ISSN 2409-9392

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
КІРОВОГРАДСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

ТЕХНІКА В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОМУ ВИРОБНИЦТВІ, ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ

За загальною редакцією М.І. Черновола

Заснований у 2001 році

В и п у с к 30

Кропивницький • 2017

ISSN 2409-9392

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

Collected Works

of Kirovohrad National Technical University

MACHINERY IN AGRICULTURAL PRODUCTION, INDUSTRY MACHINE BUILDING, AUTOMATION

Under the general editorship of M. Chernovol

Founded in 2001

Issue 30

Kropyvnytskyi • 2017

ББК 34.751+32.965=31
УДК 62:631.3

Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – вип. 30. – Кропивницький: КНТУ, 2017. – 210 с.

У збірнику представлені статті, присвячені проблемам проектування та експлуатації сільськогосподарської техніки, технології виробництва, енергозбереження, автоматизації в промисловості та сільському господарстві. Наведені практичні рекомендації до використання результатів досліджень у галузях народного господарства.
Збірник є фаховим виданням, в якому публікуються основні результати наукових досліджень вчених, аспірантів університету, а також інших навчальних закладів та промислових підприємств України.
Збірник розрахований на наукових, науково-технічних працівників різних галузей науки та техніки, ВНЗ, здобувачів вчених ступенів і звань.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол № 9 від 29 травня 2017 року.

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

Редакційна колегія: Бєлоцерковський М.А., д-р техн. наук, проф. (Білорусь); Варума Аріфа, Dr PhD (Нігер); Віхрова Л.Г., канд. техн. наук, проф. (науковий редактор за напрямком "Автоматизація"); Гамалій В.Ф., д-р ф.-м. наук, проф.; Жорнік В.І., д-р техн. наук (Білорусь); Кириченко А.М., д-р техн. наук, доц.; Кропівний В.М., канд. техн. наук, проф. (заступник головного редактора); Осадчий С.І., д-р техн. наук, проф.; Осіпов І.М., канд. техн. наук, доц. (науковий редактор за напрямком "Техніка в сільськогосподарському виробництві"); Павленко І.І., д-р техн. наук, проф. (науковий редактор за напрямком "Галузеве машинобудування"); Петренюк А.Я., д-р ф.-м. наук, проф.; Сабірзянов Т.Г., д-р техн. наук, проф.; Сафонов В.В., д-р техн. наук, проф. (РФ); Смірнов О.А., д-р техн. наук, проф.; Філімоніхін Г.Б., д-р техн. наук, проф.; Шепеленко І.В., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар).

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.

Збірник включений рішенням Атестаційної колегії Міністерства освіти і науки України в перелік наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук. Затверджений наказом Міносвіти і науки України № 1528 від 29.12.14р.
Збірник наукових праць зберігається в загальнодержавній реферативній базі даних «***Українка наукова***» Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського та представлений у міжнародній наукометричій базі даних ***Google Scholar***

Реєстраційне свідоцтво: серія КВ № 15253-3825 ПР від 30.04.2009 р.
ISSN 2409-9392

© Центральноукраїнський національний технічний університет, 2017

ТЕХНІКА В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОМУ ВИРОБНИЦТВІ

УДК 621.867.52

В.І. Дирда, проф., д-р техн. наук, О.А.Черній, ст. викл., О.А. Жидик, магістр
Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
E-mail: alex11m@ukr.net

Дослідження експлуатаційної надійності тракторів JOHN DEERE серії 8320R в умовах України

Тенденції розвитку сучасного сільського господарства передбачають використання новітньої енергонасиченої техніки. Цим вимогам відповідають зразки техніки, які виготовляються відомими світовими машинобудівними заводами. Велику частину ринку сільськогосподарської техніки України займає фірма John Deere. Але завдяки факторам властивим території України відмічається поява потоку відмов, що суттєво знижує показники експлуатаційної надійності цих машин.

Виходячи з цього, був виконаний збір та аналіз емпіричних даних відмов та наробітку на відмову тракторів John Deere серії 8320R в умовах півдня України. Під час аналізу було виявлено, що в початковий період експлуатації машин, їх несправний стан викликаний відмовами другої групи складності. Серед відмов другої групи складності була виділена несправність, що пов'язана з втратою герметичності сальників бортових редукторів переднього ведучого мосту, яка і лімітує середній наробіток на відмову трактора. Проведений статистичний аналіз виникнення даної відмови. Встановлено, що закон розподілу ймовірності виникнення відказу підпорядкований закону Вейбулла-Гнєденка. В результаті цього розрахований довірчий інтервал в якому міститься дійсне значення наробітку на відмову досліджуваних ущільнень. Ці дані дали змогу створити рекомендації по підвищенню експлуатаційної надійності тракторів John Deere серії 8320R.

експлуатаційна надійність, наробіток на відмову, статистичний аналіз відмов, бортові редуктори, сальники

В. И. Дырда, проф., д-р техн. наук, А. А. Черний, ст. препод., А. А. Жидик, магистр
Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, г. Днепр, Украина

Исследование эксплуатационной надёжности тракторов JOHN DEERE серии 8320R в условиях Украины

Тенденции развития современного сельского хозяйства предполагают использование новейшей энергонасыщенной техники. Этим требованиям отвечают образцы техники, которые изготавливаются известными мировыми машиностроительными заводами. Большую часть рынка сельскохозяйственной техники Украины занимает фирма John Deere. Но благодаря факторам присущим территории Украины отмечается появление потока отказов, что существенно снижает показатели эксплуатационной надежности этих машин.

Исходя из этого, был выполнен сбор и анализ эмпирических данных отказов и наработки на отказ тракторов John Deere серии 8320R в условиях юга Украины. Во время анализа было выявлено, что в начальный период эксплуатации машин, их неисправное состояние вызвано отказами второй группы сложности. Среди отказов второй группы сложности была выделена неисправность, связанная с потерей герметичности сальников бортовых редукторов переднего ведущего моста, которая и лимитирует среднюю наработку на отказ трактора. Проведен статистический анализ возникновения данного отказа. Установлено, что закон распределения вероятности возникновения отказа подчиняется закону Вейбулла-Гнеденко. В результате этого расчета рассчитан доверительный интервал в котором содержится истинное значение наработки на отказ исследуемых уплотнений. Эти данные позволили дать рекомендации по повышению эксплуатационной надежности тракторов John Deere серии 8320R.

эксплуатационная надёжность , наработка на отказ, статистический анализ отказов, бортовые редукторы, сальники

© В.І. Дирда, О.А.Черній, О.А. Жидик, 2017

Постановка проблеми. Велику частку українського ринку енергонасичених тракторів займають трактори John Deere, особливо серії 8R [1], які застосовуються господарствами України для виконання операцій при різних технологіях вирощування сільськогосподарських культур. Але завдяки факторам, які властиві умовам України, відмічається поява потоку відмов, що суттєво впливають на експлуатаційну надійність тракторів John Deere. Тому, актуальність проведення досліджень на надійність даного типу тракторів являється досить високою.

Аналіз останніх досліджень. У зв'язку зі збільшенням об'єму закордонних тракторів, особливо марки John Deere, в господарствах України є актуальна необхідність оцінки їх надійності, так як виробники не дають споживачам кількісних характеристик надійності пропонуємих машин. Дана проблема має своє відображення в статтях [2,3]. Але дані дослідження не дають жодних показників надійності та рекомендацій по їх підвищенню для техніки марки John Deere в умовах України.

Постановка завдання. Метою даної роботи є оцінка надійності тракторів John Deere в початковий період експлуатації в умовах України та розробка рекомендацій щодо її підвищення.

Виклад основного матеріалу. За об'єкт дослідження був прийнятий трактор John Deere 8320R.

Приймаємо план випробувань на надійність [NMT]. Для даного плану вихідними даними являються:

- число об'єктів спостережень N, шт;
- тривалість спостережень T, мото-год.

Для визначення мінімального обсягу спостережень задаємося початковимиданими, що вказують на точність отриманих результатів:

- довірчу ймовірність приймаємо $\gamma = 0,9$;
- граничну відносну похибку - $\delta = 0,15$.

Розподіл відказів за апріорними даними відповідатиме закону Вейбулла-Гнєденка [4, с.34].

Користуючись довідковими таблицями, визначаємо мінімальну кількість об'єктів, які необхідно поставити на випробування $N_{min} = 32$ [4, с.35]. Приймаємо $N = 40$.

Згідно формули визначимо довготривалість спостереження[4, с.40]

$$T = \frac{X \cdot \overline{T}}{N} = \frac{114 \cdot 588,2}{40} = 1676 \text{ мото - год.}, \quad (1)$$

де T – довготривалість спостереження, мото-год.;

N – кількість об'єктів спостережень, шт.;

$\overline{T}$ – емпіричне середнє напрацювання на відказ тракторів. Становить за спостереженнями 588,2 мото-год.;

X – припускаєма величина, відношення довготривалості спостереження T до оцінюємого показника надійності.

Величину X визначено в припущенні, що розподіл відказів підпорядковується закону Вейбулла-Гнєденка. При $\gamma = 0,9$ та $\delta = 15$ приймаємо значення $X = 114$ [4, с.40].

Дані по виникненню відказів досліджуваних тракторів взято з звітної нормативно-технічної документації офіційного дилера техніки John Deere в південному регіоні України ТОВ «Агротек».

Після групування отриманих статистичних даних за інтервалами напрацювання та складністю відказу отримаємо графік (рис. 2).

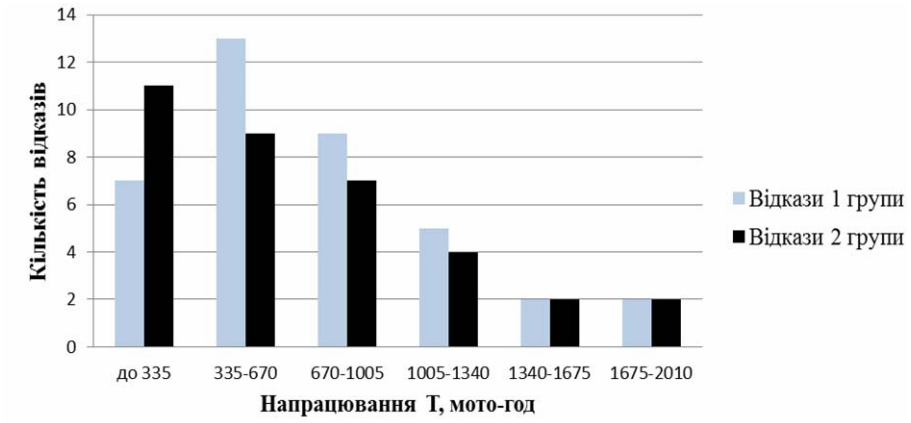


Рисунок 2 – Кількість відказів тракторів John Deere 8320R
по групам складності за напрацюванням

З гістограми видно, що в початковий період експлуатації машини (до 1000 мото-год.), основними відмовами, які впливають на стан машини являються відмови другої групи складності. До другої групи складності належать відмови, що усуваються заміною або ремонтом легкодоступних складальних одиниць та агрегатів (або їх деталей), а також відмови для усунення яких необхідне розкриття внутрішніх порожнин основних агрегатів без їх розбирання або позачергового проведення операцій ТО.

Для збільшення надійності машини в початковий період експлуатації необхідно виявити лімітуючу несправність, для знаходження шляхів щодо її усунення.

Згрупувавши відмови другої групи складності, отримаємо діаграму (рис. 3).

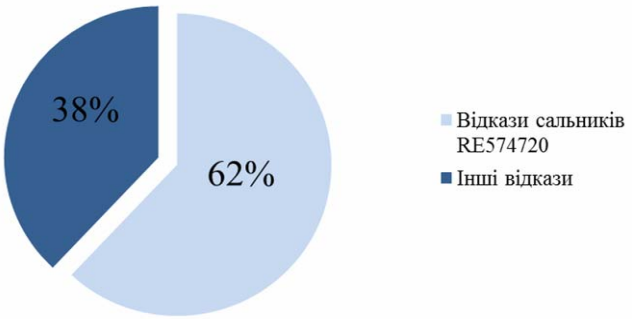
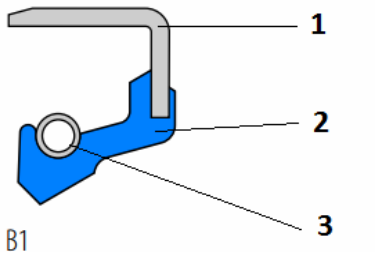


Рисунок 3 – Відсоткове співвідношення між відказами другої групи складності

Діаграма (рис. 3) підтверджує, що відмовою яка обмежує надійність машини є відмова сальників RE574720 передніх бортових передач.

Сальник RE574720 типу В1 має стандартну будову характерну для радіальних ущільнень (рис.4), він складається з металевого каркасу, кільцевої спіральної пружини та гумового ущільнення. Металевий каркас додає жорсткість ущільненню, а пружина забезпечує контакт кромки манжети з валом з питомим тиском $P_к$ = 0,02-0,04 МПа [6].

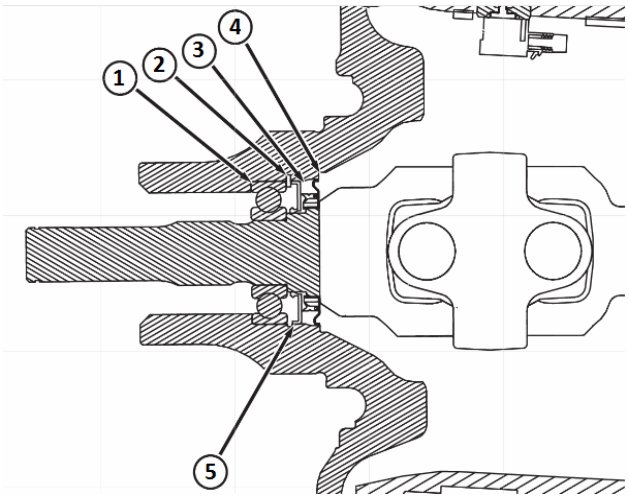


1 – металевий каркас; 2 – ущільнюючий елемент; 3 – силовий елемент (пружина)

Рисунок 4 – Вид досліджуваного сальника RE574720

Сальники типу В1 застосовуються для ущільнення валів, що працюють в мінеральних оливах, мастилах на її основі, воді, дизельному паливі, при коловій швидкості до 20 м/с, при надмірному тиску до 0,05 МПа, який може виникати під час роботи в бортових редукторах, внаслідок нагрівання мастила та при можливому радіальному битті вала [7].

Монтажне місце встановлення сальника RE574720 наведено на рис. 5.



1 - кульковий підшипник; 2 – стопорне кільце; 3 – пильник; 4 – масловідбивач;
5 - сальник RE574720

Рисунок 5– Місце встановлення сальника RE574720 передньої бортової передачі трактора John Deere8320R

Для дослідження надійності сальників приймаємо план [NUN] з вихідними даними:

- довірча ймовірність - 0,8;
- гранична похибка - 0,15;
- закон розподілу Вейбулла-Гнєденка.

Кількість об'єктів за довідковими таблицями становитиме N_{min} =15 шт. [4,с.33].

Отже, дослідження проводимо за планом [NUN] з загальною кількістю об'єктів 19 шт. (при мінімальній кількості 15 шт.). Режими випробувань за місцем проведення будуть являтися експлуатаційними.

Складемо інтервальний статистичний ряд емпіричного розподілу напрацювання сальників RE574720 передніх бортових передач до відказу.

Таблиця 1 – Інтервальний статистичний ряд напрацювання сальників RE574720 передніх бортових передач до відказу

Межі інтервалів	Середини інтервалів T_{ci}	Частості m_i	Частості m_i/N	Накопочені частості $\Sigma m_i/N[Fe(t)]$
до 234	117	5	0,2632	0,2632
234-468	351	8	0,4211	0,6842
468-702	585	2	0,1053	0,7895
702-936	819	2	0,1053	0,8947
936-1170	1053	1	0,0526	0,9474
1170-1404	1287	1	0,0526	1,0000

По інтервальному ряду побудовано полігон та гістограму частостей розподілу напрацювання сальників RE574720 передніх бортових передач до відказу.

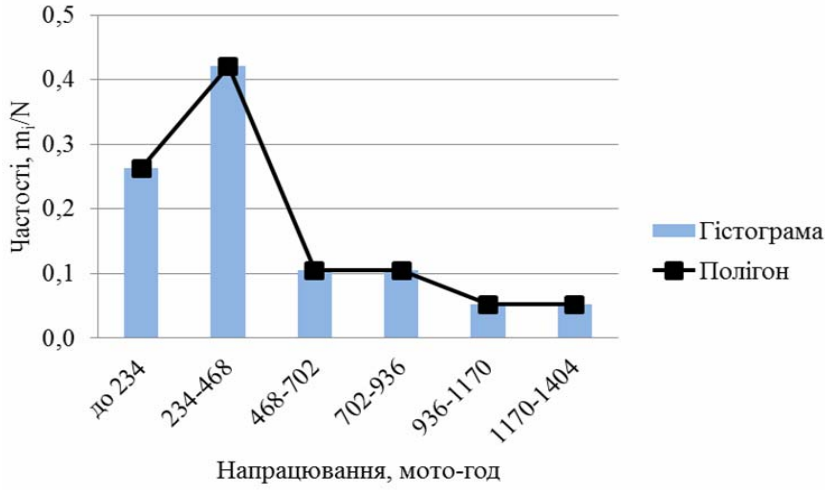


Рисунок 6 – Гістограма та полігон частостей розподілу напрацювання сальників RE574720 передніх бортових передач до відказу

Масив дослідних даних характеризується наступними показниками:

- середнє напрацювання на відказ t = 449,5 мото-год.;
- середнє квадратичне відхилення σ = 287,6 мото-год.;
- коефіцієнт варіації υ=0,64.

Приймаємо гіпотезу, що виникнення відказів сальників підпорядковано закону Вейбулла-Гнєденка, так як υ=0,64>0,33 [4, с.32].

Параметри закону наступні: параметр форми b=1,6, параметр розмірності a=501 мото-год.

Теоретична функція розподілу F(t) по закону Вейбулла-Гнєденко має вид:

$$F(t) = 1 - \exp\left[- \left(\frac{T_{Bi}}{a} \right)^b \right], \quad (2)$$

де a – параметр розмірності теоретичного розподілу, мото-год.;

b – параметр форми теоретичного розподілу;

$T_{ві}$ – поточне значення напрацювання, мото-год.

Інтегральні функції напрацювання сальників RE574720 передніх бортових передач до відказу за емпіричними та теоретичними даними представлено на рис. 6.

Перевірка відповідності між теоретичним законом та емпіричним розподілом напрацювання сальників RE574720 передніх бортових передач до відказу виконувалася за критерієм згоди λ О.М. Колмогорова. Так як P(λ) більше прийнятого рівня значущості β = 0,1, то прийнята гіпотеза про можливість узгодження закону Вейбулла-Гнєденко з емпіричним розподілом напрацювання не відкидається [5, с.70].

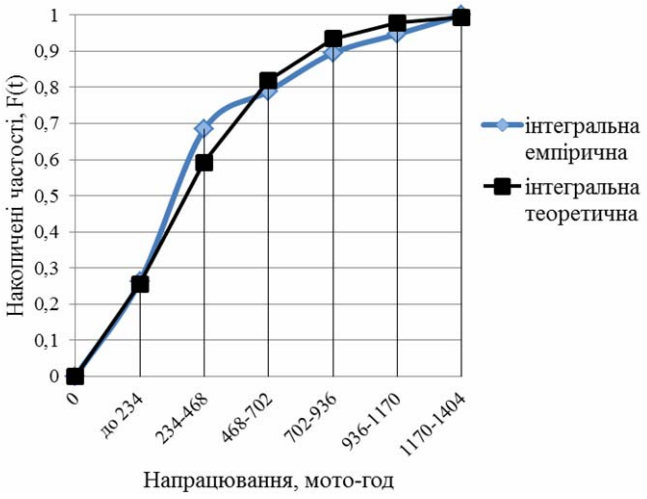


Рисунок 7 - Інтегральні функції напрацювання сальників RE574720 передніх бортових передач до відказу

Визначено границі довірчого інтервалу розсіювання середнього значення напрацювання до відказу ($\overline{T}$) для розподілу Вейбулла-Гнєденка за залежностями:

$$T_H = \hat{\overline{T}} \sqrt[b]{r_2};$$
$$T_B = \hat{\overline{T}} \sqrt[b]{r_1}, \quad (3)$$

де r_1 та r_2 – коефіцієнти Вейбулла, які визначаються в залежності від α та N [5, с.71].

$$T_H = 449{,}5 \sqrt[1{,}6]{0{,}77} = 381{,}75 \text{ мото - год};$$

$$T_B = 449{,}5 \sqrt[1{,}6]{1{,}37} = 547{,}2 \text{ мото - год}.$$

Таким чином, з ймовірністю 0,8 можна стверджувати, що значення середнього напрацювання сальників RE574720 передніх бортових передач трактора John Deere 8320R до відказу буде знаходитись в інтервалі від 381,75 мото-год. до 547,2 мото-год.

Висновки. При порівнянні отриманих результатів з рекомендованою компанією John Deere періодичністю проведення планових ТО, можна зробити висновок, що висока ймовірність відказу сальників знаходиться в проміжку між ТО 350 мото-год та

ТО 600 мото-год. [8]. Виходячи з цього, для запобігання появи відказу та втраті роботоздатності машини в період експлуатації, необхідно включити операцію заміни сальників RE574720 передніх бортових передач в операцію проведення ТО 350 мото-год. Включення даної операції до ТО 350 мото-год дозволить збільшити коефіцієнт готовності машини, знизити час простою техніки та витрати на виконання ремонту при відмові сальника.

Список літератури

1. Метьолкін, В. Ринок енергонасичених тракторів потужністю 260-410 л.с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.apk-inform.com/ru/exclusive/topic/1063723#.WQxbtH__rIU – Загол. зекрана. – Перевірено : 10.05.2017.
2. Сагиндик, Т.Ж. Аналіз відказів тракторів Джон Дір в умовах експлуатації [Текст] / Т.Ж. Сагиндик, А.М.Тулєбаєв // Вісник науки КазАТУ ім. С. Сейфуліна. – Астана,2011. – №3(70). – С.75-79.
3. Лебедев, С. А.Оцінка надійності вітчизняних і закордонних тракторів в початковий період експлуатації [Текст] / С. А. Лебедев, Т. А. Балабай // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків, 2015. – Вип. 163. – С. 45-50.
4. Армашов, Ю.В. Випробування сільськогосподарської техніки на надійність: навчальний посібник [Текст] / Ю.В. Армашов, П.К. Охмат. – Дніпропетровськ: Дніпропетровський державний аграрний університет, 2002. – 219 с.
5. Армашов, Ю.В. Надійність сільськогосподарської техніки: навчальний посібник [Текст] / Ю.В. Армашов, П.К. Охмат. – Дніпропетровськ: РВВ ДДАУ, 2008. – 208 с.
6. Каталог ущільнень [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://sale.hydraulic.com.ua/uplotneniya-corteco.html– Загол. з екрана. – Перевірено : 10.05.2017.
7. Дирда, В.І. Деталі машин: підручник [Текст] / В.І. Дирда, Ю.М. Овчаренко, Ю.Г. Козуб, І.Є. Рижков. – Луганськ-Дніпропетровськ: ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2010. – 308 с.
8. Періодичність проведення технічних обслуговувань трактора JohnDeere 8320R [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://serviceadvisor.deere.com/WebSA/manuals/-omre573879/09001faa802a2b91– Загол. з екрана. – Перевірено : 10.05.2017.

Vitaliy Dyrda, Prof., DSc., Olexandr Chernii, Senior lecturer, Olexandr Zhydyk, master
Dnipropetrovsk state agrarian and economic university, c. Dnipro, Ukraine

Research of operational reliability of john deere tractors series 8320r in the conditions of ukraine

John Deere brand takes a large part of Ukrainian agricultural machinery market. But due of factors inherent to Ukraine it has been observed a stream of refusals that decreases operation reliability indicators of machines.

Collection and analysis of empirical evidence of failures and usage of John Deere tractors in the conditions of south of Ukraine was carried out. Analysis allowed us to draw the following conclusion: the malfunctioned state of machines at the initial stage of their operational life is caused by the second level difficulties failures. Failure of seal of final drive was highlighted from the second level failures cause it takes 62 % of second level failures. Statistical analysis of this failure was carried out. The indicators of reliability of the tractors at the beginning period of usage change by Weibull - Gnedenko's law distribution. As the result confidence interval was calculated with upper endpoint – 547.2 hours and low endpoint – 381.7 hours. It includes actual value of time to failure of researched seals.

In order to prevent loss of operability due to the refusal final drive seals of front axle, it has been proposed to include replacement operation into 350 hours maintenance operating.

operating reliability, time to failure, statistical analysis of failures, final drives, seals

Одержано 18.05.17

УДК 635.82; 631.333.92

О.І. Кепко, доц., канд. техн. наук, А.В. Войтік, доц., канд. техн. наук,
О.С. Пушка, доц., канд. техн. наук, І.О. Лісовий, канд. техн. наук
Уманський національний університет садівництва, м. Умань, Україна
E-mail: kepko@meta.ua

Статична математична модель теплового балансу зерносушарки

З метою оптимізації роботи зерносушарок, які працюють в багатофакторному середовищі запропонована математична модель процесу сушіння високовологого насіння баштанних культур. Використання статичної імітаційної математичної моделі теплового балансу дає можливість розрахунковим шляхом обирати режими роботи сушарки при відомих вхідних параметрах системи.
сушарка, зерносушарка, тепловий баланс, насіння, теплоносій

О.І. Кепко , доц., канд. техн. наук, А.В. Войтик, доц., канд. техн. наук, А.С. Пушка, доц., канд. техн. наук, И.А. Лисовой, канд. техн. наук
Уманский национальный университет садоводства, г.Умань, Украина
Статическая математическая модель теплового баланса зерносушилки
С целью оптимизации работы зерносушилок, которые работают в многофакторной среде, предложена математическая модель процесса сушки высоковлажных семян бахчевых культур. Использование статической математической модели теплового баланса дает возможность расчетным путем выбирать режимы работы сушилки при известных входных параметрах системы.
сушилка, зерносушилка, тепловой баланс, зерно, теплоноситель

Постановка проблеми. В зв'язку з постійним зростанням цін на енергоносії технологічні установки, в яких мають місце теплові процеси, потребують особливої уваги, що пов'язано з високою часткою енерговитрат у структурі собівартості продукції.

При розробці сучасних технологій виділяють кілька основних і допоміжних напрямків. Один з цих напрямків розглядає питання оптимізації роботи зерносушарок які працюють в багатофакторному середовищі. Компромісним рішенням в цьому питанні може бути мінімізація витрат енергії при збереженні рівня прибутковості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цікавим об'єктом для дослідження з точки зору багатофакторності середовища є сушарка високовологого насіння баштанних культур (ВНБК) основною особливістю (ВНБК) якої є власне багатофакторне середовище, яке об'єднане поняттям мікроклімату, який має місце в зоні сушіння насіння баштанних культур, і система теплозабезпечення є невід'ємною складовою цього середовища при цьому моделювання режимів роботи цієї системи при умові складності останнього стає фактором не тільки бажаним, а під час і необхідним.

Моделювання теплових процесів є процес доволі складний, особливо у взаємозв'язку з іншими параметрами і системами зерносушарок [2, 5, 6, 9]. Запропонована статична модель є універсальною і підходить для любого типу сушарок, зокрема каскадного [4, 10] та касетного типів [11]. Умовою більш адекватного моделювання є правильна ідентифікація параметрів об'єкту, що в свою чергу підвищує точність та стійкість систем автоматичного управління [7, 8].

© О.І. Кепко, А.В. Войтік, О.С. Пушка, І.О. Лісовий, 2017

Запропонована статична модель описує роботу системи «сушильний агент – насіння» шляхом оптимізації процесу сушіння за рахунок математичного моделювання більш повного використання тепла і економії енергії.

Принцип роботи запропонованої системи описаний в роботі [3].

Постановка завдання. Метою написання статті є необхідність підвищення енергоефективності роботи зерносушарок шляхом моделювання теплових режимів.

Результати досліджень. Фактори, які підлягають контролю та регулюванню, складають систему, в яку входять температура теплоносія і насіння та їх вологість, площа шару насіння, витрата теплоносія та насіння. Основними факторами, які здійснюють вплив на систему, є фактори навколишнього середовища та вхідні параметри теплоносія та насіння.

В процесі сушки параметри, що впливають на процес потребують оптимального вибору роботи зерносушарки (контрольовані параметри). Наприклад, процес сушіння можна регулювати зміною температури теплоносія на вході в сушарку, зміною площі контакту насіння з теплоносієм, подачі теплоносія або насіння. В той же час на параметри сушіння будуть впливати і неконтрольовані параметри, такі як початкова вологість насіння та температура зовнішнього повітря.

Необхідно знайти такий варіант, який при заданих умовах забезпечив би досягнення екстремального (мінімального) значення втрат теплової енергії.

Оптимальна величина витрат енергії в сушарці, тобто набір значень змінних x_{ik}, які мінімізують значення цільової функції [1]:

$$f(x) = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} a_{kij} x_{kij} \to \min, \tag{1}$$

де i, I – номер секції та кількість секцій сушарки;

k, K – порядковий номер періоду та кількість періодів роботи (розігрів, сушіння);

j, J – параметр, що регулюється, та кількість параметрів (керованих змінних), що регулюються;

x_{ik} – витрати енергії в i–й секції k–го періоду сушки для підтримання j–го параметру.

Введемо граничні умови. Враховуючи, що при розігріванні сушарки («введення в режим») регулювання температури теплоносія та насіннєвого матеріалу за технологічними умовами не проводиться ($K=1$) і, позначивши через: j=1 – параметр температури сушильного агенту; j=2 – температури насіння; j=3 – вологовміст сушильного агенту; j=4 – вологовміст насіння, визначимо, що:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{1ij} = 0, \qquad (K = 1), \tag{2}$$

Початок, закінчення і тривалість сушіння в кожній секції запишемо як:

$$\sum_{i \in I} i \cdot \lambda_{ki}; \quad \sum_{i \in I} i \cdot \lambda_{(k+1)i} \quad \Delta i_k = \sum_{i \in I} i \cdot \lambda_{ki} - \sum_{i \in I} i \cdot \lambda_{(k+1)i}, \quad k = 1,$$

де λ_{ki} – коефіцієнт-зв'язка (булева змінна).

Враховуючи черговість проходження секцій (по вологості насіння) –

$$\sum_{i\in I} i\cdot\lambda_{1i} > \sum_{i\in I} i\cdot\lambda_{2i} \ldots \sum_{i\in I} i\cdot\lambda_{Ki}$$

Виходячи з моделі функціонування та цільової функції ефективність виконання технологічного процесу сушіння оцінюється за питомою енергоємністю процесу, швидкістю сушіння насіння та його кінцевою вологістю. Для обґрунтування параметрів сушарки ВНБК необхідно мати дані про зміну температури, вологовмісту сушильного агенту і насіннєвого матеріалу в процесі сушіння [3].

Введемо обмеження: густина повітря не залежить від температури і тиску в середині сушарки; час переміщення повітря в сушарці та насіннєвого матеріалу побічно враховується показником їх подачі; кінцева температура насіння $\leq 48^{o}$C; діапазон зміни температури сушильного агенту 50…90^{o}C; витрата насіння 15…40 кг/год; витрата сушильного агенту 0,5…1,5 кг/с. Виділимо дві основні складові моделі – тепловий баланс та баланс вологи.

Розглянемо тепловий баланс. Виходячи з теорії тепломасообміну між об'єктом сушіння і сушильним агентом отримано математичні моделі, які описують їх параметри на виході із зерносушарки.

Тепловий баланс сушильного агенту:

$$Q_{н.сш.а} = Q_{нас} + Q_{тв}, \tag{3}$$

де $Q_{н.сш.а}$ – тепло яке витрачається на нагрів сушильного агенту, Вт;

$Q_{нас}$ – тепло яке передається від сушильного агенту до насіння, Вт;

$Q_{тв}$ – тепловтрати сушильного агенту, Вт;

Тепловий баланс насіння:

$$Q_{н.нас} + Q_{нас} = Q_{вол}, \tag{4}$$

де $Q_{н.нас}$ – тепло яке витрачається на нагрів насіння, Вт;

$Q_{вол}$ – втрати теплоти на випаровування вологи (на сушіння), Вт.

Прирівнявши рівняння (3) і (4) до нуля, складемо систему рівнянь, яка буде мати вигляд:

$$\begin{cases} Q_{н.сш.а} - Q_{нас} - Q_{тв} = 0 \\ Q_{н.нас} + Q_{нас} - Q_{вол} = 0 \end{cases}. \tag{5}$$

Розклавши елементи рівняння на складові [3], система рівнянь (5) отримає вигляд:

$$\begin{cases} G_v \cdot C_p \left(t_1 - t_2\right) - \alpha \cdot f_F \left(\overline{t} - \overline{\Theta}\right) - k_T \cdot \Sigma F \left(\overline{t} - t_B\right) = 0 \\ G_z \cdot C_z \left(\Theta_1 - \Theta_2\right) + \alpha \cdot f_F \left(\overline{t} - \overline{\Theta}\right) - \beta \cdot \Psi \cdot f_F \left(a \cdot \overline{\Theta} - c - b \cdot \overline{d}\right) \cdot r' = 0 \end{cases}, \tag{6}$$

або

$$\begin{cases} G_v \cdot C_p \left(t_1 - t_2\right) - \alpha \cdot f_F \left[0{,}5\left(t_1 + t_2\right) - 0{,}5\left(\Theta_1 + \Theta_2\right)\right] - k_T \cdot \Sigma F \left(0{,}5\left(t_1 + t_2\right) - t_B\right) = 0 \\ G_z \cdot C_z \left(\Theta_1 - \Theta_2\right) + \alpha \cdot f_F \left[0{,}5\left(t_1 + t_2\right) - 0{,}5\left(\Theta_1 + \Theta_2\right)\right] - \\ -\beta \cdot \Psi \cdot f_F \left[\, 0{,}5a\left(\Theta_1 + \Theta_2\right) - c - 0{,}5b\left(d_1 + d_2\right)\right] \cdot r' = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

де C_p – питома ізобарна теплоємність сушильного агенту, Дж/кг°С;

t_1 і t_2 – температура сушильного агенту, відповідно, на вході та виході з сушарки, °С;

G_v – витрата сушильного агенту, кг/с;

α – коефіцієнт теплообміну між насінням та сушильним агентом, Вт/м^2 °С;

f_F – площа поверхні насіння, що знаходиться в сушарці, м^2;

$\bar{t}$ – середня температура сушильного агенту $\bar{t} = 0{,}5 \cdot \left(t_1 + t_2\right)$, °С;

$\overline{\Theta}$ – середня температура насіння $\overline{\Theta} = 0{,}5 \cdot \left(\Theta_1 + \Theta_2\right)$,°С;

Θ_1 і Θ_2 – початкова і кінцева температура насіння, °С;

k_T – коефіцієнт теплопередачі від сушильного агенту до зовнішнього середовища, Вт/м^2°С;

ΣF – сумарна площа стінок сушильної камери, м^2;

t_B – температура повітря в приміщенні де встановлено сушарку, °С;

C_z – питома теплоємність насіння, Дж/кг°С;

G_z – витрата насіння, кг/с;

β – коефіцієнт масообміну, кг/м^2 ·Па · с;

a,b,c – сталі розмірні коефіцієнти з розмірністю: Па/°С, Па·кг/г, Па, відповідно;

$\bar{d}$ – середній вологовміст сушильного агенту, $\bar{d} = 0{,}5 \cdot \left(d_1 + d_2\right)$, г/кг (сухої речовини);

d_1 і d_2 – початковий та кінцевий вологовміст сушильного агенту, г/кг (сухої речовини);

r' – прихована теплота пароутворення, Дж/кг;

ψ – коефіцієнт, що враховує зниження швидкості випаровування вологи при її перерозподілі під дією поступового прогріву внутрішніх шарів насіння до максимально допустимої температури нагріву білкової частки зародка.

В даному вигляді модель дозволяє визначити значення температур теплоносія (повітря) та насіння на вході та виході з сушарки в залежності від, наприклад, витрати насіння та повітря через сушарку або від температури повітря на вході. При проведенні відповідних перетворень та внесенні доповнень можна визначити і інші параметри системи.

Приклад застосування імітаційної моделі системи (7) коли необхідно визначити залежність температури повітря та насіння на виході із сушарки при зміні витрати насіння наведений на рис. 1. Моделювання проводилось при сталих значеннях $t_1 = 50^o$С, $\Theta_1 = 22\ ^o$С, $G_v = 1{,}04$кг/с.

На рис. 2 показано варіант застосування моделі коли необхідно визначити залежність температури повітря та насіння на виході із сушарки при зміні витрати теплоносія. Моделювання проводилося при сталих значеннях $t_1 = 50^o$С, $\Theta_1 = 22\ ^o$С, $G_z = 25$кг/год.

