conclude to the following: townspeople urge the increasing of the passenger traffic flow frequency, concerning trolleybuses as a matter of priority, the necessity to keep up to the schedule and the route. New extra routes are essential for the remote residential areas where residents suffer from the transport service faults considerably comparing with the residents of the centre of town.

What means of passenger transport do you use?

Also there was a survey in the Internet. A form was created for the survey and reference for the site in some social networks. All those who wished had an opportunity to log in and take part in the survey. The form included four questions and variants of answers.

The first question was "What means of transport do you use?" and one of the means should be chosen among the listed ones. The next question was "How old are you?" to define the respondents' categories, namely, schoolchildren, students, employed, retired. The third question concerned the criteria people use while choosing the means of transport. There were the basic criteria proposed concerning transport selection, which were the following: price, speed, safety, convenience and possibility to get to the destination. Certain criteria should be chosen. The last question dealt with discomfort in vehicles. The list of main inconveniencies and a possibility to supplement the answer was proposed.

According to the survey results, most population prefers route minibuses – 75%, among which are: 13 schoolchildren 9%; 37 student 26%; 55 workers 40%. Some people prefer

trolleybuses 24%, with 9 schoolchildren 6%; 1 worker 1%; 24 pensioners 17% among them (Fig. 1).

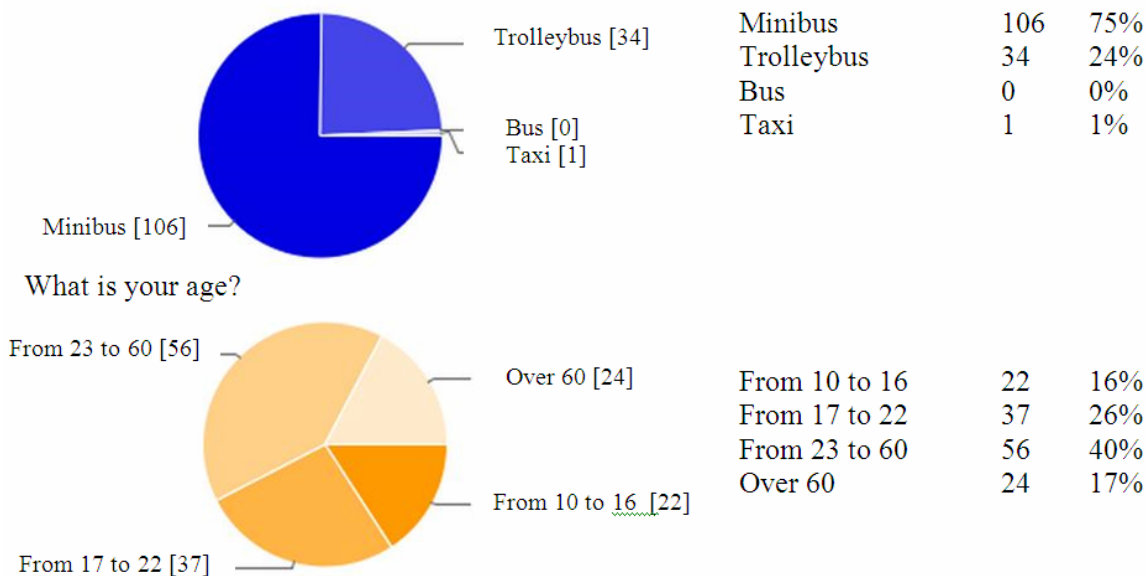


Figure 1 – Concerning the analysis of the choice of municipal transport

Source: author's development

The question concerning the choice of criteria was answered the following way: the most answers (37%) were “speed of motion”, which is one of the reasons for choice of minibuses. Another reason in favour of minibuses is in the possibility to get to the destination point 30%, as trolleybus routes mostly run in the central streets without going to the minor ones (Fig. 2).

“Fare” was another priority criterion – 35%, most of answers were in favour of trolleybuses. “Travel convenience” was the next criterion with 21%, most respondents prefer minibuses. “Safety” as a criterion was chosen by not so many people.

According to what criteria do you choose passenger transport? (several variants)

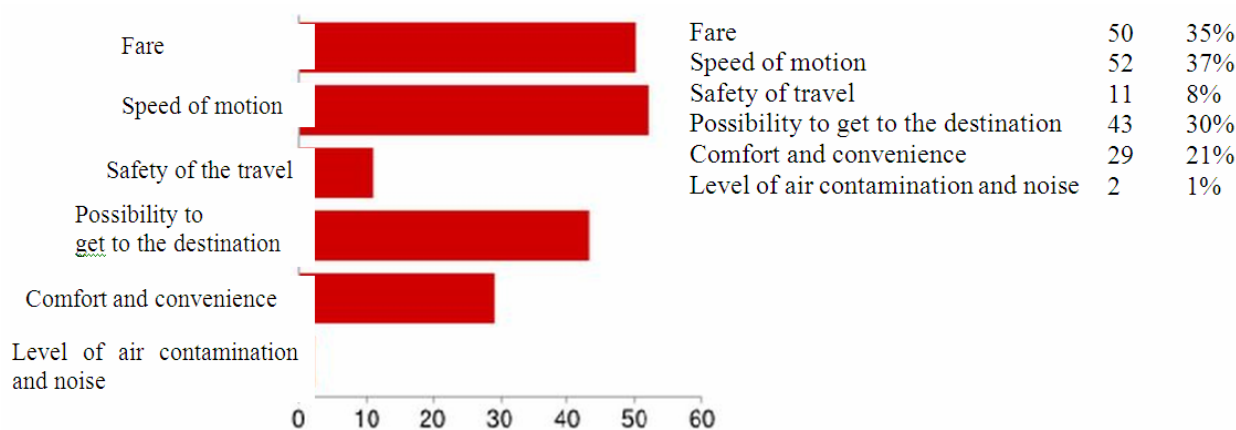


Figure 2 – Concerning the analysis of transport modes priorities

Source: author's development

The following question concerned inconvenience in transport (Fig. 3). The population considered “lack of transport during rush-hour” as the most important inconvenience (40% of

respondents chose this answer). “Improper technical condition” was the second one (24%); this condition is caused by minibuses contravention for public conveyance and an old trolleybus depot. The third one is the absence of stops announcements (21%). This mostly concerns minibuses as stops are announced in trolleybuses. Another complaint (21%) deals with inappropriate sanitary condition of the vehicle and the passenger saloon. Most vehicles are not properly cleaned.

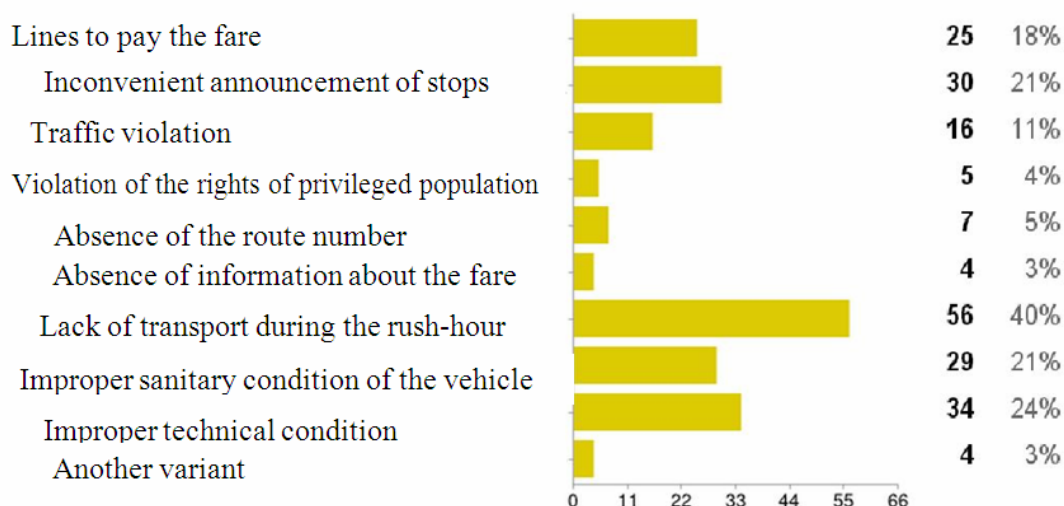


Figure 3 – Concerning the analysis of transport modes priorities

Source: author's development

One more inconvenience is queues the fare to pay (18%) which mainly refers to minibuses, as in trolleybuses there is a conductor who in the saloon who takes the fare. Other inconveniences concern minibuses among which are: traffic contravention (11%), the route number absence (5%), contravention of the privileged population rights (4%), absence of information about the fare rate (3%).

What inconveniences do you come across in public transport? (several variants)

The main conclusion that can be arrived at on the basis of these observations is that residents of the city want the traffic frequency to increase, which especially concerns trolleybuses, the schedule and the route to be kept. Extra new routes are very essential for the residents of distant neighbourhoods, who suffer from the transport service faults more than those who live in the centre of the town.

f) preference for minibuses use:

The research showed up that 6.4% of respondents use minibuses to go at the distance less than 5 km; 21.3% of the surveyed up to 7 km; 42.5% of them up to 10 km; 29.8% travel over 10 km. Minibus fixed-routes connect residential areas (28.2%); bus station and railway station, port (31.8%); medical facilities (11.8%); suburbs (8.2%); educational establishments (13.6%); production (16.4%).

A question was asked about the number of people who enjoy the benefits of fare in public transport. The answer was that, on average, 29.6% of the passengers receive such benefits. For clearness, the output data and obtained results of the survey of the population of the town of Kremenchuk are shown in Tables 1 – 4 and Figure 4-12.

Table 1 – Mode of transportation of the population depending on the sex

Mode of transportation	men, %	women, %
Only on foot	13,6	28,3
Part of the way by car	19,7	6,5
Bus or trolleybus	59,3	64,5
Only bus and/or trolleybus	24,6	31,8

Source: author's development

Table 2 – Data of family survey (average)

Number of family members	2,5 people
Number of employed people in the family	1,5 people
Number of employed men	0,8 people
Number of children	0,8 people
Number of schoolchildren	0,8 people
Number of pensioners	0,4 people
% of families living in apartments	85,9%
% of families living in detached houses	14,1%
% of the family income that is spent on food	69,3%
% of families who own a car	34,1%

Source: author's development

Table 3 – Mode of transportation of the population (everyday purposes)

Mode of transportation	%
Only on foot	34,5
Bus or trolleybus	65,2
Only minibus	34,8

Source: author's development

Table 4 – Priority of the use of public transport

Transport mode	%
Trolleybus	48,3
Route minibus	19,8
Taxi (car)	0,3
Passing transport	-

Source: author's development

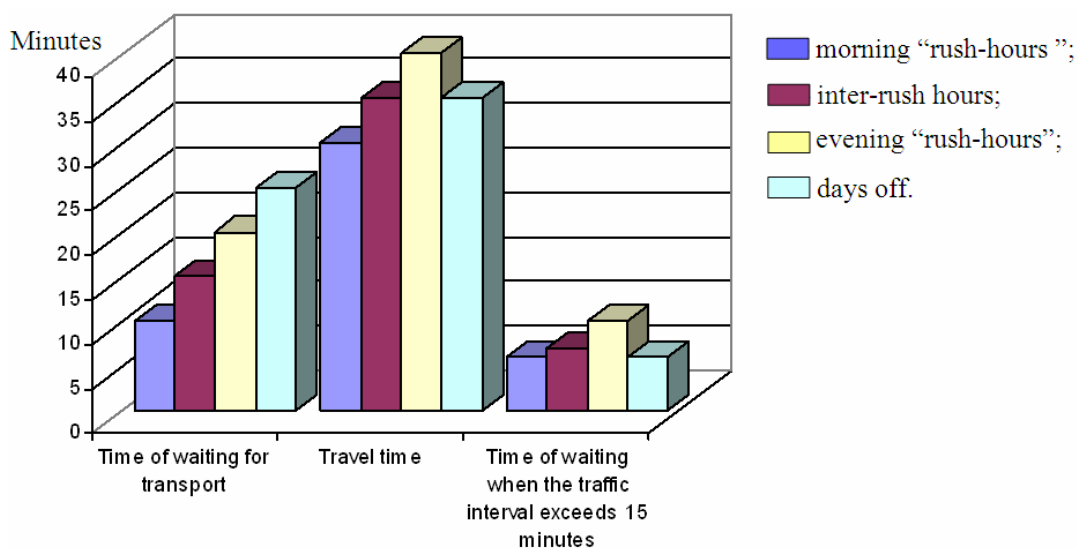


Figure 4 – Concerning the analysis of special features of transport motion during the day

Source: author's development

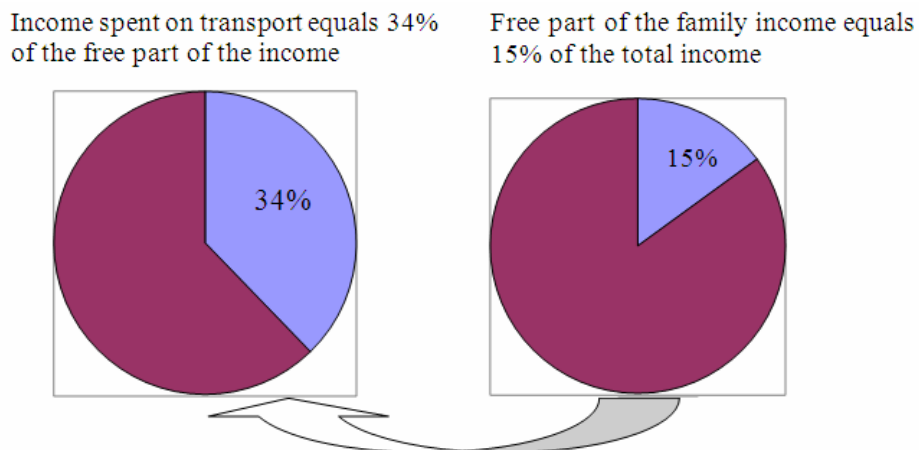


Figure 5 – Concerning the analysis of family expenditure for transport

Source: author's development

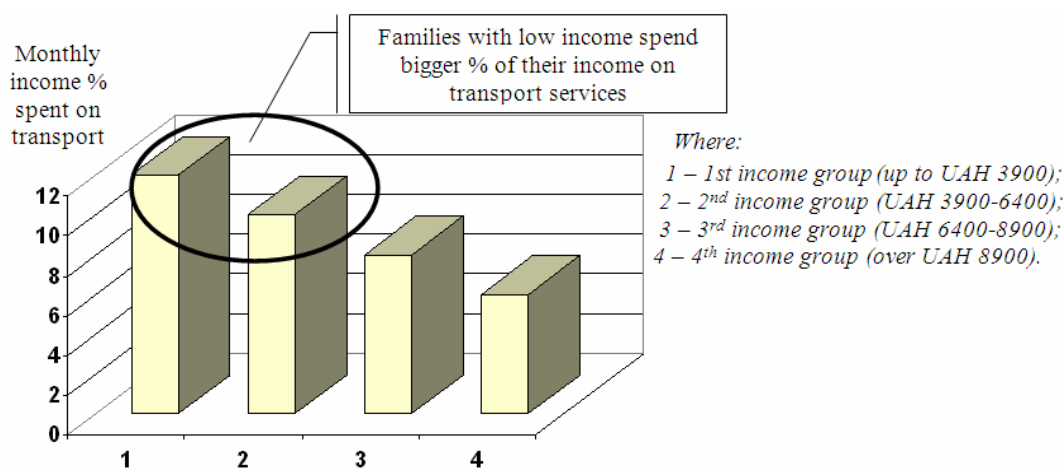


Figure 6 – Concerning the analysis of family expenditure for transport

Source: author's development



1 – Family survey; 2 – user's survey

Figure 7 – Concerning the analysis of passengers' dissatisfaction with transport operation

Source: author's development

Diagram of transport service improvement proposed by the population

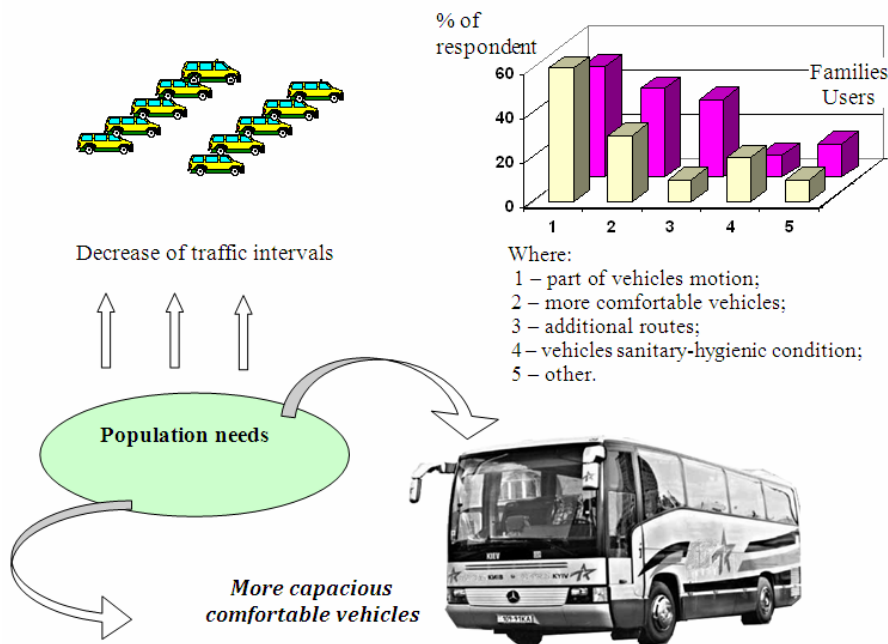


Figure 8 – Concerning the analysis of transport service improvement proposed by the population
 Source: author's development

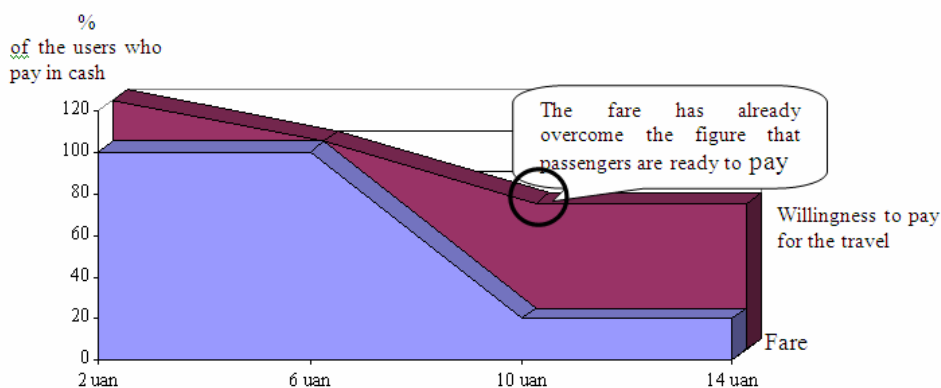


Figure 9 – Concerning the fare and willingness to pay more
 Source: author's development

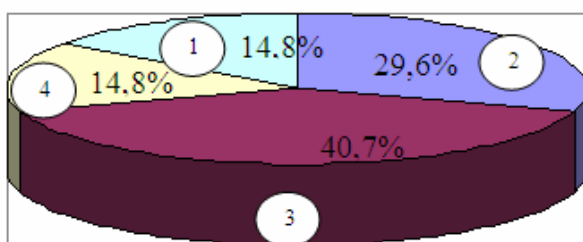
The results of the information analysis concerning the preferences of buses in the mode of route minibuses at the public transport fixed-routes.

Table 5 – Time of waiting for traffic

Time of waiting at the stop	% of respondents
5 minutes or less	29,4
From 5 to 10 minutes	21,3
From 10 to 20 minutes	29,8
Over 20 minutes	22,4
Average time of waiting	17,3

Table 6 – Duration of travel

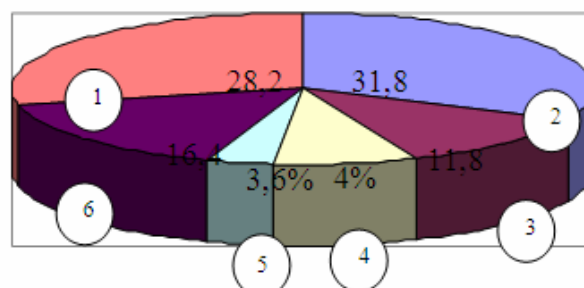
Duration of travel	% of respondents
5 minutes or less	11,3
From 15 to 20 minutes	27,3
From 20 to 30 minutes	30,4
From 30 to 40 minutes	27,5
Over 60 minutes	7,4
Average duration of travel	33,6



1 – distance up to 8 km; 2 – distance up to 10 km;
3 – distance up to 15 km; 4 – distance over 15 km

Figure 10 – Diagram of distribution of minibus routes depending on the distance of respondents' travel

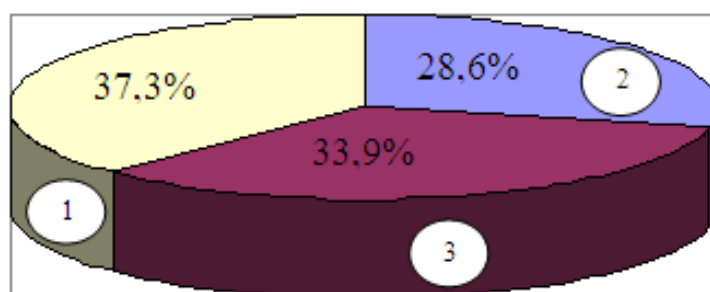
Source: author's development



1 – densely populated districts; 2 – stations;
3 – medical establishments; 4 – suburbs;
5 – educational institutions; 6 – production

Figure 11 – Diagram of distribution of minibus routes providing connection

Source: author's development



1 – drivers' fault; 2 – passengers' fault; 3 – no opinion

Figure 12 – Diagram of distribution of respondents' opinions as to dissatisfactory service level

Source: author's development

Conclusions. The data obtained make it possible to predict public transport movement and make corresponding organizational-economic decisions and provide high efficiency and quality of passenger transportation on this basis.

The results of the research of passenger flows and sociological transport survey are the output data for working out measures for the improvement of the particular routes operation efficiency.

At the same time, according to the data of the research and corresponding processing of the materials concerning the study of the population needs at trolleybus routes in the town of Kremenchuk, there is a tendency to keep the passenger flows, which enables keeping the existing network without correcting changes of the line and functioning of the trolleybus routes for the nearest prospect (7-10 years).

Список літератури

1. Аулін В.В., Голуб Д.В. Стан структури та основні напрямки розвитку пасажирського транспорту загального користування в м. Кіровограді. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту.* 2007. Вип. 18. С. 288-292.

2. Аулін В. В. Голуб Д.В. Якість перевезень пасажирів як невід’ємна частина транспортного процесу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ. 2008. Вип. 5, Ч. 2. С. 80-84.
3. Аулін В.В., Голуб Д.В. Аналіз системи перевезення пасажирів у містах, основні тенденції її розвитку і шляхи удосконалення. *Вісник національного транспортного університету*. В 2-х частинах. Ч. 2. Київ: НТУ. 2007. Вип. 15. С. 279-284.
4. Аулін В. В., Д. В. Голуб. Визначення раціональної кількості засобів міського пасажирського транспорту з урахуванням попиту пасажирів. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2008. № 64, т. 2. С. 3-6.
5. Системологія на транспорті. Кн. 1. Основи теорії систем і управління / під заг. ред. Дмитриченко М.Ф. Київ: Вища школа, 2004. 397 с.
6. Системологія на транспорті. Підручник у 5 кн. / під заг. ред. Дмитриченко М.Ф. – Кн. 2: Технологія наукових досліджень і технічної творчості. Київ: Знання України, 2007. 318 с.
7. Левковець П. Р., Мороз М.М., Мороз О.В. Удосконалення перевезень пасажирів м. Кременчук. *Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія*. 2010. Вип. 7. С. 304-308.
8. Маруніч В.С. та ін. Системний аналіз і логістика: навч. посіб. Київ: НТУ, 2009. 272с.
9. Мороз Н.Н. Проблемы пассажирского транспорта общего пользования г. Кременчуг. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*. Сборник научных трудов. Тематика выпуска: *Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2014. № 44 (1087). С. 103-108.
10. Мороз М.М. та ін. Соціально-економічне забезпечення пасажирського транспорту загального користування. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2018. № 1 (242). С. 100-105.
11. Мороз М.М. Шляхи вдосконалення пасажирських перевезень транспортом загального користування. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту*. 2015. Вип. 28. С. 57-63.
12. Moroz M.M., Korol S.O., Boiko Y.O. Social traffic monitoring in the city of Kremenchuk. *Actual Problems of Economics*. К. 2016. № 1 (175). P. 385-398.
13. Moroz M.M. Defining the term and the volume of investments on reduction to necessary structure of rolling stock of passenger public transport (Kremenchuk city case study). *Actual Problems of Economics*. Vol. 166 (4). 2015. P. 235-243.
14. Вдовиченко В. О. Формування сервісно-ресурсних умов сталості міського громадського пасажирського транспорту. *Технологический аудит и резервы производства*. 2016. № 6(2). С. 64-69.

References

1. Aulin, V.V. & Holub, D.V. (2007). Stan struktury ta osnovni napriamky rozvytku pasazhyrskoho transportu zahalnoho korystuvannia v m. Kirovohradi [The state is also developing the main directions of development of passenger transport of the well-known member in Kirovograd]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, Vol. 18, 288-292 [in Ukrainian].
2. Aulin, V. V. & Holub, D.V. (2008). Yakist perevezennia pasazhyriv yak nevidiemna chastyna transportnoho protsesu. [The quality of passenger traffic is an integral part of the transport process]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of the Kremenchug National University named after Mikhail Ostrogradsky*, Vol. 5, Part. 2, 80-84 [in Ukrainian].
3. Aulin, V.V. & Holub D.V. (2007). Analiz systemy perevezennia pasazhyriv u mistakh, osnovni tendentsii yii rozvytku i shliakhy udoskonalennia [Analysis of the system of transportation of passengers in cities, the main tendencies of its development and ways of improvement]. *Visnyk natsionalnoho transportnoho universytetu*. V 2-kh part. Part. 2, Vol. 15, 279-284 [in Ukrainian].
4. Aulin, V.V. & Holub D.V. (2008). Vyznachennia ratsionalnoi kilkosti zasobiv miskoho pasazhyrskoho transportu z urakhuvanniam popytu pasazhyriv [Determination of rational quantity of means of urban passenger transport taking into account the demand of passengers]. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*, № 64, Vol. 2, 3-6 [in Ukrainian].

5. Dmytrychenka, M.F. (Eds.) (2004). *Systemolohiia na transporti [Systemology in transport]*. Kn. I. Osnovy teorii system i upravlinnia. Kyiv: Vyshcha shkola [in Ukrainian].
6. Dmytrychenka, M.F. (Eds.) (2007). *Systemolohiia na transporti [Systemology in transport]*. Pidruchnyk u 5 kn. (Kn. 2: Tekhnolohiia naukovykh doslidzhen i tekhnichnoi tvorchosti). Kyiv: Znannia Ukrainy [in Ukrainian].
7. Levkovets P. R., Moroz M.M., Moroz O.V (2010). Udoskonalennia perevezen pasazhyriv m. Kremenchuk. Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka. Tekhnichna seriia. Vyp. 7. 304-308 [in Ukrainian].
8. Marunych, B.C. et al. (2009). *Systemnyi analiz i lohistyka [System analysis and logistics]*. Kyiv: NTU [in Ukrainian].
9. Moroz N.N. (2014). Problemyi passazhirskogo transporta obshchego polzovaniya g. Kremenchug [Problems of public passenger transport in Kremenchug]. *Vestnik Nats. tehn. un-ta «HPI». Sbornik nauchnykh trudov. Tematika vyipuska: Innovatsionnyie tehnologii i oborudovanie obrabotki materialov v mashinostroenii i metallurgii, № 44 (1087)*, 103-108 [in Russian].
10. Moroz M.M. ta in. (2018). Sotsialno-ekonomichne zabezpechennia pasazhyrskoho transportu zahalnoho korystuvannia [Socio-economic provision of public passenger transport]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia, № 1 (242)*, 100-105 [in Ukrainian].
11. Moroz, M.M. (2015). Shliakhy vdoskonalennia pasazhyrskykh perevezen transportom zahalnoho korystuvannia [Ways to improve public transportation by public transport]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyziatsiia, Vol. 28*, 57-63 [in Ukrainian].
12. Moroz, M.M., Korol, S.O. & Boiko, Y.O. (2016). Social traffic monitoring in the city of Kremenchuk. *Aktualni Problemy Ekonomiki –Actual Problems of Economics, № 1 (175)*, 385 – 398 [in English].
13. Moroz, M.M. (2015). Defining the term and the volume of investments on reduction to necessary structure of rolling stock of passenger public transport (Kremenchuk city case study). *Actual Problems of Economics, Vol. 166 (4)*, 235–243 [in English].
14. Vdovychenko, V.O. (2016). Formuvannia servisno-resursnykh, shcho stoyat miskoho hromadskoho pasazhyrskoho transport [Formation of service and resource conditions for sustainability of urban public passenger transport]. *Tekhnolohichnyy audyt ta rezervuvannia vyrobnytstva – Technological audit and production reserves, № 6/2 (32)*, 64-69 [in Ukrainian].

А.Г. Маркевич, доц., канд. техн. наук

Ланьчжоуський транспортний університет, м. Ланьчжоу, Китай

М.М. Мороз, проф., д-р техн. наук, **О.А. Мороз**, доц., канд. екон. наук

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна

О.М. Васильковський, доц., канд. техн. наук

Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Результати соціально-транспортного моніторингу пасажирських перевезень м. Кременчук

Метою статті є висвітлення результатів розробки алгоритму соціологічного опитування населення, що включає показники опитування сімей та користувачів транспорту, мету та спосіб подорожі, опис усієї поїздки маршрутами, порівняння робочих рухів за районами, задоволеність населення роботою транспорту, пріоритетність використання маршрутного таксі.

Під час соціальних досліджень було здійснено наступні дії: проведено опитування у 120 сім'ях методом випадкового вибору в мікрорайонах, пропорційно чисельності населення. Інтерв'ю включало такі питання: кількість членів родини; кількість зайнятих; дохід; кількість учнів; наявність та використання транспорту; вартість проїзду в громадському транспорті та в приватному транспорті; задоволеність роботою громадського транспорту; сімейні витрати на придбання продуктів харчування тощо. Також було проведено опитування в Інтернеті. За результатами опитування побудовано діаграми вибору муніципального транспорту, пріоритетів видів транспорту, проведено аналіз особливостей руху транспорту протягом дня, сімейних витрат на транспорт, незадоволеності пасажирів транспортною діяльністю. Досліджено думки населення щодо транспортних послуг, тарифів та готовності платити більше, а також наведені схеми розподілу маршрутних засобів залежно від відстані подорожі респондентів і діаграму розподілу думок респондентів щодо незадовільного рівня обслуговування.

Отримані дані дозволяють прогнозувати транспортне переміщення населення та приймати відповідні організаційно-економічні рішення та забезпечувати на цій основі високу ефективність та якість пасажирських перевезень. Результати є вихідними даними для розробки заходів щодо підвищення ефективності експлуатації конкретних маршрутів. Водночас, за даними дослідження та відповідної обробки матеріалів щодо вивчення потреб населення на тролейбусних маршрутах у місті Кременчук, спостерігається тенденція до утримання пасажиропотоків, що дає змогу підтримувати існуючу мережу без виправлення змін лінії та функціонування тролейбусних маршрутів на найближчу перспективу.

пасажирський транспорт, соціально-транспортне опитування, ефективність перевезень, моніторинг, пасажиропотік

Одержано (Received) 21.11.2019

Прорецензовано (Reviewed) 28.11.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

**МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО, ТЕРМІЧНА ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНА
ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ**

УДК 621.74.01

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).91-97](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).91-97)

П.М. Присяжнюк, доц., канд. техн. наук, **Р.В. Андрусишин**, асп., **Л.Д. Луцак**, доц., канд. техн. наук, **О.О. Іванов**, асп.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м.Івано-Франківськ, Україна

e-mail: admin@nung.edu.ua

Формування фазового складу, структури та властивості електродугових покриттів системи Fe-Mn-Nb-Si-C для зміцнення робочих поверхонь землерийної техніки

Для порошкових електродних матеріалів із позиції рівноважної термодинаміки розглянуто систему легування Fe-Mn-Nb-Si-C. Розраховано рівноважний фазовий склад систем характерний для матеріалів, що відповідають високомарганцевим електродам легованим карбідом ніобію. Показано, що у процесі кристалізації металу, наплавленого такими електродними матеріалами рівноважною є аустеніто-карбідна структура. Експериментальні дослідження структури наплавлених підтверджують результати розрахунків. Запропонована система легування дозволяє отримати твердість поверхневого шару на рівні 35 HRC після наплавлення та 54 HRC після пластичної деформації.

електродугове наплавлення, порошкові дроти, високомарганцева сталь, карбід ніобію, наклеп

П.Н. Присяжнюк, доц., канд. техн. наук, **Р.В. Андрусьшин**, асп., **Л.Д. Луцак**, доц., канд. техн. наук, **А.А. Іванов**, асп.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, г.Івано-Франківськ, Україна

Формирование фазового состава, структуры и свойства электродуговых покрытий системы Fe-Mn-Nb-Si-C для укрепления рабочих поверхностей землеройной техники

Для порошковых электродных материалов с позиции равновесной термодинамики рассмотрена система легирования Fe-Mn-Nb-Si-C. Рассчитан равновесный фазовый состав систем, который характерен для материалов, которые соответствуют высокомарганцевым электродам легированным карбидом ниобия. Показано, что в процессе кристаллизации металла, наплавленного такими электродными материалами равновесной является аустенито-карбидная структура. Экспериментальные исследования структуры наплавленных подтверждают результаты расчетов. Предложенная система легирования позволяет получить твердость поверхностного слоя на уровне 35 HRC после наплавки и 54 HRC после пластической деформации.

електродугова наплавка, порошкові проволочки, високомарганцева сталь, карбид ніобія, наклеп

Постановка проблеми. Специфіка роботи землерийної техніки робочих елементів землерийної техніки передбачає поєднання високої стійкості поверхневого матеріалу за умов ударних навантажень та абразивної зносостійкості. Як правило, таке поєднання властивостей викликає ряд труднощів, оскільки наявність високої концентрації масивних карбідних та (або) боридних фаз у поверхневому шарі поряд із

забезпеченням високої зносостійкості при стиранні по абразиву є причиною крихкого руйнування поверхневого шару. З іншого боку використання марганцевих сталей із високою зносостійкістю при динамічних навантаженнях не дозволяє забезпечити високий рівень стійкості в умовах абразивного зношування за тертя ковзання. Отже, для забезпечення необхідного рівня експлуатаційних показників робочих поверхонь землерийної техніки необхідною є пошук системи легування поверхневого шару, яка буде забезпечувати одночасно формування структурних складових, що забезпечують ударну та абразивну стійкість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З метою вибору найбільш раціональної системи легування електродних матеріалів для зміцнення зубів екскаватора авторами [1] було комбіноване багатшарове наплавлення матеріалами системи Fe-C3.6-Cr32 (марка ABRADUR 58) та Fe-C0.12-Mn7-Cr19-Ni9 (марка INOX B 18/8/6) із заевтектичною аустенітно-карбідною та аустенітною структурою, відповідно. Результати проведених триботехнічних та промислових випробовувань показали що така комбінація елементів дозволяє досягти підвищення зносостійкості за умов ударно-абразивного зношування. Прися практично у 3 рази за рахунок поєднання у структурі пластичного нікельмарганцевого аустеніту та карбідів хрому. Для зміцнення робочих поверхонь ґрунтообробних машин у роботі [2] пропонується проводити модифікування структури поверхневого шару сталевих деталей шляхом електродугового науглецювання поверхні із використанням обмідненого вугільного електроду. Така обробка дозволила отримати у структурі поверхневого шару відбілений чавун та досягти рівень твердості ~ 60 HRC. З метою підвищення зносостійкості зубів екскаваторів, виготовлених із середньовуглецевої низьколегованої сталі за умов роботи у середовищі базальту було застосовано електродугове наплавлення електродними матеріалами системи Fe-C1.75-Cr25-Mn1.23 (марка SURODUR) [3]. Після наплавлення проводили відпускання наплавленого шару в діапазоні температур 400 – 600 °С, яке дозволило отримати структуру поверхневого шару, що складалась із дрібнодисперсного мартенситу та зернистих ферито-цементитних сумішей із твердістю ~ 52 HRC. Підвищення довговічності завдяки використанню наплавлення склало 30 %. Використання лазерного нанесення покриттів системи FeNbC із забезпеченням прогнозованого вмісту карбідної фази 40 - 80 мас. % для зміцнення робочих поверхонь зубів екскаваторів, які працюють у гірничорудній промисловості описано у роботі [4]. Як вихідний матеріал для нанесення покриттів використовували порошок фероніобію системи Fe-Nb35-C5-Al7-Ti2.5. Покриття було нанесено на зуби екскаваторів Volvo, які працюють у гірничорудній промисловості. Отриманий поверхневий шар товщиною 1,5 мм характеризується вираженою гетерофазовою композитною структурою, яка складається із великої кількості (~ 60 об. %) огранених зерен NbC розмірами 10-30 мкм, рівномірно розташованих у в'язкій сталевій матриці. Результати промислових випробовувань показали, що використання такого покриття дозволяє знизити масову інтенсивність абразивного зношування у 2 рази. Використання авторами [5] складної системи легування Fe-C-V-Cr-Nb-W при нанесенні покриттів із порошкових дротів на основу із сталі Hardox 450 дозволило отримати поверхневий шар товщиною ~ 2 мм із мікротвердістю ~ 12 ГПа, яка досягається за рахунок формування у структурі комплексних карбідів типу $M_{23}C_6$ та MC. Зносостійкість такого покриття за даними авторів у 140-150 перевищує зносостійкість Hardox 450.

Постановка завдання. Виходячи із проведеного літературного огляду метою дослідження було встановлення закономірностей формування структури, фазового складу та властивостей електродугових покриттів із порошкових дротів на основі високолегованої (марганцевої) сталі при додаванні до її складу карбиду ніобію.

Виклад основного матеріалу. Електродні матеріали для електродугового нанесення покриттів виготовляли у вигляді однозамкової порошкової стрічки шляхом закатування шихти в оболонку із сталі 08кп ГОСТ 3559-75. Порошкова шихта складалась із феросилікомарганцю МНС17 ГОСТ 4756-91 мас. %, графіту К-354 ГОСТ 7885-86, карбіду ніобію NbC ТУ 6-09-03-6-75 та добавок що забезпечують стабільність горіння дуги. Дослідження структури проводили методом електронної мікроскопії із використанням CarlZeiss, який включає у себе базовий блок EVO 40XVP оснащений детектором відбитих електронів (BSD). Наплавлення проводили на сталь 45 на постійному струмі зворотної полярності. Структуру покриттів досліджували методом електронної мікроскопії. Твердість покриттів вимірювали методом Роквелла у вихідному стані та після деформації. Деформацію проводили на пресі Брінеля шляхом втискування твердосплавної кульки із навантаженням 3000 кг, а твердість вимірювали у центрах залишених відбитків. Моделювання формування фазового складу проводили методом Calphad із використанням бази термодинамічних функцій, скомпільованої на основі даних роботи [6] та модуля розрахунку вільної енергії GES вбудованого у програмне забезпечення Thermo-calc 2003р. Перелік складів шихти електродних матеріалів наведено у таблиці 1, а розрахований із урахуванням коефіцієнту заповнення компонентний склад поверхневого шару у таблиці 2.

Таблиця 1 – Склад шихти порошкових електродів, мас. %

Зразок №	МНС 17	NbC	Графіт	Інші
1	70	0	2	28
2	74	6	2	18
3	69	13	2	16
4	67	19	2	12
5	65	24	2	9

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Розрахований елементний склад системи легування, ат. %

Зразок №	Fe	Mn	Nb	Si	C
1	63,93	17,62	-	8,61	6,84
2	63,80	17,81	1,35	8,70	8,35
3	63,43	16,56	2,71	8,09	9,21
4	62,50	15,79	3,88	7,71	10,12
5	61,69	15,11	4,93	7,38	10,88

Джерело: розроблено авторами

Аналіз побудованої діаграми стану марганцева сталь (FeMnSiC) – NbC (рис. 1) показує, що основними стабільними фазами у даній системі є : твердий розчин на основі NbC, аустеніт (А), ферит (Ф), карбід цементитного типу (Ц), карбідна фаза типу M_5C_2 а також карбосиліцид заліза Fe_8Si_2C . Розглянута система відноситься до евтектичного типу із температурою початку евтектичного перетворення ~ 1500 К. Інтервал кристалізації аустеніту із розплаву є достатньо вузьким та не перевищує 150 К. Підвищення вмісту NbC веде до суттєвого підвищення температури ліквідуса системи, зниження стабільності карбідної M_5C_2 і карбосиліцидної фази Fe_8Si_2C за рахунок розширення області існування А+ NbC+Ц та практично не впливає на температуру початку кристалізації аустеніту та ширину температурного діапазону його кристалізації. Кристалізація сплавів що відповідають дослідним електродним матеріалам № 2 – 5 проходить за ідентичною схемою : не першому етапі із розплаву

кристалізується NbC далі, при досягненні температури ~ 1500 К, починається одночасна кристалізація аустеніту та NbC за евтектичною схемою. При подальшому охолодженні у твердому стані із аустеніту виділяється карбід типу M_5C_2 , який при зниженні температури повністю переходить у цементит. Продовження зниження температури веде до початку перетворення $A \rightarrow \Phi$ при ~ 1000 К, яке завершується при температурі ~ 900 К. Таким чином, рівноважна структура сплавів при кімнатній температурі трифазова і складається із фериту, NbC та цементиту. В реальних умовах кристалізації наплавленого шару внаслідок неможливості повного проходження дифузійного перерозподілу вуглецю у системі буде фіксуватись стан, який на рівноважній діаграмі стану відповідає областям, що межують із лінією солідус системи. У даному випадку це відповідає структурі $A + NbC$ та $A + NbC + \Psi$.

Характер кристалізації NbC із розплаву для досліджених сплавів (рис. 2) також є ідентичним: виділення NbC починається із розплаву; інтенсивне збільшення кількості карбідної фази спостерігається за температур кристалізації аустеніту; при охолодженні у твердому стані кількість NbC незначно зменшується головним чином за рахунок утворення карбідних фаз M_3C та M_5C_2 . З результатами розрахунків рівноважна кількість NbC у сплавах № 2, 3, 4 та 5 буде становити ~ 3 , ~ 6 , $\sim 8,5$ та ~ 10 об. %, відповідно.

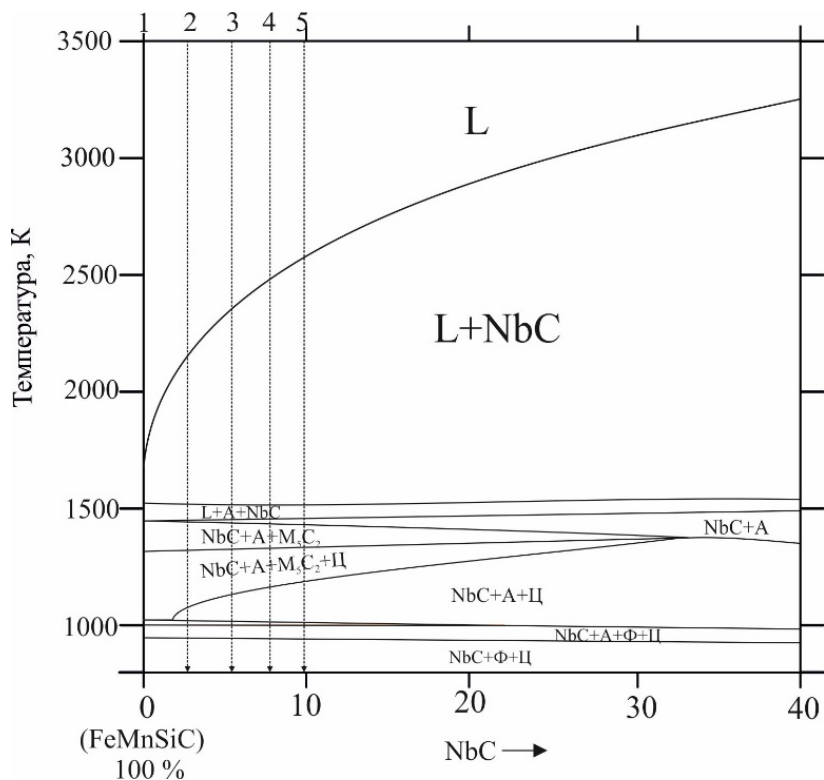


Рисунок 1 – Фрагмент псевдобінарної діаграми стану FeMnSiC – NbC

Джерело: розроблено авторами

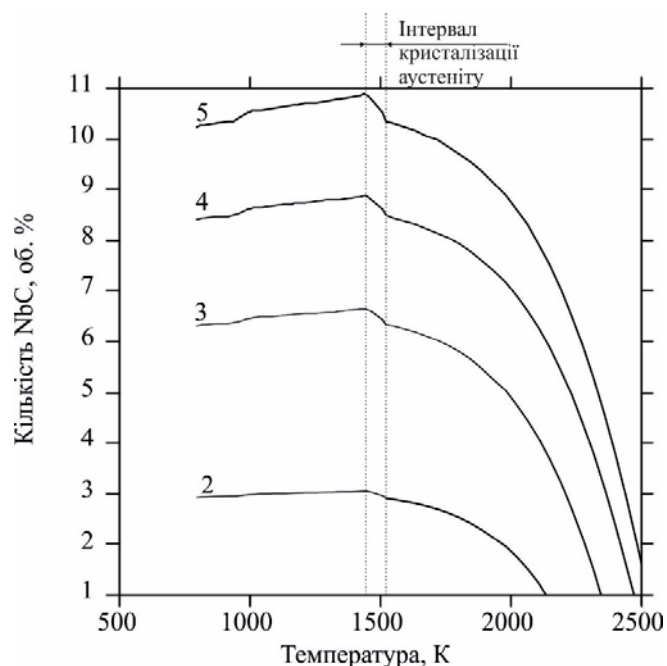


Рисунок 2 – Залежність рівноважної кількості NbC від температури для зразків № 2 -5

Джерело: розроблено авторами

Результати дослідження мікроструктури поверхневого шару, наплавленого порошковим електродним матеріалом системи Fe-Mn-Nb-Si-C (рис. 3) показують, що він складається із однорідної фази, яка представляє собою марганцевий аустеніт, у якому рівномірно розташовані дисперсні (розмірами ~ 3 мкм) включення NbC ограненої форми. Така структура відповідає розрахованому складу та має композитну будову, що сприяє підвищенню механічних властивостей.

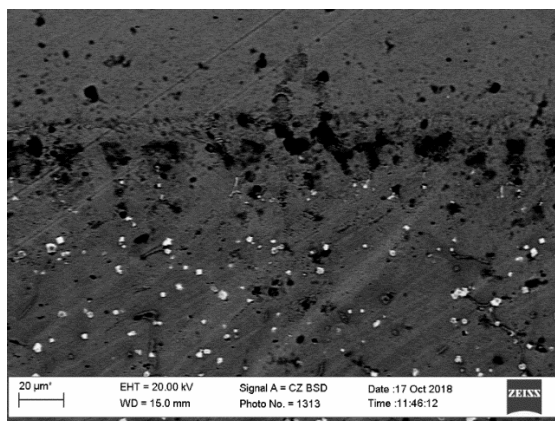


Рисунок 3 – Структура електродугового покриття системи Fe-Mn-Nb-Si-C (вміст NbC ~ 10 %)

Джерело: розроблено авторами

Результати вимірювання твердості поверхневого шару залежно від кількості NbC до деформації та після показують, що у недеформованих покриттях при збільшенні вмісту NbC від 0 до 10 об. % спостерігається пропорційне збільшення твердості за залежністю близькою до лінійної від 20 до 35 HRC. Таке зростання твердості закономірно зумовлено збільшенням у структурі більш твердої фази, що

також передбачає підвищення абразивної зносостійкості. Однак, при вимірюванні твердості деформованих шарів спостерігається інша тенденція – збільшення вмісту NbC від 0 до 6 об. % не веде до зростання твердості деформованого шару, проте підвищенні вмісту NbC понад 6 об. % відбувається інтенсивний ріст твердості наклепаного шару, яка при вмісті 10 об. % становить 54 HRC. Такий характер росту твердості наклепаного шару при збільшенні у ньому кількості включень твердої фази можна пояснити тим, що при збільшенні кількості зерен NbC у структурі відстані між частинками зменшуються і матеріал покриття деформується більш інтенсивно у міжкарбідних мікрооб'ємах. Крім того, огранена форма частинок NbC є додатковим джерелом концентраторів напружень, що інтенсифікують наклеп.

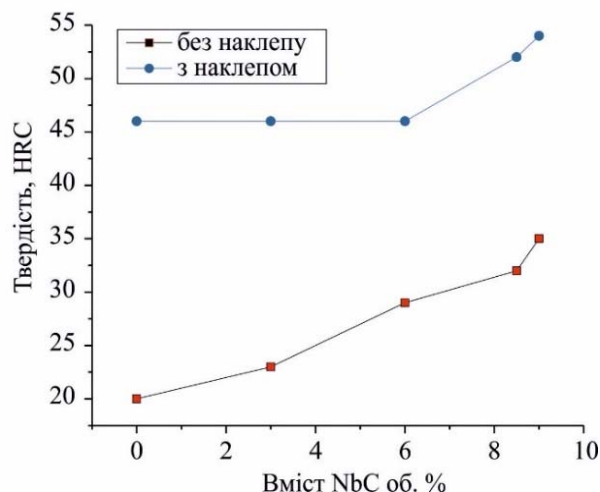


Рисунок 4 – Структура електродугового покриття системи Fe-Mn-Nb-Si-C (вміст NbC ~ 10 %)

Джерело: розроблено авторами

Висновки. За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено систему легування порошкових електродних матеріалів для зміцнення робочих органів землерийної техніки, яка працює за умов значних динамічних навантажень в абразивних середовищах. Встановлено, що при легуванні електродних матеріалів на основі марганцевих сталей близьких за складом до сталі 110Г13Л карбідом ніобію в кількості більше 6 об. % суттєво зростає як вихідна твердість (до наклепу так і твердість після деформації). Отримане значення твердості деформованого шару - 54 HRC значно перевищує твердість після деформації поверхневих шарів, отриманих шляхом електродугового наплавлення серійними електродами на основі високомарганцевих сталей (46 HRC). У подальших дослідженнях слід провести визначення абразивної зносостійкості розроблених покриттів при випробовуваннях за різними схемами навантаження.

Список літератури

1. Selection of the most appropriate welding technology for hardfacing of bucket teeth. / Vukic Lazic at el. *Materials and tehnology*. 2015. Vol. 49, № 1. P. 165–172.
2. Левчук О. В., Здобицький А. Я. Відновлення робочих органів ґрунтообробних знарядь електродуговим навугльцюванням. *Інженерія природокористування*. 2017. № 3. С. 69–73.
3. Selection of the most appropriate welding technology for hardfacing of bucket teeth. / Pascu D. R. at el. *In Advanced Materials Research. Trans Tech Publications*. 2015. Vol. 1111. P. 246–251.
4. Tavares Galvani E., Simoes S., Novaes Banov C. H., Rosa H. Application of FeNbC as a hardfacing material using laser cladding–part II. 2017. № 606. P. 195–206.

5. Phase composition and defect substructure of double surfacing, formed with V–Cr–Nb–W powder wire on steel. / Kononov S. V. et al. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. № 8(2), P. 313–317.
6. PrecHiMn-4—A thermodynamic database for high-Mn steels. / Hallstedt B. et al. *Calphad*. 2017. Vol. 56. P. 49–57.

References

1. Lazic, V., Sedmak, A., Nikolic, Ruica R., Mutavdzic, M., Aleksandrovic S., Krstic B., Milosavljevic, D., (2015). Selection of the most appropriate welding technology for hardfacing of bucket teeth. *Materials and technology*, 49(1), 165-172 [in English].
2. Levchuk, O. V., & Zdobyskyi, A. Ya. (2017). Vidnovlennia robochykh orhaniv gruntoobrobnykh znariad elektroduhovym navuhlets'ovuvanniam. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*, (2 (8)), 69-73 [in Ukrainian].
3. Pascu, D. R., Buzdugan, R. M., Birdeanu, A. V., Tihanov, D., & Binchiciu, E. (2015). Structural Hardening of Excavator Teeth Used in Exploitation of Magmatic Rocks. In *Advanced Materials Research* (Vol. 1111, pp. 246-251). Trans Tech Publications [in English].
4. Eduardo, T. G., Sergio, S., Carlos Henrique, N. B., Hugo Leandro, R., Eduardo, C., & Edmundo, B. C. (2017). Application of FeNbC as a Hardfacing Material Using Laser Cladding—Part II. *Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics and Composites XI: Ceramic Engineering and Science Proceedings Volume 37, Issue 2, 37*, 195-206 [in English].
5. Kononov, S. V., Kormyshev, V. E., Gromov, V. E., Ivanov, Y. F., & Kapralov, E. V. (2017). Phase composition and defect substructure of double surfacing, formed with V–Cr–Nb–W powder wire on steel. *Inorganic Materials: Applied Research*, 8(2), 313-317 [in English].
6. Hallstedt, B., Khvan, A. V., Lindahl, B. B., Selleby, M., & Liu, S. (2017). PrecHiMn-4—A thermodynamic database for high-Mn steels. *Calphad*, 56, 49-57 [in English].

Pavlo Prsyazhnyuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Roman Andrusyshyn**, post-graduate, **Lyubomyr Lutsak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olexandr Ivanov**, post-graduate
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Formation of Phase Composition, Structure and Properties of Electric Arc Coatings of Fe-Mn-Nb-Si-C System for Hardfacing of Working Surfaces of Earthmoving Equipment

The purpose of the study was to establish the regularities of formation of the structure, phase composition and properties of electric arc coatings of powder wires based on high-alloy (manganese) steel with niobium carbide additions using CALPHAD method together with experimental investigation of structure and properties and obtaining the hardfacing material with high impact arbasive wear resistance for earth moving machines equipment.

Using the free energy calculations of a multicomponent system by the Calpad method, a pseudobinary phase diagram of a highmanganese steel - niobium carbide system was constructed. The use of the diagram made it possible to predict the phase and elemental composition of electric arc coatings made of powder electrode materials. The proposed alloying system allows to obtain a surface layer consisting of two phases: manganese austenite and niobium carbide in the form of dispersed inclusions. The results of measuring the hardness of the arc coatings of the proposed doping system show that increasing the content of niobium carbide in high manganese hardfacing alloy from 0 to 10 vol. % leads to an increase in the hardness of the surface layer from 20 to 35 HRC in the undeformed state and from 46 to 54 in the deformed state. The results show that the presence of disperse NbC inclusions in the amount of more than 6 % by volume increases the intensity of hardening of the surface layer during deformation due to the formation of microregions with high level of internal stresses.

According to the results of theoretical and experimental researches, a system of doping of powder electrode materials was developed to strengthen the working bodies of earthmoving equipment, which operates under conditions of considerable dynamic loads in abrasive media. It is established that when alloying electrode materials based on manganese steels close in composition to 110G13L steel, niobium carbide significantly increases both the initial hardness (before deformation) and the hardness after deformation. The obtained value of the hardness of the deformed layer - 54 HRC significantly exceeds the hardness of the serial high-manganese alloys (46 HRC) hardfacings.

electric surfacing, powder wires, high manganese steel, niobium carbide, hardening

Одержано (Received) 02.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 16.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

УДК 621.74.01

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).98-103](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).98-103)

П.М. Присяжнюк, доц., канд. техн. наук, **І.М. Семяник**, асп., **Л.Д. Луцак**, доц., канд. техн. наук, **Л.Л. Трошук**, асп.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м.Івано-Франківськ, Україна

e-mail: admin@nung.edu.ua

Вибір системи легування порошкових електродних матеріалів для зміцнення робочих поверхонь обладнання з переробки деревної біомаси

З метою забезпечення довговічності робочих поверхонь обладнання для виготовлення паливних брикетів із відходів деревообробної промисловості шляхом використання методів обчислювальної термодинаміки було запропоновано систему легування порошкових електродних матеріалів для нанесення електродугових покриттів Fe-Mn15-Cr15-Ti2-C2. Отримані покриття характеризуються твердістю на рівні 52 HRC, абразивною та корозійною стійкістю, а також здатністю до деформаційного зміцнення.

електродугове наплавлення, порошкові дроти, високохромистий сплав, карбід титану, деформаційне зміцнення

П.Н. Присяжнюк, доц., канд. техн. наук, **І.М. Семяник**, асп., **Л.Д. Луцак**, доц., канд. техн. наук, **Л.Л. Трошук**, асп.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, г.Івано-Франківськ, Україна

Выбор системы легирования порошковых электродных материалов для укрепления рабочих поверхностей оборудования по переработке древесной биомассы

С целью обеспечения долговечности рабочих поверхностей оборудования для изготовления топливных брикетов из отходов деревообрабатывающей промышленности путем использования методов вычислительной термодинамики было предложено систему легирования порошковых электродных материалов для нанесения электродуговых покрытий Fe-Mn15-Cr15-Ti2-C2. Полученные покрытия характеризуются твердостью на уровне 52 HRC, абразивной и коррозионной стойкостью, а также способностью к деформационного упрочнения.

електродугова наплавка, порошкові проволочки, високохромистий сплав, карбид титана, деформаційне упрочнення

Постановка проблеми. Проблема підвищення довговічності обладнання із переробки деревної біомаси у паливні брикети набуває з кожним роком все більшої актуальності, як у Карпатському регіоні так і в Україні в цілому через необхідність посилення енергетичної безпеки держави за рахунок відновлюваної енергетики. В умовах переробки тирси на паливні брикети основними елементами, які визначають довговічність та працездатність брикетувального обладнання є деталі, які безпосередньо контактують із робочим середовищем. Це, насамперед шнеки, матриці та пуансони. З огляду на властивості робочого середовища поверхневий шар таких деталей повинен характеризуватись одночасно високою твердістю, корозійною стійкістю та стійкістю при високих циклічних питомих навантаженнях. Як показує

досвід такий комплекс властивостей може бути отриманий при використанні матеріалів на основі реліту та вуглецевої або корозійностійкої сталі. Однак, дефіцитність вольфрамової сировини та її постійно зростаюча вартість приводять до необхідності пошуку нових альтернативних систем легування та матеріалів на їх основі. До такої системи, зокрема відноситься система Fe-Cr-Mn-Ti-C у якій Mn марганець забезпечує необхідну стійкість при високих питомих навантаженнях, Cr – корозійну стійкість та твердість, а Ti – циклічну стійкість за рахунок модифікування структури. Таким чином, проблема створення нових покриттів на першому етапі зводиться до правильного вибору співвідношення компонентів на основі аналізу фазового складу, структури та властивостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш поширеними бевольфрамовими матеріалами для наплавлення у даний час залишаються високохромисті сплави заевтектичного або еквтектичного типу. Підвищення рівня їх властивостей проводиться шляхом легування сильними карбідоутворюючими елементами з метою модифікування структури. Автори роботи [1] з метою підвищення зносостійкості високохромистих сплавів для наплавлення проводили легування ніобієм. Результати досліджень показали, що при додаванні 7 % Nb до сплавів системи Fe-Cr24-C5 їх зносостійкість при терті по закріпленому абразиву зростає на 20 %, при цьому твердість поверхневого шару ~ 8 ГПа після легування практично не змінюється. За результатами мікроскопічних досліджень поверхневих шарів та зношених поверхонь таке підвищення зносостійкості пояснюється суттєвим подрібненням структури первинних карбідів хрому Cr_7C_3 . Подібні результати були отримані у роботі [2] при легуванні високохромистих матеріалів для наплавлення системи Fe-Cr30-C5,5 ніобієм та диборидом титану у кількості 4,5 та 1 мас. %, відповідно. Після проведення легування твердість наплавленого шару залишається практично незмінною – на рівні 59 HRC, а зносостійкість за умов тертя по закріпленому абразиву зростає в 1,97 рази. Таке підвищення зносостійкості пояснюється наявністю в центральних областях зерен Cr_7C_3 включень складного карбіду $(Ti,Nb)C$, який виділяється на початкових стадіях кристалізації та виконує роль модифікатора. У роботі [4] вивчали вплив легування на твердість та ударну зносостійкість електродугових покриттів на основі системи Fe-Mn-C. Результати показали, що перехід від системи легування Fe-Mn-C до системи Fe-Mn-W-C (вміст W – 19 мас. %) твердість покриттів зростає від 11 HRC до 36 HRC. Покриття складаються із аустеніту та карбідів (цементитного типу, вольфраму та типу M_6C). Після добавки до сплавів системи Fe-Mn-W-C ~ 4 мас. % Mo твердість збільшується до 44 HRC при цьому появи нових фаз на дифрактограмі не було виявлено. Практично ідентичний характер зміни властивостей проявляється при додаванні Cr. Sachin Pawara та ін. провели дослідження впливу легування покриттів системи Fe-Cr-C у наступних комбінаціях елементів: Mo-Ti, Mo-W та Mo-Nb-W-V-Ti [5]. Результатами визначення зносостійкості було встановлено, що найвищою зносостійкістю характеризується сплав, який містить одночасно усі п'ять легуючих елементів, оскільки вони утворюють тугоплавку багатоконпонентну фазу, яка модифікує структуру. Таким чином, легування карбідоутворюючими елементами є ефективним як для системи Fe-Cr-C так і для Fe-Mn-C.

Постановка завдання. Метою роботи було отримання корозійно-зносо- та ударостійкого матеріалу для нанесення покриттів системи Fe-Cr-Mn-Ti-C із модифікованою аустеніто-карбідною структурою на основі термодинамічного аналізу

характеру формування фаз при охолодженні та експериментальному дослідженні структури та властивостей електродугових покриттів із порошкових електродних матеріалів.

Виклад основного матеріалу. Моделювання фазового складу покриттів здійснювали із використанням програмного забезпечення, JmatPro 6.1 та Thermocalc які побудовані на розрахунку вільної енергії за методикою Calphad. Як вихідну систему для розрахунків було вибрано Fe-Cr15-Mn15-C2-Ti. Зразки для експериментальних досліджень виготовляли шляхом ручного електродугового наплавлення покриттів із використанням порошкових електродів на підкладки виготовлені із сталі Ст. 3. Виготовлення порошкових електродів проводили шляхом закатування у порошкову стрічку із сталі марки 08кп сумішей порошоків металевого хрому ПХА 99 ГОСТ 14-00186482-051-2005, марганцю Mn997 ГОСТ 6008-90, титану ПТС-1 ТУ 14-22-57-92 та графіту К-354 ГОСТ 7885-86. Система легування розраховувалась із урахуванням коефіцієнту заповнення порошкового електроду. Хімічний склад електродних матеріалів наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Елементний склад порошкових електродів, мас. %.

Зразок №	Cr	Mn	C	Ti
1	15	15	2	-
2	15	15	2	2

Джерело: розроблено авторами

Дослідження структури проводили методом електронної мікроскопії у режимі обернено відбитих електронів (CZ BSD), який дозволяє розрізняти фази за їх їх густиною. При дослідженнях використовували електронний мікроскоп CarlZeiss, який включає у себе базовий блок EVO 40XVP. Вимірювання мікротвердості виконані на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженнях на індентор 1 і 2 Н, значення мікротвердості розраховувалось за результатами трьох вимірювань. Розміри відбитків вимірювались за допомогою цифрової камери-окуляра DCM510 приєднаної до твердоміра. Твердість за методом Роквелла вимірювали на твердомірі ТК-2 (ГОСТ 3882-74) втискуванням алмазного конуса при навантаженні ~ 1500 Н (шкала С). Поверхневу пластичну деформацію (ППД) проводили за допомогою твердоміра Брінеля. При навантаженні 3000кг. Як індентор використовувалась твердосплавна кулька діаметром 10мм. Після (ППД) твердість вимірювалась методом Роквелла у центрі отриманих лунок. Твердість визначали як середньоарифметичне значення не менше як по 5 вимірювань.

Оцінка абразивної зносостійкості нанесених покриттів проводилась в умовах тертя по закріпленому абразиву. Як контртіло (абразив) використовувався абразивний круг із карбіду кремнію діаметром 300 мм та товщиною 40 мм. Швидкість ковзання становила 0,21 м/с, шлях тертя становив 33 м. Випробовування проводилось на зразках циліндричної форми діаметром 10 мм.