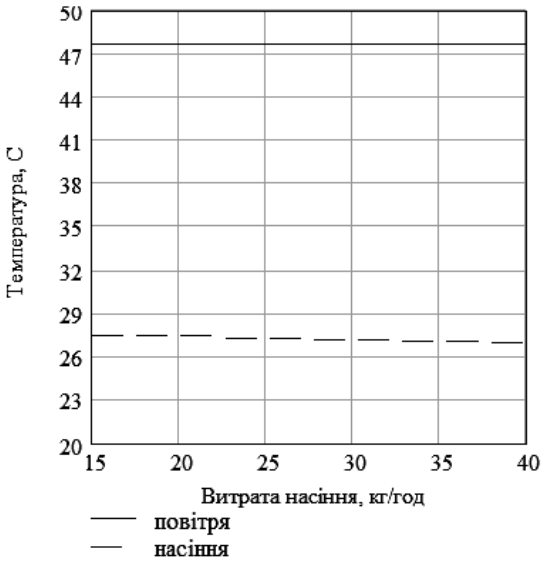


Рисунок 1 – Залежність температури повітря та насіння на виході з сушарки від витрати насіння

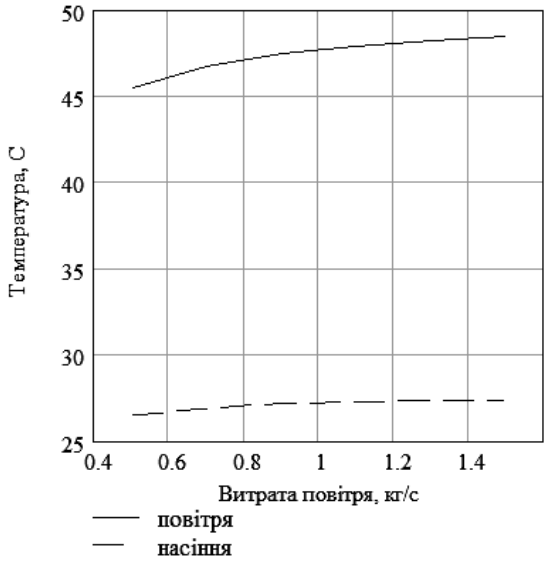


Рисунок 2 – Залежність температури повітря та насіння на виході з сушарки від витрати повітря

Розв'язавши систему (7) відносно t_2 та Θ_2 і змінюючи температуру повітря на вході в сушарку, можна вибрати режим сушіння (рис. 3), орієнтуючись на максимально-допустиму температуру нагріву насіння ($\Theta_2 \leq 48\ ^{o}C$).

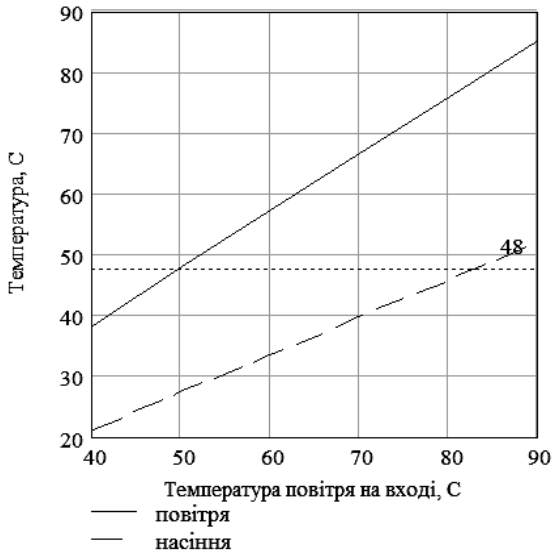


Рисунок 3 – Залежність температури повітря та насіння на виході з сушарки від температури повітря на вході

Таким чином, температуру насіння на виході з сушарки можна регулювати за допомогою зміни витрати насіння, теплоносія або його температури.

Висновки. Дослідження, проведені за допомогою статичної імітаційної математичної моделі теплового балансу системи, показують, що зміна витрати насіння та теплоносія впливає на температуру насіння в значно меншій мірі, чим зміна температури теплоносія на вході в сушарку.

Баланс вологи системи моделюється аналогічним чином.

Використання даних моделей дає можливість розрахунковим шляхом обирати режими роботи сушарки при відомих вхідних параметрах системи.

Список літератури

1. Голуб, Г.А. Інженерія виробництва гливи [Текст] / Г.А. Голуб, О.М. Гайденко, О.І. Кепко. – Кіровоград: СПД ФО Лисенко В.Ф., 2012. – 448 с.
2. Детермінована математична модель руху насіння по каскадах зерносушарки каскадного типу [Текст] / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, Д.В. Богатирьов [та ін.] // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2007. – Вип. 37. – С. 299-304.
3. Добрицький, О.О. Підвищення ефективності технологічного процесу сушіння та розробка конструкції сушарки високовологого насіння баштанних культур : автореферат... канд. техн. наук, спец.: 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» [Текст] / Добрицький О.О.; М-во аграр. політики та продовольства Укр. Луганський нац. аграр. ун-т. – Луганськ, 2011. – 24 с.
4. Експериментальні дослідження впливу параметрів зерносушарки каскадного типу на показники її роботи [Текст] / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, Д.В. Богатирьов [та ін.] // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2006. – Вип. 36. – С. 29-34.
5. Модель зміни шпаруватості псевдорозрідження шару насіння на каскадах зерносушарки [Текст] / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, М.О. Скриннік [та ін.] // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2008. – Вип. 38. – С. 258-264.
6. Модель переносу тепла в зерносушарці каскадного типу від каскаду до шару насіння [Текст] / М.М. Петренко, Т.Г. Сабірзянов, І.О. Скриннік [та ін.] // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському машинобудуванні, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2008. – Вип. 20. – С. 293-298.
7. Пат. UA 10346U Україна №u 200503610 / Зерносушильна установка касетного типу: деклараційний патент UA 10346 U Україна / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, Заявл. 18.04.2005; Опубл. 15.11.2005, Бюл. № 11. – 4 с.
8. Петренко, М.М. Зерносушильна установка касетного типу для сушіння зернових культур [Текст] / М.М. Петренко, І.О. Скриннік // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському машинобудуванні, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2004. – Вип. 15. – С. 318-323.
9. Петренко, М.М. Визначення швидкості фільтрації та гідравлічного опору на каскадах сіток зерносушарки касетного типу / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, Д.В. Богатирьов // Праці. Таврійська державна агротехнічна академія. – Мелітополь, 2005. – Вип. 34. – С. 160-165.
10. Результати експериментальних досліджень впливу основних параметрів на процес сушіння зернових культур у зерносушарці каскадного типу [Текст] / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, Д.В. Богатирьов [та ін.] // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль, 2007. – Вип. 3., Т. 12. – С. 53-59.
11. Науково-технологічні основи очисного та сушильного зернового обладнання, що працює в стані псевдозрідження [Текст] : монографія / М.М. Петренко, В.М. Сало, Д.В. Богатирьов [та ін.] – Кіровоград: СПД ФО Лисенко В.Ф., 2013. – 212 с.

Oleg Kepko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Andriy Voytik, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Olexsandr Pushka, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Ivan Lisoviy, PhD tech. sci.
Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

Mathematical model of static dryer heat balance

In connection with constant growth of prices for energy sources, processing units, where there are thermal processes, require special attention due to the high share of energy consumption in the cost structure of products.

In the development of modern technology there are several main and auxiliary directions. One of these areas considers the issues of optimizing the operation of grain dryers operating in multi-factor environment. A compromise solution in this matter may be the minimization of energy consumption while maintaining the level of profitability.

Interesting object to study from the point of view of the multifactorial environment is dryer high wet seeds of gourds, the main feature of which is actually a multifactorial environment that incorporates the concept of a microclimate, which takes place in the drying zone of the seed and system of heat supply is an integral component of this environment the simulation of this system under the condition of complexity becomes a factor not only desirable and needed.

The proposed static model describes the system work of "drying agent – seeds" by optimizing the drying process due to the mathematical modeling of more complete use of heat and energy savings.

Factors which are subject to control and regulation, constitute a system, which includes the coolant temperature and seeds and their moisture content, size of the seed layer, the flow rate of the coolant and seeds. The main factors that influence the system are the environmental factors and input parameters of the coolant and seeds.

In the drying process parameters influencing the process require optimal operation of the dryer (control parameters). For example, the drying process can be regulated by changing the temperature of the coolant at the inlet to the dryer, the change of the area of contact of seeds with coolant, coolant supply or the seeds. At the same time on the drying parameters will be affected by uncontrolled parameters, such as initial seed moisture content and open air temperature.

You need to find the option that within specified conditions would ensure the achievement of the extremal (minimum) values of the heat losses.

On the basis of the operational model and the objective function, the efficiency of the process of drying is measured at a specific energy consumption of the process, the speed of drying of seeds and final moisture content. For study parameters of the dryer it is necessary to have data on changes in temperature, moisture content of the drying agent and seed during the drying process.

A mathematical model of the drying process allows to determine the dependence of air temperature and seed at the outlet of the dryer when you change the amount of seed and determine the dependence of the air temperature and seed at the exit of the dryer when you change the coolant flow. If the proposed model will be solved for the temperature at the outlet of the dryer and the final drying temperature, changing the temperature of the air entering the dryer, you can choose the drying mode, focusing on the maximum allowable heating temperature of the seeds.

Studies conducted using the static simulation of the mathematical model of the heat balance, show that the change of consumption of the seeds and the coolant affect the temperature of the seed to a much lesser extent than changing the temperature of the coolant at the inlet to the dryer. The use of these models allows by calculation select the modes of operation of the dryer with the known input parameters of the system.

drier, grain drier, thermal balance, seeds, heat carrier

Одержано 18.05.17

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.31

Ю.О. Ковальчук, доц., канд. техн. наук, О.С. Пушка, доц., канд. техн. наук, А.В. Войтік, доц., канд. техн. наук
Уманський національний університет садівництва, м. Умань, Україна
E-mail: temp1405@mail.ru

Вплив поглинаючих покриттів на глибину лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки зі сталі 45

Досліджено вплив поглинаючих покриттів на глибину лазерної обробки з метою підвищення міцності та зносостійкості деталей сільськогосподарської техніки зі сталі 45. Визначено, що найкращі результати мають місце у випадку застосування покриттів, що містять оксиди алюмінію та цинку, а також сажу у вигляді аерозолю, що призводить до значного збільшення глибини зони лазерного впливу. Правильний підбір поглинаючих покриттів забезпечить суттєве зростання коефіцієнта корисної дії лазера.

метод поверхневої лазерної обробки, лазерне зміцнення, гартування, сталь 45, зносостійкість, деталі сільськогосподарської техніки

© Ю.О. Ковальчук, О.С. Пушка, А.В. Войтік, 2017

Ю.А. Ковальчук, доц., канд. техн. наук, А.С. Пушка, доц., канд. техн. наук, А.В. Войтик, доц., канд. техн. наук
Уманский национальный университет садоводства, г.Умань, Украина

Влияние поглощающих покрытий на глубину лазерной обработки деталей сельскохозяйственной техники из стали 45

Исследовано влияние поглощающих покрытий на глубину лазерной обработки с целью повышения прочности и износостойкости деталей сельскохозяйственной техники из стали 45. Установлено, что наилучшие результаты имеют место в случае применения покрытий, содержащих оксиды алюминия и цинка, а также сажу в виде аэрозоля, что приводит к значительному увеличению глубины зоны лазерного воздействия. Правильный подбор поглощающих покрытий обеспечит существенный рост коэффициента полезного действия лазера.

метод поверхностной лазерной обработки, лазерное упрочнение, закаливание, сталь 45, износостойкость, детали сельскохозяйственной техники

Постановка проблеми. Збільшення ресурсу виробітку різних деталей сільськогосподарської техніки нині не втрачає своєї актуальності. Забезпечення вищої міцності деталей, які найбільше піддаються зносу та виходять з ладу, є однією із першочергових задач, що стоять перед виробниками сільськогосподарських машин.

Багато деталей тракторів, комбайнів, засобів механізації тваринництва та інших сільськогосподарських машин, такі як колінчаті, розподільчі та шліцеві вали, складові кривошипно-шатунного механізму, шестерні, зубчаті колеса, зірочки, плунжери тощо, що повинні задовільняти відповідні вимоги щодо міцності та зносостійкості, виготовляються зі сталі 45. Для їх зміцнення може застосовуватися метод поверхневої лазерної обробки. Міцність та зносостійкість металевих деталей у випадку застосування даного методу залежать також і від глибини зони лазерного впливу (ЗЛВ), на яку суттєвий вплив справляють різні поглинаючі покриття.

Тому аналіз впливу різноманітних поглинаючих покриттів на глибину поверхневої лазерної обробки сталі 45, що в свою чергу впливатиме на ресурс виробітку відповідних деталей сільськогосподарської техніки, на даний момент є актуальним та важливим.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. До публікацій останніх років на тему впливу методу поверхневої лазерної обробки на властивості матеріалів можна віднести праці таких науковців та вчених, як В.П. Вейко, О.Г. Григор'янц, В.С. Черненко, І.М. Шиганов, М.В. Кіндрачук, О.І. Дудка, В.С. Коваленко та інших, які детально займалися питаннями впливу лазерного випромінювання на поверхню сталевих зразків у різних випадках та для різних матеріалів [1-4]. Останні дослідження щодо лазерного зміцнення різних деталей сільськогосподарської техніки наводились в наукових працях В.П. Бірюкова, І.Ф. Буханової, В.М. Бобрицького, О.Й. Мажейка, Т.С. Скобло та інших [5-10].

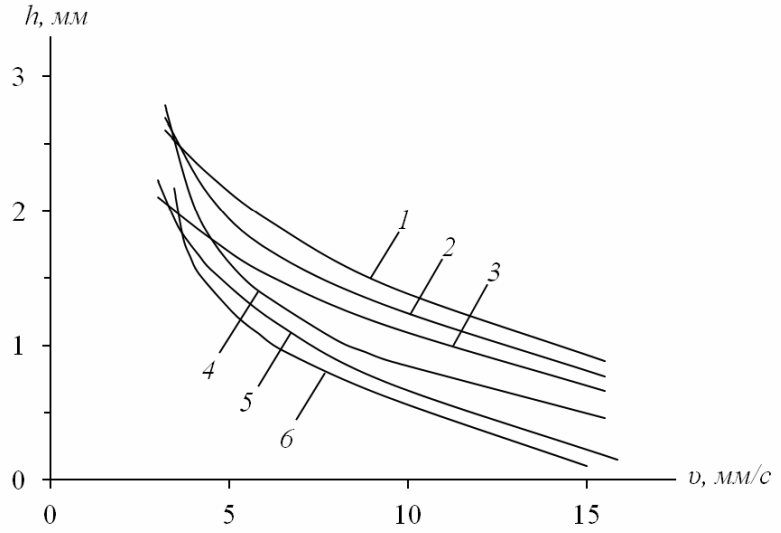
Постановка завдання. Метою роботи є дослідити вплив різних поглинаючих покриттів на глибину лазерної обробки сталі 45 з метою покращення її механічних властивостей та збільшення ресурсу виробітку відповідних деталей сільськогосподарської техніки.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що під час лазерного зміцнення деталей сільськогосподарської техніки важливим фактором впливу на їх ресурс виробітку є глибина зміцненого шару, яка залежить від параметрів поверхневої лазерної обробки, в тому числі і від нанесених на зміцнювану поверхню поглинаючих покриттів.

Поглинаючі покриття дозволяють оброблюваному зразку зі сталі отримувати значно більшу частину енергії лазерного випромінювання, суттєво зменшуючи при цьому відбиття променя від поверхні зміцнюваної деталі.

Залежність глибини ЗЛВ на полірованому зразку зі сталі 45 при використанні різних поглинаючих покриттів зображена на рис. 1 [1]. Слід зазначити, що

ефективність застосування поглинаючих покриттів та в цілому лазерного зміцнення залежить також і від швидкості обробки, що визначає час впливу лазерного випромінювання та температуру відповідної поверхні. При збільшенні швидкості лазерної обробки (υ > 6 мм/с) оплавлення поверхні дослідного зразка не відбувається. Найкращі результати мають місце у випадку застосування покриттів, що містять оксиди алюмінію та цинку, а також сажу у вигляді аерозолю (криві 1-4). При цьому відбувається значне збільшення глибини ЗЛВ.



1 – аерозольна сажа; 2 – Al_2O_3 з органічним сполучником; 3 – водяний розчин ZnO;
4 – ZnO з органічним сполучником; 5 – водяний розчин сажі; 6 – розчин графіту в ацетоні

Рисунок 1 – Зміна глибини ЗЛВ на полірованій сталі 45 при дослідженні різних поглинаючих покриттів ($E \cong 20$ $МВт/м^2$)

Також лазерне гартування сталі 45 при використанні різноманітних поглинаючих покриттів може успішно використовуватись і при вищих швидкостях обробки, але при цьому відбувається значне зменшення зміцненого цим методом обробки глибини шару (рис. 2) [1].

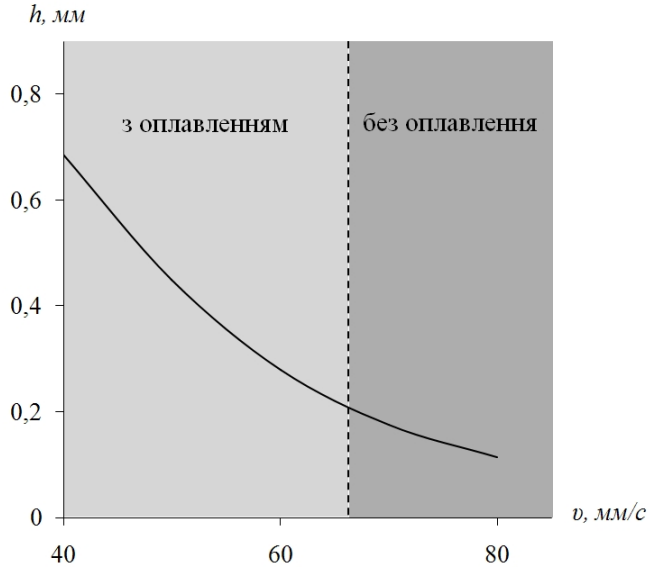


Рисунок 2 – Залежність глибини ЗЛВ сталі 45 від швидкості обробки
(P=3,1 кВт, поглинаюче покриття – аерозольна сажа)

Застосування та правильний підбір поглинаючих покриттів дозволить обробляти металеві зразки на потрібну глибину також і лазерною установкою меншої потужності, так як значно збільшиться поглинання енергії лазерного променя, зросте коефіцієнт корисної дії лазера.

Безумовно, розглянуті приклади лазерного гартування сталі 45 при використанні різних поглинаючих покриттів не охоплюють всіх можливих випадків. Питання розробки нових, більш ефективних, дешевих та технологічних покриттів для лазерної поверхневої обробки сталі не можна вважати вирішеним, необхідно й надалі продовжувати дослідження в даному напрямку.

Використання лазерного гартування дозволяє також підвищити зносостійкість пар тертя сільськогосподарської техніки, що працюють як в умовах сухого тертя, так і в абразивно-масляному середовищі. Зменшення зношування деталей після лазерного гартування обумовлене рядом факторів: великою твердістю поверхні, високою дисперсністю структури, збільшеними несучими властивостями поверхні, зменшеним коефіцієнтом тертя тощо.

Поряд із цим на зносостійкість впливає нерівномірність властивостей локальних ділянок обробленої поверхні. Зміцнення з перекриттям, а також нанесення окремих плям або доріжок лазерного зміцнення призводить до утворення знеміцнених та незміцнених ділянок у місцях, де метал опромінювався два та більше разів або зовсім не опромінювався. Ці ділянки можуть бути місцями релаксації залишкових структурних та термічних напружень. Крім того, часткове випаровування матеріалу в ЗЛВ викликає утворення мікрозаглиблень, в яких утримується мастило. Це також сприяє збільшенню зносостійкості при роботі пар тертя.

В умовах тертя ковзання сталі 45, загартованої лазерним безперервним випромінюванням без оплавлення, по загартованій і низьковідпущеній сталі ШХ15 зношування й коефіцієнт тертя суттєво знижуються в порівнянні зі звичайним гартуванням сталі 45. Також після застосування методу поверхневої лазерної обробки різко зменшується час припрацювання пар тертя (рис. 3) [1].

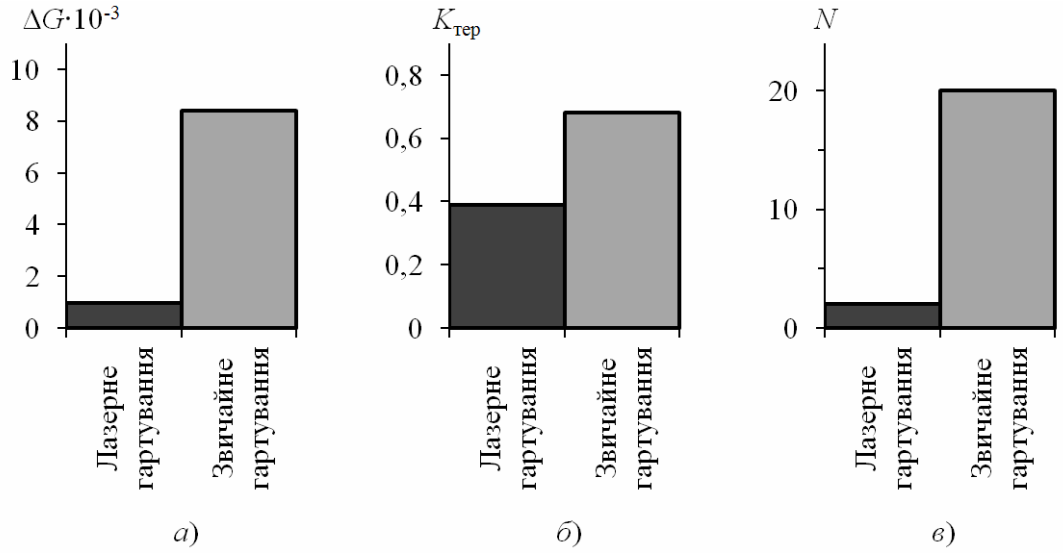


Рисунок 3 – Порівняння відносного зносу (*а*), коефіцієнту тертя (*б*) та числа циклів до припрацювання пар тертя (*в*) для звичайного та лазерного гартування сталі 45 (P=1 *кВт*, υ=25 *мм/с*)

На поверхні деталей, зокрема, зі сталі 45, зміцнених безперервним або імпульсним лазерним випромінюванням, виникають неоднорідно розподілені

залишкові напруження. Розміри області зі зміненими напруженнями значно більші, ніж зона лазерного впливу, причому має місце певна симетрія відносно центру зміцненої смуги чи плями. Величина та знак залишкових напружень залежать від режимів лазерної обробки, хімічного складу сталі та деяких інших факторів. Вони визначають такі властивості деталей сільськогосподарських машин, як зносостійкість, втомні характеристики, залишкові деформації тощо.

Порівняно зі звичайним гартуванням та з гартуванням із відпуском лазерне гартування деталей сільськогосподарської техніки забезпечує в декілька разів меншу інтенсивність зносу внаслідок особливостей залишкових напружень у поверхневому шарі сталі [1] (рис. 4).

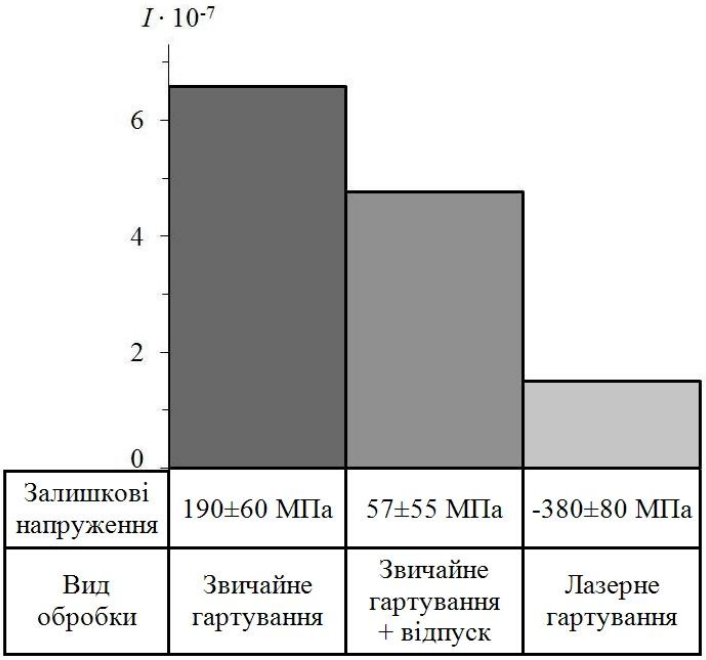


Рисунок 4 – Інтенсивність зносу сталі 45 при сухому терті в залежності від максимальних залишкових напружень у поверхневому шарі термозміцненого зразка

Висновки. Отже, досліджено вплив поглинаючих покриттів на глибину лазерної обробки сталі 45 з метою підвищення міцності та зносостійкості відповідних деталей сільськогосподарської техніки. Визначено, що найкращі результати мають місце у випадку застосування покриттів, що містять оксиди алюмінію та цинку, а також сажу у вигляді аерозолю, що призводить до значного збільшення глибини зони лазерного впливу. Правильний підбір поглинаючих покриттів забезпечить значне зростання коефіцієнта корисної дії лазера та дозволить застосовувати лазер меншої потужності, що в свою чергу сприятиме зменшенню собівартості операції зміцнення деталей сільськогосподарських машин. Застосування лазерної обробки дозволяє значно підвищити зносостійкість деталей сільськогосподарських машин.

Список літератури

1. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки : Учеб. пособие для вузов [Текст] / Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. ; под ред. А.Г. Григорьянца. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с.
2. Черненко, В.С. Променеві методи обробки : Навч. посібник [Текст] / Черненко В.С., Кіндрачук М.В., Дудка О.І. – К.: Кондор, 2008. – 166 с.

3. Вейко, В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии». Введение в лазерные технологии. [Текст] / В.П. Вейко, А.А. Петров. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 143 с.
4. Упрочнение деталей лучом лазера [Текст] / В.С. Коваленко, Л.Ф. Головко, Г.В. Меркулов, А.И. Стрижак ; под ред. В.С. Коваленко. – К.: Техника, 1981. – 131 с.
5. Бирюков, В.П. Повышение износостойкости деталей сельскохозяйственной техники и почвообрабатывающих орудий лазерным упрочнением и наплавкой [Текст] / В.П. Бирюков // Лазерные технологии в сельском хозяйстве : Тематический сборник. – М.: Техносфера, 2008. – С. 256–264.
6. Буханова, И.Ф. Применение лазерного излучения для упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственного машиностроения [Текст] / И.Ф. Буханова, В.В. Дивинский, В.М. Журавель // Лазерные технологии в сельском хозяйстве : Тематический сборник. – М.: Техносфера, 2008. – С. 264-270.
7. Мажейка, О.Й. Модифікування технології лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки [Текст] / Мажейка О.Й. // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Вип. 21. – Кіровоград: КНТУ, 2008. – С. 164–167.
8. Бобрицький, В.М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах» [Текст] / В.М. Бобрицький. – К., 2007. – 20 с.
9. Бирюков, В.П. Восстановление и упрочнение поверхностей лазерным излучением [Текст] / Бирюков, В.П. // Фотоника. – 2009. – № 3. – С. 14–16.
10. Разработка технологии восстановления с использованием лазерного луча [Текст] / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.В. Сайчук, В.Л. Манило // Научный вестник Луганского национального аграрного университета. Серия «Технические науки». – 2011. – № 30. – С. 257–265.

Yuriy Kovalchuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Olexandr Pushka, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Andriy Voitik, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

Effect of absorbing coatings on the depth of laser processing of agricultural machinery parts from steel 45

The aim of this work is to study the effect of various absorbing coatings on the depth of laser processing of steel 45.

The increase in strength and wear resistance of agricultural machinery parts as a result of laser treatment is established. It has been established that the best results are obtained when coatings containing alumina and zinc oxides and also carbon black in the form of an aerosol are used, which leads to a significant increase in the depth of the laser exposure zone. Correct selection of absorbing coatings will provide a significant increase in the coefficient of efficiency of the laser and will allow the use of a lower power laser.

Choosing the right laser power will help reduce the costs of hardening of agricultural machines parts.

method of surface laser treatment, laser hardening, tempering, steel 45, wear resistance, details of agricultural machinery

Одержано 24.04.17

УДК 621.798.38

О.В. Оришака, доц., канд. техн. наук, В.І. Гуцул, доц., канд. ф.-м. наук,
А.М. Артюхов, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
E-mail: vvv96@yandex.ua

Теоретичне дослідження регулятора витоку сипкого матеріалу

Отримані залежності впливу кута нахилу поверхні конусного ската регулятора витоку сипкого матеріалу та радіуса округлення торцевої частини полого циліндра регулятора витоку сипкого матеріалу на максимальне значення переміщення конусного ската, при якому площа витоку сипкого матеріалу залишається меншою за площу вхідного отвору матеріалопровода; залежності впливу значення переміщення конуса на час повного вивантажування бункера; залежності, які дозволяють визначати швидкість витоку матеріалу та об'єм вивантаженого матеріалу при різних значеннях основних параметрів регулятора.
регулятор витоку, сипкий матеріал

О.В. Орышака, доц., канд. техн. наук, В.И. Гуцул, доц., канд. ф.-м. наук, А.Н. Артюхов, доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальний технический университет, г. Кропивницкий, Украина
Теоретическое исследование конусного регулятора истечения сыпучего материала
Полученны зависимости влияния угла наклона поверхности конусного ската регулятора истечения сыпучего материала и радиуса округления торцевой части полого цилиндра регулятора истечения сыпучего материала на максимальное значение перемещения конусного ската, при котором площадь истечения сыпучего материала остается меньше площади входного отверстия материалопровода; зависимости влияния значения перемещения конуса на время полной выгрузки бункера; зависимости, позволяющие определять скорость истечения материала и объём выгруженного материала при различных значениях основных параметров регулятора.
регулятор истечения, сыпучий материал

Постановка проблеми. Установки безперервної дії мають ряд переваг перед установками з циклічною подачею (низькі енергетичні витрати, висока продуктивність, менша матеріалоємкість тощо) [1], тому вдосконалення установок безперервної дії є актуальною задачею. Регулятор витоку сипкого матеріалу, як складова частина установок безперервної дії, потребує відповідних досліджень для обгрунтування та оптимізіції параметрів конструкції установки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами проведено дослідження конусного стабілізатора потоку сипкого матеріалу установки безперервної дії для завантаження сипких матеріалів [1].

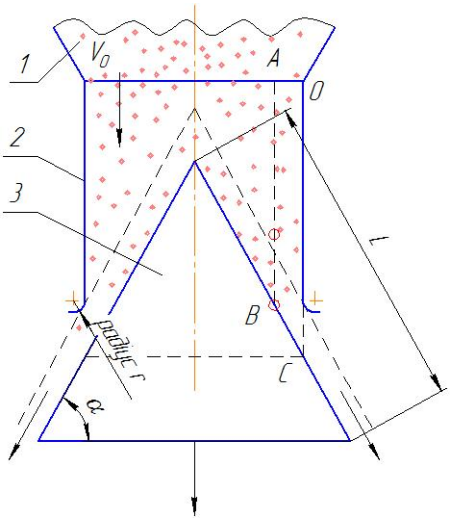
Постановка завдання. Враховуючи те, що регулятор витоку сипкого матеріалу є складовою частиною конструкції перспективної установки безперервної дії, виникла необхідність у дослідженні взаємодії потоку сипкого матеріалу і регулятора витоку.

Таким чином, необхідно було провести теоретичне дослідження впливу параметрів регулятора витоку сипкого матеріалу на максимальне значення переміщення конусного ската, при якому площа витоку сипкого матеріалу залишається меншою за площу вхідного отвору матеріалопровода; впливу значення переміщення

© О.В. Оришака, В.І. Гуцул, А.М. Артюхов, 2017

конуса на час повного вивантажування бункера; отримати залежності, які дозволяють визначати швидкість витоку матеріалу та об'єм вивантаженого матеріалу при різних значеннях основних параметрів регулятора.

Виклад основного матеріалу. Регулятор витоку (рис.1) – це матеріалопровід у формі полого циліндра, який одним торцем (верхнім) з'єднананий з бункером (вхідний отвір), а вихідний торець (нижній) перекривається конусним скатом, що має можливість рухаться впродовж своєї осі і таким чином змінювати кільцевий зазор δ (рис.2).



1 – бункер; 2 – матеріалопровід; 3 – конусний скат

Рисунок 1 – Розрахункова схема регулятора витоку сипкого матеріалу

В дослідженні розглядається випадок, коли вихід торця представляє собою криволінійну опуклу поверхню, осьовим перерізом якої є дуга кола.

При переміщенні конуса вниз на величину h утворюється кільцевий зазор δ (див. рис.2). Очевидно, що величина переміщування h визначає розмір зазору δ і площу витоку сипкого матеріалу S_B. Якщо значення h достатньо великі, то матеріал вільно рухається по конічній поверхні [1]. В даній роботі досліджується процес завантаження при відносно малих значеннях h (нижче межі зміни h будуть уточнені). У цьому випадку за допомогою величини h можна регулювати швидкість витоку сипкого матеріалу.

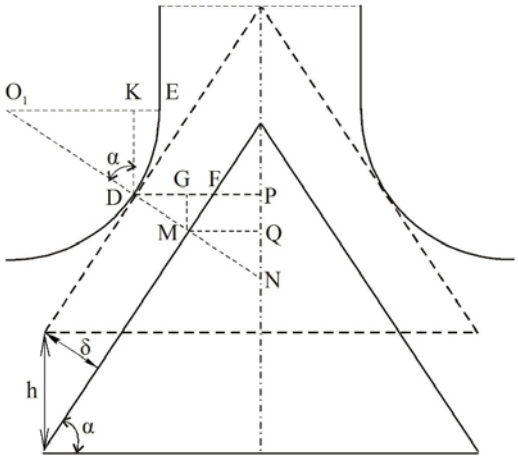


Рисунок 2 – Розрахункова схема для визначення величин R_B і S_B

Метою даної роботи є дослідження процесу витоку сипкого матеріалу при різних значеннях переміщення h та інших геометричних параметрів регулятора.

Нехай, R_T – радіус циліндра матеріалопровода;

r – радіус округлення торцевої частини матеріалопровода (рис.1);

R_B – радіус торцевої частини матеріалопровода регулятора витоку з урахуванням округ-лення (на рис.2 $R_B = DP$).

Враховуючи, що $KE = O_1E - O_1K = r(1 - \sin\alpha)$, маємо

$$R_B = R_T + r(1 - \sin\alpha), \quad (1)$$

де α – кут нахилу поверхні конусного скату (рис.2).

Поверхнею витоку сипкого матеріалу є бічна поверхня зрізаного конуса з твірною $\delta = DM$ і радіусами основ $R_1 = MQ, R_B = DP$ (рис. 2). Нехай $l_1 = MN, l_2 = DN$, тоді

$$S_B = \pi R_B l_2 - \pi R_1 l_1 .$$

Взявши до уваги, що $l_1 = l_2 - \delta, R_1 = R_B - \delta\sin\alpha$, маємо

$$S_B = \pi\delta(R_B + (l_2 - \delta)\sin\alpha) .$$

Використовуючи залежності $l_2 = R_B / \sin\alpha, \delta = h\cos\alpha$, отримуємо

$$S_B = \pi h\cos\alpha(2R_B - 0{,}5h\sin 2\alpha), \quad (2)$$

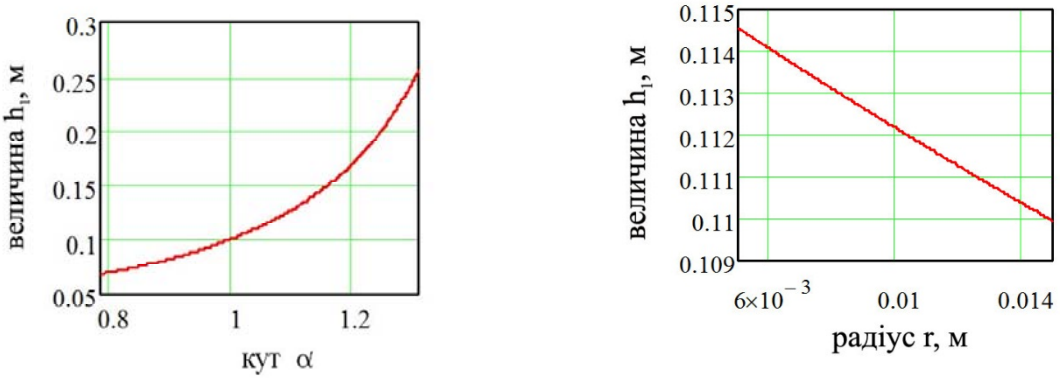
де R_B обчислюється за формулою (1).

Далі розглядаються значення h, при яких площа S_B залишається меншою за площу вхідного отвору матеріалопровода. Отже, максимальне значення величини h, яке позначимо через h_1, є розв'язком квадратного рівняння (береться менший корінь)

$$\pi h\cos\alpha(2R_B - 0{,}5h\sin 2\alpha) - \pi R_T^2 = 0 . \quad (3)$$

Значення h при $0 < h \le h_1$ визначають продуктивність витоку сипкого матеріалу.

На рис.3 показані залежності величини h_1 від параметрів α і r при фіксованому значені одного з них. Тут і у всіх наступних розрахунках приймалося, що $R_T = 0{,}08\ м$. Як бачимо, залежність h_1 від α є досить суттєвою. Збільшення кута α призводить до збільшення h_1. Це пов'язане з тим, що зростання α тягне за собою зменшення площі S_B (див. формулу (2)). Величина r значно менше впливає на значення h_1. Далі всі розрахунки зроблені при $r = 0{,}01$ м.



а) б)

а) значення h_1 при $r = 0{,}01$ м; б) значення h_1 при $\alpha = \pi / 3$

Рисунок 3 – Залежність величини h_1 від параметрів α і r

Припустимо, що матеріал в бункері знаходиться в стані інтенсивної вібрації. У цьому випадку швидкість витікання сипучого матеріалу визначається за формулою [2]

$$v = \lambda\sqrt{2gH}\ , \tag{4}$$

де λ – коефіцієнт витікання (приймає значення менше одиниці і для різних матеріалів визначається експериментально);

H – висота стовпа матеріалу над отвором витоку;

g – прискорення вільного падіння. Розглядаємо далі бункер циліндричної форми з радіусом основи $R_Б$ Через H_1 позначимо висоту стовпа матеріалу, при який форма бункера в нижній частині змінюється з циліндричної на конічну. Припускаємо, що $H \geq H_1$.