Аналіз побудованого політермічного січення (FeMnCrC) – Ti (рис. 1) показує, що основними стабільними фазами у даній системі є : TiC із ГЦК граткою, аустеніт (А), ферит (Ф) та нижчий карбід хрому Cr₇C₃. Відповідно до діаграми стану добавки Ti суттєво впливають на температуру солідуса системи (при вмісті 1 мас. % температура зростає на 400 К), тому значна кількість Ti буде суттєво ускладнювати технологічні характеристики матеріалів для наплавлення. Кристалізація сплаву із вмістом 2 мас. % Ti починається із виділення TiC за температури вище ніж 1800 К, далі при температурі ~ 1550 К починається кристалізація аустеніту у температурному інтервалі 1550 – 1450 К. Таким чином, виділені зерна TiC будуть слугувати центрами для кристалізації

аустенітної фази, подрібнюючи її структуру. При температурі 1450 К починається кристалізація евтектики $A+Cr_7C_3$, яка завершується у вузькому температурному інтервалі. При цьому, підвищення вмісту Ті у розглянутому температурному інтервалі не впливає на температуру початку евтектичного перетворення. Після завершення кристалізації структура сплаву представлена трьома фазами: аустенітом, TiC та карбідом Cr_7C_3 .

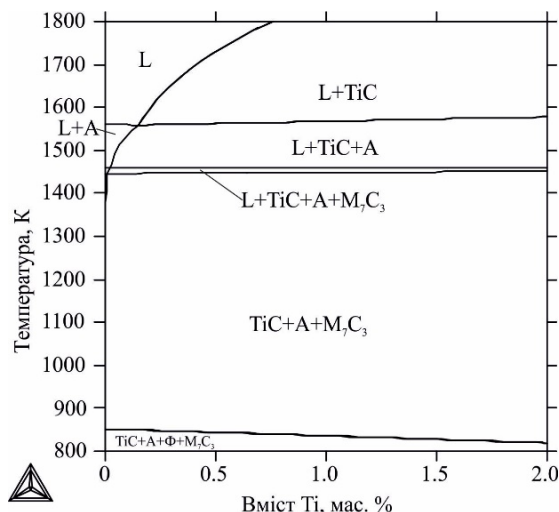


Рисунок 1 – Політермічне січення системи Fe-Cr-Mn-Ti-C по лінії Cr=Mn=15, C=2 мас. %
Джерело: розроблено авторами

Результати дослідження мікроструктури поверхневого шару, наплавленого порошковим електродним матеріалом системи Fe-Mn15-Cr15-Ti2-C2 (рис. 2) показують, що він складається із трьох структурних складових: витягнутих дендритних кристалів марганцевого аустеніту, що ростуть у напрямку протилежному відводу тепла, дисперсних обмежених зерен TiC , які знаходяться в центральних областях аустенітних зерен та пластинчастої евтектики $A+Cr_7C_3$, розташованої у міждендритному просторі.

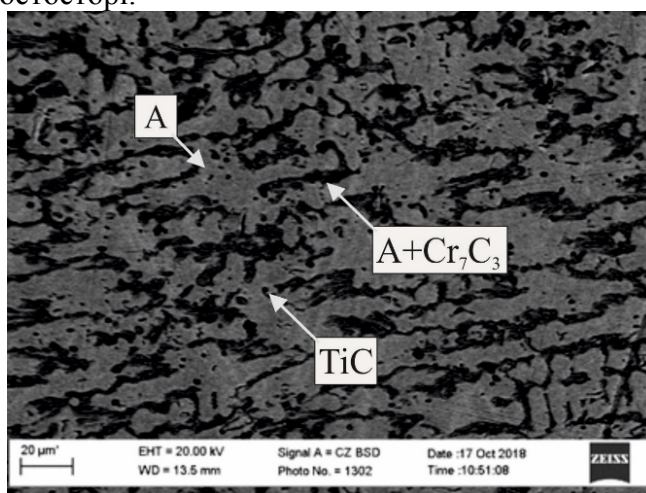


Рисунок 2 – Структура електродугового покриття системи Fe-Mn15-Cr15-Ti2-C2
Джерело: розроблено авторами

За результатами визначення твердості та зносостійкості (табл. 2) видно, що вплив Ті на твердість покриттів є незначним як до пластичної деформації так і після неї та проявляється головним чином у підвищенні мікротвердості аустеніту за рахунок

потрапляння дисперсних зерен TiC у зону інденування. Вплив вмісту Ti на абразивну зносостійкість є більш суттєвим, оскільки спостерігається її підвищення на 30 %. Ймовірно підвищення абразивної зносостійкості у даному випадку зумовлене подрібненням зерен аустеніту та евтектики через модифікуючу дію добавок TiC.

Таблиця 2 – Властивості поверхневих шарів, наплавлених електродами системи Fe-Cr-Mn-Ti-C

Зразок №	Твердість до наклепу, HRC	Твердість після наклепу, HRC	Мікротвердість аустеніту, ГПа	Відносна зносостійкість, ε
1	42	52	320	1,0
2	44	52	380	1,31

Джерело: розроблено авторами

Висновки. На основі проведених досліджень встановлено, що у системі Fe-Mn15-Cr15-C2 добавки Ti у кількості до 2 мас. % виконують роль модифікаторів структури, що сприяє суттєвому підвищенню абразивної зносостійкості. Електродугові покриття із порошкових дротів запропонованої системи легування характеризуються корозійною стійкістю та здатністю до наклепу (твердість після пластичної деформації становить 52 HRC), тому можуть бути застосовані для зміцнення робочих поверхонь деталей брикетувальних пресів з виготовлення паливних брикетів із відходів деревообробної промисловості. У подальших дослідженнях слід приділити увагу вибору раціональних технологічних параметрів отримання покриттів розробленої системи легування та особливостям їх механічної обробки.

Список літератури

1. The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe–Cr–C–Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process. / Correa, E. O. at el. *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 276. P. 479-484. DOI:10.1016/j.surfcoat.2015.06.026
2. Microstructure and properties of Fe-Cr-C hardfacing alloys reinforced with TiC-NbC. / Liu H. Y. at el. *Journal of iron and steel research international*. 2015. Vol. 23(3). P. 276-280. DOI:10.1016/S1006-706X(16)30045-0
3. Effect of nitrogen alloying on the microstructure and abrasive impact wear resistance of Fe-Cr-C-Ti-Nb hardfacing alloy. / Wang J. at el. *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 309. P. 1072-1080. DOI:10.1016/j.surfcoat.2016.10.029
4. Modeling of Microstructures and Analysis of Abrasive Wear of Arc-Welded Hadfield Steel. / Jankauskas V. at el. *Journal of Friction and Wear*. 2017. Vol. 39(1). P. 78-84. DOI: 10.3103/S1068366618010142
5. Effect of different carbides on the wear resistance of Fe-based hardfacing alloys./ Pawar S. at el. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019. Vol. 78. P. 288-295. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2018.10.014

References

1. Correa, E. O., Alcântara, N. G., Valeriano, L. C., Barbedo, N. D., & Chaves, R. R. (2015). The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe–Cr–C–Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process. *Surface and Coatings Technology*, 276, 479-484 [in English].
2. Liu, H. Y., Song, Z. L., Cao, Q., Chen, S. P., & Meng, Q. S. (2016). Microstructure and properties of Fe-Cr-C hardfacing alloys reinforced with TiC-NbC. *Journal of iron and steel research international*, 23(3), 276-280 [in English].
3. Wang, J., Liu, T., Zhou, Y., Xing, X., Liu, S., Yang, Y., & Yang, Q. (2017). Effect of nitrogen alloying on the microstructure and abrasive impact wear resistance of Fe-Cr-C-Ti-Nb hardfacing alloy. *Surface and Coatings Technology*, 309, 1072-1080 [in English].

4. Jankauskas, V., Choteborsky, R., Antonov, M., & Katinas, E. (2018). Modeling of Microstructures and Analysis of Abrasive Wear of Arc-Welded Hadfield Steel. *Journal of Friction and Wear*, 39(1), 78-84 [in English].
5. Pawar, S., Jha, A. K., & Mukhopadhyay, G. (2019). Effect of different carbides on the wear resistance of Fe-based hardfacing alloys. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 78, 288-295 [in English].

Pavlo Prisyazhnyuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Iryna Semyanyk**, post-graduate, **Dmytro Lutsak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Lyubomyr Troshchuk**, post-graduate
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

The Choice of Alloying System of Powder Electrode Materials for Strengthening the Working Surfaces of Wood Biomass Processing Equipment

The aim of the work was to obtain corrosion-resistant and impact-resistant material for hardfacings the system Fe-Cr-Mn-Ti-C based with modified austenite-carbide structure through thermodynamic analysis of the nature of phase formation during cooling and solidification and experimental studies of the microstructure, hardness, abrasive wear resistance, ability to deformation hardening of electric arc hardfacings from powder electrodes materials.

According to the results of the study of the polythermal cross section of the Fe-Mn-Cr-Ti-C system in the concentration range corresponding to the composition of the powder electrode materials, it was found that Ti doping leads to the formation of insoluble TiC in melt in the early stages of crystallization. Its presence provides grain refining of the structure of austenite and austenite-carbide eutectic. The results of the study of the microstructure of the surface layer deposited by a powder electrode material of the Fe-Mn15-Cr15-Ti2-C2 system show that it consists of three structural components: elongated dendritic crystals of manganese austenite growing in the opposite direction to the heat gradient, dispersed TiC inclusions which are located in the central regions of the austenitic grains and the plate eutectic A + Cr₇C₃ located in the interdendritic space. The results of the determination of hardness and durability show that the effect of Ti on the hardness of coatings is negligible both before and after plastic deformation and is manifested mainly in increasing the microhardness of austenite. The effect of Ti content on abrasion resistance is more significant as it is observed to increase by 30%.

Based on the studies, it was found that in the system Fe-Mn15-Cr15-C2 additives Ti in an amount up to 2 wt. % act as structure modifiers, contributing to a significant increase in abrasion resistance. Powder coated electric arc coatings of the proposed alloying system are characterized by corrosion resistance and deformation hardening (hardness after plastic deformation is 52 HRC), so they can be used to strengthen the work surfaces of briquetting presses for the production of fuel briquettes from waste products. Further research should pay attention to the choice of rational technological parameters of obtaining coatings of the developed alloying system and the features of their mechanical processing.

hardfacing, powder wires, high-alloy chromium, titanium carbide, deformation hardening

Одержано (Received) 02.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 16.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

УДК 621.432

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).104-115](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).104-115)**А.В. Рутковський**, ст. наук. співр., канд. техн. наук*Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна**e-mail: coating@ipp.kiev.ua***С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук, **С.С. Михайлюта**, асп.*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: marko60@ukr.net; sergejmihajluta2@gmail.com*

Дослідження впливу технологічних параметрів процесу вакуумного азотування алюмінієвих сплавів на властивості дифузійних іонноазотованих шарів

В роботі проведено дослідження впливу технологічних параметрів процесу вакуумного азотування алюмінієвих сплавів на мікроструктуру, хімічний склад, залишкові напруження, мікротвердість та шорсткість дифузійних іонноазотованих шарів. Наведена методика проведення досліджень. Виявлено утворення рівномірного за товщиною та розподілом легуючих елементів поверхневого шару та утворенню в ньому зміцнювальних фаз на основі AlN, утворюється поверхнева бездефектна структура зі зміненими властивостями, має місце дифузія азоту, що впливає на фазовий склад, і в остаточному підсумку на мікротвердість поверхні. Дослідження мікроструктури показали, що із збільшенням температури азотування збільшується і товщина нітридного шару. Оптимальне значення температури при якому досягається максимальна твердість складає 480°C, найбільші значення мікротвердості спостерігаються при тиску 50 МПа та складу газу 85%Ni₂ + 15% Ar. При формуванні теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів в алюмінієвих сплавах виникають напруження стиску. Максимальне значення залишкових напружень $\sigma_{\text{зал}}=280$ МПа спостерігається не на поверхні зразка, а на глибині близько 7 мкм, при цьому зі зростанням тривалості насичення поверхневого шару збільшується значення і залишкових напруг. Проте, таке підвищення проходить в умовах максимальних температур 480 ° протягом 180 хв.

вакуумне азотування, мікроструктура, хімічний склад, напруження, мікротвердість, шорсткість

А. В. Рутковский, ст. научн. сотр., канд. техн. наук*Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, г. Киев, Украина***С.И. Маркович**, доц., канд. техн. наук, **С.С. Михайлюта**, асп.*Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна*

Исследование влияния технологических параметров процесса вакуумного азотирования алюминиевых сплавов на свойстве диффузионных ионноазотированных слоев

В работе проведено исследование влияния технологических параметров процесса вакуумного азотирования алюминиевых сплавов на микроструктуру, химический состав, остаточные напряжения, микротвердость и шероховатость диффузионных ионноазотированных слоев. Приведена методика проведения исследований. Обнаружено образование равномерного за толщиной и распределением легирующих элементов поверхностного слоя и образованию в нем укрепляющих фаз на основе AlN, образуется поверхностная бездефектная структура с измененными свойствами, имеет место диффузия азота, который влияет на фазовый состав, и в окончательном итоге на микротвердость поверхности. Исследования микроструктуры показали, что с увеличением температуры азотирования увеличивается и толщина нитридного слоя. Оптимальное значение температуры при котором достигается максимальная твердость составляет 480°C, наибольшие значения микротвердости наблюдаются при давлении 50 МПа и составе газа 85%Ni₂ + 15% Ar. При формировании теплозащитных диффузионных ионноазотированных

© А.В. Рутковський, С.І. Маркович, С.С. Михайлюта, 2019

слоев в алюминиевых сплавах возникают напряжения сжатия. Максимальное значение остаточных напряжений $\sigma_{ост} = 280$ МПа наблюдается не на поверхности образца, а на глубине около 7 мкм, при этом с ростом длительности насыщения поверхностного слоя увеличивается значение и остаточных напряжений. Однако, такое повышение проходит в условиях максимальных температур 480 ° на протяжении 180 мин.

вакуумное азотирование, микроструктура, химический состав, напряжение, микротвердость, шероховатость

Постановка проблеми. Зростання експлуатаційних параметрів двигунів внутрішнього згорання викликає неухильне підвищення робочої температури конструктивних елементів двигуна, особливо деталей циліндро-поршнєвої групи [1]. Застосування для виготовлення поршнів алюмінієвих сплавів обумовлено їх високою питомою міцністю і малою питомою вагою, проте великим недоліком цих матеріалів є низька теплостійкість [2].

Перспективним для поверхневого зміцнення деталей автотракторних двигунів внутрішнього згорання вважається метод іонного азотування (іонно-плазмового азотування). Його сутність полягає у тому, що у розрідженому газовому середовищі, яке містить азот, між катодом (деталлю) та анодом (стінками вакуумної камери) збуджується тліючий розряд. При цьому позитивні іони газу з високою енергією, бомбардуючи поверхню катоду, нагрівають її до температури насичення та дифундують в цю поверхню, формуючи твердий розчин азоту в металі, а при досягненні межі розчинності - нітридні фази. Температура азотування 470-580°C, тиск $(1,33-13)10^2$ Па, робоча напруга коливається від 400 до 1000 В [2,3]. Разом з тим актуальною є задача визначення закономірностей впливу технологічних параметрів процесу на властивості дифузійних іонноазотованих шарів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню властивостей поверхневих зміцнених шарів присвячена значна кількість робіт. Відомо, що при експлуатації діючі в покритті напруження є алгебраїчною сумою експлуатаційних і залишкових напруг. Ясно, що залишкові напруги розтягання в покритті дуже небезпечні. Поряд з цим можна припустити, що при відсутності самовідшарування, наявність значних залишкових напруг стиску в покритті є бажаним, оскільки стискаючі залишкові напруги зменшують вплив прикладених напруг розтягання. Передбачається, що залишкові напруги стиску в покритті є однією з причин збільшення циклічної міцності [4], а також межі текучості і межі міцності при статичному навантаженні [5] для матеріалів з покриттям, що має стехіометричний склад.

Високий рівень залишкових напруг у іонноазотованих шарах обумовлений розходженням температурних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів покриття й основи; наявністю захоплених атомів газу; неповним структурним упорядкуванням, а отже значним ступенем дефектності конденсату [4,5]. Величина цих напруг змінюється широкому діапазоні від негативних до позитивних значень. Авторами [6] були визначені залишкові напруження в покритті нітриду бору, що у залежності від співвідношення в складі покриття атомів бору й азоту складали від -5 до -1 ГПа. Залишкові напруження стиску, що визначені для покриттів титан-нітрид вуглецю Ti(CM) на зразку зі сплаву ніобію мали порядок 2-3 ГПа [7]. У роботі [8] визначені залишкові напруження стиску покриття TiN, що осаджений реактивним розпиленням в умовах відсутності кисню склали 7,8 ГПа. При цьому було показано, що із ростом концентрації кисню в газі стискаючі напруження в плівках TiO_xN_v , падають і стають слабо розтягуючими. Це обумовлено зменшенням параметра решітки, заміщенням атому азоту атомом кисню і утворенням аморфних фаз.

Величина залишкових напружень розтягування в покритті з нітриду титана ($\epsilon - Ti_2N$), що не має стехіометричного складу, на підлощі з матеріалу 20X13 складала

800...1200 МПа. Різке зниження (від двох до чотирьох разів) залишкових напружень спостерігалось при введенні титанового підшару [5].

Разом з тим вплив процесу вакуумного азотування на мікроструктуру, хімічний склад, залишкові напруження, мікротвердість та шорсткість алюмінієвих сплавів вивчено недостатньо.

Постановка завдання. Для ефективного аналізу механізму явищ та управління технологічним процесом зміцнення поршнів, що виготовлені із алюмінієвих сплавів необхідно виявити взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу, і їх вплив на властивості дифузійних іонноазотованих шарів. Наявність цієї інформації дозволить підвищити міцність і надійність як самих покриттів, так і деталей з покриттями на стадії їхнього конструювання.

Методика дослідження. Методика растрової електронної мікроскопії та визначення хімічного складу. Мікроструктурні дослідження, а саме наявність та розподіл легуючих елементів по поверхні (ділянка 800x600 мкм), виконувалися з використанням методів растрової електронної мікроскопії і рентгенівського мікроаналізу. Дослідження проводилися на електронному мікроскопі мікроаналізаторі “CamScan-4DV”, системі рентгенівського енергодисперсного аналізу “Link- 860” (Англія), системі мікроаналізу “Oxford Energy 300” і рентгенофлюоресцентному аналізаторі фірми Філіпс за загально прийнятою методикою [9].

Визначення хімічного складу поверхні зразків, а також різних фаз, недосконалостей і включень проводилось в даній роботі з використанням методу рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА), фізична сутність якого полягає в генерації рентгенівського випромінювання при попаданні первинного електронного пучка на поверхню зразка, що досліджується.

Методика кількісного мікрорентгеноспектрального аналізу 2AP-4, що використовується в роботі, базується на використанні еталонів відомого складу. При проведенні кількісного мікроаналізу визначається величина відношення інтенсивностей рентгенівського випромінювання елемента, що досліджується, в зразку і в еталоні.

Методика визначення залишкових напружень. Серед існуючих способів визначення залишкових напружень найбільш простим і доступним є метод визначення величини залишкових напружень по кривизні обробленого прямокутного зразка [10]. Залишкові напруження, $\sigma_{\text{зал}}$ визначають, виходячи з того, що при напилюванні покриття на основу невеликої товщини вони приводять до деформації основи. Перед нанесенням покриття зразок закріплюють у кондукторі, що представляє собою пластину з двома затисками, виконаними у виді гвинтів. Після нанесення покриття затиски знімають. Під дією залишкових напруг зразок деформується у виді дуги окружності. У деформованого зразка заміряють прогин f .

Вимірюючи придбаний у такий спосіб прогин зразка з основного матеріалу, залишкові напруги можна визначити за відомими формулами [11]. Використовуючи рівняння пружної лінії для балки, у роботі [12] була отримана наступна залежність для залишкових напруг:

$$\sigma_{\text{зал}} = \frac{4EH^3}{3a^2(1-\nu)(H+h)} \frac{f}{h}, \quad (1)$$

де E , ν – модуль пружності першого роду і коефіцієнт Пуассона матеріалу основи відповідно;

a – довжина зразка;

f – стріла прогину;

H, h – товщина основи і покриття відповідно, яка для тонких покриттів $h \ll H$, може бути записана [13]

$$\sigma_{\text{зал}} = \frac{4EH^3}{3a^2(1-\mu)} \frac{f}{h}, \quad (2)$$

а для лінійного н.с.

$$\sigma_{\text{зал}} = \frac{4EH^3}{3a^2h}. \quad (3)$$

Використання апарату теорії вигину тонких пластин приводить авторів [13] до наступної розрахункової формули

$$\sigma_{\text{зал}} = \frac{EH^3}{6(1-\nu^2)(H+h)hR}, \quad (4)$$

де R – радіус кривизни, придбаний зразком у результаті деформації, викликаної залишковими напруженнями.

При $h \ll H$ і в умовах лінійного н.с., залежність (4) перетворюється у відому формулу Стоня

$$\sigma_{\text{зал}} = \frac{EH^2}{6hR}. \quad (5)$$

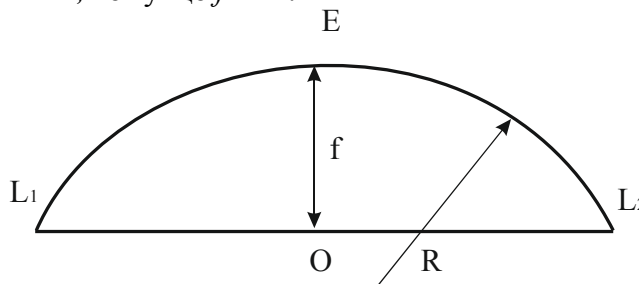
Величину радіуса кривизни R для (5) обчислюють через стрілу сегмента f і хорду $l/(L_1L_2)$ (рисунок 1). Грунтуючись на відомостях із планіметрії [13], можна знайти ступінь p точки O . З однієї сторони відомо, що

$$p^2 = OL_1^2 = \left(\frac{l}{2}\right)^2, \quad (6)$$

а з іншої сторони

$$p^2 = EO \cdot Od, \quad (7)$$

де $EO = f$, $OD \approx 2R$, тому що $f \ll R$.



L_1EL_2 – довжина зразка; L_1L_2 – хорда сегменту 1; EO – стріла сегменту, f

Рисунок 1 – Розрахункова схема обчислення радіуса кривизни зразка

Джерело: розроблено авторами з використанням [13]

З врахуванням (7) можна переписати у виді

$$p^2 = f \cdot 2R. \quad (8)$$

Порівнюючи праві частини (6) і (8), одержимо формулу для розрахунку радіуса кривизни R

$$R = \frac{\left(\frac{l}{2}\right)^2 - f^2}{2f}. \quad (9)$$

Таким чином, прямі виміри величини прогину f і наступне використання формул (3), (5) дозволяють визначити величину залишкових напругу в покритті.

Методика дослідження мікротвердості та шорсткості. Дослідження проводилися згідно ГОСТ 9450-76 за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3, кут між протилежачими гранями алмазної пірамідки становив 136° при навантаженні 100 г. При виборі навантаження виходили з імовірної глибини відбитку. Мінімальна товщина шару покриття повинна перевищувати глибину відбитку. Отримані покриття досліджувались на зміну шорсткості поверхні в залежності від технологічних режимів осадження покриттів за допомогою профілографа-профілометра 201 ТО.

Виклад основного матеріалу. Проведено визначення змін в іонноазотованих шарах після процесу їх формування за допомогою мікроструктурного та рентгено-структурного аналізу.

На основі проведених досліджень встановлено рівномірний розподіл та наявність N й Al, а також зміцнювальних фаз на основі з'єднання AlN по поверхні покриттів (рис. 2). Це підтверджує рівномірність охоплення деталі тліючим розрядом, що зумовлює рівномірне бомбардування поверхні деталі іонами газу, рівномірне нагрівання і однакову товщину дифузійного шару по всій поверхні.

Визначення хімічного складу зміцненої поверхні зразків вакуумним азотуванням в пульсуючому пучку плазми проводилося на основі методики кількісного мікрорентгеноспектрального аналізу ZAF – 4/FLS, за допомогою дисперсного енергетичного спектрометра LZ - 5 з обробкою отриманих результатів, включаючи кількісний аналіз з урахуванням усіх виправлень, у мікрокомп'ютері системи "Link-860". Дослідження проводилися на ділянці покриття 800 x 600 мкм. При цьому за основний критерій оцінки якості отриманого покриття використовувалися якісні й кількісні значення в поверхневому шарі легуючих елементів (табл. 1).

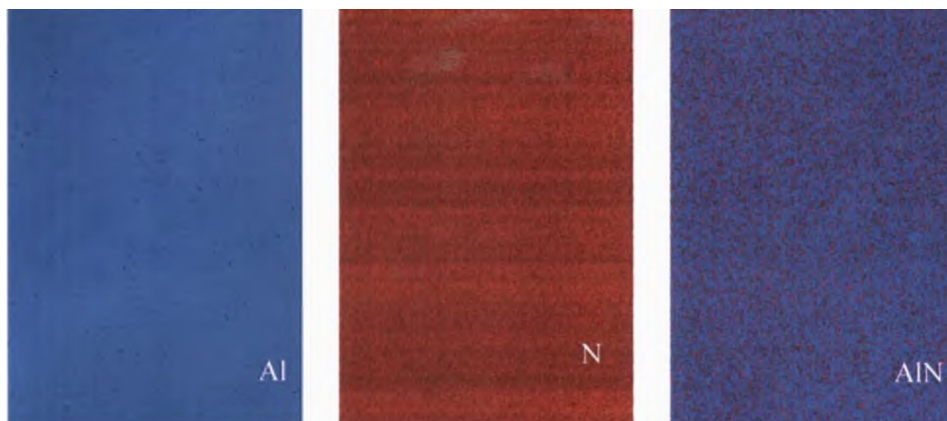


Рисунок 2 – Розподіл хімічних елементів по зміцненій поверхні

Джерело: розроблено авторами

Аналіз хімічного складу покриття дозволяє зробити висновки, що вміст Al знаходиться в межах, достатніх для утворення з'єднання тугоплавкого матеріалу AlN, який може впливати на термомеханічні характеристики покриття.

Таблиця 1 – Хімічний склад вакуум-плазмових шарів

Вміст хімічних елементів, %			
N	Cu	Mg	Al
14...16	4,2...6	0,8...1.3	69...74

Джерело: розроблено авторами

Рентгеноструктурні дослідження теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів, що сформовані на підложці з алюмінієвого сплаву АЛ21, проводилась на рентгенівському дифрактометрі ДРОН у фільтрованому мідному Cu-K α випромінюванні з послідовним розрахунком та розшифровкою дифрактограм.

Будова азотованого шару визначається протіканням двої конкуруючих процесів: катодного розпилення й зворотного катодного розпилення, яке залежить від технологічних параметрів іонного азотування. В залежності від характеру протікання цих процесів можна отримати дифузійний шар на базі високо азотистого твердого розчину баз поверхневої нітридної зони і з поверхневою нітридною зоною.

На всіх зразках з покриттями спостерігалися лінії відображення металевого Al, які відносяться до алюмінію підложки. Крім того, в усіх зразках спостерігалися сильні лінії відображення, які відповідають відображенням нітриду алюмінію. Азотування поверхневого шару проходило з участю релаксаційних процесів та утворенням високої щільності дислокацій. Спостерігається текстурування нітридних шарів за площиною куба. На жаль, більшість ліній відображення AlNi накладаються на лінії відображення Al. Для характеристики нанесених покриттів - їх відносної товщини та складу слідували за інтенсивністю та положенням цієї лінії відображення. На всіх рентгенограмах спостерігається лінія відображення під кутом $\psi = 19,7^\circ$, яка відповідає самій сильній лінії гексагонального нітриду алюмінію.

Підсумовуючи слід сказати, що в результаті мікроструктурних та рентгеноструктурних досліджень виявлено:

- утворення рівномірного за товщиною та розподілом легуючих елементів поверхневого шару;
- утворенню в поверхневому шарі зміцнювальних фаз на основі AlN.

Дослідження мікротвердості та шорсткості поверхні зміцненого зразка.

Одним з основних критеріїв впливу технологічного процесу вакуумного азотування у пульсуючому пучку плазми на зразки з алюмінієвого сплаву є зміна мікротвердості системи «основа-покриття» у порівнянні з початковою.

Для дослідження мікротвердості використовували плоскі зразки з алюмінієвого сплаву АЛ21, які підлягали обробці згідно матриці планування експерименту.

Результати експериментальних досліджень представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Мікротвердість зміцненого поверхневого шару.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Мікротвердість, МПа	15680	12680	13220	13560	11860	17920	10490	10950	11920	9090	12860	10720	12370	15820	10280	9160

Джерело: розроблено авторами

Іонна обробка визначає якість зміцненого поверхневого шару й забезпечує необхідний рівень її очистки та термоактивації. Необхідно відзначити, що в даному випадку при обробці основи утворюється поверхнева бездефектна структура зі зміненими властивостями на зразку.

Має місце дифузія азоту, що впливає на фазовий склад, і в остаточному підсумку на мікротвердість поверхні. Крім того, у вакуумній камері установки є присутнім невелика кількість кисню, так званий «залишковий вакуум». Поверхня зразка

знаходиться в активованому стані в процесі бомбардування, то природно, вона буде трохи окислятися завдяки наявності в камері кисню, що у свою чергу також впливає на властивості покриттів (рис. 3).

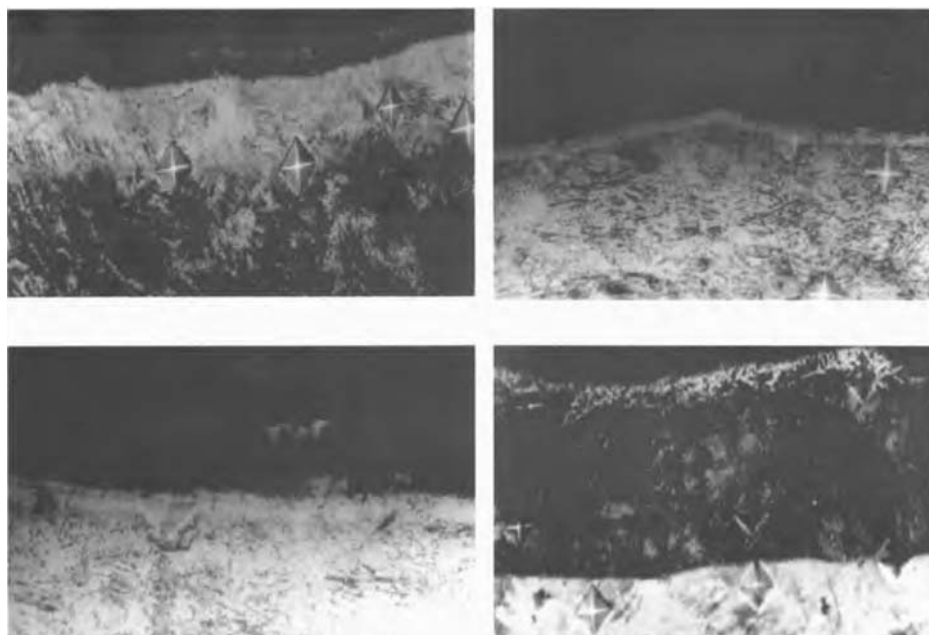


Рисунок 3 – Мікроструктури поперечного шліфа зразка, х 500

Джерело: розроблено авторами

На рис. 4 показані профілі мікротвердості азотованих зразків, що виготовлені із алюмінієвого сплаву. У азотованих зразків спостерігається зростання мікротвердості до $h_n = 20$ мкм, де крива досягає максимуму. При подальшому, збільшенні h_n мікротвердість зразків знижується до твердості основи.

Таким чином, завдяки спеціальній підготовці поверхні та послідуєчій азотації спостерігається підвищення мікротвердості поверхневого шару, властивості покриттів мають високі значення тому, що в їх утворенні беруть участь частинки (іони, збуджені атоми та іони) із високою енергією. Разом із тим формування зміцненого шару на початковій стадії в значній мірі визначає властивості та структуру поверхні в цілому. При подальшій іонній азотації стимулюються дифузійні процеси як за рахунок температури, так і в наслідок імпульсу енергії іонної компоненти.

Дослідження мікроструктури показали, що із збільшенням температури азотування збільшується і товщина нітридного шару. Оптимальне значення температури при якому досягається максимальна твердість складає 480°C . Також встановлено, що твердість азотованого шару на гострих кромках вища в порівнянні з її значенням на поверхні без гострих кромки. Це пояснюється більш високою щільністю струму на гострих кромках азотованої поверхні, що сприяє активації дифузійних процесів і підвищення фізико-механічних властивостей. Істотний вплив на мікротвердість поверхні азотованого шару здійснює тиск та склад реакційного газу. Виявлено, що найбільші значення мікротвердості спостерігаються при тиску 50 МПа та складу газу $85\%\text{Ni}_2 + 15\% \text{Ar}$.

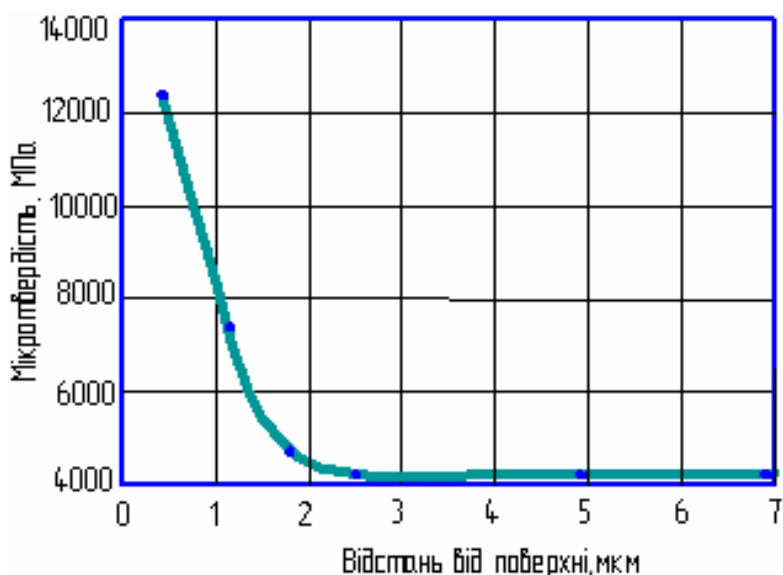


Рисунок 4 – Розподіл мікротвердості по глибині азотованого шару зразків
Джерело: розроблено авторами

Якість поверхневого шару поршнів автотракторних двигунів визначається шорсткістю поверхні, фізичним станом поверхневого шару конструкційного матеріалу та його напруженістю. Мікрогеометрія поверхні поршнів, їх рельєф, поряд із фізико-механічними властивостями поверхневого шару, є одним з істотних факторів, що визначають експлуатаційні властивості та працездатність двигунів внутрішнього згорання, їх ресурс та надійність. Крім того, шорсткість поверхневого шару впливає на характеристики міцності, якими є ізотермічна та термоциклічна повзучість.

В результаті аналізу впливу основних технологічних параметрів на формування теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів встановлено, що зміна режимів у процесі їх формування значного впливу на шорсткість поверхні не завдає (табл. 3). Різницю в значеннях шорсткості поверхні можна пояснити наявністю похибки при проведенні досліджень.

Таблиця 3 – Шорсткість поверхні азотованих поверхонь

№	0 б.з.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Шорсткість Ra, мкм	0,48	0,45	0,49	0,50	0,46	0,52	0,47	0,51	0,59	0,52	0,55	0,50	0,55	0,53	0,48	0,47	0,46

Джерело: розроблено авторами

Залишкові напруження. Для визначення залишкових напружень у зміцненому поверхневому шарі використовували пластинки розміром 200 мм x 15 мм x 1 мм із матеріалу АЛ21. Обробка зразків проводилася згідно матриці планування експерименту.

Перед формуванням дифузійних іонноазотованих шарів зразок закріплювали в кондукторі, який представляє собою пластину з двома затискачами, що виконані у вигляді гвинтів (рис. 5). Після нанесення покриття затискачі були зняті.

Під дією залишкових напружень зразок деформувався у вигляді дуги кола. У деформованого зразка заміряли прогин f , за величиною якого визначали значення залишкових напружень. Досліджувалися також можливості зниження залишкових напружень ще на стадії формування зміцненого шару і управління їх структурою.

Розподіл залишкових напруг $\sigma_{\text{зал}}$ в азотованих зразках приведені на рис. 6, а їх значення подані в табл. 4. У поверхневих шарах зразків, охолоджених після азотації, діють залишкові напруги стиснення на глибині 20...28 мкм. Застосування азотації приводить до утворення в поверхневому шарі матеріалу розподілених по поверхні і перетину залишкових напруг. За величиною стискуючі залишкові напруги більші у тому випадку, коли температура насичення поверхні азотом максимальна. Закономірності зміни залишкових напруг стиснення по перетину поверхневого шару зводяться до того, що їх максимум розташовується в глибині шару, а найбільша протяжність області дії стискуючих залишкових напруг досягається при високих температурах азотизації.

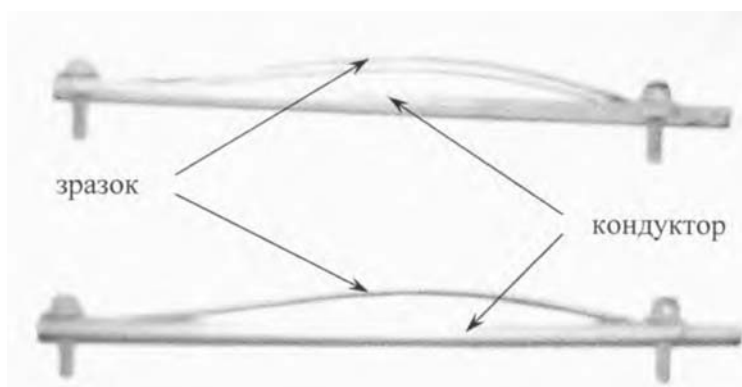


Рисунок 5 – Кондуктор із зразком

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, при азотизації регулювання рівня залишкових напруг стиснення і характеру їх розподілу по глибині поверхневого шару повинне здійснюватися шляхом оптимального вибору температури і тиску реакційного газу.

Таблиця 4 – Значення залишкових напружень в залежності від часу азотування

Вид обробки	Тривалість насичення, хв.		
	60	180	300
Іонне азотування при $T = 480 \text{ }^\circ\text{C}$	246	280	248

Джерело: розроблено авторами

Аналіз отриманих результатів показує:

- максимальне значення залишкових напружень $\sigma_{\text{зал}}=280$ МПа спостерігається не на поверхні зразка, а на глибині близько 7 мкм;

- зі зростанням тривалості насичення поверхневого шару збільшується значення і залишкових напруг. Проте, таке підвищення проходить в умовах максимальних температур $480 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 180 хв..

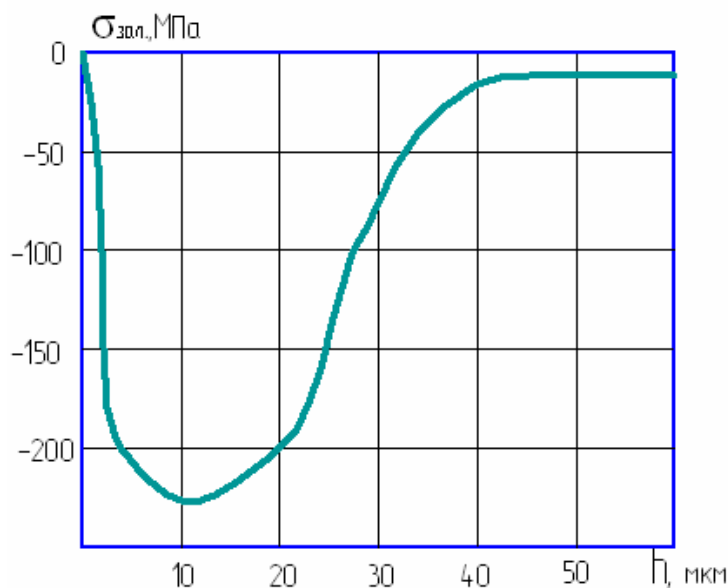


Рисунок 6 – Розподіл залишкових напружень по глибині азотованого шару
Джерело: розроблено авторами

Таким чином, при формуванні теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів в алюмінієвих сплавах виникають напруження стиску. Це може бути пояснено відмінністю температурних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів покриття й основи, а також значним ступенем дефектності конденсату.

Висновки. Виявлено утворення рівномірного за товщиною та розподілом легуючих елементів поверхневого шару та утворенню в поверхневому шарі зміцнювальних фаз на основі AlN.

Іонна обробка забезпечує необхідний рівень очистки та термоактивації. при цьому утворюється поверхнева бездефектна структура зі зміненими властивостями, має місце дифузія азоту, що впливає на фазовий склад, і в остаточному підсумку на мікротвердість поверхні.

Дослідження мікроструктури показали, що із збільшенням температури азотування збільшується і товщина нітридного шару. Оптимальне значення температури при якому досягається максимальна твердість складає 480°C

Вплив на мікротвердість поверхні азотованого шару здійснює тиск та склад реакційного газу. Виявлено, що найбільші значення мікротвердості спостерігаються при тиску 50 МПа та складу газу 85%Ni₂ + 15% Ar.

При формуванні теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів в алюмінієвих сплавах виникають напруження стиску. Максимальне значення залишкових напружень $\sigma_{\text{зал}}=280$ МПа спостерігається не на поверхні зразка, а на глибині близько 7 мкм, при цьому зі зростанням тривалості насичення поверхневого шару збільшується значення і залишкових напруг. Проте, таке підвищення проходить в умовах максимальних температур 480 ° протягом 180 хв.

Список літератури

1. Гречихин Л.И. Двигатели внутреннего сгорания: физические основы технической диагностики и оптимального управления. Минск : Наука і техніка, 1995. 270 с.
2. Ляшенко Б.А., Рутковский А.В. О достоинствах технологии вакуумного. *Оборудование и инструмент.* 2005. №12. С. 45-47.

3. Ляшенко Б.А., Маркович С.І., Михайлюта С.С. Розробка технологічного процесу вакуумного азотування поршнів двигунів в пульсуючому пучку плазми. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2017. Вип. 47, ч. 1. С. 158-166.
4. Рутковский А.В., Ляшенко Б.А., Гопкало А. П., Сорока Е.Б. Об упрочняющей роли вакуум-плазменных покрытий. *Пробл. прочности.* 1999. № 6. С. 123-127.
5. Внуков Ю.Н., Марков А.А., Лаврова Л.В., Бердышев Н.Ю. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / под ред. В.И. Гороховского. Киев: Техника, 1992. 141 с.
6. Остаточные напряжения в покрытии из нитрида титана, осажденного в вакууме / Матвеев Н.В. и др. *Пробл. прочности.* 1985. № 5. С.90-93.
7. Liu Changqing, Jin Zhujing, Wu Weltao Residual stress and damage mode of hard Ti(CN) coating. *Acta met. Sci.* 1990. 26, N 1. P.B27-B32.
8. Jin, Ping, Maruno Shigeo Stress relaxation in reactively sputter-deposited TiOxNv films / Jap. J. Appl. Phys. Pf. 1. 1991. 30, N 9A. P.2052-2062.
9. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Зчлин И. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / пер. с англ. Москва: Мир, 1984. 552 с.
10. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов / под общ. ред. А.Т.Туманова. -т.1. Москва: Машиностроение, 1974. 320 с.
11. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике. Москва: Наука, 1966. 423 с.
12. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов / Мяченков В.И., Мальцев В.П., Майборода В.П. и др. Москва: Машиностроение, 1989. 576 с.
13. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC. visualNastran for Windows. Москва: ДМК Пресс, 2004. 704 с.

Referencis

1. Grechihin, L.I. (1995). *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: fizicheskie osnovy tehnichej diagnostiki i optimal'nogo upravlenija*. Minsk : Navuka i tjechnika [in Russian].
2. Ljashenko, B.A. & Rutkovskij, A.V. (2005). O dostoinstvah tehnologii vakuumnogo [On the merits of vacuum technology]. *Oborudovanie i instrument – Equipment and tools, 12, 45-47* [in Russian].
3. Liashenko, B.A., Markovych, S.I. & Mykhajliuta, S.S. (2017). Rozrobka tekhnolohichnoho protsesu vakuumnoho azotuvannia porshniv dvyhunyv v pul'suiuchomu puchku plazmy [Development of the Technological Process of Vacuum Nitriding of Engine Pistons in the Pulsating Plasma Beam]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil'skohospodars'kykh mashyn: zahal'noderzh. mizhvid. nauk.-tekhn. zb. – National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machine, Vol. 47, 1, 158-166* [in Ukrainian].
4. Rutkovskij, A.V., Ljashenko, B.A., Gopkalo, A. P. & Soroka, E.B. (1999). Ob uprochnjajushhej roli vakuum-plazmennyh pokrytij [The strengthening role of vacuum-plasma coatings]. *Probl. prochnosti – Strength of Materials, 6, 123-127* [in Russian].
5. Vnukov, Ju.N., Markov, A.A., Lavrova, L.V. & Berdyshev N.Ju. (1992). *Application of wear-resistant coatings on high-speed tools.* (V.I. Gorohovskogo, Trans). Kiev: Tehnika [in Russian].
6. Matveev N.V. i dr (1985). Ostatochnye naprjazhenija v pokrytii iz nitrida titana, osazhdennogo v vakuume [Residual stresses in the coating of titanium nitride deposited in vacuum]. *Probl. prochnosti – Strength of Materials, 5, 90-93* [in Russian].
7. Liu Changqing, Jin Zhujing, Wu Weltao Residual stress and damage mode of hard Ti(CN) coating. *Acta met. Sci.* 1990. 26, N 1. P.B27-B32 [in English].
8. Jin, Ping, Maruno Shigeo Stress relaxation in reactively sputter-deposited TiOxNv films / Jap. J. Appl. Phys. Pf. 1. 1991. 30, N 9A. P.2052-2062 [in English].
9. Gouldstejn, Dzh., N'juberi, D. & Zchlin I. (1984). *Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis.* (Trans). Moskva: Mir [in Russian].
10. Tumanova, A.T. (Eds.). (1974). *Testing methods, control and research of engineering materials.* Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
11. Vygodskij, M.Ja. (1966). *Spravochnik po zlementarnoj matematike [Elementary Mathematics Reference]*. Moskva: Nauka[in Russian].
12. Mjachenkov, V.I., Mal'cev, V.P., Majboroda, V.P. et al. (1989). *Raschety mashinostroitel'nyh konstrukcij metodom konechnih zlementov [Calculations of engineering structures by the finite element method]*. Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
13. Shimkovich, D.G. (2004). *Raschet konstrukcij v MSC [Structural Analysis in MSC]*. visual Nastran for Windows. Moskva: DMK Press [in Russian].

Anatoly Rutkovskiy, PhD tech. sci, Senior Researcher

National Academy of sciences of Ukraine G.S. Pisarenko institute for problems of strength

Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci., Sergiy Myhajlyta, post-graduate

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Research of Influence of Technological Parameters of Process of a Vacuum Nitriding of Aluminium Alloys is on Property of the Diffusive Ion Nitrided Layers

Growth of operating parameters of combustion engines causes the steady increase of working temperature of structural elements of engine, especially pistons. The perspective for the superficial strengthening of details auto of tractor combustion engines is consider the method of the ionic nitriding. At the same time important is a task of determination of conformities to the law of influence of technological parameters of process on property of the diffusive ion nitrided layers.

For the effective analysis of mechanism of the phenomena and technological process control of strengthening of pistons which are made from aluminium alloys, it is necessary to find out intercommunication of factors, which determine motion of process, and their influence on property of the diffusive ion nitrided layers. The presence of this information will allow to promote durability and reliability of both coverages and details with coverages on the stage of their constructing. Research of influence of technological parameters of process of a vacuum nitriding of aluminium alloys is in-process conducted on mikrostructure, chemical composition, remaining tensions, mikrohardness and roughness of the diffusive ion nitrided layers. The method of leadthrough of researches is resulted. Mikro structural researches, namely a presence and distributing of alloying elements is for surfaces, were executed with the use of methods of raster electronic microscopy and x-ray photography mikro to the analysis. The size of remaining tensions was determined on curvature of the treated rectangular standard. Research mikro conducted hardness by a measuring device mikro to hardness of PMT-3, corner between against made 136 degrees the lyings verges of diamond pyramid at loading a 100 gramme. Found out education even after a thickness and distributing of alloying elements of superficial layer and to education in him of strengthening phases on the basis of AlN, a surface structure appears defect-free with the changed properties, diffusion of nitrogen which influences on phase composition takes a place, and in a final result on the mikrohardness of surface. Researches of mikrostructure rotined that with the increase of temperature of nitriding was increased thickness of the nitrided layer.

The optimum value of temperature at which is arrived at maximal hardness makes 480°C, most values мікро observed hardness at pressure of 50 Mpa and will make gas 85%Ni₂ + 15% Ar. At forming of heatcover diffusive іонноазотованих glowed there are tensions of clench in aluminium alloys. The maximal value of remaining tensions of узал=280 Mpa is observed not on-the-spot standard, but on the depth of about 7 мкм, here with growth of duration of satiation of superficial layer increased value and remaining tensions. However, such increase passes in the conditions of maximal temperatures 480 degrees for 180 minutes.**vacuum nitriding, mikrostructure, chemical composition, tension, mikrohardness, roughness**

Одержано (Received) 02.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 11.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ В МАШИНАХ

УДК 621. 824.32–044.952 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).116-121](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).116-121)

М.Ф. Ковальов, проф., канд. техн. наук, М.В. Головащук, асп.

*Національний транспортний університет, м.Київ, Україна**e-mail: mfk0146@gmail.com, Mineralisimys@ukr.net*

Визначення закономірностей зношування шийок колінчастих валів двигунів транспортних засобів

Забезпечення необхідних експлуатаційних показників двигунів транспортних засобів на сучасному етапі розвитку автомобілебудування та авторемонтного виробництва потребує поліпшення їх технічних характеристик. Однією з основних причин передчасного виходу з ладу двигунів транспортних засобів є знос трибосистеми шийки колінчастого вала - підшипника ковзання. В статті проведено аналіз закономірностей зношування корінних і шатунних шийок колінчастих валів двигунів транспортних засобів. Досліджено особливості зносу корінних та шатунних шийок колінчастих валів.

зношування, корінні та шатунні шийки колінчастого валу, двигун транспортних засобів

М.Ф. Ковалев, проф., канд. техн. наук, М. В. Головащук, асп.

Національний транспортний університет, г.Київ, Україна

Определение закономерностей изнашивания шеек коленчатых валов двигателей транспортных средств

Обеспечение необходимых эксплуатационных показателей двигателей транспортных средств на современном этапе развития автомобилестроения и авторемонтного производства требует улучшения их технических характеристик. Одной из основных причин преждевременного выхода из строя двигателей транспортных средств является износ трибосистемы шейки коленчатого вала - подшипника скольжения. В статье проведен анализ закономерностей изнашивания шеек коленчатых валов двигателей транспортных средств. Исследованы особенности износа коренных и шатунных шеек коленчатых валов.

изнашивание, коренные и шатунные шейки коленчатого вала, двигатель транспортных средств

Постановка проблеми. Поліпшення технічних характеристик двигунів на сучасному етапі розвитку автомобілебудування та авторемонтному виробництві характеризується посиленням їх експлуатаційних показників. Відомо, що зношування шийок колінчастих валів це поступова зміна їх розмірів, форми і стану поверхонь внаслідок взаємодії тонких поверхневих шарів металу в процесі тертя. В поверхневих шарах під впливом зняття сил тертя і зовнішнього середовища відбуваються складні фізико-хімічні зміни, якими і визначається швидкість зношування деталей. Швидкість зношування будь-якої деталі автомобіля залежить від великої кількості випадкових чинників: величини навантаження на поверхні тертя, що безперервно змінює величину зазору, між поверхнями, що труться, твердості і чистоти обробки поверхонь, швидкості відносного переміщення деталей, від в'язкості, температури і чистоти оливи і ін. Отже, швидкість зношування деталі слід розглядати як випадкову величину, а знос представляє залежну величину від чинників дії.

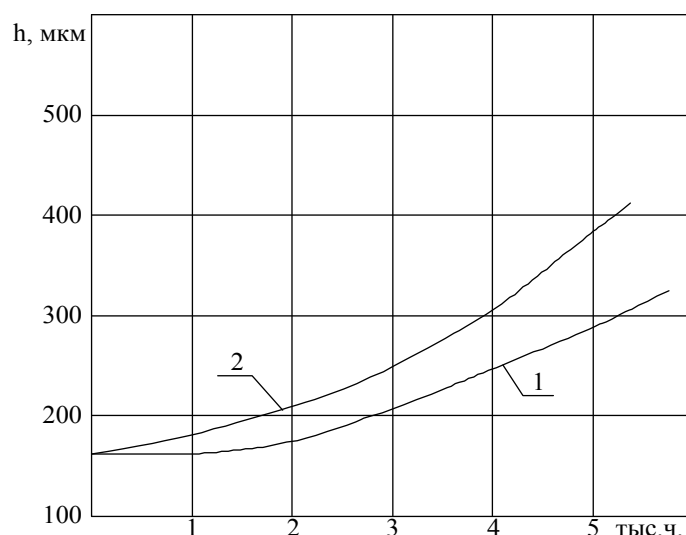
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Практичні дослідження та огляд літературних джерел вказують на те, що колінчасті вали є найбільш складною в конструктивному виконанні і найбільш напруженою деталлю двигуна, що працює в широкому об'ємі динамічних навантажень і швидкостей обертання.

Автори [3, 5] стверджують, що основною і постійно діючою причиною зміни технічного стану колінчастого вала та трибосистеми шийки колінчастого вала – вкладиша підшипника ковзання є зношення корінних та шатунних шийок.

В процесі зношення шийок колінчастих валів зростає величина зазору між поверхнями шийка вала – підшипник ковзання. В наслідок даного процесу відбувається зниження тиску оливи, а із зростанням величини зазору збільшуються динамічні навантаження які з часом набувають ударного характеру. При цьому інтенсифікується процес зниження тягового зусилля, швидкості руху, коефіцієнту корисної дії та інших технічних характеристик, а також в результаті дане явище впливає на прискорення зношування суміжних пар тертя [9].

Динаміка нерівномірного зношування корінних і шатунних шийок колінчастого вала по його довжині призводить до зростання завищених рівнів між суміжними шийками, що призводить до збільшення пластичної деформації колінчастого вала і може бути причиною його руйнування. При цьому зношування корінних шийок або підшипника ковзання в межах 0,05-0,08 мм вже небезпечне, оскільки може призвести до пошкодження колінчастого вала.

Із аналізу літературних джерел [1, 9] можна зробити висновок що зазори в трибосистемі двигунів транспортних засобів (шийка колінчастого вала – підшипник ковзання), змінюються інтенсивніше у порівнянні з циліндро-поршневою групою. Залежність зміни зазору в з'єднанні шийки колінчастого вала двигуна нового та відновленого зображено на (рис. 1).



1 - новий, 2 - відновлений

Рисунок 1 – Динаміка зміни зазорів в з'єднанні вкладиша з шийкою колінчастого вала двигуна
Джерело: [8]

Подальше дослідження характеру і причин руйнування колінчастих валів показало, що майже у всіх випадках вони пов'язані з зношенням корінних і шатунних шийок і лише невеликий відсоток від загального числа пошкоджень, які залежать від дефектів матеріалу деталі (заготовки) [4]. Це повною мірою підтверджує висновки численних спостережень професора Б. І. Костецького та інших вчених про те, що саме руйнування поверхонь деталей машин при контактній взаємодії, як правило, передує руйнуванню основи. Отже, у загальній проблемі надійності і довговічності автомобіля прийнято розрізняти «об'ємну міцність» і «міцність поверхневого шару» [6]. Дане висловлювання стверджує що переважна більшість відмов в умовах експлуатації з'являється внаслідок зношення, (руйнування) поверхневих шарів трибосистем.

Явища зношування та втома у вузлах та агрегатах транспортних засобів як показали дослідження авторів [2, 5] часто розвиваються спільно і взаємопов'язані. Ця властивість розповсюджується на силові агрегати транспортних засобів основу яких складає двигун внутрішнього згорання, а складовими системами якого, є колінчастий вал та вкладиши підшипників ковзання на зношення яких в першу чергу впливають згадані явища.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз закономірностей зношування шийок колінчастих валів двигунів транспортних засобів в залежності від величини навантаження на поверхні тертя, що безперервно змінює величину зазору, між поверхнями, що труться, твердості і чистоти обробки поверхонь, швидкості відносного переміщення деталей, від в'язкості, температури і чистоти оливи і ін. Відповідно до поставленої мети в статті досліджено особливості зносу корінних та шатунних шийок колінчастих валів.

Виклад основного матеріалу. Довговічність і потенціал роботи колінчастих валів визначаються двома параметрами – втомною міцністю і зносостійкістю. Коли питання підвищення втомної міцності колінчастого вала і, взагалі, всіх елементів трибосистем двигуна вирішується в основному на стадії його проектування, то зносостійкість деталей і пар тертя в цілому залежить від багатьох факторів, починаючи з конструкції колінчастого вала, методів зміцнення елементів вала і закінчуючи режимами роботи двигуна, якістю застосовуваних автоексплуатаційних матеріалів і зовнішніми умовами роботи (рис. 2).



Рисунок 2 – Фактори, які впливають на інтенсивність зношування трибосистем двигуна
Джерело: [3]

Аналізуючи вплив різних факторів у загальному процесі зношування деталей двигуна автори М. А. Григорьев, А. В. Чичинадзе у своїх роботах [3, 9] приділяли значну увагу процесам зношення, характерним з'єднанням вузлів та агрегатів транспортних засобів.

Зношування, що виникає при роботі трибосистем, є найбільш характерним видом пошкодження деталей машин і характеризується видаленням матеріалу з контактуючих поверхонь в результаті механічних та хімічних процесів. Нині досить добре вивчені види і закони зносу, однак сформулювати однозначно і узагальнити все різноманіття явищ, що відбувається в поверхневих шарах деталей, неможливо.

Таким чином, зносостійкість необхідно розглядати як характеристику складної трибологічної системи, так як вона не представляє собою такої ж характеристики даного матеріалу, як, наприклад, межа його міцності під час розтягу. При контакті двох сполучених поверхонь і їх відносному переміщенні в поверхневих шарах виникають механічні та молекулярні взаємодії, які, в кінцевому результаті, і призводять до руйнування мікрооб'ємів поверхонь, тобто до їх зносу. При цьому провідним процесом зношування трибосистеми шийка колінчастого вала – підшипника ковзання є механічне зношування, до якого входять абразивне і втомлене зношування [10].

Супутніми видами зношування є молекулярно-механічне і корозійно-механічне зношування з усіма своїми різновидами, які в залежності від умов роботи двигуна впливають на зношування і при певних умовах можуть стати основними процесами руйнування. Абразивні частки надходять в робочу зону пари тертя з повітря, разом з паливом і мастильними матеріалами. Забруднені мастильні матеріали істотно впливають на інтенсивність процесу зношування шатунних і корінних шийок колінчастих валів, в результаті чого спрацювання може відбуватися навіть при рідинному терті.

Як було зазначено раніше, колінчастий вал є найбільш напруженою деталлю двигуна, що сприймає періодичні навантаження від сил тиску газів в циліндрах, сил інерції зворотньо-поступальних рухомих мас і їх моментів. Протягом кожного робочого циклу (720° для чотирьох - і 360° для двотактного двигуна) сили, що діють на колінчастий вал, безперервно змінюються за величиною і напрямком. Це в сукупності призводить до того, що трибосистема шийки колінчастого вала – вкладиш підшипника ковзання двигунів працює в широкому діапазоні динамічних навантажень і швидкостей тертя.

В результаті таких умов роботи в спряжених поверхнях (шийки колінчастих валів та підшипників) в першу чергу піддаються втомним процесам поверхні корінних і шатунних шийок колінчастих валів.

Під терміном втома зазвичай розуміють особливий тип руйнування, що викликається повторно діючими циклами напруги, амплітудне значення яких не перевищує межі пружності матеріала [3], а втомне зношування є одним з найбільш поширених механізмів руйнування поверхонь деталей силових систем і, як наслідок, появи частинок зносу, зміни геометричних параметрів виробів і виходу їх з ладу. Цей вид зношування сполучень, в першу чергу, пов'язаний з втомними процесами, коли основною причиною руйнування поверхні деталі є виникнення на поверхні або під поверхнею втомних мікротріщин і відшарування частинок металу або його окисних плівок при багаторазовому навантаженні одиничних нерівностей поверхонь, що труться [6].

Ця гіпотеза отримала підтвердження в дослідженнях професорів Г. В. Самсонова, І. В. Крагельського, Л. В. Кукси та ін., які встановили, що утворення втомних мікротріщин відбувається в місцях скупчення дислокацій на певній відстані

від поверхні, різному для кожного металу, а поширення їх відбувається під дією поля напружень, обумовленого як скупченням дислокацій, так і зовнішнім джерелом силою тертя, які, з'єднуючись, утворюють сітку втомних тріщин, що призводить до руйнування поверхні. Утворення втомних тріщин спостерігається як в умовах змащування, так і в умовах обмеження мастильного шару. При цьому підкреслюється винятково важлива роль дискретних (локальних) поверхневих деформацій. Це достовірно підтверджується природою мікронеоднорідного деформованого стану металів, як в пружній, так і в пластичній областях і численними металографічними дослідженнями. Тому, основним видом фрикційних зв'язків, що виникають при терті матеріалів в сполученні шийка колінчастого вала підшипник ковзання і спонукаючи їх до зносу, є пружнопластична деформація як результат зношування мікрорельєфів поверхонь. При терті двох поверхонь зони контакту постійно змінюються, а окремі мікронерівності піддаються багаторазовому навантаженню, в результаті чого і виникають умови для втомного руйнування поверхневого шару.

Втомний знос супроводжується цілою гамою похідних фізичних, хімічних і механічних процесів, що протікають в поверхневих шарах третьових тіл.

Структура поверхневого шару металу є основою для надійної роботи колінчастих валів. Її вплив на втомний знос було досліджено багатьма вченими. Експериментально встановлено, що дрібнозерниста структура підвищує зносостійкість сталевих і чавунних деталей внаслідок підвищеного опору деформації.

Відомо також, що міцність і опір деформації ростуть при зменшенні розмірів зерна, при цьому навіть невелика кількість домішок і легуючих елементів значно підвищує межу пружної деформації сплаву.

До того ж, досліджено, що поєднання повторних механічних і термічних впливів на матеріал деталі призводить до прискореного розвитку втомних тріщин, що необхідно враховувати при розробці технологій ремонту деталей транспортної галузі [5].

Висновки. Досліджуючи закономірності зношування шийок колінчастих валів двигунів транспортних засобів можна зробити такі висновки: характер зношування і закономірність зміни зносу в часі пояснюється цілим рядом невідповідних причин, дію яких неважко прогнозувати заздалегідь. До таких непередбачуваних, детермінованих причин відносяться: зміна площі контакту елементів в процесі зношування, зміна фізико-механічних властивостей матеріалів деталей по глибині, ріст динамічних навантажень і погіршення умов змащування по мірі збільшення зазорів в спряженнях і т. д.

Однією з основних причин передчасного виходу з ладу двигунів після капітального ремонту, і зокрема, трибосистеми шийки колінчастого вала - підшипника ковзання, є рівень застосовуваних способів і якість зміцнення корінних і шатунних шийок колінчастих валів. Виходячи з цього, можна вважати, що проблема підвищення зносостійкості корінних і шатунних шийок колінчастих валів і в цілому ресурсу роботи пари тертя шийки колінчастого вала - підшипник ковзання актуальна і в теперішній час.

Список літератури

1. Авдеевский В.С., Боновой М.А. Трибология и машиностроение. *Трение и износ*. 1990. № 1. С. 23–26.
2. Анілович В.Я., Грінченко О.С., Карабін В.В. Міцність та надійність машин. Київ: Урожай, 1996. 288 с.
3. Григорьев М.А., Пономарев Н.Н. Износ и долговечность автомобильных двигателей. Москва: Машиностроение, 1976. 283 с.
4. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях. Москва: Машиностроение, 1986. 224 с.
5. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. Москва: Высш. шк., 1991. 317 с.