Нехай за малий проміжок часу Δt висота матеріалу над отвором витоку змінюється на ΔH . Оскільки Δt мале, то вважаємо, що швидкість v у цей проміжок часу залишається сталою. З одного боку об'єм матеріалу в бункері зменшився на величину $\Delta V = -\pi R_Б^2 \Delta H$ (враховано, що ΔH від'ємне), а з іншого – на величину $\Delta V = S_B v \Delta\Delta$. Можемо записати

$$-\pi R_Б^2 \Delta H = S_B v \Delta t\ , \tag{5}$$

де S_B обчислюється за формулою (2).

Замінивши в (5) прирости величин відповідними диференціалами і використовуючи залежність (4), отримуємо наступне диференціальне рівняння

$$-\pi R_Б^2 dH = \lambda\sqrt{2gH}\, S_B dt\ . \tag{6}$$

Після інтегрування маємо

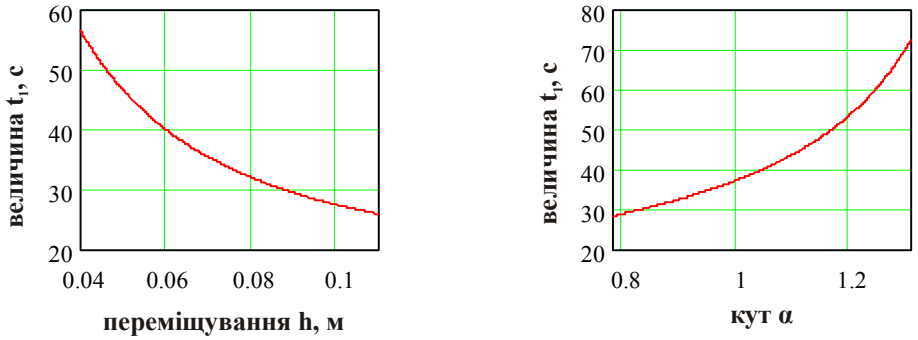
$$H = \left(\sqrt{H_0} - \frac{\lambda\sqrt{2g}\, S_B}{2\pi R_Б^2} t\right)^2 , \tag{7}$$

де H_0 – висота стовпа матеріалу над отвором витоку в початковий момент часу. Умова $H \geq H_1$ виконується при $t \leq t_1$, де

$$t_1 = \frac{2\pi R_Б^2\left(\sqrt{H_0} - \sqrt{H_1}\right)}{\lambda\sqrt{2g}S_B}. \qquad (8)$$

Величину t_1 будимо вважати часом повного вивантажування бункера.

На рис. 4 наведені розрахунки часу повної вивантажування бункера, які зроблені за формулою (8) при $R_Б = 0{,}5$ *м;* $H_0 = 2{,}5$ *м;* $H_1 = 0{,}5$ *м* (вказані значення беруться і в наступних розрахунках). Збільшення величини h прогнозовано тягне за собою зменшення t_1, а збільшення кута α призводить до збільшення t_1.



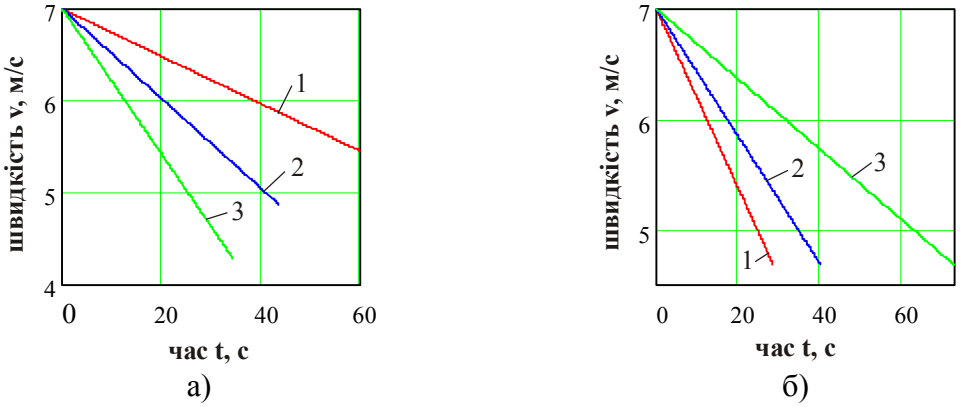
а) значення t_1 при $\alpha = \pi/3, \lambda = 0{,}6$; б) значення t_1 при $h = 0{,}06, \lambda = 0{,}6$

Рисунок 4 – Залежність величини t_1 від параметрів h і α

На основі (7) і (4) отримуємо залежність швидкості витоку v від часу:

$$v = \sqrt{2gH_0} - \frac{g\lambda^2 S_B}{\pi R_Б^2}t. \qquad (9)$$

На рис.5 побудовані закони зміни швидкості витоку $v(t)$ при деяких значеннях основних параметрів. Час t тут і далі змінювався від нуля до t_1. Як і слід було очікувати, при збільшенні коефіцієнта λ і зменшенні кута α швидкість спадання величини v збільшується.



а) 1, 2, 3 – залежність $v(t)$ при $h = 0{,}06$ *м,* $\alpha = \pi/3$ і $\lambda = 0{,}4; 0{,}55; 0{,}7$ відповідно

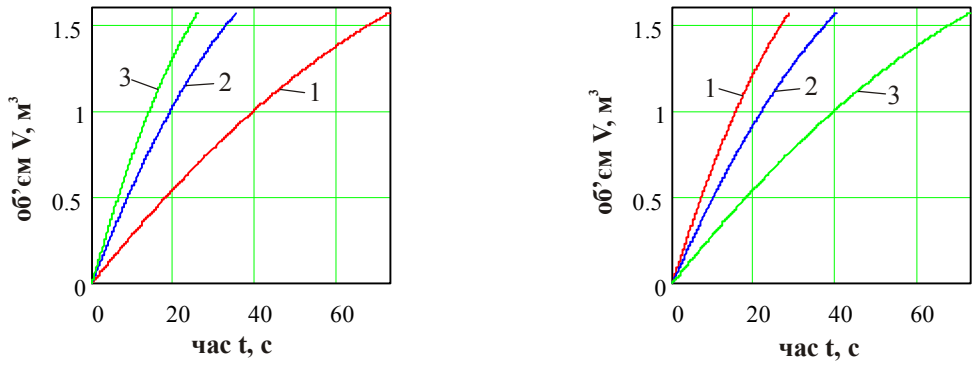
б) 1, 2, 3 – залежність $v(t)$ при $h = 0{,}06$ *м,* $\lambda = 0{,}6$ і $\alpha = \pi/4; \pi/3; 5\pi/12$ відповідно

Рисунок 5 – Закон зміни швидкості витоку

Об'єм матеріалу який витік з бункера, визначається рівнянням $V = \pi R_Б^2 (H_0 - H)$. Можемо записати

$$V = \lambda\sqrt{2g}S_B\left(\sqrt{H_0} - \frac{\lambda\sqrt{2g}S_B}{4\pi R_Б^2}t\right)\cdot t\,. \qquad (10)$$

На рис.6 наведені залежності $V(t)$, які побудовані за формулою (10). Слід відмітити суттєвий вплив значення кута α на продуктивність вивантаження. Він приблизно на тому ж рівні, що і значення вертикального зміщення конуса h.



а) 1, 2, 3 – залежність $V(t)$ при $\lambda = 0{,}6$; $\alpha = \pi/3$ і $h = 0{,}03$; 0,07; 0,11 *м* відповідно

б) 1, 2, 3 – залежність $V(t)$ при $h = 0{,}06$ *м*, $\lambda = 0{,}6$ і $\alpha = \pi/4$; $\pi/3$; $5\pi/12$ відповідно

Рисунок 6 – Закон зміни об'єму матеріалу, який вивантажується з бункеру

Висновки:

1. При випуклій (округленій) формі торцевої частини полого циліндра регулятора витоку (див. рис.1) площа витоку, а отже і основні показники роботи регулятора, залежать від радіуса округлення.

2. Величина h_1, яка визначає граничне значення переміщування h при регулюванні продуктивності витоку, в значній мірі залежить від кута α і в менший – від радіуса r.

3. Час повного вивантаження бункера t_1 збільшується, а продуктивність зменшується при збільшенні кута α і зменшенні коефіцієнта λ.

4. Зростання коефіцієнта λ, переміщування h і спадання кута α тягнуть за собою більш швидке спадання швидкості витоку v.

5. Отримані результати дозволяють визначити значення основних геометричних параметрів регулятора для забезпечення потрібних вихідних показників.

Список літератури

1. Оришака, О.В. Теоретичне дослідження конусного стабілізатора потоку сипкого матеріалу установки безперервної дії для завантаження сипких матеріалів [Текст] / О.В. Оришака, В.І. Гуцул, А.М. Артюхов // Конструювання, виробництво та експлуатація с-г. машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2016. – Вип. 46. – С. 175-181.
2. Зенков, Р.Л. Механика насыпных грузов [Текст] / Р.Л. Зенков. – М.: Машиностроение, 1964. – 251 с.
3. Аналіз продуктивності установки безперервної дії для завантаження сипких матеріалів/ Оришака О.В., Оришака В. О., Артюхов А.М., Кравцов А.О. // Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. – Запоріжжя, НВК Інтер-М, 2013. – Вип. 1, – С. 169-175.

Oleh Oryshaka, Assos. Prof., PhD tech. sci., Vasily Gutsul, Assos. Prof., PhD phys.&math. sci., Anatoly Artiuhov, Assos. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnitskyi, Ukraine
Theoretical investigation of the conical outflow regulator of free-flowing material

The dependences of the influence of the angle of slope of the cone-slope surface of the regulator of the outflow of loose material and the radius of rounding of the end part of the hollow cylinder of the flow-out material flow controller on the maximum value of the cone-shaped slope movement, at which the flow area of the loose material remains less than the area of the inlet of the material duct; Dependence of influence of value of cone displacement on the time of complete unloading of the hopper; Dependencies that allow to determine the flow rate of material and the volume of the discharged material for different values of the main parameters of the regulator.

Research findings.

1. In the convex (rounded) form the face of the hollow cylinder regulator leaks (see fig.1) leakage area, and therefore the main indicators of the regulator, depending on the radius of rounding.
2. The value h_1, that defines the limit value of displacement h in regulating leakage performance is largely dependent on the angle α and smaller - the radius r.
3. A complete unloading hopper t_1 increases and efficiency decreases with increasing angle α and decreasing coefficient λ.
4. Growth factor λ, h and decreasing displacement angle α entail a more rapid decrease leakage rate v.
5. The results allow to determine the value of basic geometric parameters of the regulator to ensure the necessary benchmarks.

conical outflow regulator, free-flowing material

Одержано 22.05.17

УДК 631.331

А. А. Панков, доц., канд. техн. наук, докторант
Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
E-mail: app.post@rambler.ru

Энергетические показатели рабочего процесса высевающих аппаратов и систем

В статье рассмотрено сравнение энергетических показателей рабочего процесса существующих и перспективных высевающих аппаратов и систем посевных машин.
высев, сеялка, система, аппарат, энергия, эффективность, привод, мощность

А. О. Панков, доц., канд. техн. наук, докторант
Центральноукраинский национальний технический университет, г. Кропивницкий, Украина
Енергетичні показники робочого процесу висівних апаратів і систем

У статті розглянуто порівняння енергетичних показників робочого процесу існуючих та перспективних висівних апаратів і систем посівних машин.
сівба, сівалка, система, апарат, енергія, ефективність, привод, потужність

Постановка проблемы. Несмотря на то, что имеется много типов высевающих систем, сравнительные показатели энергоемкости их рабочего процесса окончательно не выявлены. При создании посевных машин главное внимание уделяется обеспечению показателей качества технологического процесса и производительности. В то же время, современные требования по оптимизации энергопотребления указывают на необходимость анализа энергоемкости рабочего процесса высевающих систем.

© А. А. Панков, 2017

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросы исследования и разработки энергоэффективных конструкций и рабочего процесса высевающих аппаратов и систем отражены в работах исследователей [2, 5, 8-10, 18, 24, 28]. Определение энергетических показателей работы некоторых высевающих аппаратов и систем рассматриваются в ряде работ [6, 13, 16, 19-22, 27]. Однако систематизированные исследования по данному вопросу недостаточны.

Постановка задания. Целью исследований является установление характера качественного и количественного влияния энергетических показателей работы высевающих систем на их развитие, а также на развитие и совершенствование посевных машин и агрегатов в целом.

Изложение основного материала. Рассмотрим определение мощности для привода высевающих аппаратов и систем. В настоящее время широкое применение для рядового посева нашли катушечный высевающий аппарат и пневматическая централизованная высевающая система (ПЦВС), а для однозернового высева пропашных культур – вакуумные пневмомеханические высевающие аппараты и системы для сеялок типа СУПН, УПС и других. Также используются вибродискретная высевающая система Сухина (ВСС) сеялок "Клен" и ее аналоги, распространяются высевающие аппараты и системы с электроприводом, исследуются высевающие аппараты и системы с элементами пневмоники.

Катушечный высевающий аппарат. Большинство зерновых и специальных посевных машин оснащены высевающими системами с катушечными высевающими аппаратами. Они универсальны и обеспечивают устойчивый высев семян. Аппараты просты по конструкции и достаточно надежны в работе.

Принимаем скорость движения посевной машины $V_Д$ = 3м/с (10,8км/ч). Во многих инструкциях по наладке и настройке посевных машин представлены таблицы передаточных отношений на вал семявысевающих аппаратов сеялки СЗ-3,6 в зависимости от высеваемой культуры.

Исходя из таблиц настройки, определим угловую скорость вращения ω опорно-приводного колеса сеялки с диаметром D_K = 1245мм = 1,245м, с учетом скольжения колес ($\varepsilon = 0{,}05$):

$$\begin{aligned} \omega &= (1\text{-}\varepsilon) V_Д / (0{,}5 D_K), c^{-1}. \\ \omega &= (1-0{,}05)\cdot 3 / (0{,}5\cdot 1{,}245) = 4{,}58 c^{-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

С учетом передаточного отношения i = 0,616 (для семян пшеницы) от колес на вал семявысевающих аппаратов, определим угловую скорость катушек ω_K:

$$\begin{aligned} \omega_K &= \omega / i, c^{-1}. \\ \omega_K &= 4{,}58 / 0{,}616 = 7{,}43 c^{-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

При известном крутящем моменте на катушке M_K = 1,8Нм [19], определим мощность на высевающей катушке N_K:

$$\begin{aligned} N_K &= M_K \cdot \omega_K, Вт. \\ N_K &= 1{,}8 \cdot 7{,}43 = 13{,}4 Вт. \end{aligned} \quad (3)$$

Потери мощности зависят от вида привода вала катушек. Согласно [23], серийный привод содержит три цепные передачи с КПД $\eta_{ЦП}$ = 0,96 и две зубчатые передачи ($\eta_{ЗП}$ = 0,96). С учетом общего КПД привода ($\eta_{П}$ = 0,815) получим мощность $N_{ПК}$, которую необходимо подать на катушку с учетом потерь, то есть подведенную мощность:

$$N_{ПК} = \mathrm{N}_{К} / \eta_{П}, Вт. \qquad (4)$$
$$N_{ПК} = 13,4 / 0,815 = 16,4 Вт.$$

Приняв число катушек $n_К$ = 24шт, получим суммарную мощность для привода вала высевающих аппаратов - $N_{ПК}$ = 394Вт, с учетом потерь мощности. Аналогичные значения получены и в работе [21, 22]. Определим КПД высевающей системы $\eta_{КС}$:

$$\eta_{КС} = \mathrm{N}_{К} / \mathrm{N}_{ПК}. \qquad (5)$$
$$\eta_{КС} = 13,4 / 16,4 = 0,82.$$

Произведем аналогичные расчеты и для других культур, характеризуемых объемным весом γ. Результаты представим в табл.1.

При анализе табл.1 очевидно, что значение мощности $N_{ПК}$ зависит от агротехнических особенностей и размерно-массовых характеристик семян.

Таблица 1 – Зависимость мощности $N_{ПК}$, Вт, от вида культуры при $n_К$ = 24

Просо: i = 0,198, $\omega_К$ = 23,1с$^{-1}$, γ = 850 кг/м^3	Гречиха: i = 0,428, $\omega_К$ = 8,9с$^{-1}$, γ = 720 кг/м^3	Пшеница: i = 0,616, $\omega_К$ = 7,43с$^{-1}$, γ = 760 кг/м^3	Ячмень: i = 1,33 $\omega_К$ = 2,9с$^{-1}$, γ = 450 кг/м^3
1226	567	394	182

Кроме того, значение мощности $N_{ПК}$ зависит от величины угловой скорости опорно-приводного колеса, а, следовательно, от скорости движения посевной машины. Характеристика такой зависимости представлена в табл.2.

Таблица 2 – Зависимость мощности $N_{ПК}$, Вт, от значения скорости сеялки

Передаточное отношение «i»	$V_Д$, м/с (км/ч)			
	1,5(5,4)	2,0(7,2)	2,5(9,0)	3(10,8)
0,198	613	817	1020	1226
0,428	284	378	472	567
0,616	197	262	326	394
1,330	91	122	152	182

Немаловажным обстоятельством в отношении катушечных высевающих аппаратов является то, что отбор подведенной мощности $N_{ПК}$ в сеялке производится от опорно-приводных колес, то есть уже после всех потерь мощности на пути от двигателя к машине на почвенном фоне, обладающем слабой несущей способностью. При этом тяговый КПД посевного агрегата, согласно [17], составляет $\eta_{ТЯГ}$ = 0,48…0,52, и, следовательно, величина $N_{ПК}$ увеличивается примерно в 2 раза. В противоположность этому, в других высевающих системах («Клен», ПЦВС) отбор мощности производится от двигателя или трансмиссии трактора, без таких значительных потерь.

Кроме того в расчетах не учтены значения мощности, необходимые для привода бункерных нагнетателей, ворошителей с сводоразрушающих устройств для высева плохосыпучих семян.

ПЦВС. Катушечные высевающие аппараты устаревают и заменяются более современными пневматическими посевными машинами, так как последние имеют целый ряд преимуществ. Вследствие незначительного механического воздействия на посевной материал, пневматические высевающие аппараты и системы обеспечивают минимальное повреждение посевного материала, а также, имея более высокую надёжность и универсальность, лучше приспособлены к совершенствованию и адаптации к современным технологиям посева.

Пневматические централизованные высевающие системы получили широкое распространение. Их применение повышает производительность машинно-тракторного агрегата на посеве и существенно снижает материалоемкость посевных машин. Разработанные ПЦВС имеют различные схемы и конструкции распределительных устройств, и, соответственно, различные технико-экономические и агротехнические показатели работы, не всегда удовлетворяющие современным агротребованиям [1, 3].

Однако в отношении реализации рабочего процесса ПЦВС являются более энергоемкими системами, в связи с особенностями их принципа действия - "эффекта фонтана". Для осуществления высева в ПЦВС необходимо поднять семена, преодолевая гравитацию и турбулизовать их - то есть искусственно создать гидравлическое сопротивление и также преодолеть его. Только лишь преодоление гравитации повышает энергоемкость работы в 2…3 раза [30].

К вопросам исследования и снижения энергоемкости рабочего процесса ПЦВС относятся работы [1, 3, 4, 6, 12, 13].

Основным затруднением при проектировании ПЦВС является ввод материала в зону с избыточным давлением до 5 кПа. Для этого устанавливают специальные устройства – питатели, основное назначение которых – качественно и с наименьшими потерями энергии и повреждением материала подать семена в воздушный поток для дальнейшего транспортирования. Поэтому на энергетические показатели работы ПЦВС влияет вид питателя, или дозирующего устройства в системе. Шнековые дозаторы, согласно [25, 31], требуют значительного расхода энергии на привод.

Мощность, необходимая для привода, расходуется на преодоление сил трения транспортируемого материала о поверхность шнека и его корпус, на преодоление противодавления в аэрокамере дозатора, а также на потери энергии для привода шнека на холостом ходу. Кроме того, установлено, что утечка воздуха через питатель в размере 5% приводит к снижению производительности на 15% [12].

Поэтому за основу в расчетах принимаем шлюзовой питатель ПЦВС с катушечным дозатором ПЦВС.

В отношении ПЦВС энергетические показатели работы в литературе имеют значительный разброс значений в связи с широким спектром агротехнических особенностей и размерно-массовых характеристик посевного материала. Так, исходя из работы [11], ПЦВС для мелкосеменных культур имеет оптимальные параметры по давлению воздуха: p = 2524 Па и его расходу Q = 490 м^3/ч на 36 рядков посева. С учетом среднего значения мощности на привод катушечного дозатора $N_{ДОЗ}$ = 300…400 Вт, получим удельную мощность N_C = 20 Вт на один выход в сошник из распределителя.

Исходя из данных [6] и принимая ширину междурядья b = 0,15 м, получим усредненное значение удельной мощности N_C = 178Вт на один выход в сошник из

распределителя. При этом имеют место значения удельной мощности в интервале N_C=113…238 Вт.

Величина удельной мощности N_C является подведенной мощностью. Чтобы определить полезную мощность $N_{СП}$, необходимо учесть КПД вентилятора (η_B = 0,75) и гидравлические потери напора в воздухопроводах. Однако для приближенных вычислений ограничимся учетом потерь в вентиляторе. Тогда КПД ПЦВС будет приближенно равняться КПД вентилятора в системе, или $\eta_{ПЦВС}$ = 0,75.

В ПЦВС применяются центробежные вентиляторы, требующие достаточно высокого значения мощности для привода. В некоторых случаях вентиляторы вращаются гидромоторами, что еще более повышает энергоемкость рабочего процесса, так как КПД гидропривода в среднем на 10% меньше КПД механической передачи. Иногда посевные машины с ПЦВС даже оборудуются собственной гидросистемой [26].

Однако применение гидропривода позволяет компоновать широкозахватные пневматические сеялки из стандартных секций, улучшить равномерность распределения воздушного потока, а, следовательно, и точность высева, согласно [29].

Вибродискретная высевающая система "Клён". По данным производителей, высевающая система сеялки "Клён-6" с числом сошников n_C = 48 шт. требует 250 Вт мощности на привод электромагнитных вибродискретных высевающих аппаратов и имеет 8 блоков высевающих аппаратов. Следовательно, мощность, подведенная к блоку аппаратов, равняется $N_Б$ = 31,2 Вт. Так как в блоке 6 аппаратов, то соответственно мощность, потребляемая одним аппаратом - N_A = 5,2 Вт.

КПД вибродискретной высевающей системы определяется работой тракторного генератора с КПД $\eta_Г$ = 0,9 и работой шагового электродвигателя с КПД $\eta_{ШД}$ = 0,7. Тогда КПД высевающей системы $\eta_{ВВС}$:

$$\eta_{ВВС} = \eta_Г \cdot \eta_{ШД}. \quad (6)$$

$$\eta_{ВВС} = 0,9 \cdot 0,7 = 0,63.$$

Крутящий момент на валу шагового электродвигателя значительно меньше действующих значений момента в катушечном аппарате. Но примечательной тенденцией является то, что здесь для забора и перемещения семян достаточно значений энергии меньших, че в ранее рассмотренных аппаратах. При этом работа вибродискретной высевающей системы соответствует агротребованиям [7, 14]. Однако посевные машины с вибродискретной высевающей системой с целью увеличения угла наклона семяпроводов выполняются по моноблочной компоновочной схеме, что затрудняет их заправку и повышает металлоемкость. Для компенсации этого недостатка необходим воздух под избыточным давлением для транспортирования семян в сошник, что повысит энергозатраты на рабочий процесс.

Высевающая система с элементами пневмоники. Конструктивное исполнение аппарата в высевающей системе с элементами пневмоники аналогично ВСС, то есть блочное. Высевающая система состоит из девяти аппаратов в блоке. Мощность, подведенная к блоку аппаратов – $N_{ПБ}$ = 53Вт, к одному аппарату – $N_{ПА}$ = 6Вт.

С учетом потерь мощности в вентиляторе (η_B = 0,75) и КПД пневмоструйного элемента по давлению ($\eta_{Э(Д)}$ = 0,5), определим КПД высевающего аппарата группового высева с элементами пневмоники $\eta_{ЭП}$:

$$\eta_{ЭП} = \eta_B \cdot \eta_{Э(Д)}. \quad (7)$$

$$\eta_{ЭП} = 0,75 \cdot 0,5 = 0,37.$$

Высевающая система пневмомеханической пропашной сеялки. Энергозатраты при работе высевающей системы пропашной сеялки определяются для механической части высевающей системы, то есть для привода высевающих аппаратов, а также для пневматической части высевающей системы, для работы эксгаустера, создающего разрежение в высевающей системе [15].

Затраты мощности на привод высевающих аппаратов принимаем в размере 2,0…2,5% от мощности, необходимой на преодоление тягового сопротивления посевной машины [16], которая для сеялки типа СУПН-8 равняется примерно 19кВт. Следовательно, подведенная к высевающим аппаратам для их вращения мощность, составит примерно $N_{МЧ}$ = 400Вт.

Мощность необходимая для привода эксгаустера, согласно замерам и расчетам, равняется 900Вт, согласно [24].

Тогда суммарная подведенная для работы высевающей системы мощность составит $N_П$ = 1300Вт.

Рассмотрим энергетическую эффективность работы высевающих систем. Определим действительные затраты мощности при работе рассматриваемых видов высевающих аппаратов и их соответствие тепловому эквиваленту при сгорании дизельного топлива:

$$N_Д = \frac{N_{ПА(С)}}{\eta_{ТЯГ} \cdot \eta_{ПЕР} \cdot \eta_{ПР} \cdot \eta_Е}, кВт, \quad (8)$$

где $N_{ПА(С)}$ – мощность, подведенная к высевающему аппарату или системе, Вт;

$\eta_{ТЯГ}$ – тяговый КПД трактора, почвенный фон – поле, подготовленное под посев. Принимаем $\eta_{ТЯГ}$ = 0,5;

$\eta_{ПЕР}$ – КПД клиноременных передач на привод вентилятора или генератора. Принимаем $\eta_{ПЕР}$ = 0,95;

$\eta_{ПР}$ – приводной КПД трактора с независимым ВОМ через две зубчатые передачи. Принимаем $\eta_{ПР}$ = 0,9;

$\eta_Е$ – эффективный КПД дизельного ДВС. Принимаем $\eta_Е$ = 0,4.

Эффективный КПД дизельного двигателя в расчетах учитываем для определения расхода топлива на рабочий процесс высевающей системы.

Принимая число сошников в рядковой сеялке $n_С$ = 24шт, а количество секций пропашной сеялки $n_{СП}$ = 8шт, определим действительные энергозатраты на рабочий процесс высевающих аппаратов и систем посевных машин. Результаты расчетов представлены в табл.3.

Таблица 3 – Действительные энергозатраты высевающих аппаратов и систем

Вид ВА или системы	Составляющие общего КПД	Подвед. мощность $N_{ПА(С)}$, Вт	Действит. мощность $N_Д$, Вт	Топливн. экв.		Эффективн. сист. $\eta_{ВС}$
				л/ч	л/год*	
Катушечный	$\eta_{ТЯГ}$, $\eta_Е$	440	2200	0,22	33,0	0,20
ПЦВС	$\eta_{ПЕР}$, $\eta_{ПР}$, $\eta_Е$	4272	12491	1,25	187,5	0,34
ВСС	$\eta_{ПЕР}$, $\eta_Е$	125	329	0,03	4,5	0,38
ВС с элем. пневмоники	$\eta_{ПЕР}$, $\eta_{ПР}$, $\eta_Е$	144	421	0,04	6,3	0,34
ВС пропашной сеялки**	$\eta_{ТЯГ}$, $\eta_Е$	400	2000	4632	69	0,28
	$\eta_{ПЕР}$, $\eta_{ПР}$, $\eta_Е$	900	2632	0,46		

* - при загрузке 150 часов в год.

** - определяется раздельно для механической и пневматической части.

Эффективность рабочего процесса высевающей системы η_{BC} в агрегате посевной машины с энергетическим средством определяется как произведение составляющих общего КПД, или как соотношение подведенной к системе мощности к действительной мощности, то есть:

$$\eta_{BC} = \frac{N_{ПА(С)}}{N_{Д}}. \quad (9)$$

Выводы.

1. Катушечные высевающие аппараты, ПЦВС и высевающие системы пропашных сеялок требуют относительно больших приводных мощностей, хотя для гарантированного разрушения связей между семенами, их захвата и перемещения, действующие значения мощностей могут быть на порядок меньше, что доказывает применение ВСС и ВС с элементами пневмоники, то есть дискретных многоструйных высевающих систем, использующих дополнительные внешние поля.

2. В отношении энергозатрат ПЦВС являются наиболее энергоемкими системами, в связи с особенностями их принципа действия. Эффективность рабочего процесса высевающей системы в агрегате посевной машины с энергетическим средством, характеризуется относительным показателем η_{BC}, который минимален у катушечных высевающих аппаратов, из-за их привода от тягового усилия трактора на почвенном фоне с недостаточной несущей способностью.

3. Применение электропривода в высевающих системах оправдывается не только с технологической точки зрения, но и с энергетической. Эффективность работы высевающих систем и соответствующий КПД возрастут, однако при этом возрастают как сложность, так и стоимость таких решений. Поэтому увеличение стоимостных затрат с применением электропривода должно компенсироваться технологическими преимуществами и повышением энергоэффективности рабочего процесса посевных машин.

Список литературы

1. Адась, А.В. Повышение качества высева семян пневматическими зерновыми сеялками путем совершенствования шнекового питателя : автореф. дис... канд. техн. наук [Текст] / А.В. Адась. – Горки, 1997. – 20с.
2. Альт, В.В. Концепция развития посевных машин [Текст] / В.В. Альт, С. Г. Щукин, В. А. Вальков // Достижения Науки и Техники АПК. – 2008. – №9. – С.44-48.
3. Астахов, В.С. Механико-технологические основы посева сельскохозяйственных культур сеялками с пневматическими системами группового дозирования: диссертация ... доктора технических наук: 05.20.01 [Текст] / С.-Петерб. гос. аграр. ун-т.- Горки, 2007. – 377с.
4. Астахов, В.С. Пневматические системы централизованного высева [Текст] / В.С. Астахов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1997. – №9. – С.12-14.
5. Висівна система. Патент України №28119. Іллін О. М., Ковшарь В.М. – [Электронний ресурс]. – Режим доступу: http://uapatents.com/4-28119-visivna-sistema.html.
6. Внуков, И.Е. Направления совершенствования высевающих систем зерновых пневматических сеялок [Текст] / И.Е. Внуков, Н.И. Любушко // Тракторы и сельскохозяйстенные машины. – 1988. – №1. – С.23-27.
7. Волошин, М. Перспективна техніка для посіву дрібнонасінних культур: сівалки СЗТ-5,4 та СЗ-5,4-06 «Клен» [Текст] / Волошин М. // Техніка АПК. – 2008. – №3-4. – С.36-38.
8. Высевающий аппарат сеялки. Патент РФ №2310311. Вишняков А.А., Вишняков А.С., Богульский И.О., Богульская Н.А., Каркавин Д.А., Козлов В.А. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.freepatent.ru/patents/2310311.
9. Высевающий аппарат. Патент №791289. Бок Н.Б., Нуждов А.И. [Электронный ресурс] . – Режим доступа: http://patents.su/2-791289-vysevayushhijj-apparat.html.
10. Козлов В.А. Обоснование параметров и режимов работы комбинированного высевающего аппарата вибрационного типа: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.20.01 [Текст] /

Козлов Владимир Александрович; [Место защиты: «Красноярский государственный аграрный университет»].- Красноярск, 2012. - 18с.

11. Кузнецов, Б.Ф. Выбор централизованной высевающей системы для мелкосемянных культур [Текст] / Б.Ф. Кузнецов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1989. – №10. – С.31-32.
12. Лепешкин, Н.Д. Выбор типа питателя для пневмомеханической высевающей системы зерновой сеялки [Текст] / Н.Д. Лепешкин, А.Л. Медведев, Ю.Л. Салапура // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Минск, 2009. – Т.1. – С.108–113.
13. Любушко, Н.И. Высевающая система для пневматических зерновых сеялок и комбинированных машин [Текст] / Н.И. Любушко, И.Е. Внуков, В.И. Мишин // Тракторы и сельскохозяйстенные машины. – 1991. – №7. – С.24 - 27.
14. Овсянников, С.А. Эксплуатационно-технологические показатели посевного агрегата на базе сеялки СЗС-6 [Текст] / С.А. Овсянников, С.В. Цымбаленко, А.А. Овсянников // «Механизация и электрификация сельского хозяйства». – 1999. – №5. – С.31-32.
15. Омаров, А.Н. Теоретический анализ и расчет пневматической системы сеялки [Текст] / А.Н. Омаров, Ж.К. Кубашева, М.К. Бралиев // Новости науки Казахстана. – 2014. – № 1. – С. 48-56.
16. Петрусов, А.И. Машины для посева, посадки и внесения удобрений. (Теория, конструкции и расчет) [Текст] / А.И. Петрусов, В.Е. Комаристов – Харьков, изд-во ХГУ им. А.М. Горького, 1960. – 220с.
17. Поляк, А.Я. Справочник по скоростной с.-х. технике [Текст] / А.Я. Поляк, А.Д. Щупак, Н.М. Антышев. – М.: Колос, 1982. – 284с.
18. Стрыгин, С.П. Совершенствование посева капсулированных семян кукурузы с разработкой высевающего аппарата: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.20.01 [Текст] / Стрыгин Сергей Петрович; [Место защиты: Мичуринский гос. аграр. ун-т]. - Мичуринск, 2016. – 19с.
19. Сысолин, П.В. Почвообрабатывающие и посевные машины: история, машиностроение, конструирование [Текст] / П.В. Сысолин, Л.В. Погорелый. – К.: Феникс, 2004. – 266с.
20. Трухачев, Е.Д. Совершенствование процесса высева несыпучих семян кормовых растений травяными сеялками: диссертация ... кандидата технических наук: 05.20.01 [Текст] / Трухачев Евгений Дмитриевич; [Место защиты: Ставропольский государственный аграрный университет]. - Ставрополь, 2015.- 154с.
21. Трухачев, Е.Д. Энергетическая оценка привода устройства для высева несыпучих и слабосыпучих семян кормовых растений [Текст] / Е.Д. Трухачев, В.Х. Малиев // Вестник АПК Ставрополья. – 2013. – №04(12). – С.96-98.
22. Федотов, И.Д. Применение устройства привода вала высевающих аппаратов зерновых сеялок для оценки их технологической готовности по параметрам нормы равномерности высева [Текст] / И.Д. Федотов, В.В. Вдовин, С.В. Стрельцов, А.В. Павлушин, В.П. Зайцев // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – №3 (Часть 3) – С. 388-389.
23. Хоменко, М.С. Механизация посева зерновых культур и трав. Справочник [Текст] / М.С. Хоменко, В.А. Зырянов, В.А. Насонов. – К.: Урожай, 1989. – 168с.
24. Щеглов, А.В. Повышение эффективности технологического процесса пунктирного высева семян подсолнечника струйной пневмомеханической системой: дисс. … канд. техн. наук: 05.05.11 [Текст] / Андрей Викторович Щеглов. – Луганск, ЛНАУ. - 2009. – 197с.
25. Высевающий аппарат зерновой сеялки с централизованным дозированием семян. Патент РФ №2452165. Авторы: Калугин Д.С., Кулаев Е.В., Руденко Н.Е. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.freepatent.ru/patents/2452165
26. Sulky Maxidrill [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.sulky-burel.com/mgt/resources/fichiers/MAXIDRILL_RU_01.pdf
27. Віброгравітаційна висіваюча система. Номер патенту: 21339. Автори: Висоцька Наталія Дмитрівна, Вальянов Дмитро Герасимович [Електронний ресурс]. – Режим доступа: http://uapatents.com/2-21339-vibrogravitacijjna-visivayucha-sistema.html
28. А.с. 1474881 СССР, А 01 С 7/00. Способ высева сыпучих материалов и устройство для его осуществления [Текст] / В.Я. Коваль, В.С. Кочетков, И.В. Буйлов и др. (СССР, BG). – №1026680.
29. Крючин, Н.П. Посевные машины. Особенности конструкций и тенденции развития. Учебное пособие [Текст] / Н.П. Крючин. – Самара: РИЦ СГСХА, 2009. – 176с.
30. Яковчик, С.Г. Анализ распределителей посевного материала пневматических зерновых сеялок [Текст] / С.Г. Яковчик, Ю.Л. Салапура // Механизация и электрификация сельского хозяйства. Межведомственный тематический сборник. – 2014. – Вып.48, т.1. – С.3-10.

31. Артюшин, А.А. Исследование объемных дозаторов сыпучих кормов [Текст] / А.А. Артюшин, И.К. Пульчев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. Республиканский межведомственный тематический научно-технический сборник. – 1975. – Вып.33. – С.84-90.

Andrij Pankov, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnitskyi, Ukraine

The energy characteristics of the working process of seeding machines and systems

The purpose of the research was to establish the nature of the qualitative and quantitative influence of the energy performance of a seed system.

Currently, many types of metering systems and energy performance of their work is not completely defined. When creating planting machines main attention is paid to ensure quality of process and performance. At the same time, the current requirements for optimization of energy consumption indicate the need for analysis of the intensity of the working process of the sowing devices. Therefore, in this work the determination and comparison of power to drive the seeding apparatus and systems.

Sowing machines and systems require a relatively large amount of power to operate, although the destruction of the ties between the seeds and their movements, active power values can be much smaller.

seeding, seeder, system, apparatus, energy, efficiency, drive, power

Одержано 21.04.17

УДК 539.621:621.82.09

М.М. Студент, д-р техн. наук, Я.Я. Сірак, асп.
Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, м.Львів, Україна
E-mail: algirdas.280378@gmail.com
С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна

Трибологічна поведінка ПЕО шарів у парі зі сталями 45 та У 8

Досліджено трибологічну поведінку сталей 45 та У8 у парі із ПЕО шарами, синтезованими на легких сплавах АМг-6 та Д16Т у мінеральній оливі І-20, із додатком до неї дистильованої води та водного розчину гліцерину. Виявили різницю у фрикційній поведінці ПЕО шарів, синтезованих на алюмінієвих сплавах із підвищеним вмістом магнію (АМг-6) та з підвищеним вмістом міді (Д16Т) за контактування із стальними контртілами.