6. Костецький Б.І., Караулов О.К., Костецька Н.Б. Структурно-енергетичні умови поверхневої міцності при терті. Київ: АН УССР, 1977. 26 с.
7. Крагельский И. В. Трение и износ. Москва: Машиностроение, 1968. 480 с.
8. Стеценко Е.Г., Конарев Ю.Н. Коленчатые валы тепловозных дизелей. Москва: Транспорт, 1985. 112 с.
9. Чичинадзе А. В. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Москва: Наука и техника, 1995. 284 с.
10. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. Москва: Наука, 1970. 118 с.

References

1. Avduevskij, V.S. & Bonovoj, M.A. (1990). Tribologija i mashinostroenie [Tribology and mechanical engineering]. *Trenie i iznos – Friction and Wear. 1.* 23–26 [in Russian].
2. Anilovych, V.Ya., Hrinchenko, O.S. & Karabin, V.V. (1996). *Mitsnist' ta nadijnist' mashyn [Strength and reliability of machines]*. Kyiv: Urozhaj [in Ukrainian].
3. Grigor'ev, M.A. & Ponomarev, N.N. (1976). *Iznos i dolgovechnost' avtomobil'nyh dvigatelej [Wear and durability of car engines]*. Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
4. Drozdov, Ju.N., Pavlov, V.G. & Puchkov, V.N. (1986). *Trenie i iznos v jekstremal'nyh uslovijah [Friction and wear in extreme conditions]*. Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
5. Kogaev, V.P. & Drozdov, Ju.N. (1991). *Prochnost' i iznosostojkost' detalej mashin [The strength and durability of machine parts]*. Moskva: Vyssh. shk. [in Russian].
6. Kostets'kyj, B.I., Karaulov, O.K. & Kostets'ka, N.B. (1977). *Struktorno-enerhetychni umovy poverkhnevoi mitsnosti pry teriti [Structural-energy conditions of surface friction strength]*. Kyiv: AN USSR [in Russian]. [in Ukrainian].
7. Kragel'skij, I. V. (1986). *Trenie i iznos [Friction and wear]*. Moskva: Mashinostroenie
8. Stecenko, E.G. & Konarev, Ju.N. (1985). *Kolenchatye valy teplovoznyh dizel'ej [Crankshafts of locomotive engines]*. Moskva: Transport [in Russian].
9. Chichinadze, A.V. (1995). *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka) [Basics of tribology (friction, wear, grease)]*. Moskva: Nauka i tehnika [in Russian].
10. Hrushhev, M.M. & Babichev, M.A. (1970). *Abrazivnoe iznashivanie [Abrasive wear]*. Moskva: Nauka [in Russian].

Kovalov Mykhailo, Prof., PhD tech. sci., **Holovaschchuk Mykhailo**, post-graduate
National Transport University, Kyiv, Ukraine

Determination of Patterns of Wear on the Crankshafts of Vehicles Engines

The purpose of the article is to analyze the regularities of the wear characteristics of the crankshafts of vehicles engines depending on the magnitude of the load on the friction surface, which continuously changes the gap between the rubbing surfaces, the hardness and cleanliness of the machined surfaces, the speed of relative movement of parts, viscosity, temperature and purity of oil, etc. In accordance with the stated goal, the article explores the peculiarities of the wear of the crankshafts and crankshafts.

Providing the necessary operational performance of vehicle engines at the present stage of development of automotive and auto repair production requires improvement of their technical characteristics. One of the main causes of premature failure of vehicles engines is the wear of the tribosystem of the crankshaft neck - the sliding bearing. Wear of the crankshaft necks leads to a gradual change in their size, shape and condition of the surfaces due to the interaction of thin metal surface layers in the friction process. The nature of wear and tear patterns over time is explained by a number of non-random causes. These include: change in the contact area of the elements in the wear probe, change in the physical and mechanical properties of the materials of the parts in depth, increase in dynamic loads and deterioration of lubrication conditions as the gaps in the joints increase, etc.

Thus, the leading process of wear of the tribosystem of the neck of the crankshaft - the sliding bearing is mechanical wear, which includes abrasive and fatigue wear. One of the main causes of premature failure of engines after major repairs, and in particular, the crankshaft cervical tribosystem - sliding bearing, is the level of methods used and the quality of strengthening of the crankshaft and crankshaft crankshafts. Therefore, the problem of increasing the wear resistance of the crankshaft crankshafts and crankshafts and in the whole life of the pair of crankshaft friction pairs - the sliding bearing is relevant today.

wear, crankshaft neck, vehicle engine

Одержано (Received) 19.11.2019

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ

УДК 620.179.14

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).122-129](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).122-129)

В.Б. Бондаренко, асп., **К.Г. Петрова**, доц., канд. техн. наук, **С.В. Серебренніков**, проф., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: kateflash27@gmail.com

Синтез електромагнітної системи діагностування дефектів опор повітряних ЛЕП із використанням нейро-нечіткого моделювання

Показано, що за умов невизначеності під час діагностування дефектів опор повітряних ЛЕП в режимі реального часу, раціональним є побудова електромагнітної системи із використанням нейро-нечіткого моделювання. Розглянуто найінформативніші детерміновані та ймовірнісні ознаки образу дефекту. Доведено, що застосування гібридних нейронних мереж призводить до істотного збільшення швидкодії вихрострумовевого контролю та надійності розпізнавання дефектів.

дефекти опор, вихрострумовевий контроль, нейро-нечітке моделювання, діагностування

В.Б. Бондаренко, асп., **Е.Г. Петрова**, доц., канд. техн. наук, **С.В. Серебренніков**, проф., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна

Синтез електромагнітної системи діагностування дефектів опор повітряних ЛЕП з використанням нейро-нечіткого моделювання

Показано, що в умовах неопределенности при діагностуванні дефектів опор повітряних ЛЕП в режимі реального часу, раціональним є побудова електромагнітної системи з використанням нейро-нечіткого моделювання. Розглянуто найбільш інформативні детерміновані та ймовірнісні ознаки образу дефекту. Доведено, що застосування гібридних нейронних мереж призводить до істотного збільшення швидкодії вихрострумовевого контролю та надійності розпізнавання дефектів.

дефекти опор, вихрострумовевий контроль, нейро-нечітке моделювання, діагностика

Постановка проблеми. Останнім часом спостерігається інтенсивне зростання кількості аварійних ситуацій у розподільчих електричних мережах України. Аналізування причин аварій елементів ЛЕП свідчить, що 30...35% становлять пошкодження залізобетонних опор [1]. Це обумовлено тривалою експлуатацією більшості залізобетонних опор понад 20 років.

Для ЛЕП напругою до 10 кВ застосовують опори з вібробетону найрізноманітніших перерізів: круглі, гратчасті, прямокутні, порожнисті, суцільні, таврові тощо. Для ліній електропередачі напругою 35-500 кВ найпоширенішими є залізобетонні центрифуговані опори циліндричної або конічної форми (рис. 1). Арматурний каркас таких опор складають поздовжні стрижні, діаметром 12-14 мм (сталь 25 ГС), приварених до внутрішніх монтажних кілець з холоднотягнутого дроту діаметром 4-5 мм. Товщина залізобетонного кільця дорівнює 40-60 мм. У нових конструкціях передбачена попередня напруга арматури: шість арматурних стрижнів діаметром 12 мм, що проходять по довжині усього ствола, напружують силою близько

40 т; інші - не напружені 30 стрижнів, обриваються на висоті 4 м від основи опори, на висоті 5,5 м - 27 стрижнів, а на висоті 15 м - всього 10 стрижнів. Стійки опор конічної форми: діаметр в основі 560 мм, у вершині - 334 мм, конусність 1/100.

Опори ЛЕП постійно підпадають під вплив деструктивних процесів, зокрема: атмосферних навантажень, ожеледі, коливань температури, вібрації від вітрових навантажень, дії мінералізованої вологи, хімічно активних речовин, ґрунтових солей тощо. Це пришвидшує втому й корозійне зношення металу, знижує механічну міцність опор. Агресивне середовище також роз'їдає бетон опори – він втрачає міцність й відшаровується, у місцях контакту з окисленою арматурою бетон набухає та утворюються раковини і наскрізні отвори (рис. 1 г); пошкодження захисного шару бетону відкриває додаткові шляхи волозі до армуючих сталевих стрижнів.

Тріщини в арматурі утворюються внаслідок періодичних вигинаючих деформацій опор під дією асиметричних атмосферних навантажень; критичне накопичення дефектів й втрата механічної міцності призводить до падіння опор (рис. 1 д, е). Візуальне виявлення дефектів під шаром бетону, фарби або іншого непрозорого покриття є недоступним. Інтерпретація результатів неруйнівного контролю й оцінювання критичності дефектів в умовах невизначеності є проблематичними та вимагає використання інтелектуальних методів діагностування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До неруйнівних методів діагностування стану арматури та несучої спроможності конструкцій залізобетонних опор ЛЕП належать [2]:

- електрохімічний поляризаційний метод, недоліком якого є низька достовірність у разі значного ступеню корозії арматури;
- вібраційний метод, недоліком якого є складність створення коливань необхідної інтенсивності;
- ультразвуковий метод, що вимагає створення щільного контакту давача з об'єктом;
- метод резонансної частоти, однак резонансна частота та амплітуда великою мірою залежить від демпфуючих властивостей матеріалу навколо арматури;
- рентгенівський контроль є точним, але малопродуктивним і небезпечним тощо.

Це актуалізує удосконалення безконтактного, простого в реалізації електромагнітного методу контролю [2-4], здатного поєднуватися з автоматизованими інтелектуальними системами інтерпретації результатів обстежень.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення системи діагностування дефектів (пошкоджень арматури) опор повітряних ЛЕП на основі поєднання принципів електромагнітного контролю з інтерпретацією результатів діагностування із використанням нейро-нечіткого моделювання.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 показано зовнішній вигляд досліджуваного об'єкта. Для реалізації електромагнітного методу необхідно обґрунтувати тип первинного електромагнітного перетворювача, частоту зондування, схему та алгоритм оброблення сигналу вторинним аналого-цифровим перетворювачем. У випадку використання динамічного режиму контролю крок сканування обирають таким, щоб забезпечити виявлення довільно орієнтованого тріщиноподібного дефекту.

Практика показує, що на стрижнях арматури опор ЛЕП злами орієнтовані перпендикулярно утворюючій, а стрес-корозійні тріщини – паралельно їй. Оптимальні результати електромагнітного контролю досягаються за напрямку сканування, що перетинає дефекти перпендикулярно їх довгій стороні [3]. У разі електромагнітного діагностування висновок щодо наявності дефекту та його розмірів зазвичай ґрунтується на значеннях амплітуди, фази й частоти поточного сигналу. Проте, завеликі обсяги

інформації, яка надходить під час контролю десятків й сотен опор ЛЕП у польових умовах під напругою, перевищує можливості людини адекватно її сприймати в режимі реального часу та вимагає автоматизації аналізу даних; це істотно збільшить швидкість контролю, зменшить помилки та похибки, пов'язані з діями персоналу, дозволить координатно "прив'язати" результати до об'єкту контролю. За таких умов раціональним є синтезувати електромагнітну систему діагностування дефектів опор повітряних ЛЕП із використанням нейро-нечіткого моделювання. Тобто, створити нейронну мережу та навчити її здійснювати пошук дефектів на основі реальних даних.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 1 – Зовнішній вигляд досліджуваного об'єкта

Джерело: зафіксовано авторами

Розпізнавання образів (об'єктів, сигналів, процесів) – завдання ідентифікації об'єкта за його полем та іншими характеристиками, наприклад, – розпізнавання локальних ділянок опори, у яких є дефекти, за результатом вимірювання вносимих у вихорострумний перетворювач (ВСП) опору $R_{\text{вн}}$ та індуктивності $L_{\text{вн}}$.

Нейро-нечітке моделювання проводили з використанням середовища *MATLAB* та його пакету *Fuzzy Logic Toolbox* (нечітку модель типу Сугено, для налаштування використано гібридний алгоритм) [5].

В якості вхідних та вихідних параметрів розглянемо детерміновані та ймовірнісні ознаки.

До детермінованих ознак, що мають конкретні постійні числові значення, належать:

x_{11} – частота електромагнітного поля $f = 10^3 \dots 10^6$ Гц;

x_{12} – електропровідність армуючого стрижня опори $\sigma \approx 10^6$ См/м;

x_{13} – магнітна проникність стрижня $\mu \approx 10^3$;

x_{14} – діаметр стрижня $D = 8; 10; 12; 14$ мм;

$y_1 = F_1(x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14})$ – геометрія та розміри ВСП.

Ймовірнісні ознаки розпізнавання – це характеристики об'єкта, що мають випадковий характер:

x_{21} – відхилення траєкторії сканування від осі арматури (причини – невидимість контрольованого стрижня, швидке сканування нерівної поверхні тощо);

x_{22} – шар бетону (фарби) завтовшки $\delta = 10^{-3} \dots 10^{-2}$ м (причини – різні умови виробництва);

x_{23} – швидкість сканування ($v = 0,01 \dots 1$ м);

x_{24} – розмір (розкриття) тріщини T ($T = 0,1 \dots 4$ мм, причини – різна степінь руйнування);

x_{25} – координата z розташування дефекту по висоті опори ($z = 0 \dots 1,5$ м);

$y_2 = F_2(x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, x_{25})$ – середнє значення потужності сигналу ВСП від дефекту (причина – електронні шуми в тому самому радіодіапазоні).

Вихідний сигнал нейрону (виявлення дефекту) Y , який інтегрує в собі 9 характеристичних ознак:

$$Y = F_Y(y_1, y_2) = F_Y(x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, x_{25}).$$

Якщо ж з'ясується, що опора має дефект, потрібно визначити тип цього дефекту та розмір T .

Гібридна нейронна мережа, структура якої показана на рис. 2, має 4 шари нейронів. Корегування правил виконувалось із застосуванням гібридного алгоритму, що є комбінацією методу зворотного розповсюдження помилки та методу найменших квадратів.

Для розпізнавання образу дефекту (ОД) потрібна база еталонних зразків. Навчання мережі проводили з використанням зразків штучних дефектів типу наскрізна тріщина T . Кожен ОД був отриманий під час зміни ряду параметрів контролю: частоти збудження ВСП від 1 кГц до 1 МГц, зазору h між ВСП і поверхнею металу, відповідно до товщини бетонної оболонки, – від 1 до 10 мм, розмір (розкриття) тріщини ($T = 0,1 \dots 4$ мм), координати розташування ВСП відносно дефекту (рис. 3).

Експериментальні вимірювання вносимих у ВСП опору $R_{\text{вн}}$ та індуктивності $L_{\text{вн}}$ проводили із використанням автоматичного мостового вимірювача імітансу Е7-25 (рис. 3) з класом точності 0,15 на частотах 1...1000 кГц. В процесі сканування зразків арматури з наскрізною тріщиною T аналізували всю модуляційну характеристику

відносних значень активного $R_{BH}/2\pi fL_0=F(z)$ та індуктивного $L_{BH}/L_0=F(z)$ опорів. Графіки залежностей $R_{BH}/2\pi fL_0=F(z)$ і $L_{BH}/L_0=F(z)$ для різних h, T, f показані в [3].

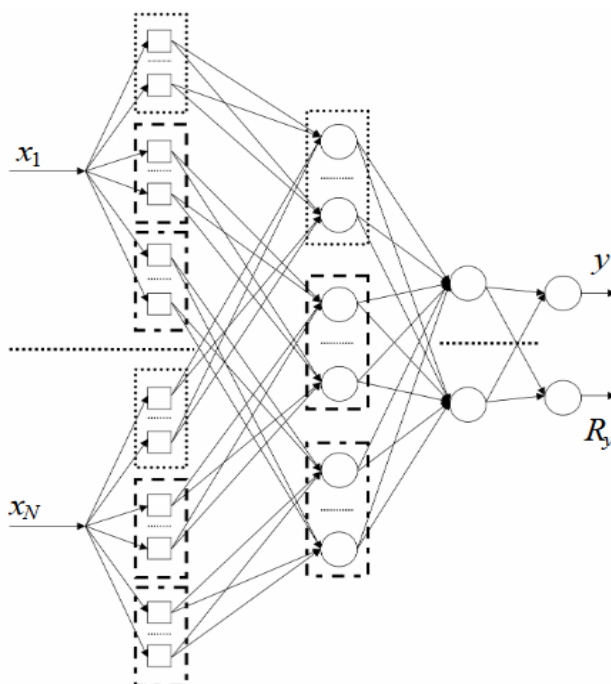


Рисунок 2 – Структура досліджуваної моделі на основі нейро-нечіткого моделювання (архітектура ANFIS)

Джерело: розроблено авторами

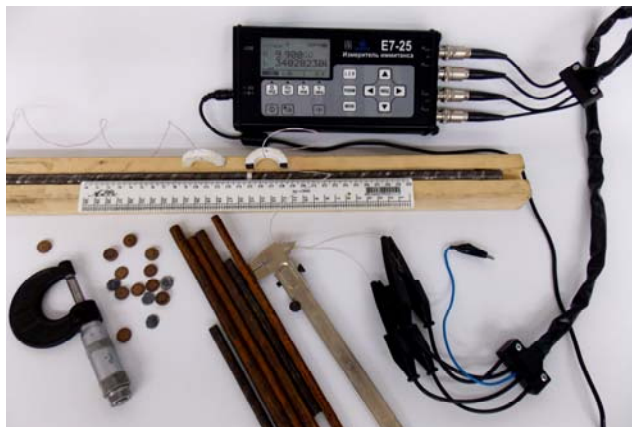


Рисунок 3 – Фізична модель об'єкту досліджень (арматура $D = 10$ мм з тріщиною $T = 4$ мм)

Джерело: власна розробка авторів

Коректність навчання мережі забезпечена шляхом розподілу експериментальних даних на тестові та навчальні. Для результативного моделювання було використано 2 блоки даних: обсяг навчальної вибірки становив 180 наборів даних та 60 наборів тестових. Інформаційні блоки заповнювали із врахуванням особливостей нейромережевого синтезу – дані повинні змінюватись почергово (в бік зростання) та максимально насичено заповнювати всю область їхніх значень. Для навчання мережі використано гібридний метод навчання з рівнем похибки 0 та кількістю циклів 400.

Після завершення навчання нейро-нечіткої мережі було виконано аналіз показників якості класифікації (точність, чутливість, помилки першого та другого

роду) та залежності похибки навчання від кількості циклів навчання, що підтвердив працездатність мережі.

Синтезовано електромагнітну систему діагностування дефектів опор повітряних ЛЕП із використанням нейро-нечіткого моделювання, яка складається з наступних блоків (рис. 4):

1) блок зчитування початкових даних (первинний ВСП – контроль можна реалізувати за внесеними $R_{вн}$ та $L_{вн}$);

2) блок попередньої обробки даних, видалення шумів і спотворень сигналу, приведення даних у формат, що якнайкраще дозволяє робити точне перетворення в подальшому блоці (вторинний автогенераторний перетворювач та АЦП – контроль можна здійснювати за амплітудою і фазою напруги на резонансному контурі);

3) блок нейромережевої обробки, який на основі відповідним чином підготовлених даних, що поступають в нього, чинить ідентифікацію дефекту;

4) блок кінцевого перетворення, який чинить зворотне перетворення даних у формат, придатний для розгляду персоналом, забезпечує наочне представлення даних діагностики про стан об'єкту, придатне для ухвалення управлінських рішень щодо ремонтно-відновлювальних робіт або заміни опори.

Подальша обробка даних здійснюється користувачем, в завдання якого входить вибір діагнозу відповідно до рекомендацій, що надає нейромережева частина, а також верифікація отриманого сигналу за критерієм логічної відповідності розвитку реальної ситуації, що дозволяє додатково збільшити надійність контролю. Вибір діагнозу здійснюють за чотирма нечіткими термами: "справний", "працездатний", "обмежено працездатний" та "аварійний" у відповідності до класифікації технічного стану металевих конструкцій [6].

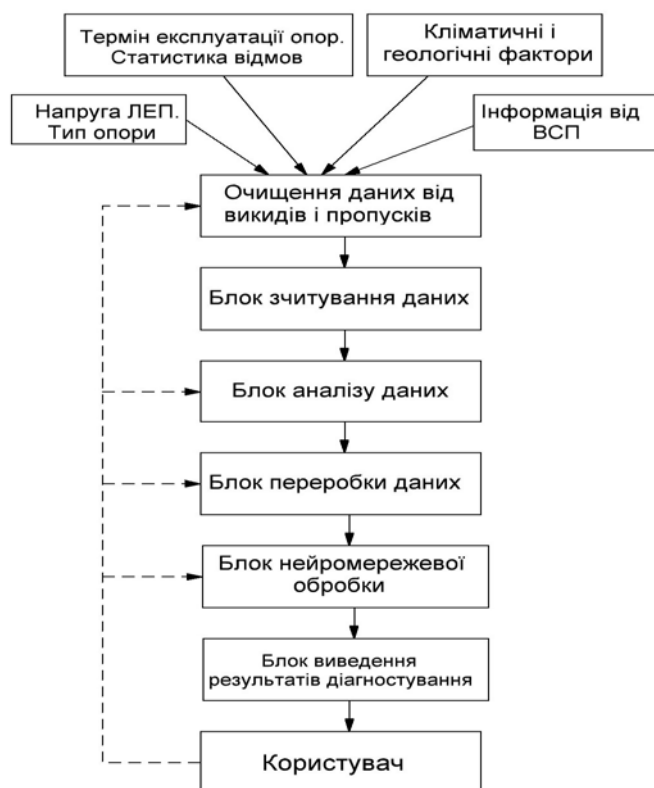


Рисунок 4 – Структура електромагнітної нейромережевої системи діагностування
Джерело: розроблено авторами

Структура електромагнітної системи діагностики показана на рис. 4. Вхідні дані для діагностики – напруга ЛЕП, тип опори, термін експлуатації, статистика відмов, дані про кліматичні і геологічні умови, сигнал з ВСП. Крім того, можливе введення додаткових даних від користувача тощо.

Висновки.

1. Аналіз причин аварійних ситуацій елементів ЛЕП показав, що 30...35% становлять пошкодження залізобетонних опор, а існуючі методи неруйнівного діагностування стану арматури та несучої спроможності опор недостатньо дієві. Це вимагає удосконалення безконтактного електромагнітного методу контролю.

2. Дослідження комплексу характеристичних параметрів дозволило обрати 9 найбільш інформативних детермінованих та ймовірнісних ознак образу дефекту.

3. Навчання нейронної мережі проведено з використанням зразків штучних дефектів типу наскрізна тріщина арматури за гібридним методом навчання з рівнем похибки 0 та кількістю циклів 400, що дозволило підвищити якість розпізнавання образу дефекту.

4. Поєднання переваг електромагнітної системи діагностування дефектів із використанням нейро-нечіткого моделювання дозволить істотно збільшити швидкодію вихорструмового контролю та надійність розпізнавання дефектів опор.

Список літератури

1. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕП). *Звіт про результати діяльності НКРЕП у 2018 році*: веб-сайт. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=39678> (дата звернення: 20.12.2019).
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник / за ред. В.В. Клюева. Москва : Машиностроение, 1986. 488 с.
3. Бондаренко В.Б. Проблеми електромагнітної дефектоскопії опор повітряних ліній електропередачі. *Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві*: зб. матеріалів конф. XI-ї Міжн. наук.- практ. конф., Кіровоград, 21-22 жов. 2015 р. Кіровоград: КНТУ, 2015. С. 112-114.
4. Бондаренко В.Б. Підвищення надійності та продуктивності вихорструмової діагностики елементів повітряних ЛЕП. *Енергоефективність: наука, технології, застосування*: зб. тез доп. всеукр. наук.- практ. конф., Київ, 27 листопада 2019 р. Київ: НПУ імені М.П. Драгоманова, 2019. С. 8-11.
5. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH : книга. Санкт-Петербург : БВХ, 2005. 736 с.
6. ДСТУ Б В.2.6-210:2016. Оценка технического состояния эксплуатируемых стальных строительных конструкций. [Чинний від 2017-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2016. 57 с. (Національний стандарт України).

References

1. Sait «Nacional'na komisiya, shho zdiysnyuye derzhavne regulyvannya u sferax energety'ky` ta komunal'ny`x poslug» [Site of National Commission for State Regulation of Energy and Utilities]. *nerc.gov.ua*. Retrieved from <https://www.nerc.gov.ua/?id=39678> [in Ukrainian].
2. Klyuev, V. (Eds.). (1986). *Priboryi dlya nerazrushayuschego kontrolya materialov i izdeliy* [Devices for non-destructive testing of materials and products: a reference]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
3. Bondarenko, V.B. (2012). Problemy` elektromagnitnoyi defektoskopiyyi opor povitryany`x liniy elektropredachi [Problems of electromagnet defectoscopy poles of repeated transmission lines]. *Problems of energy efficiency and automation in industry and government: XI Mezhdunarodnaia nauchnoprakticheskaiia konferentsiia (21-22 zhovtynya 2015 r.) – 21-st International Scientific and Practical Conference*. (pp. 112-114). Kirovograd: KNTU [in Ukrainian].
4. Bondarenko, V.B. (2019). Pidvy`shhennya nadijnosti ta produkty`vnosti vy`xorostrumovoyi diagnosty`ky` elementiv povitryany`x LEP [Improvement of reliability and performance of eddy current diagnostics of air transmission line elements]. *Energy efficiency: science, technology, application: Vseukrayins`ka nauchnoprakticheskaiia konferentsiia (27 ly`stopada 2019 r.) – All-Ukrainian Scientific*

- and Practical Conference.* (pp. 8-11). Ky`yiv: NPU imeni M.P. Dragomanova[in Ukrainian].
5. Leonenkov, A.V. (2005). *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH]*. Sankt-Peterburg: BVH [in Russian].
 6. DSTU B V.2.6-210:2016. *Otsenka tehnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemiyh stalnyih stroitelnyih konstruksiy*. [National Standard B V.2.6-210:2016. Assessment of the technical condition of operating steel building structures]. Kyiv, Minregion Ukrainy, 2016. 57 p. [in Ukrainian].

Vladimir Bondarenko, Post-graduate, **Kateryna Petrova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Serebrennikov**, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Synthesis of an Electromagnetic System for the Diagnosis of Defects of Air Transmission Lines Using Neuro-fuzzy Modeling

The purpose of the work is to develop a system for diagnosing defects (damages of the armature) of air transmission line supports based on the combination of electromagnetic control principles with the interpretation of the results of diagnosis using neuro-fuzzy modeling. It is shown that in the case of uncertainty in the diagnosis of defects of air transmission line supports in real time, it is rational to build an electromagnetic system using neuro-fuzzy modeling. Practice shows that the bars of the reinforcement bars of the transmission lines support fractures oriented perpendicularly forming, and stress-corrosion cracks - parallel to it. Optimal results of the electromagnetic control are achieved in the scan direction, which intersects the defects perpendicular to their long side. In the case of electromagnetic diagnosis, the conclusion about the defect and its size is usually based on the values of the amplitude, phase and frequency of the current signal. However, the large amount of information that comes from controlling the tens and hundreds of power lines in the field under live conditions exceeds the human ability to adequately perceive it in real time and requires automation of data analysis; this will significantly increase the speed of control, reduce errors and errors associated with the actions of the staff, will allow to coordinate the results to the object of control. Under such conditions, it is rational to synthesize an electromagnetic system for diagnosing defects of air transmission lines using neuro-fuzzy modeling. That is, create a neural network and teach it to look for defects based on real data. The most informative deterministic and probable signs of defect image are considered. It is proved that the use of hybrid neural networks leads to a significant increase in the speed of eddy current control and the reliability of recognition of defects.

An analysis of the causes of emergency situations of the transmission line elements showed that 30-35% are damage to reinforced concrete supports, and the existing methods of non-destructive diagnosis of the condition of reinforcement and bearing capacity of the supports are not effective enough. This requires improvement of the non-contact electromagnetic control method. The study of the complex of characteristic parameters allowed us to select the 9 most informative deterministic and probabilistic features of the defect image. The training of the neural network was carried out using samples of artificial defects such as through-through fracture of the reinforcement according to the hybrid method of training with the error level 0 and the number of cycles 400, which allowed to improve the quality of recognition of the defect image. The correctness of network training is ensured by dividing the experimental data into test and training ones. For data modeling, 2 data blocks were used: the training sample volume was 180 datasets and 60 test sets. The information blocks were filled taking into account the features of neural network synthesis - the data should change alternately (in the direction of growth) and as much as possible fill the entire area of their values.

Diagnostic inputs include transmission line voltage, resistance type, lifetime, failure statistics, climatic and geological conditions, VCT signal. It is also possible to enter additional user data and more. Combining the benefits of an electromagnetic defect diagnosis system with the use of neuro-fuzzy modeling will significantly increase the speed of eddy current control and the reliability of recognition of defects of supports.

defects of supports, eddy current control, neuro-fuzzy modeling, diagnostics

Одержано (Received) 17.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 20.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

УДК 621.3.016.3

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).130-139](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).130-139)

П.Г. Плешков, проф., канд. техн. наук, **Ю.І. Казанцев**, доц., канд. техн. наук, **О.І. Сіріков**, доц., канд. техн. наук, **Н.Ю. Гарасьова**, доц., канд. техн. наук, **Т.В. Величко**, ст. викл.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: kaf.etssem@gmail.com

Методика визначення розрахункових навантажень промислових підприємств за питомою витратою електроенергії з використанням нестационарної моделі графіків електричних навантажень

Запропонована методика визначення розрахункового електричного навантаження промислових підприємств за питомою витратою електроенергії та визначенням коефіцієнту максимуму на основі теорії ймовірності з використанням ергодичних теорем для нестационарних випадкових процесів. Дана методика може бути використана для визначення розрахункового електричного навантаження на вищих щаблях системи електропостачання - цех, корпус, підприємство.

розрахункове навантаження, питомі витрати електроенергії, ергодичні теореми, нестационарний процес

П.Г. Плешков, проф., канд. техн. наук, **Ю.І. Казанцев**, доц., канд. техн. наук, **А.І. Сириков**, доц., канд. техн. наук, **Н.Ю. Гарасьова**, доц., канд. техн. наук, **Т.В. Величко**, ст. препод.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Методика определения расчетных нагрузок промышленных предприятий по удельному расходу электроэнергии с использованием нестационарной модели графиков электрических нагрузок

Предложенная методика определения расчетной электрической нагрузки промышленных предприятий за удельным расходом электроэнергии и определения коэффициента максимуму на основе теории вероятности с использованием эргодических теорем для нестационарных случайных процессов. Данная методика может быть использована для определения расчетной электрической нагрузки на высших ступенях системы электроснабжения - цех, корпус, предприятие.

расчетная нагрузка, удельные расходы электроэнергии, эргодические теоремы, нестационарний процес

Постановка проблеми. При проектуванні систем електропостачання головною вихідною величиною є розрахункове електричне навантаження. Саме за ним вибираються головні елементи системи електропостачання: кабельні і повітряні лінії електропередачі, трансформатори, вимикачі і автомати, запобіжники і т.д. [1,2]. Відповідно до точності, правильності і коректності визначення електричного навантаження пред'являються високі вимоги, адже це обумовлює вартість системи електропостачання, її техніко-економічні показники, та правильність обраних технічних рішень щодо конструювання системи електропостачання.

Останнім часом у зв'язку з поширенням практики проведення енергетичних аудитів, які проводяться зокрема і для систем електропостачання, розрахункове

електричне навантаження використовується для визначення втрат електроенергії в існуючій системі електропостачання. Такий підхід дозволяє зменшити об'єми необхідних експериментальних досліджень в системі електропостачання та спростити проведення енергетичного аудиту без суттєвого погіршення його якості [3].

В практиці проектування існує достатня кількість методів розрахунку електричних навантажень, такі як: за відомим графіком навантаження, питомими показниками, методами заснованими на теорії ймовірності і математичної статистики. Як правило, при проектуванні системи електропостачання графік електричного навантаження невідомий, складно його отримати і при проведенні енергетичного аудиту. Тому використовувати метод розрахунку на основі аналізу графіку електричного навантаження складно не дивлячись на його простоту. Розповсюдженими методами є методи за питомими показниками: питомою витратою електроенергії і питомою щільністю навантаження на м² виробничої площі. Найбільш розповсюджений метод з використанням теорії ймовірності і математичної статистики – метод упорядкованих діаграм (метод Г.М. Каялова). Даний метод є основним методом розрахунку електричних навантажень промислових підприємств і з часом по суті не змінювався, а лише уточнювався і коригувався. Він закладений в нормативні документи по розрахунку електричних навантажень промислових підприємств. В той же час актуальним залишається пошук нових та удосконалення існуючих методів розрахунку електричних навантажень з метою підвищення точності та простоти розрахунку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нормативні методи розрахунку електричних навантажень промислових споживачів є доволі консервативними та не змінюються протягом десятиліть. Так наприклад, прийняті ще в 1968 році «Указания по определению электрических нагрузок в промышленных установках» були змінені в 1990 р. тимчасовою інструкцією, відкориговані та остаточно введені з 1993 р. [4] та діють і по нині. Згідно цього методу розрахункове електричне навантаження P_p визначається за формулою

$$P_p = K_p \sum K_n P_n, \quad (1)$$

де K_p – коефіцієнт розрахункової потужності,

K_n – коефіцієнт використання групи електроприймачів,

P_n – групова номінальна (встановлена) активна потужність, що дорівнює сумі номінальних активних потужностей групи однотипних електроприймачів.

Метод впорядкованих діаграм рекомендовано застосовувати для нижчих щаблів систем електропостачання на рівні окремих груп споживачів, діляниць, цехів та корпусів, що живляться напругою до 1000 В. На вищих рівнях розподілу електроенергії застосування даного методу розрахунку може супроводжуватися значними похибками, тому його використання не рекомендується [1].

Постановка завдання. В даній роботі запропонований метод розрахунку електричних навантажень за питомою витратою електроенергії на прикладі комбінату будівельних матеріалів та його окремих цехів. Два з них мають трьохзмінний, а один двохзмінний режим роботи, процес зміни їх електричного навантаження на добових і тим більше місячних інтервалах є не стаціонарним [5].

Виклад основного матеріалу. Питомі витрати електроенергії по цехам та комбінату в цілому визначається за допомогою основної енергетичної характеристики, яка може бути застосована для певних однотипних підприємств [6]

$$\omega/p_y = f(\alpha), \quad (2)$$

де ω – питома витрата електроенергії на випуск продукції,

$p_y = P_y/A_0$ – питома встановлена потужність підприємства, цеху або підрозділу,
 P_y – встановлена потужність електроприймачів підприємства, цеху або підрозділу,

A_0 – проектний випуск продукції підприємства, цеху або підрозділу,

$\alpha = A/A_0$ – відносний випуск продукції підприємства, цеху або підрозділу,

A – фактичний випуск продукції підприємства, цеху або підрозділу.

Для добового електроспоживання комбінатом будівельних матеріалів найменшу похибку ($\sigma = 0,1\%$) має рівняння десятої степені відносно змінної $x = \alpha^{-1/2}$, тобто

$$\omega/p_y = 168 - 164\alpha^{-1/2} - 230\alpha^{-1} - 766\alpha^{-3/2} + 2546\alpha^{-2} - 1420\alpha^{-5/2} - 970\alpha^{-3} + 1045\alpha^{-7/2} - 143\alpha^{-4} - 56\alpha^{-9/2} + 2,5\alpha^{-5}. \quad (3)$$

Для цеху №1 маємо

$$\omega/p_y = 3,57 + 7,94\alpha^{-1} \quad (\sigma = 2,9\%). \quad (4)$$

Для цеху №2 маємо

$$\omega/p_y = 3,3 + 4,97\alpha^{-1} \quad (\sigma = 1,6\%). \quad (5)$$

Для цеху №3 маємо

$$\omega/p_y = 0,798 + 7,93\alpha^{-1} \quad (\sigma = 1,96\%). \quad (6)$$

Помноживши обидві частини (2) на p_y отримаємо залежність $\omega = f(\alpha, p_y)$.

Методика виведення енергетичних характеристик типу (2) викладена, наприклад в [7,8]. Варто відзначити, що енергетичні характеристики (2), відносяться до некоректних стохастичних зв'язків [9].

Для визначення розрахункового електричного навантаження (наприклад, за максимальним нагрівом провідників), немає необхідності враховувати властивості навантаження в окремі моменти часу, а достатньо лише виявити результат сумарного (інтегрального) впливу за розрахунковий період часу. В зв'язку з чим доцільно ввести деякі середні в часі на розрахунковому інтервалі T характеристики не стаціонарних випадкових процесів зміни навантаження [10]:

1. Середнє за інтервал T значення навантаження (аналог оцінки математичного очікування для стаціонарних процесів)

$$m_{PT} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt, \quad (7)$$

де $P(t)$ – реалізація не стаціонарного випадкового процесу зміни активної потужності за час T .

Середнє значення навантаження за період T в умовах експлуатації визначається за показниками лічильників електроенергії, а в умовах проектування або прогнозування – за питомими нормами та продуктивністю, що планується.

2. Середня на інтервалі T дисперсія графіку навантаження (аналог не залежної від часу дисперсії стаціонарного процесу).

$$D_{PT} = \frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt - m_{PT}^2. \quad (8)$$

3. Осереднена на інтервалі T одномірна щільність розподілення або гістограма графіку навантаження

$$f_T(P) = \frac{1}{T} \int_0^T f(P, t) dt, \quad (9)$$

де $f(P, t)$ – одномірна щільність розподілення, що залежить для нестационарних процесів від параметра t .

Необхідно відмітити, що вказані характеристики нестационарних процесів зміни навантаження визначаються по одній реалізації, тому вони залежать від T і є випадковими величинами (m_{PT} , D_{PT}) або випадковими функціями $f_T(P)$.

В цьому випадку важливим є питання щодо відповідності цих, визначених по одній реалізації, характеристик істинним характеристикам визначеним по ансамблю реалізацій, тобто питанню про ергодичні властивості нестационарних процесів зміни навантаження. Для вирішення цього питання можливо використовувати ергодичні теореми [10], сформульовані і доведені для одного класу нестационарних процесів. Суть теорем полягає в тому, що при виконанні деяких умов, що накладають обмеження на властивості нестационарних процесів, що досліджуються, середні за часом характеристики (7) і (8) при великих T сходяться з ймовірністю одиниця до відповідних характеристик навантажень, тобто до не випадкових величин.

Перша умова, необхідна для існування цих ергодичних теорем, полягає в обмеженості дисперсії та безперервності в середньоквадратичному випадкових процесів, що розглядаються. Ця умова завжди виконується для графіків електричних навантажень.

Друга умова відноситься до згасання кореляційних зв'язків у часі і полягає у тому, що період осереднення T повинен значно перевищувати інтервал кореляції, тобто інтервал суттєвого послаблення кореляційних зв'язків.

Дослідження показали, що в кореляційних функціях графіків навантаження різних споживачів крім згасаючої аперіодичної є періодичні складові, обумовлені добовою, тижневою та сезонною циклічністю електроспоживання. Тому для ефективного використання ергодичних теорем при аналізі навантаження додатково до умови $T \gg \tau_0$ (τ_0 – інтервал згасання аперіодичної складової) необхідно виконання умов кратності інтервалу T періодам періодичних складових.

В кореляційних функціях комбінату будівельних матеріалів крім аперіодичної складової, що згасає за декілька годин, є дві періодичні складові з восьмигодинним та добовими періодами (рис. 1). Перша обумовлена зміною, друга добовою циклічністю електроспоживання. Сезонна циклічність виявилася незначною.

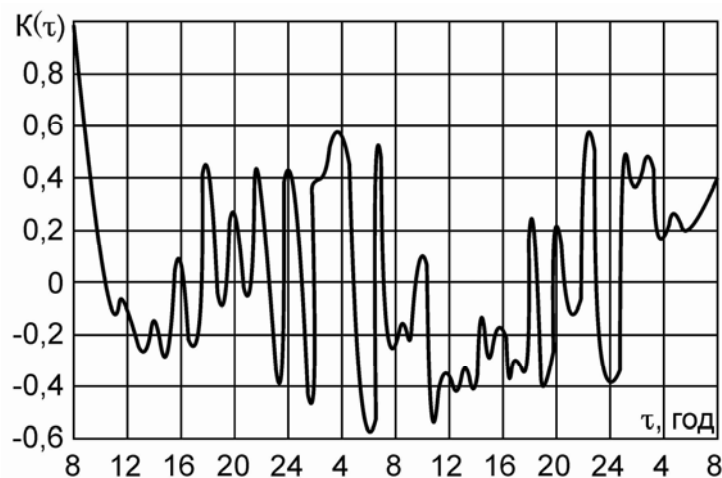


Рисунок 1 – Кореляційна функція зміни півгодинних навантажень цеху №1

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, можна вважати, що для даного споживача місячний інтервал задовольняє необхідним умовам ергодичних теорем. Отримані з їх допомогою висновки про ергодичні властивості нестационарних процесів зміни навантаження відносно характеристик (7) і (8) очевидно можуть бути поширені і на характеристику (9). Дійсно, якщо період T задовольняє вищезазначеним умовам і всі можливі властивості процесу формування навантаження проявилися за цей період неодноразово, то можливо очікувати, що завжди знайдеться таке T , для якого гістограма графіку навантаження при подальшому збільшенні T зміниться несуттєво. Іншими словами, послідовність випадкових функцій $f_T(P)$, яка має місце для різних значень T , збігається з ймовірністю одиниця до межі $\bar{f}(P)$, тобто для будь яких $\varepsilon > 0$ або $\delta > 0$ завжди знайдеться таке T , що при будь яких t ймовірність сумісного існування k -нерівностей

$$|f_{T+t_k}(P) - \bar{f}(P)| < \varepsilon; t_k = t_1, t_2, \dots, t_k$$

будуть більше ніж $1 - \delta$. При цьому

$$\lim_{T \rightarrow \infty} f_T(P) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(P, t) dt = \bar{f}(P).$$

З допомогою визначених в часі характеристик (7), (8) і (9), обчислених по одній реалізації, нестационарні навантаження можна порівняти до еквівалентних в середньому однорідних у часі, стационарних випадкових процесів. Це дозволяє моделювати навантаження на тривалих інтервалах часу випадковими величинами, статистичні характеристики і закони розподілення яких мають смисл осереднених у часі характеристик нестационарних випадкових процесів. Знаючи ці характеристики та закони розподілення, віднесені до розрахункового періоду часу (місячному, річному) нескладно визначити розрахункове максимальне навантаження з оцінкою її довірчої ймовірності. Очевидно, що при цьому головним є відшукування на інтервалі T одномірних законів розподілення графіків навантаження (9).

На рис. 2 наведені гістограми процесів зміни навантаження комбінату будівельних матеріалів та його цехів, побудовані по графікам навантаження, записаним на трьохмісячному інтервалі часу з 30-хвилинним інтервалом осереднення.

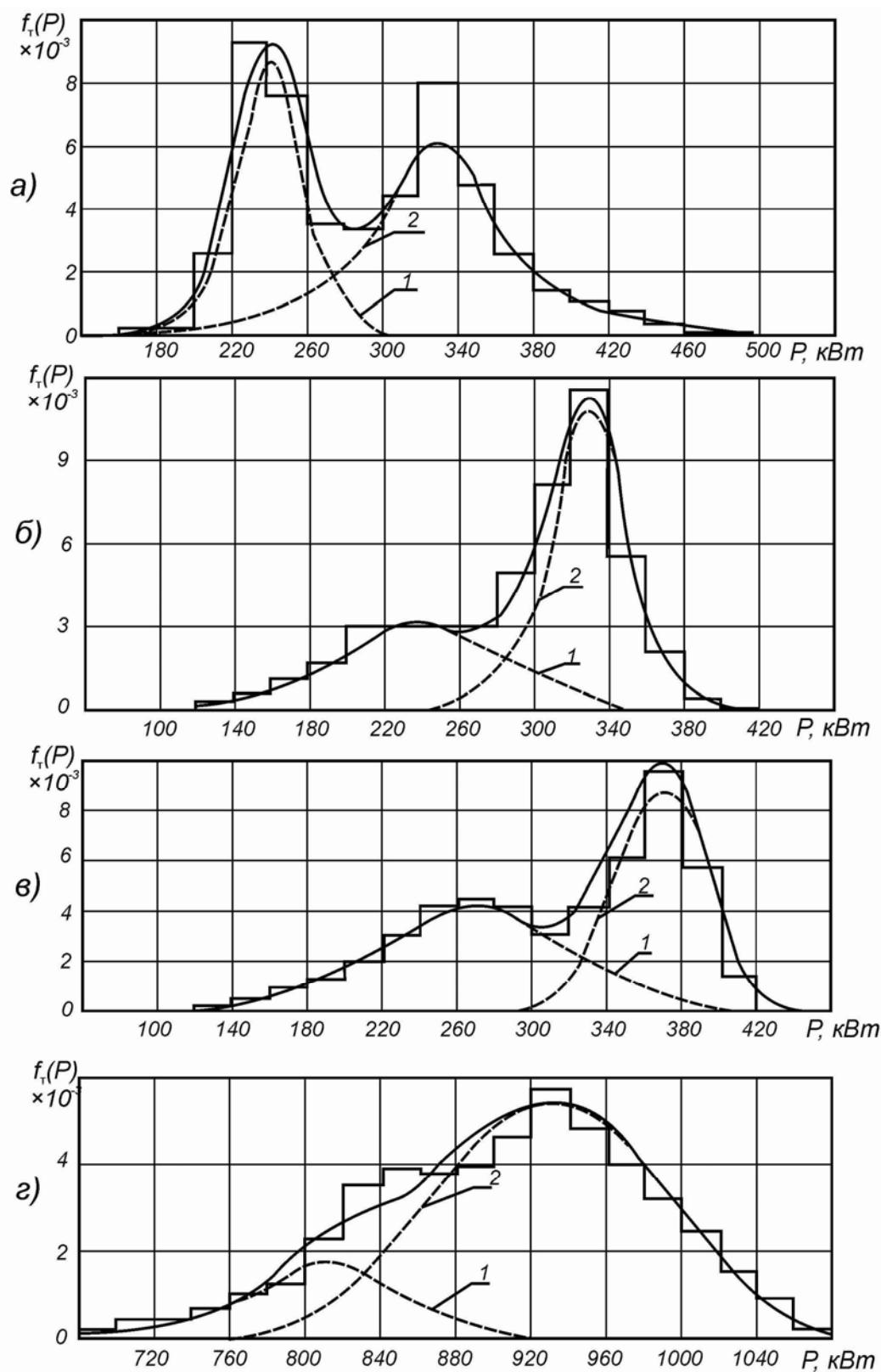
Отримані гістограми апроксимуються кривою $f_T(P)$, яка є сумою двох щільностей розподілення:

$$f_T(P) = f_{T1}(P) + f_{T2}(P). \quad (10)$$

Як показав аналіз, щільність розподілення $f_{T1}(P)$ і $f_{T2}(P)$ для гістограм, що розглядаються достатньо точно вирівнюються кривими нормальної щільності, за виключенням цеху №1 з двохзмінним режимом роботи, для якого $f_{T2}(P)$ вирівнюється А-рядом Грама-Шарлье.

Для цеху №1

$$f_T(P) = f_{T1}(P) + f_{T2}(P) = f_{T1}(P) + f_{TН}(P) - \frac{r_3}{6} f_{TН}^{(3)}(P) + \frac{r_4 - 3}{24} f_{TН}^{(4)}(P), \quad (11)$$



1 – щільність розподілення $f_{T1}(P)$; 2 – щільність розподілення $f_{T2}(P)$;
 а) цех №1; б) цех №2; в) цех №3; г) в цілому по комбінату будівельних матеріалів

Рисунок 2 – Гістограма та щільності розподілення потужності комбінату будівельних матеріалів та його цехів

Джерело: розроблено авторами

$$\text{де } f_{T1}(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{PT1}}} e^{-\frac{(P-m_{PT1})^2}{2\sigma_{PT1}^2}},$$

$$f_{T2}(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{PT2}}} e^{-\frac{(P-m_{PT2})^2}{2\sigma_{PT2}^2}},$$

$f_{T1}^{(3)}$, $f_{T1}^{(4)}$ – третя та четверта похідні $f_{T1}(P)$ відповідно,

$r_3 = -0,03$ – третій основний момент,

$r_4 = 4,73$ – четвертий основний момент.

Для цехів №2 і №3, а також в цілому по комбінату будівельних матеріалів

$$f_T(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{PT1}}} e^{-\frac{(P-m_{PT1})^2}{2\sigma_{PT1}^2}} + \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{PT2}}} e^{-\frac{(P-m_{PT2})^2}{2\sigma_{PT2}^2}}, \quad (12)$$

В табл. 1 наведені параметри досліджених гістограм.

Таблиця 1 – Статистичні характеристики гістограм комбінату будівельних матеріалів

п/п	Найменування	$f_{T1}(P)$		$f_{T2}(P)$		$f_T(P)$		λ	K_M
		m_{PT1} , кВт	σ_{PT1} , кВт	m_{PT2} , кВт	σ_{PT2} , кВт	m_{PT} , кВт	σ_{PT} , кВт		
1	Цех №1	239	17	331	50	296	62	0,93	1,3
2	Цех №2	240	52	328	22	293	57	1,04	1,2
3	Цех №3	270	54	379	20	614	64	0,35	1,2
4	Всього по комбінату	810	40	930	60	912	82	0,59	1,15

Джерело: розроблено авторами

Правомірність прийнятої гіпотези у вигляді розподілення підтверджена кількісною оцінкою з допомогою критерію погодження Колмогорова (λ), значення якого наведено в табл. 1.

Знаючи характеристики m_{PT} , D_{PT} та закони розподілення $f_T(P)$, віднесені до розрахункового періоду часу (місяць, рік) нескладно визначити розрахункове 30-хвилинне максимальне навантаження P_M , при заданій довірчій ймовірності, що дорівнює 0,95

$$B(P \leq P_M) = 0,95 = \int_{-\infty}^{P_M} f_T(P) dP. \quad (13)$$

Далі визначається коефіцієнт максимуму

$$K_M = \frac{P_M}{m_{PT}}. \quad (14)$$

Внаслідок ергодичних властивостей процесу зміни навантаження відносно характеристик m_{PT} , D_{PT} та $f_T(P)$ отримані значення коефіцієнтів максимуму можна рахувати типовими для даного споживача.

Отже, з допомогою енергетичної характеристики визначається питома норма ω електроспоживання, а за її значенням легко перейти до загального енергоспоживання W підприємством, цехом, ділянкою за формулою

$$W = \omega \cdot A_0, \quad (15)$$

а далі від нього до середньої потужності

$$P_{\text{ср}} = W/T. \quad (16)$$

Тоді максимальне півгодинне розрахункове навантаження може бути знайдене як

$$P_p = K_M \cdot P_{\text{ср}}. \quad (17)$$

Отримані з допомогою нестационарної моделі типові значення коефіцієнтів максимуму дозволяють проводити оцінку розрахункового навантаження промислового підприємства.

На відміну від методу упорядкованих діаграм покладеного в основу вказівок по розрахунку електричних навантажень, для вказаних підприємств пропонується статистичний метод, що не потребує розгляду та врахування характеристик режимів роботи індивідуальних електроспоживачів. Розрахункове навантаження визначається за даними проектної продуктивності, питомими нормами електроспоживання і типовим значенням коефіцієнту максимуму для окремих цехів і підприємству в цілому.

Приклад розрахунку. Визначити розрахункове навантаження підприємства типу комбінату будівельних матеріалів з продуктивністю A_0 , що дорівнює 82 млн. шт. цеглин на рік.

По енергетичній характеристиці (3) знаходимо при $\alpha = 1$ і $p_y = 0,5$ питому витрату електроенергії $\omega = 100$ кВт·год/тис. шт.

Визначаємо середнє за рік навантаження

$$m_{\text{рТ}} = \frac{\omega A_0}{365 \cdot 24} = \frac{100 \cdot 82 \cdot 10^3}{365 \cdot 24} = 935 \text{ кВт.}$$

За значенням коефіцієнту максимуму комбінату будівельних матеріалів рівним 1,15 визначаємо розрахункове навантаження

$$P_p = K_M \cdot P_{\text{ср}} = 1,15 \cdot 935 = 1070 \text{ кВт.}$$

Висновки.

1. Існуючі методи розрахунку електричних навантажень промислових підприємств не є універсальними і можуть бути застосовані з певними обмеженнями. Так, наприклад, метод упорядкованих діаграм рекомендовано для нижчих щаблів систем електропостачання напругою до 1000 В, а метод за питомою витратою електроенергії для вищих щаблів на рівні ділянок, цехів і підприємства в цілому.

2. Проведені дослідження графіків електричного навантаження комбінату будівельних матеріалів та його цехів показали, що електроспоживання є нестационарним випадковим процесом. Натомість вказані графіки відповідають вимогам ергодичних теорем для нестационарних процесів, а отже це дозволяє моделювати навантаження на тривалих інтервалах часу випадковими величинами як для стаціонарних процесів.

3. Доведено, що основна енергетична характеристика дозволяє визначити коефіцієнт максимуму для типових підприємств. Даний підхід запропоновано покласти в удосконалений метод розрахунку електричних навантажень промислових підприємств, який поєднує в собі метод упорядкованих діаграм та метод за питомою витратою електроенергії.

4. Запропонований метод розрахунку електричних навантажень промислових підприємств може бути використаний для вищих щаблів системи електропостачання на рівні ділянок, цехів та підприємства в цілому.

5. Перевагою запропонованого методу на відміну від методу упорядкованих діаграм є відсутність необхідності розгляду та врахування характеристик режимів роботи індивідуальних електроспоживачів. Розрахункове навантаження визначається за даними проектної продуктивності, питомими нормами електроспоживання і типовим значенням коефіцієнту максимуму для окремих ділянок, цехів і підприємству в цілому.

Список літератури

1. Маліновський А.А., Хохулін Б.К. Основи електроенергетики та електропостачання: підручник. 2-ге вид., перероб. і доп.. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. 436 с.
2. Бурбело М.Й., Бірюков О.О., Мельничук Л.М. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків: навч. посіб.. Вінниця: ВНТУ, 2011. 204 с.
3. Проблеми визначення ефективності та ранжування енергоощадних заходів на об'єктах бюджетної сфери / Плешков П.Г. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Вип. 1(32). С. 166-172.
4. Указания по расчету электрических нагрузок (РТМ 36.18.32.4-92). Москва : ВНИПИ Тяжпромэлектропроект, 1992. 27 с.
5. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций: учебное пособие. Изд. 3-е, стер. Санкт-Петербург: Лань, 2011. 463 с.
6. Авилов-Карнаухов Б.Н. Электроэнергетические расчеты для угольных шахт. Москва: Недра, 1969. 103 с.
7. Казанцев Ю.І., Котиш А.І., Сіріков О.І. Енергетичні характеристики підприємств при багатонаменклатурному виробництві як некоректні стохастичні зв'язки. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту*. 2004. Вип. 14. С. 369-375.
8. Казанцев Ю.І., Стець П.Г. Энергетические характеристики как основа нормирования электроэнергии и ее рационального использования в электроэнергетических системах. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту*. 2012. Вип. 25, Ч.ІІ. С. 142-144.
9. Кабанихин С.И. Обратные и некорректные задачи. Изд. 4-е ред. Новосибирск: ФГУП «Издательство СО РАН», 2018. 512 с.
10. Железнов Н.А. Некоторые вопросы теории информационных электрических систем. *Труды ЛКВИА*. 1960. Т. 191. С. 155-160.

References

1. Malinovskyi, A.A., & Khokhulin, B.K. (2009). *Osnovy elektroenerhetyky ta elektropostachannia [Fundamentals of Electricity and Power Supply]*. Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika» [in Ukrainian].
2. Burbelo, M.I., Biriukov, O.O., & Melnychuk, L.M. (2011). *Systemy elektropostachannia. Elementy teorii ta pryklady rozrakhunkiv [Power supply systems. Elements of theory and examples of calculations]*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
3. Plieshkov, P.H., Serebrennikov, S.V., Petrova, K.H., Savelenko, I.V., & Sirikov, O.I. (2019). Problemy vyznachennia efektyvnosti ta ranzhuvannia enerhooshchadnykh zakhodiv na ob'ektakh biudzhethnoi sfery [Problems in determining the efficiency and ranking of energy-saving measures in budgetary entities]. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky. – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Engineering sciences*,. 1(32), 166-172 [in Ukrainian].
4. Ukazaniya po raschetu elektricheskikh nagruzok (RTM 36.18.32.4-92) [Instructions for the calculation of electrical loads (RTM 36.18.32.4-92)]. (1992) Moscow: VNIPI Tyazhpromelektroproekt. [in Russian].
5. Sveshnikov, A.A. (2011). *Prikladnye metody teorii sluchajnykh funktsij [Applied methods of the theory of random functions]*. Sankt-Peterburg: Lan [in Russian].
6. Avilov-Karnauhov, B.N. (1969). *Elektroenergeticheskie raschety dlya ugol'nykh shaht [Electric power calculations for coal mines]*. Moscow: Nedra [in Russian].

7. Kazantsev, Yu.I., Kotysh, A.I., & Sirikov, O.I. (2004). Enerhetychni kharakterystyky pidpriemstv pry bahatonomenklaturnomu vyrobnytstvi yak nekorektni stokhastychni zviazky [Energetic characteristics of enterprises in multi-nomenclature production as incorrect stochastic connections]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collection of scientific works of Kirovohrad National Technical University. Engineering in agricultural production, industry engineering, automation, 14*, 369-375 [in Ukrainian].
8. Kazancev, YU.I., & Stec', P.G. (2012). Energeticheskie harakteristiki kak osnova normirovaniya elektroenerгии i ee racional'nogo ispol'zovaniya v elektroenergeticheskikh sistemah [Energy characteristics as a basis for the normalization of electricity and its rational use in power systems]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collection of scientific works of Kirovohrad National Technical University. Engineering in agricultural production, industry engineering, automation, 25(II)*, 142-144 [in Russian].
9. Kabanihin, S.I. (2018). *Obratnye i nekorrektnye zadachi [Inverse and incorrect tasks]*. Novosibirsk: FGUP «Izdatel'stvo SO RAN» [in Russian].
10. ZHeleznov, N.A. (1960). Nekotorye voprosy teorii informacionnyh elektricheskikh sistem [Some questions about the theory of information electrical systems]. *Trudy LKVIA – Proceedings of LKVIA, 191*, 155-160 [in Russian].

Petro Pleshkov, Prof., PhD tech. sci., **Yuri Kazantsev**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Sirikov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Natalia Garasova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Tatiana Velichko**, Senior Lecturer
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Methodology for Determining the Design Loads of Industrial Enterprises by the Specific Energy Consumption Using an Non-stationary Model of Electrical Load Schedules

The proposed methodology for determining the calculated electric load of industrial enterprises for the specific energy consumption and determining the coefficient maximum based on probability theory using ergodic theorems for non-stationary random processes.

When designing power supply systems, the main initial value is the calculated electrical load. High demands are placed on the accuracy and correctness of determining the electrical load. The most common method for calculating the electrical loads of industrial enterprises is the method of ordered diagrams. It is recommended for use at the lower levels of power supply systems at the level of individual consumer groups, sections, workshops and buildings. At higher levels of electricity distribution, the application of this calculation method may be accompanied by significant errors. Therefore, its use for higher levels is not recommended. The specific energy costs of the workshops and the plant as a whole are determined using the main energy characteristics. It can be applied to certain similar enterprises. According to the specific norms of power consumption and the design performance data, the average power is determined. Knowing the average value for the time interval and the variance of the graph of the electrical load, as well as the distribution laws, it is possible to determine the estimated 30-minute maximum load for a given confidence probability. And by its value, the coefficient maximum. By multiplying the average power by the coefficient maximum, the desired design load is determined.

The proposed method for calculating the electrical loads of industrial enterprises can be used for higher stages of the power supply system at the level of sections, workshops and the enterprise as a whole. The advantage of the proposed method, in contrast to the ordered diagram method, is the absence of the need to consider and take into account the characteristics of the operating modes of individual electric consumers.

design load, specific electricity consumption, ergodic theorems, non-stationary process

Одержано (Received) 02.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 20.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

УДК 621.316.13

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).140-149](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).140-149)

В.П. Солдатенко, канд. техн. наук, **В.В. Зінзура**, доц., канд. техн. наук, **С.П. Плешков**, доц., канд. техн. наук, **Н.Ю. Гарасьова**, доц., канд. техн. наук, **Т.В. Величко**, ст. викл.

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: kirovograd41@gmail.com*

Технічна реалізація системи автоматичного управління режимом низьковольтної розподільчої електричної мережі з відновлюваними джерелами енергії

Здійснено розробку мікроконтролерного блоку автоматичного управління режимом генерації активної потужності установок з відновлюваними джерелами енергії, що працюють в складі комбінованої електроенергетичної системи. Розроблено структурну та принципові схеми даного блоку, які було використано для створення макету пристрою. Проведено експериментальні дослідження розробленої мікроконтролерної системи автоматичного управління, результати яких підтвердили її працездатність.

відновлювані джерела енергії, система автоматичного управління

В. П. Солдатенко, канд. техн. наук, **В. В. Зинзура**, доц., канд. техн. наук, **С. П. Плешков**, доц., канд. техн. наук, **Н. Ю. Гарасева**, доц., канд. техн. наук, **Т. В. Величко**, ст. преп.

Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Техническая реализация системы автоматического управления режимом низковольтной распределительной электрической сети с возобновляемыми источниками энергии

Произведена разработка микроконтролерного блока автоматического управления режимом генерации активной мощности установок с возобновляемыми источниками энергии, работающих в составе комбинированной электроэнергетической системы. Разработана структурная и принципиальные схемы данного блока, которые были использованы для создания макета устройства. Проведены экспериментальные исследования разработанной микроконтролерной системы автоматического управления, результаты которых подтвердили ее работоспособность.

возобновляемые источники энергии, система автоматического управления

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку енергетичної галузі України спостерігаються стійкі тенденції до все більшого поширення установок генерації електричної потужності з відновлюваними джерелами енергії (ДЕ). Так, найбільшого розповсюдження набули сонячні (СЕС) та вітрові електростанції (ВЕС), що пов'язано, перш за все, з кліматичними умовами території України. Окрім цього, на підприємствах агропромислового напрямку набули поширення біогазові електростанції (БГЕ) – установки для утилізації відходів тваринництва або рослинництва з виробництвом електроенергії.

Такі установки на промислових підприємствах встановлюється для досягнення цілі зменшення витрат на споживання електричної енергії, що досягається шляхом виробництва її власними електрогенеруючими установками. Слід зазначити, що продаж виробленої електроенергії за «зеленим» тарифом дозволяє досягти істотного зниження строку окупності установок для виробництва електроенергії з відновлюваних ДЕ.

© В.П. Солдатенко, В.В. Зінзура, С.П. Плешков, Н.Ю. Гарасьова, Т.В. Величко, 2019

Додатковою перевагою сумісного використання різнорідних джерел електричної енергії на основі відновлюваних ДЕ в рамках комбінованої електроенергетичної системи (КЕЕС) є зниження добової нерівномірності вироблення електроенергії такою системою. Це, безперечно, є суттєвою перевагою КЕЕС в порівнянні із застосування генеруючих установок, що працюють на відновлюваному ресурсі одного виду.

Стрімкий ріст встановленої потужності генерації установок з відновлюваними ДЕ призводить до негативних явищ [1- 4], серед яких: відхилення напруги в низьковольтних електричних мережах, коливання напруги тощо.

Вирішити дану проблему можливо шляхом покращення характеристик систем автоматичного управління (САУ) виробництвом електричної енергії установками з відновлюваними ДЕ. Метою удосконалення зазначених САУ є досягнення максимального значення можливого рівня виробництва електричної енергії установками з відновлюваними ДЕ. При цьому обмежуючим фактором є забезпечення нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в місці приєднання споживачів електричної енергії до низьковольтної розподільчої мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В результаті виконання аналізу літературних джерел [5- 7] було встановлено, що більшість існуючих САУ установок з ВДЕ (в тому числі і тих, що працюють в КЕЕС) забезпечують підхід до автоматичного управління, при якому відбувається обмеження величини виробництва електричної енергії в залежності від фіксованого значення уставки по напрузі. Негативним фактором такого підходу є скорочення грошових надходжень від реалізації виробленої електричної енергії за ставкою «зеленого» тарифу. Причина вказаного скорочення полягає в зниженні рівня генерації електроенергії в розподільну електричну мережу.

Шляхи удосконалення управління установками з відновлюваними ДЕ при одночасному забезпеченні нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в місці приєднання споживачів електричної енергії до розподільчої електричної мережі було розглянуто в роботах [3, 4, 8-11].