оксидокерамічні шари, тертя, зношування, коефіцієнт тертя, сталь

М.М. Студент, д-р техн. наук, Я.Я. Сирак, асп.
Физико-механический институт им.Г.В.Карпенко НАН Украины, г. Львов, Украина
С.И. Маркович, канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Трибологические характеристики ПЭО слоев в паре со сталями 45 и У8

Исследовано трибологическое поведение сталей 45 и У8 в паре с ПЭО слоями, синтезированными на легких сплавах АМг-6 и Д16Т в минеральном масле И-20, с приложением к ней дистиллированной воды и водного раствора глицерина. Обнаружили разницу во фрикционном поведении ПЭО слоев, синтезированных на алюминиевых сплавах с повышенным содержанием магния (АМг-6) и с повышенным содержанием меди (Д16Т) при контакте со стальными контртелами.

оксидокерамические слои, трение, износ, коэффициент трения, сталь

© М.М. Студент, Я.Я. Сірак, С.І. Маркович, 2017

Постановка проблеми. Обсяг застосування легких сплавів на основі Al завдяки їх високій питомій міцності постійно збільшується не тільки в аерокосмічній галузі, але також у загальному та сільськогосподарському машинобудуванні, енергетиці, будівельній промисловості. Але довговічність елементів конструкцій і деталей із цих

сплавів через низьку твердість, схильність до схоплювання при терті з іншими матеріалами досить обмежена. Крім того, алюмінієві сплави при пошкодженні природної оксидної плівки мають низьку корозійну, корозійно-механічну та зносостійкість. Тому у промислово розвинутих країнах зараз ведуться дослідження з розробки методів поверхневого зміцнення деталей з легких сплавів, використовуючи для цього плазмові, лазерні, вакуумні технології отримання покриттів, а також поверхневе пластичне деформування. Проте ці методи не забезпечують у повній мірі сучасних вимог до експлуатаційних і функціональних властивостей отримуваних покриттів, або є економічно невигідними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Альтернативою є створення комплексних методів відновлення та зміцнення, а саме: газотермічне напилення покриттів із алюмінієвих дротів з наступним плазмоелектролітним синтезом на них оксидокераміки (ПЕО) на основі α-фази Al_2O_3 (корунду) які відзначаються унікальним комплексом експлуатаційних властивостей. Разом з тим синтез таких шарів та їх властивості ще недостатньо вивчені, тому синтез оксидокерамічних шарів на електродугових покриттях (ЕДП) є актуальним напрямком наукових досліджень з метою захисту та відновлення деталей машин.

У вузлах тертя легкі сплави за стандартних режимів термічної обробки не використовують через низький опір зношуванню. Тому, їх поверхневі шари модифікують. На сьогодні найбільш ефективною є технологія синтезу плазмо-оксидо-керамічних (ПЕО) шарів безпосередньо на металевій підкладці – сплаві. Ця технологія [1] забезпечує перетворення поверхні легких сплавів у композитний оксидокерамічний шар із високою зносостійкістю [2]. Такі ПЕО шари є ідеальним матеріалом для застосування у вузлах тертя двигунів внутрішнього згоряння, компонентах турбін, підшипників ковзання, ущільнень насосів та ін.

Найефективнішим варіантом на сьогодні є поєднання у вузлі тертя металу із керамікою, оскільки за такого поєднання спостерігається менша швидкість зношування як металу так і кераміки, ніж у контактних парах метал – метал чи кераміка – кераміка. В роботах [2, 4] показано, що за поєднання в контактній парі кераміки з металом зношування металу знижується приблизно на два порядки у порівнянні із типовим поєднанням метал-метал. Причина такої поведінки поки що не зрозуміла. Така поведінка контактних пар за фрикційної взаємодії свідчить про важливість правильного підбору матеріалів тріади. Цей ефект спостерігається вже упродовж тривалого часу досліджень [2, 5], однак він поки що не пояснений.

Останнім часом спостерігається також великий інтерес щодо застосування у фрикційних парах екологічно чистих додатків до мастил, зокрема водних розчинів гліцерину [5] на відміну від дитіофосфатів. Водний розчин гліцерину, як додаток до традиційних мінеральних мастил є з ними добре сумісний, а така суміш – має кращі змащувальні властивості ніж чисте мінеральне мастило. За додатку водного розчину гліцерину до мастила коефіцієнт тертя та зношування металевих контактних пар за умов граничного мащення зменшується на порядок [2].

Для ПЕО шарів, синтезованих на алюмінієвих сплавах, фазовий склад є визначальним чинником, що впливає на трибологічну поведінку тріади: матеріал 1 – середовище – матеріал 2. ПЕО шари, синтезовані на алюмінієвих сплавах, складаються в основному з α – та γ – Al_2O_3 фаз та незначної домішки аморфного оксиду алюмінію.

Вміст фази α-Al_2O_3 є в межах від 60 до 70 % в ПЕО шарах, синтезованих на алюмінієвих сплавах з підвищеним вмістом міді та незначної домішки $NaAlO_2$, у той час, як на алюмінієвих сплавах, з підвищеним вмістом магнію – γ – Al_2O_3 є домінуючою фазою покриттів, та домішки складних оксидів $MgOxAl_2O_3x3SiO_2$ [2-5]. Раніше [2] нами досліджено трибологічні властивості ПЕО шарів, синтезованих на сплавах АМг-6 та Д16 в мастилі М10Г2к із додатком до нього водного розчину гліцерину і показано, що вони відзначаються високою зносостійкістю за умов граничного мащення. Однак, щоби пересвідчитися про ефективність додатку гліцерину до мастила та виокремити вплив дитіофосфату цинку нами проведено дослідження в нелегованій мінеральній оливі І-20 із додатком гліцерину.

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідити трибологічну поведінку ПЕО шарів, синтезованих на легких сплавах АМг-6 та Д16 в чистій мінеральній оливі І-20, з додатком до неї дистильованої води та водного розчину гліцерину при контактуванні зі сталями 45 та У8 .

Методики досліджень. Трибологічну поведінку контактних пар ПЕО шари, синтезовані на сплаві Д16Т – залізовуглецеві сплави (діелектрик – провідник) проводили за схемою випробувань "диск – колодка" (площинний контакт) на випробувальній машині СМЦ-2 згідно ГОСТ 23.224-86. Співвідношення між контактними поверхнями за фрикційної взаємодії було 0,125. Під час проведення випробувань для кріплення нерухомого зразка (колодки) використовували самоналаштовуване пристосування, яке забезпечувало сталість геометричної площі контакту, строге взаємне розташування контактних поверхонь під час фрикційної взаємодії, що уможливило правильно оцінювати зміни трибологічних параметрів у спряженні за фрикційної взаємодії. Під час досліджень одночасно фіксували зміну моментів тертя безконтактним індуктивним давачем, змонтованим на валу установки та температуру триборозігріву контртіл хромель-алюмелевою термопарою, вмонтованою в них на відстані 0,5 mm від зони контакту. Швидкість ковзання 0,67 m/s. Контактне навантаження 4 MPa. Час випробувань 4 h. Під час трибологічних експериментів проводився комп'ютерний запис електричних сигналів від зміни вимірюваних параметрів у мілівольтах із кроком 0,25 s.

Роздільні середовища: індустріальна олива І-20 (ГОСТ 20799-88), додаток до неї 0, 5 vol % дистильованої води, оскільки в мастилі завжди є вода як технологічна так і набута та 1 vol % 2,5 vol % водного розчину гліцерину.

Зразки "диск" виготовляли із алюмінієвих сплавів Д16Т та АМг-6 товщиною 10 mm. На твірній (робочій) поверхні дисків синтезували оксидокерамічні шари плазмоелектролітним методом – ПЕО. Покриття синтезували імпульсним струмом за частоти 50 Гц у катодно-анодному режимі при співвідношенні струмів ($I_к/I_a$) = 1 та густини струму 20 A/dm^2 в електроліті – 3 g/l KOH + 2 g/l Na_2SiO_3 (водний розчин рідкого скла). Товщина покриття після синтезу ≈ 250…300 μm. Перед трибологічними випробуваннями синтезовані ПЕО шари шліфували алмазним кругом до розміру d = 42 ± 0,02 mm та шорсткості R_a = 0,6 R_z = 3.5 μm. Параметри шліфування: швидкість обертання деталі 190 min^{-1}, швидкість обертання круга 30 m/sek, подача стола 0,3 m/min, глибина різання 0,025 mm за прохід [3].

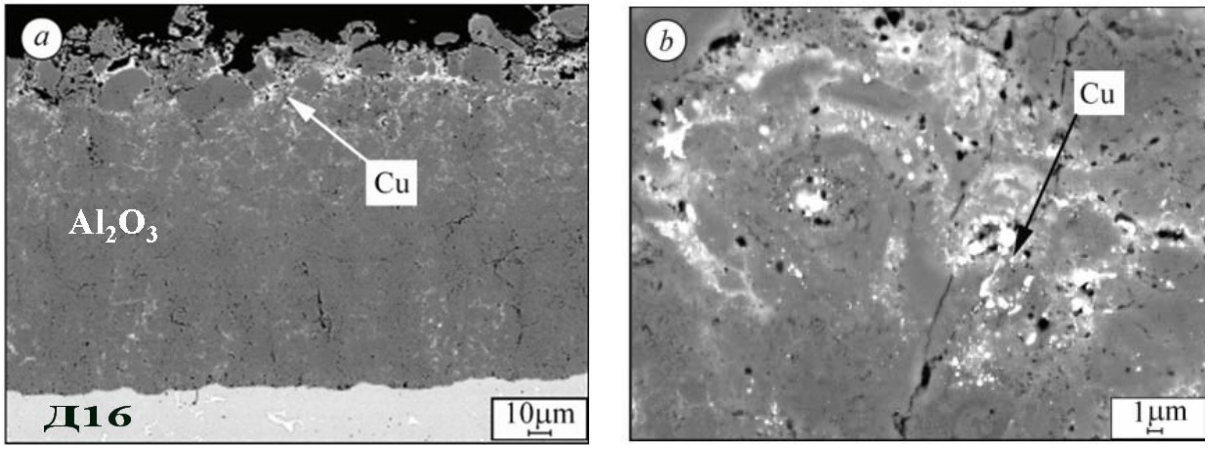
Зразки "колодка" виготовляли зі сталей 45 та У8 аналогічного внутрішнього діаметра та товщини. Стальні зразки перед випробуваннями відпалювали у вакуумі за температури 800ºС упродовж 1 h.

Зношування зразків колодка визначали гравіметричним методом на аналітичній вазі Radwag WAA 160 з точністю ± 0,0001g. Макроструктуру поверхонь тертя вивчали на мікроскопі Zeiss Stemi 2000-c, а мікроструктуру та поелементний аналіз утворених

вторинних структур – на сканувальному електронному мікроскопі EVO-40XVP (Carl Zeiss) із системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy.

Результати досліджень.

Структура ПЕО шарів на алюмінієвих сплавах. У структурі ПЕО шарів, синтезованих на сплаві Д16Т виявлено сегрегації виділень чистої міді нанометричних розмірів (рис. 1).

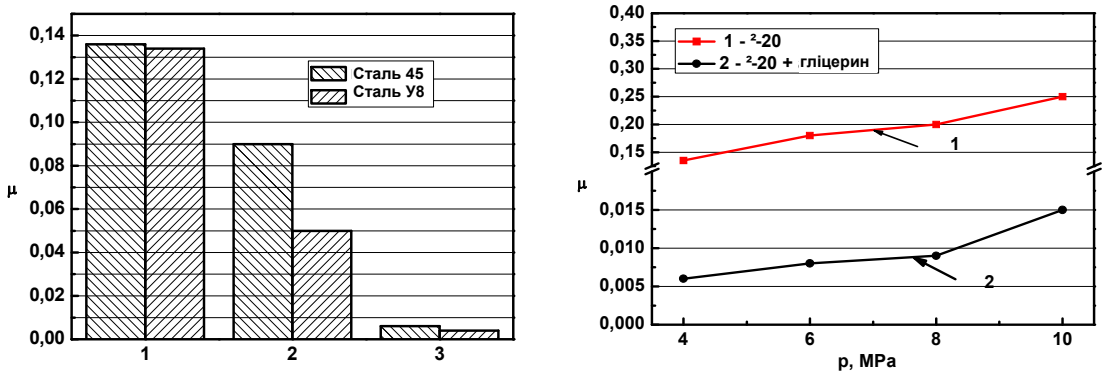


(а) – поперечний переріз, (б) – поверхня тертя

Рисунок 1 –Мікроструктура ПЕО шарів, синтезованих на алюмінієвому сплаві Д16

Частинки міді появляються в оксидній фазі, очевидно, наступним чином: в каналі іскрового розряду в процесі плазмо-електролітного синтезу утворюється як оксид алюмінію, так і оксид міді. В подальшому залишок розплаву алюмінію відновлює оксид міді до чистої міді. У структурі оксидних шарів на сплаві АМг-6 виявлено виділення чистого магнію [2].

Трибологічні дослідження. Випробуваннями контактних пар ПЕО шари, синтезовані на сплавах АМг-6 та Д16Т (зразки диск) у парі із контртілами зі сталей 45 та У8 (зразки колодка) виявили, що зношування дисків гравіметричним методом не фіксується, а знос стальних контртіл із цих двох сталей в досліджуваних роздільних середовищах подано на рис. 2 а.



а *б*

(1) – в оливі І-20, (2) – в оливі І-20 з додатком 0,5 об. % дистильованої води, (3) – в оливі І-20 з додатком 1 об. % 2,5% водного розчину гліцерину; б) в контакті зі сталлю 45 в оливі І-20 (1), в оливі І-20 з додатком до неї 1 % 2,5 % водного розчину гліцерину (2) за різних навантажень

Рисунок 2 – Усереднені значення коефіцієнтів тертя пар тертя – ПЕО шари, синтезовані на сплаві Д16Т (час випробувань 4 години): а) за контактного навантаження 4 МПа

Із рис.2 видно, що за додатку води до мінеральної оливи І-20 при контактуванні ПЕО шару, синтезованого на сплаві АМг-6 зі сталлю 45 зношування стальних контртіл зменшується ≈ у 1,5 рази порівняно як в чистій мінеральній оливі, а за додатку водного розчину гліцерину до неї – ≈ у 2 рази. Зношування контртіл зі сталі У8 є меншим – відповідно ~ у 3 та 3,5 рази (рис. 2 а). Середні значення коефіцієнтів тертя для цих двох сталей при випробуванні в мінеральній оливі є ≈ на рівні 0,15 0.2, а температура триборозігріву зони контакту зменшується ≈ від 100ºС до 80ºС. За додатку водного розчину гліцерину до мінеральної оливи ці два параметри найнижчі – ≈ 0,125, та відповідно ≈ 60ºС. Фрикційна поведінка сталей за контактування у парі із ПЕО шарами, синтезованими на сплаві Д16Т – інша, особливо за додатку до мастила водного розчину гліцерину. Коефіцієнт тертя зменшується ≈ в 30 разів, а температура триборозігріву зони контактту ≈ в 5 разів. Середні значення коефіцієнтів тертя для цих двох сталей у парі із ПЕО шаром на сплаві Д16 є ~ 0,005, а температури триборозігріву зони контакту ~ 20ºС.

На рис.2 б приведено усереднені значення коефіцієнтів тертя і показано, як впливає додаток гліцерину на зміну трибологіних параметрів у парх тертя ПЕО шари, синтезвані на сплаві Д16Т – сталь 45 та У8 при зміні питомого навантаження від 2 …10 МПа.

Мікроскопічними дослідженнями поверхонь тертя стальних контртіл після трибологічних випробувань у всіх досліджуваних роздільних середовищах у парі із ПЕО шарами, синтезованими на сплаві АМг-6 виявили трибосинтезовані блискучі склоподібні плівки. В той час як при контактуванні сталей із ПЕО шарами, синтезованими на сплаві Д16Т поверхні тертя наче у вихідному стані.

Фазовий аналіз трибоструктур (ТС), утворених на поверхнях стальних контртіл, після фрикційної взаємодії із ПЕО шарами, синтезованими на сплаві АМг-6, проводили на дифрактометрі ДРОН-3М у випромінюванні Со-$К_\alpha$. Детальним аналізом дифракторам (рис.3) встановили, що найінтенсивнішими фазами є: + – α -Fe, * – Fe_3C, незначна кількість $FeAl_2O_4$ (герценіту) та оксиду SiO_2, що відносяться до фазового складу трибосинтезованої плівки.

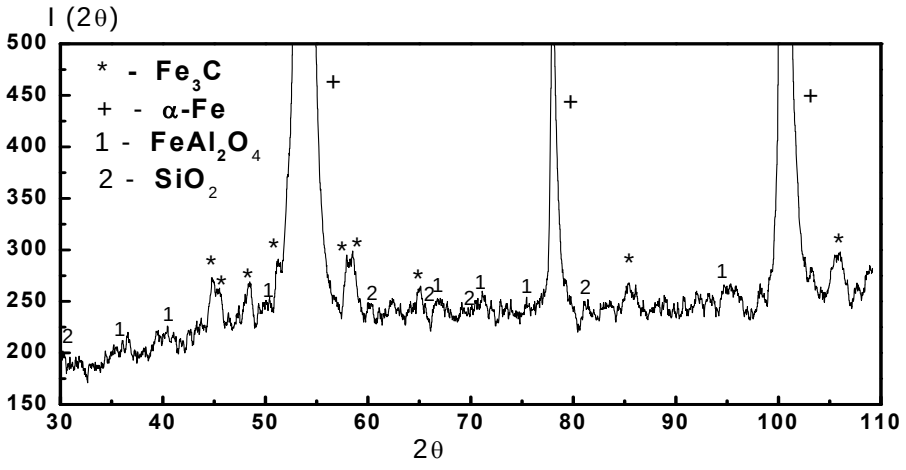


Рисунок 3 – Фазовий склад ТС, утворених на поверхні тертя контртіла зі сталі 45 після трибологічних випробувань у парі із ПЕО шаром, синтезованим на сплаві АМг-6. Контактне навантаження 4 МРа

Фази: + α -Fe, * Fe_3C, 1- $FeAl_2O_4$, 2 – SiO_2 Роздільне середовище – мастило І-20 з додатком 1 vol. % 2,5 % водного розчину гліцерину

Отже, на поверхнях тертя стальних контртіл синтезується ТС типу шпінелі – герценіт – із загальною формулою $FeAl_2O_4$, а у нашому випадку – $Fe_{0,816}$ $Al_{0,184}$) ($Al_{1,816}$ $Fe_{0,184}$) O_4, Ця трибосинтезована сполука захищає стальні поверхні від руйнування за дії водню [4]. Без впливу механічного чинника синтез герценіту відбуваються за інших умов, і режими його формування не можна ні порівнювати, ні співставляти. Так, у дугових печах він синтезується за температур, що перевищують 1500 ºС за прямої реакції між FeO та Al_2O_3. І його часто представляють формулою Fe ($Fe_{0.5}$ $Al_{1.5}$)O_4., а за сумарної дії азоту та водню – вона синтезується за температур ≈ 490…600°С. Цим трибоекспериментом встановлено, за контатування ПЕО шару, синтезованого на сплаві АМг-6 синтез герценіту на залізовуглецевих сплавах відбувається за температур до 120°С, але за механічного впливу та дії водню, через деструкцію роздільного водень вмісного середовища. Цей, трибо синтезований шар перешкоджає зношуванню стальних поверхонь за дії водню та відновленню Fe^{2+} до Fe^0 через окиснення його водою [4].

ТС на поверхнях контр тіл досліджували також і електронно мікроскопічним методом (ЕМ) та проводили їх по елементний аналіз. Виявили, що їх морфологія після випробувань в конкретних роздільних середовищах дещо інша. Однак, дослідженнями у зворотньо розсіяних електронах (BSD) виявили, що вони мають характерну кластерну будову, яка складаються із білих, світло сірих, темно сірих та чорних включень. В білих – більше заліза, менше алюмінію та кисню, в темні – навпаки містять більше – алюмінію, магнію та кисню. Світлі включення містять переважно залізо та незначну домішку кисню (очевидно локально утворюються не оксиди, а леговані киснем сполуки), а темні включення – мають домішки алюмінію, магнію та значну кількість кисню). Після випробувань у оливі із додатком до неї гліцерину морфологія утвореного трибо шару інша, однак співвідношення між елементами у кластерах подібне. Подібною є будова ТС, утворених і на сталі У8.

ЕМ дослідженнями поверхонь тертя стальних контр тіл після фрикційної взаємодії із ПЕО шарами, синтезованими на сплаві Д16Т виявили, що вони практично як у вихідному стані.

Отримані результати щодо фрикційної поведінки тріади ПЕО шари, синтезовані на сплаві Д16Т – залізовуглецеві сплави – мастило - гліцеринова суміш, згідно загальноприйнятих уявлень про тертя та зношування правильно пояснити поки, що неможливо. Є припущення.

Згідно [4], такий перебіг процесів тертя найімовірніше пов’язаний із поведінкою водню у зоні контакту за фрикційної взаємодії, який утворюється під час деструкції роздільного середовища. Як і під час вибіркового перенесення, так і під час водневого зношування в зоні контакту на поверхнях тертя, відбуваються реакції, обумовлені впливом водню в іонній формі за фрикційної взаємодії. Саме протон водню H^+ і є рушійною та транспортуючою силою. Можлива також і каталітична дія ювенільних поверхонь перехідного металу – заліза із утворенням атомарного кисню, його взаємодії із атомарним воднем та синтезом води у зоні контакту. Перебіг такої реакції перешкоджає окисненню та водневому зношуванню поверхонь, і відбувається без окиснювальне зношування. Тому, в зоні контакту і відбуваються ендотермічні реакції. При трибо деструкції гліцерину водень може відновлювати як оксиди міді так і оксиди заліза. Може відбуватися утворення полімерів тертя – як гліцератів заліза так і міді та води. Такий перебіг процесу відбувається за температур до ≈ 65 ºС. За вищої температури буде відбуватися інтенсивне зношування за дії водню.

Нами [2], також було зроблено розрахунки, і показано, що під час трибо хімічних реакцій, які можливі за участі гліцерину – залізо буде окислюватися до оксидів та гідроксидів (II) та (III), які, взаємодіючи з гліцерином, утворюватимуть

гліцерати заліза різного складу. Такі реакції термодинамічно вигідніші, ніж утворення гліцерату міді. Одночасно, на ювенільній поверхні контр тіла можлива і пряма взаємодія заліза та гліцерину внаслідок високої активності атомів заліза, а також низької кислотності гліцерину. На ювенільних залізних поверхнях може формуватися плівка гліцератів заліза, що опосередковано підтверджують експериментальні дані [2]. За додавання до мастила гліцерину підвищуються максимально можливі контактні навантаження в парах тертя ПЕО шари на сплаві Д16Т – залізовуглецеві сплави, низькі температури трибо розігріву та різке зменшення зношування. Оскільки, одно заміщені гліцерати заліза є гігроскопічними речовинами, здатними утворювати сольватні комплекси з будь-якими спиртами, то формуванню захисної плівки на поверхні залізовуглецевих сплавів сприятимуть полімеро подібні асоціати та синтез води.

Висновок. Вивчено трибологічну поведіку контактних пар діелектрик – провідник (кераміка – метал) на прикладі ПЕО шарів, синтезованих на легких сплавах АМг та Д16Т в контакті із залізовуглецевими сплавами – сталлю 45, У8.

Фазовим аналізом виявлено відмінності у структурі ПЕО шарів, синтезованих на сплавах АМг-6 та Д16Т. Зокрема, у ПЕО шарах із підвищеним вмістом магнію утворюється значна кількість фази збагаченої киснем складу ($MgOxAl_2O_3x3SiO_2$) – так звана шпінель із дефектною структурою. За фрикційної взаємодії таких ПЕО шарів із будь-яким залізовуглецевим сплавом відбувається втілення атомів заліза в металічну підгратку шпінелі, внаслідок чого в зоні контакту утворюється тонка герценітна плівка $FeAl_2O_4$, товщина якої з часом зростає, оскільки більше атомів заліза дифундує у структуру шпінелі. Фаза $FeAl_2O_4$ запобігає утворення водню в зоні контакту.

У ПЕО шарах, синтезованих на сплаві Д16Т із підвищеним вмістом міді дана фаза відсутня. Натомість виявлено фазу $NaAlO_2$ яка запобігає синтезу герценітної плівки в зоні контакту через утворення атомарного водню. Тому при терті утворюється лише гліцератна плівка, товщина якої практично не змінюється і трибопара працює в режимі без окиснювального зношування.

Список літератури

1. Гордиенко, П.С. Образование покрытий на аноднополяризованных электродах в водных электролитах при потенциалах пробоя и искрения [Текст] / Гордиенко П.С. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 216 с.
2. Student, M.M. Tribologycal properties of combined metal-oxide–ceramic layers on light alloys / M.M. Student, V.M. Dovhunyk, M.D. Klapkiv [and all.] // Materials Science, Vol. 48, No. 2, 2012 pp. – P. 55 – 64.
3. Phase transformation in plasma electrolytic oxidation coatings on 6061 aluminum alloy V. Dehnavi, X.Y. Liu, B. L. Luan and all. Surface & Coatings Technology 251, 2014, 106-114 p.
4. Shatskyi, I. P. Strength optimization of two-layer coating for the particular local loading condition / I. P. Shatskyi, L. Ya. Ropyak, M. V. Makoviichuka // Strength of Materials, Vol. 48, No. 5, September, 2016 – P. 726-730.
5. Molina, G. J Triboemission from ceramics: charge intensity and energy distribution characterization. Dissertation submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of July 3, 2000 Blacksburg, Virginia, 182 p.

Muhajlo Student, Prof., DSc., Yaryna Sirak, post-graduate
Physico-mechanical institute by G.V.Karpenko of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine
Sergey Markovich, Assos. Prof., PhD tech. sci.
Cenral'no Ukrainian national technical university, Kropivnizksiy, Ukraine

Tribological characteristics of plasma-electrolyte layers in pairs with steels 45 and U8

Purpose of this work to probe the tribologichnu conduct of PEO glowed, synthesized on the easy alloys of AMg-6 and D16T in the clean mineral olive of I-20, with an appendix to it of the distilled water and water solution of glycerin at a contact from stalyami 45 and U8 .

The tribological behavior of steels 45 and Y8 in pairs with PEO layers synthesized on light alloys AMg-6 and D16T in mineral oil I-20 with the application of distilled water and an aqueous solution of glycerin was investigated. They found a difference in the frictional behavior of plasma-electrolyte layers synthesized on aluminum alloys with increased magnesium content (AMg-6) and with an increased copper content (D16T) in contact with steel counterweights. In the case of contact between the plasma-electrolyte layers synthesized on the AMg-6 alloy with the steels under investigation, as a result of tribochemical reactions in the contact zone on the steel surface, a spinel-type oxide layer is synthesized with the general formula FeAl2O4, which protects them from wear by exposure to hydrogen, Loads not exceeding 4 MPa. In the case of contact between the plasma-electrolyte layers synthesized on the D16T alloy, oxygen-free wear of steel counter-bodies occurs and such a contact pair is operable to loads above 10 MPa with a low frictional heating temperature.

Investigational tribological behavior of pair of dielectrics – an explorer (ceramics are a metal) glowed on the example of PEO, synthesized on the easy alloys of AMg and D16T in a contact with iron-carbon alloys – steel 45, U8.

oxide-ceramic layers, friction, wear, friction coefficient, steel

Одержано 18.05.17

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.9.048.4

В.М. Боков, проф., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
E-mail: bokov_vm@mail.ru

Електродугове різання металів бідротовим електродом-інструментом

Запропоновано та досліджено високопродуктивний спосіб електродугового різання металів бідротовим електродом-інструментами. Розроблено концепцію проектування експериментального верстата, що реалізує даний спосіб різання.
електрична дуга, гідродинамічний режим, бідротовий електрод-інструмент, технологічна схема формоутворення, верстат для різання

В. М. Боков, проф., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г.Кропивницкий, Украина
Электродуговое резание металлов бипроволочным электродом-инструментом
Предложен и исследован высокопроизводительный способ электродугового резания металлов бипроволочным электродом-инструментом. Разработано концепцию проектирования экспериментального станка, который реализует данный способ резания.
электрическая дуга, гидродинамический режим, бипроволочный электрод-инструмент, технологическая схема формообразования, станок для резания

Актуальність. В сучасному машинобудуванні для різання важкооброблюваних матеріалів застосовуються такі електрофізикохімічні методи, як електроіскрове різання дротовим електродом-інструментом, електрохімічне, анодно-механічне, електроконтактне, плазмове та лазерне різання. Кожен із цих методів володіє певними перевагами та недоліками, які обумовлюють їх раціональну область використання. В більшості випадків продуктивність процесу різання є визначальною при виборі того чи іншого способу різання.

За роботами [1, 2] відомий високопродуктивний спосіб розмірної обробки металів електричною дугою.

Однак, даний спосіб не знайшов застосування для ефективного різання металів. Головна причина – відсутність оптимальної технологічної схеми формоутворення різу, при якої певним чином компенсується електроерозійний знос електрода-інструмента.

В роботі запропоновано спосіб електродугового різання, який включає в себе нову технологічну схему формоутворення різу з компенсацією зносу електрода-інструмента шляхом паралельного протягування в робочій зоні двох дротів [3]. Тому, розробка нового високопродуктивного способу електродугового різання важкооброблюваних матеріалів бідротовим електродом-інструментом та розробка концепції верстата для його реалізації, є актуальною задачею.

Мета дослідження – розробка способу різання металів електричною дугою з компенсацією зносу електрода-інструмента, а також концепції проектування, створення та випробування експериментального верстата для електродугового різання бідротовим електродом-інструментом.

© В.М. Боков, 2017

Поставлена мета реалізується шляхом вирішення наступних задач: обґрунтувати технологічну схему формоутворення різу; розробити концепцію проектування експериментального верстата для електродугового різання металів бідротовим електродом-інструментом; виконати технологічні випробування верстата.

Методика дослідження включає в себе аналіз та порівняння елементів відомої технологічної схеми формоутворення різу зі схемою, що пропонується.

Виклад основного матеріалу. В новому способі електродугового різання металів, що пропонується, використовується *нова технологічна схема формоутворення різу* (рис. 1), в якій електричну дугу 1 збуджують в гідродинамічному потоці робочої рідини 2 між електродом-заготовкою 3 та складеним електродом-інструментом, який включає в себе два паралельні дроти 4, 5, що протягують по випуклій поверхні електродотримача 6.

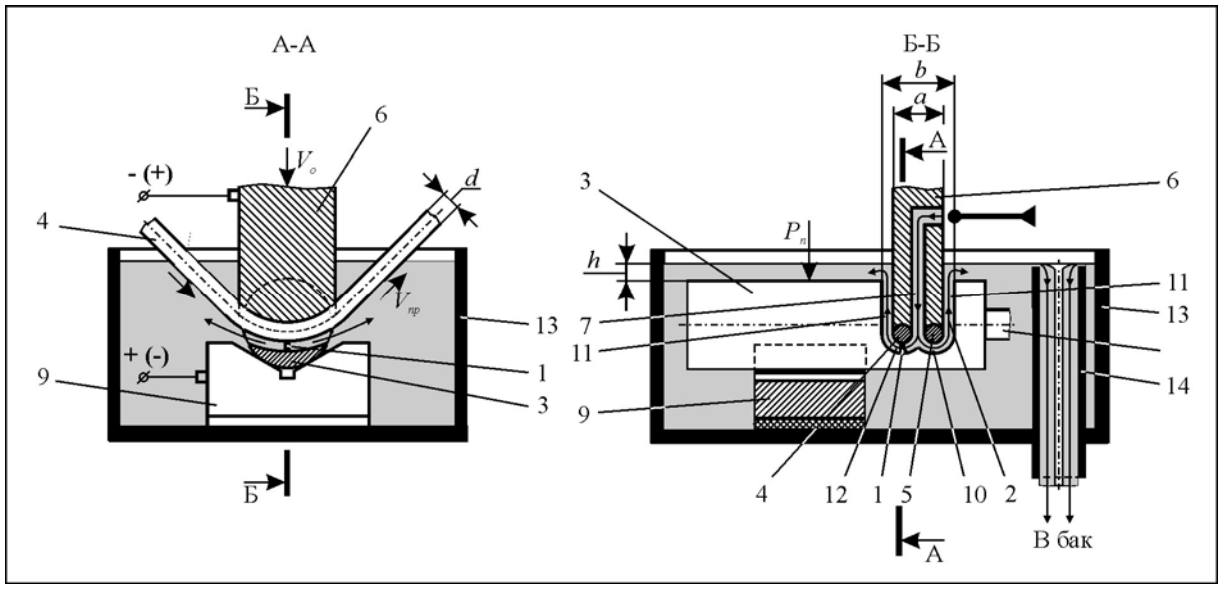


Рисунок 1 – Технологічна схема формоутворення різу

Джерело: розроблено автором

Робочу рідину нагнітають в зону різання під технологічним тиском крізь електродотримач 6 в щілину 7 між дротами 4, 5, ширина якої (c) менша або дорівнює двом торцевим міжелектродним зазорам (δ_m). Ширину майстра-електрода 6 (a) вибирають із умови $a \le 2d + c = 2(d + \delta_m)$, де d – діаметр дроту. Перед початком процесу електрод-заготовку 3 встановлюють до упору 8 та нерухомо закріплюють відносно тримача 9. Це дозволяє відрізати декілька однакових деталей довжиною L. Далі вмикають джерело живлення постійним технологічним струмом, систему подачі робочої рідини в зону різання та ведуть різання електрода-заготовки 3 електричною дугою 1, що горить в потужному гідродинамічному потоці робочої рідини. Продукти ерозії вилучаються із торцевого 10 та бічного 11 міжелектродних зазорів потоком робочої рідини. Подача V_o електродотримача 6 з дротами в напрямку розрізування здійснюється з використанням автоматичного регулятора міжелектродного проміжку. Завдяки оптимальної відстані c між дротами технологічний виступ між дротами не утворюється. В той же час, завдяки протягування дротів, точність різання зростає, а витрати на бід ротовий електрод-інструмент мінімізуються.

Концепція проектування експериментального верстата для електродугового різання металів бідротовим електродом-інструментом включає в себе:

- забезпечення оптимальних умов процесу в зоні різання;
- забезпечення протягування та натягу дротів;
- забезпечення регулювання швидкості протягування дротів;
- забезпечення моніторингу глибини різання;
- забезпечення мінімальної деформації тонкостінних електродотримачів від тиску робочої рідини в зоні різання.

Забезпечення оптимальних умов процесу в зоні різання. Режим електродугового різання задається наступними факторами: силою струму I, А; напругою на електродах U, В; статичним тиском робочої рідини на вході в міжелектродний зазор $P_{ст}$, МПа; швидкістю протягування двох паралельних дротів в зоні різання V_n, м/хв.

Оскільки продуктивність різання приблизно прямо пропорційна силі струму, з метою забезпечення максимально можливої продуктивності різання, сила струму I, при якій здійснюється процес різання на експериментальному верстаті, повинна бути як можна більша.

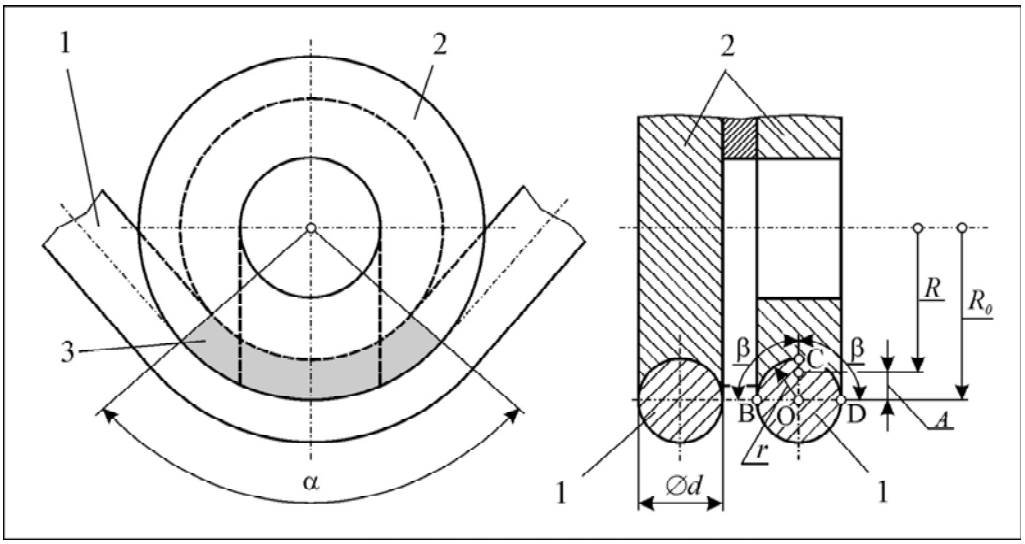
Якщо вважати, що площа, через яку тече електричний струм, визначається двома площами перерізу дротових електродів-інструментів діаметром d = 0,8 мм кожний, то допустима сила струму $I_{доп}$, яка не викликає нагрівання та обрив дротів, визначиться за формулою (1):

$$I_{доп} = 2F \cdot j = \frac{2\pi d^2 \cdot 10}{4} = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}8^2}{4} = 10\ A\,, \qquad (1)$$

де j – допустима густина струму в перерізі дротових електродів-інструментів. На підставі експериментальних даних для сталевої пари ЕІ – Е3 допустима густина струму складає 10 А/мм^2.

Однак, в умовах прийнятої технологічної схеми формоутворення (рис. 1) площа контакту двох дротів з електродотримачами, через яку тече електричний струм, значно більша і являє собою частину поверхні тору (рис. 2). Її можна визначити за формулою (2)

$$F = 2\pi r \cdot \frac{2\pi R\alpha}{360} = \frac{\pi^2 rR\alpha}{90}\,, \qquad (2)$$



1 – дріт; 2 – електродотримач; 3 – площа контакту (частина поверхні тору)

Рисунок 2 – До розрахунку площі контакту двох дротів з електродотримачем

Джерело: розроблено автором

де r – радіус поперечного перерізу дроту. r = 0,4 мм;

R – радіус, що проходить через центр тяжіння дуги BCD поверхні тору

$$R = R_0 - A = R_0 - (k \cdot r \cdot Sin\beta),$$

A – відстань від центра дуги BCD до центра тяжіння дуги BCD;

k – коефіцієнт, що визначається за формулою

$$k = \frac{57,5}{\beta};$$

β – половина центрального кута дуги BCD. β=90°;

α – централь
ний кут дуги BCD. α = 106° (задається конструктивно).

Тоді:

$$R = 30,4 - (\frac{57,5}{90} \cdot 0,4 \cdot \sin 90) = 30,14 \text{ мм};$$

$$F = \frac{3,14^2 \cdot 0,4 \cdot 30,14 \cdot 106}{90} = 140 \text{ мм}^2.$$

Однак, реальна площа контакту дротів з електродотримачами у місці ковзання F_∂ значно менша і пов'язана із точністю виготовлення фігурної контактної поверхні електродотримача. Вона ураховується коефіцієнтом зменшення поверхні контакту ε. Якщо прийняти ε = 0,1, то величину F_∂ можна підрахувати за формулою (3)

$$F_\partial = \varepsilon F = 0,1 \cdot 140 = 14 \text{ мм}^2. \quad (3)$$

Тоді реальна допустима сила струму, яка не викликає нагрівання та обрив дротів, визначиться за формулою (4)

$$I_{доп.(р)} = F \cdot j = 14 \cdot 10 = 140 \text{ А}. \quad (4)$$

На експериментальному верстаті для електродугового різання металів дротовим електродом-інструментом напруга на електродах визначається джерелом живлення технологічним струмом. Для зварювального випрямляча ВДУ504, що застосовується, робоча напруга на електродах змінюється в межах від 25 до 35 В.

В якості робочої рідини використовується технічна вода, яка може бути підведена до верстату у двох варіантах:

- від водопровідної мережі. Тоді статичний тиск її становить 0,33 МПа. Це не потребує використання станції робочої рідини, Але при застосуванні підвищеної сили струму процес різання відрізняється нестабільністю та низькою якістю різу. Пояснюється дане явище недостатнім динамічним тиском робочої рідини на дугу, внаслідок чого енергетичні параметри електричної дуги дуже низькі;

- від станції робочої рідини, що включає в себе бак, насосну установку, систему керування та контролю тиску. Станція дозволяє регулювати статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор у межах від 0,4 до 1,0 МПа. Це дозволяє вести процес електродугового різання з використанням технологічних струмів підвищеної сили і тим самим забезпечити підвищену продуктивність обробки.

Протягування дротів 4, 5 здійснюють при умові, коли тороподібні поверхні контакту майстра-електрода 6 збігаються з тороподібними поверхнями дротів. При цьому площа контакту кожного дроту з майстер-електродом 6 є максимальною, що дозволяє суттєво підвищити силу технологічного струму, і тим самим продуктивність процесу різання. А потужне прокачування робочої рідини в міжелектродному зазорі 12 дозволяє ефективно стиснути дугу 1 і тим самим підвищити якість поверхонь розділення.

Процес здійснюють при зануренні електрод-заготовку 3 в робочу рідину на глибину $h \geq 5$ мм в ванну 13. Останнє дозволяє виключити можливість розбризкування робочої рідини за межі зони обробки та можливість попадання її на оператора. Ванна 13 постачається трубою переливу 14, що забезпечує вказаний вище рівень занурення.

Використання даної технологічної схеми формоутворення різу, порівняно з відомими, дозволяє: зменшити ширину різу до 2 мм; зменшити витрати на інструмент; розрізати заготовки будь-якої початкової довжини; покращати умови роботи за рахунок виключення можливості попадання робочої рідини в струминному режимі течії на оператора; забезпечити надійну пожежну безпеку при реалізації процесу.

Забезпечення протягування та натягу двох дротів. Для забезпечення найбільш можливої продуктивності електродугового різання дротовими електродами-інструментами, як було показано вище, необхідно вести процес на як можна більшій силі струму, що вибирається із умови забезпечення густини струму до 10 А/мм^2. Дана умова передбачає ведення процесу різання при максимально можливій площі контакту кожного із двох дротів з електродотримачем.

Оскільки використовуються дроти круглого перерізу, то максимальна площа їх контакту з електродотримачами досягається, коли поверхня електродотримача являє собою частину тору з радіусом, що співпадає з радіусом перерізу дроту. Це, крім того, задає напрямок руху та забезпечує можливість протягування дротів в зоні різання.

Однак, певне технічне утруднення виникає при виготовленні електродотримача з такою фасонною поверхнею способом різання, у зв'язку з малою його жорсткістю.

Технологія виготовлення електродотримача, що пропонується, передбачає:

- виконання електродотримача для експериментального верстату у вигляді диску діаметром 60 мм та товщиною, що збігається з діаметром дроту ($s = d = 0{,}8$ мм);

- виготовлення заготовки для електродотримача із листової сталі, зокрема із сталі 20 (рис. 3), із збільшеним зовнішнім діаметром та збільшеною товщиною, тобто з припуском на подальшу обробку. В заготовці передбачається точний центральний отвір для подальшого базування та потрібні отвори для складання (останні на рис. 3 не показано);

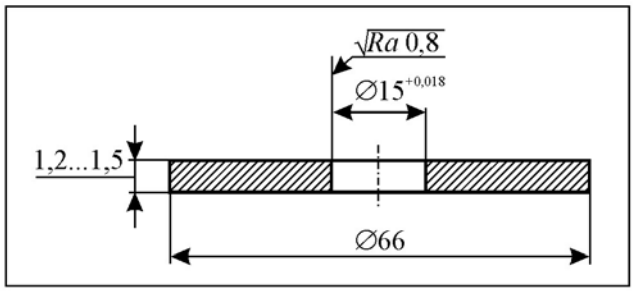
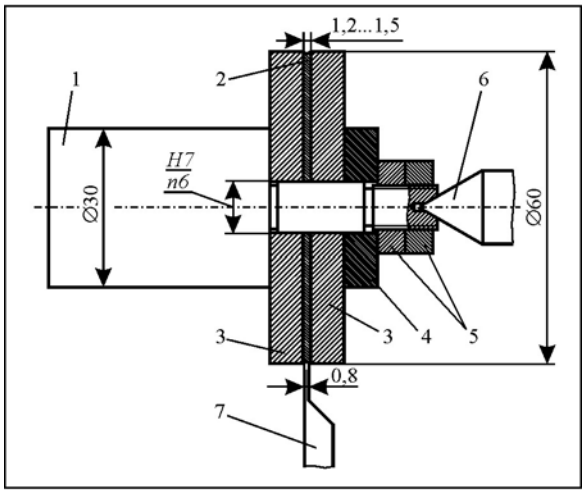


Рисунок 3 – Заготовка для виготовлення електродотримача
Джерело: розроблено автором

- токарну обробка робочої частини електродотримача 2 на оправці 1 (рис. 4). Для чого щільно (с натягом) встановлюють заготовку електротримача 2 між двома напрямними шайбами 3 та притискують її через притискну шайбу 4 двома гайками 5. Лівий бік оправки 1 затискують в трикулачковому патроні, а правий – підпирають

центром 6, що обертається, для підвищення точності обробки. Напрямні шайби 3 виготовляються із кольорового сплаву, наприклад із латуні Л63, для того, щоб було видно тонку заготовку. Спочатку прохідним різцем проточують зовнішній діаметр заготовки електротримача 2 разом з напрямними шайбами (з розміру ∅66 мм на розмір ∅60 мм). Далі ведуть обробку поверхні тору різцем 7, фігурна частина якого виготовлена методом шліфування на вертикальному оптико-шліфувальному верстаті;



1 – оправка;
2 – електродотримач;
3 – напрямні шайби;
4 – шайба притискна;
5 – гайки;
6 – конус задньої бабки верстата;
7 – фігурний різець

Рисунок 4 – Налагодження до токарного верстата для обробки поверхні тору на електротримачі
Джерело: розроблено автором

- компенсування нецентрального розташування поверхні тору відносно товщини заготовки шляхом шліфування на плоскошліфувальному верстаті за попередньо виконаними вимірюваннями на інструментальному мікроскопі. Доведення товщини диску до $0{,}8_{-0{,}05}$ мм.

Механізм перемотування та натягу дротів включає в себе (рис. 5):

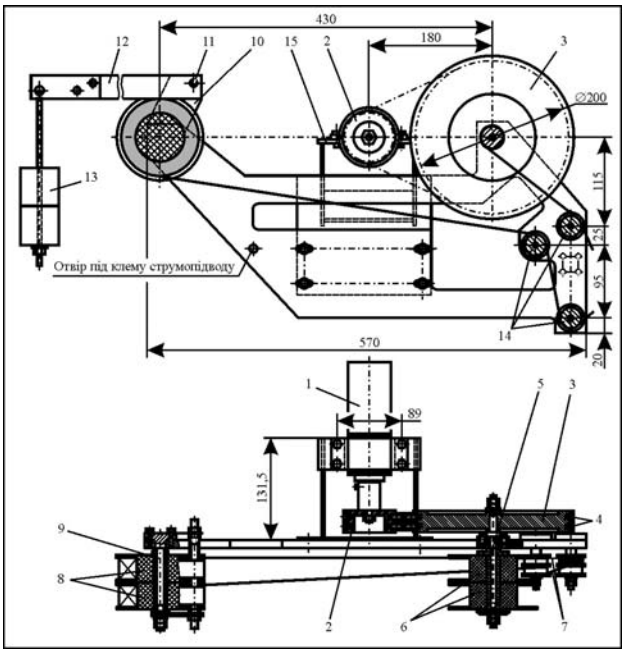


Рисунок 5 – Механізм перемотування та натягу дротів
Джерело: розроблено автором

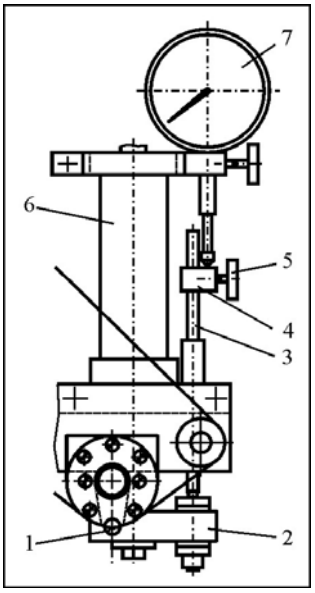
- електродвигун 1 постійного струму потужністю 0,2 кВт з вбудованим редуктором;
- клиноремінну передачу, яка складається із малого шківа 2, великого шківа 3 та двох клинових ременів 4;
- вал 5, що передає обертальний момент на дві котушки 6 для накопичення відпрацьованого дроту 7;
- пристрій для розмотування дротів з котушок 8, що включає в себе вісь 9;

- пристрій для натягу дротів, що складається із тримача 10, вісі 11 двох дерев'яних планок 12 та двох вантажів 13, які підбираються за масою так, щоб оказувати певний опір розмотуванню дротів з котушок 8;

- комплект роликів 14 для зміни напрямку протягування дротів;

- підставку 15 для кріплення електродвигуна 1 та натягу ременів 4.

Забезпечення регулювання швидкості протягування дротів. В експериментальному верстаті для електродугового різання дротовими електродами-інструментами перемотування дротів здійснюється електродвигуном постійного струму з збудованим редуктором (див. рис. 5). Крім того, після редуктора встановлено клиноремінну передачу, яка володіє передаточним відношенням i = 3,17, що ще зменшує кількість обертів. Вибрана кінематична схема дозволяє за рахунок зміни числа обертів в хвилину електродвигуна регулювати лінійну швидкість протягування дротів в діапазоні від 20 мм/с до 35 мм/с.



Забезпечення моніторингу глибини різання. Оператору, що працює на експериментальному верстаті для електродугового різання дротовими електродами-інструментами, в кожний момент часу необхідна інформація про текучу глибину різання. Дана інформація потрібна для оперативного керування процесом різання, а також для оперативного виміру лінійної швидкості різання.

В процесі різання заготовка рухається вгору, а дріт не рухається вгору, але протягується відносно електродотримача. Тому доцільно кінематично зв'язати вертикальне переміщення заготовки з приладом точного виміру лінійного переміщення – індикатором годинникового типу ИЧ-25.

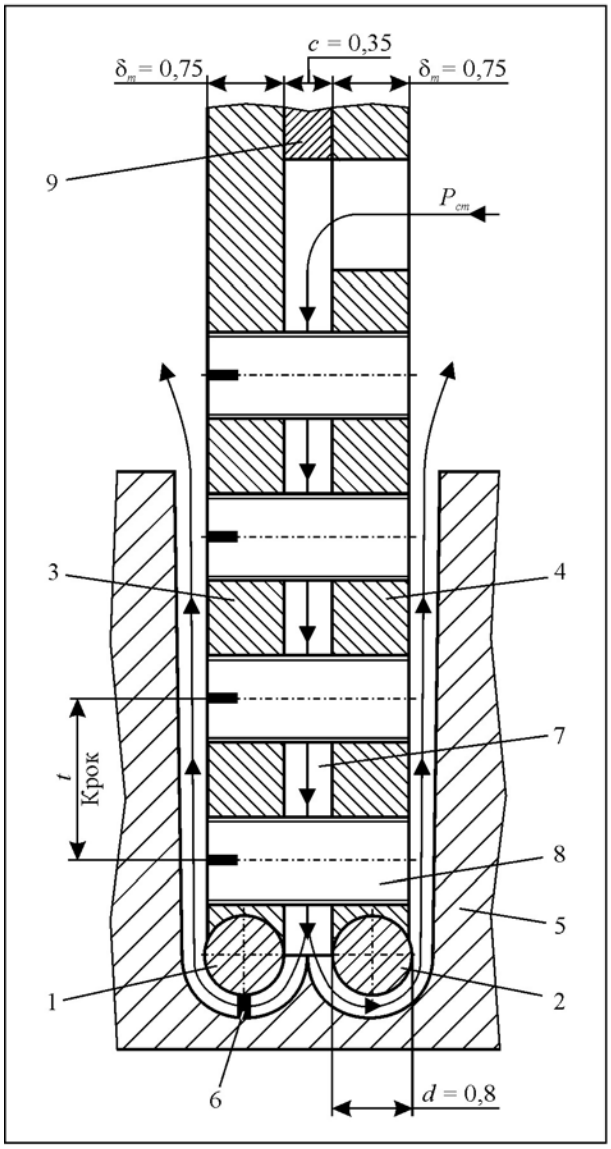
Рисунок 6 – Пристрій для моніторингу глибини різання
Джерело: розробка автора

На рис. 6 показано пристрій контролю глибини різання до експериментального верстата для електродугового різання дротовими електродами-інструментами. Лінійний вертикаль-ний рух заготовки 1 передається через тримач 2 та вертикальну стійку 3 на планку 4. Планка має установочне переміщення за вертикаллю та кріпиться до стійки 3 гвинтом 5. У верхній частині верстату нерухомо відносно гідроциліндра 6 закріплено індикатор 7 так, що його рухома частина, яка кінематично пов'язана із стрілкою індикатора, впирається у планку 4. Індикатор 7 дозволяє з точністю 0,01 мм контролювати глибину різання та характеризує якість роботи системи керування торцевим міжелектродним зазором в процесі різання за діапазоном коливання його стрілки.

Забезпечення мінімальної деформації тонкостінних електродотримачів від тиску робочої рідини в зоні різання. Зона різання експериментального верстата, що пропонується, суттєво відрізняється від зон різання будь-якого відомого верстата наявністю тонкостінних електродотримачів, що працюють під тиском робочої рідини. Товщина стінки такого електродотримача, як показано вище, залежить від діаметра дроту, якій протягується по ньому. Так, для діаметра дроту d, що дорівнює 0,8 мм, товщина стінки електродотримача δ_m складає 0, 75 мм.

В умовах різання на експериментальному верстаті тонкостінний електродо-тримач під дією статичного тиску робочої рідини працює як балка на двох опорах. Тому, чим менша відстань між опорами, тим менше прогин. Наявність прогину, що

перевищує 0,05 мм, не бажаний, так як це приводить до зменшення бічного міжелектродного зазору, що сприяє горінню електричної дуги в бічному зазорі та руйнуванню стінки електродотримача.



Для зменшення величини прогину пропонується суттєво зменшити відстань t між опорами за рахунок встановлення між електродотримачами системи стяжних гвинтів (сітки штучних опор), причому вертикальний та горизонтальний кроки повинні бути рівними та вибрані із умови $t = (10…15)\,d$.

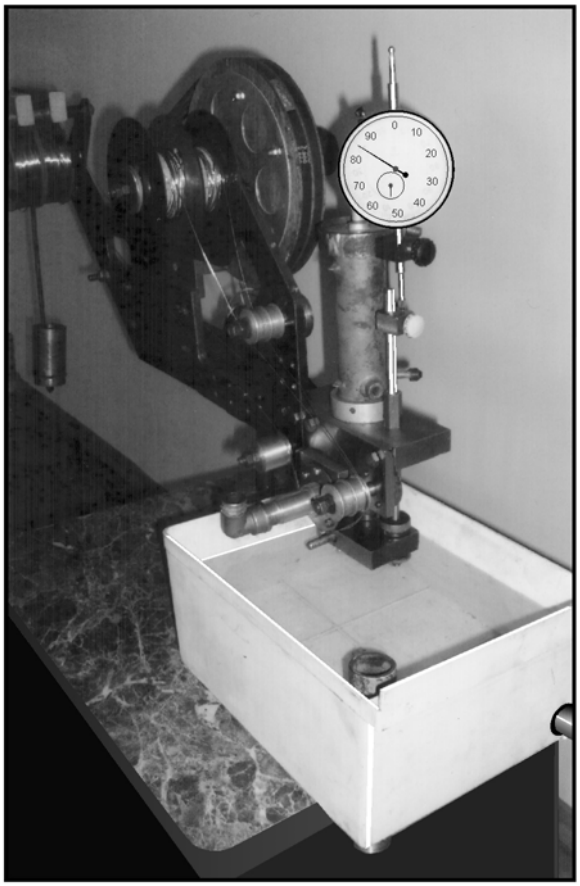
Так, для умов експериментального верстата приймається відстань t = 12 мм, а діаметри стяжних гвинтів – М2×0,4 (рис. 7).

1 – дріт лівий;
2 – дріт правий;
3 – електродотримач лівий;
4 – електродотримач правий;
5 – електрод-заготовка;
6 – електрична дуга;
7 – щілиноподібний канал;
8 – стяжний гвинт;
9 – дистанційна пластина

Рисунок 7 – Робоча зона різання
Джерело: розробка автора

З метою забезпечення гідроізоляції зони різання, а також можливості роботи верстата на підвищеній силі струму, гвинти встановлюються на електропровідному клею. Доцільно для поліпшення складання вузла довжину гвинтів брати на 2…4 мм більше відстані між зовнішніми поверхнями електродотримачів, а після висихання клею шліфувати дані поверхні до моменту зникнення їх виступаючої частини.

Експериментальний верстат «Ніж-1». З урахуванням викладеної вище концепції проектування спроекто-вано та виготовлено експеримен-тальний верстат «Ніж-1» для електро-дугового різання металів бідротовим електродом-інструментом (рис. 8). Він являє собою установку, що складається із наступних елементів: власне, верстата; станції робочої рідини; станції гідроприводу; джерела живлення постійним технологічним струмом, зокрема зварювального випрямляча типу ВДУ-504; пульта керування. Верстат призначено для експериментальних досліджень фізико-технологічних характеристик процесу електродугового різання металів бідротовим електродом-інструментом. Він реалізує новий спосіб різання металів електричною дугою [3].



Верстат (рис. 9) включає в себе раму 1 з підставкою 2, які з'єднані між собою. Підставка 2 нерухомо закріплена на стільниці 3, а стільниця закріплена на кришці 4 бака 5 станції робочої рідини.

На рамі 1 змонтовано усі основні деталі та вузли верстата:

- електродотримачі 6 з дистанційною прокладкою 7 товщиною 0,35 мм;
- рухомий стіл 8 з закріпленою заготовкою 9, що розрізається;
- механізм протягування дротів 10, який включає в себе: електродвигун 11, редуктор 12, малий шків 13, великий шків 14, клиновий ремінь 15, ролики 16, що спрямовують, котушки 17 для відпрацьованого дроту;
- гідроциліндр 18 подачі заготовки 9 (що слідкує за торцевим міжелектродним зазором);

Рисунок 8 – Експериментальний верстат моделі «Ніж-1» для електродугового різання металів бі-дротовим електродом-інструментом

Джерело: розробка автора

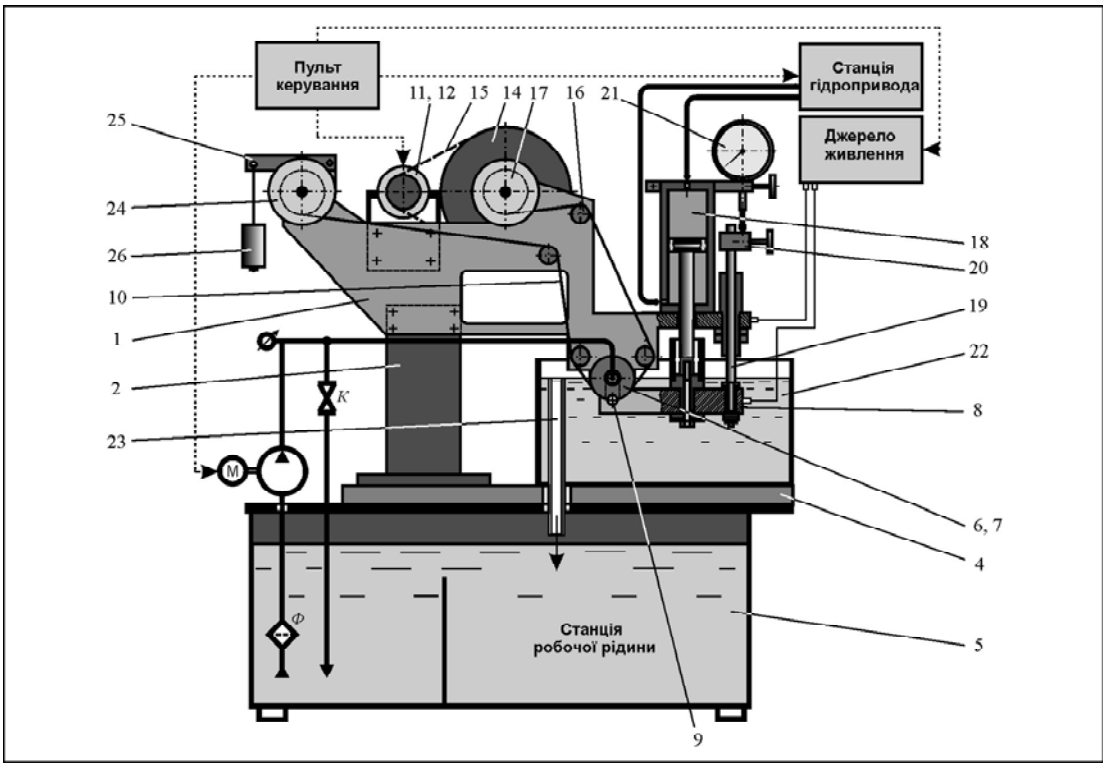


Рисунок 9 – Електрогідрокінематична схема експериментального верстата моделі «Ніж-1»

Джерело: розробка автора

- пристрій для моніторингу гли-бини різання, що включає в себе: вертикальну стійку 19, планку 20, що має установочне переміщення, індикатор 21 годинникового типу ИЧ-25;

- ванну 22 з робочою рідиною (водою) та з трубою переливу 23;

- механізм на тяжіння дротів, що включає в себе: дві котушки 24 з дротом, два важеля 25 та два вантажу 26, що регулюється.

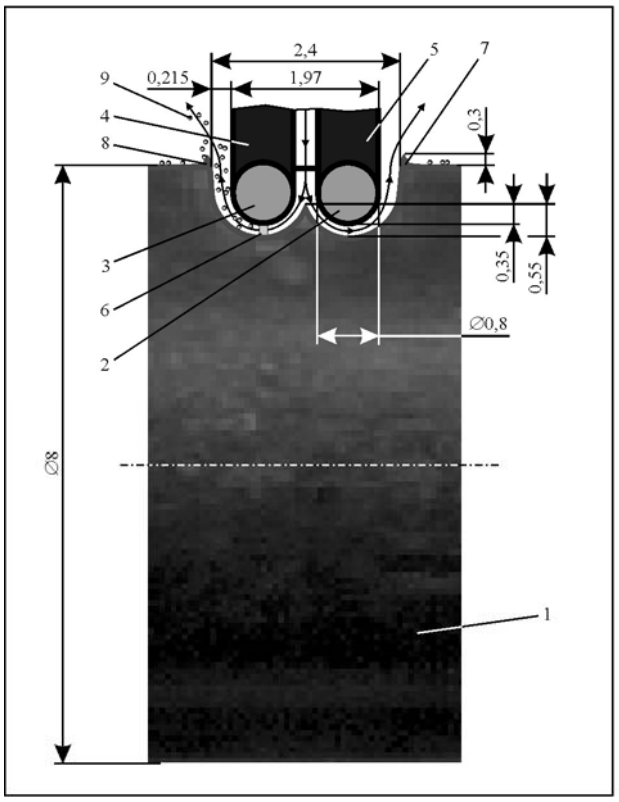
Верстат працює наступним чином. В початковому положенні рухомий стіл 6 із заготовкою 9 знаходиться у крайньому нижньому положенні.

Вмикають електродвигун насосу подачі робочої рідини (води) в робочу зону верстата – щілину між електродотримачами 6 та дротами 10. Слідкують за тим, щоб рівень робочої рідини в ванні 22 досяг верхнього краю труби переливу 23. Далі вмикають електродвигун 11 протягування дротів, електричний струм, виставляють годинниковий індикатор 21 глибини обробки на нуль та ведуть процес різання на вибраному режимі обробки.

Електрична дуга в умовах різання горить в міжелектродному торцевому зазорі між заготовкою та дротами в потужному поперечному гідродинамічному потоці робочої рідини, який стискує дугу, концентрує в ній енергію та інтенсивно вилучає продукти ерозії із зазору в ванну 22.

Протягування дротів компенсує електроерозійний знос дротових електродів-інструментів 10, завдяки чому годинниковий індикатор 21 точно відбиває глибину різання.

Технологічні випробування верстата: формування різу. Різ характеризується геометричними параметрами та формою.



На рис. 10 наведено результати дослідження геометричних параметрів та форми різу після електродугового різання дротовими електродами-інструментами сталевої заготовки діаметром 8 мм.

1 – заготовка, що розрізується;
2 – дріт правий;
3 – електродотримач лівий;
4 – електродотримач лівий;
5 – електродотримач правий;
6 - електрична дуга;
7, 8 – нарости із продуктів ерозії;
9 – продукти ерозії

Рисунок 10 – Скановане зображення заготовки в початковий момент формоутворення різу (×10)

Режим різання:

- сила струму I = 30 А;
- напруга U = 30 В;
- статичний тиск робочої рідини на вході потоку в міжелектродний зазор P = 0,25 МПа;
- робоча рідина – водопровідна вода;
- полярність – пряма (заготовка «+»);

- швидкість протягування дротів 35 мм/с.

В результаті дослідження виявлено:

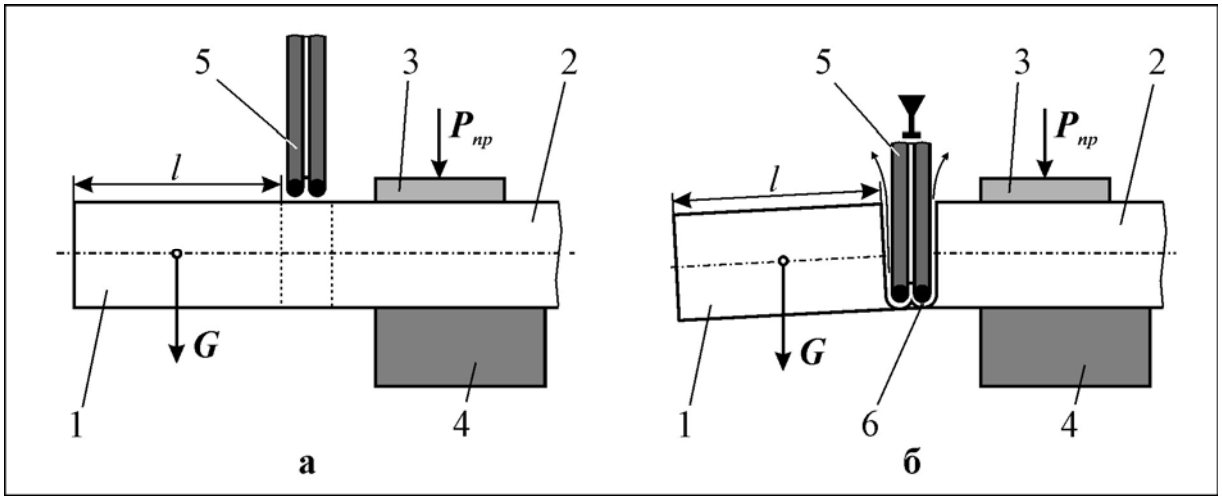
- технологічний виступ між дротами не утворюється (руйнується електричною дугою), а висота його не перевищує 0,55 мм. Це дозволяє стабілізувати процес різання за рахунок не утворення додаткових дуг між виступом та дротами і сприяє підвищенню продуктивності різання;

- міжелектродний зазор в напрямку прокачування робочої рідини зростає. Так, найменший зазор (0,185 мм) спостерігається в на переході від бічного внутрішнього до торцевого, а найбільший (0,215 мм) – в бічному зовнішньому. Дане явище обумовлено подовженню довжини електричної дуги при підвищенні концентрації продуктів ерозії в зазорі. Але абсолютна різниця між максимальним та мінімальним міжелектродними зазорами невелика та складає 0,03 мм;

- на виході із міжелектродного проміжку розжарені продукти ерозії спікаються на утворюють нарости 7, 8, висота яких не перебільшує 0,3 мм. Дані нарости легко руйнуються механічним способом (наприклад, абразивним каменем).

Відокремлення заготовки. Відокремлення відрізаної заготовки від прутка може здійснюватися в різних умовах:

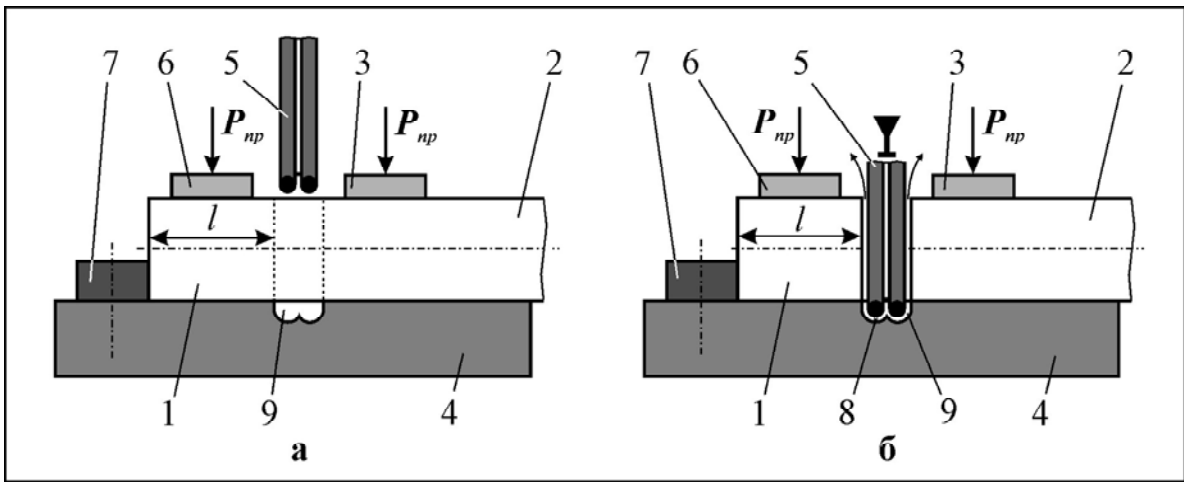
- умова 1: заготовка 1, що буде відрізана від прутка 2, консольно звисає із тримача 4, передній упор відсутній. В цьому випадку доцільно кріпити тільки пруток 2 (рис. 11, а). В момент, що передує відокремленню (рис. 11, б), утворюється тонка перемичка, і під дією тиску робочої рідини на поверхню заготовки та під дією гравітаційної сили *G* від маси заготовки виникає орбітальний момент, який повертає заготовку, і вона без торкання з дротовими електродами-інструментами або з електродотримачами відокремлюється. При цьому на заготовці залишається задирка від технологічного вступу, а на прутку – задирка з радіусною частиною (радіус приблизно 0,6 мм), що пов'язана з незакінченістю процесу різання. Звичайно задирки вилучаються механічним способом обробки;



а – початкова фаза; б – кінцева фаза; 1 – заготовка, що відрізується; 2 – пруток; 3 – притискач прутка; 4 – тримач; 5 – електрод-інструмент складеної конструкції; 6 – електрична дуга

Рисунок 11 – Схема відокремлення заготовка від прутка при електродуговому різанні бідротовим електродом-інструментом за умовою 1

- умова 2: заготовка, що буде відрізана від прутка, встановлена за переднім упором. Така потреба виникає, якщо треба відрізати від прутка декілька однакових за довжиною заготовок. Якщо кріпити тільки пруток, то в момент відокремлення заготовка може повернутися навколо точки торкання з упором та торкнутися дротових електродів-інструментів або електродотримачів. Це може привести до дестабілізації процесу різання та обриву звичайно одного із дротів. Саме тому необхідно кріпити не тільки пруток, але й заготовку, що буде відрізана (рис. 12, а). Такий прийом забезпечує стабілізацію процесу при наскрізному виході дротових електродів-інструментів із бічного зовнішнього міжелектродного зазору та гарантує якість відрізування, тобто отримання і заготовки і прутка без утворення задирок (рис. 12, б).



а – початкова фаза; б – кінцева фаза; 1 – заготовка, що відрізується; 2 – пруток; 3 – притискач прутка; 4 – тримач; 5 – електрод-інструмент складеної конструкції; 6 – притискач заготовки; 7 – передній упор; 8 – електрична дуга; 9 – порожнина для виходу електрода-інструмента

Рисунок 12 – Схема відокремлення заготовка від прутка при електродуговому різанні бідротовим електродом-інструментом за умовою 2

Електроерозійний знос дротових електродів-інструментів. Абсолютний електроерозійний знос дротового електрода-інструмента в умовах електродугового різання (рис. 13) залежить від швидкості його протягування (перемотування) та сили технологічного струму, причому чим менша швидкість протягування та більша сила струму, тим більший абсолютний знос. Надмірний абсолютний знос дротового електрода-інструмента може привести до його обриву.

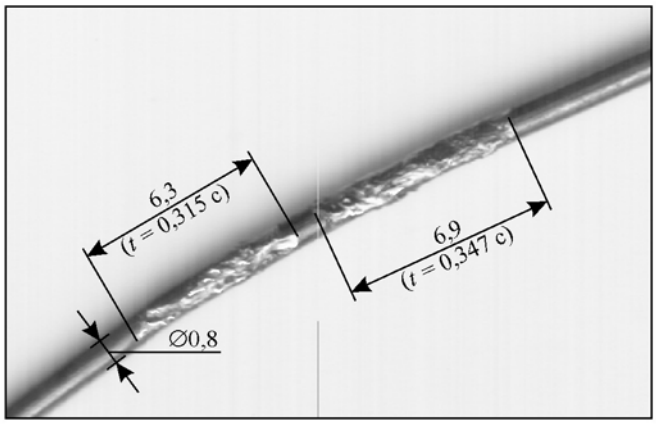


Рисунок 13 – Характер електро-ерозійного зносу дротового електрода-інструмента після електродугового різання (×10)

За даними роботи [4 с. 235] для електроіскрового різання дрото-вим електродом-інструментом сталей та твердих сплавів рекомендується змінювати швидкість протягування дроту у межах від 8 до 20 мм/с.

У відміну від електроіскро-вого, при електродуговому різанні в якості інструмента використовується електрична дуга і процес здійснюється без пауз. Тому за даними умовами слід чекати більшу продуктивність обробки, а отже і більш інтенсивний знос дротового електрода-інструмента. Саме тому на експериментальному верстаті для електродугового різання дротовими електродами-інструментами швидкість протягування дротів більш завищена та лежить у межах від 20 до 35 мм/с.

Продуктивність різання. Продуктивність електродугового різання металів дротовими електродами-інструментами, також як і продуктивність розмірної обробки електричною дугою отворів та порожнин, визначається насамперед силою технологічного струму та пропорційна їй. Але із підвищенням сили струму глибина електроерозійної лунки (або сліду) на дроті зростає, що зменшує площу поперечного перерізу дроту. В свою чергу, протікання струму крізь меншу площу викликає нагрівання та обрив дротового електрода-інструмента.

Отже, для підвищення продуктивності різання необхідно створити такі умови процесу, при яких із підвищенням сили струму глибина лунки не зросте більш допустимої величини. Ці умови досягаються, коли підвищення сили струму буде супроводжуватися одночасним підвищенням швидкості потоку в міжелектродному зазорі, Сформований таким чином більш інтенсивний гідродинамічний потік діє на дугу та стискує її. При цьому енергетичні параметри дуги зростають, а геометричні зменшуються. Таким чином, є можливим ввести в зону різання електричний струм значної сили і тим самим підвищити продуктивність різання.

З метою досягнення максимально можливої продуктивності, подальші дослідження процесу різання будуть продовжені.