В роботах [10, 11] авторами запропоновано САУ установок з відновлюваними ДЕ яка дозволяє врахувати вплив генерації активної потужності на рівні усталеного відхилення напруги в точці приєднання споживачів до електричної мережі. Позитивний ефект від застосування розробленої в [11] САУ генерацією активної потужності установок з відновлюваними ДЕ підтверджується результатами комп'ютерного імітаційного моделювання.

Проте, для підтвердження працездатності розробленої в [11] САУ, а також для визначення ефективності її роботи необхідно розробити мікропроцесорний блок, що реалізує алгоритм автоматичного управління, запропонований в [11], та провести експериментальні дослідження режимів роботи розробленої системи.

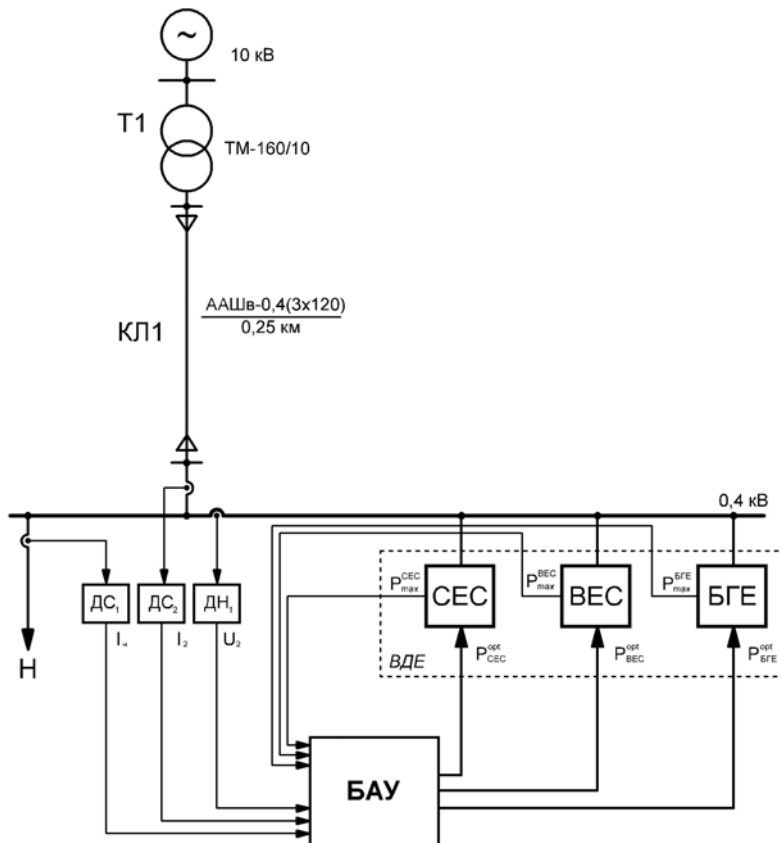
Постановка завдання. Таким чином, метою дослідження є розробка мікропроцесорної САУ, застосування якої забезпечить максимально можливий рівень генерації активної потужності установками з відновлюваними ДЕ, що входять до складу КЕЕС, при одночасному забезпеченні нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці підключення споживачів електричної енергії до низьковольтної розподільчої мережі.

Виклад основного матеріалу. В роботах [9, 11] запропоновано інтерпретувати задачу управління рівнем генерації активної потужності установок з відновлюваними ДЕ, що працюють у складі КЕЕС у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації. Проте, авторами не запропонована технічна реалізація такої системи.

Для здійснення перевірки працездатності, а також для експериментального підтвердження ефективності роботи САУ генерацією активної потужності

відновлюваних ДЕ в КЕЕС було виконано розробку структурної схеми мікроконтролерної САУ генерацією активної потужності відновлюваних ДЕ в КЕЕС із застосуванням сучасної елементної бази.

На рис. 1 зображена структурна схема САУ генерацією активної потужності відновлюваних ДЕ в КЕЕС із зазначенням вимірювальних каналів напруги, струмів лінії живлення та навантаження.



T1 – силовий трансформатор; КЛ – кабельна лінія; Н – електричне навантаження; ВЕС, СЕС, БГЕ – вітрова, сонячна та біогазова електростанції відповідно; ДС₁, ДС₂ – датчики струму; ДН₁ – датчик напруги; БАУ – мікроконтролерний блок автоматичного управління генерацією активної потужності відновлюваних ДЕ в КЕЕС

Рисунок 1 – Структурна схема САУ генерацією активної потужності відновлюваних ДЕ в КЕЕС
Джерело: розроблено авторами

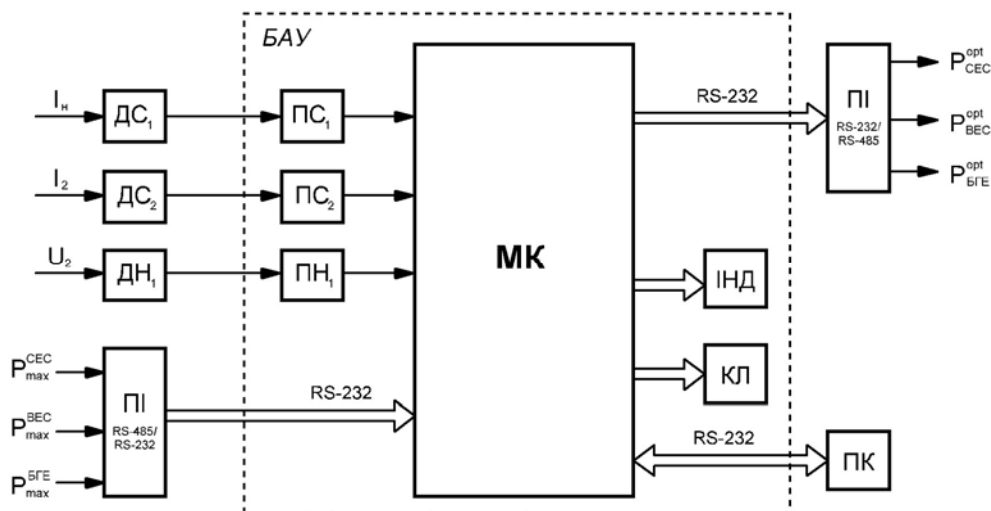
В ролі первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) струму запропоновано застосування застосовувати вимірювальні трансформаторів струму. Такий тип ПВП має суттєві переваги в порівняно з іншими, зокрема:

- багатофункціональність використання, адже дані ПВП можуть застосовуватись як для організації вимірювальних каналів запропонованої САУ, так і для контролю робочих режимних параметрів КЕЕС та релейного захисту;
- доступність та широкий спектр типоміналів;
- задовільний клас точності (0,5 і більше) в широкому діапазоні вимірювання.

З огляду на те, що контроль параметрів реалізується на стороні 0,4 кВ, необхідність у застосуванні вимірювальних трансформаторів напруги не виникає. В таких випадках застосовується пряме підключення вимірювальних приладів до мережі.

Головним елементом структурної схеми САУ генерацією активної потужності відновлюваних ДЕ в КЕЕС є блок автоматичного управління БАУ. Зазначений блок реалізує запропонований алгоритм визначення оптимального вектора управління.

На рис. 2 наведена структурна схема мікроконтролерного БАУ генерацією електричної енергії відновлюваними ДЕ в КЕЕС.



БАУ – блок автоматичного управління; МК – мікроконтролер; ПН₁, ПС₁, ПС₂ – перетворювачі напруги та струму; ДН₁, ДС₁, ДС₂ – датчики напруги та струму; ПІ – перетворювач інтерфейсу RS-485/RS-232; ІНД – блок індикації даних; КЛ – блок введення даних (клавіатура); ПК – персональний комп’ютер

Рисунок 2 – Структурна схема мікроконтролерного БАУ генерацією електричної енергії відновлюваними ДЕ в КЕЕС

Джерело: розроблено авторами

Принцип роботи блоку автоматичного управління (рис. 2) наступний. Інформація про виміряні значення струмів навантаження та лінії (I_1 , I_2) і напруги в точці підключення електроспоживачів (U_2) з виходів датчиків (ДН₁, ДС₁, ДС₂) надходять на входи перетворювачів напруги і струму (ПН₁, ПС₁, ПС₂). В зазначених перетворювачах виконується перетворення інформації про сигнали в цифрову форму із аналогової. Перетворені сигнали з блоків ПС₁, ПС₂ та ПН₁, а також інформація про максимальне в даний момент часу значення генерації електричної енергії установками з відновлюваними ДЕ подаються на вхід мікроконтролера МК. В якості вихідного сигналу мікроконтролера МК буде вектор оптимального управління. Визначення вектора управління відбувається за алгоритмом, який запропонований в роботі [11].

Принципова електрична схема БАУ генерацією електроенергії відновлюваних ДЕ в комбінованій системі зображена на рис. 3. Реалізація розробленого алгоритму визначення оптимального вектора управління відбувається на 8-бітному мікроконтролері Atmega162, що володіє достатніми обчислювальними ресурсами.

Зовнішній вигляд макету БАУ генерацією електроенергії відновлюваних ДЕ в КЕЕС наведено на рис. 4.

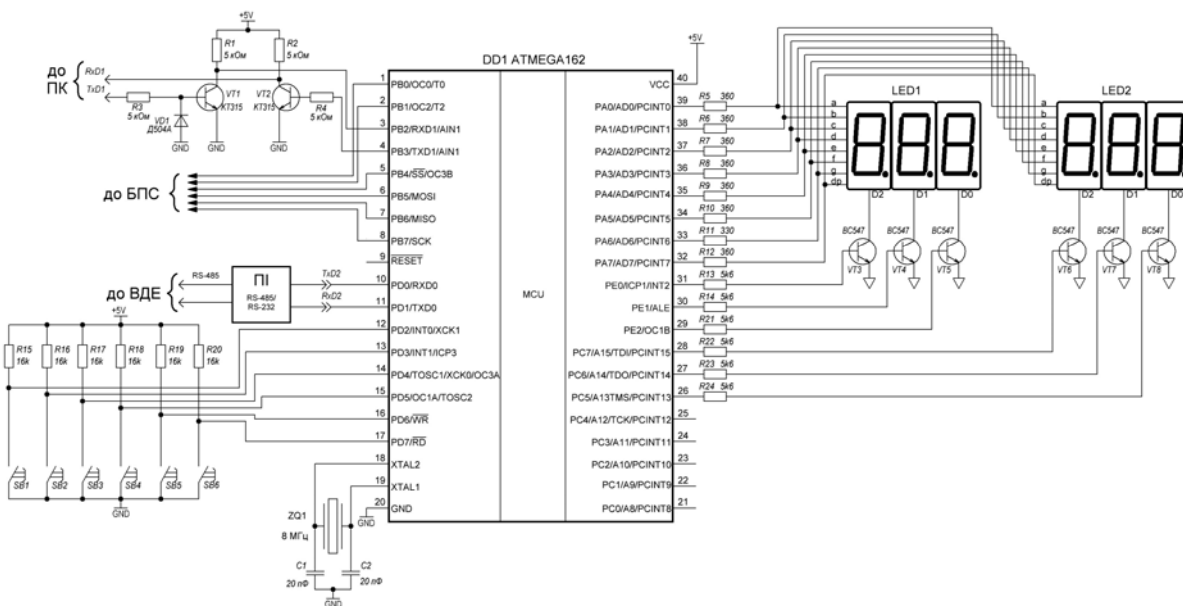


Рисунок 3 – Принципова електрична схема БАУ генерацією електроенергії відновлюваних ДЕ в КЕЕС

Джерело: розроблено авторами

Експериментальні дослідження створеної мікроконтролерної САУ генерацією електричної енергії відновлюваних ДЕ в КЕЕС були проведені на лабораторному стенді. Функціональна схема лабораторного стенда зображена на рис. 5., де: МС – модель живлячої системи; E_C – джерело стабілізованої напруги (моделює ЕРС живлячої системи); R_C – моделює опір електроспоживачів живлячої системи; $R_{Л1}$ – моделює еквівалентний опір ланок електропередачі; МН – модель навантаження; R_H – моделює опір електроспоживачів КЕЕС; МВДЕ – моделює відновлювані джерела енергії; J_1, J_2, J_3 – керовані джерела струму (моделюють генерацію електроенергії від СЕС, ВЕС, БГЕ; БАУ – блок автоматичного управління генерацією електроенергії; $K_1^{opt}, K_2^{opt}, K_3^{opt}$ – складові вектора оптимального управління; I_H – струм навантаження; U_H – напруга на шині електроспоживачів; I_1, I_2, I_3 – значення струмів джерел J_1, J_2, J_3 ; ПК – персональний комп’ютер.

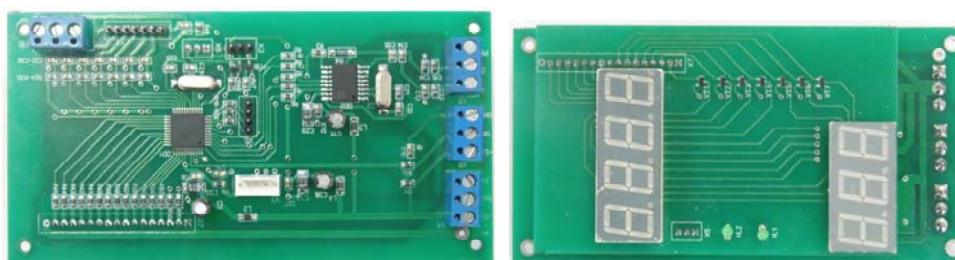


Рисунок 4 – Макет блоку автоматичного управління генерацією електроенергії відновлюваних ДЕ в КЕЕС

Джерело: розроблено авторами

Для моделювання генерації активної потужності установками з відновлюваними ДЕ було використано трьохканальне програмоване джерело струму. Даний пристрій виконано на основі мікросхеми Atmega 162, цифро-аналогових перетворювачів AD5446

та операційних підсилювачів AD8510. Значення складових вектора управління $K_{\text{СЕС}}^{\text{opt}}$, $K_{\text{ВЕС}}^{\text{opt}}$, $K_{\text{БГЕ}}^{\text{opt}}$ передаються від БАУ по інтерфейсу RS-232.

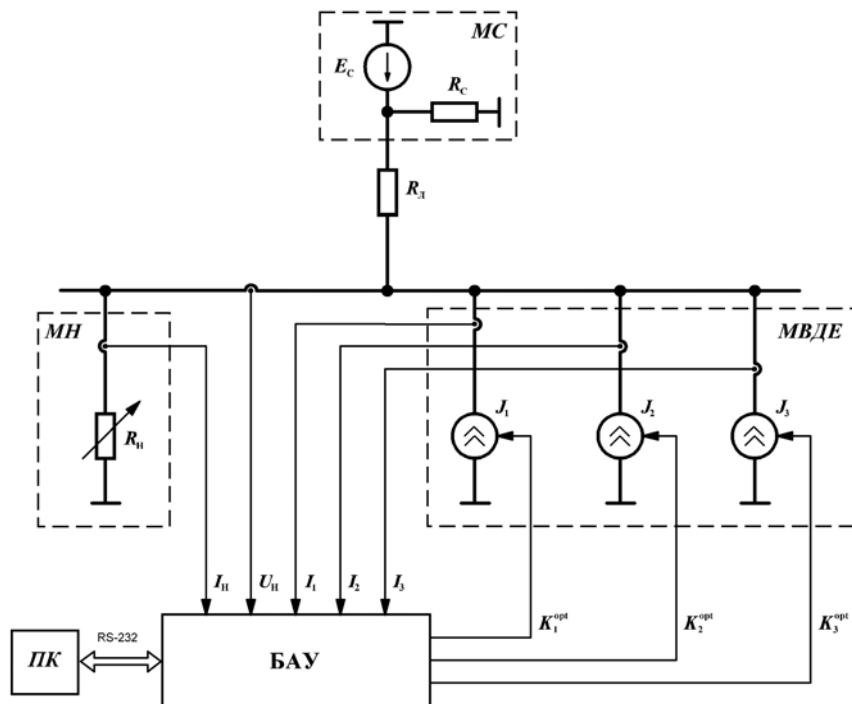


Рисунок 5 – Функціональна схема лабораторного стану для експериментального дослідження мікроконтрольної САУ генерацією електроенергії відновлюваних ДЕ в КЕЕС

Джерело: розроблено авторами

Загальний вигляд лабораторного стану для дослідження САУ генерацією електроенергії відновлюваних ДЕ в КЕЕС приведений на рис. 6.



Рисунок 6 – Загальний вигляд лабораторного стану для експериментального дослідження САУ блоку управління рівнем генерації активної потужності в КЕЕС з ВДЕ

Джерело: розроблено авторами

Результати проведених експериментальних досліджень наведені на рис. 7 – 9 у вигляді графіків

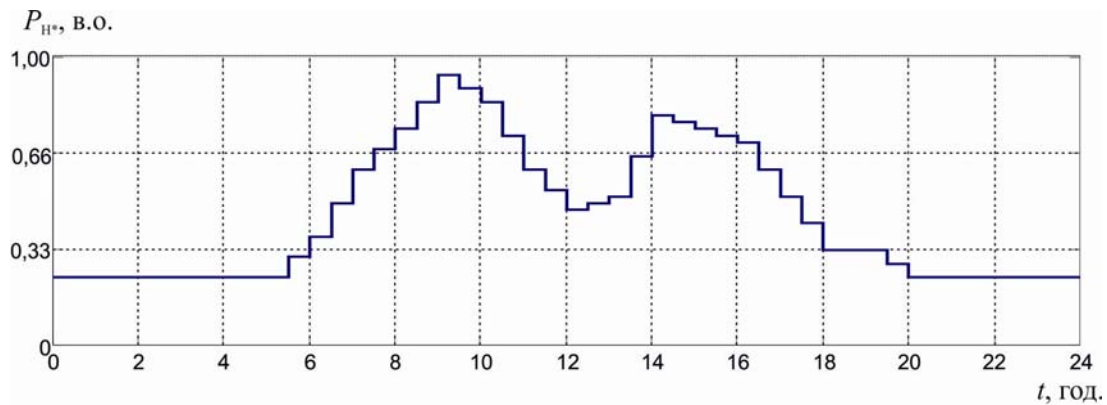


Рисунок 7 – Графік споживання потужності навантаження споживачів електроенергії
Джерело: розроблено авторами

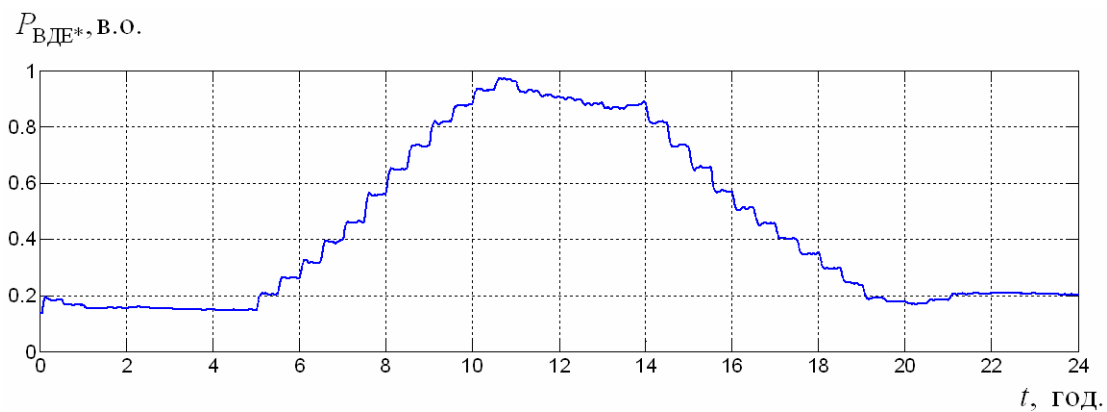


Рисунок 8 – Графік сумарної потужності генерації електроенергії установками з відновлюваними ДЕ
Джерело: розроблено авторами

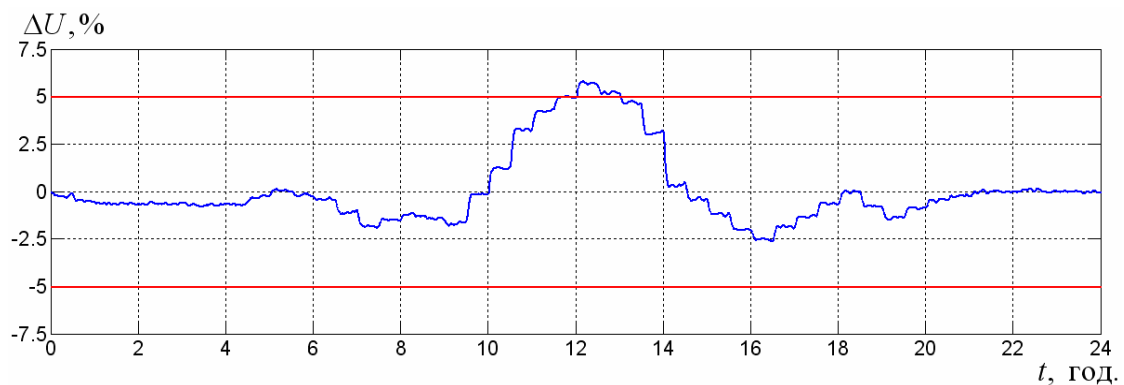


Рисунок 9 – Графік відхилення напруги на шинах електроспоживачі
Джерело: розроблено авторами

Було проведено обробку даних отриманих в результаті комп'ютерного імітаційного моделювання в роботі [11] та експериментального дослідження. Результати статистичної обробки даних наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати статистичної обробки результатів експериментальних досліджень та комп'ютерного імітаційного моделювання

№ з/п	Параметр режиму	Математичне очікування, M	Середньо-квадратичне відхилення, σ
Результати комп'ютерного імітаційного моделювання			
1.	Потужність навантаження споживачів електроенергії, P_n , в.о.	0,483	0,246
2.	Потужність генерації відновлюваних джерел, $P_{ВДЕ}$, в.о.	0,423	0,288
3.	Значення усталеного відхилення напруги, ΔU , %	0,093	1,955
Результати експериментальних досліджень			
4.	Потужність навантаження споживачів електроенергії, P_n , в.о.	0,483	0,255
5.	Потужність генерації відновлюваних джерел, $P_{ВДЕ}$, в.о.	0,436	0,288
6.	Значення усталеного відхилення напруги, ΔU , %	0,097	1,947

Джерело: розроблено авторами

Як видно з результатів статистичної обробки даних, що наведені в таблиці 1, розбіжність між результатами експериментальних досліджень та даними комп'ютерного імітаційного моделювання [11], знаходиться в діапазоні 3-4%. Це свідчить про працездатність розробленої мікроконтролерної САУ генерацією електроенергії відновлюваними ДЕ в КЕЕС.

Висновки. Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Для реалізації алгоритму визначення вектора оптимального управління генерацією електроенергії відновлюваних ДЕ в КЕЕС запропоновано структурну схему мікроконтролерної САУ а також її принципову схему з використанням сучасної елементної бази.

2. Розроблений лабораторний стенд, для експериментального дослідження роботи запропонованої САУ генерацією електричної енергії відновлюваними ДЕ в КЕЕС, дозволив виконати експериментальні дослідження мікропроцесорної САУ.

3. Співставлення результатів проведених експериментів з даними комп'ютерного імітаційного моделювання з наступною обробка статистичних даних показала, що розбіжність між ними складає менше 4 %. Це підтверджує працездатність розробленої САУ генерацією активної потужності відновлюваних ДЕ в КЕЕС.

Список літератури

1. Аналіз впливу приєднання відновлюваних джерел електроенергії на рівні напруги електричних мереж / О. В. Кириленко, В. В. Павловський, Л. М. Лук'яненко, А. Е. Зоммер. *Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*. 2011. Ч. 2. С. 44–49.
2. Проблеми інтеграції відновлюваних джерел електроенергії в «слабкі» електричні мережі / О. В. Кириленко, В. В. Павловський, Л. М. Лук'яненко, І. В. Трач. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 25–26
3. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Ковальчук О. А. Оптиміальне керування розосередженими джерелами енергії в локальній електричній системі. *Праці Інституту електротехнічної динаміки НАН України: збірник наукових праць. Спеціальний випуск*. 2011. ч. 1. С. 48–55.

4. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Гунько І. О. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ. *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*. 2015. № 3 (41). С. 7–13.
5. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems / F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A.V. Timbus. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2006. vol.53. no.5. pp.1398-1409.
6. Blaabjerg F., Chen Z. Power electronics as an enabling technology for renewable energy integration. *J. Power Electron*. 2003. vol. 3. no. 2. pp. 81–89.
7. Blaabjerg F., Liserre M., Ma K. Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2012. Vol. 48. No.2. P. 708–719.
8. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Гунько І. О. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2015. №. 2. С. 134–145.
9. Солдатенко В. П., Плешков С. П. Автоматичне керування режимами роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів*. 2017. №34(1256). С. 66–70.
10. Солдатенко В. П. Система автоматичного керування роботою комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки. Вип. 187 Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*. 2017. С. 37–39.
11. Плешков П.Г., Гарасьова Н.Ю., Солдатенко В.П. Оптиміальне керування режимом роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2018. №32 (1308). С. 64-70.
12. Зінзура В. В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту*. 2012. Вип. 25. Ч. 1. С. 350-360.

Referencis

1. Kyrylenko, O.V., Pavlovskiy, V.V., Lukianenko, L.M. & Zommer, A.E. (2011). Analiz vplyvu pryiednannia vidnovliuvanykh dzherel elektroenerhii na rivni napruhy elektrychnykh merezh [Analysis of the influence of connection of renewable energy sources on the voltage level of electricity grids]. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk «Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist» – Technical electrodynamicics. «Power Electronics and Energy Efficiency» Special issue, 2*, 44 [in Ukrainian].
2. Kyrylenko, O.V., Pavlovskiy, V.V., Lukianenko, L.M. & Trach, I.V. (2012). Problemy intehratsii vidnovliuvanykh dzherel elektroenerhii v «slabki» elektrychni merezhi [Problems of integration of renewable energy sources into "weak" electric grids]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamicics, 3*, 25–26 [in Ukrainian].
3. Lezhniuk, P.D., Kulyk, V.V. & Kovalchuk, O.A. (2011). Optymalne keruvannia rozoseredzhenymy dzherelamy enerhii v lokalnii elektrychnii systemi [Optimal control of scattered energy sources in the local electrical system]. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy: zbirnyk naukovykh prats. Spetsialnyi vypusk – Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine: collection of scientific works. Special issue, 1*, 48–55 [in Ukrainian].
4. Lezhniuk, P.D., Rubanenko, O.Ye. & Hunko I.O. (2015). Vplyv soniachnykh elektrychnykh stantsii na napruhu spozhyvachiv 0,4 kV [Flush of sonny electric power stations on the spur of settling 0,4 kV]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnologii, ekolohiia: naukovyi zhurnal – Energy: economics, technology, ecology: science journal, 3 (41)*, 7–13 [in Ukrainian].
5. Blaabjerg, F., Teodorescu, R., Liserre, M. & Timbus, A.V. (2006). Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 5*, 1398-1409 [in English].
6. Blaabjerg, F. & Chen, Z. (2003) Power electronics as an enabling technology for renewable energy integration *Power Electron, 2*, 81–89 [in English].
7. Blaabjerg, F., Liserre, M. & Ma, K. (2012). Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications, 2*, 708–719 [in English].
8. Lezhniuk, P.D., Rubanenko, O. Ye. & Hunko, I.O. (2015). Vplyv invertoriv SES na pokaznyky yakosti elektrychnoi enerhii v LES [Influence of solar power inverters on the electric power quality indicators in the local electrical system]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Bulletin of Khmelnytsky National University. Technical sciences, 2*, 134–135 [in Ukrainian].

9. Soldatenko, V.P. & Plieshkov, P.G. (2017). Avtomatychnе керування rezhymamy roboty kombinovanoi elektroenerhetychnoi systemy z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii [Automatic control of the modes of operation of the combined power system with renewable energy sources]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Serii: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific works. Series: Problems of Improvement of Electric Machines and Apparatus, 34(1256), 66–70* [in Ukrainian].
10. Soldatenko, V.P. (2017). Systema avtomatychnoho керування robotoiu kombinovanoi elektroenerhetychnoi systemy z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii [The system of automatic control of the operation of a combined power system with renewable energy sources]. *Visnyk KhNTUSH im. P. Vasylenka. Tekhnichni navky. Vyp. 187 Problemy enerhozabezpechennia ta enerhozberezhennia v APK Ukrainy – Bulletin KhNTUSH P. Vasilenko. Technical lessons. Whip 187 Problems of power supply and energy saving in the agroindustrial complex of Ukraine, 37–39* [in Ukrainian].
11. Plieshkov, P.G., Soldatenko, V.P. & Harasova, N. Y. (2018). Optymalne керування rezhymom roboty kombinovanoi elektroenerhetychnoi systemy z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii [Optimal Control of the Work of the Hybrid Electric Energy System with Renewable Sources of Energy]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Serii: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific works. Series: Problems of Improvement of Electric Machines and Apparatus, 32(1308), 66–70* [in Ukrainian].
12. Zinzura, V.V. (2012). Metody rozviazku zadachi bahatokryterialnoi optymizatsii rehuliuвання napruhy v elektrychnykh merezhakh. [Methods of solving the problem of multicriteria optimization of voltage regulation in electric networks]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University, 25, 350-360* [in Ukrainian].

Valentyn Soldatenko, Lect., PhD tech. sci., **Vasyl Zinzura**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Plieshkov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliia Harasova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Tetiana Velychko**, Sen. Lect. *Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

Technical Implementation of the Automatic Control System of the Low-voltage Distribution Network with Renewable Energy Sources

The purpose of the study is to develop a microprocessor-based automatic control system, the application of which will provide the highest possible level of generation of active power to the units of RES, which are part of the EEC, subject to the observance of the normally acceptable values of the established voltage deviation at the point of connection of consumers to the electrical distribution network.

A block diagram of a microprocessor-based automatic control system for generating the active power of renewable energy sources operating within a combined power system using a modern element base has been developed. Structural and schematic diagrams of the microprocessor-based automatic control system were developed, based on an algorithm for determining the optimal control vector based on the solutions of the multicriteria optimization problem. The developed laboratory stand for the experimental study of the quality of work of the automatic control system of generation of active power of renewable energy sources working in the combined electric power system allowed to perform the experimental researches of the microprocessor automatic control system. Experimental studies were conducted to test the performance of the developed microprocessor-based system for automatic control of the level of active power generation, as well as to determine its efficiency.

Comparison of the results of the experimental studies with the data of computer simulation and the results of statistical data showed the correctness of the theoretical studies and the efficiency of the developed system of automatic control of the generation of active power of renewable energy sources operating in the combined electricity system.

renewable energy sources, automatic control system

Одержано (Received) 18.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 20.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

ІННОВАЦІЙНІ ТА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.9.048.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).150-160](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).150-160)**В.І. Носуленко**, проф., д-р техн. наук, **В.М. Шмельов**, доц., канд. техн. наук,
О.С. Голованич, асп.*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна**e-mail: shmelyovvm@gmail.com***Технологічні схеми формоутворення за умов
розмірної обробки електричною дугою**

Підвищення ефективності суспільного виробництва пов'язано, перш за все, з розвитком машинобудування та широким впровадженням у виробництво прогресивних технологій. Основою машинобудування є металообробка, яка представлена різноманітними традиційними способами обробки металів різанням, тиском та литтям, а також електрофізичними та електрохімічними способами обробки. В виробництві для виготовлення важконавантажених та відповідальних деталей все частіше застосовують матеріали, що важко піддаються обробці різанням. Такі деталі зазвичай виготовляють електрофізичними методами обробки. Одним із прогресивних способів електрофізичної обробки металів, що забезпечує широкі технологічні можливості, є електроерозійна обробка, зокрема спосіб розмірної обробки електричною дугою. Реалізація конкретних технологій розмірної обробки електричною дугою та розробка відповідних технологічних схем формоутворення вимагає індивідуальних підходів та застосування найрізноманітніших технологічних прийомів. Це потребує уніфікації цих прийомів та розробки відповідних рекомендацій. На підставі аналізу і узагальнень теоретичних та експериментальних досліджень і практичної реалізації процесу розмірної обробки електричною дугою викладено технологічні прийоми у вигляді правил реалізації процесу. Результати практичного використання технології, верстатів і електроерозійних головок, що реалізують спосіб розмірної обробки електричною дугою, згідно викладеного, підтверджують вказані раніше переваги способу порівняно з відомими, традиційними способами електроерозійної обробки, заснованими на використанні нестационарних електричних розрядів, а саме: при заданій якості обробки продуктивність способу в 5...10 разів і більше перевищує продуктивність відомих способів, приблизно вдвічі зменшується питома витрата електроенергії, значно менша вартість джерел живлення технологічним струмом, а також забезпечуються широкі можливості реалізації процесу за рахунок різноманітних технологічних схем формоутворення як профільованим, так і непрофільованим електродом, починаючи від традиційних і аж до того, що запропонований процес може бути ефективно використаним на будь-яких металорізальних верстатах без втрати останніми їх основних функцій.

**електрична дуга, електроіскрова обробка, електроімпульсна обробка, електророзрядна обробка,
розмірна обробка електричною дугою****В.И. Носуленко**, проф., д-р техн. наук, **В.Н. Шмелев**, доц., канд. техн. наук, **А.С. Голованич**, асп.*Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Украина***Технологические схемы формообразования в условиях размерной обработка
электрической дугой**

Повышение эффективности общественного производства связано, прежде всего, с развитием машиностроения и широким внедрением в производство прогрессивных технологий. Основой машиностроения является металлообработка, которая представлена различными традиционными способами обработки металлов резанием, давлением и литьем, а также электрофизическими и электрохимическими способами обработки. В производстве для изготовления тяжело нагруженных и ответственных деталей все чаще применяют материалы трудно поддающиеся обработке резанием. Такие детали обычно изготавливают электрофизическими методами обработки. Одним из прогрессивных

способов электрофизической обработки металлов, обеспечивает широкие технологические возможности, является электроэрозионная обработка, в частности способ размерной обработки электрической дугой. Реализация конкретных технологий размерной обработки электрической дугой и разработка соответствующих технологических схем формообразования требует индивидуальных подходов и применения самых технологических приемов. Это требует унификации этих приемов и разработки соответствующих рекомендаций. На основании анализа и обобщений теоретических и экспериментальных исследований и практической реализации процесса размерной обработки электрической дугой изложены технологические приемы в виде правил реализации процесса. Результаты практического использования технологии, станков и электроэрозионных головок, реализующих способ размерной обработки электрической дугой, согласно изложенного, подтверждающих указанные ранее преимущества способа по сравнению с известными, традиционными способами электроэрозионной обработки, основанными на использовании нестационарных электрических разрядов, а именно: при заданном качестве обработки производительность способа в 5...10 раз и более превышает производительность известных способов, примерно вдвое уменьшается удельный расход электроэнергии, значительно меньшая стоимость источников питания технологическим током, а также обеспечиваются широкие возможности реализации процесса за счет различных технологических схем формообразования как профилированным, так и непрофилированными электродами, начиная от традиционных и до того, что предложенный процесс может быть эффективно использован на любых металлорежущих станках без потери последними их основных функций.

электрическая дуга, электроискровой обработки, электроимпульсная обработка, электроразрядными обработка, размерная обработка электрической дугой

Постановка проблеми. Підвищення ефективності суспільного виробництва пов'язано, перш за все, з розвитком машинобудування та широким впровадженням у виробництво прогресивних технологій. Основою машинобудування є металообробка, яка представлена різноманітними традиційними способами обробки металів різанням, тиском та литтям, а також перспективними, але порівняно мало вивченими і такими, що мають обмежене практичне застосування різноманітними процесами так званої електротехнології (електрофізичними та електрохімічними способами обробки) [1,2,3].

В виробництві для виготовлення важконавантажених та відповідальних деталей все частіше застосовують матеріали, що важко піддаються обробці різанням. Такі деталі зазвичай виготовляють електрофізичними методами обробки. Одним із способів електрофізичної обробки металів, що забезпечує широкі технологічні можливості, є традиційна електроерозійна обробка з використанням нестационарних електричних розрядів (ЕЕО) (електроіскрова, електроімпульсна обробка) [4], проте вона знаходить обмежене практичне застосування, оскільки не забезпечує достатньо високої продуктивності. В цьому зв'язку певний практичний інтерес являє спосіб розмірної обробки електричною дугою (РОД) [5], що отримав помітне практичне застосування і вимагає подальшого удосконалення та розширення технологічних можливостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виготовлення деталей з важкооброблюваних матеріалів зі складним профілем зазвичай виконують методами традиційної ЕЕО з використанням нестационарних електричних розрядів. Для таких методів обробки при копіювально-прошивних операцій електрод-інструменти (ЕІ) виготовляють зазвичай з міді, що при обробці важкооброблюваних матеріалів володіє порівняно низькою стійкістю [6]. Такі ЕІ виготовляють методами вирізання, необхідного контуру, електрод-дротиною з необхідною точністю, що призводить до підвищення вартості таких ЕІ [7] і, як наслідок, підвищення собівартості виготовлення виробів. Для підвищення стійкості ЕІ виготовляють з композиційних матеріалів [8] та псевдосплавів [9], тобто, з матеріалів різних за своїми властивостями методами порошкової металургії спікають ЕІ необхідної форми і розмірів. Виготовлені з таких матеріалів ЕІ хоча і мають вищу стійкість порівняно з мідними ЕІ, проте собівартість виготовлення таких ЕІ значно зростає.

При обробці способом РОД в якості матеріалу для виготовлення ЕІ

використовують, зазвичай, електроерозійний графік марок МПГ-7, МПГ-8, який має порівняно низьку вартість і легко піддається обробці різанням, що дозволяє знизити собівартість виготовлення деталей.

Постановка завдання. При забезпеченні основної умови реалізації процесу РОД, яка полягає в тому, що обробка здійснюється електричною дугою в поперечному потоці середовища-діелектрика [10] при динамічному тиску останнього не менше 1...2кПа, РОД, як і відомі способи традиційні ЕЕО з використанням нестационарних електричних розрядів, дозволяє здійснити майже всі технологічні схеми формоутворення, характерні для обробки металів різанням (так звана обробка непрофільованим електродом).

Реалізація конкретних технологій РОД та розробка відповідних технологічних схем формоутворення вимагає індивідуальних підходів та застосування найрізноманітніших технологічних прийомів. Це потребує уніфікації цих прийомів та розробки відповідних рекомендацій. На підставі аналізу і узагальнень теоретичних та експериментальних досліджень і практичної реалізації процесу РОД викладемо ці технологічні прийоми у вигляді правил реалізації процесу РОД або, що те ж, але згідно діючої термінології, у вигляді переліку та опису способів РОД.

Виклад основного матеріалу. Спосіб РОД, згідно якого потік робочої рідини підводять до передньої формоутворюючої поверхні електрода 1 (рис. 1), а відводять від задньої робочої поверхні електрода, що прилягає до менш чистої за умовами виготовлення поверхні заготовки або в сторону припуску на подальшу обробку, напуску чи відходу.

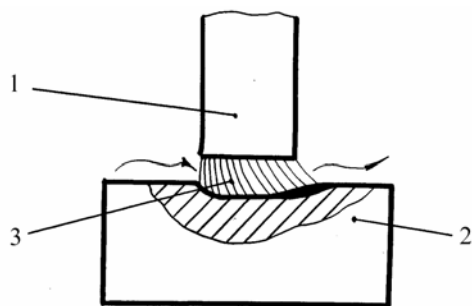


Рисунок 1 – Структура електричної дуги в поперечному потоці рідини

Джерело: розроблено авторами

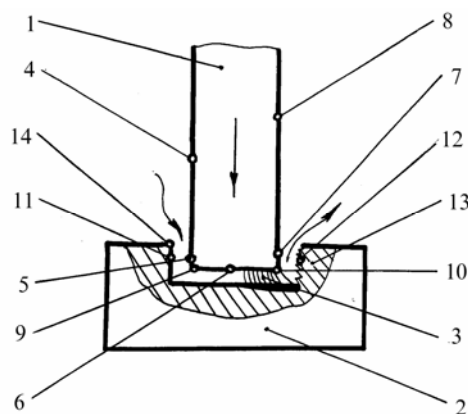


Рисунок 2 – Схема реального процесу

Джерело: розроблено авторами

Рідину подають поміж електродом 1 і заготовкою 2 примусово потоком в напрямку, по суті, поперечному до осі стовпа електричної дуги 3.

При цьому в умовах реального процесу (рис. 2) на електроді 1 треба розрізнити такі елементи: передня поверхня 4, передня формоутворююча поверхня 5, торцева робоча поверхня 6, задня робоча поверхня 7 і задня поверхня 8. В місцях перетину передньої і торцевої поверхні електрода розташована передня формоутворююча кромка 9, а в місцях перетину задньої і торцевої поверхонь – задня робоча кромка 10.

Таке технічне рішення дозволяє оптимально використати стаціонарну електричну дугу в поперечному потоці рідини як джерело тепла для розмірної обробки металів, оскільки така дуга має несиметричну енергетичну структуру, а саме, зі сторони потоку, який набігає на неї, її енергетичні характеристики вищі, її «ріжучі» властивості кращі, ніж з задньої сторони, де потік залишає електрод. До того ж в

напрямку потоку, що рухається, якість обробленої поверхні погіршується ще й через продукти ерозії, які рухаються разом з потоком.

Отже, дуга зі сторони потоку, що набігає на неї, формує якісну кромку 14 і якісно оброблену поверхню 11, в той час як зі сторони задньої поверхні електрода, де потік залишає електрод, формується менш якісна поверхня 12. Таким чином, коли потік робочої рідини підводять до формуючої поверхні 5 електрода, то саме тут формується якісна кромка 14, а надалі і якісна поверхня 11, в той час як зі сторони задньої поверхні 8 електрода формується менш якісна поверхня 12. Відзначимо, що якість обробленої поверхні 11 при цьому не поступається досягнутій при традиційних способах електроерозійної обробки.

Спосіб РОД, згідно якого для підвищення якості обробленої поверхні, зменшення розбризкування робочої рідини, гасіння світлових і звукових ефектів на задню робочу поверхню 7 електрода 1 (рис. 3) подають додатковий потік робочої рідини, по суті, перпендикулярно до основного потоку в аксіальному (паралельному поздовжній осі електрода) і тангенціальному (по дотичній до бічної поверхні електрода з круглим поперечним перерізом) напрямках, або ж в зустрічному напрямку до основного потоку. Це дозволяє локалізувати зону обробки за рахунок її затоплення робочою рідиною, в зв'язку з чим такий додатковий потік робочої рідини називають потоком затоплення. Напрямок додаткового потоку рідини визначається вимогами реалізації конкретної технологічної схеми формоутворення.

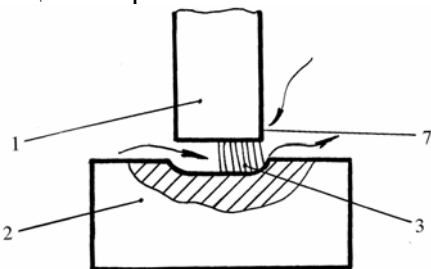


Рисунок 3 – Схема процесу з додатковим потоком затоплення

Джерело: розроблено авторами

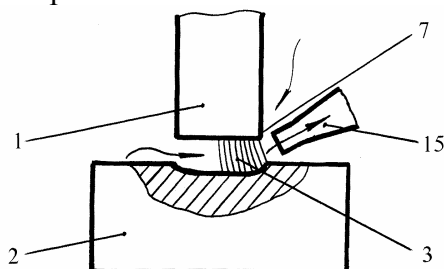


Рисунок 4 – Схема процесу при відведенні рідини через сопло

Джерело: розроблено авторами

Спосіб РОД, згідно якого ефект збереження швидкості потоку рідини, що залишає електрод зі сторони його задньої робочої поверхні 7 електрода 1, а отже і забезпечення високої якості обробленої поверхні досягають за рахунок того, що потік робочої рідини формують при її відводі через сопло 15 (рис. 4) або щілину тільки всмоктуванням, тільки нагнітанням або ж комбінацією нагнітання і всмоктування. Таке технічне рішення забезпечує не тільки якісне формоутворення поверхні, що обробляється, але й дозволяє оптимізувати витрату робочої рідини. При цьому вибір варіанту формування потоку робочої рідини (тільки всмоктуванням, тільки нагнітанням або ж комбінацією нагнітання та всмоктування) повністю визначається вимогами реалізації конкретної технологічної схеми формоутворення.

Спосіб РОД, згідно якого для локалізації зони обробки з метою підвищення якості обробленої поверхні, зменшення розбризкування робочої рідини та зменшення світлових і звукових ефектів зі сторони задньої робочої поверхні 7 електрода 1 (рис. 5) створюють гідравлічний опір розтіканню рідини у вигляді ущільнення 16, яке прикріплене до стінки 17. При цьому в зону обробки подається більша кількість рідини, ніж іде на вільний злив під ущільнення 16. Як наслідок, інша частина рідини затоплює робочу зону обробки, створюючи ванну і зливається, наприклад, через стінку 17 або контрольний отвір в ній.

Спосіб РОД, згідно якого для покращення якості обробленої поверхні зі сторони задньої поверхні 7 електрода 1 (рис. 6), достатньо зберегти швидкість потоку робочої рідини, що залишає електрод. Для цього зі сторони задньої робочої поверхні 7 електрода встановлюють додаткові елементи 18, наприклад, одну накладку (див. рис. 6) або дві накладки (рис. 7). Додаткові елементи 18 формують щілину для відведення робочої рідини, висоту якої приймають рівною, або дещо більшою висоти міжелектродного зазору.

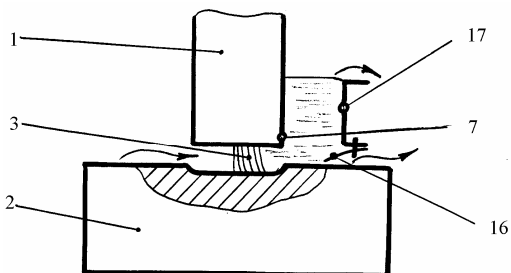


Рисунок 5 – Схема процесу при затопленні зони обробки

Джерело: розроблено авторами

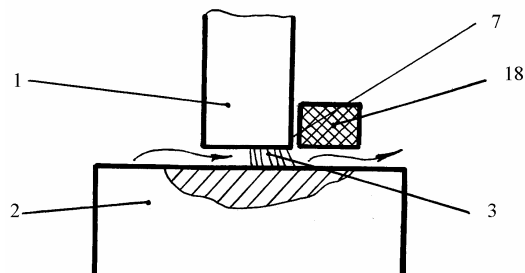


Рисунок 6 – Схема процесу при застосуванні додаткового елемента

Джерело: розроблено авторами

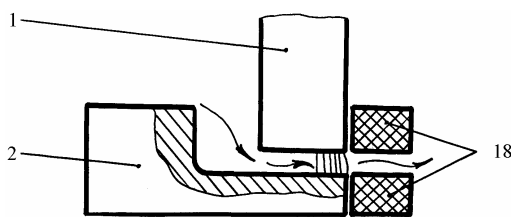


Рисунок 7 – Схема процесу при застосуванні двох додаткових елементів

Джерело: розроблено авторами

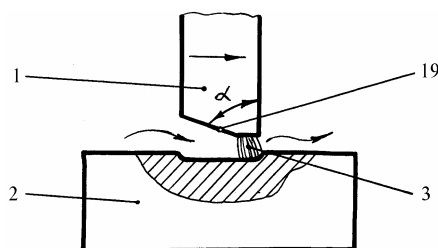


Рисунок 8 – Схема процесу при течі рідини в звужуючу щілину

Джерело: розроблено авторами

Спосіб РОД, коли враховують, що якість обробленої поверхні в умовах даного способу визначається, перш за все, характером взаємодії дуги з потоком робочої рідини. Тому, формуючи потік відповідних характеристик, зокрема забезпечуючи більш рівномірну течу робочої рідини в міжелектродному зазорі, можна покращити якість обробленої поверхні. З цією метою потік робочої рідини формують при її течі в звужуючу щілину, що утворюється оброблюваною поверхнею заготовки 2 (рис. 8) і нахилоною торцевою неробочою поверхнею 19 електрода 1, яку доцільно розташувати під кутом $\alpha=70...85^\circ$. При цьому шорсткість обробленої поверхні зменшується на один-два квалітети при інших рівних умовах порівняно з технологічними схемами формоутворення з плоскою торцевою поверхнею.

Спосіб РОД, згідно якого для прошивання наскрізних щілин в тонких листових заготовках застосовують електрод 1 зі скошеною нахилоною або вигнутою торцевою робочою поверхнею 20 (рис. 9). Після заглиблення в заготовку 2 гострою кромкою електрода 1 і його подальшому русі донизу довжина траси прокачування робочої рідини через міжелектродний зазор залишається приблизно однаковою і є невеликою. Під оброблюваним отвором передбачають порожнину 21 з робочою рідиною. Скіс торцевої робочої поверхні може бути як однобічним (див. рис. 9), так і двобічним (рис. 10), а кут β (див. рис. 9) електрода 1 може коливатись в широких межах, в середньому

60°; крім того торцева робоча поверхня 20 електрода 1 може бути вигнута в різних варіантах – і все це, в кінцевому підсумку, визначається вимогами реалізації конкретної технологічної схеми формоутворення.

Спосіб РОД, згідно якого для забезпечення якості нижньої кромки наскрізного отвору, обробку здійснюють на металевій чи гумовій підкладці 22 (див. рис. 10), якою, зокрема, може бути одна з попередньо прошитих заготовок, звичайно перша, яка стає, таким чином, довготривалим оснащенням для прошивання інших заготовок.

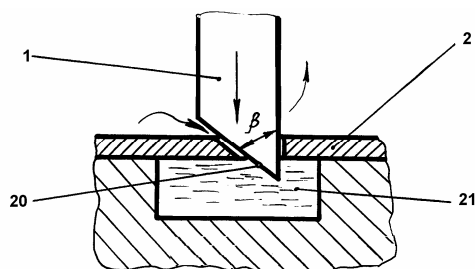


Рисунок 9 – Схема процесу обробки вузької щілини

Джерело: розроблено авторами

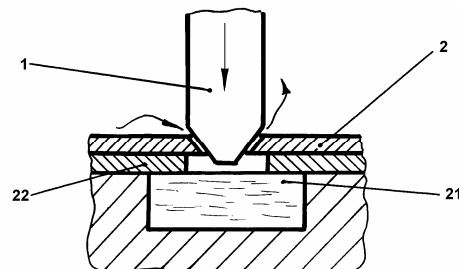


Рисунок 10 – Схема процесу обробки при наявності підкладки

Джерело: розроблено авторами

Спосіб РОД, згідно якого для підвищення продуктивності та якості обробленої поверхні при наскрізному прошиванні під отвором, який отримують, передбачають порожнину 21, яку з'єднують зі зливом (рис. 11), а в головній зливній магістралі створюють додатковий гідравлічний опір, т. з. протитиск, наприклад, за допомогою крана (на схемі умовно не показано). Величина протитиску, яка звичайно коливається в межах 1...10атм, повністю визначається умовами реалізації конкретної технологічної схеми формоутворення.

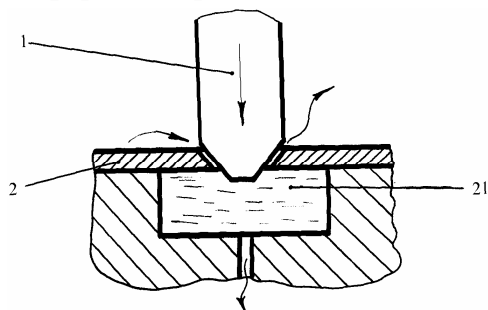


Рисунок 11 – Схема процесу обробки підкладки з притиском

Джерело: розроблено авторами

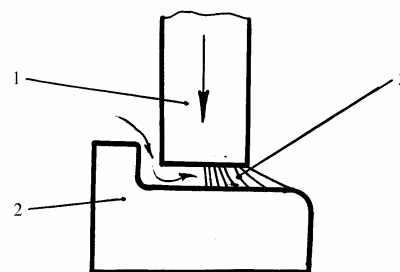


Рисунок 12 – Схема процесу при підвищених напрузі і струму

Джерело: розроблено авторами

Спосіб РОД, коли буває потрібно видалити підвищений припуск (напуск) або відхід. В цьому випадку простим за використанням, продуктивним та економічним в енергетичному відношенні, оскільки руйнування металу здійснюється за рахунок локального плавлення видовженою дугою, є збільшення тільки напруги дуги до $U = 35...70\text{В}$, тільки струму дуги до $I = 300...1000\text{А}$, або ж одночасно струму і напруги до вказаних значень. Як наслідок, може бути видалений підвищений припуск (напуск) або відхід (до 5...10 мм і більше) (рис. 12).

Спосіб РОД, згідно якого для забезпечення якісного формування поверхні 23 (рис. 13) та кромки 24 зі сторони задньої робочої поверхні електрода процес реалізують при мінімальній напрузі дуги $U = 20...25\text{В}$ і мінімальному струмі $I = 1...30\text{А}$.

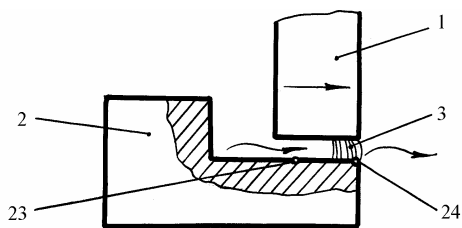


Рисунок 13 – Схема процесу при мінімальних
нарузі і струму

Джерело: розроблено авторами

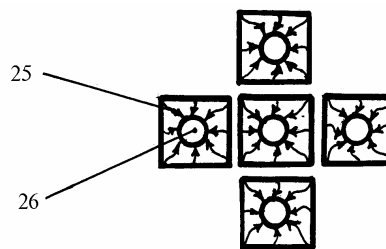


Рисунок 14 – Приклад багатосекційного
електрода в плані

Джерело: розроблено авторами

Спосіб РОД, коли проблемою є стабілізація процесу і виключення його порушень, при запалюванні дуги, близької за своїми енергетичними характеристиками до звичайних зварювальних дуг, що псує оброблювану поверхню. Особливо це виявляється при обробці несиметричних і великих поверхонь, при багатоелектродній обробці, при використанні багатосекційних електродів і т. і. Щоб це виключити, достатньо щоб гідравлічний опір на всіх лініях течії робочої рідини був по можливості мінімальним і приблизно однаковим, для чого траси прокачки робочої рідини через міжелектродний зазор повинні бути по можливості мінімальними і приблизно однаковими. Для цього робочу поверхню електрода поділяють на окремі ділянки прокачування, які повинні наближатися до круглих чи квадратних в плані. На рис. 14 наведено приклад багатосекційного електрода в плані, який складається із п'яти окремих квадратних ділянок 25 з отворами 26 для відведення робочої рідини, що задовольняє зазначеним умовам та забезпечує якісну обробку.

Спосіб РОД, коли при обробці великих поверхонь профільованим електродом різко зростають траси прокачування робочої рідини через міжелектродний зазор і, відповідно, тиск робочої рідини, що погіршує якість обробленої поверхні, ускладнює і часто порушує процес. В цьому випадку доцільна, особливо при обробці видовжених в плані поверхонь, коли до того ж можна оптимізувати витрату робочої рідини, реалізація технологічної схеми обкатування заготовки 2 профільованим електродом 27 при прокачуванні робочої рідини в напрямку, зворотному обкатуванню (рис. 15).

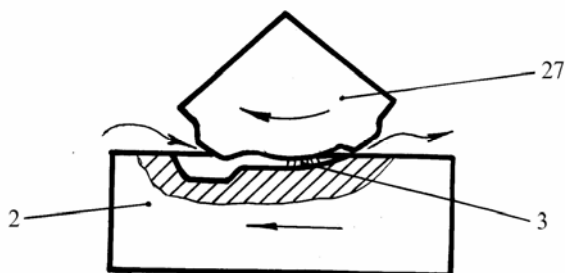


Рисунок 15 – Технологічна схема формоутворення за
принципом обкатування

Джерело: розроблено авторами

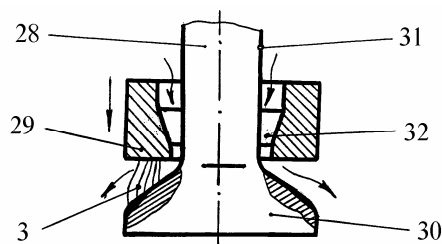


Рисунок 16 – Технологічна схема
формоутворення деталі типу «стержень»

Джерело: розроблено авторами

Викладені технічні рішення, прийоми та режими обробки способу в їх сукупності, взаємозв'язку та взаємозалежності дозволяють реалізувати практично всі відомі технологічні схеми формоутворення розмірної обробки, забезпечуючи при цьому оптимальне поєднання кількісних та якісних характеристик процесу і, в кінцевому рахунку, зазначені раніше його переваги.

Як приклад, що підтверджує це, розглянемо реалізацію технологічної схеми формоутворення деталі 28 (рис. 16) типу фасонний стержень. Перш за все звертаємось

способу зображеному на рис. 2, згідно якого для якісного формоутворення деталі при реалізації відомої схеми зворотного копіювання необхідно використати так зване пряме прокачування робочої рідини від центру порожнистого профільованого електрода 29 до його периферії і, відповідно, від центру оброблюваної заготовки до її периферії. З метою високопродуктивного видалення збільшеного припуску 30 використовуємо спосіб зображений на рис. 12. Щоб покращити якість поверхні 31, використовуємо спосіб зображений на рис. 8. Як наслідок, реалізується технологічна схема формоутворення (див. рис. 16) і відповідні режими обробки, що забезпечують зазначені вище переваги способу. Так, наприклад, при обробці сталеві заготовки при застосуванні дуги напругою $U=35\text{В}$ при струмі $I=1000\text{А}$ забезпечується продуктивність $30000\text{мм}^3/\text{хв}$ при відсутності на обробленій поверхні 31 зони термічного впливу та при шорсткості обробленої поверхні в межах четвертого класу ($R_a 6,3$). Це при заданій якості поверхні в десятки разів перевищує продуктивність традиційних методів електроерозійної обробки.

Наступним прикладом є реалізація способу при відносному переміщенні заготовки і електрода в різних напрямках, наприклад, при обробці тіл обертання (рис. 17, 18) непрофільованим електродом 33. В цьому випадку треба виходити з того, що оптимальним варіантом підведення робочої рідини високого тиску в зону обробки є загальновідоме технічне рішення – використання порожнистого електрода 33 з отвором 34. Проте при цьому існує проблема локалізації робочої зони обробки з метою забезпечення якості обробки, зменшення світлових і звукових ефектів від розряду та зменшення розбризкування робочої рідини із зони обробки. Найбільш просте рішення із викладених, що вирішує цю проблему, це технічне рішення, що показано на рис. 5. Згідно цього зі сторони задньої робочої поверхні електрода 33 (див. рис. 17) створюють гідравлічний опір розтіканню робочої рідини ущільненням 16, яке прикріплене до стінки 17. Оскільки кількість рідини, що надходить через отвір 34 в електроді 33, більше тієї, що іде на вільний злив під ущільненням 16, то робоча рідина затоплює зону обробки, створюючи ванну, і зливається через контрольний отвір 35.

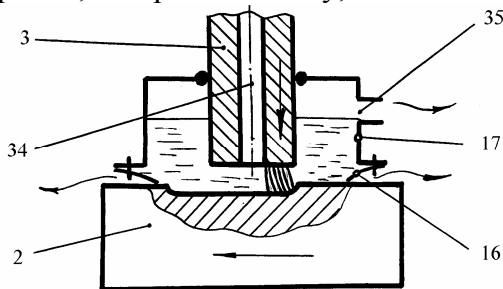


Рисунок 17 – Технологічна схема формоутворення непрофільованим електродом
Джерело: розроблено авторами

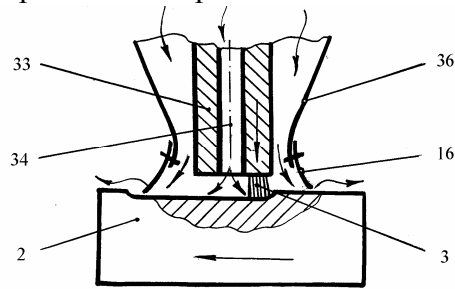


Рисунок 18 – Технологічна схема формоутворення непрофільованим електродом
Джерело: розроблено авторами

Більш складним, але й більш ефективним є технічне рішення показане на рис. 3. Згідно цього на задню робочу поверхню електрода 33 (див. рис. 18) подають додатковий потік робочої рідини за допомогою камери 36, до нижньої частини якої прикріплене ущільнення 16. Це створює ванну робочої рідини, яка локалізує зону обробки, з можливостями впливати на характер течії робочої рідини в зоні обробки, а відповідно визначати, в відомих межах, як кількісні, так і якісні характеристики процесу обробки, а також умови обслуговування.

Ще більш складним, але й більш ефективним може бути технічне рішення, показане на рис. 4 коли є можливість, зокрема, за рахунок всмоктування взагалі

видалити із зони обробки як робочу рідину, так і продукти ерозії.

Аналогічно, згідно викладеного, можна реалізувати як відомі, так і нові технологічні схеми формоутворення електроерозійної обробки.

Висновки. Результати практичного використання технології, верстатів і електроерозійних головок, що реалізують спосіб РОД, згідно викладеного, підтверджують вказані раніше переваги способу порівняно з відомими, традиційними способами електроерозійної обробки, заснованими на використанні нестационарних електричних розрядів, а саме: при заданій якості обробки продуктивність способу в 5...10 разів і більше перевищує продуктивність відомих способів, приблизно вдвічі зменшується питома витрата електроенергії, значно менша вартість джерел живлення технологічним струмом, а також забезпечуються широкі можливості реалізації процесу за рахунок різноманітних технологічних схем формоутворення як профільованим, так і непрофільованим електродом, починаючи від традиційних і аж до того, що запропонований процес може бути ефективно використаним на будь-яких металорізальних верстатах без втрати останніми їх основних функцій.

Список літератури

1. Киселев М.Г. Мрочек Ж.А., Дроздов А.В. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: учебное пособие. Москва: НИЦ ИНФРА-М, Нов. знание, 2014. 389 с.
2. Носенко В. А., Даниленко М.В. Физико-химические методы обработки материалов: учебное пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2019. 196 с.
3. Серебrenицкий П. П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование: учебное пособие для вузов по направлению "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств". Изд.2-е, перераб. и доп. Санкт-Петербург: Лань, 2013. 352 с.
4. Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. Состояние и перспективы развития наукоемких технологий машиностроительного производства. *Металлообработка*. 2010. № 2. С. 9–17.
5. Носуленко В.І., Шмельов В.М. Розмірна обробка металів електричною дугою: навчальний посібник. Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. 256 с.
6. Абляз Т.Р., Ханов А.М., Хурматуллин О.Г. Современные подходы к технологии электроэрозионной обработки материалов: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. 120 с.
7. Гришарин А.О., Абляз Т.Р. Анализ актуальных задач использования электроэрозионных технологий для изготовления деталей гидроцилиндров и изделий специального назначения. *Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2016)*: материалы 3-й междунар. науч.-практ. конф., г. Пермь, 3–7 октября 2016 г. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. С. 53–56.
8. Елисеев Ю.С., Савушкин Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / под ред. Б.П. Савушкина. Москва: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2010. 437 с.
9. Гришарин А.О., Абляз Т.Р., Оглеznев Н.Д. Повышение эффективности электроэрозионной обработки деталей гидроцилиндров и изделий специального назначения путем применения электродов-инструментов с повышенными электроэрозионными свойствами. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-elektroerozionnoy-obrabotki-detaley-gidrotsilindrov-i-izdeliy-spetsialnogo-naznacheniya-putem-primeneniya/viewer> (дата звернення: 20.11.2019).
10. Носуленко В. І., Шмельов В.М. Особливості електричної дуги в поперечному потоці рідини. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту*. 2017. Вип 30. С.103-110.

References

1. Kiselev, M.G. Mrochek, Zh.A., & Drozdov, A.V. (2014). *Elektrofizicheskaya i elektrohimicheskaya obrabotka materialov [Electrophysical and electrochemical processing of materials]*. Moscow: NITs INFRA-Moscow: Nov. znanie [in Russian].

2. Nosenko, V.A., & Danilenko, M.V. (2019). *Fiziko-himicheskie metody obrabotki materialov [Physico-chemical methods of processing materials]*. Staryiy Oskol: OOO «Tonkie naukoemkie tehnologii» [in Russian].
3. Serebrenitskiy, P.P. (2013). *Sovremennyye elektroerozionnyie tehnologii i oborudovanie [Modern electroerosion technologies and equipment]*. Sankt-Peterburg: Lan [in Russian].
4. Eliseev, Iu.S. & Saushkin, B.P. (2010). *Sostoianie i perspektivy razvitiia naukoemkikh tekhnologii mashinostroitel'nogo proizvodstva [State and prospects of development of high technologies of machine-building production]*. Metalloobrabotka, 2, 9–17 [in Russian].
5. Nosulenko, V.I. & Shmelev, V.N. (2017). *RozmIrna obrobka metallv elektrichnoyu dugoyu [Dimensional processing of metals by an electric arc]*. Kropyvnytskyi: PP «Eksklyuziv-Sistem» [in Ukrainian].
6. Abliaz, T.R., Khanov, A.M., & Khurmatullin, O.G. (2012). *Sovremennyye podkhody k tekhnologii elektroerozionnoi obrabotki materialov [Modern approaches to technology of electroerosive processing of materials]*. Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta [in Russian].
7. Grisharin, A.O. & Abliaz, T.R. (2016). Analiz aktual'nykh zadach ispol'zovaniia elektroerozionnykh tekhnologii dlia izgotovleniia detalei gidrotsilindrov i izdelii spetsial'nogo naznacheniiia [The analysis of relevant problems of use of electroerosive technologies for production of details of hydraulic cylinders and products of a special purpose]. *Innovatsionnyie tekhnologii v materialovedeni i mashinostroeni (ITMM-2016): materialy 3-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, g. Perm', 3–7 oktiabria 2016 g.* Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2016, pp. 53–56 [in Russian].
8. Eliseev, Iu.S. & Savushkin, B.P. (2010). *Elektroerozionnaia obrabotka izdelii aviatsionnokosmicheskoi tekhniki [Electroerosive processing of products of the aerospace equipment]*. Ed. B.P. Savushkina. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana [in Russian].
9. Grisharin, A.O., Abliaz, T.R. & Ogleznev, N.D. Povy'shenie e'ffektivnosti e'lektroe`roizionnoj obrabotki detalej gidrocilindrov i izdelij speczi`al'nogo naznacheniya putem primeneniya e'lektrodov-instrumentov s povy'shenny`mi e'lektroe`roizionny`mi svojstvami [Increase of efficiency electrical discharge machining of details of hydraulic cylinders and products of special purpose by application of electrodes with the raised electrical discharge machining properties]. *cyberleninka.ru*. Retrieved from: +(accesses 20 November 2019)
10. Nosulenko, V. I., & Shmelov, V.M. (2017). Osoblyvosti elektrychnoi duhy v poperechnomu pototsi ridyny [Features of an electric arc in a cross flow of fluid]. *Zbirnyk naukovykh prats kirovohrad'skoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytsvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyziatsiia – Collected Works of Kirovohrad National Technical University machinery in agricultural production, industry machine building, automation, Vol. 30, 153-156* [in Ukrainian].

Victor Nosulenko, Prof., DSc., **Vitaliy Shmelyov**, Assoc. Prof., **Phd** tech. sci., **Alexander Golovanych**, post-graduate

Centralukrainian National Technical University, Kropivnitsky, Ukraine

Technological Schemes of Shaping In the Conditions of Dimensional Droccessing By an Electric Arc

The increase in the efficiency of social production is associated primarily with the development of mechanical engineering and the widespread introduction of advanced technologies in production. The basis of mechanical engineering is metalworking, which is represented by various traditional methods of metal processing by cutting, machining pressure and casting, as well as electrophysical and electrochemical processing methods. In production, materials that are difficult to process by cutting are increasingly used for the manufacture of heavily loaded and critical parts. Such parts are usually manufactured by electrophysical processing methods. One of the progressive methods of electrophysical processing of metals, which provides wide technological capabilities, is electrical discharge machining, in particular, the method of dimensional processing by an electric arc. The implementation of specific technologies for dimensional processing by an electric arc and the development of appropriate technological schemes for shaping requires individual approaches and the application of the most technological methods. This requires the unification of these techniques and the development of appropriate recommendations.

Based on the analysis and generalizations of theoretical and experimental studies and the practical implementation of the process of dimensional processing by an electric arc, technological methods are described in the form of rules for the implementation of the process.

The results of the practical use of technology, machines and electroerosive heads, implementing the method of dimensional machining by an electric arc, according to the foregoing, confirming the previously mentioned advantages of the method compared to the known, traditional methods of electroerosive, based on the use of non-stationary electric discharges, namely: for a given processing quality 5 to 10 times or more of the method exceeds the productivity of the known methods, decreases by about half specific energy consumption, significantly lower cost of technological current power sources, and also provides ample opportunities for implementing the process due to various technological schemes of forming as by profiled and non-profiled electrodes, starting from traditional ones and to the fact that the proposed process can be effectively used on any metal-cutting machine tools without the last loss of their basic functions.

electric arc, electrospark processing, electroimpulse processing, electrodischarge processing, dimensional electric arc processing

Одержано (Received) 22.11.2019

Прорецензовано (Reviewed) 04.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.94

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).161-172](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).161-172)

Г.М Дресва, викл., О.А. Смірнов, проф., д-р техн. наук, О.М. Дресв, канд. техн. наук, Т.В. Смірнова, канд. техн. наук

*Центральнoукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
e-mail: gannadreeva@gmail.com, dr.SmirnovOA@gmail.com, drey.sanya@gmail.com, sm.tetyana@gmail.com*

Фрактальний аналіз генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова

В даній роботі проведено дослідження фрактальної розмірності часового ряду, який отримано за допомогою генератора самоподібного трафіку на основі ланцюгів Маркова з керованою фрактальною розмірністю. Для цього у роботі були вирішені наступні задачі: на основі числових експериментів визначення фрактальної розмірності генерованих числових послідовностей, показано статистично значимі зміни фрактальних властивостей числової послідовності на різних масштабах; вказано на недостатній розвиток високопродуктивних алгоритмів отримання самоподібних числових послідовностей для імітаційного генерування трафіку в телекомунікаційних системах та мережах; запропоновано напрями подальших досліджень щодо керування явищем мультифрактальності в генераторах, які основані на ланцюгах Маркова. Результатом роботи є обґрунтування підвищення продуктивності імітаційного моделювання руху інформації в телекомунікаційних системах та комп'ютерних мережах за рахунок генератора самоподібного трафіку на ланцюгах Маркова.

моделювання, трафік, самоподібність, мультифрактал, комп'ютерні мережі

А.Н Дресва, препод., А.А.Смирнов, проф., д-р техн. наук, А.Н. Дресв, канд. техн. наук, Т.В. Смирнова, канд. техн. наук

Центральнoукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна

Фрактальный анализ генератора самоподобного трафика на основе цепи Маркова

В данной работе проведено исследование фрактальной размерности временного ряда, полученного с помощью генератора самоподобного трафика на основе цепей Маркова с управляемой фрактальной размерностью. Для этого в работе были решены следующие задачи: на основе численных экспериментов определения фрактальной размерности генерируемых числовых последовательностей, показано статистически значимые изменения фрактальных свойств числовой последовательности на разных масштабах; указано на недостаточное развитие высокопроизводительных алгоритмов получения самоподобных числовых последовательностей для имитационного генерирования трафика в телекоммуникационных системах и сетях; предложены направления дальнейших исследований по управлению явлением мультифрактальности в генераторах, основанные на цепях Маркова. Результатом работы является обоснование повышения производительности имитационного моделирования движения информации в телекоммуникационных системах и компьютерных сетях за счет генератора самоподобного трафика на цепях Маркова.

моделирование, трафик, самоподобие, мультифрактал, компьютерные сети

Постановка проблеми. Сьогодні для математичного опису телекомунікаційних процесів використовують математичні моделі самоподібного часового ряду. На графіках, де зображена завантаженість каналу комп'ютерної мережі самоподібність виражена наявністю викидів, кількість яких перевищує за передбачення класичної статистичної теорії (рис. 1), де на горизонтальній вісі показаний час в умовних одиницях, а по вертикалі завантаженість мережі відносно максимальної пропускну́ї спроможності.

© Г.М Дресва, О.А. Смірнов, О.М. Дресв, Т.В. Смірнова, 2019

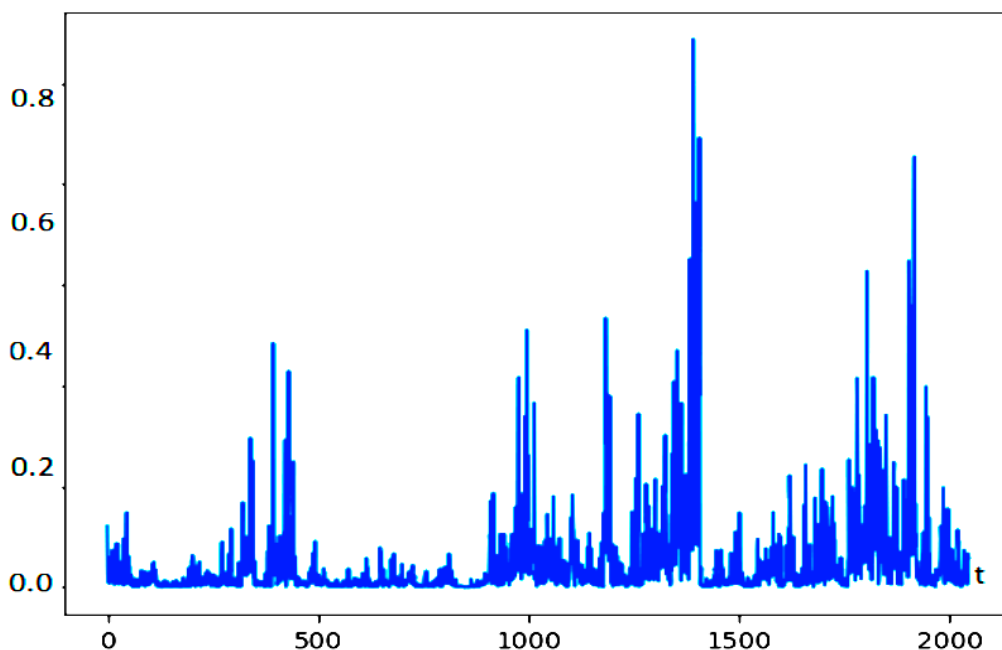


Рисунок 1 – Приклад самоподібного трафіку

Джерело: [3]

В більшості випадків для самоподібного трафіку, передбачення параметрів за якістю обслуговування QoS, аналітичні вирази побудувати не вдається, або такі перетворення можливо побудувати для занадто специфічних ситуацій, тому переважно аналітичні викладки є недоцільними. З цієї причини для визначення основних показників якості обслуговування, таких як джитер, запізнення, середня кількість відмов, та інших, використовують імітаційне моделювання за допомогою генераторів самоподібного трафіку. Це призводить до потреб в простих, з точки зору кількості обчислень, генераторів самоподібного трафіку з керованими фрактальними властивостями, які б давали числові послідовності з властивостями як можна ближчими до властивостей реального трафіку телекомунікаційної мережі, що досліджується.

З огляду актуальності виконання задачі керування фрактальними властивостями генерованого трафіку, робота присвячена визначенню залежності фрактальних властивостей моделі трафіку від використаного масштабування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз досліджень та публікацій виявив наступне. В [1] розглянуто загальні методи фрактального та мультифрактального аналізу часових рядів. Описані методи визначення основних показників числових послідовностей, які використовуються для аналізування трафіку в телекомунікаційних системах та мережах. У [4] також сформульовані базові визначення та поняття теорії фрактального виміру та фрактального аналізу. Важливість мультифрактального аналізу процесів обміну інформацією в комп'ютерних мережах описано в [2], де проведено аналіз Інтернет трафіку, статистика якого збиралася більше чотирнадцяти років. При цьому автори описують наявність розвитку глобальної мережі, при якому спостерігаються зміни в фрактальних показниках на всіх рівнях масштабування. Стаття [2] містить докази існування самоподібності різного характеру на окремих часових масштабах. У [3] основну увагу присвячено використанню навченої нейронної мережі для автоматизації класифікації трафіку за його

фрактальними та мультифрактальними властивостями. Автори успішно використовують результати роботи для детектування DDoS атак. Це доводить відмінність мультифрактальних показників трафіку для даних різного виду. Тезис значного впливу на фрактальність трафіку підтверджено в [5], наведено інформацію про успішне використання фрактального аналізу для ідентифікації потоків трафіку P2P, ігор, передачі інформації у хмарах, сканування портів та дій ботнету. В [6] показано використання мультифрактального моделювання числових послідовностей для відновлення втрачених фрагментів часових рядів. Мультифрактальна інтерполяція дає кращі результати за випадкове заповнення та за класичні методи інтерполяції. Робота [8] також використовує фрактальну інтерполяцію для відновлення трафіку з відомими фрактальними властивостями, на іншому часовому масштабі. Результати дослідження [7] показують, що моделювання складних мереж стає можливим при врахування ієрархічної самоподоби в матриці суміжності. Фактично цей підхід дає можливість вносити класифікацію великих мереж, проводити моделювання. Також теорія застосовна для мереж більш широкого змісту, наприклад, до ієрархічних зв'язків між структурними одиницями різних порядків або масштабування. Наступні роботи [8-23] мають відношення до моделювання процесів обміну інформацією в комп'ютерних мережах з метою відновлення втрачених даних, імітаційне моделювання роботи телекомунікаційної мережі на різних масштабах та типів даних, аналіз трафіку мережі для різних застосунків. Всі ці задачі вимагають наявності імітації джерела мультифрактального трафіку з керованими властивостями. І наявність потоку публікацій з урізноманітненням методів та засобів моделювання мультифрактального трафіку підкреслюють актуальність розвитку засобів як в напрямку підвищення точності відтворення заданих властивостей, так і в напрямку зменшення обчислювальної складності реалізацій генераторів мультифрактального трафіку, що дозволить без використання більш коштовних систем підвищити швидкодію, або складність моделювання процесів в телекомунікаційних мережах.

Постановка завдання. Основною задачею роботи є аналіз властивостей бінарного числового ряду, який отримано за допомогою генератора на основі графової моделі станів та ймовірності переходів між ними. Такий генератор трафіку є представником генераторів з використанням ланцюгів Маркова (рис. 2).

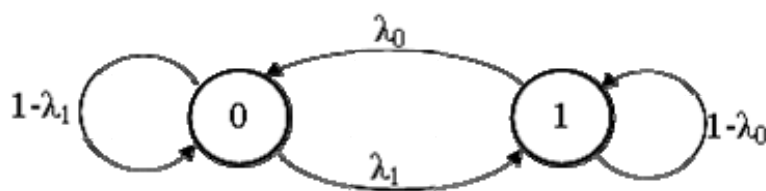


Рисунок 2 – Модель генератора фрактального трафіку

Джерело: розроблено авторами

В моделі використано стани, які відповідають за вихідне генероване значення. Наступне значення отримується за випадковими переходами, де λ_0 та λ_1 відповідають за ймовірності змінити стан на наступний квант часу, а ймовірності $1-\lambda_0$ та $1-\lambda_1$ – зберегти поточний стан. Зазначений генератор не використовує розподіли з важким хвостом та не вимагає складних обчислень, використовуються лише стандартні відпрацьовані генератори псевдовипадкового числа на проміжку $[0;1)$ з рівномірним розподілом. Мала кількість операцій для обчислення є значною перевагою для практичного

застосування в системах імітаційного моделювання формування трафіку в телекомунікаційних мережах і дозволяє заощадити час обчислювання.

Фрактальна розмірність числового ряду може бути виражена різними метриками, що може привести до інших значень фрактальної розмірності. Використання окремої метрики на моделі та реальних даних також дозволяє порівняти їх фрактальні властивості. Тому, для генератора, модель якого показана на рис. 2, побудована окрема метрика числового ряду, для якої вважається ширина покриття одиничною, якщо всі n послідовних не дорівнюють одному значенню, та нульовому, якщо всі n послідовних значень рівні лише 1 або 0. Завдяки цьому легко отримати аналітичну форму розрахунку ймовірності зустріти сегмент нульового розмаху з n елементів, і ця ймовірність дорівнює $\lambda_1(1-\lambda_0)^n + \lambda_0(1-\lambda_1)^n$.

На основі статистичного моделювання роботи зазначеного генератора, отримано математичне сподівання розмаху випадкового блукання з n кроків, що дало можливість аналітично визначити фрактальну розмірність ряду. При цьому фрактальна розмірність залежить від довжини n отриманої числової послідовності за наступним законом (1):

$$d(n, \lambda_0, \lambda_1) = 2 + \frac{\lambda_1(1-\lambda_0)^n \ln(1-\lambda_0) + \lambda_0(1-\lambda_1)^n \ln(1-\lambda_1)}{\lambda_0 + \lambda_1 - \lambda_1(1-\lambda_0)^n - \lambda_0(1-\lambda_1)^n}. \quad (1)$$

Для значення ймовірностей переходу $\lambda_0=\lambda_1=0.5$, що відповідає класичному випадковому процесу, показано графік залежності фрактальної розмірності D від кількості елементів генерованого ряду n отриманого з формули (1), рис. 3:

Наявність в математичних об'єктах на різних рівнях масштабування різних значень фрактальної розмірності має назву мультифрактальність. В [3] показана наявність мультифрактальності в трафіку комп'ютерних мережах.

Для використання методів фрактального аналізу часових рядів на основі розмірності Мінковського або R/S аналізу, потрібно проводити додаткові дослідження.

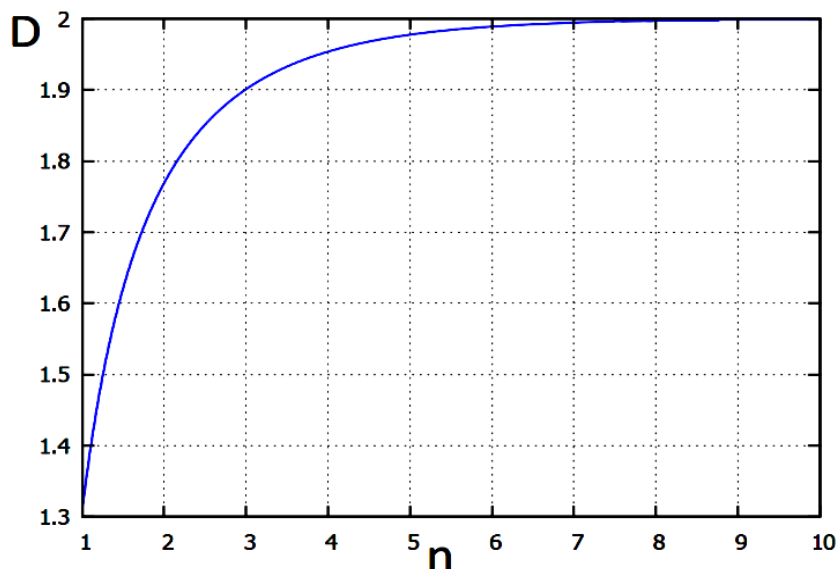


Рисунок 3 – Теоретично визначена фрактальна розмірність $D(n)$ при ймовірності зміни стану $\lambda_0=\lambda_1=0.5$

Джерело: розроблено авторами

Використані методи розрахунку фрактальної розмірності. Для визначення фрактальної розмірності можна скористатися означенням фрактальної розмірності в інтерпретації Мінковського (2), [4]:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(N)}{-\ln(\varepsilon)}, \quad (2)$$

де використано позначення:

ε – розмір, або діаметр підмножини, яким покривають множину, розмірність якої визначається;

N – мінімальна кількість підмножин ε , яку потрібно використати для покриття всієї множини, розмірність якої визначається.

Безпосередньо використати означення (2) до дискретної множини не є можливим з причини того, що існує мінімум ε . Тому потрібно скористатися фіксованими значеннями ε .

Нехай для покриття основної множини використовують покриття розмірами ε та $k\varepsilon$ (k – для дискретної системи ε заданим натуральним числом; ε – невідомий коефіцієнт, який характеризує обрану дискретну систему). Тоді, відповідно обраним підмножинам, кількість таких підмножин для покриття складатиме $N(\varepsilon)$ та $N(k\varepsilon)$. Метод розрахунку метрики $N(k\varepsilon)$ є досить довільним, і обирається згідно величин, які вивчаються в конкретному процесі. З відношення (2), при умові відкидання визначення межі, для дискретної системи, матимемо (3):

$$-D \ln(k) - C = \ln(N(k\varepsilon)), \quad C = D \ln(\varepsilon). \quad (3)$$

Тут $\ln(k)$, $\ln(N(k\varepsilon))$ є величинами, які розраховуються для кількох значень k ; D та C отримуються в результаті лінійної регресії до точок $(\ln(k), \ln(N(k\varepsilon)))$. З причини випадковості числового ряду, $N(k\varepsilon)$ теж є випадковою величиною, з певним математичним сподіванням та дисперсією. Як в наслідок, отримані точки $(\ln(k), \ln(N(k\varepsilon)))$ будуть наближатися до прямої, але не обов'язково належатимуть їй.

З метою зменшення додаткових розрахунків та перетворень, в розглянутому генераторі, було змінено подію генерування “0” на генерування “-1”, в результаті для $\lambda_0 = \lambda_1$ математичне сподівання генерованої послідовності стало складати 0, а стандартне відхилення 1. Наступним кроком, побудовану послідовність $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ замінено на кумулятивний ряд, який відповідає випадковому блуканню $\{b_1, b_2, \dots, b_n \mid b_i = a_1 + a_2 + \dots + a_i\}$. Для такого ряду вводиться розрахунок ширини покриття $N(k\varepsilon)$ сегменту довжиною в k дискретних елементів:

$$N(k\varepsilon) = \sum_{i=0}^{n/k-1} (\max(b_{i \cdot k+1} \dots b_{i \cdot k+1+k}) - \min(b_{i \cdot k+1} \dots b_{i \cdot k+1+k})). \quad (4)$$

Більш зручно в якості n брати степінь двійки, тоді k можна буде теж змінювати вдвічі при побудові опорних точок для лінійної апроксимації. Вказаний процес для $k=8, 16, 32, 64, 128$ дозволив побудувати п'ять точок, для яких лінійна апроксимація визначає показник Херста пробної послідовності в 0.53 як кут нахилу отриманої прямої (рис. 4).

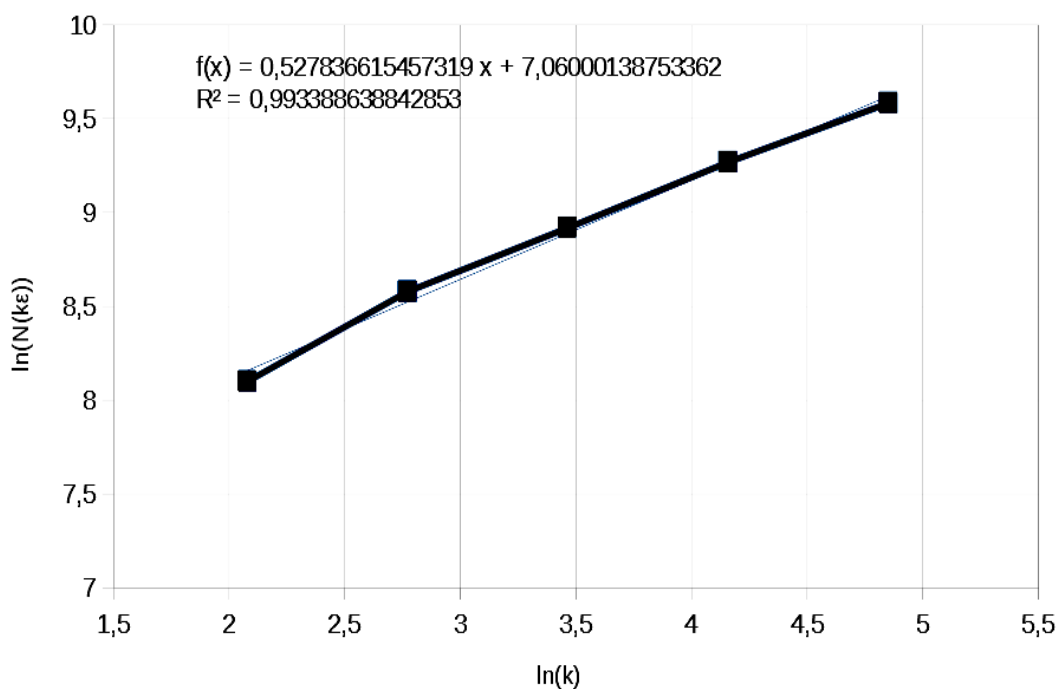


Рисунок 4 – Визначений коефіцієнт Херста $H=0.53$, що відповідає фрактальній розмірності $D=1.47$ при ймовірностях змінити стан $\lambda_0=\lambda_1=0.5$

Джерело: розроблено авторами

Теоретично для випадкової послідовності результат мав складати $H=0.5$, або що те саме $D=1.5$. Це є близьким до отриманих результатів.

Класично ширина покриття $N(k\epsilon)$ для кривих на площині повинна виражатися у кількості квадратів зі стороною $k\epsilon$, що покривають криву випадкового блукання. Але прийнята міра (4) є асимптотично рівною до міри Мінковського, більш того, при однаковому виборі значення k , показник Херста співпадає з отриманим за допомогою R/S аналізу, для якого зв'язок з фрактальною розмірністю вже відомий.

Аналіз впливу обрання масштабу на отриману фрактальну розмірність. З метою експериментального підтвердження залежності фрактальної розмірності числового ряду від обраного масштабу, було використано 11 реалізацій послідовностей в 1024 чисел “-1”, “1”. Для кожної з 11 реалізацій було розраховано показник Херста з п'яти контрольних точок при $k=\{1024, 512, 256, 128, 64\}; \{512, \dots, 32\}; \{256, \dots, 16\}; \{128, \dots, 8\}$. Результати чисельного експерименту показані на таблицях 1, 2, 3.

Одинадцять експериментів, для кожного з режимів генерування, утворюють у відповідному масштабі незалежне вимірювання показника Херста. Це дозволяє використати статистичну обробку результату, для якого знайдено середнє значення показника Херста та стандартне відхилення у середнього значення, яке обернено пропорційне кореню з довжини вибірки. На основі стандартного відхилення розрахований довірний інтервал з надійністю 99%, який забезпечується для відхилення від середнього значення $\pm 3\sigma$. Межі інтервалу надійності в 99% в таблиці показано відповідно в стовпцях -3σ та $+3\sigma$ відповідно.

В результаті з усіх трьох таблиць свідчать про зміну показника Херста зі зміною масштабування, що є підтвердженням припущення, яке було висунуте в попередньому пункті на основі аналітичної формули (1) для спрощеної метрики розрахунку фрактальної розмірності.

Таблиця 1 – Показники Херста при генеруванні послідовності з параметрами $\lambda_0=\lambda_1=0.95$

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Mean	-3 σ	+3 σ
1024..64	0.38	0.23	0.48	0.44	0.34	0.29	0.42	0.46	0.40	0.26	0.40	0.37	0.30	0.45
512..32	0.40	0.33	0.52	0.50	0.34	0.38	0.45	0.44	0.41	0.31	0.48	0.41	0.35	0.48
256..16	0.42	0.35	0.53	0.48	0.38	0.41	0.41	0.45	0.45	0.39	0.47	0.43	0.38	0.48
128..8	0.42	0.35	0.46	0.40	0.40	0.39	0.41	0.42	0.43	0.41	0.43	0.41	0.39	0.44

Джерело: розроблено авторами

З таблиці 1 видно, що при високій ймовірності змінити попередній стан на протилежний, модуляція трафіку відбувається майже постійно, що призводить до значно меншої ймовірності отримання викидів. Це відбивається на показнику Херста, який має значення, для різних масштабів, від 0.37 до 0.41. Побудований сигнал при таких параметрів показано на рис. 5.

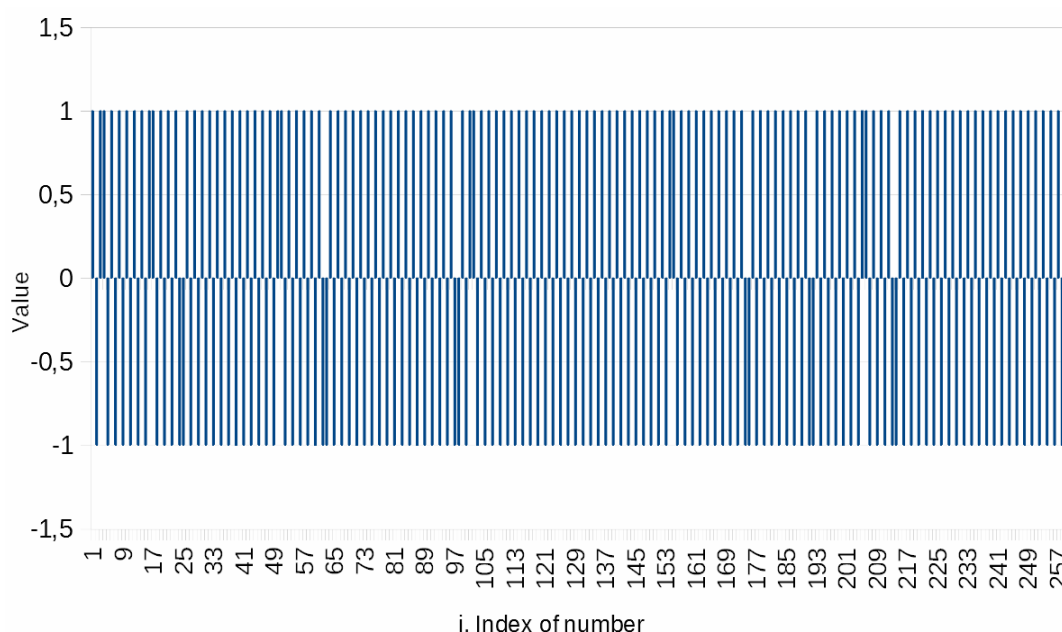


Рисунок 5 – Гістограма сигналу, який отриманий генеруванням з параметрами $\lambda_0=\lambda_1=0.95$

Джерело: розроблено авторами

В результаті випадкового блукання на основі отриманої послідовності, віддалення від початку руху буде відбуватися значно повільніше, бо на кожен крок в сторону буде значно більш висока ймовірність отримання наступного кроку протилежного напрямку.

Наступна таблиця 2 містить результати чисельного експерименту з налаштуванням генератору на рівну ймовірність збереження та зміни поточного стану $\lambda_0=\lambda_1=0.50$. В такому режимі генератор повинен відповідати класичному випадковому процесу з показником Херста $H=0.5$.

Однак, з таблиці 2 видно, що результати визначення показника Херста вже при різниці k в чотири рази, дають оцінки значення показника Херста з надійністю більше 99%, які не перетинаються. Тобто, з надійністю більше 99%, дослідження числового ряду на 1024 відліках дають менші значення показника Херста ніж на 256 відліках. Це свідчить про відмінність фрактальних властивостей числової послідовності на різних масштабах. Відповідно до цього факту, можна обирати довжину черги для системи

обслуговування, для якої показник Херста матиме значення близьке до 0.5, і використовувати для визначення характеристики такої системи обслуговування теорію випадкового потоку Пуассона без врахування самоподібності за допомогою класичної статистики.

Таблиця 2 – Показники Херста при генеруванні послідовності з параметрами $\lambda_0=\lambda_1=0.50$

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Mean	-3 σ	+3 σ
1024..64	0.41	0.46	0.39	0.41	0.50	0.37	0.40	0.54	0.35	0.41	0.42	0.42	0.37	0.47
512..32	0.48	0.48	0.53	0.47	0.54	0.48	0.45	0.60	0.47	0.52	0.46	0.50	0.46	0.54
256..16	0.52	0.55	0.58	0.52	0.52	0.55	0.52	0.56	0.56	0.59	0.55	0.55	0.52	0.57
128..8	0.55	0.59	0.61	0.57	0.57	0.57	0.56	0.59	0.60	0.66	0.59	0.59	0.56	0.61

Джерело: розроблено авторами

Переглянути фрагмент отриманої послідовності з параметрами генерування $\lambda_0=\lambda_1=0.50$ можна на рис. 6.

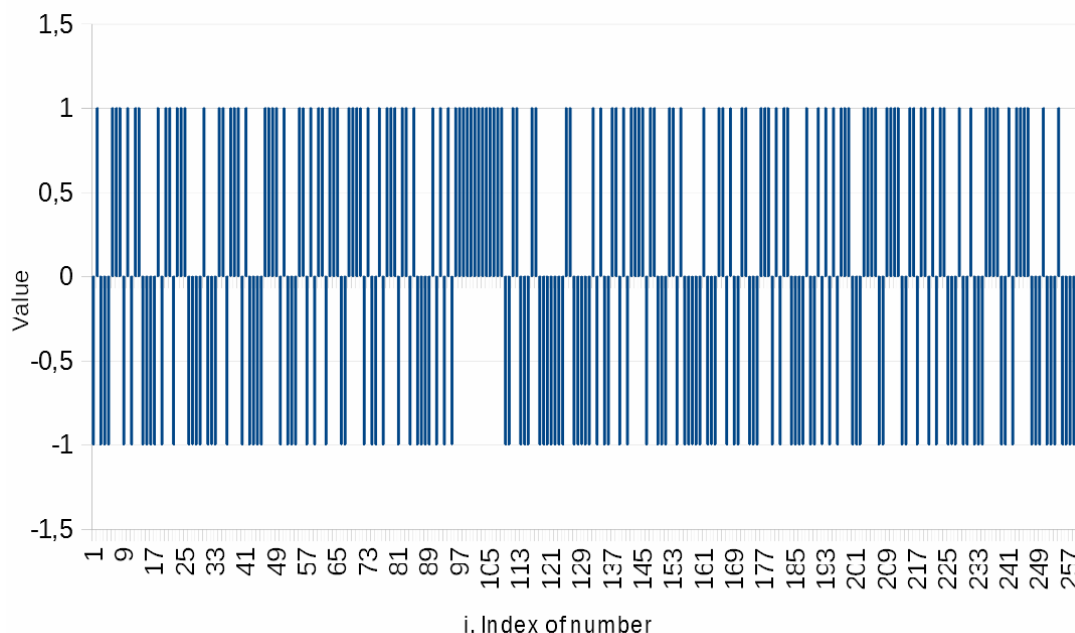


Рисунок 6 – Гістограма сигналу, який отриманий генеруванням з параметрами $\lambda_0=\lambda_1=0.50$

Джерело: розроблено авторами

Останній експеримент, результати якого наведено в таблиці 3, був проведений з параметрами генерування $\lambda_0=\lambda_1=0.05$, тобто ряд з малою ймовірністю змінює напрям руху.

Таблиця 3 – Показники Херста при генеруванні послідовності з параметрами $\lambda_0=\lambda_1=0.05$

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Mean	-3 σ	+3 σ
1024..64	0.48	0.58	0.45	0.54	0.61	0.58	0.51	0.37	0.64	0.39	0.64	0.53	0.44	0.61
512..32	0.52	0.63	0.56	0.60	0.66	0.61	0.58	0.49	0.69	0.45	0.69	0.59	0.52	0.66
256..16	0.66	0.77	0.72	0.77	0.67	0.69	0.62	0.65	0.79	0.58	0.76	0.70	0.64	0.76
128..8	0.78	0.83	0.83	0.84	0.73	0.82	0.73	0.79	0.86	0.73	0.80	0.80	0.75	0.84

Джерело: розроблено авторами

В результаті, числова послідовність персистентна і здатна зберігати деякий час тренд. Але в той самий час, на великих проміжках в 1024 відліків, спостерігається значення показника Херста близьким до $H=0.5$. Це значить, що на великих відстанях, розмах кумулятивного ряду не відрізняється від кумулятивного ряду класичної випадкової послідовності, де різниця між максимальним та мінімальним значенням зростає в середньому пропорційно кореню з кількості зроблених кроків.

На малих відстанях, показник Херста сильно відрізняється, і сягає до $H=0.8$. Відповідно до цього, існує масштаб для якого самоподібний трафік, як і в попередньому випадку, матиме властивості класичного випадкового процесу.

Фрагмент отриманої послідовності можна побачити на рис. 7.

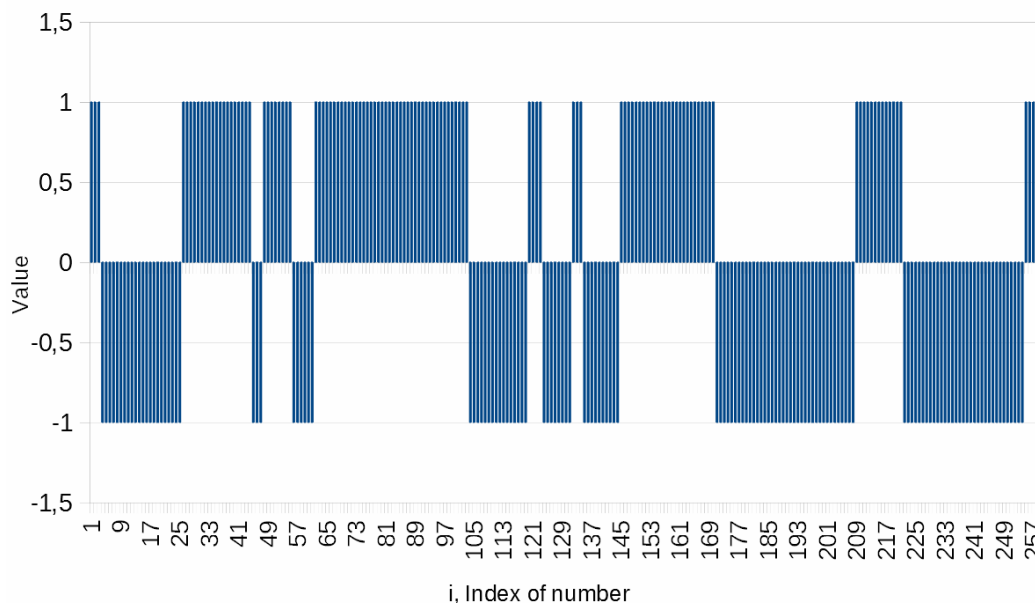


Рисунок 7 – Гістограма сигналу, який отриманий генеруванням з параметрами $\lambda_0=\lambda_1=0.05$
Джерело: розроблено авторами

Висновки. Генератори самоподібного трафіку на ланцюгах Маркова відрізняються від аналогів меншими вимогами до обчислювальної потужності систем моделювання, що дозволяє підвищити продуктивність імітаційного моделювання руху інформації в телекомунікаційних системах та комп'ютерних мережах, тому актуальним є подальший розвиток та вивчення таких систем.

На основі спрощеної метрики $N(k\epsilon)$ побудовано аналітичний вираз розрахування фрактальної розмірності результату генерування бінарного числового ряду на основі ланцюга Маркова. Відмічено залежність фрактальної розмірності від довжини проміжку, на якому проводиться розрахунок фрактальної розмірності, та зроблено припущення про повторення властивості мультифрактальності на класичних метриках, таких як рахування розмірності на основі R/S аналізу або розмірності Мінковського.

З метою перевірки припущення було проведено чисельний експеримент, який з надійністю вищу за 99% підтвердив припущення про мультифрактальність числової послідовності, що отримана генераторами на ланцюгах Маркова.

Робота може бути продовжена з метою розробки методів для керування параметрами мультифрактальності, або можливості усунення мультифрактальності в разі потреби.

Список літератури

1. Jan W. Kantelhardt Fractal and Multifractal Time Series Institute of Physics, Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, 06099 Halle, Germany April 4, 2008 42 p. URL: <https://arxiv.org/pdf/0804.0747>
2. Fontugne, Romain and Abry, Patrice and Fukuda, Akira and Veitch, Darryl and Cho, Kenjiro and Borgnat, Pierre and Wendt, Herwig Scaling in Internet Traffic: a 14 year and 3 day longitudinal study, with multiscale analyses and random projections. (2017) *IEEE/ACM Transactions on Networking journal*, 25 (4). 2152-2165. ISSN 1063-6692. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7878657>
3. Lyudmyla Kirichenko, Tamara Radivilova, Vitalii Bulakh Machine Learning in Classification Time Series with Fractal Properties. December 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/329973801_Machine_Learning_in_Classification_Time_Series_with_Fractal_Properties (Last accessed: 17.11.2019)
4. Александров П.С., Пасынков Б.А. Введение в теорию размерности – М: Наука, 1973. – 576с.
5. Mackenzie Haffey; Martin Arlitt; Carey Williamson, Modeling, Analysis, and Characterization of Periodic Traffic on a Campus Edge Network. 2018 *IEEE 26th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS)*, pp. 170 – 182, 2018.
6. Lai Simin, Wan Li, Zeng Xiangjian. Comparative Analysis of Multi-fractal Data Missing Processing Methods. *Applied and Computational Mathematics*. Vol. 8, No. 2, 2019, pp. 44-49. doi: 10.11648/j.acm.20190802.14.
7. Mahdi Barat Zadeh Joveini, Javad Sadri and Hoda Alavi Khoushhal. Fractal Modeling of Big Data Networks Conference: International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (ICPRAI 2018) At: Center for Pattern Recognition and Machine Intelligence (CENPARMI), Concordia University, Montreal, Canada, pp. 1-4, 2018.
8. D. Jiang, L. Huo and Y. Li. Fine-granularity inference and estimations to network traffic for SDN. *PLoS ONE* 13(5), 2018. Doi.org/10.1371/journal.pone.0194302
9. K. Xie, C. Peng, X. Wang, G. Xie and J. Wen Accurate recovery of internet traffic data under dynamic measurements, in *Proc. of INFOCOM'17*, pp. 1–9, 2017.
10. C. Wang, S. T. Maguluri, and T. Javidi Heavy traffic queue length behavior in switches with reconfiguration delay, in *Proc. of INFOCOM'17*, pp. 1–9, 2017.
11. G. Xie, K. Xie, J. Huang Wang X, Chen Y and Wen J. Fast low-rank matrix approximation with locality sensitive hashing for quick anomaly detection, in *Proc. of INFOCOM'17*, pp. 1–9, 2017.
12. Tatiana Mikhailovna Tatamikova and Oleg Ivanovich Kutuzov, “Evaluation and comparison of classical and fractal queuing systems”, *XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems*, pp.155 - 157, 2016.
13. Michai Czarkowski, Sylwester Kaczmarek and Maciej Wolff, “Influence of Self-Similar Traffic Type on Performance of QoS Routing Algorithms”, *INTL Journal of electronics and telecommunications*, vol. 62, no. 1, pp. 81-87, 2016
14. Lakhmi Priya Das, Sanjay Kumar Patra and Sarojananda Mishra, “Impact of hurst parameter value in self-similarity behaviour of network traffic”, *International Journal of Research in Computer and Communication Technology*, 2016, Vol 5, No 12, pp.631-633.
15. Ушанев К.В. Имитационные модели системы массового обслуживания типа Ра/М/1, Н2/М/1 и исследование на их основе качества обслуживания трафика со сложной структурой. *Системы управления, связи и безопасности*. 2015. №4. С.217-251.
16. Кучук Г. А., О., Можаяев О., Воробйов О. В. Метод прогнозування фрактального трафіка. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2006, №6, С. 181–188,. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2006_6_34.
17. Кучук Г. А., Можаяев О. О., Воробйов О. В. Прогнозирование трафика для управления перегрузками интегрированной телекоммуникационной сети. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2007, № 8. С. 261–271. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2007_8_48.
18. Кучук Г. А., Можаяев О. О., Воробйов О. В. Аналіз та моделі самоподібного трафіка. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2006, № 9. С. 173–180. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2006_9_35.
19. Smirnov A.A., Kuznetsov A.A., Danilenko D.A., Berezovsky A., «The statistical analysis of a network traffic for the intrusion detection and prevention systems», *Telecommunications and Radio Engineering*. – Volume 74, Issue 1. – Begel House Inc. – 2015. – P. 61-78.
20. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Kiian, A., Zamula, A., Rudenko, S., Hryhorenko, V., «Variance Analysis of Networks Traffic for Intrusion Detection in Smart Grids», *2019 IEEE 6th International Conference On Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS)*, Kyiv, Ukraine April 17-19, 2019 P. 353-358.

21. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Kavun, S., Babenko, B., Nakisko, O., Kuznetsova, K., «Malware Correlation Monitoring in Computer Networks of Promising Smart Grids», *2019 IEEE 6th International Conference On Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS)*, Kyiv, Ukraine April 17-19, 2019 P. 347-352
22. Коваленко А. А., Кучук Г. А., Можаяев А. А. Построение экспоненциальных временных шкал при анализе очередей мультисервисных сетей. *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. 2010, № 7. С. 257–262. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2010_7_52.
23. Добровольский Е.В., Нечипорук О.Л. Моделирование сетевого трафика с использованием контекстных методов. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2005, № 1. С.24-32

References

1. Jan W. Kantelhardt Fractal and Multifractal Time Series Institute of Physics, Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, 06099 Halle, Germany April 4, 2008 42 p. Retrieved from <https://arxiv.org/pdf/0804.0747> [in English].
2. Fontugne, Romain and Abry, Patrice and Fukuda, Akira and Veitch, Darryl and Cho, Kenjiro and Borgnat, Pierre and Wendt, Herwig Scaling in Internet Traffic: a 14 year and 3 day longitudinal study, with multiscale analyses and random projections. (2017) *IEEE/ACM Transactions on Networking journal*, 25 (4). 2152-2165. ISSN 1063-6692. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/7878657> [in English].
3. Lyudmyla Kirichenko, Tamara Radivilova, Vitalii Bulakh Machine Learning in Classification Time Series with Fractal Properties. December 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/329973801_Machine_Learning_in_Classification_Time_Series_with_Fractal_Properties [in English].
4. Aleksandrov, P.S. & Pasynkov, B.A. (1973). *Vvedenie v teoriju razmernosti [Introduction to the theory of dimension]*. Moscow: Science [in Russian].
5. Mackenzie Haffey; Martin Arlitt; Carey Williamson, Modeling, Analysis, and Characterization of Periodic Traffic on a Campus Edge Network. *2018 IEEE 26th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS)*, pp. 170 – 182, 2018. [in English].
6. Lai Simin, Wan Li, Zeng Xiangjian. (2019). Comparative Analysis of Multi-fractal Data Missing Processing Methods. *Applied and Computational Mathematics*, Vol. 8, No. 2, 44-49. doi: 10.11648/j.acm.20190802.14 [in English].
7. Mahdi Barat Zadeh Joveini, Javad Sadri and Hoda Alavi Khoushhal. Fractal Modeling of Big Data Networks Conference: International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (ICPRAI 2018) At: Center for Pattern Recognition and Machine Intelligence (CENPARMI), Concordia University, Montreal, Canada, pp. 1-4, 2018. [in English].
8. D. Jiang, L. Huo & Y. Li. (2018). Fine-granularity inference and estimations to network traffic for SDN. *PLoS ONE 13(5)* Doi.org/10.1371/journal.pone.0194302 [in English].
9. K. Xie, C. Peng, X. Wang, G. Xie & J. Wen (2017). Accurate recovery of internet traffic data under dynamic measurements, *in Proc. of INFOCOM'17*, pp. 1–9, 2017. [in English].
10. C. Wang, S. T. Maguluri, and T. Javidi Heavy traffic queue length behavior in switches with reconfiguration delay, *in Proc. of INFOCOM'17*, pp. 1–9, 2017. [in English].
11. G. Xie, K. Xie, J. Huang Wang X, Chen Y and Wen J. Fast low-rank matrix approximation with locality sensitive hashing for quick anomaly detection, *in Proc. of INFOCOM'17*, pp. 1–9, 2017. [in English].
12. Tatiana Mikhailovna Tatamikova and Oleg Ivanovich Kutuzov, “Evaluation and comparison of classical and fractal queuing systems”, *XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems*, pp.155 - 157, 2016. [in English].
13. Michai Czarkowski, Sylwester Kaczmarek and Maciej Wolff, “Influence of Self-Similar Traffic Type on Performance of QoS Routing Algorithms”, *INTL Journal of electronics and telecommunications*, vol. 62, no. 1, pp. 81-87, 2016 [in English].
14. Lakhmi Priya Das, Sanjay Kumar Patra and Sarojananda Mishra, “Impact of hurst parameter value in self-similarity behaviour of network traffic”, *International Journal of Research in Computer and Communication Technology*, Vol 5, No 12, pp.631-633, 2016. [in English].
15. K.V. Ushanev, "Imagination models of the mass service system type Pa / M / 1, H2 / M / 1 and studying on their basis the quality of service of traffic with complex structure", *Control systems, communication and security*. №4, p.217-251, 2015. [in Russian].
16. Kuchuk, G.A., Mozhayev, O.O. & Vorobeyov, O.V. (2006). The method of prediction of fractal traffic. *Radio and Computer Systems*, No. 6, 181–188. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2006_6_34 [in Russian].

17. Kuchuk, G.A., Mozhayev, O.O. & Vorobeyov, O.V. (2007). Traffic prediction for congestion management integrated telecommunications network. *Radio-electronic and computer systems*, № 8, 261–271. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2007_8_48 [in Russian].
18. Kuchuk, G A., Mozhayev, O.O. & Vorobeyov, O.V. (2006). Analiz that model samoponibnogo traffic. *Aerospace and technology*, No. 9, 173–180. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2006_9_35 [in Ukrainian].
19. Smirnov A.A., Kuznetsov A.A., Danilenko D.A.&, Berezovsky A. (2015). «The statistical analysis of a network traffic for the intrusion detection and prevention systems», *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol,74, Issue 1. – Begel House Inc. P. 61-78. [in English].
20. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Kiian, A., Zamula, A., Rudenko, S., Hryhorenko, V., «Variance Analysis of Networks Traffic for Intrusion Detection in Smart Grids», *2019 IEEE 6th International Conference On Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS)*, Kyiv, Ukraine April 17-19, 2019 P. 353-358. [in English].
21. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Kavun, S., Babenko, B., Nakisko, O., Kuznetsova, K. (2019). «Malware Correlation Monitoring in Computer Networks of Promising Smart Grids», *2019 IEEE 6th International Conference On Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS)*, Kyiv, Ukraine April 17-19, 2019 P. 347-352 [in English].
22. Kovalenko, A.A., Kuchuk, G. A. & Mozhaev, A. A. (2010). Construction of exponential time scales in the analysis of multiservice network queues. *Radio and Computer Systems*. No. 7, 257–262. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2010_7_52 [in Russian].
23. Dobrovolsky, E.V. & Nechyporuk. O.L. (2005). Modeling of Network Traffic Using Context Methods *Scientific Papers ONAS them. O.S. Popova*, No. 1, 24-32 [in Russian].

Hanna Drieieva, teacher, **Oleksii Smirnov**, Prof., DSc., **Oleksandr Drieiev**, PhD tech. sci., **Tetiana Smirnova**, PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Ukraine, Kropyvnytskyi

A Fractal Analysis of a Self-similar Traffic Generator Based on a Markov Chain

In this work, we investigate the fractal dimension of the time series, which was obtained using a self-similar traffic generator based on Markov chains with controlled fractal dimension. The subject of the article is a fractal analysis of a self-similar traffic generator based on a Markov chain.

The purpose of the study is to investigate the fractal dimension of the time series, which is obtained using a self-similar traffic generator based on Markov chains with controlled fractal dimension. For this purpose the following problems were solved in the work: on the basis of numerical experiments of determination of fractal dimension of generated numerical sequences, statistically significant changes of fractal properties of numerical sequence on different scales were shown; points out the insufficient development of high-performance algorithms for obtaining self-similar numerical sequences for simulating traffic generation in telecommunication systems and networks; Directions for further studies on the management of the multifractal phenomenon in Markov-based generators are proposed.

Generators of self-similar traffic on Markov circuits differ from their counterparts with lower requirements for the computational power of simulation systems, which improves the performance of imitation modeling of information traffic in telecommunication systems and computer networks, so further development and study of such systems is relevant. On the basis of the simplified metric $N(k\epsilon)$, an analytical expression for calculating the fractal dimension of the result of generating a binary number series based on a Markov chain is constructed. The dependence of the fractal dimension on the length of the interval at which the fractal dimension is calculated is made, and the assumption is made of the repetition of the multifractal property on classical metrics, such as dimension calculation based on R/S analysis or Minkowski dimension. In order to verify the assumptions, a numerical experiment was conducted which, with a reliability higher than 99%, confirmed the assumption of multifractal numerical sequence obtained by generators on Markov chains. Work can be continued to develop methods for managing multifractality parameters, or to eliminate multifractality when needed.

modeling, traffic, self-similarity, multifractal, computer networks

Одержано (Received) 28.11.2019

Прорецензовано (Reviewed) 12.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

О.В. Коваленко, доц., канд. техн. наук

Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: clashav@gmail.com

Математична модель технології тестування комплексу DOM XSS вразливостей для аналітичної оцінки часових витрат

В роботі представлені результати дослідження та алгоритми тестування на вразливість до одних з найбільш поширених видів атак на Web-застосунки – DOM XSS для аналітичної оцінки тимчасових витрат. В цілому, проведені дослідження показали, що GERT-моделювання є ефективним способом визначення заздалегідь невідомих законів і функцій розподілу випадкових величин при відомому алгоритмі функціонування (процесу). Головною метою GERT є оцінка логіки мережі і тривалість активності і отримання висновку про необхідність виконання деяких активностей. В результаті розроблено математичну модель технології тестування комплексу DOM XSS вразливостей яка відрізняється від відомих, урахуванням специфіки комплексного аналізу різних типів XSS вразливості («stored XSS», «reflected XSS» і DOM Based XSS), а також включенням в алгоритм процедур автоматичного аудиту DOM Based XSS окремо. Це дає можливість провести аналітичну оцінку тимчасових витрат тестування зазначених вразливостей в умовах реалізації стратегії розробки безпечного програмного забезпечення.

технології тестування, DOM XSS вразливості, GERT-моделювання, вразливості безпеки

А. В. Коваленко, доц., канд. техн. наук

Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Математическая модель технологии тестирования комплекса DOM XSS уязвимостей для аналитической оценки временных затрат

В работе представлены результаты исследования и алгоритмы тестирования на уязвимость к одним из наиболее распространенных видов атак на Web-приложения – DOM XSS для аналитической оценки временных затрат. В целом, проведенные исследования показали, что GERT-моделирование является эффективным способом определения заранее неизвестных законов и функций распределения случайных величин при известном алгоритме функционирования (процесса). Главной целью GERT является оценка логики сети и продолжительность активности и получения заключения о необходимости выполнения некоторых активностей. В итоге разработана математическая модель технологии тестирования комплекса DOM XSS уязвимостей которая отличается от известных, учетом специфики комплексного анализа различных типов XSS уязвимости («stored XSS», «reflected XSS» и DOM Based XSS), а также включением в алгоритм процедур автоматического аудита DOM Based XSS отдельно. Это дает возможность провести аналитическую оценку временных затрат тестирования указанных уязвимостей в условиях реализации стратегии разработки безопасного программного обеспечения.

технологии тестирования, DOM XSS уязвимости, GERT-моделирование, уязвимости безопасности

Постановка проблеми. Збільшення числа користувачів всесвітньої мережі Інтернет, постійне зростання інформаційного, фінансового і ділового контенту в кіберпросторі обумовлює підвищення попиту на Web-застосунки. У той же час цей процес викликає зворотню негативну реакцію з боку злоумисників, що мають постійну можливість аналізу об'єктивно існуючих вразливостей інтернет-застосунків.

Аналіз різного роду статистичних матеріалів відомих організацій (наприклад, Open Web Application Security Project) [1] показав, що одним з найбільш небезпечних видів атак (вразливостей) є міжсайтовий скриптинг – XSS (Cross Site Scripting).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З робіт [2, 3, 4, 5] відомо, що під XSS зазвичай мається на увазі моментальний і відкладений міжсайтовий скриптинг. При моментальному XSS зі шкідливим кодом (Javascript) повертається атакуються сервером негайно як відповідь на HTTP запит. Відкладений XSS означає, що це шкідлива програма зберігається на системі, що атакуються і пізніше може бути впроваджений в HTML сторінку вразливої системи. Така класифікація передбачає, що фундаментальна властивість XSS полягає в тому, що це шкідлива програма відправляється з браузера на сервер і повертається в цей же браузер (моментальний XSS) або будь-який інший браузер (відкладений XSS).

У ряді інтернет-статей [6, 7] детально описані основні механізми виникнення подібного роду погроз, а також шляхи можливого блокування. Однак, щоб ідентифікувати ці загрози і можливі наслідки їх поширення в процесі безпечного управління IT-проектами, а також запропонувати оптимальні шляхи вирішення цієї проблеми, існує необхідність математичної формалізації процесу їх ініціалізації і поширення.

У ряді робіт реалізовані спроби математичної формалізації процесу пошуку і усунення вразливостей подібного роду. Так в роботах [7] представлені узагальнені матеріали механізмів і процедур безпечного програмування, які переслідують цілі зниження ризиків вразливості. У роботах [8] представлені математичні моделі, які описують алгоритми аналізу Web-застосунків (в тому числі і алгоритм однією з найбільш поширених вразливостей – DOM (Document Object Model) XSS вразливості). Однак представлені моделі не враховують останні тенденції XSS вразливості, а саме відмінність їх типів («stored XSS», «reflected XSS» і DOM Based XSS) і необхідність їх виявлення.

Постановка завдання. Саме тому особливо актуальним завданням в цьому напрямку є моделювання алгоритму виявлення DOM (Document Object Model) XSS вразливості з урахуванням комплексу трьох їх можливих типів.

Проведені дослідження показали, що уразливість DOM XSS є підвид XSS, в разі якої результат атаки знаходиться не у відповіді сервера і, відповідно, не в HTML коді, а в DOM структурі HTML сторінки. При цьому в режимі «stored XSS» здійснюється передача і зберігання XSS на сервері. Надалі ми на цю сторінку перенаправляються користувачі. У режимі «reflected» XSS повертається в тілі відповіді від сервера на конкретний запит з самої XSS. Результати атак за допомогою таких вразливостей можна виявити тільки в процесі виконання або аналізі DOM структури. Сам механізм атаки, а саме ін'єкція Javascript коду в вразливий сегмент, залишається незмінним.

Одним з найменш математично формалізованих і досліджуваних типів XSS є DOM Based XSS. Можливо, це пов'язано з тим, що навіть сучасними сканерами їх не часто можна виявити і відповідно представити чіткий алгоритм виконання операцій аналізу вразливості. Мета роботи: розробити математичну модель технології тестування DOM XSS вразливостей для аналітичної оцінки часових витрат.

Виклад основного матеріалу.

Алгоритм виявлення комплексу DOM XSS вразливостей. Для математичної формалізації алгоритму виявлення комплексу DOM XSS вразливостей різних типів скористаємося основними положеннями мережевого GERT-моделювання, докладно описаними в роботах [7, 8].

Відповідно до алгоритму аналізу DOM XSS вразливості основні етапи можна описати таким чином:

1) З коду аналізованої сторінки витягуються всі теги `<script>` і формується список тегів для аналізу.

2) Виконується аналіз вмісту тега. При цьому, якщо теги не містять код, а посилаються на віддалений файл, виконується звернення до файлу та отримання коду з нього. У вмісті файлу знаходяться потенційні небезпечні ділянки коду (sink), які використовують вхідні дані клієнта (source).

3) Якщо в коді тега використовується source, виконується атака з певним маркером, який можна відстежити в DOM структурі сторінки після виконання коду (наприклад, ін'єкція певного текстового вмісту в DOM).

4) Виконується перевірка вмісту DOM. Якщо в результаті атаки маркер знаходиться в DOM, можна зробити висновок про наявність DOM вразливості.

5) Після впровадження даних вручну і аналізу результатів, виконуваності на перших 4 етапах виконується аудит коду (може бути здійснений дистанційно).

6) Кроки 2 – 5 виконуються для кожного тега script на сторінці.

Для побудови формальної моделі алгоритму виявлення комплексу DOM XSS вразливостей обрана стохастична GERT- мережу.

Проведені дослідження показали, що GERT (Graphical Evaluation and Review Technique) – є методом вивчення та аналізу стохастичних мереж, які використовуються для опису логічного взаємозв'язку між частинами проекту або етапами процесу [7]. Головною метою GERT є оцінка логіки мережі і тривалість активності і отримання висновку про необхідність виконання деяких активностей.

Мережі GERT складаються з вузлів типу AND, INCLUSIVE-OR і EXCLUSIVE-OR, і гілок з двома і більше параметрами. Гілка, має напрямок, має вузол початку і вузол кінця. Параметри гілки містять:

1) ймовірність проходження гілки (P_a) за умови, що вузол, який є джерелом гілки, був реалізований;

2) час (t_a) проходження гілки, якщо вона буде реалізована.

Час t_a може бути випадковою величиною. Якщо гілка не є частиною реалізації мережі, тобто під час виконання процесу активність, пов'язана з гілкою, не відбувається, то $t_a = 0$.

Вузол в стохастичній мережі GERT складається з функції входу (контрибутивної функції) і функції виходу (дистрибутивної функції). Кожна з функцій описується певним логічним відношенням щодо пов'язаних гілок.

В цілому, проведені дослідження показали, що GERT-моделювання є ефективним способом визначення заздалегідь невідомих законів і функцій розподілу випадкових величин при відомому алгоритмі функціонування (процесу). Саме тому, як інструмент математичного моделювання, нами було вибрано GERT-моделювання.

GERT-модель технології тестування комплексу DOM XSS вразливостей. Побудуємо, відповідно до представленого описом мережеву GERT-модель технології тестування комплексу DOM XSS вразливостей. Графічне зображення GERT-моделі представлено на рис. 1

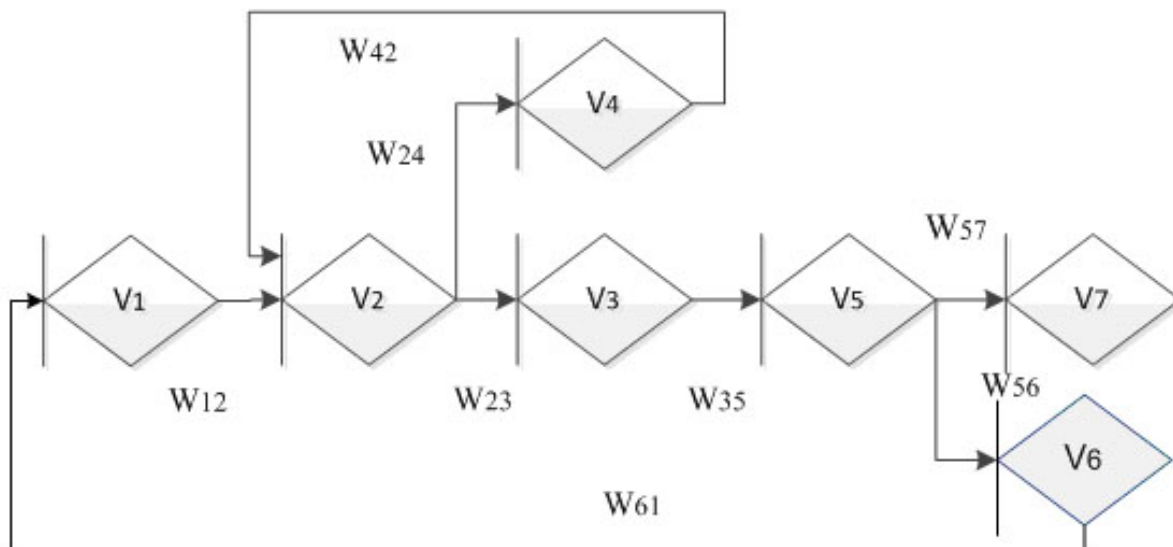


Рисунок 1 – GERT-модель технології тестування комплексу DOM XSS вразливостей
 Джерело: розроблено автором

У представленій мережі вузли графа інтерпретуються станами комп'ютерної системи в процесі функціонування DOM структури, а гілки графа – ймовірностимчасовими характеристиками переходів між станами. Зокрема гілка (1,2) описує процес отримання та аналізу вмісту тега. Гілка (2,3) відображає процес виконання атаки в разі наявності «Source» структури. Гілка (2,4) визначається процедурами звернення до вмісту віддаленого файлу (пошук «sink»). Гілка (4,2) характеризує повернення на виконання атаки. Гілка (3,5) описує продовження атаки, зокрема перевірку вмісту DOM. Гілка (5,6) характеризує одну з основних особливостей аналізу алгоритму XSS вразливостей різних типів – автоматичний аудит коду (при необхідності віддалений). Гілка (5,1) відображає процес переходу до нового тегу. Далі гілка (5,7) характеризує заключну стадію прийняття рішення про уразливість. Характеристики гілок моделі представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики гілок моделі

№ п/п	Гілка	W-функція	Ймовірність	Функція, що походить від моментів
1	(1,2)	W ₁₂	p1	$\lambda_1 / (\lambda_1 - s)$
2	(2,3)	W ₂₃	p2	$\lambda_2 / (\lambda_2 - s)$
3	(2,4)	W ₂₄	p3	$\lambda_3 / (\lambda_3 - s)$
4	(3,5)	W ₃₅	p2	$\lambda_2 / (\lambda_2 - s)$
5	(5,6)	W ₅₆	p4	$\lambda_4 / (\lambda_4 - s)$
6	(6,1)	W ₅₁	1 – p4	$\lambda_5 / (\lambda_5 - s)$
7	(4,2)	W ₄₂	p3	$\lambda_3 / (\lambda_3 - s)$
8	(5,7)	W ₄₂	p4	$\lambda_4 / (\lambda_4 - s)$

Джерело: розроблено автором

Особливїсть даного процесу полягає в рїзнорїдностї аналізованих і оброблюваних даних. При цьому можливі рїзні випадки організації зворотного зв'язку. На рис. 1 ці цикли зафіксовані у вигляді переходів $W_{12} \rightarrow W_{24} \rightarrow W_{42}$, $W_{12} \rightarrow W_{23} \rightarrow W_{35} \rightarrow W_{56} \rightarrow W_{61}$.