Висновки. Запропоновано та досліджено високопродуктивний спосіб електродугового різання металів бідротовим електродом-інструментами, що реалізує нову технологічну схему формоутворення різу. Описано фізичний механізм різання. Розроблено концепцію проектування експериментального верстата, що реалізує даний спосіб різання. Спроектовано, виготовлено, випробувано та досліджено експериментальний верстат «Ніж-1» для електродугового різання бідротовим електродом-інструментом важкооброблюваних матеріалів.

Список літератури

1. Носуленко, В. И. Размерная обработка металлов электрической дугой [Текст] / В. И. Носуленко, Н. Г. Мещеряков // Электронная обработка материалов. – 1981. – № 1. – С. 19-23.
2. Боков, В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою [Текст] / Віктор Боков – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс-ЛТД», 2002. – 300 с.
3. Спосіб різання металів електричною дугою [Текст]: пат. 102343 Україна: МПК В 23 К 9/00 / Боков В. М.; заявник та патентовласник Боков В. М. – № u201504022; заявл. 27.04.15; опубл. 26.10.15, Бюл. № 20. – 6 с.
4. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки [Текст] / Г. Л. Амитан, И. А. Байсупов, Ю. М. Барон и др. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. – 719 с.

Viktor Bokov, Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Electric arc metal cutting with by-wire electrode-tool

The goal of the work is to develop a new way of electric arc metal cutting with electrode tool wear compensation and to develop a machine design concept.

In this new of electric arc metal cutting that is proposed, a new cut shaping technology scheme, in which the electric arc is excited in the hydrodynamic flow of the working fluid between an electrode-blank and a composite electrode-tool, is used. This electrode-tool includes two parallel wires, which are pulled over the convex surface of the electrode holder. The work fluid is pumped into the cutting zone under a process pressure the electrode holder and into the gap between the wires; the size of the gap is less or equal two interelectrode end

backlashes. This allows conducting the cutting process without the formation of technological protrusion between wires. Distinctive features of a new cut shaping technology scheme are reflected in a machine design concept, which ensures the following: optimal process conditions in the cutting zone, minimal cut width, maximum possible cutting performance, parallel pulling and tensioning of the two wires in the cutting zone, wire in pulling speed adjustment, cutting depth monitoring, optimum wear of the bi-wire electrode-tool.

This article proposes and examines a high performance way of electric arc metal cutting with bi-wire electrode-tool. The physical cutting mechanism is described. Machine design concept, which implements this method, is developed. Experimental machine «Knife-1» for electric arc hard materials cutting with bi-wire electrode-tool is designed, manufactured and examined.

electric arc, hydrodynamic mode, bi-wire electrode-tool, shaping technology system, cutting machine

Одержано 22.12.16

УДК 62-231:621.9.04

А.М. Кириченко, проф., д-р техн. наук, Аль Ібрахімі Метак, асп.
Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
E-mail: andrew.kirichenko@gmail.com

Багатокоординатний верстат з надлишковим механізмом паралельної структури та спеціальним робочим органом

У статті досліджуються перспективи вдосконалення багатокоординатного обладнання паралельної структури з ланками змінної довжини шляхом введення надлишкових приводів. Запропоновано нову конструкцію п'ятикоординатного верстата з надлишковим механізмом паралельної структури 2R3T та спеціальним робочим органом, яка дозволяє позбавитись від особливих положень у робочому просторі та розширити діапазон кутів повороту обертальних ступенів вільності до 120º та 180º відповідно, розглянуто ряд можливих компоновок подібних верстатів.

верстат, механізм паралельної структури, надлишковість, робочий орган

А. Н. Кириченко, проф., д-р техн. наук, Аль Ибрахими Метак, асп.
Центральноукраинский национальный технический университет, г.Кропивницкий, Украина

Многокоординатный станок с избыточным механизмом параллельной структуры и специальным рабочим органом

В статье исследуются перспективы усовершенствования многокоординатного оборудования параллельной структуры с звеньями переменной длины путем введения избыточных приводов. Предложена новая конструкция пятикоординатного станка с избыточным механизмом параллельной структуры 2R3T и специальным рабочим органом, позволяющая избавиться от особых положений в рабочем пространстве и расширить диапазон углов поворота вращательных степеней свободы до 120º и 180º соответственно, рассмотрен ряд возможных компоновок подобных станков.

станок, механизм параллельной структуры, избыточность, рабочий орган

Постановка проблеми. Вирішення задачі максимального збільшення продуктивності обробки деталей при забезпеченні гнучкості виробництва можливе лише з використанням верстатів з ЧПУ для високошвидкісної обробки, в тому числі багатокоординатної. Подальше підвищення продуктивності вимагає збільшення жорсткості для можливості інтенсифікації режимів різання, а також збільшення

© А.М. Кириченко, Аль Ібрахімі Метак, 2017

швидкостей та прискорень робочих і допоміжних рухів. Зокрема, за даними фірми Starrag Group AG [1], збільшення прискорення робочого органа з 0,5g до 1g дозволяє зменшити час обробки на 30% при високошвидкісній обробці алюмінієвих сплавів.

Таким чином, перспективним завданням сучасного верстатобудування є створення високопродуктивних багатокоординатних фрезерних верстатів і обробних центрів з надвисокими швидкостями та прискореннями, що можливе з використанням механізмів паралельної структури. Повноцінному застосуванню механізмів паралельної структури в багатокоординатних верстатах з ланками змінної та постійної довжини перешкоджають певні недоліки, основним з яких є обмеження робочого простору та кутів орієнтації робочого органа внаслідок виникнення особливих положень.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування надлишкових механізмів паралельної структури, які потенційно дозволяють зменшити вплив особливих положень та принципово покращити характеристики робочого простору. Таким чином, розширення технологічних можливостей багатокоординатних верстатів паралельної структури є актуальною науковою задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відома значна кількість зарубіжних досліджень, присвячених надлишковим механізмам паралельної структури [2]. Відомо, що надлишковість спрощує вирішення прямої задачі кінематики, дозволяє керувати формою еліпсоїдів статичної та динамічної маніпульованості [3]. Якщо розглядати надлишковий механізм паралельної структури як сукупність повнопаралельних механізмів, отриманих виключенням надлишкових ланок, для того, щоб надлишковий механізм знаходився у особливому положенні, необхідно, щоб усі такі механізми знаходились у особливих положеннях. Таким чином, надлишковість дозволяє ефективно усунути особливі положення у робочому просторі паралельних маніпуляторів.

Досить вичерпно досліджені прості плоскі надлишкові механізми, зокрема у [4] для 3RPR (рис. 1) встановлено, що використання надлишкової приводної ланки дозволяє кардинально покращити маніпульованість у робочому просторі порівняно з двохланковим механізмом.

Одним з найбільш розповсюджених застосувань для надлишкових механізмів є кабельні маніпулятори. Наприклад, у [5] показано, що для таких маніпуляторів (рис. 2) надлишковість приводів дозволяє підвищити жорсткість, забезпечити більш ефективне використання робочого простору.

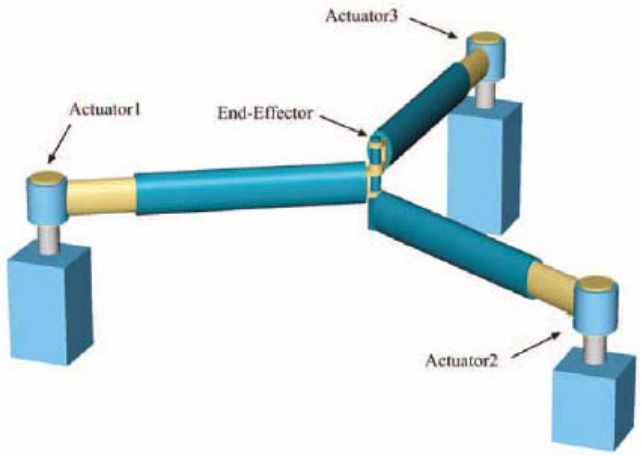


Рисунок 1 – Плоский надлишковий механізм паралельної структури

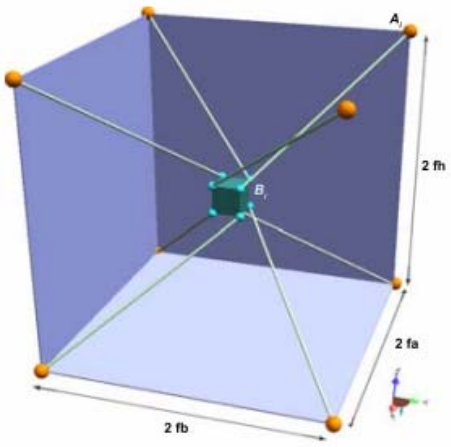


Рисунок 2 – Кабельний маніпулятор з 8 приводами

На відміну від повнопаралельних механізмів, управління надлишковими маніпуляторами повинно здійснюватись за моментами приводів ланок з використанням доповнених пропорційно-диференційних регуляторів [6], при цьому необхідно враховувати неточності виготовлення, які можуть призвести до виникнення значних напружень у просторовій структурі механізму [7]. Для врахування навантаження на робочий орган швидкісних надлишкових механізмів запропоновано використовувати адаптивне управління у подвійних координатах – приводів та робочого органа [8].

Відомі конструкції надлишкових механізмів паралельної структури: плоского 3-осьового ARCHI [13] з нескінченним обертанням навколо осі та просторового 5-осьового EUREKA [14] з можливістю повороту ±90º навколо одної з осей та повороту на повний оберт навколо іншої. Недоліками обох механізмів є невисока жорсткість у одному або кількох напрямках.

Надлишкові механізми паралельної структури знайшли застосування й у верстатобудуванні. Одним з небагатьох дослідних верстатів, побудованих на основі маніпуляторів паралельної структури з надлишковими приводами, є Eclipse [9], розроблений у Сеульському національному університеті (Південна Корея). Використання 8 приводів для керування 6 ступенями вільності дозволяє позбавитись від особливих положень у робочому просторі, забезпечуючи можливість вільного переходу від вертикальної до горизонтальної орієнтації шпинделя. Недоліками верстата Eclipse є використання кільцевих напрямних, які мають високу вартість та ускладнюють калібрування, а також зміна жорсткості від 50 Н/мкм до 15 Н/мкм при переході від вертикальної до горизонтальної орієнтації робочого органа [10].

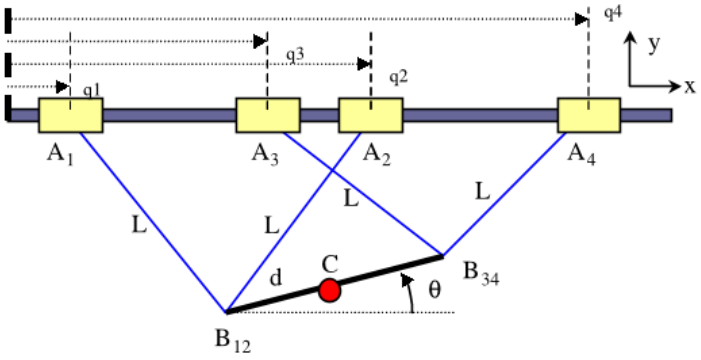


Рисунок 5 – Механізм ARCHI

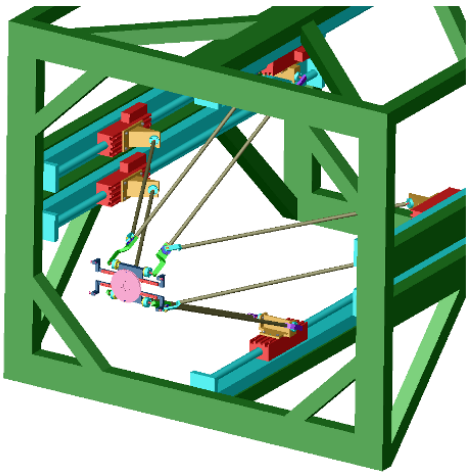


Рисунок 6 – Механізм Eureka

Німецька фірма Metrom [11] випускає багатокоординатні верстати паралельної структури із спеціальним робочим органом, у якому спільна вісь шарнірних опор одночасно є віссю шпинделя, який має п’ять ступенів вільності. Наприклад, п’ятикоординатний фрезерний верстат P1000 (рис. 5), на якому можна здійснювати точіння, фрезерування, обробку фрезеруванням поверхонь обертання, точіння та фрезерування некруглих поверхонь обертання. Кінематичні характеристики таких верстатів розглянуті у [12]. Основними недоліками слід вважати обмежену рухомість робочого органа та порівняно низьку жорсткість на краях робочої зони, обумовлені наявністю особливих положень.

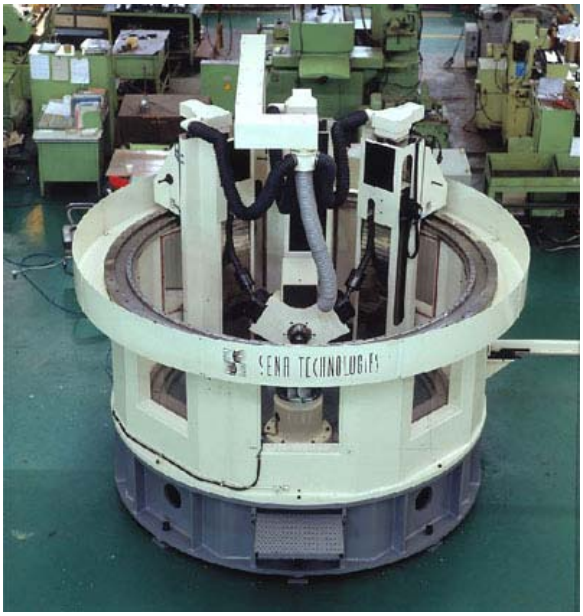


Рисунок 3 – Прототип верстата Eclipse (Південна Корея)

Рисунок 4 – Промисловий верстат P1000 фірми Metrom (Німеччина)

Відомі розробки щодо застосування надлишкових приводних ланок для усунення особливих положень платформи Гауфа-Стюарта [15], проте дослідження надлишкових механізмів із спеціальними робочими органами відсутні.

Метою роботи є розробка багатокоординатного надлишкового механізму паралельної структури з 5 ступенями вільності 2R3T (2 обертальних і 3 поступальних ступені вільності) з розширеними можливостями орієнтації внаслідок виключення особливих положень за рахунок використання надлишкових приводів і спеціальної конструкції робочого органа, для використання у верстатах паралельної структури.

Об'єкт та методика дослідження. Об'єктом дослідження є багатокоординатні верстати паралельної структури з надлишковими приводами та спеціальним робочим органом.

Для використання принципу надлишковості приводів у багатокоординатному обладнанні розроблено схему верстата паралельної структури з 5 керованими координатами і 6 приводами штанг змінної довжини, який має спеціальний робочий орган з спільною віссю шарнірних опор (рис. 5).

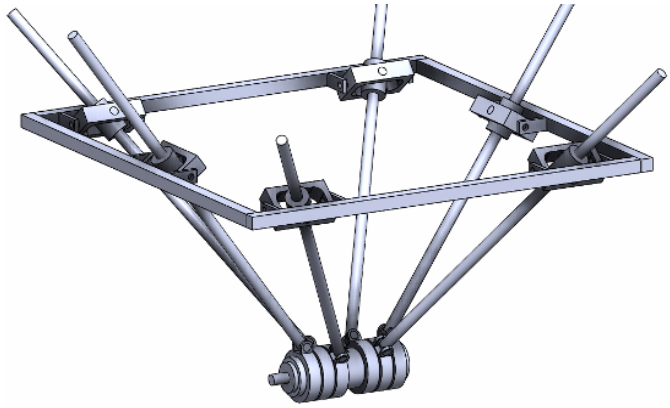


Рисунок 5 – Схема багатокоординатного верстата з надлишковим приводом

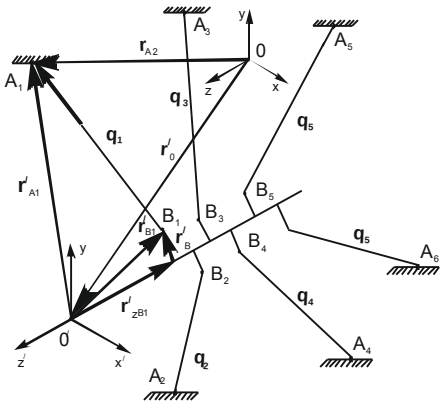


Рисунок 6 – Геометрична схема

Робочий орган верстата з'єднується з основою шістьма ланками змінної довжини, причому шарніри робочого органа мають спільну вісь, яка співпадає з віссю шпинделя верстата. Використання спеціального робочого органа дозволяє забезпечити надлишковість механізму паралельної структури вже при кількості приводів 6, тоді як для надлишкової платформи Гауфа-Стюарта необхідно хоча б 7 приводних ланок.

Відповідно до схеми (рис. 6) довжина ланок у зворотних кінематичних залежностях визначається аналогічно [12]:

$$l_i = \left| \left(R \cdot \left(z_{B_i} - \frac{\left(z_{A_i} - z_{B_i}\right) \cdot \mathbf{r}_{Bi}}{\sqrt{x_{A_i}^2 + y_{A_i}^2} - \mathbf{r}_{Bi}} \right) + \mathbf{r}_0 \right) - \mathbf{r}_{Ai} \right|, \quad (1)$$

де R – матриця повороту системи координат робочого органа відносно системи координат основи;

$x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i}$ – координати центрів A_i шарнірів основи;

z_{B_i} – координати центрів B_i шарнірів робочого органа;

$\mathbf{r}_B$ – радіус-вектор точки B_i в абсолютній системі координат основи.

$\mathbf{r_0}$ – радіус-вектор початку координат робочого органа в системі координат основи;

$\mathbf{r}_{Ai}$ – радіус-вектор точки A_i у системі координат основи.

Таким чином, зворотні кінематичні залежності мало відрізняються від залежностей пентапода, але матриця похідних зворотної кінематичної функції має розмірність 5×6.

Отримання прямих кінематичних залежностей, необхідних для можливості управління верстатом від ЧПУ, можливе чисельним методом (ітерації Ньютона-Рафсона) з врахуванням сумісності руху приводів. Управління треба здійснювати за розрахованим на основі моделі верстата моментом.

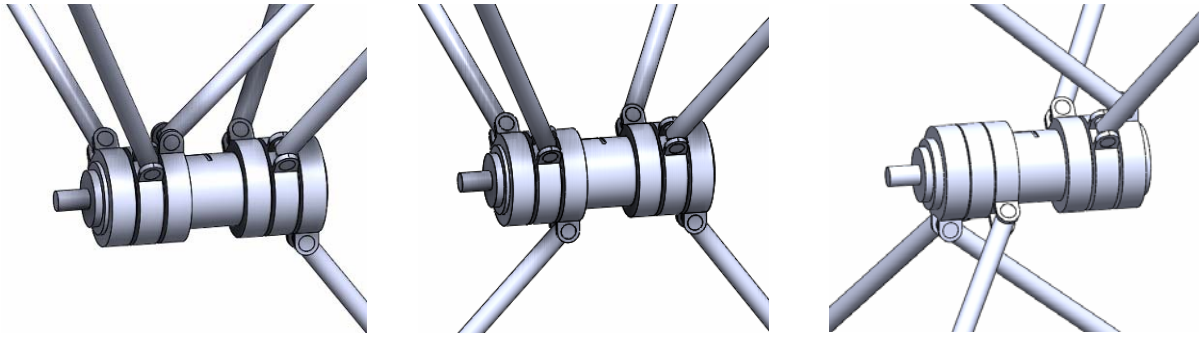
Матриця жорсткості надлишкового механізму паралельної структури з спеціальним робочим органом згідно [16] визначається як сума матриць жорсткості шести ланок, що розглядаються як лінійні пружини, та одної ланки, що розглядається як крутильна пружина:

$$K = \sum_{i=6}^{n} k_n \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{n}_i \\ \mathbf{r}_B \times \mathbf{n}_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{n}_i \\ \mathbf{r}_B \times \mathbf{n}_i \end{bmatrix}^T + k_к \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{r}_B \times \mathbf{n}_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{r}_B \times \mathbf{n}_6 \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

де k_i – жорсткість ланки;

$\mathbf{n}_i$ – одиничний вектор осі штанги змінної довжини.

Результати дослідження. Розроблені варіанти виконання робочого органа з метою розширення орієнтаційного робочого простору та підвищення стабільності просторового положення робочого органа. Варіант розміщення штанг (рис. 5, а) залишає одну з сторін вільною для зручності доступу до деталі, варіант (рис. 5, б) потенційно може забезпечити більшу жорсткість, а варіант (рис. 5, в) має широкі можливості орієнтації робочого органа.

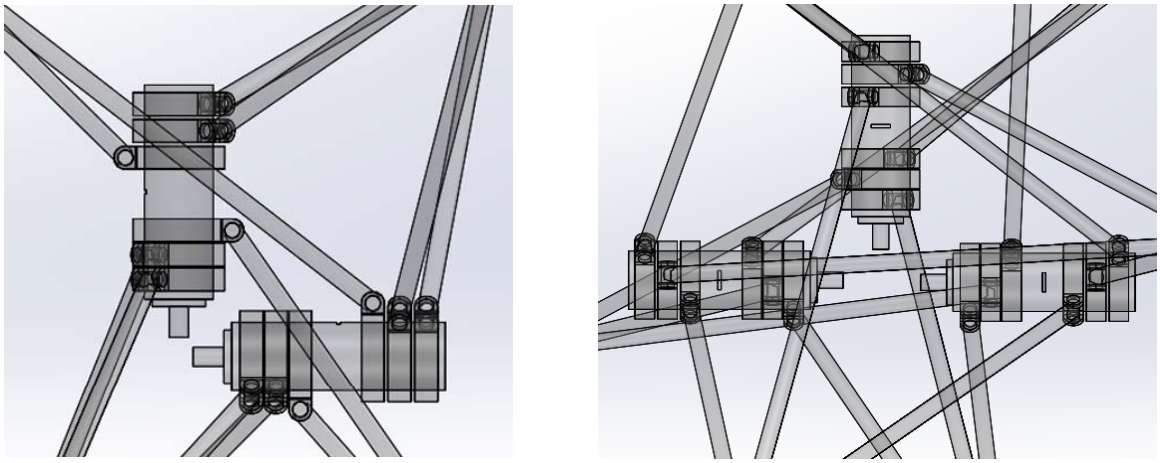


а) б) в)

Рисунок 5 – Варіанти виконання з різною орієнтацією штанг відносно робочого органа

Попередні розрахунки та моделювання показують (рис. 6), що за рахунок кінематичної надлишковості приводів механізму та спеціального розміщення шарнірів основи і робочого органа орієнтація робочого органа у вертикальній площині можлива у діапазоні до 120º, а у горизонтальній площині – до 180º в залежності від розташування шарнірних опор.

Надлишковість приводів вимагає точної ідентифікації координат шарнірних опор основи і робочого органа прямим вимірюванням (наприклад, за допомогою координатно-вимірювальної машини) вже на етапі попереднього налаштування верстата для запобігання надлишкових деформацій конструкції верстата внаслідок неузгодженості приводів штанг у статично невизначеному механізмі. Одним із способів усунення невизначеності без втрати корисних властивостей може бути конструктивне забезпечення вільного переміщення однієї із груп шарнірів уздовж осі робочого органа, проте це може привести до зменшення просторової жорсткості.



а) б)

а) у вертикальній площині; б) у горизонтальній площині

Рисунок 6 – Поворот робочого органа

Висновки.

1. Розроблено багатокоординатний надлишковий механізм паралельної структури з 5 ступенями вільності 2R3T (2 обертальних і 3 поступальних ступені вільності) з ланками змінної довжини та спеціальним робочим органом, для використання у верстатах паралельної структури, на відміну від існуючих конструкцій,

дозволяє без застосування додаткових механізмів забезпечити діапазон повороту робочого органа відносно двох координатних осей до 120º та 180º відповідно.

2. Особливості надлишкових механізмів обумовлюють значні відмінності кінематичних залежностей, методів розрахунку точності та жорсткості, потребують відповідного уточнення алгоритмів управління, виходу у початкове положення та калібрування верстата.

3. Напрями подальших досліджень включають аналіз прямих кінематичних залежностей верстата, визначення характеристик робочого простору, оцінку показників маніпульованості, обґрунтування раціонального розміщення шарнірних опор для реалізації максимального діапазону кутів орієнтації робочого органа при збереженні керованості просторової структури верстата, оптимізацію конструктивних параметрів для підвищення жорсткості.

Список літератури

1. Starrag Group [Електронний ресурс] // Офіційний сайт. – Режим доступу: www.starrag.com.
2. Luces, M. A. Review of Redundant Parallel Kinematic Mechanisms / M. Luces, J. K. Mills, B. Benhabib // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – May 2017. – Vol. 86, Issue 2. – P. 175-198.
3. Merlet, J-P. Redundant parallel manipulators // J. of Laboratory Robotic and Automation. – 1996. – Vol. 8(1). – P. 17-24.
4. Müller, A. On the terminology and geometric aspects of redundant parallel manipulators // Robotica. – 2013. – Vol. 31(1). – P. 137-147.
5. Aref, M. M. Geometrical workspace analysis of a cable-driven redundant parallel manipulator: KNTU CDRPM / M. M. Aref, H. D. Taghirad // 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice. – 2008. – P. 1958-1963.
6. Shang, W. Augmented nonlinear PD controller for a redundantly actuated parallel manipulator / W. Shang, S. Cong, Z. Li, S. Jiang // Advanced Robotics. – Vo. 23 (12-13). – P. 1725-1742.
7. Müller, A. Consequences of geometric imperfections for the control of redundantly actuated parallel manipulators // IEEE Trans. Robot. – 2010. – Vol. 26 (1). – P. 21–31.
8. Sartori, Natal G. Dual-space adaptive control of redundantly actuated parallel manipulators for extremely fast operations with load changes / G. Sartori Natal, A. Chemori, F. Pierrot // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, Saint Paul, MN, USA, pp. 253-258, 2012.
9. Ryu, S.J. ECLIPSE: An Overactuated Parallel Mechanism for Rapid Machining / Ryu, S.J., Kim, J.W.. Hwang, J.C., Park C., Ho, H.S., Lee, K., Lee, Y., Cornel U., Park, F.C., Kim. J. // Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. – Vol. 8, USA, 1998, pp. 681-689.
10. Kim, J. Eclipse-RP: A new RP machine based on deposition and machining / J. Kim, K. S. Cho, J. Hwang, C. Iurascu, F. C. Park // J. Multi-body Dyn. – 2002. – Vol. 216. – P. 13–20.
11. Metrom mechatronische maschinen [Електронний ресурс] // Офіційний сайт. – Режим доступу: www.metrom.com.
12. Кириченко, А. М. Кінематика п’ятикоординатного верстата з паралельною структурою [Текст] / А. М. Кириченко, О. В. Шелепко, С. П. Сапон // Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки». – Чернігів : ЧДТУ, 2013. – № 3 (67). – С. 100-104.
13. Marquet, F. ARCHI, a redundant mechanism for machining with unlimited rotation capacities / F. Marquet, S. Krut, O. Company, F. Pierrot // Proc. of IEEE ICAR. – 2001. – P. 683-689.
14. Krut, S. Eureka: A New 5-Degree-of-Freedom Redundant Parallel Mechanism / S. Krut, O. Company, S. Rangsri, F. Pierrot // Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2003. – P. 3575-3580.
15. Cao, Y. Singularity Elimination of Stewart Parallel Manipulator Based on Redundant Actuation / Y. Cao, H. Zhou, B. Li, S. Long, M. Liu // Advanced Materials Research. – 2011. – Vols. 143-144. – P. 308-312.
16. Кириченко, А. М. Матриця жорсткості просторових механізмів паралельної структури з пружними ланками [Текст] / А. М. Кириченко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград: КНТУ, 2010. – Вип. 40, ч. І. – С. 256-262.

Andriy Kyrychenko, Prof., DSc., Methaq Alibraheemi, post-graduate
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
Multi-axis machine tool with redundant parallel manipulator and custom end effector

The article is aimed to develop a new 5-dof redundant parallel manipulator 2R3T (2 rotational and 3 translational degrees of freedom) with custom end effector to eliminate singularities in the workspace and provide advanced orientation ability for machine tools applications.

The new redundant parallel manipulator with 5 controllable degrees of freedom has 6 variable-length links actuators connected to the end effector with a common axis of joints. A few possible layouts of the machine are proposed, extending the orientation capability of the end effector to 120 deg and 180 deg about two axes respectively. Kinematics and stiffness of the manipulator are considered.

The further research should be aimed to direct kinematics, workspace, manipulation indices, stiffness and geometry optimization, developing a special control algorithms based on a calculated torque to keep the stability and prevent the internal stress in the manipulator structure.
machine tool, parallel manipulator, redundant, end effector

Одержано 16.05.17

УДК 621.644:621.833.15

Ю.В. Кулєшков, проф., д-р техн. наук, Є.В. Магонець, асп., К.Ю. Кулєшкова, інж., М.В. Красота, доц., канд. техн. наук, Т.В. Руденко, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
E-mail: krasotamv@ukr.net

Аналіз теоретичних досліджень геометричних параметрів відсіченої порожнини шестеренного насоса

В статті наведені результати аналізу теоретичних досліджень геометричних параметрів відсіченої порожнини шестеренного насоса. Встановлені теоретичні залежності об'єму відсіченої порожнини від параметрів зубчастого зачеплення, а також від положення точки зачеплення на лінії зачеплення шестерень насоса. Отримані теоретичні залежності дозволяють визначити геометричні параметри відсіченої порожнини, при яких виключається явище компресії робочої рідини. Виключення компресії досягнуто завдяки використанню зубчастого зачеплення з асиметричною лінією зачеплення. В роботі вказані недоліки існуючих теоретичних досліджень і вказані напрямки подальшого їх розвитку.
шестеренний насос, зубчасте зачеплення, лінія зачеплення, точка зачеплення, робоча рідина, відсічена порожнина, компресія, коефіцієнт перекриття зубчастого зачеплення

Ю.В. Кулешков, проф., д-р техн. наук, Е.В. Магонець, асп., К.Ю. Кулешкова, инж., М.В. Красота, доц., канд. техн. наук, Т.В. Руденко, доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г.Кропивницкий, Украина

Анализ теоретических исследований геометрических параметров отсеченной полости шестеренного насоса

В статье приведены результаты анализа теоретических исследований геометрических параметров отсеченной полости шестеренного насоса. Установлены теоретические зависимости объема отсеченной полости от параметров зубчатого зацепления, а также от положения точки зацепления на линии зацепления шестерен насоса. Полученные теоретические зависимости позволяют определить геометрические параметры отсеченной полости, при которых исключается явление компрессии рабочей жидкости. Исключение компрессии достигнуто за счет использования зубчатого зацепления с асимметричной линией зацепления. В работе указаны недостатки существующих теоретических исследований и указаны направления дальнейшего их развития.
шестеренный насос, зубчатое зацепление, линия зацепления, точка зацепления, рабочая жидкость, отсеченная полость, компрессия, коэффициент перекрытия зубчатого зацепления

© Ю.В. Кулєшков, Є.В. Магонець, К.Ю. Кулєшкова, М.В. Красота, Т.В. Руденко, 2017

Постановка проблеми. Шестеренні насоси (НШ) знайшли саме широке застосування завдяки здатності працювати у важких умовах підвищеної запиленості та високих температур, що пояснюється особливостями їх конструкції.

Однак, поряд з перевагами, НШ мають істотний недолік, пов'язаний з утворенням в процесі роботи відсіченої порожнини (ВП). У ВП насоса відбуваються складні гідродинамічні процеси, що проявляються спочатку у різкому підвищенні, а потім зниженні тиску робочої рідини, що призводить до істотного зниження працездатності НШ.

На сьогодні єдиним реальним шляхом зниження впливу компресії робочої рідини на працездатність НШ є розвантаження відсіченої порожнини через відповідні канали, що не являється кардинальним вирішенням проблеми.

Подальше вдосконалення конструкції НШ у напрямку усунення компресії ВП можливе лише на основі відповідних фізичних і математичних моделей процесів, що відбуваються у ВП.

Дана робота присвячена аналітичному огляду наукової інформації у напрямку розробки фізичних і математичних моделей процесів, що відбуваються У ВП НШ, а отже є актуальною.

Зазначена проблема компресії робочої рідини у ВП НШ не може бути вирішена без встановлення фізичної суті процесів, що відбуваються у ВП НШ в процесі його роботи.

Відсутність фізичної моделі процесів, що відбуваються у ВП стримує розвиток відповідних математичних моделей, що повинні стати підґрунтям для усунення проблем, які виникають в НШ при утворенні ВП.

Першим етапом на цьому шляху є аналіз існуючих теоретичних моделей і їх відповідність дійсному стану речей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією з особливостей роботи шестеренного насоса є утворення відсіченої порожнини (ВП). Складні гідродинамічні процеси, які відбуваються у ВП, як правило негативно позначаються на технічних характеристиках НШ. Незважаючи на те, що теоретичні дослідження ВП ведуться досить тривалий час, єдиної теорії гідромеханічних процесів, що відбуваються у ВП НШ, досі не створено, що пояснюється складністю цих процесів [1].

З усього різноманіття науково-технічних джерел інформації, присвячених теоретичному дослідженню процесів, що відбуваються у ВП НШ, найбільшу увагу заслуговують джерела [1-13, 20-26].

Постановка завдання. Метою досліджень є проведення аналізу науково-технічної інформації щодо результатів теоретичних досліджень геометричних параметрів ВП шестеренного насоса та визначення подальшого напрямку досліджень процесів, які відбуваються у відсіченій порожнині та формулювання наукової гіпотези досліджень.

Виклад основного матеріалу. У роботі В.М. Прокоф'єва [13] запропонована залежність зміни об’єму ВП від параметрів зубчастого зачеплення НШ:

$$\Delta V_{ВП} = \frac{\pi b t_0^2}{4 z_1} \cdot \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right) \cdot (\varepsilon - 1)^2, \qquad (1)$$

де $\Delta V_{ВП}$ – величина зміни об’єму відсіченої порожнини, мм^3;

b – ширина шестерень, мм;

t_0 – крок зачеплення, мм;

r_1, r_2 – відповідно радіуси початкових (полоідних) кіл;

z_1 – число зубів ведучої шестерні;

ε – коефіцієнт перекриття зубчатого зачеплення.

З виразу (1) можна знайти втрати робочого об'єму ΔV_0 насоса через наявність ВП [13], мм^3:

$$\Delta V_0 = z_1 \cdot \Delta V_{ВП} . \tag{2}$$

Більш суттєві результати теоретичного дослідження ВП представлені в роботах А.Ф. Осипова, Е.М. Юдіна та Е.А. Рибкіна і А.А. Усова [5, 8, 9, 14].

У роботі А.Ф. Осипова [9] представлена залежність зміни об'єму ВП – $\Delta V_{ОП}$, що подібна залежності (1):

$$\Delta V_{ВП} = 2\, r_0^2\; b\,(\varepsilon - 1)^2 \left(\frac{\pi}{z}\right)^3 . \tag{3}$$

Крім того, наведена залежність максимальної величини об'єму ВП у вигляді двох доданків виду:

$$\Delta V_{ВП\max} = \Delta V_{ВП\min} + \Delta V_{ВП} . \tag{4}$$

У роботі Є.М. Юдіна [8] вираз для визначення мінімального об'єму ВП для шестерень з однаковою кількістю зубів представлений у більш простому вигляді, ніж у А.Ф. Осипова [9]:

$$\Delta V_{ВП\min} = 2b\left\{\begin{array}{l} r_o^2 \cdot \left[\dfrac{\pi}{z}\cdot\left(tg^2\alpha + \dfrac{\pi^2}{3z^2} + 1\right) - \dfrac{tg^3\alpha}{3}\right] - R_e^2 \cdot \left(\dfrac{\phi}{2} + inv\alpha - inv\gamma_e\right) - \\ - R_i^2 \cdot \left[\dfrac{\pi}{z} - \dfrac{\phi}{2} - inv\alpha\right] \end{array}\right\} . \tag{5}$$

Однак, дослідження проведені в роботах [8, 9] не досягають рівня побудови фізичної або математичної моделі, що не дає можливості досліджувати явища, що відбуваються у ВП в процесі роботи НШ. Крім того, розгляду в згаданих роботах піддаються тільки зубчасті зачеплення з однаковою кількістю зубів.

Істотним кроком в цьому напрямку є робота Е.А. Рибкіна і А.А. Усова [5]. У цій роботі отримана математична модель зміни об'єму ВП від кута повороту ведучої шестерні, мінімальний і максимальний об'єм ВП та інші характерні точки цього процесу. Однак ряд прикрих помилок або описок не дає можливості використовувати ці залежності для дослідження поведінки ВП. Крім того, наведені залежності справедливі тільки для шестерень з однаковою кількістю зубів.

У роботі І.П. Аістова [15] теоретично досліджуються умови розвантаження ВП через спеціальні розвантажувальні канавки. Розглядаючи масу робочої рідини в розвантажувальній канавці як коливальну систему, власну частоту коливань якої автор пропонує визначати відповідно за виразом [15]:

$$f_{рж} = \frac{1}{2\,\pi}\sqrt{\frac{p \cdot F_к}{\rho_{рр} \cdot L_к \cdot \Delta V_{рр}}} , \tag{6}$$

де $\rho_{рр}$ – щільність робочої рідини;

$F_к$ – площа канавки;

$\Delta V_{рр}$ – величина «надлишкового» об'єму ВП, яка повинна бути витіснена з ВП через систему розвантажувальних каналів;

$L_к$ – довжина канавки;

p – тиск робочої рідини у ВП.

На рис. 1 наведені розрахункові значення власної частоти коливань маси робочої рідини в розвантажувальній канавці $f_{ржс}$ (графік 1) залежно від коефіцієнту перекриття зубчастого зачеплення ε. На графіку 2 (рис.1) показана частота перетікання робочої рідини, яка дорівнює частоті перезачеплення зубів шестерень насоса. З рис. 1 випливає, що зниження тиску спостерігається за умови $f_z < f_{РР}$, тобто при значенні коефіцієнту перекриття зубчастого зачеплення шестерень насоса ε більше ніж 1,027. У насосів, в яких при складанні коефіцієнт перекриття зубчастого зачеплення $\varepsilon < 1{,}027$ – робота розвантажувальних канавок стає неефективною і необхідне зниження тиску робочої рідини в міжзубовій западині не відбувається [15].