Еквівалентна W-функція часу виконання алгоритму тестування комплексу DOM XSS рїзних типів (в тому числі DOM Based XSS) вразливостей дорівнює:

$$W_E(s) = \frac{W_{12}W_{23}W_{35}W_{56} + W_{12}W_{24}W_{42}W_{23}W_{35}W_{57}}{1 - W_{12}W_{23}W_{35}W_{51} - W_{12}W_{24}W_{42}W_{23}W_{35}W_{56}W_{61}} =$$

$$= \frac{p_1 p_2^2 \lambda_1 \lambda_2^2 (p_4 \lambda_4 (\lambda_3 - s)^2 (\lambda_5 - s) + p_3^2 q_1 \lambda_3^2 \lambda_5 (\lambda_4 - s))}{(\lambda_4 - s) \left((\lambda_1 - s)(\lambda_2 - s)^2 (\lambda_3 - s)^2 (\lambda_5 - s) - \right.}$$

$$\left. - p_1 \lambda_1 p_2^2 \lambda_2^2 q_1 \lambda_5 (\lambda_3 - s)^2 - p_1 p_2^2 p_3^2 p_4 \lambda_1 \lambda_2^2 q_1 \lambda_3^2 \lambda_4 \lambda_5 \right)}, \quad (1)$$

де $1 - p_4 = q_1$.

Для GERT-мереж з циклами не існує простих методів знаходження особливих точок функції $\Phi_E(z)$ заміни дійсних змінних ($z = -i\zeta$), де ζ - дійсна змінна. Це пояснюється тим, що для знаходження особливих точок необхідно вирішувати нелїнійні рївняння, і чим складнїше структура GERT-мережі, тим складнїше і вихідне рївняння. Тому в ходї моделювання пропонується вдатися до подїбної заміни.

Виконуючи комплексне перетворення $z = -s$, отримаємо:

$$\Phi(z) = \frac{uz^3 + vz^2 + bz + k}{(\lambda_4 + z)(z^6 + cz^5 + dz^4 + gz^3 + hz^2 + wz + m)}, \quad (2)$$

де

$$u = -p_1 p_2^2 p_4 \lambda_1 \lambda_2^2 \lambda_4,$$

$$v = p_1 p_2^2 p_4 \lambda_1 \lambda_2^2 \lambda_4 (\lambda_5 + 2\lambda_3),$$

$$b = -p_1 p_2^2 p_4 \lambda_1 \lambda_2^2 \lambda_4 \lambda_3 (2\lambda_5 - \lambda_3),$$

$$k = -p_1 p_2^2 \lambda_1 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \lambda_4 \lambda_5 (p_4 + p_3^2 q_1),$$

$$c = \lambda_1 + 2\lambda_2 + 2\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5,$$

$$d = -(2\lambda_3 \lambda_5 \lambda_4 + \lambda_1 \lambda_5 \lambda_4 + 2\lambda_2 \lambda_5 \lambda_4 + \lambda_3^2 + 2\lambda_1 \lambda_3 + 4\lambda_2 \lambda_3 + 2\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2),$$

$$g = \left(\lambda_3^2 \lambda_4 \lambda_5 + 4\lambda_1 \lambda_2 \lambda_4 \lambda_5 + 4\lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \lambda_1 + 2\lambda_3^2 \lambda_2 + 4\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 + \right.$$

$$\left. + 2\lambda_2^2 \lambda_3 + \lambda_2^2 \lambda_1 + \lambda_3^2 \lambda_4 + \lambda_2^2 \lambda_4 \right),$$

$$h = - \left(\lambda_1 \lambda_3^2 \lambda_4 \lambda_5 + 2\lambda_2 \lambda_3^2 \lambda_4 \lambda_5 + 4\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 + 2\lambda_2^2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 \lambda_4 + \right.$$

$$\left. + 2\lambda_1 \lambda_2^2 \lambda_3 \lambda_4 - p_1 p_2^2 p_3 p_4 q_1 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_4 \lambda_5 \right),$$

$$w = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3^2 \lambda_4 \lambda_5 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 \lambda_4 \lambda_5 + 2\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 + \lambda_1 \lambda_2^2 \lambda_4 \lambda_3 - 2p_1 p_2^2 p_4 q_1 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5,$$

$$m = p_1 p_2^2 p_4 q_1 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3^2 \lambda_4 \lambda_5 + p_1 p_2^2 p_3 p_4 q_1 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3^2 \lambda_4 \lambda_5 - \lambda_1 \lambda_2^2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5.$$

Щільність розподїлу ймовїрностей часу виконання алгоритму аналізу DOM XSS вразливостї:

$$\varphi(x) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} e^{zx} \frac{uz^3 + vz^2 + bz + k}{(z^6 + cz^5 + dz^4 + gz^3 + hz^2 + wz + m)} dz, \quad (3)$$

де операція інтегрування виконується за допомогою інтеграла Бромвіча-Вагнера [8].

Спосіб інтегрування залежить від того, чи має функція $\Phi(z)$ тільки прості полюси, або полюси деякого порядку. У тому випадку, коли функція $\Phi(z)$ має тільки прості полюси, вираз $e^{zx}\Phi(z)$ можна представити у вигляді:

$$e^{zx}\Phi(z) = \frac{e^{zx}(uz^3 + vz^2 + bz + k)}{z^7 + \gamma_6 z^6 + \gamma_5 z^5 + \gamma_4 z^4 + \gamma_3 z^3 + \gamma_2 z^2 + \gamma_1 z + \gamma_0} = \frac{\mu(z)}{\psi(z)}, \quad (4)$$

де $\gamma_6 = c$, $\gamma_5 = c + d$, $\gamma_4 = d + g$, $\gamma_3 = g + h$, $\gamma_2 = h + w$, $\gamma_1 = w + m$, $\gamma_0 = m$.

Тоді щільність розподілу часу виконання алгоритму аналізу DOM XSS вразливості всіх типів дорівнює:

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \sum_{k=1}^7 \operatorname{Res} [e^{zx}\Phi(z)] = \sum_{k=1}^7 \frac{\mu(z_k)}{\psi'(z_k)} = \\ &= \sum_{k=1}^7 \frac{e^{zx}(uz^3 + vz^2 + bz + k)}{7z_k^6 + 6\gamma_6 z_k^5 + 5\gamma_5 z_k^4 + 4\gamma_4 z_k^3 + 3\gamma_3 z_k^2 + 2\gamma_2 z_k + \gamma_1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Функція $\Phi(z)$ крім рішень, які визначаються коренями рівняння $z^6 + cz^5 + dz^4 + gz^3 + hz^2 + wz + m = 0$, може мати і полюс другого або третього порядку. Тоді щільність розподілу часу передачі повідомлення $\varphi(x)$ знаходиться за формулою знаходження відрахувань r_{-1} від полюсів z_k порядку n :

$$r_{-1} = \frac{1}{(n-1)!} \lim_{z \rightarrow z_k} \frac{d^{n-1} \left((z - z_k)^n e^{zx} \Phi(z) \right)}{dz^{n-1}}. \quad (6)$$

Вираз (6) являє собою дрібно-раціональну функцію щодо z зі ступенем знаменника більшою, ніж ступінь чисельника. Тому для нього виконується умови леми Жордана [9].

Багаточлен $z^6 + cz^5 + dz^4 + gz^3 + hz^2 + wz + m$ породжує сім полюсів. Вирішення рівняння:

$$z^6 + cz^5 + dz^4 + gz^3 + hz^2 + wz + m = 0 \quad (7)$$

може бути знайдено будь-яким методом, наприклад, за формулами Вієта [10]. В результаті обчислюються особливі точки $z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6$.

Таким чином, на основі експоненційної GERT-мережі розроблено математичну модель технології тестування комплексу DOM XSS вразливостей всіх типів («stored XSS», «reflected XSS» і DOM Based XSS), яка відрізняється від відомих, урахуванням їх специфіки та необхідності автоматичного аудиту DOM Based XSS окремо.

Розроблена модель може бути використана для дослідження інтернет Web-застосунків в мережевих структурах, а також при розробці нових засобів і протоколів захисту даних в комп'ютерних системах і мережах.

Застосування експоненційних стохастичних моделей GERT дасть можливість використання результатів, отриманих в аналітичному вигляді (функції, щільності

розподілу) для проведення порівняльного аналізу і досліджень, більш складних комп'ютерних систем математичними методами.

Висновки. У роботі розроблена математична модель процесу тестування Web-застосунків. В основу математичного моделювання покладено підхід GERT-мережевого синтезу. В результаті розроблено математичні моделі технології тестування DOM XSS вразливості.

Математична модель технології тестування комплексу DOM XSS вразливостей відрізняється від відомих, урахуванням специфіки комплексного аналізу різних типів XSS вразливості («stored XSS», «reflected XSS» і DOM Based XSS), а також включенням в алгоритм процедур автоматичного аудиту DOM Based XSS окремо. Це дає можливість провести аналітичну оцінку тимчасових витрат тестування зазначених вразливостей в умовах реалізації стратегії розробки безпечного програмного забезпечення.

Список літератури

1. About The Open Web Application Security Project – OWASP. URL: https://www.owasp.org/index.php/About_The_Open_Web_Application_Security_Project (Last accessed: 08.12.2019)
2. Смирнов А.А., Коваленко А.В., Якименко Н.Н., Доренский А.П. Проблемы анализа и оценки рисков информационной деятельности. *Системы обработки информации. збірник наукових праць.* 2016. Вип. 3(140). С. 40-42.
3. Смирнов А.А., Коваленко А.В. Методы качественного анализа и количественной оценки рисков разработки программного обеспечения. *Системы обработки информации. збірник наукових праць.* 2016. Вип. 5(142). С. 153-157.
4. Коваленко А.В. Метод управления рисками разработки программного обеспечения. *Системы управления, навигации та зв'язку.* 2016. Вип. 2 (38). С. 93-100.
5. OSSTMM 3 – The Open Source Security Testing Methodology Manual. Contemporary Security Testing And Analysis. URL: <http://www.isecom.org/mirror/OSSTMM.3.pdf> (Last accessed: 10.12.2019)
6. Positive Research 2016. URL: <https://www.ptsecurity.com/upload/ptru/analytics/Positive-Research-2016-rus.pdf> (Last accessed: 08.12.2019)
7. Semenov S.G., Zmiyevskaya V N., Kassem Khalife Development of Gert model of management system by using test cases. *Journal of Qafqaz university-mathematics and computer science.* 2016. Vol.(4), № 1. С. 52-59.
8. Testing for DOM-based Cross-site scripting (OTG-CLIENT-001) – OWASP. URL: [https://www.owasp.org/index.php/Testing_for_DOM-based_Cross_site_scripting_\(OTG-CLIENT-001\)](https://www.owasp.org/index.php/Testing_for_DOM-based_Cross_site_scripting_(OTG-CLIENT-001)) (Last accessed: 08.12.2019)
9. Cohen W., Ravikumar P., Fienberg S. A Comparison of String Metrics for Matching Names and Records. URL: <https://www.cs.cmu.edu/afs/cs/Web/People/wcohen/postscript/kdd-2003-match-ws.pdf> (Last accessed: 11.12.2019)
10. Kevin Dressler, Axel-Cyrille Ngonga Ngomo. On the Efficient Execution of Bounded Jaro-Winkler Distances. *Semantic Web – Interoperability, Usability, Applicability an IOS Press Journal.* URL: <http://www.semantic-web-journal.net/system/files/swj944.pdf> (Last accessed: 6.12.2019)

References

1. About The Open Web Application Security Project – OWASP. *www.owasp.org.* Retrieved from: https://www.owasp.org/index.php/About_The_Open_Web_Application_Security_Project.
2. Smirnov, A.A., Kovalenko, A.V., Jakimenko, N.N. & Dorenskiy, A.P. (2016). Problemy analiza i ocenki riskov informacionnoj dejatel'nosti [Problems analysis and risk assessment information activities]. *Sistemi obrobki informacii – Information Processing Systems, Vol. 3(140), 40-42* [in Russian].
3. Smirnov, A.A. & Kovalenko, A.V. (2016). Metody kachestvennogo analiza i kolichestvennoj ocenki riskov razrabotki programmnogo obespechenija [Methods of qualitative analysis and quantitative risk assessment software development]. *Sistemi obrobki informacii – Information Processing Systems, Vol. 5(142), 153-157* [in Russian].

4. Kovalenko, A.V. (2106). Metod upravlennja riskami razrobotki programnogo obespechenija [Software Development Risk Management Method]. *Sistemi upravlinnja, navigacii ta zv'jazku – Control, Navigation and Communication Systems*. Vol. 2 (38). S. 93-100 [in Russian].
5. OSSTMM 3 – The Open Source Security Testing Methodology Manual. Contemporary Security Testing And Analysis. www.isecom.org. Retrieved from: <http://www.isecom.org/mirror/OSSTMM.3.pdf>.
6. Positive Research 2016: Retrieved from: <https://www.ptsecurity.com/upload/ptru/analytics/Positive-Research-2016-rus.pdf>.
7. Semenov, S.G., Zmiyevskaya, V N. & Kassem, Khalife (2016). Development of Gert model of management system by using test cases. *Journal of Qafqaz university-mathematics and computer science*, Vol.(4), 1, 52-59
8. Testing for DOM-based Cross-site scripting (OTG-CLIENT-001) – OWASP: Retrieved from: [https://www.owasp.org/index.php/Testing_for_DOM-based_Cross_site_scripting_\(OTG-CLIENT-001\)](https://www.owasp.org/index.php/Testing_for_DOM-based_Cross_site_scripting_(OTG-CLIENT-001)).
9. Cohen W., Ravikumar P., Fienberg S. A Comparison of String Metrics for Matching Names and Records William W. Cohen, Pradeep Ravikumar, Stephen E. Fienberg. Retrieved from: <https://www.cs.cmu.edu/afs/cs/Web/People/wcohen/postscript/kdd-2003-match-ws.pdf>.
10. Kevin Dressler & Axel-Cyrille Ngonga Ngomo. (2015). On the Efficient Execution of Bounded Jaro-Winkler Distances / Semantic Web – Interoperability, Usability, Applicability an IOS Press Journal. Retrieved from: <http://www.semantic-web-journal.net/system/files/swj944.pdf>

Oleksandr Kovalenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Mathematical Model of DOM XSS Vulnerability Testing Technology for Analytical Assessment of Time Costs

The paper presents the results of the study and testing algorithms for vulnerability to one of the most common types of attacks on Web applications, DOM XSS, for analytic assessment of time costs. Analysis of various kinds of statistical materials of well-known organizations (for example, the Open Web Application Security Project) showed that one of the most dangerous types of attacks (vulnerabilities) is Cross Site Scripting – XSS. In a number of works, attempts of mathematical formalization the process of finding and eliminating vulnerabilities of this kind were made. However, the presented models do not take into account the latest trends of XSS vulnerability, namely the difference in their types (“stored XSS”, “reflected XSS” and DOM Based XSS) and the need to identify them. That is why a particularly relevant task in this direction seems to be the modeling of the DOM (Document Object Model) XSS vulnerability algorithm taking into account the complex of their three possible types.

In general, studies have shown that GERT-modeling is an effective way to determine previously unknown laws and distribution functions of random variables with a known algorithm of functioning (process). That is why, we chose GERT modeling as a tool for mathematical modeling. The main purpose of GERT is to evaluate the network logic and the duration of the activity and obtaining a conclusion on the need to perform certain activities.

As a result, a mathematical model was developed for testing the DOM XSS vulnerability complex which differs from the known ones by taking into account the specifics of complex analysis of various types of XSS vulnerability (“stored XSS”, “reflected XSS” and DOM Based XSS), as well as separately including DOM Based XSS into the algorithm of automatic audit procedures. This makes it possible to conduct an analytical assessment of the time spent testing these vulnerabilities in the context of implementing a secure software development strategy.

testing technologies, DOM XSS vulnerabilities, GERT modeling, security vulnerabilities

Одержано (Received) .17.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 20.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

УДК 004.056.55:004.312.2 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).181-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).181-189)**Н.В. Лада**, канд. техн. наук, докторант, **Ю.В. Рудницька**, асп.*Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна***С.Г. Козловська**, доц., канд. техн. наук*Східноєвропейського університету економіки і менеджменту, м. Черкаси, Україна**e-mail: Ladanatali256@gmail.com, kozlovskifamili@ukr.net, Y.V.Rudnitskaya@gmail.com*

Дослідження і синтез групи симетричних модифікованих операцій додавання за модулем чотири

В статті наведено основні результати дослідження синтезу групи двохоперандних двохранрядних симетричних модифікованих операцій додавання за модулем чотири на основі використання групи двохранрядних однооперандних операцій криптоперетворення, для підвищення варіативності алгоритмів комп'ютерної криптографії. На основі чотирьох модифікацій моделей операції додавання за модулем два з врахуванням моделі розповсюдження переносу побудовано аналогічні модифікації моделей операції додавання за модулем чотири. Було встановлено, що побудувати всі модифікації двохранрядної двохоперандної операції додавання за модулем чотири, можна на основі групи двохранрядних двохоперандних операцій операцій криптографічного перетворення інформації. Синтез моделей двохоперандної симетричної операції проводився поєднанням довільної двохранрядної операції для перетворення другого операнда з базовою для даної операції операцією перетворення першого операнда шляхом додавання за модулем два. Коректність отриманих результатів підтверджено результатами обчислювального експерименту. У подальшому потрібно продовжити дослідження направлені на вдосконалення алгоритмів потокового шифрування на основі синтезованої групи нових криптографічних операцій.

криптографічна операція, модифікації операцій, математична група операцій, додавання за модулем, моделі операції, потокове

Н.В. Лада, канд. техн. наук, докторант, **Ю.В. Рудницкая**, асп.*Черкасский государственный технологический университет, г. Черкассы, Украина***С.Г. Козловская**, доц., канд. техн. наук*Восточноевропейский университет экономики и менеджмента, г. Черкассы, Украина*

Исследование и синтез группы симметричных модифицированных операций сложения по модулю четыре

В статье приведены основные результаты исследования синтеза группы двухоперандных двуххранрядных симметричных модифицированных операций сложения по модулю четыре на основе использования группы двуххранрядных однооперандных операций криптопреобразования, для повышения варіативности алгоритмов компьютерной криптографии. На основе четырех модификаций моделей операции сложения по модулю два с учетом модели распространения переноса построено аналогичные модификации моделей операции сложения по модулю четыре. Было установлено, что построить все модификации двуххранрядных двухоперандных операций сложения по модулю четыре, можно на основе группы двуххранрядных двухоперандных операции операций криптографического преобразования информации. Синтез моделей двухоперандной симметричной операции проводился сочетанием произвольной двуххранрядной операции для преобразования второго операнда с базовой для данной операции операцией преобразования первого операнда путем сложения по модулю два. Корректность полученных результатов подтверждается результатами вычислительного эксперимента. В дальнейшем необходимо продолжить исследования направлены на совершенствование алгоритмов потокового шифрования на основе синтезированной группы новых криптографических операций.

Постановка проблеми. Всесвітня тенденція до щорічного збільшення кібератак характеризується як зростанням їх кількості так і розширенням переліку автоматизованих та інформаційних системи, що піддалися нападу. Особливо важливо забезпечити ефективну протидію криптоатакам, адже саме вони направлені на заволодіння конфіденційною інформацією, розголошення якої приводить до негативних наслідків та фінансових збитків. Все це в сукупності робить проблему підвищення ефективності систем комп'ютерного криптографічного захисту інформації особливо актуальною. Вирішення даної проблеми полягає у вдосконаленні вже існуючих та побудові нових криптоалгоритмів та криптосистем, в тому числі на основі застосування нових, раніше невідомих підходів. Одним з нових шляхів розвитку сучасної та постквантової криптографії полягає в розробці криптопримітивів оснований на застосуванні нових багатооперандних операцій криптографічного перетворення інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Операції криптографічного перетворення інформації забезпечують збільшення стійкості криптоперетворень [1-3]. Крім того аналіз даних операцій дозволяє виокремити нові підходи для побудови систем комп'ютерної криптографії [4, 5]. В алгоритмах комп'ютерної криптографії особливе місце займають операції додавання за модулем а також модифікації даних операцій з точністю до перестановки [6-8]. Збільшення кількості операцій додавання за модулем дозволяє збільшити варіативність алгоритмів, стійкість результатів шифрування та надійність криптосистем [9].

В роботах [10-11] наведено результати обчислювального експерименту на основі якого отримано 96 симетричних двохрозрядних двооперандних симетричних операцій представлених поєднанням однооперандних операцій та їх таблицями підстановки. В основу експерименту було взято групу однооперандних операцій криптоперетворення наведених в табл. 1 [12].

Таблиця 1– Класифікація однооперандних двохрозрядних операцій криптографічного перетворення інформації

Класифікатор операцій	Операції інверсії			
	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
Базові операції	$F_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$	$F_2 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_3 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}$	$F_4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$
	$F_5 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \end{bmatrix}$	$F_6 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_7 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}$	$F_8 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$
	$F_9 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix}$	$F_{10} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{11} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix}$	$F_{12} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$
Операції перестановок	$F_{13} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{bmatrix}$	$F_{14} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{15} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}$	$F_{16} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$
	$F_{17} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix}$	$F_{18} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{19} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix}$	$F_{20} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$
	$F_{21} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_1 \end{bmatrix}$	$F_{22} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{23} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}$	$F_{24} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$

Джерело: розроблено авторами

Експериментально отримані операції було поділено на 4 математичних групи по 24 операції в кожній, що дає змогу досліджувати кожну групу окремо.

В роботі [13] досліджена можливість побудова повної групи двохоперандних операцій криптоперетворення, на основі відомої, за рахунок встановлення і застосування перестановочних взаємозв'язків між таблицями істинності. Встановлено, що застосування повної групи перестановочних схем забезпечить побудову повної групи наборів модифікованих двохоперандних операцій криптоперетворення невідомої групи, на основі однієї відомої операції. Отримані результати співпали з результатами обчислювального експерименту.

Робота [14] присвячена розробці технології побудови двохоперандних операцій криптографічного перетворення інформації, за результатами моделювання, придатних для практичного застосування в комп'ютерній криптографії.

Основним недоліком даної технології полягає в необхідності виконання громіздких математичних перетворень, що значно ускладнює ефективність досліджень.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження і синтез групи двохоперандних двохранних симетричних модифікованих операцій додавання за модулем чотири на основі використання групи двохранних одноперандних операцій криптоперетворення для підвищення варіативності алгоритмів комп'ютерної криптографії.

Виклад основного матеріалу. В основу проведення дослідження було взято чотири математичні моделі двохоперандних двохранних симетричних модифікованих операцій додавання за модулем два [9]. Дослідимо можливість побудови аналогічних модифікованих операцій на основі додавання за модулем чотири.

Так як операція двохранного додавання за модулем два включає в себе операцію додавання за модулем два першого та другого розрядів, то вона буде задана моделлю:

$$O_1^{\text{mod}2} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus k_1 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де x_i, k_i – значення i -тих розрядів першого та другого операндів відповідно.

Операція двохранного додавання за модулем чотири, відрізняється від двохранного додавання за модулем два наявністю переносу з молодшого в старший розряд. Виходячи з цього модель операції двохранного додавання за модулем чотири можна представити як:

$$O_1^{\text{mod}4} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Якщо ввести позначення, по аналогії з табл.1 $F_j^1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$, $F_j^2 = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$ та представити їх як j -ту операцію відображення в результатах додавання по модулю першого та другого операнда відповідно, тоді:

$$O_1^{\text{mod}2} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus k_1 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = F_1^1 \oplus F_1^2, \quad (3)$$

за умови що, $y_1 = k_1$, $y_2 = k_2$.

По аналогії модель операція двохрозрядного додавання за модулем чотири можна представити:

$$O_1^{\text{mod}4} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = F_1^1 \oplus F_1^2, \quad (4)$$

за умови що, $y_1 = x_2 \cdot k_2 \oplus k_1$, $y_2 = k_2$.

Розглянемо модифіковані операція додавання за модулем два [6] та по аналогії з виразами (3-4) побудуємо аналогічні модифіковані операція додавання за модулем чотири:

$$O_2^{\text{mod}2} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus k_1 \\ x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = F_2^1 \oplus F_1^2, \quad (5)$$

за умови що, $y_1 = k_1$, $y_2 = k_2$;

$$O_2^{\text{mod}4} = F_2^1 \oplus F_1^2 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \\ x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

за умови що, $y_1 = x_2 \cdot k_2 \oplus k_1$, $y_2 = k_2$;

$$O_3^{\text{mod}2} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus k_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = F_3^1 \oplus F_1^2, \quad (7)$$

за умови що, $y_1 = k_1$, $y_2 = k_2$;

$$O_3^{\text{mod}4} = F_3^1 \oplus F_1^2 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

за умови що, $y_1 = x_2 \cdot k_2 \oplus k_1$, $y_2 = k_2$;

$$O_4^{\text{mod}2} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus k_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = F_4^1 \oplus F_1^2, \quad (9)$$

за умови що, $y_1 = k_1$, $y_2 = k_2$;

$$O_4^{\text{mod}4} = F_4^1 \oplus F_1^2 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

умови що, $y_1 = x_2 \cdot k_2 \oplus k_1$, $y_2 = k_2$.

Коректність наведених моделей двохоперандних двохрозрядних симетричних модифікованих операцій додавання за модулем два підтверджена застосуванням технології побудови двохоперандних операцій криптоперетворення, а також результатами обчислювального експерименту.

На основі аналізу отриманих модифікацій двохранрядної операції додавання за модулем чотири, в тому числі, наведені в (3-10), можна зробити висновок, що їх можна отримати на основі однооперандних операцій обробки першого операнда, шляхом додавання операції додавання за модулем два базової для них операції перетворення другого операнда, за умови врахування моделі переносу в старший розряд.

Перевіримо коректність даного висновку шляхом застосування інших однооперандних операцій криптоперетворення, наведених в табл.1. При побудові модифікованих операцій додавання за модулем чотири буде виконуватися умова: $y_1 = x_2 \cdot k_2 \oplus k_1$, $y_2 = k_2$.

Так як для однооперандної операції F_5 базовою однооперандною операцією також є F_5 тоді:

$$\begin{aligned} O_5^{\text{mod}4} &= F_5^1 \oplus F_5^2 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} y_1 \oplus y_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \\ k_2 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

Для однооперандної операції F_6 базовою однооперандною операцією також є F_5 , виходячи з цього отримуємо:

$$\begin{aligned} O_6^{\text{mod}4} &= F_5^1 \oplus F_6^2 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \\ k_2 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \\ x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \\ x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} O_{12}^{\text{mod}4} &= F_9^1 \oplus F_{12}^2 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} y_1 \oplus 1 \\ y_1 \oplus y_2 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \\ x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} O_{14}^{\text{mod}4} &= F_{13}^1 \oplus F_{14}^2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} y_2 \\ y_1 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_2 \\ k_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} x_2 \oplus k_2 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} O_{19}^{\text{mod}4} &= F_{17}^1 \oplus F_{19}^2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} y_2 \oplus 1 \\ y_1 \oplus y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_2 \\ x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

$$O_{24}^{\text{mod}4} = F_{21}^1 \oplus F_{24}^2 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} y_1 \oplus y_2 \oplus 1 \\ y_1 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \\ x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus 1 \end{bmatrix}, \tag{16}$$

Результати дослідження синтезу модифікації двохрозрядної двооперандної операції додавання за модулем чотири наведено в табл.2.

Таблиця 2 – Результати дослідження синтезу модифікацій двохрозрядної двооперандної операції додавання за модулем чотири

Класифікатор операцій	Операції інверсії			
	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
Базові операції	$O_1 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix}$	$O_2 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \\ x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$O_3 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix}$	$O_4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$
	$O_5 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix}$	$O_6 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \\ x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$O_7 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \oplus 1 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix}$	$O_8 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \oplus 1 \\ x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$
	$O_9 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix}$	$O_{10} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$O_{11} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix}$	$O_{12} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$
Операції перестановок	$O_{13} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus k_2 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \end{bmatrix}$	$O_{14} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus k_2 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$O_{15} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix}$	$O_{16} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$
	$O_{17} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus k_2 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix}$	$O_{18} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus k_2 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$O_{19} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \end{bmatrix}$	$O_{20} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus k_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$
	$O_{21} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \end{bmatrix}$	$O_{22} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$O_{23} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \end{bmatrix}$	$O_{24} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$

Джерело: розроблено авторами

В процесі дослідження було встановлено, що побудувати всі модифікації двохрозрядної двооперандної операції додавання за модулем чотири, можна на основі групи двохрозрядних двооперандних операцій операцій криптографічного перетворення інформації. При проведенні дослідження були отримані моделі симетричних операцій, кожна з яких забезпечує як пряме так і обернене криптоперетворення. Синтез моделі двооперандної симетричної операції проводився шляхом поєднання довільної однооперандної двохрозрядної операції для перетворення другого операнда з базовою для даної операції операцією перетворення першого операнда. Поєднання однооперандних двохрозрядних операцій реалізовано на основі додавання за модулем два.

Отримані теоретичні результати повністю співпали з результатами обчислювального експерименту по моделюванню симетричних операцій криптоперетворення [9].

Висновки. В процесі дослідження отримано наступні результати:

На основі чотирьох модифікацій моделей операції додавання за модулем два з врахуванням моделі розповсюдження переносу побудовано аналогічні модифікації моделей операції додавання за модулем чотири.

Було встановлено, що побудувати всі модифікації двохрозрядної двохоперандної операції додавання за модулем чотири, можна на основі групи двохрозрядних двохоперандних операцій операцій криптографічного перетворення інформації.

Синтез моделей двохоперандної симетричної операції проводився поєднанням довільної двох розрядної операції для перетворення другого операнда з базовою для даної операції операцією перетворення першого операнда шляхом додавання за модулем два. Коректність отриманих результатів підтверджено результатами обчислювального експерименту.

У подальшому потрібно продовжити дослідження направлені на вдосконалення алгоритмів потокового шифрування на основі синтезованої групи нових криптографічних операцій.

Список літератури

1. Бабенко В.Г. Складності та особливості побудови ефективних криптоалгоритмів. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2014. Вип. №3. С.87–91.
2. Фауре Е.В., Сисоєнко С.В., Миронюк Т.В. Синтез і аналіз псевдовипадкових послідовностей на основі операцій криптографічного перетворення. *Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. праць*. Полтава: Полтавський нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2015. Вип. 4 (36). С. 85–87.
3. Фауре Е.В., Сисоєнко С.В. Метод підвищення стійкості псевдовипадкових послідовностей до лінійного криптоаналізу. *The scientific potential of the present: proceedings of the International Scientific Conference* (St. Andrews, Scotland, UK, December 1, 2016) / ed. N. P. Kazmyna. NGO «European Scientific Platform». Vinnytsia: PE Rogalska I. O., 2016. P. 119–122.
4. Миронець І.В., Миронюк Т.В., Сисоєнко С.В. Апаратна реалізація базової групи операцій перестановок, керованих інформацією. *Актуальні задачі та досягнення у галузі кібербезпеки: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф.* (м. Кропивницький, 23–25 листоп. 2016 р.). Кропивницький: КНТУ, 2016. С. 141–142.
5. Стабецька Т.А. Математичне обґрунтування узагальненого методу синтезу обернених операцій нелінійного розширеного матричного криптографічного перетворення. *Наукові праці: наук.-метод. журнал*. Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. Вип.238(250). Комп'ютерні технології. С.110-114.
6. Лада Н.В., Козловська С.Г. Застосування операцій криптографічного додавання за модулем два з точністю до перестановки в потокових шифрах. *Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. праць*. Полтава: ПНТУ, 2018. Т. 1 (47). С. 127-130.
7. Бабенко В. Г., Лада Н. В. Синтез і аналіз операцій криптографічного додавання за модулем два. *Системи обробки інформації: зб. наук. пр.* Харків: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2014. Вип. 2 (118). С. 116–118.
8. Бабенко В.Г. Дослідження матричних операцій криптографічного перетворення на основі арифметичних операцій за модулем. *Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. праць*. К., 2012. Вип. 4 (24). С. 85–88.
9. Рудницький В.М., Лада Н.В., Бабенко В.Г. Криптографічне кодування: синтез операцій потокового шифрування з точністю до перестановки: монографія. Харків: ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2018. 184 с.
10. Рудницький В.Н., Пивнева С.В., Бабенко В.Г., Миронець І.В. и др Криптографическое кодирование: методы и средства реализации: монографія. Тольятт. гос. ун-т. Тольятти, 2013. 196 с.
11. Голуб С.В., Бабенко В.Г., Рудницький С.В. Метод синтезу операцій криптографічного перетворення на основі додавання за модулем два. *Системи обробки інформації: зб. наук. праць*. Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2012. Вип. 3 (101), Т. 1. С. 119–122.
12. Рудницький В.М., Бабенко В.Г., Жилияев Д.А. Алгебраїчна структура множини логічних операцій кодування. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: наук.-техн. журн.* 2011. Вип. 2 (6). С. 112–114.
13. Козловська С.Г. Синтез груп двохоперандних операцій криптоперетворення на основі перестановлюваних схем. *Сучасна спеціальна техніка: науково-практичний журнал*. Київ, 2018. № 4 (55). С. 47-56.

14. Рудницький В.М., Лада Н.В., Козловська С.Г. Технологія побудови двохоперандних операцій криптографічного перетворення інформації за результатами моделювання. *Сучасні інформаційні системи: щоквартальний науково-технічний журнал*. Харків, 2018. Т. 2. № 4. С. 26-30.

References

1. Babenko, V.G. (2014). Skladnosti ta osoblyvosti pobudovy efektyvnykh kryптоalhoritmiv [Complexities and specificities for constructing of effective cryptographic algorithms]. *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky*, 3, 87–91 [in Ukrainian].
2. Faure, E.V., Sysoienko, S.V. & Mironiuk, T.V. (2015), “Syntez i analiz psevdovypadkovykh poslidovnostei na osnovi operatsii kryптоgrafichnoho peretvorennia” [Synthesis and analysis of pseudorandom sequences based on cryptographic transformation operations], *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku. Zbirnyk naukovykh prats PNTU im. Yurii Kondratiuka, No. 4 (36)*, 85–87 [in Ukrainian].
3. Faure, E.V. and Sysoienko, S.V. (2016), Metod pidvyshchennia stiikosti psevdovypadkovykh poslidovnostei do liniinoho kryптоanalizu. *The scientific potential of the present: proceedings of the International Scientific Conference*. (St. Andrews, Scotland, UK, December 1, 2016) / ed. N. P. Kazymna. NGO «European Scientific Platform». Vinnytsia: PE Rogalska I. O., pp. 119–122 [in Ukrainian].
4. Myronets, I.V., Mironiuk, T.V. and Sysoienko, S.V. (2016), Aparatna realizatsiia bazovoi hrupy operatsii perestanovok, kerovanykh informatsiieiu. Aktualni zadachi ta dosiahnennia u haluzi kiberbezpeky: *materialy Vseukrainskoi nauково-praktychnoi konferentsii* (m. Kropyvnytskyi, 23–25 lystop. 2016 r.). Kropyvnytskyi: KNTU, 141–142 [in Ukrainian].
5. Stabetskaya, T.A. (2014), “Matematychnе obgruntuvannia uzahalnenoho metodu syntezu obernenykh operatsii neliniinoho rozshyrenoho matrychnoho kryптоgrafichnoho peretvorennia” [Mathematical justification of generalized method of synthesis of feedback nonlinear operations of expanded matrix cryptographic transformations]. *Naukovi pratsi: nauково-metodychnyi zhurnal. ChDU im. Petra Mohyly, Kompiuterni tekhnolohii, No. 238 (250)*, 110-114 [in Ukrainian].
6. Lada, N.V. & Kozlovska, S.H. (2018). Zastosuvannia operatsii kryптоgrafichnoho dodavannia za modulem dva z tochnistiю do perestanovki v potokovykh shyfrakh [Applying cryptographic addition operations by module two with accuracy of permutation in stream ciphers]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku. Zbirnyk naukovykh prats PNTU, No. 1 (47)*, 127-130 [in Ukrainian].
7. Babenko, V.H. & Lada, N.V. (2014). “Syntez i analiz operatsii kryптоgrafichnoho dodavannia za modulem dva” [Synthesis and analysis of operations of cryptographic addition modulo two], *Systemy obrobky informatsii: zbirnyk naukovykh prats KHUPS im. I. Kozheduba, No. 2 (118)*, 116–118 [in Ukrainian].
8. Babenko, V.G. (2012). “Doslidzhennia matrychnykh operatsii kryптоgrafichnoho peretvorennia na osnovi aryfmetychnykh operatsii za modulem” [The research of matrix operations of cryptographic transformation based on arithmetic modulo]. *Systemy upravlinnia, navigatsiyi ta zvyazku. Zbirnyk naukovykh prats, No. 4 (24)*, 85-88 [in Ukrainian].
9. Rudnitskyi, V.M., Lada, N.V. & Babenko, V.H. (2018). *Kryптоgrafichne koduvannia: syntez operatsii potokovoho shyfruvannia z tochnistiю do perestanovki: monohrafiia* [Cryptographic encoding: Synthesis for streaming encryption operations within the accuracy of permutation: monograph], TOV «DISA PLIUS», Kharkiv [in Ukrainian].
10. Rudnitskyi, V.M., Pyvneva, S.V., Babenko, V.G. & et al. (2018). *Kryптоgrafichne koduvannia: metody i zasoby realizatsii: monohrafiia* [Cryptographic encoding: methods and means of implementation: monograph], Toliatinskoho hosudarstvennii universytet [in Russian].
11. Golub, S.V., Babenko, V.G. & Rudnitskyi, S.V. (2012). “Metod syntezu operatsii kryптоgrafichnoho peretvorennia na osnovi dodavannia za modulem dva” [The method of synthesis of the operations of cryptographic transformations on the basis of addition modulo two]. *Systemy obrobky informatsii: zbirnyk naukovykh prats KHUPS im. I. Kozheduba, No. 3 (101), Vol. 1*, 119–122 [in Ukrainian].
12. Rudnitskyi, V.M., Babenko, V.G. & Zhylyayev, D.A. (2011), “Alhebraichna struktura mnozhyny lohichnykh operatsii koduvannia” [Construction of reverse functions for the systems of protection to information]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy: nauково-tekhnichniy zhurnal, No. 2 (6)*, 112–114 [in Ukrainian].
13. Kozlovska, S.H. (2018). Syntez hrup dvokhoperandnykh operatsii kryптоperetvorennia na osnovi perestanovliuvanykh skhem [Synthesis of groups two-operand operations of cryptoconversion on the basis of permutation schemes]. *Suchasna spetsialna tekhnika, No. 4 (55)*, 47-56 [in Ukrainian].
14. Rudnitskyi, V.M., Lada, N.V. & Kozlovska, S.H. (2018). Tekhnolohiia pobudovy dvokhoperandnykh operatsii kryптоgrafichnoho peretvorennia informatsii za rezultatamy modeliuвання [Technology of two

operand operations construction of information cryptographic transformation by modeling results].
Suchasni informatsiini systemy, Vol.2, No. 4, 26-30 [in Ukrainian].

Nataliia Lada, PhD tech. sci., Doctoral student, **Yulia Rudnitskaya**, post-graduate

Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

Svetlana Kozlovska, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

East European University of Economics and Management, Cherkasy, Ukraine

Researching and Synthesizing a Group of Symmetric Modified Modulo-4 Addition Operations

The main research results of synthesizing a group of two-operand two-bit symmetric modified modulo-4 addition operations, based on using the group of two-bit one-operand cryptographic transformation operations for increasing the variability of computer cryptography algorithms are presented in the article.

In order to achieve this goal, based on four modulo-2 addition operation's models modifications, similar modifications' models of the modulo-4 addition operation's models were constructed in the article. For the construction of these models, the main difference between the operations of two-bit addition modulo-4 was used from the two-digit addition modulo-2, which consists in the transfer from junior to senior. The sequences of mathematical transformations given in the article provide the construction of a group of models of operations on the basis of a given, for example, the operation of adding modulo-4. The correctness of given models of two-operand two-bit symmetric modified modulo-2 addition operations is confirmed by the application of the two-operand cryptographic transformation operations construction technology, as well as by the computational experiment's results. The assumption on all two-bit two-operand modulo-4 addition operation modifications building possibility based on using the group of two-bit one-operand operations of information cryptographic transformation was proved in the article. During the study, the symmetric operations' models were obtained, each of which provides both direct and inverse cryptographic transformation. The established relationships between operations allowed to synthesize a models' group of two-bit two-operand symmetric modified modulo-4 addition operations, based on combining the random two-bit operation to transform the second operand, with the first operand's transforming operation, which is basic for this operation, through the modulo-2 addition.

The obtained theoretical results completely coincide with the computational experiment's results on simulating the symmetric operations of cryptographic transformation.

cryptographic operation, modifications of operations, mathematical group of operations, module addition, operation models, streaming encryption

Одержано (Received) 21.11.2019

Прорецензовано (Reviewed) 10.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

УДК 519.83

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).190-201](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).190-201)

Yuriy Parkhomenko, Assoc. Prof., PhD. tech. sci., **Mykhailo Parkhomenko**, Assoc. Prof.,
Ludmila Rybakova, Assoc. Prof., **Andriy Boki**

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

e-mail: parhomenkoym@ukr.net

Analysis of the Methods for Solving Game Puzzles such as «Flip-Flop»

There is a variety of popular puzzles having a goal of reducing an arbitrary binary matrix to either all “0” or “1” matrix. In this paper we study methods for solving “Flip-Flop” like puzzles of dimensions 3x3, 3x4, 4x4 applying tools of logical analysis of situations, combinatorics and discrete mathematics. We found that applying the method of sequential analysis of each combination that works well for 3x3 matrices is cumbersome and inefficient for matrices of 4x4 and higher dimensionalities. Therefore, we discovered and analyzed algorithms named trait selection method, stream method and snake method which work better

We concluded that in order to find an optimized solution it is helpful to check if each current combination matches one of the pre-final ones, or to swap «0»s with «1»s and vice versa.

computer puzzle games, logical situation analysis, combinatorics, discrete mathematics, trait method, stream method, snake method

Ю. М. Пархоменко, доц., канд. техн. наук, **М. Д. Пархоменко**, доц., **Л.Рибакова**, доц., **А. Р. Бокій**
Центральноукраїнський національний технічний університет, з.Кропивницький, Україна

Исследование методов решения игр-головоломок типа «Flip-Flop»

Существует множество популярных головоломок, целью которых является сокращение произвольной двоичной матрицы до любой матрицы «0» или «1». В этой статье мы изучаем методы решения компьютерных игр-головоломок типа «Flip-Flop», с матрицами размерностей 3x3, 3x4, 4x4, с использованием инструментов логического анализа ситуаций, комбинаторики и дискретной математики. Мы определили, что применение метода последовательного анализа каждой комбинации, который хорошо работает для матриц 3x3, является громоздким и неэффективным для матриц 4x4 и более высоких размерностей. Поэтому мы нашли и проанализировали алгоритмы, названные методом выбора признаков, методом «ручейка» и методом «змейки», которые работают лучше.

Мы пришли к выводу, что для нахождения оптимального решения полезно проверить, соответствует ли каждая текущая комбинация одной из предконечных, и своевременно вмешаться в процесс, либо предварительно обработать содержимое исходной матрицы, чтобы оптимизировать количество ячеек с кодами «0» или «1».

компьютерные игры-головоломки, логический анализ ситуаций, комбинаторика, дискретная математика, метод выделения признаков, метод «ручейка», метод «змейки»

Statement of the problem. Mental games like checkers and chess appeared in ancient times as a mental leisure activity. With the rise of educational level they have become more sophisticated, and the circle of their fans has been growing. Gradually, games became not only a type of leisure, but also an object of scientific research. At the turn of the XIX and XX centuries, the Game Theory emerged, and since then it has been constantly evolving finding applications in economics, sociology, biology, industry, military and other fields of human activity. The state of the art in decision making relies on simulation of game situations, behavioral analysis and optimization methods in order to find the best strategy.

Among the growing number of computer games, the so-called puzzle games are of great interest to young people and adults. Solving puzzles requires careful analysis of situations and finding logical and mathematical patterns to determine the right sequence of

actions. Some puzzles stimulate theoretical and practical advances. For example, the number of different states of Rubik's cube reaches 43 quintillions of combinations. At the same time, it is known that applying so-called «algorithm of God» allows solving the puzzle in no more than 20 steps from any state. Rubik's cube became not just a toy, but also an object of research for mathematicians and engineers. Even today such puzzles as «Crossbones-Nulks» and Game of Fifteen that people have played for generations have not lost their popularity. At the same time a lot of newcomers, like «Threes!», «2048», «Sudoku» and others have appeared.

The «Flip-Flop» puzzle, that can be found on the internet in different variations caught our attention. The essence of the game is as follows. At the beginning of the game matrix cells 4×4 are filled with «0»s or «1»s randomly. When a matrix cell gets activated, the values of the entire row and column at the intersection of it are changed to the opposite codes, that is, «0» becomes «1» and vice versa. The objective of the game is to bring all matrix cells either to «0»s or «1»s (depending on the given goal) in a finite number of steps. There are several modifications of the game that differ by cell content; instead of «0» and «1»s game designers use flowers, berries ("Fruity Flip Flop") and the like. There are also rule differences when the activation of a cell changes the values of the adjacent cells as opposed to changing the entire row and column.

This paper explores the original version of the game, i.e. when all values of adjacent row and column get changed.

Analysis of recent researches and publications. As the Flip-Flop experience shows, achieving the goal of arriving to the matrix with all 0s (or 1s) from an arbitrary initial combination in a finite number of steps is not an easy problem. It is hard to foresee what combination occurs in two or three steps ahead even in matrix 4×4 because seven out of sixteen cells change their values at each step. In order to solve the puzzle we have developed and analyzed an algorithm that allows us to reach the solution of forming either all-0s or all-1s matrix in minimal number of steps for any $m \times n$ matrix.

Studying references like Game Theory [1, 2], Discrete Math [3], Artificial Intelligence [4], Combinatorics [5], and experiences with similar puzzles at braingames.ru convinced us to use simulation, formal logic and combinatorics.

Statement of the objective. The aim of the article is to determine the methods for solving the problem of reducing the arbitrary combination of matrix codes, with a minimum number of steps, to one "0" or "1" and to build the algorithms that will provide this process.

The main material.

Terminology. We use the following notation:

- binary numbers 0 or 1 are used to fill matrix cells;
- $(i=1,2,3\dots m)$ denotes $\langle i\text{-th} \rangle$ row of the matrix;
- $(j=1,2,3\dots m)$ denotes $\langle j\text{-th} \rangle$ column of the matrix;
- (i,j) denotes i,j matrix cell;
- instead of binary code (of a row) hexadecimal code may be used. Therefore instead of representing a matrix as a collection of cells we may represent it as a list of (hex) codes of its rows;
- activated cell is denoted by either **0.** or **1.**;
- “zero” matrix - matrix consisting of 0s;
- “unit” matrix - matrix consisting of 1s;
- when a cell gets activated, the content of each cells in its row and column gets inverted («0» becomes «1» and vice versa).
- an arbitrary combination of the matrix at the beginning of the game is generated programmatically using a binary random number generator;

- since algorithms for the formation of «zero» and «unit» matrices are similar, we focus on obtaining «zero» matrix.

Analysis of the "Flip-Flop" Solution for 3x3 Matrix.

Before proceeding with the study of a solution for matrices of 3x3 size, we will analyze forming a «zero» 2x2 matrix. In doing so, we will simulate all possible initial combinations and form the final «zero» matrix from them by analyzing the current configuration and determining the strategy for the next step (Fig. 1).

$$\begin{aligned}
 &1) \begin{matrix} 1. 0 \\ 0 1 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} 0 1 \\ 1 1. \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} 0 0 \\ 0 0 \end{matrix} \quad 2) \begin{matrix} 1 1 \\ 0 0. \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} 1 0 \\ 1. 1 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} 0 0 \\ 0 0 \end{matrix} \quad 3) \begin{matrix} 1. 1 \\ 1 1 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} 0 0. \\ 0 1 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} 1 1 \\ 0 0. \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} 1 0 \\ 1. 1 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} 0 0 \\ 0 0 \end{matrix} \\
 &4) \begin{matrix} 1 0. \\ 0 0 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} 0 1 \\ 0. 1 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} 1. 1 \\ 1 0 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} 0 0 \\ 0 0 \end{matrix} \quad 5) \begin{matrix} 1. 0 \\ 0 0 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} 0 1. \\ 1 0 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} 1 0 \\ 1. 1 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} 0 0 \\ 0 0 \end{matrix}
 \end{aligned}$$

Figure 1 – The sequence of formation of «zero» matrix with different initial combinations
 Source: author's development

The analysis of the obtained solutions shows:

- in order to reach the «zero» combination, it necessary to arrive to the pre-final combination in which activation of the critical cell results in forming the «zero» matrix;
- all possible pre-final combinations are formed at the intersection of matrix cells, so their number corresponds to the number of the matrix cells (for the matrix 2x2 = 4);
- the search strategy is to find one of the four final combinations, which makes it easier to solve the problem;
- examples 4 and 5 show that starting from the same input, the sequence of steps for reaching one of the final combinations may be different but the result is the same.

It follows that for the matrix 3x3 there are 9 pre-final combinations. All of them can be expressed number triplets: 7-4-4; 7-1-1; 4-4-7; 1-1-7; 7-2-2; 2-2-7; 4-7-4; 1-7-1; 2-7-2.

1			2			3			4			5			6			7			8			9		
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0

Figure 2 – Table of final combinations for matrix 3x3
 Source: author's development

Searching for a long time for ways to reach one of these combinations did not give positive results. At the same time, the following has been established: the modulo 2 sum of columns and rows of all pre-final combinations is equal (sum |2|= 7₂); if the current combination is even (sum|2|= 0) then the next combination is odd, so the pre-final combination must necessarily be even; when activating an arbitrary cell, for example (2,3), in the current combination (let's call it combination A) and then the same cell in the resulting combination, then the first combination (i.e. combination A) will appear again; if in the odd combination (2-5-0) sequentially activate cells (1,1) and (1,2), then two new even combinations will be formed, if in the first of them (5-1-4) activate cell (1,2), and in the second (5-7-2) activate cell (1,1), we will also obtain new, but absolutely identical combinations (2-3-6) (Fig. 3); this partly explains why the process may be infinite, that is the sequence of actions results in the same combinations making it cyclical.

Sum 2	1	1	1		0	0	0		1	1	1	Sum 2	1	1	1		0	0	0		1	1	1
1	0.	1	0		1	0.	1		0	1	0	2	0	1.	0		1.	0	1		0	1	0
	1	0	1	⇒	0	0	1	⇒	0	1	1		1	0	1	⇒	1	1	1	⇒	0	1	1
	0	0	0		1	0	0		1	1	0		0	0	0		0	1	0		1	1	0

Figure 3 – Repeatability of combinations

Source: author's development

Let's get back to the search for combinations which lead to forming the pre-final and final matrices. The analysis has revealed the following:

- activation of the cells with the code «0» in each of the 9 pre-final combinations (Figure 2) result in 6 new types of matrices (Fig. 4, Examples 1-3) having 6 copies of each (4×9=36), which differ from each other by rows with codes 3 5 6 (3-6-5, 6-5-3, 5-3-6, 6-3-5, 3-5-6, 5-6-3);

- activations of the cells with code «1» in each of the 9 pre-final combinations (Fig. 2) result in 18 new matrix types (Fig. 4, Examples 4-9), which differ from each other by rows with codes 0 3 3, 0 5 5 and 0 6 6;

- when performing reverse actions - activation of cells with codes «1» in front of the pre-final matrices with rows having codes 3 5 6 (Fig. 5, examples 1-3) different combinations of the pre-final matrices are formed (Fig. 2);

- when performing reverse actions - activation of cells with codes «1» in front of the pre-final matrices with the rows having codes 0 3 3, 0 5 5 and 0 6 6 (Fig. 5, examples 4-9) different combinations of the pre-final matrices are also formed (Fig. 5, examples 4-9);

- activations of the cells with code «0» in front of the pre-final matrices with rows having codes 3 5 6 result in forming the pre - pre final matrix with combinations of rows having codes 1 2 4 (Fig. 6, Examples 1-3);

- activations of cells with code «1» in front of the pre-final matrices with row codes 0 3 3, 0 5 5 and 0 6 6 result in forming the pre-pre pre-final matrix with row codes 1 2 4 (Fig. 6, examples 4-9);

- when performing reverse actions - activation of cells with codes «1» in front of the pre-pre pre-final matrices with row codes 1 2 4 the pre pre-final matrix is formed with row codes 3 5 6 (Fig. 7, Examples 1-3);

- when performing reverse actions - activation of cells with codes «0» in front of the pre pre pre-final matrices with row codes 1 2 4 the pre pre-final matrix is formed with row codes 0 3 3, 0 5 5 and 0 6 6 (Fig. 7, examples 4-9).

Matrix Forming with row codes 3 5 6 by activation of cells with code «0»											
1.	(4) 1 0. 0	⇒	(3) 0 1 1	2.	(4) 1 0 0.	⇒	(3) 0 1 1	3.	(2) 0 1 0	⇒	(6) 1 1 0
	(4) 1 0 0		(6) 1 1 0		(4) 1 0 0		(5) 1 0 1		(7) 1 1 1		(3) 0 1 1
	(7) 1 1 1		(5) 1 0 1		(7) 1 1 1		(6) 1 1 0		(2) 0. 1 0		(5) 1 0 1
Matrix Forming with row codes 0 3 3, 0 5 5 та 0 6 6,											
4.	(4) 1. 0 0	⇒	(3) 0 1 1	5.	(4) 1 0 0	⇒	(0) 0 0 0	6.	(4) 1 0 0	⇒	(6) 1 1 0
	(4) 1 0 0		(0) 0 0 0		(4) 1. 0 0		(3) 0 1 1		(4) 1 0 0		(6) 1 1 0
	(7) 1 1 1		(3) 0 1 1		(7) 1 1 1		(3) 0 1 1		(7) 1 1. 1		(0) 0 0 0
by activation of cells of pre-final matrices with code «1»											
7.	(7) 1 1 1	⇒	(5) 1 0 1	8.	(7) 1 1 1	⇒	(5) 1 0 1	9.	(7) 1. 1 1	⇒	(0) 0 0 0
	(2) 0 1. 0		(5) 1 0 1		(2) 0 1 0		(0) 0 0 0		(2) 0 1 0		(6) 1 1 0
	(2) 0 1 0		(0) 0 0 0		(2) 0 1. 0		(5) 1 0 1		(2) 0 1. 0		(6) 1 1 0

Figure 4 – Examples of forming matrices with row codes 3 5 6, 0 3 3, 0 5 5, and 0 6 6

Source: author's development

Forming of the Pre-final Matrix with row codes 3 5 6 by activation of cells with code«1»											
1.	(3) 0 1 1.1	⇒	(4) 1 0 0 0	2.	(3) 0 1 1 1	⇒	(7) 1 1 1 1	3.	(6) 1 1 1 0	⇒	(7) 1 1 1 1
	(6) 1 1 1 0		(7) 1 1 1 1		(5) 1. 0 1 1		(2) 0 1 0 0		(3) 0 1 1.1		(4) 1 0 0 0
	(5) 1 0 1 1		(4) 1 0 0 0		(6) 1 1 1 0		(2) 0 1 0 0		(5) 1 0 1 1		(4) 1 0 0 0
Forming of the Pre-final Matrix with row codes 0 3 3, 0 5 5 and 0 6 6,											
4.	(3) 0. 1 1 1	⇒	(4) 1 0 0 0	5.	(0) 0 0. 0 0	⇒	(7) 1 1 1 1	6.	(6) 1 1 1 0.	⇒	(1) 0 0 1 1
	(0) 0 0 0 0		(4) 1 0 0 0		(3) 0 1 1 1		(1) 0 0 1 1		(6) 1 1 1 0		(7) 1 1 1 1
	(3) 0 1 1 1		(7) 1 1 1 1		(3) 0 1 1 1		(1) 0 0 1 1		(0) 0 0 0 0		(1) 0 0 1 1
by activation of cells with code «0»											
7.	(5) 1 0. 1 1	⇒	(2) 0 1 1 0	8.	(5) 1 0. 1 1	⇒	(2) 0 1 1 0	9.	(6) 1 1 1 0	⇒	(7) 1 1 1 1
	(5) 1 0 1 1		(7) 1 1 1 1		(0) 0 0 0 0		(2) 0 1 0 0		(0) 0 0 0 0		(1) 0 0 1 1
	(0) 0 0 0 0		(2) 0 1 1 0		(5) 1 0 1 1		(7) 1 1 1 1		(6) 1 1 1 0.		(1) 0 0 1 1

Figure 5 – Examples of the formation of final matrices from before the finite
 Source: author's development

Forming of the matrices with row codes 1 2 4 by activation of cells having code «0» in the matrices with row codes 3 5 6,											
1.	(3) 0. 1 1 1	⇒	(4) 1 0 0 0	2.	(3) 0 1 1 1	⇒	(1) 0 0 1 1	3.	(6) 1 1 1 0	⇒	(4) 1 0 0 0
	(6) 1 1 1 0		(2) 0 1 1 0		(5) 1 0. 1 1		(2) 0 1 0 0		(3) 0 1 1 1		(1) 0 0 1 1
	(5) 1 0 1 1		(1) 0 0 1 1		(6) 1 1 1 0		(4) 1 0 0 0		(5) 1 0. 1 1		(2) 0 1 1 0
Forming of the matrices with row codes 1 2 4 by activation of cells having code «1» in the matrices with row codes 0 3 3, 0 5 5 and 0 6 6.											
4.	(3) 0 1. 1 1	⇒	(4) 1 0 0 0	5.	(0) 0 0 0 0	⇒	(2) 0 1 1 0	6.	(6) 1 1 1 0	⇒	(2) 0 1 1 0
	(0) 0 0 0 0		(2) 0 1 1 0		(3) 0 1. 1 1		(4) 1 0 0 0		(6) 1. 1 1 0		(1) 0 0 1 1
	(3) 0 1 1 1		(1) 0 0 1 1		(3) 0 1 1 1		(1) 0 0 1 1		(0) 0 0 0 0		(4) 1 0 0 0
7.	(5) 1. 0 1 1	⇒	(2) 0 1 1 0	8.	(5) 1 0 1 1	⇒	(1) 0 0 1 1	9.	(6) 1 1 1 0	⇒	(4) 1 0 0 0
	(5) 1 0 1 1		(1) 0 0 1 1		(0) 0 0 0 0		(4) 1 0 0 0		(0) 0 0 0 0		(2) 0 1 1 0
	(0) 0 0 0 0		(4) 1 0 0 0		(5) 1. 0 1 1		(2) 0 1 1 0		(6) 1 1. 0 0		(1) 0 0 1 1

Figure 6 – Examples of forming matrices with 1, 2, 4 row codes from the pre pre-final matrices
 Source: author's development

Thus, we reached a cycle: in order to output «zero» matrix, it is necessary to get to one of 9 pre-final matrices, however we can get to any of them only from the pre pre-final matrix with row codes 3 5 6, 0 3 3, 0 5 5 and 0 6 6; the pre pre-final matrices are formed from matrices with row codes 1 2 4, and the latter are themselves formed from the pre pre-final matrices with row codes 3 5 6, 0 3 3, 0 5 5 and 0 6 6. Hence, we can conclude that the solution to the problem for 3×3 matrix only exists if the row codes generated by the random number generator match one of the 30 possible codes 1 2 4, 3 5 6, 0 3 3, 0 5 5, and 0 6 6, in all other cases the problem has no solution.

Forming of the matrices with row codes 3 5 6 by activation of cells having code «1» in the matrices with row codes 1 2 4.											
1.	(4) 1. 0 0	⇒	(3) 0 1 1	2.	(1) 0 0 1	⇒	(3) 0 1 1	3.	(4) 1 0 0	⇒	(6) 1 1 0
	(2) 0 1 0		(6) 1 1 0		(2) 0 1. 0		(5) 1 0 1		(1) 0 0 1		(3) 0 1 1
	(1) 0 0 1		(5) 1 0 1		(4) 1 0 0		(6) 1 1 0		(2) 0 1. 0		(5) 1 0 1
Forming of the matrices with row codes 0 3 3, 0 5 5 and 0 6 6.											
4.	(4) 1 0. 0	⇒	(3) 0 1 1	5.	(4) 1 0 0	⇒	(0) 0 0 0	6.	(2) 0 1 0	⇒	(6) 1 1 0
	(2) 0 1 0		(0) 0 0 0		(4) 1. 0 0		(3) 0 1 1		(1) 0. 0 1		(6) 1 1 0
	(1) 0 0 1		(3) 0 1 1		(7) 1 1 1		(3) 0 1 1		(4) 1 0 0		(0) 0 0 0
by activation of cells having code «0» in the matrices with row codes 1 2 4.											
7.	(2) 0. 1 0	⇒	(5) 1 0 1	8.	(1) 0 0 1	⇒	(5) 1 0 1	9.	(4) 1 0 0	⇒	(6) 1 1 0
	(1) 0 0 1		(5) 1 0 1		(4) 1 0 0		(0) 0 0 0		(2) 0 1 0		(0) 0 0 0
	(4) 1 0 0		(0) 0 0 0		(2) 0. 1 0		(5) 1 0 1		(1) 0 0. 1		(6) 1 1 0

Figure 7 – Examples of forming the pre pre-final matrices from matrices with row codes 1 2 4
 Source: author's development

Search for algorithms for solving the "Flip-Flop" problem for the 4x4 matrix.

Following similar steps as in the previous section, we first determine the pre-final combinations. Their number corresponds to the number of cells in the matrix $N = m \times n = 4 \times 4 = 16$, and the configurations correspond to cells at the intersection of rows and columns with either codes «1» or «0». For each of the 16 pre-final combinations, you can create 15 pre pre-final ones, the total number of which is equal $15 \times 16 = 300$. It is hard to keep them in memory for a regular person. Getting to the pre-final or the pre pre-final combinations by analyzing the current combinations and determining the optimal solution for each subsequent step proved to be quite difficult as at each step the current matrix codes are changed to the opposite in 7 cells out of 16, so tracing the result for 2-3 steps is even harder. Therefore we abandoned attempts to find the best next step at each combination focusing instead at a search for an algorithm capable to find a solution in finite number of steps. The first algorithm was inspired by the following analogy: a reader wants to finish a book quickly and she cares only about her favorite character, so she opens the first page, finds a section talking about her favorite character, reads it and moves to the next page.

Method of sign allocations. Since the number of steps to obtain «zero» matrix in this method varies and can exceed two dozen, in order to make the explanation less cumbersome and more visible, we are going to expand the whole sequence of matrix combinations in the long rows (Fig. 9), and use the tables only for demonstration of the first few steps (Fig. 8).

1-st step	⇒	2-nd step	⇒	3-d step	⇒	4-th step	⇒	5-th step	⇒	6-th step
(8) 1. 0 0 0		0 1. 1 1		1 0 0 0		0 0 0 0		0 0 0 1		0 1 0 1
(2) 0 0 1 0		1 0 1 0		1. 1 1 0		0 0 0 1.		1 1 1 0		1 0 1 0
(1) 0 0 0 1		1 0 0 1		1 1 0 1		0 1 0 1		0 1. 0 0		1 0 1. 1
(7) 0 1 1 1		1 1 1 1		1 0 1 1		0 0 1 1		0 0 1 0		0 1 1 0

Figure 8 – Sequence of actions according to the method of signs
 Source: author's development

The algorithm for implementing the sequence of actions by the method of signs is as follows. If you want to get to the «zero» combination, you need to activate the necessary cells with code «1», in the «unit» combination then you need to activate cells with code «0». Your chosen code serves as a sign. Consider an option to getting to «zero» combination (Fig. 8, 9).

The first step begins with activation of the cell with the code «1» in the input matrix (marked in bold type with a dot).

Note: You can start with an arbitrary cell with code «1» and at an arbitrary step of the game.

When a new combination is detected, going clockwise we skip all cells with code «0» until we detect the first cell with code «1» in the same or next row, but farther from the active cell in the previous combination, and activate it.

We make the next steps following the same rule. If the last activated cell with code «1» was in the last (i.e. fourth) row, and after it in the same row of the new combination there are no cells with code «1» then going clockwise we identify the first cell with code «1» in the first line of this combinations and activate it (see Figure 9 transitions from 7 to 8, from 14 to 15 and from 23 to 24 steps). We continue to perform similar steps until «zero» combination appears. This method is not optimal, but guarantees finding a solution to the problem.

N _i /o	1-st row	2-nd row	3-d row	4-th row	16-th row code
1	1. 0 0 0	0 0 1 0	0 0 0 1	0 1 1 1	8 2 1 7
2	0 1. 1 1	1 0 1 0	1 0 0 1	1 1 1 1	7 A 9 F
3	1 0 0 0	1. 1 1 0	1 1 0 1	1 0 1 1	8 E D B
4	0 0 0 0	0 0 0 1.	0 1 0 1	0 0 1 1	0 1 5 3
5	0 0 0 1	1 1 1 0	0 1. 0 0	0 0 1 0	1 E 4 2
6	0 1 0 1	1 0 1 0	1 0 1. 1	0 1 1 0	5 A B 6
7	0 1 1 1	1 0 0 0	0 1 0 0	0 1. 0 0	7 8 4 4
8	0 0 1 1	1 1 0 0	0 0 0 0	1 0 1. 1	3 C 0 B
9	0 0 0 1.	1 1 1 0	0 0 1 0	0 1 0 0	1 E 2 4
10	1 1 1 0	1. 1 1 1	0 0 1 1	0 1 0 1	E F 3 5
11	0 1 1 0	0 0 0 0	1. 0 1 1	1 1 0 1	6 0 B D
12	1 1 1 1	1 0 0 0	0 1. 0 0	0 1 0 1	F 8 4 5
13	1 0 1 0	1 1 0 0	0 1 1. 0	1 1 0 0	A C 6 C
14	1 0 0 0	1 1 1 0	0 1 0 0	0 0 1. 1	8 E 4 3
15	1. 0 1 0	1 1 0 0	0 1 1 0	1 1 0 0	A C 6 C
16	0 1. 0 1	0 1 0 0	1 1 1 0	0 1 0 0	5 4 E 4
17	1 0 1. 0	0 0 0 0	1 0 1 0	0 0 0 0	A 0 A 0
18	0 1 0 1.	0 0 1 0	1 0 0 0	0 0 1 0	5 2 8 2
19	1 0 1 0	0 0 1. 1	1 0 0 1	0 0 1 1	A 3 9 3
20	1 0 0 0	1 1 0 0	1. 0 1 1	0 0 0 1	8 C B 1
21	0 0 0 0	0 1 0 0	0 1. 0 0	1 0 0 1	0 4 4 9
22	0 1 0 0	0 0 0 0	1 0 1. 1	1 1 0 1	4 0 B D
23	0 1 1 0	0 0 1 0	0 1 0 0	1. 1 1 1	6 2 4 F
24	1. 1 1 0	1 0 1 0	1 1 0 0	0 0 0 0	E A C 0
25	0 0 0 1.	0 0 1 0	0 1 0 0	1 0 0 0	1 2 4 8
26	1 1 1 0	0 0 1. 1	0 1 0 1	1 0 0 1	E 3 5 9
27	1 1 0 0	1 1 0 0	0 1. 1 1	1 0 1 1	C C 7 B
28	1 0 0 0	1 0 0 0	1 0 0 0	1. 1 1 1	8 8 8 F
29	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0

Figure 9 – Illustration of the Sign Method Algorithm

Source: author's development

Though the algorithm does not find the optimal solution, its analysis gives us useful insights. While tracing each step of the algorithm, we repeatedly identified combinations which could reliably bring us to the pre-final and final combinations much earlier than the algorithm did. This may be explained by the fact that the player does not analyze the current combination, rather she activates a cell that is provided by the rule, and not the one that is required by the logic. Therefore, when applying this algorithm, it is advisable not to mechanically follow its steps but to analyze each current combination in order to timely detect the pre-final one thus effectively impacting the algorithm flow in order to finish the game earlier. This will significantly reduce the number of steps and make the game much more interesting.

We tried finding more optimal algorithms that are based on the rigid sequence of actions. We called the first of them as the «stream» method. We have identified several modifications and optimization paths for it.

The «stream» method. The essence of this method for the 4x4 matrix is as follows.

All cells with code «0» of the input matrix are numbered from the first row to the last, traversing them clockwise (similar to the flow of the stream) (Fig. 10, 11).

Below we only use addresses of the numbered input cell. We activate the cell with number 1 in the input combination and get a combination with number 1 (see Figure 11). In the resulting combination we activate the cell that is located at the address of the cell with number 2, regardless of its contents. In combination number 2 we activate the cell with number 3 and so on. After activating the last numbered cell of the input matrix, we get a combination (No. 8 in Figure 11), which we set as the basis for further action.

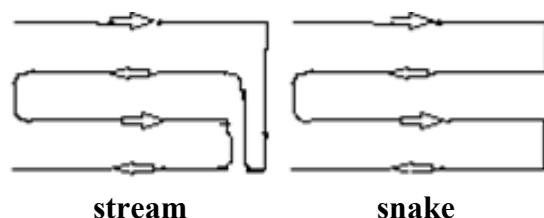


Figure 10 – Cell traversal type

Source: author's development

	Input	1	2	3	4	5	
	1 0 ¹ 1 0 ² 0 ⁵ 1 1 0 ³	0 1 0 1. 0 0 1 0	1 0 1 0 0 0 1 1.	1 0 1 1 1 1 0 0	1 0 1 0 1. 1 0 1	0 0 1 0 0 0 1 0	
	1 1 0 ⁶ 1 0 ⁸ 1 0 ⁷ 0 ⁴	1 0 0 1 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0 0 1	1 0 0 1 0 0 0 0.	1 0 0 0 1 1 1 1	0 0 0 0 0 1 1 1	
	6	7	Basic	1	2	3	
⇒	0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 1 0. 1	0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 0 1 1. 0 1 0	1. 0 1 ² 0 1 ³ 0 1 ⁴ 0 0 1 ⁵ 0 1 ⁶ 0 1 ⁷ 0 1 ⁸	0 1 0. 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1	1 0 1 0 0. 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1	0 0 1 0 1 1 1. 1 0 1 1 1 0 1 1 1	
	4	5	6	7	8		
⇒	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1. 0 1 0 1 0 1	0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0. 0 0 0 1	0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0. 0 0	0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 1 1 1 1.	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	The goal is achieved in 16 steps	

Figure 11 - Algorithm for solving the problem by the stream method

Source: author's development

Now we enumerate its cells which have code «1» by sequentially traversing the rows starting from the beginning of the first row to its end, then from the end of the second row to the beginning of it, again from the beginning of the third row to its end and from the end of the fourth row to its beginning.

This traversal looks like the snake movement (Fig. 10). Starting from the base combination we keep executing the sequence of steps of the described above algorithm by activating the cell with the next sequential number. Again we get combination number 1. We activate its cell with number 2, etc. After 16 steps we get the desired result - the «zero» combination.

The «snake» method differs from the «stream» method only by the way of traversing the positions of the input matrix while enumerating the cells. The cells of the input matrix and the following base matrix are numbered identically along the trajectory of the snake movement (Fig. 10). The sequence of actions in both algorithms is the same. In all combinations, namely incoming, base, and current, cells with the number and location of which are determined in the input and base matrices are activated. The method for determining the cell numbers and the traversal algorithm is presented in Fig. 12.

The simulation results showed that in order to reach the zero matrix by the snake method it is possible to start enumeration of the input matrix cells either with code «0» cells or code «1» cells. In any case the activation begins with the first numbered cell of the input matrix. In the base combination, cells with code «1» are enumerated. To reach the «unit» combination the cells with the code «0» of the input and base combinations are enumerated.

If the input matrix has the number of cells with zeros greater than 7, then it is desirable to change them to codes «1» at the first step. To do this, you need to activate a cell at the intersection of a row and a column with the largest number of zero cells. Then the resulted combination shall be taken as the input matrix and you need to perform the above sequence of actions on it. This procedure will reduce the number of steps, and therefore **optimizes the process**. An example of optimizing the exit process from the input matrix given in Fig. 12 to «zero» matrix is shown in Fig. 13. As the figure demonstrates the total number of steps is decreased by 2 in comparison to the example presented in Fig. 12, and the number of steps to reach the "zero" matrix from the simplified input matrix is 12.

	Input		1		2		3		4		5	
	1 0 ¹ 1 0 ²		0 1 0 1.		1 0 1 0		1 1 1 0		0 1 1 0		0 0 1 0	
	1 0 ³ 1 1	⇒	1 1 1 1	⇒	1 1. 1 0	⇒	0 0 0 1	⇒	1 0 0 1	⇒	1 1 0 1	⇒
	0 ⁴ 0 ⁵ 0 ⁶ 1	⇒	0 1 0 1	⇒	0 1 0 0	⇒	0. 0 0 0	⇒	1 1. 1 1	⇒	0 0 0. 0	⇒
	0 ⁹ 0 ⁸ 1 0 ⁷	⇒	0 1 1 0	⇒	0 0 1 1	⇒	0 0 1 1	⇒	1 0 1 1	⇒	1 1 1 1	⇒
	6		7		8		Basic		1		2	
⇒	0 0 0 0	⇒	0 0 0 1	⇒	0 1 0 1	⇒	1 ¹ . 1 ² 0 1 ³	⇒	0 0. 1 0	⇒	1 1 0 1.	⇒
	1 1 1 1	⇒	1 1 1 0	⇒	1 0 1 0	⇒	0 0 1 ⁴ 0	⇒	1 0 1 0	⇒	1 1 1 0	⇒
	1 1 1 1	⇒	1 1 1 0	⇒	1 0 1 0	⇒	0 0 1 ⁵ 0	⇒	1 0 1 0	⇒	1 1 1 0	⇒
	1 1 0 1.	⇒	0 0. 1 0	⇒	1, 1 0 1	⇒	0 0 1 ⁶ 0	⇒	1 0 1 0	⇒	1 1 1 0	⇒
	3		4		5		6					
⇒	0 0 1 0	⇒	0 0 0 0	⇒	0 0 1 0	⇒	0 0 0 0	⇒		⇒	The goal is achieved in 15 steps	
	1 1 1. 1	⇒	0 0 0 0	⇒	0 0 1 0	⇒	0 0 0 0	⇒		⇒		
	1 1 1 1	⇒	1 1 0. 1	⇒	0 0 1. 0	⇒	0 0 0 0	⇒		⇒		
	1 1 1 1	⇒	1 1 0 1	⇒	1 1 1 1	⇒	0 0 0 0	⇒		⇒		

Figure 12 - Algorithm for solving the problem by the snake method

Source: author's development

Analysis of feasibility for solving the "Flip-Flop" problem for the 3x4 matrix.

The number of final combinations for the 3x4 matrix is equal to the number of its cells $3 \times 4 = 12$. Since the 12 pre-final combinations can be obtained from $12 \times 11 = 132$ the pre pre-final ones, the probability of solving such problem is high.

Fig. 14 shows an example of solving the problem by using the above-mentioned «snake» method which can find a solution in 10 steps.

		Input	1	2	3	Basic
		1 0 1 0 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 1 0	1 1 1 0. ¹ 1 1 1 1 1 1 1 0 ² 0 ⁴ 1 1 0 ³	0 0 0 1 1 1 1 0 1 1 1 1. 0 1 1 1	0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 0.	0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1. 0 0 1
		1	2	3	4	5
		0 1 1 0. 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 0	1 0 0 1 1 1 1. 0 0 0 0 1 1 1 1	1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 1 1 0 1	1 1 1 1 1 1 1 1 0. 1 1 0 1 0 0 1	0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 1. 0 0 0 1
		7	8			
		0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 1. 1 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0			
						The goal is achieved in 13 steps

Figure 13 – An example of optimizing the solution process using the snake method

Source: author's development

When you get to the basic combination, the question arises if we need to enumerate cells with units or zeros. When enumerating cells with code «1» the process proved to be long, and enumerating of zeros quickly leads to the solution. It required 17 steps to solve the problem by the sign method, however the player has to timely detect the pre pre-final combination and «manually» interfere in the solution process. It is encouraging that the above methods were also suitable for matrices of size $m \times n$. However, solving the problem for matrices of higher dimension were not investigated in detail.

	Input	1	2	3	4	5
	0. ¹ 1 0 ² 1 1 1 0 ³ 1 1 0 ⁴ 0 ⁵ 0 ⁶	1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0	0 1 0 1 0 1 1 0 0 0 1 0	0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0	0 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1	0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0
	Basic	7	8	9	10	11
	0. ¹ 0 ² 0 ³ 0 ⁴ 1 1 1 1 1 1 1 1	1 1. 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1	0 0 0. 0 0 0 1 1 0 0 1 1	1 1 1 1. 0 0 0 1 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	The goal is achieved in 10 steps

Figure 14 - An example of optimizing the solution process of the snake method

Source: author's development

Conclusions. The results of the study showed that applying logical analysis to each combination in 4x4 and higher dimensionality matrices in order to find the optimal next step is a complex and inefficient process.

To solve the problem at hand it is necessary to find non-standard approaches such as the method of identifying distinct features and using them in the course of the algorithm development; the method for allocating cells with code «1» or «0» in the input matrix along with their enumeration rules and developing on this basis the rules for finding the successful sequence of actions (i.e. «stream» and «snake» methods). When optimizing these algorithms, it is necessary to analyze the current combinations and either timely interfere in the process (like in the sign method) or pre-process the input matrix in order to optimize the number of cells with code «0» or «1» (like in the «snake» method).

Список літератури

1. Раскин М.А. Введение в теорию игр // Летняя школа «Современная математика». Дубна, 2008. URL: <https://www.mccme.ru/dubna/2008/courses/raskin.htm> (дата обращения: 08.11.2019)
2. Мазалов В.В. Математическая теория игр и приложения. – Санкт-Петербург - Москва - Краснодар: Лань, 2010. 446 с.
3. Яблонский С.В. Введение в дискретную математику. Москва: Высш. шк., 2003. 384 с.
4. Міщенко Н. Штучний інтелект-виклик часу. *Науковий світ*. 2006. № 10. С. 12-13
5. Виленкин Н.Я. Популярная комбинаторика. Москва: Наука, 1975. 208 с.

References

1. Raskin, M.A. (2008). Vvedeniye v teoriyu igr // Letnyaya shkola «Sovremennaya matematika». Dubna, www.mccme.ru. Retrieved from: <https://www.mccme.ru/dubna/2008/courses/raskin.htm> [in Russian].
2. Mazalov, V.V. (2010). *Matematicheskaya teoriya igr i prilozheniy [Mathematical game theory and applications]*. Sankt-Peterburg - Moskva - Krasnodar: Lan' [in Russian].
3. Yablonskiy, S.V. (2003). *Vvedeniye v diskretnuyu matematiku [Introduction to Discrete Mathematics]*. Moscow: Vyssh. shk. [in Russian].
4. Mishchenko, N. (2006). Shtuchniy intelekt-viklik chasu [Artificial Intelligence Challenge of Time]. *Naukoviy svit*, № 10, 12-13 [in Ukrainian]
5. Vilenkin, N.YA. (1975). *Populyarnaya kombinatorika [Popular combinatorics]*. Moscow: Nauka [in Russian].

Ю.М. Пархоменко, доц., канд. техн. наук, **М.Д. Пархоменко**, **Л.В. Робакова**, **А.Р. Бокій**
Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
Дослідження методів розв'язання ігор-головоломок типу «Flip-Flop»

Метою статті є визначення методів розв'язання задачі зведення довільної комбінації кодів матриці, з мінімальним числом кроків, до одних «0» або «1» та побудова алгоритмів, які забезпечать цей процес.

Як показала практика гри «Flip-Flop», досягнення мети - зведення довільної комбінації кодів матриці, в результаті кінцевого числа кроків, до одних «нулів» або «одиниць», шляхом аналізу ситуацій отриманих після кожного кроку, є задачею не простою. Логіку зміни комбінацій на два, три кроки уперед важко передбачити, так як навіть в матриці 4×4 з кожним кроком одночасно змінюється вміст семи комірок із 16. Тому, без визначення алгоритму послідовності дій, задача розв'язання даної головоломки, навіть при необмеженому числі кроків, не завжди досяжна. З метою визначення методів розв'язання задачі - алгоритмів виконання послідовності дій, які гарантовано або з мінімальною кількістю кроків забезпечать формування «0»-ї або «1»-ї матриці на основі довільно заданої початкової комбінації, було детально досліджено процес формування комбінацій двійкових кодів матриці розміром $m \times n$ при активації окремих її комірок і методів прийняття рішень.

У роботі приведені результати дослідження методів розв'язання комп'ютерних ігор-головоломок типу «Flip-Flop» з матрицями розміром 3×3 , 3×4 , 4×4 з використанням методів логічного аналізу ситуацій, комбінаторики та дискретної математики. З'ясували, що застосування методу логічного аналізу кожної поточної комбінації, який добре працює в матрицях розміром 3×3 , в матрицях 4×4 і вище, для прийняття оптимального рішення при визначенні наступного кроку, є процесом складним і неефективним. Тому вирішили шукати алгоритми у визначенні постійної послідовності дій за певною ознакою. Розглянули та проаналізували методи виділення певних ознак, метод «струмка» та метод «змійки».

Виконані дослідження показали, що для оптимізації кількості кроків, при застосуванні вказаних алгоритмів, необхідно аналізувати поточні комбінації і своєчасно вмішуватися в процес, або попередньо обробити вхідну матрицю, з метою оптимізації кількості комірок з кодами «0» або «1».

комп'ютерні ігри-головоломки, логічний аналіз ситуацій, комбінаторика, дискретна математика метод виділення ознак, метод «струмка», метод «змійки»

Одержано (Received) 11.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 16.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

УДК 681.58

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).201-208](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).201-208)

В.В. Смирнов, доц., канд. техн. наук, **Н.В. Смирнова**, доц., канд. техн. наук
Центральнoукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна
e-mail: swckntu@gmail.com

Использование статистических методов в системе радиуправления робототехническим объектом

Приведена реализация системы управления радиоуправляемым объектом в условиях потери связи с оператором. В общий контур радиуправления объектом введен локальный регулятор, который позволил стабилизировать объект управления в условиях автономного аварийного режима. Для уменьшения влияния случайных возмущений на объект управления в систему управления введен статистический блок, реализующий положения теории принятия статистических гипотез. Уменьшено время реакции системы на изменение значения задающего воздействия. Разделены циклы получения задающего воздействия и циклы управления сервоприводами.

система управления, сервопривод, люфт, объект, статистическая гипотеза

В.В. Смірнов, доц., канд. техн. наук, **Н.В. Смірнова**, доц., канд. техн. наук
Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Використання статистичних методів в системі радіоуправління робототехнічним об'єктом

Наведено реалізація системи управління керованим по радіо об'єктом в умовах втрати зв'язку з оператором. У загальний контур радіоуправління об'єктом введений локальний регулятор, який дозволив стабілізувати об'єкт управління в умовах автономного аварійного режиму. Для зменшення впливу випадкових збурень на об'єкт управління в систему управління введений статистичний блок, який реалізує положення теорії прийняття статистичних гіпотез. Зменшено час реакції системи на зміну значення впливу що задається. Розділені цикли отримання впливу що задається і цикли управління сервоприводами.

система управління, сервопривід, люфт, об'єкт, статистична гіпотеза

Постановка проблемы. В настоящее время существует много разновидностей недорогих систем радиуправления робототехническими объектами различного назначения. В составе системы радиуправления находится оператор, который и осуществляет управление объектом при визуальном контакте с ним или по данным телеметрии.

В такой системе управления оператор является задатчиком и регулятором. Оператор передает объекту задающее воздействие и в процессе управления объектом

визуально или по данным телеметрии вручную компенсирует все отклонения в поведении объекта, вызванные люфтами в исполнительных механизмах, ошибками позиционирования рулей, возмущающими воздействиями и прочими дестабилизирующими факторами.

Однако возникают ситуации, когда теряется связь с объектом управления или пропадает визуальный контакт оператора с управляемым объектом. Тогда проблемой становится управляемость объекта, поскольку из системы управления выпадает основное звено – оператор, выполняющий функции задатчика и регулятора.

В этом случае, случайные возмущения и люфты в исполнительных механизмах учтены не будут, что может привести к непредсказуемому поведению объекта управления. В больших робототехнических системах специального назначения (военного, метеорологического, картографического и пр.) указанная проблема решена, однако в малых и недорогих радиоуправляемых робототехнических системах остается проблема возникновения аварийной ситуации при потере управляемости.

Анализ исследований и публикаций. Исполнительные механизмы на базе сервоприводов являются системами с запаздыванием. Установлено, что наибольшее отрицательное влияние на качество систем управления с запаздыванием оказывают нелинейности типа люфт [1].

Типовая структура системы управления БПЛА в своих передаточных функциях не учитывает такие нелинейности [2].

Архитектура системы управления БПЛА типа «Каскад1» избыточна для недорогих радиоуправляемых систем и не в полной мере решает проблему качества управления объектом в системе с запаздыванием [3].

В работе [4] описана система радиоуправления легкими БПЛА на базе оборудования фирмы Futaba. Данная система не обладает свойством синхронного управления сервоприводами и не учитывает случайные возмущения и влияние люфтов в исполнительных механизмах на качество управления объектом.

Постановка задачи. С целью улучшения характеристик системы управления радиоуправляемого объекта, в том числе при потере связи с оператором, необходимо решить следующие задачи:

- уменьшить время передачи задающего воздействия системе управления сервоприводами;
- компенсировать влияние на объект управления случайных возмущений и люфтов исполнительных механизмов на основе методов математической статистики.

Изложение основного материала. Для реализации системы управления и выполнения поставленных задач необходимо разработать архитектуру аппаратного и программного обеспечения системы управления.

На рис. 1 представлена простая типовая структурная схема системы радиоуправления с общей петлей обратной связи, неотъемлемой частью которой является оператор.

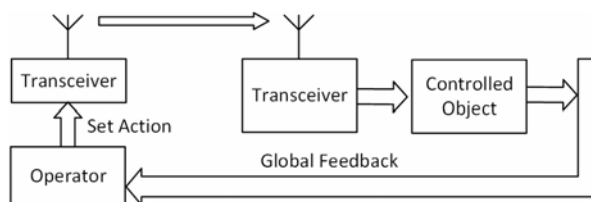


Рисунок 1 – Система радиоуправления объектом с общей петлей обратной связи

Источник: разработано автором

На рис. 2 представлена структурная схема системы радиуправления с двумя петлями обратной связи: общей и локальной.

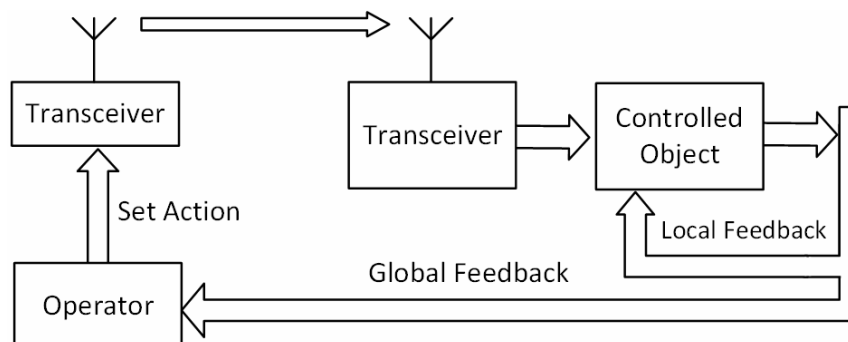


Рисунок 2 – Система радиуправления с общей и локальной петлей обратной связи
Источник: разработано автором.

Введение в структуру объекта управления локальной обратной связи дает возможность осуществить компенсацию люфтов и ошибок позиционирования рулевых механизмов непосредственно в объекте без участия оператора с помощью простого ПИД – регулятора, закон управления которого описывается выражением:

$$u(t+1) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

где e – ошибка отклонения, K , T_i , T_d – пропорциональный коэффициент, постоянная интегрирования и постоянная дифференцирования соответственно;

$u(t+1)$ – управляющее воздействие для следующего цикла управления сервоприводами - импульс, длительность которого изменяется регулятором (рис. 3).

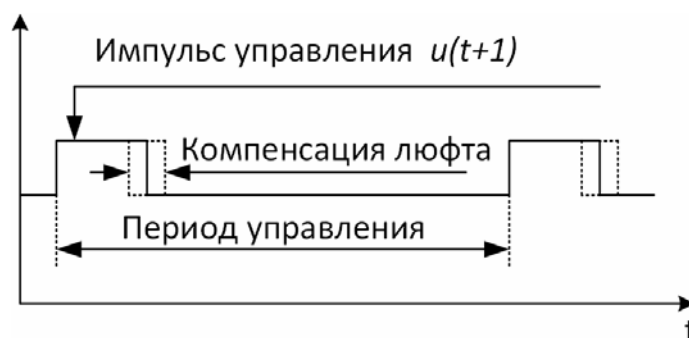


Рисунок 3 – Коррекция длительности управляющего импульса при компенсации люфта исполнительного механизма

Источник: разработано автором

При потере объектом управления связи с оператором, объект переходит в аварийный автономный режим и движется к точке старта для возобновления связи с оператором. В автономном режиме становится актуальной компенсация люфтов и ошибок позиционирования рулевых механизмов.

На объект воздействуют случайные аддитивные возмущения, которые не приводят к нарушению функционирования объекта (ложные тревоги), однако дестабилизируют регулятор и систему управления в целом.

Для уменьшения влияния случайных аддитивных возмущений на процесс регулирования необходимо введение статистического блока, который будет принимать решения (гипотезы) о значимости влияния случайного возмущения на объект управления.

Тем самым будут улучшены характеристики системы управления объектом за счет снижения количества ложных тревог, на которые реагирует ПИД – регулятор.

Статистический блок выполняет функцию принятия статистических гипотез H_0 и H_1 при изменении значения регулируемого параметра объекта управления.

В основу теории проверки статистических гипотез положен критерий отношения правдоподобия [5]:

$$L(r) = \prod_{k=r}^n \frac{p_1(y_k)}{p_0(y_k)}, \quad (2)$$

$$\text{где } p_i(y_k) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(y_k - \mu_i)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (i = 0,1).$$

Логарифмирование выражения (2) дает статистику критерия [5]:

$$L_n(r) = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma^2} \sum_{k=r}^n (u_k - \frac{\mu_1 + \mu_0}{2}) = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma^2} \sum_{k=r}^n (y_k - \mu_0 - \frac{\mu_1 - \mu_0}{2}) = \frac{1}{\sigma^2} S_r^n(\mu_0, \nu), \quad (3)$$

где r – момент изменения регулируемого параметра y ;

μ_0 – математическое ожидание значения регулируемого параметра y ;

μ_1 – математическое ожидание значения регулируемого параметра y при влиянии дестабилизирующих воздействий;

В этом случае, критерий для принятия гипотез имеет вид:

$$g_n = \max_r S_r^n(\mu_0, \nu) \begin{cases} H_1 > \lambda \\ H_0 < \lambda \end{cases}, \quad (4)$$

где λ – пороговое значение критерия для принятия гипотезы H_0 или H_1 ;

S – накопительная сумма.

Реализация системы управления объектом реализуется следующим алгоритмом:

- при незначительном уровне случайных аддитивных возмущений принимается гипотеза H_0 . ПИД-регулятор не реагирует на изменения значений датчиков, вызванных аддитивными возмущающими воздействиями.

- при продолжительных возмущающих воздействиях принимается гипотеза H_1 . В этом случае ПИД-регулятор осуществляет компенсацию ошибки отклонения e путем изменения длительности управляющего импульса, обнуляется накопительная сумма S и принимается гипотеза H_0 .

На рис. 4 представлена функциональная схема разработанной системы радиоуправления на стороне объекта управления.

Система управления на стороне объекта управления состоит из приемопередатчика, трех контроллеров MCU 1, MCU 2 и MCU 3, сервоприводов, рулевых механизмов и датчиков положения рулей.

Контроллер MCU 1 взаимодействует с приемопередатчиком посредством интерфейса UART, а с контроллером MCU 2 и MCU 3 посредством интерфейса SPI. Скорость интерфейса UART составляет 19,2 Кбод, а SPI - 3 Мбит/сек.

Контроллер MCU 1 выполняет следующие задачи:

- получает управляющие пакеты от передатчика по интерфейсу UART и передает данные телеметрии;
 - получает цифровые значения датчиков положения рулей от контроллера MCU 3 по интерфейсу SPI;
 - принимает статистические гипотезы H_0 или H_1 на основании значений датчиков положения, уровня и длительности аддитивных возмущающих воздействий и заданного порогового значения λ ;
 - формирует управляющие воздействия для каждого ПИД-регулятора сервоприводов;
 - передает сформированное управляющее воздействие контроллеру MCU 2.
- Контроллер MCU 2 выполняет задачи:
- получает управляющие воздействия от контроллера MCU 1;
 - осуществляет синхронное управление пулом сервоприводов объекта управления.

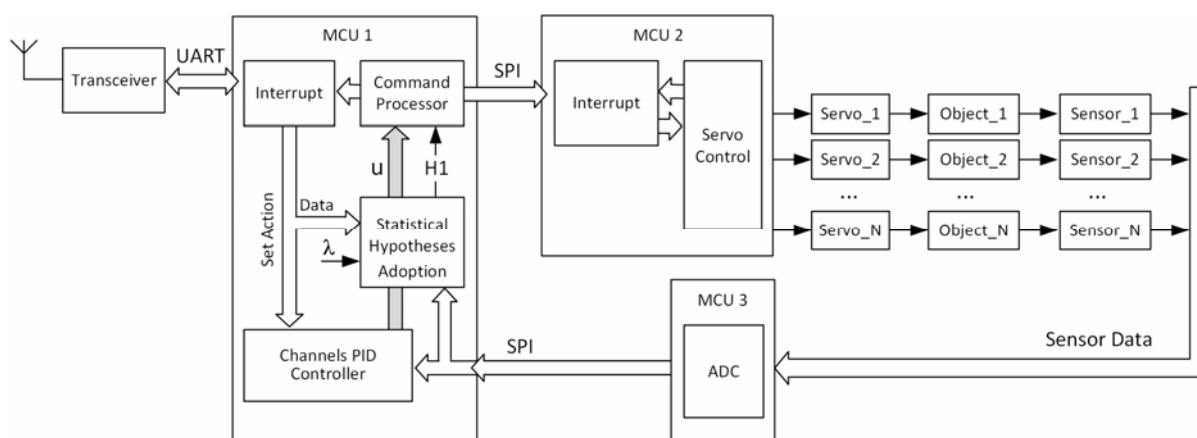


Рисунок 4 – Функциональная схема системы радиуправления на стороне объекта управления

Источник: разработано автором

Контроллер MCU 3 выполняет задачи:

- получает аналоговые данные от датчиков положения рулей;
- оцифровывает данные и передает их контроллеру MCU 1.

Временные диаграммы работы системы радиуправления на стороне объекта управления представлены на рис. 5.

Временные диаграммы, показывающие отсутствие влияния цикла приема управляющего воздействия на длительности цикла управления пулом сервоприводов объекта управления представлены на рис. 6.

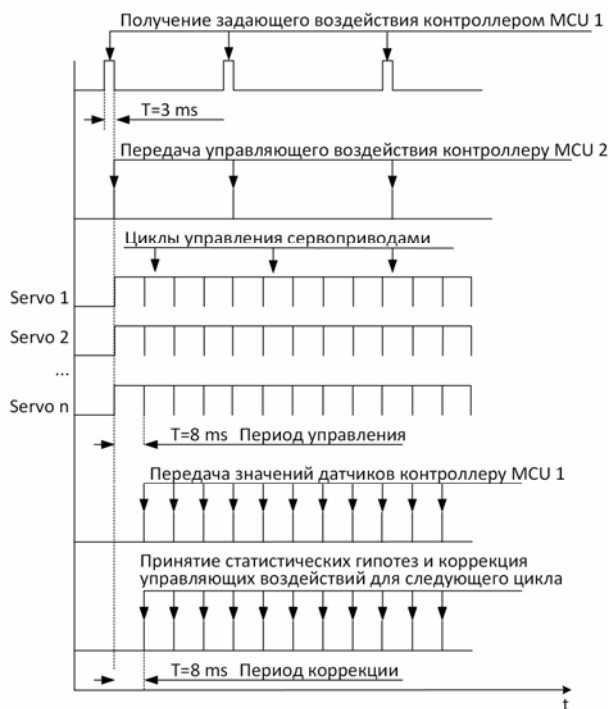


Рисунок 5 – Временные диаграммы работы системы радиуправления на стороне объекта управления
 Источник: разработано автором

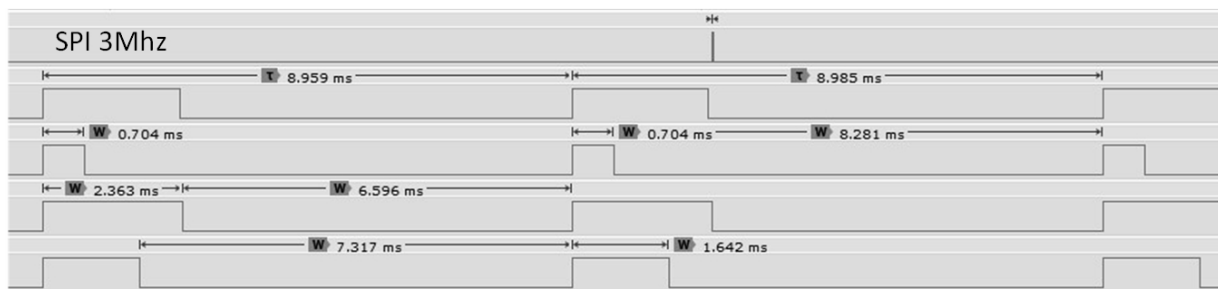


Рисунок 6 – Отсутствие влияния цикла приема управляющего воздействия на длительности цикла управления пулом сервоприводов
 Источник: разработано автором

Из рисунка следует, что время передачи управляющего воздействия контроллеру MCU 2 составляет около 0,03 ms и увеличивает длительность цикла управления сервоприводами с 8,959 ms до 8,985 ms, чем можно пренебречь.

Выводы. Использование статистических методов, в частности, критерия отношения правдоподобия для принятия статистических гипотез позволяет уменьшить воздействие случайных возмущений на ПИД – регулятор.

Реализация разработанной системы управления показала ее эффективность как при ручном управлении радиоуправляемым объектом, так и в автономном режиме при потере связи с объектом управления. Объект остается устойчивым и четко выполняет команды программы аварийного режима.

Регулятор осуществляет компенсацию люфтов и ошибок позиционирования рулевых механизмов в следующем цикле управления сервоприводами с задержкой 8 ms.

Созданная система управления радиоуправляемыми робототехническими объектами может служить базой для расширения их целевых функций.

Для дальнейшего улучшения качественных характеристик системы управления целесообразно исследовать возможность компенсации ошибок позиционирования рулевых механизмов в текущем цикле управления сервоприводами

Список літератури

1. Као Тиен Гуинь Нелинейное управление непрерывными процессами с запаздыванием : дис. д-ра техн. наук : 05.13.07 / Одесса, 1984. 372 с. URL: <https://www.dissercat.com/content/nelineinoe-upravlenie-nepreryvnymi-protsessami-s-zapazdyvaniem> (дата обращения: 02.11.2019).
2. Структура системы управления беспилотным летательным аппаратом. URL: <https://poznayka.org/s99419t1.html> (дата обращения: 06.11.2019)
3. Архипкин А.В. Аппаратура передачи данных для комплекса с БЛА легкого класса. *Сборник докладов и статей по материалам II-й научно-практической конференции. Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами.* 2017. Коломна. С. 29-34. URL: <https://stat.mil.ru/files/morf/Sbornik-konferencii-2017.pdf> (дата обращения: 10.11.2019).
4. Андреев В.Л., Иванов Р.В., Козлов Е.Б., Потупчик С.Г., Соколов П.В. Системы управления малоразмерными дистанционно пилотируемыми самолетами. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение.* 2011. Т. 54. № 8. С. 48-57. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-upravleniya-malorazmernymi-distantsionno-pilotiruemymi-samoletami/viewer> (дата обращения: 11.11.2019).
5. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем / Бассвиль, А. и др. / пер. с англ. И. Б. Вильховченко. Москва : Мир, 1989. 278 с.

Referencis

1. Kao Tiyen Guin'. (1984). Nelineynoye upravleniye nepreryvnymi protsessami s zapazdyvaniyem [Non-linear control of continuous processes with delay]: 05.13.07. *Doctor's thesis.* Odessa. *dissercat.com*. Retrieved from <https://www.dissercat.com/content/nelineinoe-upravlenie-nepreryvnymi-protsessami-s-zapazdyvaniem> [in Russian].
2. Struktura sistemy upravleniya bespilotnym letatel'nyim apparatom [The Unmanned Aerial Vehicle Control System Structure]. (n.d.). *poznayka.org*. Retrieved from <https://poznayka.org/s99419t1.html> [in Russian].
3. Arkhipkin A.V. (2017) Apparatura peredachi dannykh dlya kompleksa s BLA legkogo klassa [Data transmission equipment for a complex with a light UAV]. *Perspektivy razvitiya i primeneniya kompleksov s bespilotnymi letatel'nyimi apparatami '17: Sbornik dokladov i statey po materialam II-y nauchno-prakticheskoy konferentsii - Prospects for the development and use of complexes with unmanned aerial vehicles '17: Collection of reports and articles based on the materials of the 2nd scientific and practical conference.* (pp. 29-34.). Kolomna. Retrieved from <https://stat.mil.ru/files/morf/Sbornik-konferencii-2017.pdf> [in Russian].
4. Andreyev, V.L., Ivanov, R.V., Kozlov, Ye.B., Potupchik, S.G. & Sokolov, P.V. (2011). Sistemy upravleniya malorazmernymi distantsionno pilotiruyemyimi samoletami [Control systems for small remotely piloted aircraft]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye - News of higher educational institutions. Instrument making. Vol 54. No. 8.* 48-57. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-upravleniya-malorazmernymi-distantsionno-pilotiruemymi-samoletami/viewer> [in Russian].
5. Basseville, M., Willsky, A., Banveniste, A., Deshayes, J., Picard, D., Nikiforov, I. et al. (1989) *Obnaruzheniye izmeneniya svoystv signalov i dinamicheskikh sistem [Detection of abrupt changes in signals and dynamical systems]* (I. B. Vilkhovchenko, Trans). Moscow: Mir. [in Russian].

Volodymyr Smirnov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Natalia Smirnova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The Statistical Methods Using In The Robotic Object Radio Control System

The purpose of the article is to improve the characteristics a radio-controlled object servo drive pool control system in case of communication loss and solve the problems: reduce the transmission time of the driving influence to the object control system, the influence compensate for random disturbances and actuators backlash on the control object based on mathematical statistics methods.

The article describes the radio-controlled object control system implementation. It is shown that the operator acts as a regulator. The problems that arise when the connection between the control object and the operator are lost are considered. The influence of random disturbing on the control object is considered. The use

of statistical methods in the facility control system is proposed. A statistical method is used that implements the statistical hypotheses theory acceptance. As a hypotheses criterion for the adoption, a likelihood ratio criterion was used. It is shown that in the autonomous mode it is necessary to compensate for backlash and random disturbances. The functional diagram of the control system is developed. The architecture of the control program is developed. The cycle of obtaining the driving action and the control cycle of servos are divided. Reduced response time of the system to a change in the set action value. The receiving cycle the master action has a duration of 0.03 ms. The servo control cycle has a value from 8 ms.

Implementation of the developed servo pool management system has shown the effectiveness of the selected architecture for creating software and hardware for radio-controlled robotic systems. Solved tasks to reduce the transmission time of the master object exposure control system to minimize the influence of the time delay cycle master receiving the impact on the duration and servo control loop is provided a synchronous servo control pool.

control system, servo, backlash, object, statistical hypothesis

Одержано (Received) 25.11.2019

Прорецензовано (Reviewed) 10.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

УДК 004.4'23:004.057.5 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).208-213](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).208-213)

Nikita Shevtsiv, Graduate Student, **Dmitriy Shvets**, Senior Lecturer, **Nadezhda Karabut**, Senior Lecturer

Kyryvi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: i.am.dmitriy.shvets@gmail.com

Prospects for Using React Native for Developing Cross-platform Mobile Applications

The article is devoted to the study of determining the best methods and tools for cross-platform development of mobile applications, allowing to accelerate the process of writing application program code. The analysis of the existing technologies used to write mobile applications is carried out, their advantages and disadvantages are considered. The nuances of using the React Native framework, the mechanism of its work, the advantages of working with it are described. The data on the interest of developers in the React Native framework, search trends, the number of downloads of its installation package have analyzed.

React Native, framework, Android, iOS, mobile application, development

Н. А. Шевцов, магистрант, **Д. В. Швец**, ст. препод., **Н. А. Карабут**, ст. препод.

Криворожский национальный университет, г. Кривой Рог, Украина

Перспективы применения React Native для разработки кроссплатформенных мобильных приложений

Статья посвящена исследованию вопроса определения оптимальных методов и инструментальных средств кроссплатформенной разработки мобильных приложений, позволяющих ускорить процесс написания программного кода приложения. Проведен анализ существующих на сегодняшний день технологий, используемых для написания мобильных приложений, рассмотрены их преимущества и недостатки. Описаны нюансы использования фреймворка React Native, механизм его работы, преимущества работы с ним. Проанализированы данные о заинтересованности разработчиков во фреймворке React Native, поисковых трендах, количестве скачиваний его установочного пакета.

React Native, фреймворк, Android, iOS, мобильное приложение, разработка

Statement of the problem. Traditionally, the process of developing mobile applications has been divided into two parts – creating an application for the Android operating system using the Java programming language, and developing a product for the iOS platform, for which the Objective C programming language was used.

However, the use of this approach significantly increases the time of writing code, accordingly, the cost of developing the application. In this regard, it seems appropriate to search for solutions that allow for cross-platform development of mobile applications, taking into account modern ergonomic requirements and, at the same time, providing the opportunity to significantly reduce the time spent on writing code.

Analysis of recent research and publications. One of the possible options for cross-platform development of mobile applications is the Apache Cordova framework [1]. This framework allows you to create applications for mobile devices using CSS3, HTML5 and JavaScript, instead of using specific API platforms such as Android, IOS or Windows Phone. This is achieved by converting from CSS, HTML and JavaScript to code that any platform perceives as a web element. This approach extends the capabilities of HTML and JavaScript to work with various devices [2]. The result of development is a hybrid application that has the features of both a web and a mobile application. However, the described technology has several disadvantages:

- Existing plugins for Apache Cordova quickly become obsolete and developers need to write independently;
- The application runs in the browser, which causes difficulties in obtaining feedback from the native application;
- Often there are problems with optimizing the application and its fast and stable operation.
- Ergonomics of applications developed using Apache Cordova, loses significantly compared to native applications.

Xamarin [3] is a framework for cross-platform development of mobile applications (iOS, Android, Windows Phone) using the C # language. This technology allows you to take advantage of the C # language in development, allowing you to get an application that practically does not differ in performance from native ones. The disadvantages of Xamarin are the larger application size, limited access to open-source libraries, limited ecosystems, and the complexity of developing applications with high-performance graphics.

PWA technology was developed by designer Frances Berriman and Google Chrome engineer Alex Russell back in 2015. It allows you to add sites the capabilities of applications for mobile devices (in particular, installed on smartphones, work offline, deliver push notifications). PWA applications are quite simple to develop, which leads to cheaper development compared to native applications. However, PWA does not allow access to most functions of the smartphone (calls, SMS, calendar, camera, sensors, etc.), and, in addition, it is not supported by all browsers.

Flutter [4] – Google’s development in the form of an open source SDK for creating mobile applications. Flutter, unlike a number of analogues, does not use JavaScript. As a programming language for Flutter, Dart is chosen, which is compiled into binary code, thereby achieving a speed of operations comparable to Objective-C, Swift, Java, or Kotlin [5]. The disadvantages of development can be considered the instability of work, which is due to the relative youth of the project. This also explains the small number of existing libraries for Flutter and information on working with this technology.

Statement of the objective. The objective of the research is to determine the best methods and tools for cross-platform development of mobile applications to speed up the process of coding applications.

Statement of the main material. One of the most promising tools for solving tasks today is React Native [6-9]. This tool was created as a tool that allows you to write program code for a single application and receive a mobile application on various mobile platforms. The tool was designed to fix flaws that made it difficult to use Apache Cordova.

React Native is a Javascript framework based on the React library for developing cross-platform iOS and Android platform applications, released in 2015 by Facebook.

The main mechanism of React Native's operation is that each React Native application has two threads:

- Main thread - runs in absolutely every native application. It handles the display of user interface elements and user gestures.
- JavaScript stream - executes JavaScript code in a separate engine. JavaScript deals with the business logic of the application and defines its functionality.

The so-called bridge, the core of React Native, is responsible for the interaction between the two threads. It serves as an intermediary that directs requests and incoming data from two streams. This approach allows them to interact asynchronously, which ensures stable operation, protecting against mutual blocking of flows.

Other JavaScript solutions for mobile platforms simply wrap your JS code in a web view.

The final application running on the phone uses native code (Java for Android, Objective-C for iOS). The compilation results in the same application as written in the native language: controls, appearance and gestures work the same way as in the native application.

React Native provides high performance, especially when working with fast-changing data. Thanks to its component structure, React Native encourages you to write modular, reusable code. Greater speed is achieved through incremental assembly - only modified modules are reassembled, not the entire assembly.

All changes in the JS code are immediately visible in the simulator, which greatly speeds up development, while in Java, the developer each time has to start the application manually.

In order to develop applications on React Native, knowledge and experience in Java / Kotlin for Android or Objective-C / Swift for iOS are not required. But understanding HTML, CSS and the fundamental knowledge of React itself will be enough for the initial stages of work. This framework turns any web developer into a potential developer of mobile applications, significantly improving the process of creating them.

Used in React JavaScript XML (JSX) is an extension of JavaScript syntax. XML / HTML-like JSX extends ECMAScript so that XML / HTML-like text can coexist with JavaScript / React code. The syntax is intended for use by preprocessors (i.e., transpilers such as Babel) to convert HTML-like text found in JavaScript files to standard JS objects that the engine will analyze. It is also possible to use React Native without it, but the opposite is recommended, since JSX describes the appearance of the UI as clearly as possible, while including all the JavaScript features. Like HTML / XML, JSX tags have names, attributes, and children.

There are 5 ways to style the React Native UI components in 2019:

- Inline CSS
- CSS in JS
- Styled Components
- CSS Modules
- Stylable

The way of styling is the key to modularity, for the possibility of scaling the code base. These styling techniques help to avoid common scalability issues that slow down development speed.

The life cycle of all React Native components is completely different from iOS and Android. If you focus on the differences from native systems, then:

- UI elements themselves change state / appearance when changing input parameters;
- On Android, there is no need to manage onSaveInstanceState. React Native does this on its own;
- on iOS, there are no methods that directly explicitly report the moment the application screens appear / hide.

However, React Native has its drawbacks.

Often a project stops building, for example, after:

- React Native kernel updates (including when updating the minor version);
- updates of npm modules;
- Xcode updates;
- CocoaPods updates (a fairly common problem);
- the need to write a large amount of native code for advanced projects.

To assess interest in technologies in the field of mobile application development, we will consider data on their use. The development effectiveness to a large extent depends on the interest of the developer in the technology that he uses to create the application. Figure 1. shows the data of the Medium.com resource [10] about frameworks, libraries and tools that:

- developers like

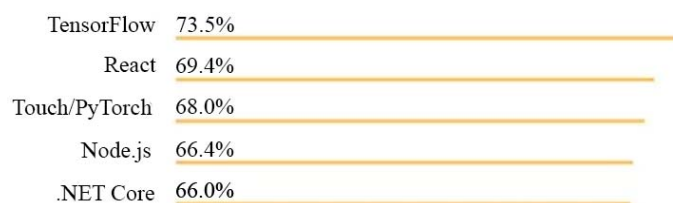


Figure 1 – Attitude of developers to technology

Source: developed by the authors

- wish to study the technology and work with it:



Figure 2 – Interest in the study of technology

Source: developed by the authors

To assess interest in technologies in this industry, we use the following metrics [10]:

- Google search trends [11].

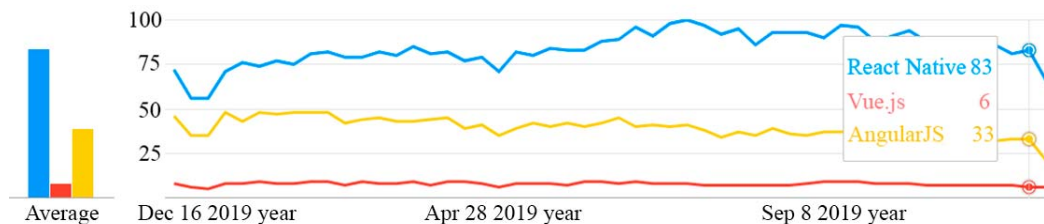


Figure 3 – Google search trends

Source: [11]

For search queries, React overtook Angular in January 2018 and maintained leadership throughout the year. Vue.js began to take a visible, but still relatively insignificant position.

- Number of downloads [10]. This parameter allows you to evaluate the actual use: installing the package, as a rule, means its necessity for the workflow.

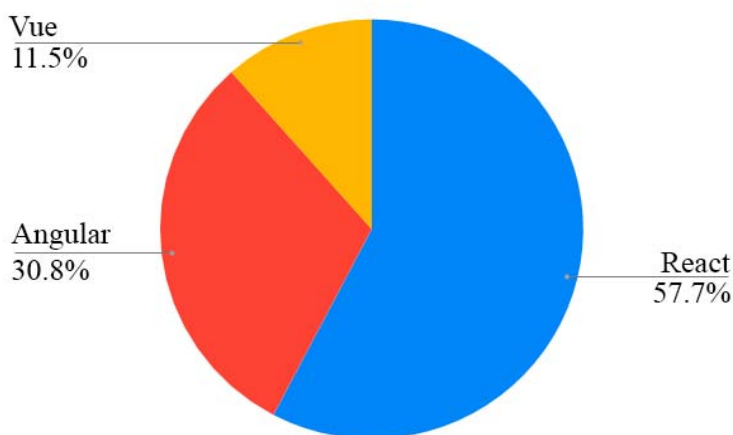


Figure 4 – The number of downloads of installation packages

Source: [10]

Conclusions. React Native has a serious development prospect given its ever-growing popularity among mobile application developers. React Native has been constantly reinforcing its position on the labor market and relevance since its development for three years. In addition, studying the React Native framework is useful due to the fact that while studying this technology, students simultaneously encounter a stack of web technologies and the intricacies of developing applications for the Android and iOS platforms. In general, React Native provides high-quality cross-platform mobile development and can significantly increase the speed of developing mobile applications.

References

1. Apache Cordova. URL: <https://cordova.apache.org/> (Last accessed: 03.11.2019)
2. Мобильная среда разработки приложений Apache Cordova. URL: https://flexberry.github.io/ru/gbt_cordova.html (Last accessed: 07.11.2019)
3. Xamarin – an app platform for building Android and iOS apps with .NET and C#. URL: <https://dotnet.microsoft.com/apps/xamarin> (Last accessed: 07.11.2019)
4. Flutter – Google’s UI toolkit for building natively compiled applications for mobile, web, and desktop. URL: <https://flutter.dev/> (Last accessed: 17.11.2019)
5. Flutter. URL: <https://habr.com/ru/post/430918/> (Last accessed: 14.11.2019)

6. Темиргалиев Ж.Е. Особенности разработки геолокационных приложений для мобильных устройств с помощью фреймворка React Native. ИнтерКарто. ИнтерГИС: материалы Международной конференции 2019. Вып. 25(1). С.414–422 <http://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-1-25-414-422>
7. Lazcano Calixto, Ricardo Nefitali, Valencia González, Luis Ángel, Baena Díaz, Daniel Esteban y Venegas Guzmán, Ricardo. (2019). React Native: acertando las distancias entre desarrollo y diseño móvil multiplataforma / Revista Digital Universitaria (RDU). Vol.20 (5). DOI:<http://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2019.v20n5.a5>
8. BRITO, H. et al. Javascript in mobile applications: React native vs ionic vs nativescript vs native development [javascript em aplicações móveis: React native vs ionic vs nativescript vs desenvolvimento nativo] / IEEE Computer Society, 2018. v. 2018-June, p. 1– 6
9. H. Brito, Á. Santos, J. Bernardino, A. Gomes. Mobile development in Swift, Java and React Native: an experimental evaluation in audioguides / 2019 14th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), Coimbra, Portugal, 2019, pp. 1-6. doi: 10.23919/CISTI.2019.8760864
10. JavaScript: топ тем и фреймворков для изучения в 2019 году. URL: <https://medium.com/web-standards/top-js-2019-1116718b2b67> (Last accessed: 18.11.2019)
11. Google Trends. URL: <https://trends.google.ru> (Last accessed: 18.11.2019)

Н. А. Шевців, магістрант, **Д. В. Швець**, ст. викл., **Н. О. Карабут**, ст. викл.
Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна

Перспективи застосування React Native для розробки кросплатформних мобільних додатків

Стаття присвячена дослідженню питання визначення оптимальних методів і інструментальних засобів кросплатформної розробки мобільних додатків, що дозволяють прискорити процес написання програмного коду додатків. Актуальність досліджень полягає в тому, що традиційно процес розробки мобільних додатків складається з двох частин – розробки програмного продукту для платформ Android та iOS на різних мовах програмування. Зазначений підхід значно збільшує затрати часу на розробку мобільних додатків. Поставлена мета полягає в аналізі існуючих на сьогоднішній день засобів розробки кросплатформних мобільних додатків для пришвидшення процесу створення мобільного програмного забезпечення.

В роботі проведено аналіз існуючих на сьогоднішній день технологій, які використовуються для створення мобільних додатків, розглянуті їх переваги та недоліки. Зазначено, використання яких мов програмування вимагають ті чи інші інструменти, розглянуті механізми їх роботи, описані можливості застосування та можливі обмеження щодо їх використання. В дослідженні описано нюанси використання фреймворка React Native як одного з найбільш вдалих рішень для кросплатформної розробки мобільних додатків, механізм його роботи, переваги використання. Проаналізовано дані про зацікавленість розробників у застосуванні фреймворку React Native для створення додатків, пошукові тренди стосовно даної технології, кількість завантажень інсталяційного пакету React Native.

Проведені дослідження показали, що використання фреймворку React Native для розробки кросплатформних мобільних додатків має значні переваги. Створюване за допомогою React Native програмне забезпечення при запуску на мобільному телефоні використовує нативний код та забезпечує високу продуктивність. Крім того, вивчення фреймворку React Native дозволяє одночасно опанувати тонкощі роботи з мобільними платформами та стек web-технологій.

React Native, фреймворк, Android, iOS, мобільний додаток, розробка

Одержано (Received) 25.11.2019

Прорецензовано (Reviewed) 04.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ ТА СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

УДК 004.8/681.5

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).214-221](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).214-221)

О. П. Голик, доц., канд. техн. наук, **І. В. Волков**, викл., **Ісмаїл Мухаммед**, асп.
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
e-mail: dego@ukr.net

Структура моніторингу та ідентифікації нафтових забруднень

В статті запропоновано схему структури загального аналізу нафтових забруднень у режимі реального часу. В даному випадку пропонується для очистки вод від нафтових забруднень використовувати біологічні способи очистки.

нафтові забруднення, ідентифікація, прийняття рішень, база знань, база даних

Е. П. Голик, доц., канд. техн. наук, **І. В. Волков**, препод., **Ісмаїл Мухаммед**, асп.
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

Структура мониторинга и идентификации нефтяных загрязнений

В статье предложена схема структуры общего анализа нефтяных загрязнений в режиме реального времени. В данном случае предложено для очистки воды от нефтяных загрязнений использовать биологические методы очистки.

нефтяные загрязнения, идентификация, принятие решений, база знаний, база данных

Постановка проблеми. В [1] було обґрунтовано доцільність автоматизації комп'ютерно-інтегрованої технології ідентифікації та моніторингу нафтових забруднень. Авторами зазначено, що для того щоб розробити робота, який повинен в реальному часі виконувати функції моніторингу, ідентифікації та очистки морських вод від нафтових забруднень, необхідно володіти інформацією про види розливів нафти, їх хімічний склад та методи і засоби очистки. Оскільки наслідки забруднень нафтопродуктами можуть швидко зростати, то потрібно щоб такі роботи були розташовані безпосередньо на морському транспорті.

Для живлення таких роботів доцільно використовувати сонячну енергію. В роботі [2] було запропоновано методіку моделювання імовірності надходження сонячної радіації для систем очищення від нафтових забруднень.

В роботі [3] авторами було проведено пошук оптимальних рішень щодо вибору методів очищення водних ресурсів від нафтових забруднень та було визначено, що оптимальним рішенням щодо вибору методу очистки водних ресурсів від нафтових забруднень є біологічний метод очистки.

Таким чином метою даної роботи є дослідження біологічних методів очистки вод від нафтових забруднень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для автоматизації процесів біологічної очистки стічних вод підприємств нафтової промисловості в роботі [4] авторами запропоновано використовувати нейронну мережу в задачі керування комплексом очисних споруд. Дана нейронна мережа дозволяє прогнозувати значення

показників якості очищеної води, згідно виміряних на вході показниках неочищеної води. Однак розроблена нейронна мережа не є універсальною, оскільки вона навчена для умов роботи конкретного підприємства нафтової промисловості.

В роботах [5, 7] авторами зазначено, що серед методів, які успішно використовуються для ліквідації наслідків забруднень нафтою та нафтопродуктами, сорбційне очищення води є одним з ефективних способів. Було проведено лабораторні дослідження в результаті яких, дану гіпотезу було підтверджено експериментальними даними. Однак розроблений авторами метод перебуває у стадії випробувань та розробки.

Авторами запропоновано сорбент на основі гідроксидів заліза та алюмінію [6]. Дослідження показали, що отриманий сорбент дозволяє виконувати очистку стічних вод гальваноцеху до прийнятих норм.

Перспективним є використання технології переробки нафти вуглеводнями, які володіють високою мінералізацією, меншою селективністю та токсичністю [8]. Однак використання даної технології ускладнюється наявністю складної матриці нафтовмісних вод, що призводить до більшого енергоспоживання та подальшої обробки.

В роботі [9] авторами доведено ефективність очистки нафтовмісних вод з використанням комплексної фото каталітичної та біологічної очистки. Обробку було проведено в періодичних реакторах з використанням TiO_2 в якості фотокаталізатора. При цьому було досягнуто очищення від нафтопродуктів на 90% за 30 хвилин часу реакції при $\text{pH}=5,0$. Для біологічної очистки було використано бактерії *Pseudomonas aeruginosa* у біоплівках. За 45 хвилин часу було очищено 66,5% нафтових забруднень. Для підвищення ефективності процесу очистки авторами запропоновано об'єднати хімічне та біологічне очищення, забезпечивши таким чином очистку на 99% нафти та 78,6% загального органічного вуглецю.

В [10] наведено результати біологічної очистки синтетичної води, що добувають на родовищі в активному мулі з метою видалення органічних сполук з використанням ендогенних бактерій. Було отримано біокінетичні коефіцієнти, які показали низьку спорідненість до субстрату.

Вважається, що біологічні обробки дають найкращий компроміс між ефективністю видалення нафтових плям та експлуатаційними витратами [11]. Гібридні процеси показують багатообіцяючу продуктивність, але повинні бути додатково вивчені.

Наразі вченими вже розроблено деякі препарати, що містять консорціум мікроорганізмів (наприклад, препарати Ленойл та Деворойл). До складу таких препаратів, як правило, входять мікроорганізми *Bacillus brevis* та *Arthrobacter*, які здатні адаптуватися до високих доз нафти, ефективно утилізувати субстрат незалежно від типу ґрунту та особливостей забруднювача. Їх можна використовувати для очистки: в'язкої нафти, парафінової нафти, нафти з високим вмістом сірки, нафтопродуктів (мазут, дизельне паливо, бензин та інше), ароматичних речовин (фенол, крезол тощо).

В результаті біологічної обробки нафтового забруднення препаратами Деворойл та Ленойл [12] в навколишньому середовищі залишаються бактеріальний білок (не потребує подальшої утилізації) та нетоксичні продукти розпаду нафти. Продукти життєдіяльності бактерій та власне самі бактерії легко засвоюються аборигенною мікрофлорою, даючи основу для формування гумусу або утворюючи донний мул. Ефективність окислення вуглеводнів нафти досягає 99%.

Препарати Деворойт та Ленойл представляють собою порошки, які складаються з клітин мікроорганізмів, що володіють вуглеводнеокисляючою активністю та концентрацією не менше 10⁹ клітин уграмі препарату [12].

Постановка завдання. Аналіз останніх досліджень показав, що використання саме біологічних методів очистки вод від нафтових забруднень є перспективним. Метою даної роботи є дослідження роботи установок для біологічного очищення вод від нафти та нафтопродуктів і розробка структури аналізу нафтових забруднень для бази даних та бази знань інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень.

Основний матеріал. При біологічній очистці використовують мікроорганізми, які «з'їдають» нафту. На сьогодні існує більше 1000 простих організмів (наприклад, дріжджі *Candida* харчуються нафтовими парафінами). Після чого утворюється велика кількість біомаси з великою концентрацією вітамінів та білку.

Для розробки бази знань та бази даних біологічної очистки вод від нафтових забруднень необхідно володіти інформацією про фізіологію мікроорганізмів. Всі вони мають свій обмін речовин: поживні речовини засвоюються, а продукти життєдіяльності виділяються. Мікроорганізми живуть за рахунок дихання і харчування.

Одним із видів біологічної очистки є біоремедація. В [13] наведено схему кроків біоремедації при забрудненні нафтовими плямами, показана на рис. 1 (схема показана в оригінальному вигляді [13]).