На рис. 2 приведено графік залежності тиску робочої рідини у ВП НШ залежно від коефіцієнта перекриття зубчастого зачеплення. За графіком видно, що тиск в міжзубовому просторі досягає Δp=2,7 МПа, що становить 45% від тиску в порожнині нагнітання $p_н$=6 МПа, що розвиває НШ. У цьому, випадку, як показують силові розрахунки, відбувається зростання радіального навантаження на підшипники насоса на 18% більше від номінального розрахункового радіального навантаження [15].

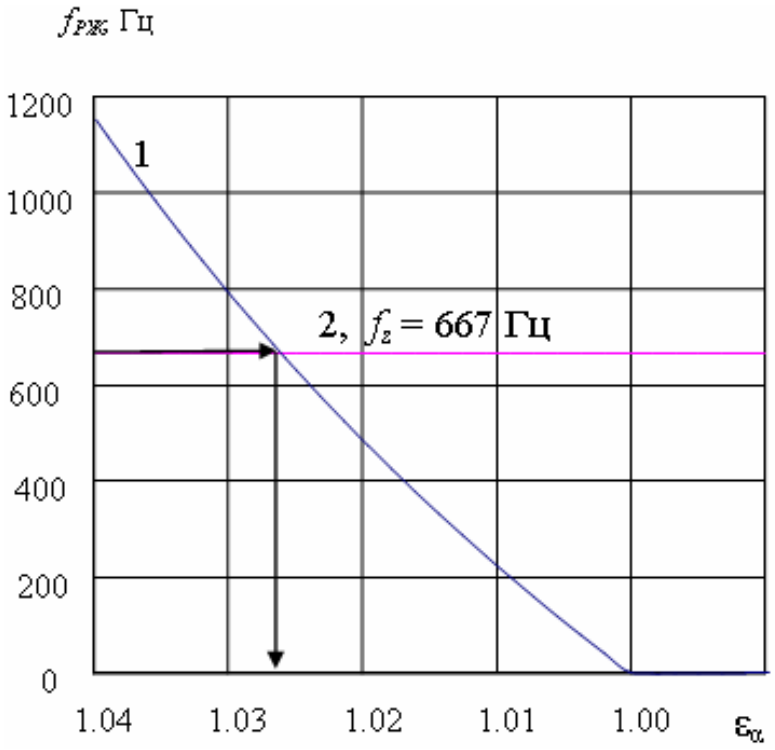


Рисунок 1 – Графіки залежності власної частоти коливання робочої рідини у розвантажувальній канавці від коефіцієнта перекриття зубчастого зачеплення [15]

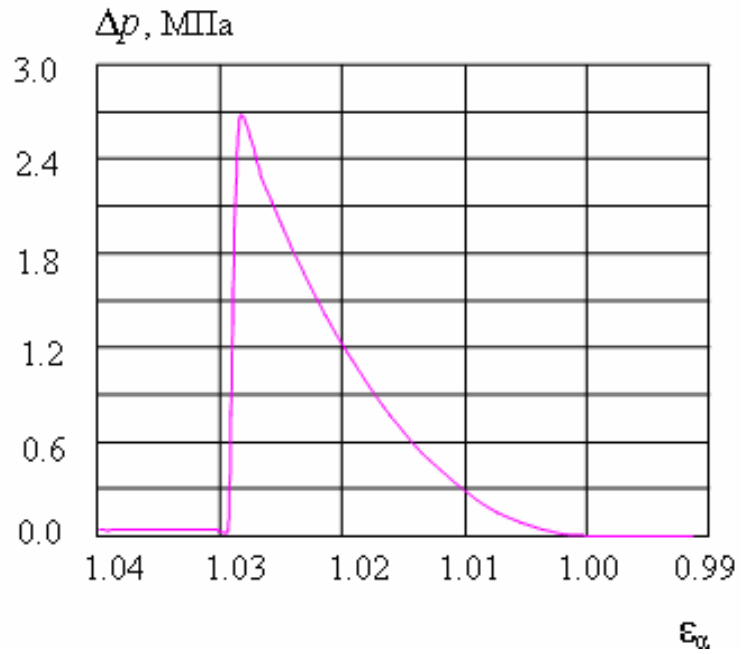


Рисунок 2 – Графіки залежності тиску робочої рідини у ВП НШ в залежності від коефіцієнт перекриття зубчастого зачеплення [15]

У статті [1] пропонується математична модель, що дозволяє визначити тиск у ВП НШ:

$$\begin{cases} Q_{ВП} = Q_{сж} + Q_H + Q_B; \;\; Q_{сж} = \dfrac{dV_П}{dt}; \;\; Q_H = \pm\mu_H \, F_H \sqrt{\dfrac{2\left|\Delta p_H\right|}{\rho}} \\ Q_B = \pm\mu_B \, F_B \sqrt{\dfrac{2\left|\Delta p_B\right|}{\rho}}; \;\; \dfrac{1}{K} = -\dfrac{1}{V_П}\dfrac{dV_П}{dt} \end{cases}, \qquad (7)$$

де $Q_{ВП}$ – геометричні втрати у ВП НШ м^3/с;

p – тиск у відсіченій порожнині, Па;

Q_H – втрати в область нагнітання, м^3/с;

Q_B – втрати в область всмоктування, м^3/с;

$V_П$ – приведений об'єм ВП, м^3;

μ_H *і* μ_B – коефіцієнти втрати площ контакту ВП з областями нагнітання і всмоктування відповідно;

F_H *і* $F_в$ – площа контакту ВП з порожнинами нагнітання і всмоктування відповідно;

Δp_H *і* Δp_B – різниця між тиском у ВП і тиском нагнітання і всмоктування відповідно, Па;

ρ – густина робочої рідини, кг/м^3;

K – об'ємний модуль пружності робочої рідини, Па.

Наведену математичну модель слід визнати напівемпіричною, оскільки коефіцієнти втрати площ контакту ВП з областями нагнітання і всмоктування - повинні визначатися експериментально для кожного з досліджуваних насосів. Модель не дозволяє визначити поведінку ВП залежно від кута повороту шестерень НШ. Все це

істотно знижує цінність пропонованої моделі [1].

У процесі дослідження проблеми ВП авторами [16 - 19] була вперше поставлена задача розробки математичної моделі поведінки площі (об'єму) ВП залежно від положення точки зачеплення на лінії зачеплення [16 - 19]. Для зубчастого зачеплення з асиметричною лінією зачеплення ($z_1 \neq z_2$) маємо:

$$\begin{aligned} S(x)_{z_1<z_2} &= \left(\frac{\pi}{z_1}+\frac{\pi}{z_2}\right)\cdot x^2 + \left[\frac{2\cdot\pi^2\cdot r_{02}}{z_2^2} - \frac{2\cdot\pi}{z_2}\cdot(r_{01}+r_{02})\cdot tg\alpha + \frac{2\cdot\pi^2\cdot r_{01}}{z_1^2}\right]\cdot x + \\ &+ \frac{\pi}{z_2}\left[(r_{01}+r_{02})^2\cdot tg^2\alpha - \frac{2\cdot\pi\cdot r_{02}}{z_2}\cdot(r_{01}+r_{02})\cdot tg\alpha + \frac{4\cdot\pi^2\cdot r_{02}^2}{3z_2^2} + r_{02}^2 - R_{i2}^2\right] + \\ &+ \frac{\pi}{z_1}\left(\frac{4\cdot\pi^2\cdot r_{o1}^2}{3z_1^2} + r_{01}^2 - R_{i1}^2\right) - r_{01}^2\cdot\frac{tg^3\gamma_{e1}}{3} - R_{e1}^2\cdot\left(\frac{\phi_1}{2} + inv\alpha_1 - inv\gamma_{e1}\right) + \\ &+ R_{i1}^2\cdot\left(\frac{\phi_1}{2}+inv\alpha_1\right) - r_{02}^2\cdot\frac{tg^3\gamma_{e2}}{3} - R_{e2}^2\cdot\left(\frac{\phi_2}{2}+inv\alpha_2 - inv\gamma_{e2}\right) + R_{i2}^2\cdot\left(\frac{\phi_2}{2}+inv\alpha_2\right) \end{aligned}, \quad (8)$$

де $z_1; z_2$ – число зубців, відповідно ведучої і веденої шестерні, мм;

$r_{01}; r_{02}$ – радіус основної окружності, відповідно ведучої і веденої шестерні, мм;

$R_{i1}; R_{i2}$ – радіус окружності западин зубців, відповідно ведучої і веденої шестерні, мм;

$\gamma_{e1}; \gamma_{e2}$ – кут верхівки евольвенті, відповідно ведучої і веденої шестерні, град;

α – кут зачеплення, град;

ϕ – кут дуги зуба по начальному колу, град;

x – відстань точки зубчастого зачеплення від полюсу, мм.

Аналіз залежності площі ВП від положення точки зачеплення на лінії зачеплення – x (8) показав, що вона являє собою квадратний тричлен.

Для шестерень із симетричною лінією зачеплення, тобто за умови, коли $z_1 = z_2$ залежність площі ВП від x теж має вигляд квадратного тричлена [16-19]:

$$\begin{aligned} S(x)_{z_1=z_2} &= \frac{2\pi}{z}x^2 + \frac{4\pi r_0}{z}\left(\frac{\pi}{z} - tg\alpha\right)\cdot x + \frac{\pi r_0^2}{z}\left(4tg^2\alpha - \frac{4\pi}{z}tg\alpha + \frac{4\pi^2}{3z^2} - 2R_i^2 + 1\right) - \\ &- 2\left[r_o^2\frac{tg^3(\gamma_e)}{3} - R_e^2\left(\frac{\phi}{2} + inv\alpha + inv\gamma_e\right) + R_i^2\left(\frac{\phi}{2}+inv\alpha\right)\right] \end{aligned}. \quad (9)$$

Аналіз отриманих залежностей (8) і (9) показав, що їх графіки являють собою параболу спрямовану вершиною донизу, оскільки коефіцієнт при x^2 завжди позитивна величина. З цього випливає, що залежності (8) і (9) мають мінімум.

Надалі були отримані значення аргументу – x, при яких залежності (8) і (9) мають абсолютний мінімум:

- для шестерні з різною кількістю зубів, тобто за умови $z_1 \neq z_2$:

$$x_{\min z_1<z_2} = \frac{z_1}{z_1+z_2}\left[(r_{01}+r_{02})\cdot tg\alpha - \frac{\pi\cdot r_{02}}{z_2} - \frac{\pi\cdot r_{o1}\cdot z_2}{z_1^2}\right]; \quad (10)$$

- для шестерні з однаковою кількістю зубів:

$$x_{\min z_1=z_2} = r_0 \cdot \left(tg\alpha - \frac{\pi}{z} \right). \quad (11)$$

Підставивши значення $x_{\min}$ з (10) та (11) у вирази (8) і (9) отримаємо мінімальне значення площі (об'єму) ВП для довільного випадку зубчастого зачеплення шестерень НШ.

В результаті досліджень розробленої математичної моделі ВП [16-19] були визначені координати точки зачеплення – x_0 на лінії зачеплення в момент утворення ВП:

$$x_{0z_1<z_2} = (r_{01} + r_{02}) \cdot tg\alpha - r_{02} \cdot tg\gamma_{e2}. \quad (12)$$

Для випадку, коли $z_1 = z_2$ координати точки на лінії зачеплення матиме вигляд:

$$x_{0z_1=z_2} = r_0 \cdot (2 \cdot tg\alpha - tg\gamma_e). \quad (13)$$

Далі були визначені координати точки зачеплення першої пари зубів $x_к$ в момент припинення існування ВП [16-19]:

- для випадку, коли ($z_1 \neq z_2$):

$$x_{кz_1<z_2} = ME - t_0 = r_{01} \cdot tg\gamma_{e1} - \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{01}}{z_1} = r_{01} \cdot \left(tg\gamma_{e1} - \frac{2 \cdot \pi}{z_1} \right). \quad (14)$$

- для випадку, коли $z_1 = z_2$:

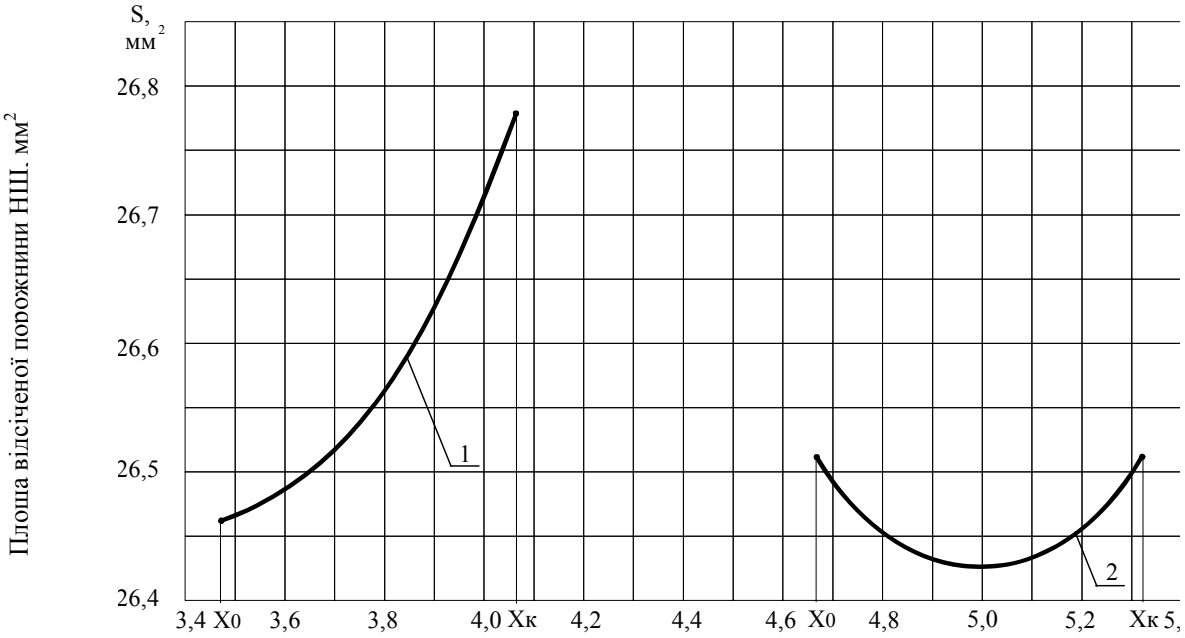
$$x_{кz_1=z_2} = r_0 \cdot \left(tg\gamma_e - \frac{2 \cdot \pi}{z} \right). \quad (15)$$

На рис. 3 представлені графічні залежності площі ВП (8) і (9) від координати точки зачеплення зубів шестерень *x* на лінії зачеплення. Дані графіки будувалися для насоса типу НШ – 32УК. Параметри зачеплення шестерень для згаданого насоса за умови рівності зубів шестерень при $z_1 = z_2 = 8$, становлять: $r_o = 18{,}794 мм$; $r = 22{,}5 мм$; $R_i = 16{,}86 мм$; $\gamma_e = 46{,}89^\circ$; $R_e = 27{,}5 мм$; $\phi = 0{,}384\ рад$; $\alpha = 33{,}35^\circ$.

Далі, визначали положення точок утворення ВП в точці x_0 і зникнення ВП в точці $x_к$ відповідно до залежностей (13) і (15). В результаті розрахунків були отримані наступні значення $x_0 = 4{,}666$ мм і $x_к = 5{,}315$ мм.

Потім, визначали положення точки, в якій функція площі ВП (11) приймає мінімальне значення $x_{\min z_1=z_2} = 4{,}991$ мм.

Підставивши значення $x_0 = 4{,}666$ мм і $x_к = 5{,}315$ мм у вираз (9), отримаємо наступні результати: $S_{z_1=z_2}(x_0) = S_{z_1=z_2}(x_к) = 26{,}515$ мм^2 і $S_{z_1=z_2}(x_{\min z_1=z_2}) = 26{,}432$ мм^2. Отримані результати графічно представлені на рис. 3 (крива 1). Графік побудований для випадку, коли $z_1 < z_2$ при $z_1 = 7$ $z_2 = 9$; $r_{o1} = 16{,}445$ мм; $r_{o2} = 21{,}143$ мм; $r_1 = 20$ мм; $r_2 = 25$ мм; $R_{i1} = 14{,}46$ мм; $R_{i2} = 19{,}29$ мм; $\gamma_{e1} = 48{,}869^\circ$; $\gamma_{e2} = 45{,}189^\circ$; $R_{e1} = 25{,}0$ мм; $R_{e2} = 30{,}0$ мм; $\varphi_1 = 0{,}439$ рад; $\varphi_2 = 0{,}341$ рад; $\alpha_1 = 34{,}691^\circ$.



Координати точки зачеплення на лінії зачеплення – x

крива 1 – $z_1 = 7$, $z_2 = 9$; крива 2 – $z_1 = z_2 = 8$

Рисунок 3 – Графічне відображення зміни площі ВП від положення точки зачеплення першої парі зубів на лінії зачеплення *x*

В результаті розрахунків були отримані координати точок утворення ВП $x_0 = 3{,}459$ мм і зникнення $x_к = 4{,}069$ мм, а також координату точки мінімального значення площі ВП $x_{\min z_1<z_2} = 3{,}459$ мм, яка збігається з координатами точки $x_0 = 3{,}459$ мм моменту утворення ВП. Це є підтвердженням гіпотези, що полягає у тому, що в зубчастому зачепленні з асиметричною лінією зачеплення, тобто при умові, коли $z_1 < z_2$ – момент утворення ВП відповідає його мінімальному значенню, що в принципі виключає компресію робочої рідини у ВП НШ.

Підставивши значення $x_0 = 3{,}459$ мм, $x_к = 4{,}069$ мм і $x_{\min z_1<z_2} = 3{,}459$ мм у вираз (8), отримаємо наступні результати: $S_{z_1<z_2}(x_0) = S_{z_1<z_2}(x_{\min z_1<z_2}) = 26{,}464$ мм^2 та $S_{z_1<z_2}(x_к) = 26{,}776$ мм^2. Отримані результати представлені у вигляді графіків на рис. 3, крива 1.

Аналіз графіків, представлених на рис. 3 показав, що за умови, коли $z_1 = z_2$ (рис. 3 крива 2) ВП утворюється в точці $x_0 = 4{,}666$ мм і в цей момент набуває максимального значення $S_{z_1=z_2}(x_0) = S_{z_1=z_2}(x_к) = 26{,}515$ мм^2. Далі, по мірі зміни аргументу *x* від точки утворення ВП $x_0 = 4{,}666$ мм, до точки зникнення ВП $x_к = 5{,}315$ мм, площа (об'єм) ВП зменшується від значення $S_{z_1=z_2}(x_0) = S_{z_1=z_2}(x_к) = 26{,}515$ мм^2 до $S_{z_1=z_2}(x_{\min z_1=z_2}) = 26{,}432$ мм^2. Різницю між максимальним і мінімальним значенням об'єму ВП можна знайти за формулою

$$\Delta V = b \cdot \left(S_{\max} - S_{\min}\right) = b \cdot \left[S(x_0) - S(x_{\min})\right]. \quad (16)$$

Відзначимо, що саме цей період найбільш негативно впливає на працездатність НШ оскільки в процесі зменшення замкнутого об'єму ВП відбувається компресія робочої рідини, що викликає різке підвищення тиску робочої рідини у ВП.

Підвищення тиску у ВП можна визначити відповідно до залежності [4]:

$$\Delta p = \frac{\Delta V}{V_{ВП}} \cdot E = \frac{b \cdot (S_{\max} - S_{\min})}{b \cdot S_{\max}} \cdot E = \left(1 - \frac{S_{\min}}{S_{\max}}\right) \cdot E, \quad (17)$$

де ΔV – зміна об'єму ВП в процесі повороту шестерень, мм^3;

$V_{ВП}$ – вихідна величина об'єму ВП в точці x_0, мм^3;

Зробивши відповідні підстановки у вираз (17), отримаємо:

$$\Delta p = \left(1 - \frac{26{,}432}{26{,}515}\right) \cdot 1{,}35 \cdot 10^9 = 4{,}226 \text{ МПа}.$$

Для порівняння, номінальний тиск НШ 32-3 УК становить 16 МПа, тобто тиск у ВП підвищується на 26%.

Зовсім по-іншому поводить себе об'єм ВП при використанні в НШ зубчастого зачеплення з асиметричною лінією зачеплення. У нашому випадку це варіант при $z_1 = 7$, $z_2 = 9$. Як видно з рис. 3 (крива 1) момент утворення ВП в цьому випадку збігається з мінімальним значенням об'єму ВП, що виключає компресію робочої рідини в процесі подальшої зміни об'єму ВП при обертанні шестерень НШ. А це виключає всі ті негативні явища, які виникають в НШ при наявності компресії робочої рідини у в ВП.

Висновки. 1. Аналіз представлених результатів теоретичних досліджень показав, що до сих пір немає загальноприйнятого чіткого розуміння всіх фізичних процесів, що протікають у ВП при роботі НШ, що пояснює відсутність розробленої фізичної моделі. Це стримує подальший розвиток теорії зазначених процесів, що відбуваються у ВП.

2. Виявлені математичні моделі описують поведінку об'єму ВП від положення точки зачеплення на лінії зачеплення. Але, для практичних цілей більш прийнятною є математична модель зміни об'єму ВП від кута повороту або від часу обертання ведучої шестерні.

3. Встановлено, що одним з можливих шляхів зниження впливу компресії робочої рідини у ВП НШ є не розвантаження ВП спеціально виконаними канавками, а принципове усунення компресії робочої рідини у ВП насоса шляхом, наприклад, використанням зубчастого зачеплення з асиметричною лінією зачеплення. Однак, відомі теоретичні дослідження дозволяють вирішити задачу усунення компресії робочої рідини у ВП лише для окремого випадку, коли $z_1 < z_2$. Отже, з вищевикладеного бачимо, що існуючі математичні моделі поведінки об'єму ВП підтверджують принципову можливість усунення компресії робочої рідини у ВП.

4. В представлених результатах теоретичних досліджень не сформульовані умови, при яких можливо усунути компресію робочої рідини у ВП. Отже, запропонована математична модель вирішує завдання усунення компресію робочої

рідини у ВП лише для окремого випадку, коли $z_1 < z_2$.

5. Відомі фізичні і математичні моделі не можуть до кінця пояснити механізм складних геометричних і гідромеханічних процесів, що відбуваються в ВП НШ. Це не дозволяє розробити математичну модель усунення компресії робочої рідини у НШ для загального випадку. З чого випливає нагальна необхідність у подальших поглиблених теоретичних і експериментальних досліджень процесів, що відбуваються у ВП НШ.

6. Результати аналізу представлених результатів теоретичних досліджень поведінки об'єму ВП в процесі роботи НШ дозволять сформулювати завдання подальшого розвитку теоретичних аспектів з цього питання. Тобто, сформульована актуальна науково-технічна проблема по розробці і дослідженню фізичної і математичної моделі геометричних і гідромеханічних процесів у ВП шестеренного насоса.

Перш ніж приступити до формулювання робочої гіпотези наведемо функцію бажаності. Аналіз науково – технічних джерел, власний досвід розробки нових конструкцій НШ і їх експериментальних досліджень дозволив отримати досить якісну науково-технічну інформацію, яка дозволила сформулювати основні положення функції бажаності.

Розроблені нові фізичні і математичні моделі геометричних і гідромеханічних процесів у ВП НШ дозволять встановити і пояснити причинно-наслідкові зв'язки між геометричними параметрами зубчастого зачеплення НШ і параметрами, що описують обертальний рух шестерень і зміною тиску робочої рідини в ВП НШ.

Розуміння і пояснення фізичних і геометричних принципів в роботі НШ, що приводять до компресії робочої рідини у ВП дозволить усвідомлено підійти до реалізації отриманих знань при розробці нових фізичних і математичних моделей процесів, що відбуваються ц ВП НШ.

Реалізація нових знань на практиці полягає в розробці нових методів розрахунку геометричних параметрів зубчастого зачеплення НШ, використання яких при проектуванні зубчастого зачеплення дозволять виключити компресію робочої рідини у ВП, підвищити технічний рівень НШ за основними параметрами.

В якості робочої гіпотези висувається припущення про те, що розробка і дослідження фізичної і математичної моделі геометричних і гідромеханічних процесів, що відбуваються у ВП НШ дозволить виявити умови, при яких буде усунута компресія робочої рідини у ВП, що стане передумовою для подальшого підвищення технічного рівня НШ.

Використання результатів, отриманих при дослідженні фізичної і математичної моделі процесів, що відбуваються у ВП НШ, дасть можливість розробити методику розрахунку і проектування зубчастого зачеплення з параметрами, які дозволять виключити компресію робочої рідини у ВП НШ.

Результати попередніх пошукових досліджень експериментального зразка НШ, в якому виключена компресія робочої рідини у ВП НШ дають підстави припустити, що пропонований метод усунення компресії робочої рідини у ВП реально дозволяє досягти зазначеного нижче технічного ефекту.

Прогнозовані технічні характеристики експериментального НШ, в якому усунуто компресію робочої рідини у ВП, не поступаються характеристикам серійного НШ [11], а за деякими параметрами перевершують серійний:

- по здатності забезпечити тиск експериментальний насос перевершує насоси третього виконання не менше ніж на 2,0 МПа [11];

- номінальна частота обертання $n = 40\ c^{-1}$;

- об'ємний ККД НШ, в якому використовується зубчасте зачеплення з

оптимальними геометричними параметрами не менше $\eta_v = 0{,}94...0{,}96$, а загальний ККД не менший $\eta_{заг} = 0{,}85$.

Список літератури

1. Математическая модель динамики работы запертого объема шестеренного насоса с учетом движения подпятника [Текст] / Г.О. Белов, А.Н. Крючков, Л.В. Родионов, Е.В. Шахматов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – №4, т. 12, – С. 151-156.
2. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы [Текст] / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1970. – 593 с.
3. Козерод, Ю.В. Исследование влияния геометрических параметров зацепления на качественные показатели шестеренного насоса [Текст] : дис. … канд. техн. наук / Козерод Ю.В. – М. Московский институт инженеров железнодорожного транспорта, 1977. – 150 с.
4. Башта, Т.М. Расчеты и конструкция самолетных гидравлических устройств [Текст] / Т.М. Башта. – [3-е изд. перераб. и доп.] . – М.: Гос. научно-технич. издат. Оборонгиз, 1961. – 475 с.
5. Рыбкин, Е.А. Шестеренные насосы для металлорежущих станков [Текст] / Е.А. Рыбкин, А.А. Усов. – Г.: Машгиз, 1960. – 189 с.
6. Лурье, З.Я. Математическая модель качающего узла шестеренного насоса, как объекта многокритериальной оптимизации [Текст] / З.Я. Лурье, И.В. Коваленко // Вибрации в технике и технологиях. – 2003. – № 3 (29). – С.9-13.
7. Башта, Т.М. Машиностроительная гидравлика: [справочное пособие] [Текст] / Т.М. Башта. – М.: Машиностроение, 1977. – 672 с.
8. Юдин, Е.М. Шестеренные насосы. Основные параметры и их расчет [Текст] / Е.М. Юдин. – [2-е изд. перераб. и доп.]. – М.: Машиностроение, 1964. – 236 с.
9. Осипов, А.Ф. Объемные гидравлические машины коловратного типа [Текст] / А.Ф. Осипов // Теория, конструкция, проектирование. – М.: Машиностроение, 1971. – 207 с.
10. Осипов, А.Ф. Исследование вопросов устойчивой работы шестереных насосов и моторов на высоких давлениях рабочей жид кости [Текст] : дис. канд. техн. наук / А.Ф.Осипов. – М., МАИ, 1953. – 95 с.
11. Желтобрюх, В.Н. Повышение надежности шестеренчатых насосов с подшипниками скольжения [Текст] / В.Н. Желтобрюх, В.А. Петренко, В.М. Карленко // Технология и организация производства. – 1969. – №6. – С. 7-9.
12. Осипов, А.Ф. Объемные гидравлические машины [Текст] / А.Ф. Осипов. – М.: Машиностроение, 1966. – 159 с.
13. Прокофьев, В.Н. Основы функциональной взаимозаменяемости гидропередач / В.Н. Прокофьев // Сборник «Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении». – М.: Машиностроение, 1964. – № 4. – С. 217-250.
14. Патент на корисну модель № 73824 (Україна) 7 F04C2/08. Шестеренна гідромашина зовнішнього зачеплення з регульованою подачею / Ю.В. Кулєшков, М.І. Черновол, Т.В. Руденко, О.О. Матвієнко, Г.В. Москалєнко, О.В. Бевз, А.А. Волк. – опубл. 15.09.2005 р., Бюл. № 9.
15. Аистов, И. П. Разработка методов повышения ресурса шестеренных насосов гидротопливных систем [Текст] : автореферат дис. … доктора техн. наук / И. П. Аистов. – Братск, 2009. – 36 с.
16. Бевз, О.В. Підвищення технічних характеристик шестеренних насосів типу НШ шляхом усунення компресії робочої рідини в затиснутому об’ємі [Текст] : дис. канд. техн. наук / О.В. Бевз. – Суми, 2004. – 230 с.
17. Кулешков, Ю.В. Шестеренные насосы с асимметричной линией зацепления шестерен [Текст] / Ю.В. Кулешков, М.И. Черновол, О.В. Без, Ю.А. Титов // Теория, конструкция и расчет. – Кировоград: «КОД», 2009. – 243 с.
18. Кулєшков, Ю.В. Теоретичне обґрунтування усунення компресії робочої рідини в затиснутому об’ємі шестеренного насоса з асиметричною лінією зачеплення [Текст] / Ю.В. Кулєшков, О.В. Бевз, О.О. Матвієнко, Г.В. Москалєнко// Вибрации втехнике и технологіях. – 2003. – № 4. – С. 97 - 102.
19. Черновол, М.І. Основні напрямки підвищення технічного рівня шестеренних насосів сільськогосподарської техніки. [Текст] / М.І. Черновол, Ю.В. Кулєшков // Вісник аграрної науки. – 2016. – №8. – С.38– 42.
20. Edge, K.A. The reduction of gear pump pressure ripple [Text] / K.A. Edge, B.R. Lipscombe // Proc. IMechE. – 1987. – Vol. 201. No B2.

21. Casoli, P. A numerical model for the simulation of external gear pumps [Text] / P. Casoli, A. Vacca, G. Franzioni // The six JFPS international symposium on fluid power. – 2005. – Tsukuba, Japan.
22. Yang, M. Condition monitoring and fault diagnosis for vane pumps using flow ripple measurement. Fluid Power and Motion Control [Text] / M. Yang, K.A. Edge, Johnston D.N. – 2008.
23. Исследование характеристик пульсаций нагнетаемого давления в шестеренных насосах / ТПП. – № 18341/3. – М., 1987. – 24 с. - Пер. с японск. ст. Ямагути Кэндзи из. журн.: Нихон кикай гаккай ромбу нею. – 1984. – Т. 50. – С. 2968-2976.
24. E. Kajima, E. Characteristics of Fluidborne Noise Generated by Fluid Power Pump [Text] / E. Kajima, M. Shinada. // Bulierin of JSME. – October 1984. – Vol. 27, № 232. – p. 2188-2195.
25. Acoustical control of external gear pumps by intensity measuring techniques. [Text] / E. Carliffi, I. Veechi. // Noise Contr. Eng. J. – 1990. – 35, № 2. – pp. 53-59.
26. The noise control of external gear pumps. [Text] / R. Thorns, R. Bomhaev.- Beins, B. Schmidt. // Pr. Nauk. Inst. Konstr. i Eksploat. Macz. Pwof. Ser. Wspofepr. – 1991. – № 4. – С 179-188.

Yuriy Kuleshkov, Prof., DSc., E. Magonets, post-graduate, Ksenia Kuleshkova, eng., Mikhail Krasota, Assoc. Prof., Phd tech. sci., Timofey Rudenko, Assoc. Prof., Phd tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis of theoretical studies of geometric parameters of the cut-off housing the of gear pump

The objective of research is to analyze scientific and technical information on the results of theoretical studies of the geometric parameters of the cut-off housing of the gear pump and to determine future direction of research of the processes that take place in the cut-off housing and to formulate the scientific hypothesis of the research.

The article presents the results of the analysis of theoretical studies of geometric parameters of the cut-off housing of the gear pump. The theoretical dependences of the volume of the housing on the parameters of toothing were established as well as the position of the point of engagement on the line of contact of a gear pump. The theoretical dependences allow determining geometrical parameters of the cut-off housing which eliminate the phenomenon of the working fluid compression. The avoidance of compression is achieved through the use of toothing with asymmetrical engagement line. The work indicates the shortcomings of existing theoretical research and presents the directions of further development.

It was established that one of the possible ways to reduce the impact of the compression of the working fluid in the cut-ff housing is to use toothing with asymmetric line engagement.

gear pump, toothing, engagement line, engagement point, working fluid, cut-off housing, compression, toothing overlap coefficient

Одержано 26.01.17

УДК 628.16.081.3

В.В. Клименко, проф., д-р техн. наук, Н.В. Ковальчук, викл., В.І. Кравченко, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
E-mail: klymvas@ukr.net

Експериментальна оцінка ефективності регенерації картриджів побутових фільтрів доочистки питної води

Наразі для додаткової очистки питної води розповсюджене застосування побутових фільтрів зі змінними картриджами. Картриджі мають обмежений термін експлуатації, що викликає потребу в їх відносно частій заміні, певною альтернативою якій може бути відновлення очищувальної спроможності шляхом регенерації.

В статті описано методику та результати експериментальної оцінки ефективності доочистки питної води побутовими фільтрами з регенерованими картриджами. Технологічний ланцюг регенерації складається з послідовної обробки фільтрувальних матеріалів розчином лугу, розчином NaCl та промивки відстояною водою (без розборки картриджів). Наведено результати аналізу домішок у водопровідній воді, обробленій регенерованими картриджами побутових фільтрів та виконано їх порівняння з величиною наявних аналогічних домішок у воді, доочищеній новими картриджами.

Отримані результати свідчать про можливість застосування даного методу регенерації для відновлення роботи картриджів побутових фільтрів доочистки питної води.

питна вода, доочистка води, розчин лугу, розчин NaCl, побутові фільтри, картридж, регенерація

В.В. Клименко, проф., д-р техн. наук, Н.В. Ковальчук, викл., В.И.Кравченко, доц., канд. техн. наук
Центральноукраинський национальний технический университет, г.Кропивницкий, Украина

Експериментальная оценка степени эффективности регенерации картриджей бытовых фильтров доочистки питьевой воды

На сегодняшний день для дополнительной очистки питьевой воды широко применяются бытовые фильтры со сменными картриджами. Картриджи имеют ограниченный срок эксплуатации, что вызывает потребность их относительно частой замены, определенной альтернативой которой может быть восстановление очистительной способности путем регенерации.

В статье описана методика и результаты экспериментальной оценки эффективности доочистки питьевой воды бытовыми фильтрами с регенерированными картриджами. Технологическая цепь регенерации состоит из последовательной обработки фильтровальных материалов раствором щелочи, раствором NaCl и промывки отстоянной водой (без разборки картриджей). Приведены результаты анализа примесей в водопроводной воде, обработанной регенерируемыми картриджами бытовых фильтров и выполнено их сравнение с количеством имеющихся аналогичных примесей в воде, доочищенной новыми картриджами.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения данного метода регенерации для восстановления работы картриджей бытовых фильтров доочистки питьевой воды.

питьевая вода, доочистка воды, раствор щелочи, раствор NaCl, бытовые фильтры, картридж, регенерация

Постановка проблеми. Наразі для додаткової очистки питної води масово застосовуються побутові фільтри. Вони мають обмежений термін експлуатації і потребують відносно частої заміни, певною альтернативою якій може бути відновлення очищувальної спроможності фільтрів.

© В.В. Клименко, Н.В. Ковальчук, В.І. Кравченко, 2017

Більшість фільтруючих елементів таких фільтрів містять активоване вугілля, яке може займати весь об'єм фільтра, або бути однією із складових фільтруючого завантаження. Таке поширене застосування активованого вугілля пояснюється його відносно низькою ціною та високою адсорбційною здатністю до видалення домішок з води [1]. Окрім того, цей сорбент безпечний для людського здоров'я; легко кришиться на дрібні фракції, має велику адсорбційну площу; добре очищує воду від різних сполук органічного походження, тривалентного заліза, глинистих суспензій, водоростей, активного хлору, вірусів і бактерій; усуває неприємний запах і присмак [2].

Але після певного часу експлуатації фільтр з водоочисного приладу може перетворитись на джерело забруднень внаслідок акумулювання у процесі роботи шкідливих домішок та мікроорганізмів. Це обмежує термін безпечної експлуатації фільтра і вимагає або установки нового картриджа, або регенерації фільтруючого елемента, що може бути економічно більш вигідним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ґрунтовно якість роботи побутових водоочищувачів різних виробників та конструкцій, в тому числі ємнісних фільтрів, досліджували науковці Київського інституту гігієни та медичної екології ім. О.М. Марзєєва НАМН України [3]. Відмічається, що поряд з простотою, доступністю та ефективністю доочищення води такими фільтрами їх змінні картриджі мають досить короткий термін експлуатації, але питання регенерації картриджів не розглядалося.

В роботах [2, 4] приведені результати лабораторних досліджень, які підтверджують ефективність очистки водопровідної води при застосуванні фільтрів з активованим вугіллям.