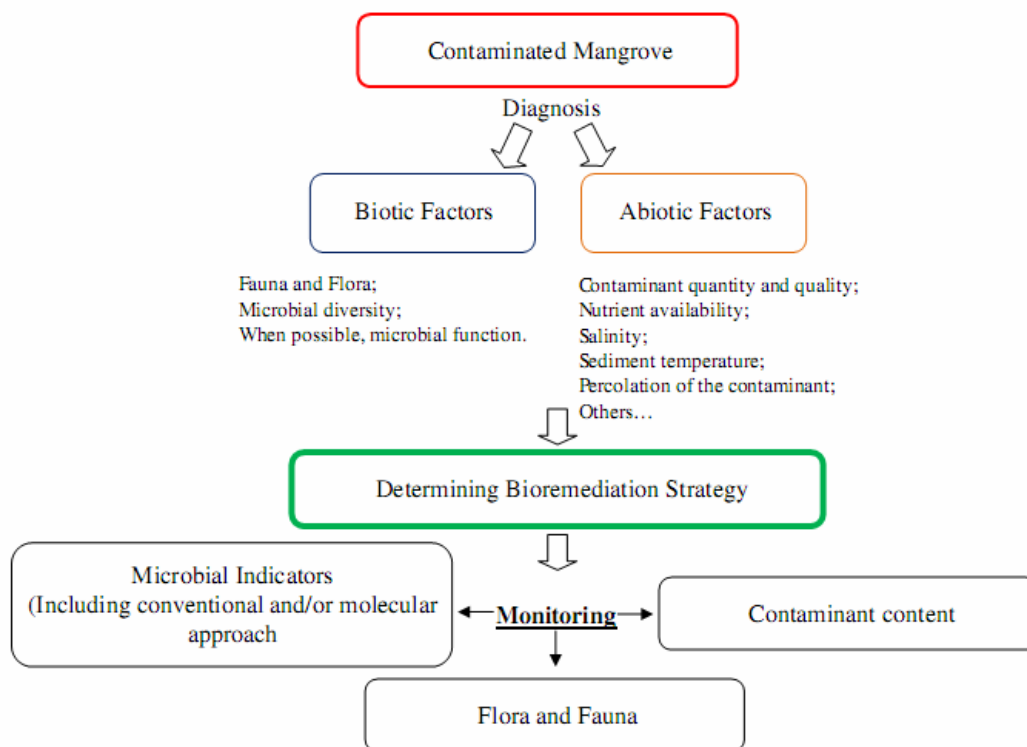


Рисунок 1 – Схема процесу біоремедації для очистки вод від нафтових плям

Джерело: [13]

Автори використали дану схему при дослідженні екосистеми мангрових лісів. Основним в даній схемі є визначення рівня забруднення. Зазвичай використовуються хімічні параметри рівнів забруднення, але як правило, це ароматичні вуглеводні речовини, які швидко розчиняються в повітрі. Згідно даної схеми, по-перше необхідно

визначити кількість забруднювача, знайденого на ділянці, та його концентрацію. Даний підхід можна використати і для очищення вод від нафтових забруднень.

В [14] запропоновано поєднати моніторинг розливу нафти та моделювання, як симбіотичну систему управління зворотнім зв'язком, засновану на теорії системи застосування динамічного приводу даних (Dynamic Data Drive Application System (DDDAS)).

На рис. 2 наведено блок-схему DDDAS для контролю розливів нафти в морських акваторіях.

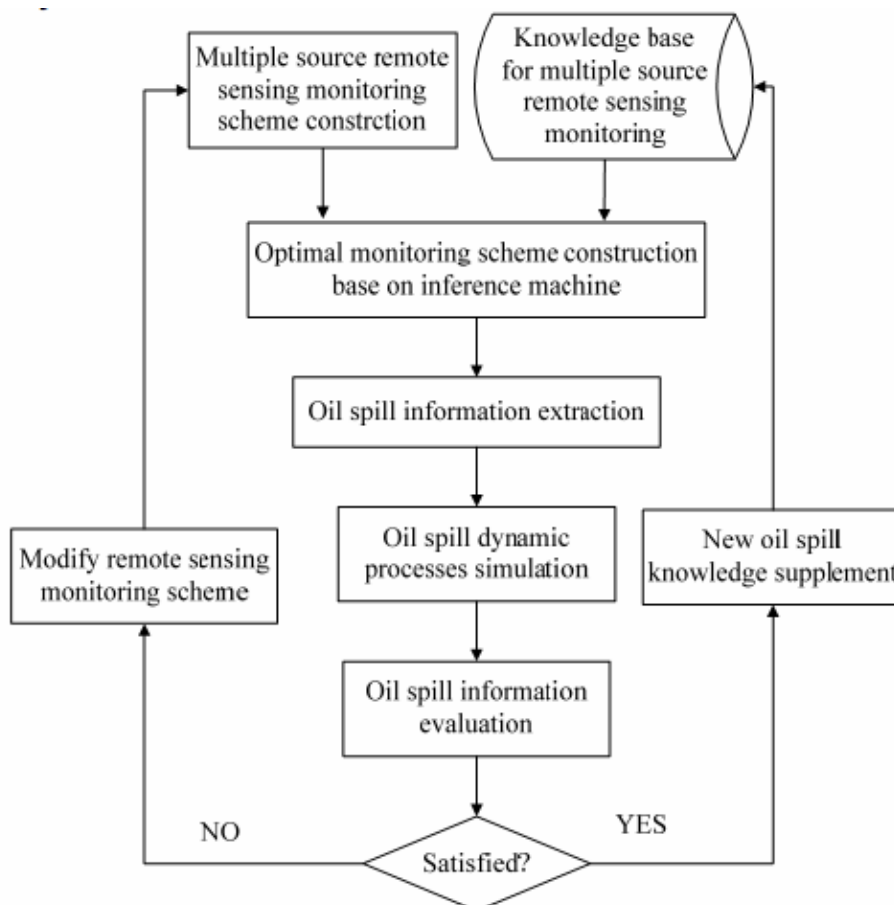


Рисунок 2 – Схема процесу біоремедації для очистки вод від нафтових плям

Джерело: [14]

Згідно рис. 2 на схему моніторингу на основі машинного висновку надходить інформація з бази знань для моніторингу дистанційного зондування декількох джерел. Після чого відбувається вилучення інформації про розлив нафти. Потім відбувається симуляція процесу розливу нафти в динаміці та оцінювання інформації щодо розливу нафти. Якщо результати оцінювання вказують на наявність розливу нафти, то відбувається внесення даних до бази знань про нові розливи нафти. Якщо інформація не підтверджується, то процес зондування повторюють знову.

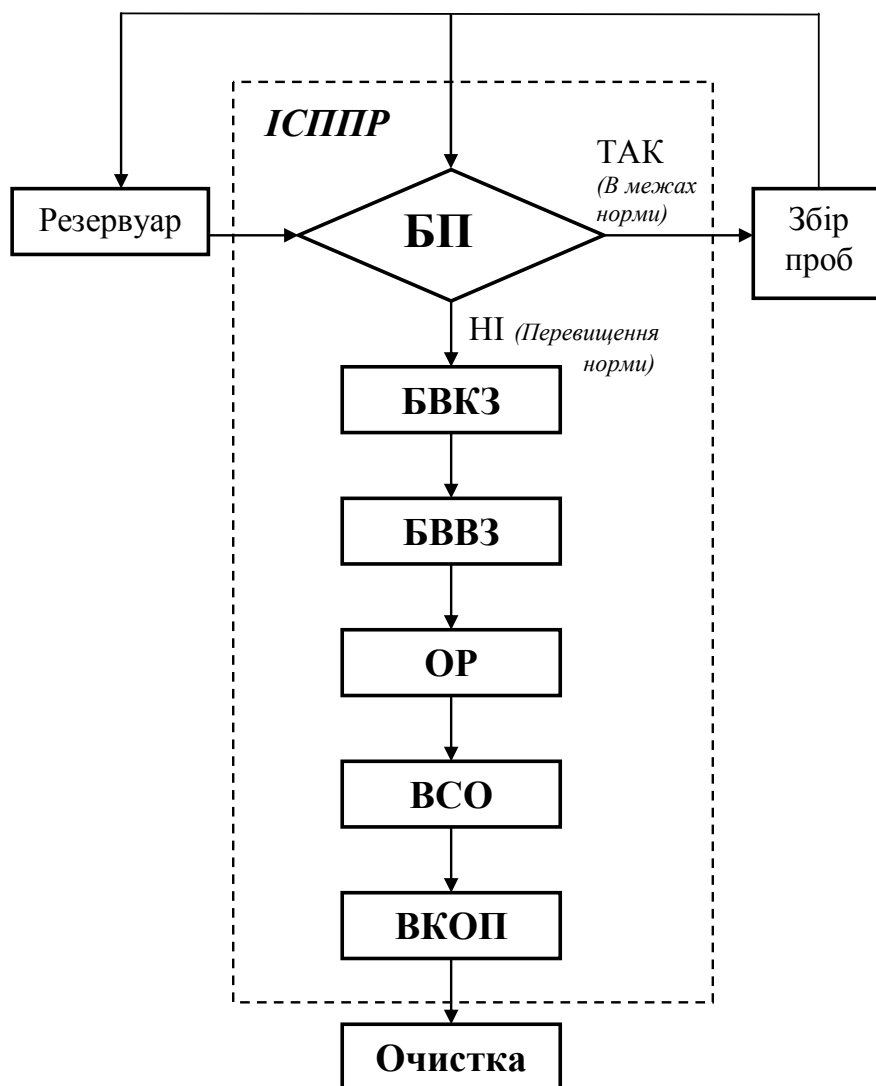
Виходячи з вище наведеного пропонується наступна схема загального аналізу нафтових забруднень у водних ресурсах, наведена на рис. 3.



Рисунок 3 – Схема загального аналізу нафтових забруднень

Джерело: розроблено автором

Згідно запропонованих в [1] етапів розробки інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для робота з очистки вод від нафтових забруднень, загальна структура аналізу нафтових забруднень матиме вигляд, показаний на рис. 4.



ІСППР – Інтелектуальна система підтримки прийняття рішень; БП – блок порівняння;
 БВКЗ – блок визначення кількості забруднення; БВВЗ – блок визначення виду забруднення;
 ОР – обробка результатів; VCO – визначення способу очистки;
 ВКОП – визначення кількості очисного препарату

Рисунок 4 – Структура аналізу нафтових забруднень водних ресурсів

Джерело: розроблено автором

В блоці порівняння відбувається оцінка забруднення. В резервуар надходять зразки проб води. Після чого в БП визначається чи відповідає зразок нормам не забрудненої води. Якщо зразок води знаходиться в межах норми, то далі відбувається збір нових проб. Якщо виявляється що вода забруднена, то в БВКЗ та БВВЗ виконується визначення кількості та виду забруднення. Після обробки результатів відбувається визначення способу очистки та кількості очисних препаратів.

В подальших дослідженнях дану схему (рис. 4) буде модифіковано та синтезовано. Більше уваги буде приділено розробці бази даних та бази знань для блоку порівняння.

Висновки. В даній роботі на основі аналізу попередніх досліджень, було запропоновано схему загального аналізу нафтових забруднень. Дана схема дозволяє в режимі реального часу проводити моніторинг та ідентифікацію нафтових забруднень. Застосування даної схеми для аналізу нафтових забруднень можливе не лише для визначення нафтових забруднень у водних ресурсах.

Список літератури

1. Голик О.П., Жесан Р.В., Ісмаїл Мухаммед Обґрунтування автоматизації комп'ютерно-інтегрованої технології ідентифікації та моніторингу нафтових забруднень. *Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2019. Вип. 1 (32). 220-227. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1\(32\).220-227](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).220-227)
2. Голик О. П., Жесан Р. В., Ісмаїл Мухаммед Моделювання імовірності надходження сонячної радіації для систем очищення від нафтових забруднень. *Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту*: зб. матеріалів конф., 21-25 травня 2019 р. Херсон: Видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2019. С. 42-43.
3. Голик О.П., Жесан Р.В., Мірошніченко М.С., Ісмаїл Мухаммед Пошук оптимальних рішень щодо вибору методів очищення водних ресурсів від нафтових забруднень. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія Технічні науки.* 2019. Т. 30 (69). № 5. Частина I. 75-80. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.5-1/12>
4. Плехов В. Г., Дьяченко В. В., Дьяченко И. Л. Автоматизация процессов биологической очистки сточных вод предприятий нефтяной промышленности. *Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология.* 2012. №14. С. 22-33. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-protsesov-biologicheskoy-ochistki-stochnyh-vod-predpriyatij-neftyanoy-promyshlennosti> (звернення: 13.05.2019).
5. Магеррамов А. М., Азизов А. А., Алосманов Р. М., Буният-заде И. А., Керимова Э. С. Удаление тонких нефтяных пленок с водной поверхности. *Молодой ученый.* 2011. №7. Т.1. С. 65-68. URL <https://moluch.ru/archive/30/3451/> (дата звернення: 16.09.2019).
6. Марченко Людмила Анатольевна, Белоголов Ефим Анатольевич, Марченко Артем Андреевич, Бугаец Ольга Николаевна, Боковикова Татьяна Николаевна. Исследование возможности сорбционной очистки при ликвидации нефтяных загрязнений. *Научный журнал КубГАУ - Scientific Journal of KubSAU.* 2012. №84. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vozmozhnosti-sorbtsionnoy-ochistki-pri-likvidatsii-neftnyanyh-zagryazneniy> (дата звернення: 13.09.2019).
7. Долгополова В. Л., Патрушева О. В. Способы очистки морских акваторий от нефтяных загрязнений. *Молодой ученый.* 2016. №29 (133). С. 229-234. URL: <https://moluch.ru/archive/133/37456/> (дата звернення: 13.05.2019).
8. Liu, Bo & Chen, Bing & Zhang, Baiyu. Oily Wastewater Treatment by Nano-TiO₂-Induced Photocatalysis. *IEEE Nanotechnology Magazine.* 2017. Vol. PP. 1-1. DOI: 10.1109/MNANO.2017.2708818
9. Yeber, María & Paul, Elvira & Soto, Carolina. Chemical and biological treatments to clean oily wastewater: Optimization of the photocatalytic process using experimental design. *Desalination and Water Treatment.* 2012. Vol. 47. 295-299. DOI: 10.1080/19443994.2012.696413
10. Kardena, Edwan & Hidayat, Syarif & Nora, Silvia & Helmy, Qomarudin. Biological Treatment of Synthetic Oilfield-Produced Water in Activated Sludge Using a Consortium of Endogenous Bacteria Isolated from A Tropical Area. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology.* 2017. Vol. 08. DOI: 10.4172/2157-7463.1000331

11. Lusnier, Nicolas & Seyssiecq, Isabelle & Sambusiti, Cecilia & Jacob, Matthieu & Nicolas, Lesage & Roche, Nicolas. Biological Treatments of Oilfield Produced Water: A Comprehensive Review. *SPE Journal*. 2019. DOI: 10.2118/195677-PA
12. Очистка воды от нефти. *Все о воде*. веб-сайт. URL: http://www.o8ode.ru/article/answer/clean/o4ictka_vody_ot_nefti.htm (дата звернення: 14.12.2019)
13. Santos, Henrique & Carmo, Flávia & Paes, Jorge & Rosado, Alexandre & Peixoto, Raquel. Bioremediation of Mangroves Impacted by Petroleum. 2011. *Water, Air, & Soil Pollution*. Vol. 216. 329-350. DOI: 10.1007/s11270-010-0536-4
14. Li, Yao & Wang, Lizhe & Chen, Lajiao & Ma, Yan & Zhu, Xiaomin & Chu, Bin. Application of DDDAS in marine oil spill management: A new framework combining multiple source remote sensing monitoring and simulation as a symbiotic feedback control system. 2013. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 4526-4529. DOI: 10.1109/IGARSS.2013.6723842

References

1. Holyk, O.P., Zhesan, R.V. & Ismail, Mohammad. (2019). Obruntuvannia avtomatyzatsii kompiuterno-intehrovanoi tekhnologii identyfikatsii ta monitorynhu naftovykh sabrudnen [Rationale for the Development of Automated Computer-integrated Technology for the Identification and Monitoring of Oil Pollution], *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, No 1(32)*, 220-227. DOI: 10.32515/2664-262X.2019.1(32).220-227. [in Ukraine].
2. Holyk, O.P., Zhesan, R.V. & Ismail, Mohammad. (2019). Modeliuvannia imovirnosti nadkhodzhennia soniachnoi radiatsii dlia system ochyshchennia vid naftovykh sabrudnen [Modeling the probability of solar radiation for oil pollution treatment systems]. *Conference proceedings from Intellectual system for decision making and problems of computational intelligence: Mizhnarodna naukova konferentsiia (21-25 travnia 2019 roku)*. (pp. 42-43). Zaliznyi Port: FOP Vyshemyrskii V.S. [in Ukraine].
3. Holyk, O.P., Zhesan, R.V., Miroshnichenko, M.S. & Ismail, Mohammad. (2019). Poshuk optymalnykh rishen shchodo vyboru metodiv ochyshchennia vodnykh resursiv vid naftovykh zabrudnen [The searching to the optimal decision for the metod selection for the water treatment from oil pollution]. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University". Series: Technical Sciences, Vol. 30 (69), № 5, Part I*, 75-80. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.5-1/12> [in Ukraine].
4. Plehov, V.H., Dyachenko, V.V., Dyachenko, I.L. (2012). Avtomatizatsiya protsessov biologicheskoy ochistki stochnykh vod predpriyatiy neftyanoy promyshlennosti [Automation of processes of biological wastewater treatment of oil industry enterprises]. *Vestnik PNIPU. Himicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya - Bulletin PNRPU. Chemical technology and biotechnology, №14*, 22-33. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-protsessov-biologicheskoy-ochistki-stochnykh-vod-predpriyatiy-neftyanoy-promyshlennosti> [in Russian].
5. Maherramov, A.M., Azizov, A.A., Alosmanov, R.M., Buniat-zade, I.A. & Patrusheva, O.V. (2011). Udalenie tonkikh neftianykh plenok s vodnoy poverkhnosti [Removing thin oil films from a water surface]. *Molodoy ucheniy - Young scientist, №7, Vol.133*, 65-56. Retrieved from <https://moluch.ru/archive/30/3451/> [in Russian].
6. Marchenko, L.A., Beloholov, E.A., Marchenko, A.A., Buhaets, O.N. & Bokovikova, T.N. (2012). Issledovanie vozmozhnosti sorbtionnoy ochistki pri likvidatsii neftianykh zahriazneniy [Study of the possibility of sorption purification in the elimination of oil pollution]. *Scientific Journal of KubSAU, №84*. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vozmozhnosti-sorbtionnoy-ochistki-pri-likvidatsii-neftianykh-zagryazneniy> [in Russian].
7. Dolgopolova, V.L., & Patrusheva, O.V. (2016). Sposoby ochistki morskikh akvatoriy ot neftianykh zagryazneniy [Methods for cleaning offshore areas from oil pollution]. *Molodoy ucheniy - Young scientist, №29(133)*, 229-234. Retrieved from <https://moluch.ru/archive/133/37456/> [in Russian].
8. Liu, Bo & Chen, Bing & Zhang, Baiyu. (2017). Oily Wastewater Treatment by Nano-TiO₂-Induced Photocatalysis. *IEEE Nanotechnology Magazine, Vol. PP. 1-1*. DOI: 10.1109/MNANO.2017.2708818
9. Yeber, Maria & Paul, Elvira & Soto, Carolina. (2012). Chemical and biological treatments to clean oily wastewater: Optimization of the photocatalytic process using experimental design. *Desalination and Water Treatment, Vol. 47*, 295-299. DOI: 10.1080/19443994.2012.696413
10. Kardena, Edwan & Hidayat, Syarif & Nora, Silvia & Helmy, Qomarudin. (2017). Biological Treatment of Synthetic Oilfield-Produced Water in Activated Sludge Using a Consortium of Endogenous Bacteria Isolated from A Tropical Area. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology, Vol. 08*. DOI: 10.4172/2157-7463.1000331
11. Lusnier, Nicolas et al. (2019). Biological Treatments of Oilfield Produced Water: A Comprehensive Review. *SPE Journal*. DOI: 10.2118/195677-PA [in English].

12. Ochistka vody ot nefti. Vse o vode. veb-sajt. Retrieved from: http://www.o8ode.ru/article/answer/clean/o4ictka_vody_ot_nefti.htm [[in Russian].]
13. Santos, Henrique, Carmo, Flávia, Paes, Jorge, Rosado, Alexandre & Peixoto, Raquel. (2011). Bioremediation of Mangroves Impacted by Petroleum. *Water, Air, & Soil Pollution, Vol. 216*, 329-350. DOI: 10.1007/s11270-010-0536-4
14. Li, Yao, Wang, Lizhe, Chen, Lajiao, Ma, Yan, Zhu, Xiaomin & Chu, Bin. (2013). Application of DDDAS in marine oil spill management: A new framework combining multiple source remote sensing monitoring and simulation as a symbiotic feedback control system. 2013. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 4526-4529. DOI: 10.1109/IGARSS.2013.6723842

Olena Holyk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ihor Volkov**, Instructor, **Mohammad Ismail**, Doctoral Student
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The Structure of Monitoring and Identification by Oil Pollution

In different countries, scientists pay attention to the method of monitoring, identification and water purification from oil pollutions. The problem of oil pollution is not only relevant for oil producing countries. Oil spills can occur anywhere in the world. The authors of this article propose to develop the robot with artificial intelligence that would monitor, identify and purify water resources from oil pollution in the mode of real time. Previous studies have shown that it is advisable to use biological methods to water purification from oil pollution. To date, scientists have already developed preparations containing a consortium of microorganisms to purify water resources from oil and petroleum products. Microorganisms are able to adapt to large doses of oil. As a result of the biological treatment of petroleum contamination, such microorganisms in the environment remain bacterial protein (which does not require further disposal) and non-toxic oil decay products. The products of the activity of bacteria and the bacteria themselves are easily absorbed by the native microflora, giving the basis for the formation of humus or forming bottom silt.

The purpose of this work is to investigate installations for the biological treatment of water resources from oil and petroleum products. In order to achieve this goal, the structure of the scheme of general analysis of oil pollution is proposed in the article. This scheme contains blocks of comparison, determination of the type and amount of contamination. The results are processed using statistical and mathematical analysis methods. The following algorithm is proposed. The robot has a special container for collecting water samples. This container has special sensors that determine the condition of the sample and transmit information to the comparison unit. The comparison unit, based on the knowledge base, determines the conformity of the water sample to the standards. If the amount of pollutants is exceeded, the information goes to the units for determining the amount and type of pollutants. In the results processing unit, decisions are made regarding the method of purification and the amount of purification preparation.

In the future, this scheme will be modified and synthesized. More attention should be paid to developing a database and knowledge that is part of an intelligent decision support system. The application of this scheme to the analysis of oil pollution is possible not only for the determination of oil pollution in water resources.

oil pollutions, identification, decision-making, knowledge data base

Одержано (Received) 16.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 20.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

УДК 004.94(075.8)

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).222-230](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).222-230)

Д.М. Лужков, асп., С.І. Осадчий, проф., д-р техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна
e-mail: srg2005@ukr.net

Імітаційне моделювання роботи холодильного устаткування фірми Danfoss у складі оптимальної двоканальної системи стабілізації температури повітря у холодильній камері супермаркету

Мета статті полягає у розробці алгоритму оцінювання характеристик холодильного коефіцієнту обладнання фірми Danfoss, яке функціонує у складі оптимальної двоканальної системи стабілізації повітря при наявності випадкових корисних сигналів збурень та завад. Алгоритм складається з двох етапів. На першому етапі на основі результатів структурної ідентифікації та синтезу оптимальної системи стабілізації виконується імітаційне моделювання роботи холодильного устаткування. На другому етапі, на основі результатів імітаційного моделювання у вигляді кривої зміни холодильного коефіцієнту оцінюється ефективність холодильного устаткування.

хладагент, холодильний коефіцієнт, імітаційна модель, передаточна функція, ефективність

Д.М. Лужков, асп., С.І. Осадчий, проф., д-р техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Имитационное моделирование работы холодильного оборудования фирмы Danfoss в составе оптимальной двухканальной системы стабилизации температуры воздуха в холодильной камере супермаркета

Цель статьи заключается в разработке алгоритма оценки характеристик холодильного коэффициента оборудования фирмы Danfoss, которое функционирует в составе оптимальной двухканальной системы стабилизации воздуха при наличии случайных полезных сигналов возмущений и помех. Алгоритм состоит из двух этапов. На первом этапе на основе результатов структурной идентификации и синтеза оптимальной системы стабилизации выполняется имитационное моделирование работы холодильного оборудования. На втором этапе, на основе результатов имитационного моделирования в виде кривой изменения холодильного коэффициента оценивается эффективность холодильного оборудования.

хладагент, холодильный коэффициент, имитационная модель, передаточная функция, эффективность

Постановка проблеми. Європейським стандартом EN 16001: 2009, прийнятим в більшості країн Євросоюзу, затверджені вимоги до енергоспоживання усіх використовуваних та розроблювальних машин, приладів, устаткування, в тому числі, холодильних установок. Тому актуальним стає завдання оцінки ефективності холодильної техніки, яка входить до складу автоматичної системи керування та функціонує в умовах непередбачуваної зміни температури продуктів, що зберігаються, та параметрів оточуючого середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення публікацій [1, 2, 3, 4] показало, що ефективність функціонування холодильного обладнання традиційно визначають з допомогою холодильного коефіцієнту ϵ_K . Алгоритм визначення цього

коєфіцієнту залежить від класу холодильної машини та зворотного теплового циклу, який реалізовано у ній. Розгляд розповсюджених алгоритмів розрахунку холодильного коєфіцієнту, показав, що всі вони коректно визначають зазначений коєфіцієнт в умовах постійних температур холодоагенту, охолоджуваного середовища та оточуючого середовища.

З іншого боку у статті [5] доведено, що при функціонуванні холодильного обладнання фірми Danfoss в умовах супермаркету усі користі сигнали, збурення та завади належать до нестационарних випадкових процесів. В таких умовах холодильний коєфіцієнт являє собою приклад випадкової функції, числові характеристики якої необхідно визначати методами математичної статистики [6].

Постановка завдання. Стаття присвячена представленню результатів дослідження, спрямованого на розробку нового алгоритму оцінювання характеристик холодильного коєфіцієнту обладнання фірми Danfoss, яке функціонує у складі оптимальної двоканальної системи стабілізації повітря при наявності випадкових корисних сигналів збурень та завад.

Як доведено у роботах [7, 8], структурна схема оптимальної двоканальної системи стабілізації температури повітря у холодильній камері з допомогою апаратури Danfoss (рис. 1) має два багатовимірні входи та один багатовимірний вихід.

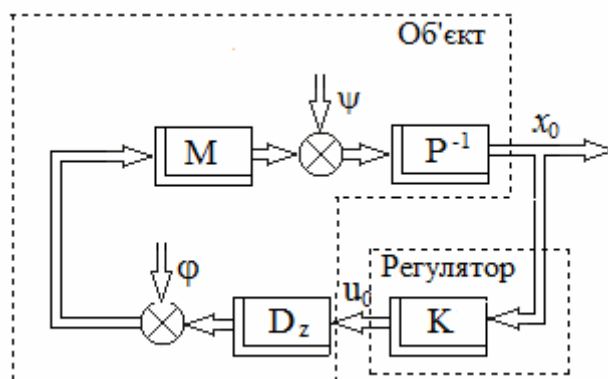


Рисунок 1 – Структурна схема системи стабілізації температури

Джерело: [7, 8]

На входах діють двовимірні вектори збурень ψ та шумів перетворення ϕ , а на виході вектор x_0 вигляду

$$x_0 = [x_1 \quad x_2]^T, \quad (1)$$

x_1 – відхилення температури повітря у холодильній камері від заданого значення;

x_2 – відхилення температури холодоагенту на виході випарника від заданого значення;

індекс / позначає транспонування.

Динаміку збурень та шумів, що виникають при роботі устаткування в умовах супермаркету, вектори яких приведені до одного входу ψ , характеризує [8] двовимірний формувальний фільтр [9] з матрицею передаточних функцій Ψ_0 , яка дорівнює

$$\Psi_0 = \begin{bmatrix} 2.17(s + 6.2 \cdot 10^{-4}) - 0.027(s + 6.2 \cdot 10^{-4}) & \\ 0 & 0.0032(s + 7 \cdot 10^{-4}) \end{bmatrix} \frac{1}{s^2 + 6.8 \cdot 10^{-4}s + 8.4 \cdot 10^{-7}}, \quad (2)$$

де s – комплексна змінна ($s=j\omega$).

Під дією зазначених збурень та шумів відбувається зміна компонентів вектору x_0 , які з допомогою цифрових датчиків температури вимірюються та передаються на вхід регулятора з матрицею дискретних передаточних функцій K вигляду [7]

$$W = \left[\frac{0.085(z-1.05)(z^2-1.47z+0.62)}{(z^2-1.91z+0.91)(z^2-1.73z+0.88)} \quad \frac{0.81(z-0.94)(z^2-1.56z+0.69)}{(z^2-1.91z+0.91)(z^2-1.73z+0.88)} \right], \quad (3)$$

де z – комплексна змінна ($z=e^s$).

На виході регулятора виникає сигнал керування u_0 та подається на керований вхід об'єкта керування. Об'єкт керування складається з двох частин [8]. Перша частина – це ланка чистого запізнення з передаточною функцією D_z

$$D_z = e^{-164s}. \quad (4)$$

Друга частина включає [10] терморегулювальний вентиль, випарник, холодильну камеру з продуктами, динаміку яких характеризує наступна лінеаризована система звичайних диференціальних рівнянь у відхиленнях

$$Px_0 = Mu + \psi, \quad (5)$$

де P – поліноміальна матриця [7], яка характеризує власну динаміку другої частини об'єкта керування, та дорівнює

$$P = \begin{bmatrix} 5.69 \cdot 10^{-7} & 0 \\ 0 & 4.51 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix} (s + 0.0012)(s + 0.136); \quad (6)$$

M – поліноміальна матриця, яка характеризує вплив зміни пропускної здатності вентиля на компоненти вектору x_0 , та дорівнює

$$M = \begin{bmatrix} -1.76 \cdot 10^{-9}(s - 0.44)(s - 0.0067) \\ 8.51 \cdot 10^{-9}(s + 0.002)(s + 0.1) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

У підручнику [2] показано, що для оцінки ефективності холодильного обладнання доцільно та можливо розраховувати холодильний коефіцієнт з рівняння

$$\varepsilon_k = \frac{x_2}{T_0 - x_2}, \quad (8)$$

де T_0 – температура повітря, яке оточує конденсатор.

Аналіз роботи структурної схеми (рис.1) доводить, що в умовах випадкової зміни збурень та шумів, яка є характерною для роботи холодильного устаткування у супермаркеті, холодильний коефіцієнт (8) також змінюється випадковим чином. Отже проблема дослідження полягає у наступному.

За відомими матрицями (2)-(7) та структурною схемою (рис. 1) розробити процедури оцінювання математичного сподівання та дисперсії холодильного коефіцієнту ε_k , а також визначити величини зазначених числових характеристик для обладнання фірми Danfoss в умовах функціонування у супермаркеті.

Виклад основного матеріалу. Оскільки вираз (8) вказує на нелінійний характер зв'язку між значенням коефіцієнту ε_k та коливаннями температур x_2 , T_0 , то розв'язання поставленої задачі доцільно здійснити у два етапи.

Мета першого етапу методом імітаційного моделювання [11] роботи оптимальної двоканальної системи стабілізації температури (рис. 1) отримати реалізацію випадкового процесу зміни холодильного коефіцієнту.

Мета другого етапу – здійснити оцінювання математичного сподівання m_ϵ та дисперсії D_ϵ холодильного коефіцієнту.

Виконання першого етапу здійснене з допомогою інструменту SIMULINK середовища Matlab. В основу імітаційної моделі покладені структурні перетворення схеми, представленої на рис. 1, з метою виключення з імітаційної моделі елементів з передаточними функціями, порядок поліномів-чисельників яких перевищує порядок поліномів-знаменників. Зазначені перетворення ілюструють рисунки рис. 2 та рис. 3.

В результаті першого кроку структурних перетворень (рис. 2) обернена матриця P винесена за коло стабілізації та утворена матриця передаточних функцій об'єкта керування W_u , яка дорівнює

$$W_u = P^{-1}M.$$

На другому кроці структурних перетворень (рис. 3) здійснено заміну кола стабілізації еквівалентним дискретним об'єктом з матрицею передаточних функцій F_x , яка задана виразом

$$F_x = \frac{1}{f_0} \left[\begin{array}{l} \frac{(z - 0.91)(z + 0.2)(z - 6.03 \cdot 10^{-5})(z^2 - 1.93z + 0.93)(z^2 - 0.2z + 0.046)(z^2 - 1.73z + 0.87)}{(z - 7.7 \cdot 10^{-5})(z^2 + 1.1 \cdot 10^{-4}z + 6 \cdot 10^{-9})(z^2 - 1.1 \cdot 10^{-4}z + 6.96 \cdot 10^{-9})} \\ \frac{1.27 \cdot 10^{-3}(z - 1.05)(z - 0.86)(z - 6.03 \cdot 10^{-5})(z^2 - 1.47z + 0.62)}{(z - 7.7 \cdot 10^{-5})(z^2 + 1.1 \cdot 10^{-4}z + 6 \cdot 10^{-9})(z^2 - 1.1 \cdot 10^{-4}z + 6.96 \cdot 10^{-9})} \\ \frac{4.45 \cdot 10^{-3}(z + 9 \cdot 10^{-5})(z - 0.94)(z - 1.88)(z^2 - 1.56z + 0.69)}{(z - 9.7 \cdot 10^{-5})(z^2 + 8.5 \cdot 10^{-5}z + 2.8 \cdot 10^{-9})(z^2 - 6.4 \cdot 10^{-5}z + 6 \cdot 10^{-9})} \\ \frac{(z - 0.94)(z + 0.089)(z + 9 \cdot 10^{-5})(z^2 - 1.88z + 0.89)(z^2 - 0.088z + 8.88 \cdot 10^{-3})(z^2 - 1.73z + 0.88)}{(z - 9.7 \cdot 10^{-5})(z^2 + 8.5 \cdot 10^{-5}z + 2.8 \cdot 10^{-9})(z^2 - 6.4 \cdot 10^{-5}z + 6 \cdot 10^{-9})} \end{array} \right], \quad (9)$$

де f_0 – поліном від комплексної змінної z вигляду

$$f_0 = (z + 0.2)(z - 0.94)(z - 0.92)(z^2 - 1.9z + 0.9)(z^2 - 0.2z + 0.048)(z^2 - 1.73z + 0.87).$$

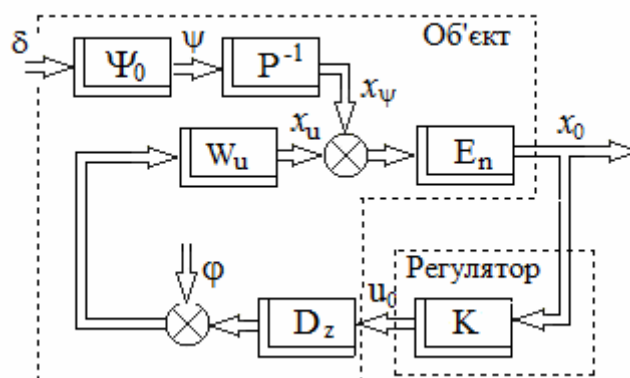


Рисунок 2 – Результат першого етапу структурних перетворень

Джерело: розроблено автором

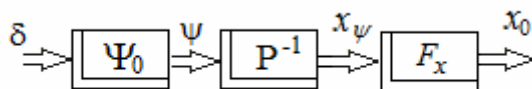


Рисунок 3 – Результат другого етапу структурних перетворень

Джерело: розроблено автором

На вході структурної схеми (рис. 3) діє вектор некорельованих білих шумів одиничної інтенсивності δ , а на виході вектор відхилень температури повітря у холодильній камері та температури хладагенту на виході випарника x_0 .

Отриманий таким чином результат дозволив розробити імітаційну модель системи стабілізації температури повітря у холодильній камері, структура якої у позначеннях інструменту SIMULINK представлена на рис. 4. Ця схема має декілька входів та виходів. Перші два входи утворюють генератори білого шуму, які приєднані до підсилювачів Gain, Gain1, та формують на виходах останніх випадкові процеси δ_1 , δ_2 , які утворюють вектор δ (рис. 4)

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix}$$

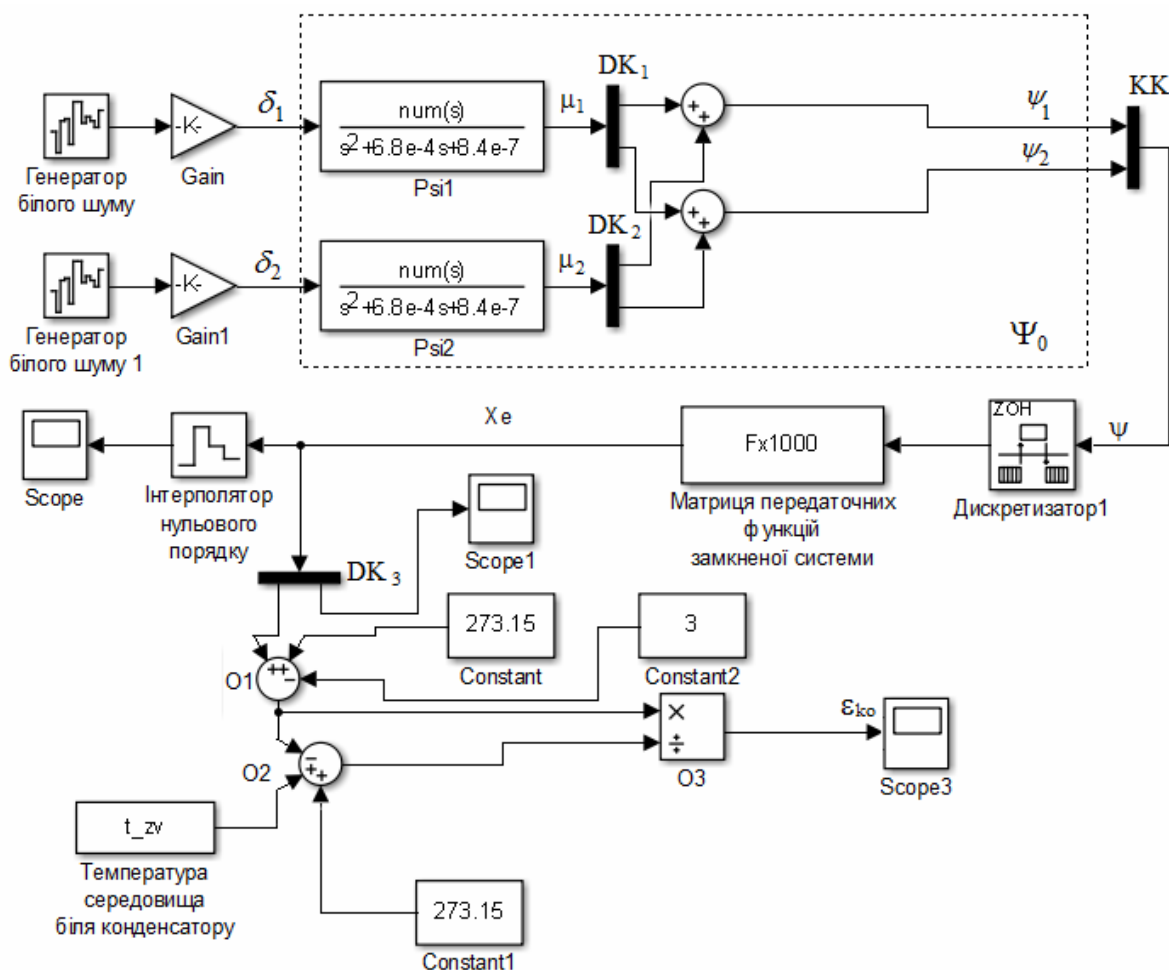


Рисунок 4 – Структурна схема імітаційної моделі

Джерело: розроблено автором

Випадкові процеси δ_1 , δ_2 подаються на входи формувального фільтру. Моделювання матриці передаточних функцій даного фільтру Ψ_0 здійснене з допомогою блоків передаточних функцій (Transfer Fcn) позначених на схемі (рис. 4) як Psi1, Psi2. На вході блоку Psi1 діє випадковий процес δ_1 , а на виході вектор сигналів μ_1 . Вектор μ_2 формується на виході блоку Psi2 за аналогічними до блоку Psi1 правилами. З допомогою блоків деконкатенації (Demux) DK₁ та DK₂ вектори μ_1 , μ_2 розділяються на компоненти. Компоненти подаються на входи блоків складання, на виходах яких визначаються сигнали збурень ψ_1 та ψ_2 . Блок конкатенації (Mux) KK формує вектор збурень ψ .

Вектор збурень подається на вхід пристрою зміни часу моделювання (Rate Transition), позначеного на схемі рис. 4 як Дискретизатор 1, де відбувається перетворення аналогового сигналу на дискретний. Дискретне збурення подається на вхід блоку «Матриця передаточних функцій замкненої системи». Зазначена матриця реалізована з допомогою блоку LTI System, який зв'язано з об'єктом Fx1000, що зберігає матрицю (9) та знаходиться у робочому просторі Matlab. Використання цього об'єкту для моделювання роботи замкненої системи керування з допомогою SIMULINK запобігає виникненню арифметичних циклів накопичення похибок інтегрування, як це доведено у книзі [12].

На виході об'єкту Fx1000 виникає вектор X_e , який через інтерполятор нульового порядку подається на вхід осцилографу Scope, а також на вхід блоку деконкатенації DK₃, де відбувається розділення вектору X_e на компоненти. Перший компонент, відхилення температури повітря у холодильній камері від заданого значення, передається до осцилографу Scope1. Другий компонент, зміна температури хладагенту поступає на входи блоку складання O1.

Блок O1 призначено для обчислення абсолютної температури хладагенту у оптимальній системі стабілізації. Для здійснення цієї операції на його вхід подаються другий компонент вектору X_e , середня температура хладагенту 3°C та температура абсолютного нуля -273.15°C. Знайдена абсолютна температура подається на входи обчислювачі O2 та O3.

Обчислювач O2 призначений для розрахунку знаменника виразу (8) для оптимальної системи, тому на його виходах окрім абсолютної температури хладагенту діють температура повітря навколо конденсатору холодильної установки та температура абсолютного нуля. Температура повітря формується з допомогою блоку From Workspace, позначеного «Температура середовища біля конденсатору» за даними з матриці t_{zv} , яка повинна знаходитись у робочому просторі Matlab. Обчислювач O3 призначений для розрахунку холодильного коефіцієнту оптимальної системи алгоритмом (8). Розраховане значення ϵ_{ko} подається на вхід осцилографу Scope3 та зберігається у робочому просторі Matlab у вигляді матриці Y , перший стовпчик якої зберігає відмітки часу, а другий відповідні значення ϵ_k . Кількість рядків n матриці Y відповідає часу моделювання роботи системи.

Оцінювання математичного сподівання та дисперсії холодильного коефіцієнту на другому етапі необхідно здійснювати з допомогою відомих [9] співвідношень

$$m_\epsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y(i,2), \quad (10)$$

$$D_\epsilon = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} [Y(i,2) - m_\epsilon]^2. \quad (11)$$

В результаті моделювання роботи оптимальної системи стабілізації температури повітря з допомогою імітаційної моделі (рис. 4) та відтворення графіку

зміни холодильного коефіцієнту існуючої системи отримано криві, які представлені на рис.5.

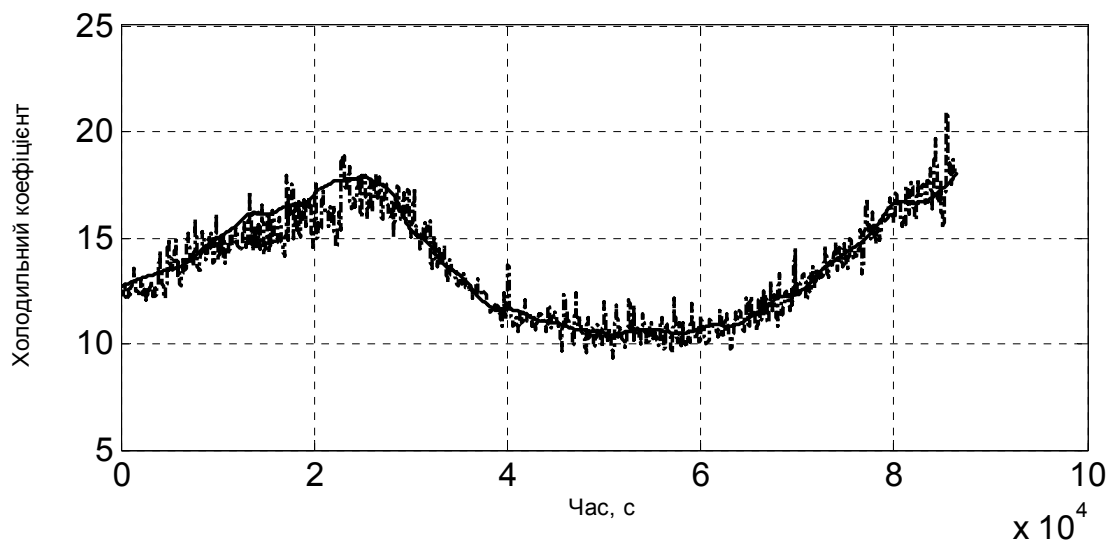


Рисунок 5 – Графіки зміни холодильних коефіцієнтів у оптимальній (лінія) та реальній (пунктир) системах

Джерело: розроблено автором

Вигляд зазначених графіків доводить, що під час роботи холодильного устаткування відбуваються випадкові коливання холодильного коефіцієнту, які виникають внаслідок випадкових коливань температур холодоагенту та повітря навколо конденсатору. Отже ефективність цього класу обладнання змінюється.

Застосування рівнянь (10), (11) до результату моделювання, представленому на рис. 5, дозволило визначити що математичне сподівання зміни холодильного коефіцієнту складає 14,83 одиниці, а дисперсія – 2,7.

Таким чином, поставлена задача розв'язана.

Висновки. Новий алгоритм оцінювання характеристик холодильного коефіцієнту обладнання фірми Danfoss, яке функціонує у складі оптимальної двоканальної системи стабілізації повітря при наявності випадкових корисних сигналів збурень та завад, складається з виконання двох взаємозв'язаних етапів: розробка імітаційної моделі системи, оцінювання числових характеристик отриманої кривої зміни холодильного коефіцієнту.

Імітаційне моделювання роботи оптимальної системи стабілізації температури повітря у холодильній камері супермаркету, яка обладнана устаткуванням фірми Danfoss, дозволяє оцінити ефективність такого холодильного устаткування за рахунок формування кривої зміни холодильного коефіцієнту.

Порівняння графіків зміни холодильних коефіцієнтів у оптимальній системі стабілізації та у системі, яка існує, в однакових умовах функціонування доводить, що впровадження оптимального закону керування дозволяє суттєво зменшити високочастотну складову коливань холодильного коефіцієнту та як наслідок підвищити ефективність обладнання.

Список літератури

1. Катраев М.Ю. Повышение эффективности работы холодильной установки. Выбор алгоритма управления терморегулирующим вентилем. *Холодильная техника*. 2011. №4. С.4-5.

2. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шендлин А.Е. Техническая термодинамика: учебник для вузов. Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. 496 с.
3. Циклы холодильных машин и методы анализа их эффективности: учебн. пособие / Г.Н. Злотин, Е.А. Захаров, А.А. Бурков и др. Волгоград: ВолгГТУ, 2006. 49с.
4. Эрлихман В.Н. Разработка принципов повышения эффективности технологических процессов холодильных производств: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.18.04, 05.18.12. Калининград, 2005. 49с.
5. Лужков Д.М., Осадчий С.І., Дідик О.К. Ідентифікація лінеаризованої моделі динаміки контролера та терморегулювального вентиля фірми Danfoss за даними пасивного експерименту. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наукових праць КНТУ*. 2018. Вип. 31. С. 150-158.
6. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. Москва: Фигматгиз, 1968. 463 с.
7. Осадчий С.І., Березюк І.А., Златопольский Ф.Й., Лужков Д.М. Оптимальна стабілізація температури повітря та холодоагенту холодильної установки з одним терморегулювальним вентиляем. *Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: матеріали між нар. наук. конф., с. залізний Порт, 21-25 травня 2019р., Херсон: Вид-во ФОП Вишемирський В.С., 2019. С. 132-133*
8. Осадчий С.І., Березюк І.А., Лужков Д.М. Дослідження динаміки холодильної камери в реальних умовах функціонування. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2019. Вип. 2(69), ч.2. С. 103-109.
9. Статистична динаміка систем управління: підручник / Л.М. Блохін, М.Ю. Буриченко, Н.В. Білак та ін. Київ: НАУ. 2014. 300с.
10. Контроллер испарителя АК-СС 550 для управления холодильными установками. Руководство пользователя. Danfoos – RS.8E.N1.50. 44с.
11. Томашевський В.М. Моделювання систем: підручник. Київ: Видавнича група ВНУ. 2005. 352 с.
12. Дж.Дэбни, Т.Харман. Simulink 4. Секреты мастерства. Издательство: Бином. Лаборатория знаний. 2003. 404с

References

1. Khatraev, M.Ju. (2011). Povyshenie jeffektivnosti raboty holodil'noj ustanovki. Vybor algoritma upravlenija termoregulirujushhim ventilem [*Improving the refrigeration unit efficiency. The choice of control algorithm for thermostatic valve*]. *Holodil'naja tehnika – Refrigeration equipment*. 4, 4-5 [in Russian].
2. Kirillin, V.A., Sychev, V.V. & Shendlin, A.E. (2016). *Tehnicheskaja termodinamika [Technical thermodynamics]*. Moskow: Izdatel'skij dom MJeI [in Russian].
3. Zlotin, G.N., Zaharov, E.A., Burkov, A.A. & et al. (2006). *Cikly holodil'nyh mashin i metody analiza ih jeffektivnosti [Cycles of chillers and methods for analyzing their effectiveness]*. Volgograd: VolgGTU [in Russian].
4. Jerlihman, V.N. (2005). Razrabotka principov povyshenija jeffektivnosti tehnologicheskikh processov holodil'nyh proizvodstv [*Development of principles for improving the efficiency of technological processes of refrigeration*]. *Candidate's thesis*. Kaliningrad [in Russian].
5. Luzhkov, D.M., Osadchij S.I. & Didyk, O.K. (2018). Identyfikatsiia linearyzovanoi modeli dynamiky kontrolera ta termorehuliuval'noho ventyliu firmy Danfoss za danymy pasyvnoho eksperymentu [*Identification of the Linearized Model of Controller Dynamics and Danfoss Temperature Control Valve According to the Passive Experiment*]. *Tekhnika v sil's'kohopodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia. Zbirnyk naukovykh prats' KNTU – Machinery in agricultural production, industry machine building, automation. Collected works of KNTU. Vol. 31, 150-158* [in Ukrainian].
6. Sveshnikov, A.A. (1968). *Prikladnye metody teorii sluchajnyh funkcij [Applied methods of the random functions theory]*. Moscow: Figmatgiz [in Russian].
7. Osadchij, S.I., Bereziuk, I.A., Zlatopol'skyj, F.J. & Luzhkov, D.M. (2019). Optymal'na stabilizatsiia temperatury povitria ta kholodoahentu kholodyl'noi ustanovky z odnym termorehuliuval'nym ventylem [*Optimal stabilization of air temperature and refrigerant of the refrigeration unit with one thermostatic valve*]. *Intelligent decision-making systems and problems of computational intelligence: Mizhnar. nauk. konf. (21-25 travnia 2019 r.) – International Scientufic Conference (pp. 132-133). Zaliznyj Port, Kherson [in Ukrainian]*.
8. Osadchij, S.I., Berezok, I.A. & Luzhkov, D.M. (2019). Doslidzhennia dynamiky kholodyl'noi kamery v real'nykh umovakh funktsionuvannia [*Investigation of the dynamics of the refrigeration chamber in real*

- conditions of operation]. *Visnyk Khersons'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu –Vol. 2(69), isse.2*, 103-109 [in Ukrainian].
9. Blokhin L.M., Burychenko, M.Yu., Bilak, N.V. & et al. (2014). *Statystychna dynamika system upravlinnia: pidruchnyk [Statistical dynamics of control systems: a textbook]*. Kyiv: NAU [in Ukrainian].
 10. Kontroller isparitel'ja AK-SS 550 dlja upravlennja holodil'nymi ustanovkami [AK-SS 550 evaporator controller for control of refrigeration units]. *Rukovodstvo pol'zovatel'ja*. Danfoos – RS.8E.N1.50 [in Russian].
 11. Tomashevs'kyj, V.M. (2005). *Modeliuvannia system [Model System]*. Kyiv: Vydavnycha hrupa BHV [in Ukrainian].
 12. Djebni, D., Harman, T. (2003). *Simulink 4. Sekrety masterstva [Simulink 4. Secrets of Mastery]*. Izdatel'stvo: Binom. Laboratorija znanij [in Russian].

Dmytro Luzhkov, postgraduate, **Sergiy Osadchy**, Prof., DSc.

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitsky, Ukraine

Simulation the Danfoss Refrigeration Equipment Work as a Part of an Optimal Two-channel Air Temperature Stabilizing System in a Supermarket Refrigeration Chamber

The article purpose is to develop an algorithm for assessing the refrigeration coefficient characteristics of the Danfoss equipment, which operates as a part of an optimal two-channel air stabilization system in the presence of random useful signals, disturbances and interferences.

It is developed an algorithm that consists of two stages to achieve this goal in the article. The stabilization system structural scheme was converted to a convenient form for modeling under the algorithm's first stage performing process. Based on the converted block diagram using the Simulink tool, a simulation model of the refrigeration coefficient changing process is developed. The algorithm second step purpose is to obtain estimates of the mathematical expectation and variance of the refrigeration coefficient change. The initial data for its implementation is the simulation result, namely, changes in the refrigeration coefficient's graphic.

A new algorithm for assessing the refrigeration coefficient characteristics of the Danfoss equipment, which operates as a part of an optimal two-channel air temperature stabilization system in the presence of random useful signals, disturbances and interferences, consists of performing two interrelated steps: development of a system simulation model and the resulting refractive curve numerical characteristics estimation.

Comparison of refrigeration coefficients change graphics in the optimal stabilization system and in the existing system in the same operating conditions proves that the implementation of the optimal control law allows to reduce significantly the high-frequency component of the refrigeration coefficient fluctuations and as a consequence to improve the equipment efficiency.

refrigerant, refrigeration coefficient, simulation model, transfer function, efficiency

Одержано (Received) 21.11.2019

Прорецензовано (Reviewed) 29.11.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

ЗМІСТ

МАШИНИ І ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

<i>В.В. Аулін, А.А. Тихий, С.О. Карпушин, Д.А. Дерев'янка</i> Підвищення енергоефективності обробітку ґрунту зменшенням процесів його налипання на поверхні робочих органів	3
<i>І.А. Велит, Я.В. Неділько, Р.С. Дорохін</i> Зарнодробарки для малих свиновідгодівельних ферм	17
<i>Ів.Б. Гевко, В.З. Гудь</i> Синтез гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни тракторії перевантаження матеріалів	25
<i>В.В. Дідур, А.Б. Чебанов, В.А. Дідур, О.П. Назарова, О.Л. Верещага</i> Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів шнекового преса для віджимання мезги насіння рицини (на прикладі одного витка шнекового вала).....	34
<i>В.Ю. Єрмаков, О.В. Ізвалов</i> Аналіз сучасних досліджень безпілотних літальних апаратів.....	43

ЗАСОБИ ТРАНСПОРТУ. ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС. ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЛОГІСТИКА

<i>В.В. Аулін, С.В. Лисенко, А.В. Гриньків</i> Модель надійності деталей транспортних машин за процесами реалізації триботехнологій їх припрацювання і відновлення	50
<i>В.В. Аулін, Т.Н. Замота, А.В. Гриньків, С.В. Лысенко, О.В. Крутица, К.К. Панайотов</i> Обоснование использования современных подходов для усовершенствования диагностирования систем и агрегатов автомобиля.....	65
<i>Andrei Markevich, Mykola Moroz, Olena Moroz, Oleksii Vasylkovskyi</i> Results of Social-Transport Monitoring of Passenger Transportation Kremenchuk City	76

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО, ТЕРМІЧНА ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ

<i>П.М. Присяжнюк, Р.В. Андрусишин, Л.Д. Луцак, О.О. Іванов</i> Формування фазового складу, структури та властивості електродугових покріттів системи Fe-Mn-Nb-Si-C для зміцнення робочих поверхонь землерийної техніки.....	91
---	----

П.М. Присяжнюк, І.М. Семяник, Д.Л. Луцак, Л.Л.Трощук
Вибір системи легування порошкових електродних матеріалів для зміцнення робочих поверхонь обладнання з переробки деревної біомаси..... 98

А. В. Рутковський, С.І. Маркович, С.С. Михайлюта
Дослідження впливу технологічних параметрів процесу вакуумного азотування алюмінієвих сплавів на властивості дифузійних іонноазотованих шарів..... 104

ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ В МАШИНАХ

М.Ф. Ковальов, М.В. Головацук
Визначення закономірностей зношування шийок колінчастих валів двигунів транспортних засобів 116

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ

В.Б. Бондаренко, К.Г. Петрова, С.В. Серебренніков
Синтез електромагнітної системи діагностування дефектів опор повітряних ЛЕП із використанням нейро-нечіткого моделювання 122

П.Г. Плешков, Ю.І. Казанцев, О.І. Сіріков, Н.Ю. Гарасьова, Т.В. Величко
Методика визначення розрахункових навантажень промислових підприємств за питомою витратою електроенергії з використанням нестационарної моделі графіків електричних навантажень 130

В. П. Солдатенко, В. В. Зінзура, С. П. Плешков, Н. Ю. Гарасьова, Т. В. Величко
Технічна реалізація системи автоматичного управління режимом низьковольтної розподільчої електричної мережі з відновлюваними джерелами енергії..... 140

ІННОВАЦІЙНІ ТА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

В.І. Носуленко, В.М. Шмельов, О.С. Голованич
Технологічні схеми формоутворення за умов розмірної обробки електричною дугою 150

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Г.М Дреєва, О.А. Смірнов, О.М. Дреєв, Т.В. Смірнова
Фрактальний аналіз генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова 161

О.В. Коваленко
Математична модель технології тестування комплексу DOM XSS вразливостей для аналітичної оцінки часових витрат 173

<i>Н.В. Лада, С.Г. Козловська, Ю.В. Рудницька</i> Дослідження і синтез групи симетричних модифікованих операцій додавання за модулем чотири	181
<i>Yuriy Parkhomenko, Mykhailo Parkhomenko, Ludmila Rybakova, Andriy Boki</i> Analysis of the Methods for Solving Game Puzzles such as «Flip-Flop»	190
<i>В.В. Смирнов, Н.В. Смирнова</i> Использование статистических методов в системе радиуправления робототехническим объектом	201
<i>Nikita Shevtsiv, Dmitriy Shvets, Nadezhda Karabut</i> Prospects for Using React Native for Developing Cross-platform Mobile Applications	208

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ ТА СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

<i>О. П. Голик, І. В. Волков, Ісмаїл Мухаммед</i> Структура моніторингу та ідентифікації нафтових забруднень	214
<i>Д.М. Лужков, С.І. Осадчий</i> Імітаційне моделювання роботи холодильного устаткування фірми Danfoss у складі оптимальної двоканальної системи стабілізації температури повітря у холодильній камері супермаркету	222

CONTENT

MACHINERY AND MEANS OF AGRICULTURAL MANUFACTURING AND MANUFACTURING

- Viktor Aulin, Andriy Tykhyi, Sergiy Karpushyn, Dmytro Derevjnko*
Improving the Energy Efficiency of Soil Cultivation by Reducing the
Processes of its Sticking to the Surface of Operating Elements 3
- Iryna Velit, Yaroslav Nedilko, Roman Dorohin*
Crushers for Small Pig Farms 17
- Ivan Hevko, Viktor Hud*
Synthesis of Screw Conveyors with the Possibilities of Technological
Transformation and Mobile Change of the Trajectory of Material Overload..... 25
- Volodimir Didur, Andrii Chebanov, Volodimir Didur, Olga Nazarova,
Oleksiy Vereshaga*
Optimization of Design and Technological Parameters of Auger Press
for Squeezing of a Castor Seed Brain (on the Example of One Coil of
a Screw Shaft) 34
- Vladyslav Yermakov, Oleksii Izvalov*
Analysis of Modern UAV Research..... 43

MEANS OF TRANSPORT. TECHNICAL SERVICE. TRANSPORT TECHNOLOGIES AND LOGISTICS

- Viktor Aulin, Sergey Lysenko, Andrey Grinkiv*
The Reliability Model of Parts of Transport Vehicles for the Implementation
of Tribological Technologies for Their Running-in and Recovery..... 50
- Viktor Aulin, Taras Zamota, Andriy Grinkiv, Sergiy Lysenko, Oleg Krupitsa,
Kostiantyn Panayotov*
The Rationale for the Use of Modern Approaches to Improve the Diagnosis
of Vehicle Systems and Assemblies..... 65
- Andrei Markevich, Mykola Moroz, Olena Moroz, Oleksii Vasylkovskiy,*
Results of Social-Transport Monitoring of Passenger Transportation
Kremenchuk City 76

MATERIAL SCIENCE, THERMAL AND PHYSICAL AND TECHNICAL PROCESSING OF MATERIALS

- Pavlo Prysyzhnyuk, Roman Andrusyshyn, Lyubomyr Lutsak, Olexandr Ivanov*
Formation of Phase Composition, Structure and Properties of Electric Arc
Coatings of Fe-Mn-Nb-Si-C System for Hardfacing of Working Surfaces
of Earthmoving Equipment 91

Pavlo Prysyzhnyuk, Iryna Semyanyk, Dmytro Lutsak, Lyubomyr Troshchuk
The Choice of Alloying System of Powder Electrode Materials for
Strengthening the Working Surfaces of Wood Biomass Processing Equipment..... 98

Anatoly Rutkovskiy, Sergiy Markovych, Sergiy Myhajlyta
Research of Influence of Technological Parameters of Process of a Vacuum
Nitriding of Aluminium Alloys is on Property of the Diffusive Ion Nitrided
Layers..... 104

RUBBER AND WARNING IN MACHINES

Kovalov Mykhailo, Holovaschchuk Mykhailo
Determination of Patterns of Wear on the Crankshafts of Vehicles Engines.....116

ELECTRICAL COMPLEXES

Vladimir Bondarenko, Kateryna Petrova, Sergiy Serebrennikov
Synthesis of an Electromagnetic System for the Diagnosis of Defects of Air
Transmission Lines Using Neuro-fuzzy Modeling 122

*Petro Pleshkov, Yuri Kazantsev, Oleksandr Sirikov, Natalia Garasova,
Tatiana Velichko*
Methodology for Determining the Design Loads of Industrial Enterprises by
the Specific Energy Consumption Using an Non-stationary Model
of Electrical Load Schedules..... 130

*Valentyn Soldatenko, Vasyl Zinzura, Serhii Plieshkov, Nataliia Harasova,
Tetiana Velychko*
Technical Implementation of the Automatic Control System of the Low-voltage
Distribution Network with Renewable Energy Sources 140

INNOVATIVE AND ENERGY SAVING TECHNOLOGIES

Victor Nosulenko, Vitaliy Shmelyov, Alexander Golovanych
Technological Schemes of Shaping In the Conditions of Dimensional
Drocessing By an Electric Arc 150

INFORMATION TECHNOLOGY

Hanna Drieieva, Oleksii Smirnov, Oleksandr Drieiev, Tetiana Smirnova
A Fractal Analysis of a Self-similar Traffic Generator Based on a Markov Chain..... 161

Oleksandr Kovalenko
Mathematical Model of DOM XSS Vulnerability Testing Technology
for Analytical Assessment of Time Costs 173

<i>Nataliia Lada, Yulia Rudnitskaya, Svetlana Kozlovska</i> Researching and Synthesizing a Group of Symmetric Modified Modulo-4 Addition Operations	181
<i>Yuriy Parkhomenko, Mykhailo Parkhomenko, Ludmila Rybakova, Andriy Boki</i> Analysis of the Methods for Solving Game Puzzles such as «Flip-Flop»	190
<i>Volodymyr Smirnov, Natalia Smirnova</i> The Statistical Methods Using In The Robotic Object Radio Control System	201
<i>Nikita Shevtsiv, Dmitriy Shvets, Nadezhda Karabut</i> Prospects for Using React Native for Developing Cross-platform Mobile Applications	208

AUTOMATION OF INDUSTRIAL PROCESSES AND AGRICULTURE

<i>Olena Holyk, Ihor Volkov, Mohammad Ismail</i> The Structure of Monitoring and Identification by Oil Pollution	214
<i>Dmytro Luzshkov, Sergiy Osadchy</i> Simulation the Danfoss Refrigeration Equipment Work as a Part of an Optimal Two-channel Air Temperature Stabilizing System in a Supermarket Refrigeration Chamber	222

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ

Збірник наукових праць

В и п у с к 2(33)

Відповідальний за випуск І.М. Березюк, О.М. Кузик

Комп'ютерна верстка І.М. Каліч

Тиражування О. Г. Каліч

*Приватне підприємство «Ексклюзив-Систем»
Свідоцтво № ДК 4470 від 17.01.2013р.
25006, м. Кіровоград, вул. Шевченка, 25
тел./факс 24-35-53*

Підписано до друку 04.06.2019р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 29,75
Тираж 300 прим. Зам. № 002/01/2020