Питання регенерації картриджів з фільтрувальним матеріалом в згаданих вище публікаціях не розглядалося

Для регенерації фільтрів з активованим вугіллям найбільш розповсюджені термічні методи, що відрізняються застосуванням різноманітних окислювачів для попередньої обробки та різними джерелами підвищення температури [5-7]. Але рекомендовані значення підтримання досить високих температур в процесі регенерації знаходяться за межами значень, допустимих при експлуатації побутових фільтрів, основними конструкційними матеріалами яких є пластмаси. Тому для регенерації фільтруючі матеріали попередньо потрібно буде виймати з картриджів, а це призведе до руйнування картриджів, оскільки в переважній більшості вони виконані у вигляді нерозбірних конструкцій.

Регенерація відпрацьованого активованого вугілля за допомогою хімічних реагентів є досить дороговартісною [8].

Перспективною, на нашу думку, є технологія регенерації фільтрів з активованим вугіллям, за якою обробка недорогими хімічними реагентів поєднується з термічною обробкою при невисокій температурі в межах до 80 °С [9].

Постановка завдання дослідження є експериментальна перевірка технології відновлення функцій побутових фільтрів доочистки питної води та визначення якості води після доочищення у регенерованих фільтрах.

Об'єктом дослідження є технологія регенерації картриджів побутових фільтрів доочистки питної води.

Предмет дослідження - картриджі побутових ємнісних фільтрів.

Виклад основного матеріалу. Попередній аналіз показує, що активоване вугілля є суттєвою, а в деяких випадках і єдиною, складовою фільтруючих матеріалів картриджів побутових фільтрів.

Тому при розробці технологічних і конструктивних рішень регенерації картриджів побутових фільтрів за основу нами було взято технологію, яку

запропонували і втілили на практиці для регенерації вугільних фільтрів підготовки води при виробництві напоїв в Інституті колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України [10].

В нашому дослідженні використовувались картриджі “БАРЬЕР Железо ”, ”БАРЬЕР Жесткость ” виробництва ЗАТ “МЕТТЭМ-Технологии”, Росія; та ” Аквафор В100-5 , посилений бактеріцидною добавкою ” виробництва ТОВ “ АКВАФОР-ВЕСТ ”, м. Київ , які перебували в експлуатації протягом місяця у щоденному використанні в побутових умовах (рис.1). Під час експлуатації через кожний досліджуваний фільтр пропускалась вода з міського водопроводу м. Кропивницького загальним об’ємом 300-350 літрів.

а

б

в

а - ” БАРЬЕР Жесткость ” виробництва ЗАТ “МЕТТЭМ-Технологии”, Росія;
б - “ БАРЬЕР Железо ” виробництва ЗАТ “МЕТТЭМ-Технологии”, Росія;
в - ”Аквафор В100-5 , посилений бактеріцидною добавкою” виробництва ТОВ “ АКВАФОР-ВЕСТ ”, м. Київ

Рисунок 1 – Загальний вигляд картриджів

Для перевірки складу фільтрувального матеріалу було розрізано три картриджа, які є ідентичними досліджуваним зразкам. Було виявлено, що в усіх трьох зразках фільтрувальне завантаження картриджів більш як на 50% складається з активованого вугілля (рис.2).

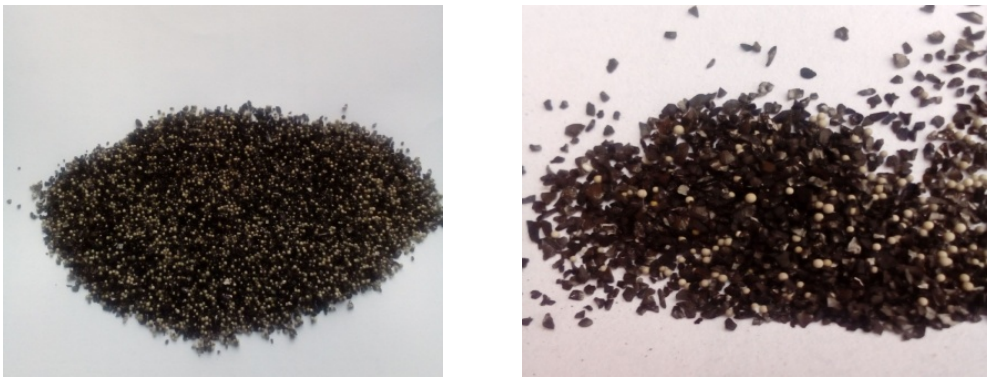


Рисунок 2 – Загальний вигляд фільтруючого матеріалу картриджів

Обробка і промивка фільтруючого матеріалу проводились без механічного втручання в конструкцію самого картриджа для запобігання порушення його цілісності. Крім того, при приготуванні та використанні регенеруючих розчинів була врахована максимально допустима температура експлуатації картриджів даних фільтрів.

Досліди з регенерації картриджів проводились наступним чином. Картридж розміщували в скляній ємності з 3% водним розчином кальцинованої соди (гідроксид натрію) і витримували три години. Весь час температура розчину 40°С підтримувалась за рахунок водяної бані з терморегулятором. Після цього годину витримували в 0,5% аналогічному розчині. Далі промивка відстояною водою відбувалась протягом однієї години. Витримка у відстояній воді через кожні п’ять хвилин супроводжувалась струшуванням. Наступним етапом була витримка протягом двох годин у 2% водному розчині NaCl. також при температурі розчину 40°С. Промивка картриджу чистою водою здійснювалася аналогічна першому етапу.

Проби для аналізів відбиралися після нового, відпрацьованого та регенерованого картриджа. Аналіз проб проводився в лабораторії обласного управління ОКВП ” Дніпро-Кіровоград ”. Результати аналізів представлені в таблицях 1-3.

Таблиця 1 – Показники питної води до і після обробки картриджем ” Аквафор В100-5 ” виробництва ТОВ “ АКВАФОР-ВЕСТ ”, м. Київ

Показники якості	Питна вода з водопроводу	Вода після картриджа		
		нового	відпрацьованого	регенерованого
Смак при 20^0С, бали	2	0	1	0
Забарвленість, град.	20,46	14,61	15,2	14,71
Мутність, мг/л	2,31	1,45	2,02	1,5
Запах при 20^0С, бали	0	0	0	0
Жорсткість загальна, ммоль/л	4,0	0,6	4,0	0,3
Загальне залізо, мг/л	0,36	0,22	0,24	0,2
Нітрати, мг/л	1,125	0,675	1,665	1,125
Нітріти, мг/л	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Аміак, мг/л	0,08	1,27	0,05	0,01
ЗМЧ, КУО/см^3	<1х10^1	<1х10^1	<1х10^1	<1х10^1

Результати лабораторних досліджень (в табл. 1-3 не наведено) показали, що бактеріологічні показники якості не перевищують нормативних, як у водопровідній воді, так і після обробки у фільтрах. Можливо, це пояснюється тим, що дослідження проводились у зимовий період і температура довкілля та води не сприяла виникненню і розмноженню шкідливих мікроорганізмів. Показники по каламутності та кольоровості після обробки води регенерованими картриджами покращились майже до показників після обробки новими картриджами. Найбільш відчутне покращення доочистки після регенерації по показнику загальної жорсткості.

Таблиця 2 – Показники питної води до і після обробки картриджем " БАРЬЕР Железо " виробництва ЗАТ "МЕТТЭМ-Технологии", Росія

Показники якості	Питна вода з водопроводу	Вода після картриджа		
		нового	відпрацьованого	регенерованого
Смак при 20^0С, бали	2	0	1	0
Забарвленість, град.	19,31	13,46	20,48	15
Мутність, мг/л	1,05	0,87	0,93	0,93
Запах при 20^0С, бали	1	0	1	0
Жорсткість загальна, ммоль/л	3,8	1,7	3,8	1,5
Загальне залізо, мг/л	0,34	0,2	0,34	0,3
Нітрати, мг/л	2,025	0,675	2,025	2,025
Нітріти, мг/л	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Аміак, мг/л	0,18	0,52	0,18	0,18
ЗМЧ, КУО/см^3	$<1x10^1$	$<1x10^1$	$<1x10^1$	$<1x10^1$

Звертає увагу, що після обробки питної води в усіх фільтрах з новими картриджами, заповненими комбінованими фільтруючими матеріалами, суттєво зростає концентрація аміаку, яка з часом експлуатації зменшується до величини концентрації у водопровідній воді.

Таблиця 3 – Показники питної води до і після обробки картриджем " БАРЬЕР Жесткость " виробництва ЗАТ "МЕТТЭМ-Технологии", Росія

Показники якості	Питна вода з водопроводу	Вода після картриджа		
		нового	відпрацьованого	регенерованого
Смак при 20^0С, бали	1	0	1	0
Забарвленість, град.	18,72	14,61	18,41	14
Мутність, мг/л	1,1	0,7	1,45	0,81
Запах при 20^0С, бали	1	0	1	0
Жорсткість загальна, ммоль/л	3,7	0,6	3,5	0,5
Загальне залізо, мг/л	0,36	0,22	0,34	0,24
Нітрати, мг/л	1,57	1,57	1,57	1,57
Нітріти, мг/л	0,004	<0,003	0,007	0,003
Аміак, мг/л	0,24	0,5	0,24	0,2
ЗМЧ, КУО/см^3	$<1x10^1$	$<1x10^1$	$<1x10^1$	$<1x10^1$

Доцільно зіставити отримані результати з результатами обробки питної фільтром, картридж якого завантажений виключно активованим вугіллям. В таблиці 4 представлені показники питної води з водопроводу м.Черкаси до і після доочищення за допомогою ємнісного фільтра „Бар'єр-Норма" з картриджем, наповненим активованим вугіллям [2].

Таблиця 4 – Показники питної води до і після доочистки у фільтрі з картриджем, наповненим активованим вугіллям

Показники якості	Вихідна питна вода з водопроводу	Вода після обробки картриджем
Смак при 20^0С, бали	2	0
Забарвленість, градуси	25	1
Мутність, мг/л	0,1	0,001
Запах при 20^0С, бали	2	0
Іони заліза,мг/л	0,3	0,01
Нітрати, мг/л	2,5	0,1
Нітріти, мг/л	1,5	0,05
Аміак, мг/л	0,3	Відсутній
Окислюваність перманганатна, мг O_2/л	5,5	0,5

Співставлення даних таблиць 1-показує, що доочистка питної води за показниками зменшення концентрації іонів заліза та нітратів картриджем з активованим вугіллям більш ефективна, ніж картриджами з комбінованими фільтруючими матеріалами, що містять активоване вугілля.

Висновки. Отримані результати свідчать про можливість застосування дослідженого методу регенерації картриджів побутових фільтрів доочистки питної води. Доочистка питної води картриджем з активованим вугіллям за показниками зменшення концентрації іонів заліза та нітратів більш ефективна, ніж картриджами з комбінованими фільтруючими матеріалами, що містять активоване вугілля та іонообмінні смоли.

Після обробки питної води в досліджених фільтрах з новими картриджами, заповненими комбінованими фільтруючими матеріалами, суттєво зростає концентрація аміаку, яка з часом експлуатації зменшується до величини концентрації у водопровідній воді.

Для визначення оптимальних параметрів технологічних процесів та складів промивних розчинів, що застосовуються для регенерації картриджів побутових фільтрів доочистки питної води, потрібні додаткові дослідження.

Список літератури

1. Адсорбция органических веществ из воды [Текст] / А.М. Когановский, Н.А.Клименко, Т.М. Левченко, И.Г. Рода. – Л.: Химия, 1990. – 256 с.
2. Гончаренко, Т.П. Оцінка можливості доочистки питної води м. Черкаси за допомогою побутових фільтрів. [Текст] / Т.П. Гончаренко // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції" І Всеукраїнський з'їзд екологів". – Вінниця, 4–7 жовтня, 2006 . – С. 241.
3. Прокопов, В.О. Досвід використання в Україні побутових фільтрів для доочищення водопровідної питної води [Текст] / В.О. Прокопов, О.Б. Липовецька // Гігієна населених місць. – 2013. – №.62. – С. 68-80.

4. Тунакова, Ю. А. Оценка эффективности фильтров для доочистки питьевых вод в конечной точке потребления [Текст] / Ю.А. Тунакова, А.Р. Галимова, Ю.А. Шмакова // Вестник Казанского технологического университета scholar. – 2012. – № 19, том 15. – С.83-86.
5. А.с. СССР № SU 1264972 «Способ регенерации активированного угля» / Климов О.М., Михайлов В.К., Крейнин Л.Б.: Заявитель: Всесоюзный проектно-конструкторский и технологический институт вторичных ресурсов; заявка: №3715894, 30.12.1983, опубл.: 23.10.1986.
6. Пат. РФ 394760, CO1B31/08 /B01J20/Способ регенерации активированного угля / Хоанг К. Б., Темкин О.Н., Тимофеев В.С., Валитова Э.Р., Грешняева И.М., Черкасова О.А., Ворожцов Г.Н., Калия О.Л., Кузнецова Н.А.; Патентообладатели: Федеральное государственное унитарное предприятие "Государственный научный центр "Научно-исследовательский институт органических полупродуктов и красителей" (ФГУП "ГНЦ "НИОПИК") (RU), Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова" (МИТХТ) (RU); заявка: 2009112022/15, 02.04.2009; опубл. 20.07.2010 Бюл. № 20.
7. Пат. РФ2499770 Фильтр для очистки воды на основе активированного угля и способ его регенерации/Автор(ы): Кармазинов Ф.В., Кинебас А.К., Трухин Ю.А., Мурашев С.В., Петров Е.Н.; патентообладатель: Государственное Унитарное Предприятие "Водоканал Санкт-Петербурга" (RU) - заявка: 2011139630/05, 30.09.2011; опубл.: 27.11.2013 Бюл. № 33.
8. Martin, R.J., Ng W. J. Chemical regeneration of exhausted activated carbon // Water Res. – 1987. – 21, N8. – P. 961 – 965.
9. Пат. України UA 105574 C2. Спосіб хімічної регенерації активованого вугілля/Здоровенко Г. М., Самсоні-Тодорова О. О., Мєшкова-Клименко Н. А., Патюк Л.К.; власник: інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського національної академії наук України № a201213957 заявка: 07.12.2012; опубл. 26.05.2014, бюл. № 10/2014.
10. Восстановление адсорбционной емкости активного угля после длительной эксплуатации фильтров для доочистки водопроводной воды [Текст] / Н.А. Клименко, Е.А. Самсони-Тодорова, Л.А. Савчина, Л.К. Патюк // Химия и технология воды. – 2013. – №4. – С. 286-297.

Vasyl Klymenko, Prof., DSc., Natalia Kovalchuk, Lect., Volodymyr Kravchenko, Assoc. Prof., Phd tech. sci.
CentralUkrainian National Technical University, Kropyvnytsky, Ukraine

Experimental evaluation of the efficiency of regeneration of cartridges of household filters for post-treatment of drinking water

To date, for additional purification of drinking water, household filters with replaceable cartridges are widely used. Cartridges have a limited lifespan, which causes the need for their relatively frequent replacement, a certain alternative of which can be the restoration of purifying ability by regeneration.

The technique and results of the experimental evaluation of the efficiency of post-treatment of drinking water with household filters with regenerated cartridges are described in the article. The technological chain of regeneration consists of sequential processing of filter materials with a solution of alkali, NaCl solution and washing with standing water (without disassembly of cartridges). The results of the analysis of impurities in tap water treated with regenerated household filter cartridges are presented and compared with the amount of existing similar impurities in water, refined with new cartridges.

The obtained results testify to the possibility of using this regeneration method for restoring the work of cartridges of household filters for post-treatment of drinking water.

drinking water, additional water treatment, alkali solution, NaCl solution, household filters, cartridge, regeneration

Одержано 15.05.17

УДК 621.793

Ю.В. Кулєшков, проф., д-р техн. наук, М.В. Красота, доц., канд. техн. наук, Т.В. Руденко, доц., канд. техн. наук, О.О. Матвієнко, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
E-mail: krasotamv@ukr.net

Використання мікродугового оксидування при зміцненні деталей з алюмінієвих сплавів, відновлених пластичним деформуванням

У статті приведений аналіз можливості використання нового способу зміцнення - мікродугового оксидування для підвищення зносостійкості деталей, виготовлених з алюмінієвих сплавів, зокрема корпусів шестеренних насосів типу НШ. У роботі викладена сутність процесу зміцнення деталей мікродуговим оксидуванням, представлені основні фізико-механічні характеристики зміцнюючого покриття. Відзначено, що міцність зчеплення і механічні властивості покриття багато в чому залежать від стану поверхні, що зміцнюється, зокрема від методу попередньої обробки. При цьому встановлено, що зміцнюючі покриття після пластичного деформування деталей мають вищу міцність зчеплення, твердість і більшу товщину. У роботі представлені основні відомості про мікродугове оксидуванні, які на думку авторів будуть сприяти застосуванню маловивченого способу зміцнення в ремонтному виробництві.

мікродугове оксидування, зміцнення алюмінієвих сплавів, пластичне деформування, міцність зчеплення, зносостійкість, мікротвердість покриття, металокераміка

Ю.В. Кулешков, проф., д-р техн. нук, М.В. Красота, доц., канд. техн. наук, Т.В. Руденко, доц., канд. техн. наук, А.А. Матвиенко, доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г.Кропивницкий, Украина

Использование микродугового оксидирования при упрочнении деталей из алюминиевых сплавов, восстановленных пластическим деформированием

В статье приведен анализ возможности использования нового способа упрочнения рабочих поверхностей деталей - микродугового оксидирования для повышения износостойкости деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов, в частности корпусов шестеренных насосов типа НШ. В работе изложена сущность процесса упрочнения деталей микродуговым оксидированием, представлены основные физико-механические характеристики упрочняющего покрытия. Отмечено, что прочность сцепления и механические свойства покрытия во многом зависят от состояния упрочняемой поверхности, в частности от метода предварительной обработки. При этом установлено, что упрочняющее покрытие металла после пластического деформирования обладает более высокой прочностью сцепления, твердостью и имеет большую толщину. В работе представлены основные сведения о микродуговом оксидировании, которые, по мнению авторов, будут способствовать применению малоизученного способа упрочнения в ремонтном производстве.

микродуговое оксидирование, упрочнение алюминиевых сплавов, пластическое деформирование, прочность сцепления, износостойкость, микротвердость покрытия, металлокерамика

Постановка проблеми. У ремонтному виробництві для відновлення деталей широко застосовується пластичне деформування, в тому числі і для деталей, виготовлених з алюмінієвих сплавів. Цьому способу відновлення притаманний ряд таких переваг:

- висока продуктивність - процес пластичного деформування триває лічені секунди;

- здатність заліковувати мікротріщини, що виникли в процесі експлуатації;

© Ю.В. Кулєшков, М.В. Красота, Т.В. Руденко, О.О. Матвієнко, 2017

- подрібнення зерна і вибудовування його вздовж силового впливу, що сприяє підвищенню міцності на 15…20%.

Однак, одним із суттєвих недоліків деталей, які виготовляються з алюмінієвих сплавів є надзвичайно низька їх зносостійкість, що пояснюється низькою твердістю цих сплавів. До останнього часу не існувало дієвих методів підвищення зносостійкості робочих поверхонь, виготовлених із алюмінієвих сплавів.

Більшість машин і агрегатів (85...90%) втрачають працездатність внаслідок зношування робочих поверхонь деталей. Тому, підвищення зносостійкості деталей машин є однією з важливих і актуальних проблем підприємств, що займаються як виготовленням, так і ремонтом техніки. Постійне збільшення вартості запасних частин і їх невисока якість також стимулюють розробку технологій виготовлення, відновлення і зміцнення, що дозволяє знизити знос деталей, вузлів і агрегатів техніки при її експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мікродугове оксидування (інші назви: мікроплазмове, анодно-іскрове, плазмово-електролітичне) - один з найперспективніших методів поверхневого зміцнення робочих поверхонь матеріалів. Суть методу полягає в тому, що при проходженні струму великої густини через межу розділу метал-електроліт створюються умови, коли напруженість на межі розділу стає вищою за діелектричну міцність, і на поверхні електроду виникають мікроплазмові розряди з високими локальними температурами і тисками. Результатом дії мікроплазмових розрядів є формування шару покриття, що складається з окислених форм елементів металу основи і складових електроліту. Залежно від режиму мікроплазмового оксидування і складу електроліту можна отримувати керамічні покриття завтовшки до 300 мкм з унікальними характеристиками і широким спектром застосування [1–8].

Завдяки тому, що процес ведуть в умовах іскрового плазмового розряду на поверхні оксидованої деталі при локальних температурах в зоні реакції 250…700°С, композиційні добавки, що знаходяться в електроліті у вигляді порошків, сплавляються з іншими компонентами покриття, створюючи міцний керамічний шар. Застосування цих електролітів дозволяє формувати покриття з використанням оксиду алюмінію, оксиду титану та інших матеріалів, введених до складу електроліту, що істотно розширює можливість отримання покриттів з функціональними різними властивостями.

До основних переваг МДО відносяться [1, 4, 9, 10]:

- можливість створення надміцних покриттів з унікальними характеристиками;
- отримання кількох захисних характеристик в комплексі;
- практично нескінченний термін служби електроліту;
- можливість обробки деталей із складним профілем;
- висока розсіююча здатність електроліту (покриття наноситься в отвори і порожнини з мінімальними труднощами);
- нанесення покриттів, однорідних за якістю і товщиною, як на зовнішні, так і на внутрішні поверхні деталей будь-якої форми;
- відсутність необхідності у спеціальній підготовці поверхні перед нанесенням покриття і механічній обробці після нанесення покриття;
- регулювання швидкості процесу в широкому діапазоні;
- отримання різних покриттів на одному матеріалі.

Однак, на сьогоднішній день в ремонтному виробництві вищевказаний спосіб широкого розповсюдження не отримав. Це пояснюється рядом причин, серед яких недостатня вивченість способу, особливо стосовно до відновлення і зміцнення

ливарних алюмінієвих сплавів, відсутність технологічних рекомендацій для відновлення конкретних деталей, тощо.

Постановка завдання. Одним з перспективних способів зміцнення робочих поверхонь деталей, які отримують все більше поширення, є зміцнення поверхні деталей мікродуговим оксидування (МДО), яке відносять до нанотехнологій. Але, в ремонтному виробництві цей спосіб зміцнення робочих поверхонь алюмінієвих деталей не знайшов відповідного поширення.

Метою досліджень є проведення аналізу науково-технічної інформації щодо зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів мікродуговим оксидуванням, зокрема деталей, які були відновлені гарячим пластичним деформуванням.

Викладення основного матеріалу. Оскільки процес МДО відбувається в спеціальному електроліті, то основними напрямками досліджень є обґрунтування вибору складу електроліту та режимів нанесення покриття за допомогою МДО для одержання товстошарових керамічних покриттів.

Залежно від хімічного складу сплаву, режимів МДО і компонентів електроліту на деталях з алюмінієвих сплавів формуються складні за фазовим складом покриття, що включають високотемпературні модифікації оксидів Al_2O_3. Такі покриття, сформовані з лужного електроліту, можна розглядати як композиційні, в яких оксид $A1_2O_3$ є зміцнюючою фазою. Мікротвердість таких покриттів досягає 20...25 ГПа [3-16].

Міцність зчеплення з основою (адгезія) покриттів, одержуваних способом МДО, досягає 350 МПа, що дає можливість застосовувати їх при великих контактних навантаженнях. Крім того, зносостійкість покриттів, отриманих способом МДО, порівнянна з зносостійкістю матеріалів на основі карбіду вольфраму.

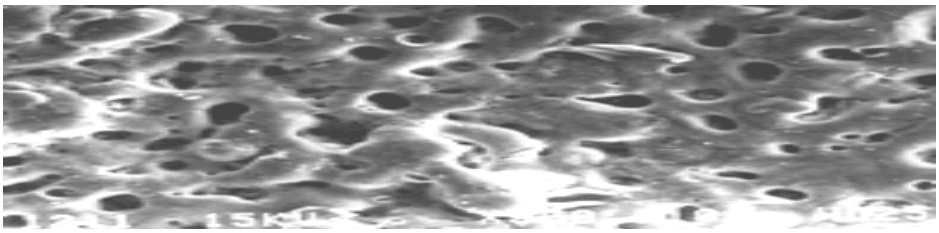
Покриття, що були отримані мікродуговим оксидуванням являють собою кераміку складного складу. Покриття при мікродуговому оксидуванні утворюється за рахунок окислення поверхні металу, при цьому формуються оксидні і гідроксидні форми цього металу. З іншого боку товщина покриття зростає за рахунок включення до його складу елементів з електроліту. Елементи електроліту входять в покриття у вигляді солей, оксидів і гідроксидів складного складу. При необхідності, технологія мікродугового оксидування дозволяє ввести в покриття будь-який потрібний хімічний елемент. Чим триваліша обробка деталі, тим більше елементів з електроліту накопичується в поверхневому шарі. Нижній шар покриття, що прилягає до металу-основи, складається переважно з його оксидних сполук.

Товщина покриттів визначається декількома основними чинниками. Це склад електроліту, матеріал сплаву металу, режим обробки і час процесу. Мікродугове оксидування дозволяє отримувати покриття товщиною від часток до сотень мікрометрів. Необхідна товщина покриття залежить від призначення і умов експлуатації деталі. Для нанесення підшару під фарбування досить 5-10 мкм, для підвищення електроізоляційних властивостей або високої зносостійкості необхідно 50…100 мкм. Декоративні властивості та антикорозійні властивості в атмосферних умовах забезпечують 20…40 мкм покриття.

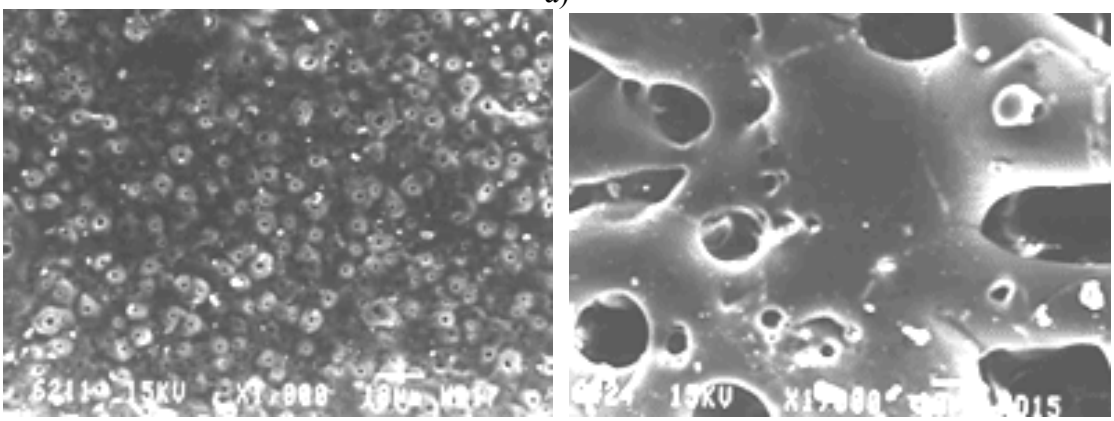
Пористість покриттів варіюється в інтервалі 5…50%, розміри від 0,01 до 10 мкм. Будова пор при товщині покриття більше 5…10 мікрон складна, вона характеризується розгалуженням з безліччю окремих відгалужень і замкнутих просторів (рис. 1). Покриття, що не містять пор отримати неможливо, що обумовлено природою процесу. При необхідності пористість може бути знижена за допомогою просочення різними матеріалами або за допомогою нанесення шару полімеру. Найчастіше застосовується просоченням фторопластами і нанесення полімерних порошкових фарб. У ряді випадків пористість є позитивним фактором. При роботі покриття на зношування в

умовах змащення, мастило заходить в пори і поступово виділяється в зоні тертя.

У медицині біоактивні покриття, що були отримані мікродуговим оксидуванням, можуть містити в порах лікарські препарати [7, 11].



а)



б) в)

а –х400 ; б –х100 ; в -х500

Рисунок 1 - Мікрофотографії покриттів, що були отримані мікродуговим оксидуванням

Покриття, що були отримані мікродуговим оксидуванням використовуються як зносостійкі в різних вузлах і агрегатах машин і механізмів. За рахунок цього, в багатьох випадках вдається застосовувати деталі з алюмінію - металу досить м'якого і складного для традиційних методів поверхневої обробки (наприклад, гальваніки). Проводилися порівняльні випробування зразків покриттів, що були отримані мікродуговим оксидуванням на алюмінії та сталевому зразку з нанесеним зносостійким шаром хрому. Питоме навантаження при випробуванні становило 0,64 МПа. Покриття, отримане мікродуговим оксидуванням показало менший знос, особливо при підвищених температурах.

Очевидно, причини високої зносостійкості покриттів, отриманих МДО, слід пов'язувати з їх структурним станом. Можна припустити, що структурні модифікації оксиду алюмінію в покриттях утворюють між собою найміцніший тип міжмолекулярного зв'язку. Ряд авторів [3, 14-17] також вказують на те, що оксидне покриття, отримане МДО, по суті, представляє собою композиційний матеріал, який вдало поєднує в собі відносну пластичність матриці, що складається з твердого розчину муллита 3 Al_2O_3 • $2SiO_2$ із незначною кількістю γ -Al_2O_3 і складнооксидних сполук елементів основи із зміцнюючою фазою α - Al_2O_3 (до 65%), яка, головним чином, і забезпечує високу зносостійкість покриттів. У роботах [18 - 20] зазначено, що зносостійкість покриттів, сформованих способом МДО, порівнянна з зносостійкістю композиційних матеріалів на основі карбідів вольфраму, що традиційно застосовуються проти абразивного зношування матеріалів.

Таким чином, проведені порівняльні дослідження зносостійкості дозволили

встановити, що покриття, отримані мікродуговим оксидуванням, мають високу зносостійкість. В результаті можна зробити висновок, що дані керамічні покриття можуть бути рекомендовані для відновлення і зміцнення алюмінієвих деталей шестеренних насосів типу НШ.

Покриття, отримані мікродуговим оксидуванням мають підвищену стійкість до термічних і термоциклічних навантажень. Покриття можуть без обмежень працювати при температурах від -40 до + 60 ° С. При поступовому нагріванні деталі термостійкість покриттів, отриманих мікродуговим оксидуванням, обмежується температурою плавлення металу самої деталі, оскільки ці значення для металу завідомо нижчі, ніж для кераміки. Дослідження показали, що покриття можуть витримувати до 280 термоциклів 310-15° С і до 25 термоциклів 500-15° С. При таких випробуваннях, зразок з покриттям нагрівається до заданої температури в печі, а потім занурюється в холодну воду.

В процесі обробки шорсткість поверхні, зміцненої мікродуговим оксидуванням, підвищується зі збільшенням часу обробки. Можна отримати покриття з шорсткістю до Ra 0,8. Шорсткість поверхні залежить від матеріалу сплаву, стану його поверхні і режиму обробки. На рис. 2 наведено зразок 3D-профілометрії поверхні, зміцненої мікродуговим оксидуванням.

Зміцнення мікродуговим оксидуванням дозволяє отримувати покриття, стійкі в атмосферних умовах і в різних корозійних середовищах - хімічно агресивних розчинах, парах, морській воді та ін. Так як покриття, зміцнені мікродуговим оксидуванням являють собою кераміку складного складу, то корозійна стійкість матеріалу покриття досить висока. Захист від корозії металу-основи можна забезпечити товщиною покриття і регулюванням кількості і будови пор. Додатковий захист надає просочення пор інертним матеріалом (найчастіше фторопластом). Проведені прискорені випробування за стандартними методиками алюмінієвих зразків з полімерно-керамічним покриттям, отриманим мікродуговим оксидуванням показали, що зазначені покриття можуть експлуатуватися як корозійностійкі протягом 15 років.

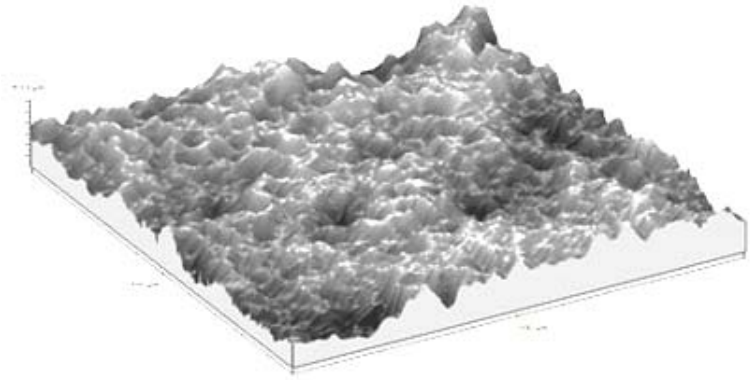


Рисунок 2 - 3 D-профілометрія поверхні, зміцненої мікродуговим оксидуванням

Покриття, отримані мікродуговим оксидуванням мають чудове зчеплення з металом-основою, що забезпечується наявністю перехідного шару на межі метал - покриття. Перехідний шар формується як всередину металу, так і назовні, а також має профіль з безліччю вигинів.

Твердість покриттів, отриманих мікродуговим оксидуванням досягає 21 ГПа. Вимірювання твердості проводили за допомогою приладу Nano Hardness Tester, при вантаженні на інденторі - 200 Н. Твердість покриттів розраховували виходячи із глибини проникнення індентора [6, 8, 13, 14, 21].

Для отримання високої зносостійкості покриття на пластично деформованих алюмінієвих сплавах Ал-9 і АО3-7 був запропонований електроліт складу: Na_2Si0_3 - 14 г / л. При використанні вищевказаних складу електроліту і режимів МДО загальна товщина зміцненого шару складе 0,12 мм, мікротвердість покриттів на сплаві Ал-9 - 10 ГПа, а на АО3-7 - 12 ГПа. При цьому товщина зовнішнього зміцненого шару збільшується на 50%, внутрішнього зміцненого шару зменшується на 25%, а мікротвердість зростає на 15...30%, в порівнянні з МДО сплаву вихідного стану.

Дослідження залишкових внутрішніх напружень показали, що на відновленій пластичною деформацією внутрішній поверхні корпуса насоса присутні стискаючі напруження рівні -50 МПа. Залишкові внутрішні напруження в покритті МДО також є стискаючими і складають -310 МПа, що має позитивний вплив на його зносостійкість.

Випробування на зношування дозволили встановити, що знос пар тертя з покриттями, сформованими на раціональному складі електроліту і режимах МДО в з'єднаннях «корпус-шестерня» (сплав Ал-9), в 2,5 рази вище, а в з'єднанні «втулка-цапфа шестерні »(сплав АО3-7) в 3,0 рази вище, ніж у аналогічних без покриттів, прийнятих за еталон порівняння.

Лабораторні випробування шестеренних насосів НШ-32У-2 показали, що зносостійкість з'єднань «корпус-шестерня» і «втулка-цапфа шестерні» насосів НШ-32У-3 з відновленими пластичним деформуванням і зміцненими МДО деталями в 2,5 ... 3 рази вище, ніж у з'єднань серійних насосів.

На підставі проведених досліджень розроблено технологічний процес зміцнення МДО відновлених пластичним деформуванням корпусу і втулки насоса НШ-32У-3. Експлуатаційні випробування підтвердили результати прискорених стендових випробувань на зношування.

При напрацюванні 1000...1100 мото-год., що становить 30% від гарантованої заводом-виробником, зносостійкість з'єднань шестерень з відновленими і зміцненими за пропонованою технологією корпусами і втулками шестеренних насосів НШ-32У-3 була в 2,5...3 рази вища, ніж у з'єднаннях із серійними деталями.

Висновки. В роботі запропонований метод підвищення зносостійкості деталей машин з ливарних і антифрикційних алюмінієвих сплавів, відновлених пластичним деформуванням, за рахунок застосування технології зміцнення МДО, що представляє суттєве значення для ремонтного виробництва. При цьому встановлено, що мікроструктура ливарного алюмінієвого сплаву Ал-9 після пластичного деформування і термічної обробки впливає на товщину покриття, сформованого МДО, таким чином, що товщина внутрішнього зміцненого шару буде менша, а товщина зовнішнього зміцненого шару більше в порівнянні з покриттям, отриманим на недеформованому сплаві.

В процесі вивчення способу зміцнення МДО було встановлено, що мікроструктура сплаву після пластичного деформування і термічної обробки суттєво впливає на розташування і властивості зміцненого шару щодо дійсного розміру деталі.

Вивчення фізико-механічних властивостей покриттів, отриманих на деталях з алюмінієвих сплавів, відновлених пластичним деформуванням, дозволить значно збільшити їх зносостійкість, а, отже, довговічність і є перспективним напрямком розвитку ремонтного виробництва в сучасних умовах.

Список літератури

1. Николаев, А.В. Новое явление в электролизе [Текст] / А.В. Николаев, Г.А. Марков, В.И. Пещевицкий // Изв. СО АН СССР. Серия "Химические науки". – 1977. – Вып. 5, № 12, – С. 32-34.
2. Яковлев, С.Я. Микродуговой электролиз на угольных материала [Текст] / С.Я. Яковлев, Г.Л. Кравецкий, П.Н. Другов // Вестник МВТУ им. Баумана. Серия "Машиностроение", 1992. – С. 25-34.

3. Павлюс, С.Г. Диэлектрические свойства анодно-искровых силикатных покрытий на алюминии [Текст] / С.Г. Павлюс, В.Я. Соборнитский, Ю.А. Шепрут // Электронная обработка материалов. – 1987. – № 3. – С. 34-36.
4. Марков, Г.А. Микродуговое оксидирование [Текст] / Марков Г.А., Белеванцев В.И., Терлеева О.П., Шулейко Е.К., Слонова А.И. // Вестник МВТУ им. Баумана. Серия "Машиностроение". – 1992. – № 1. – С. 34- 56.
5. Батищев, А.Н. Восстановление алюминиевых деталей сельскохозяйственной техники микродуговым оксидированием [Текст] / Батищев А.Н., Новиков А.Н., Кузнецов Ю.А.// Инженерно-техническое обеспечение АПК. – 1996. – № 4. – С. 18-19.
6. Черненко, В.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом [Текст] / В.И. Черненко, Л.А. Снежко, И.И. Потапова. – Москва: Химия, 1991. – 128 с.
7. Снежко, Л.А. Энергетические параметры процесса получения оксидных покрытий на алюминии в режиме искрового разряда [Текст] / Л.А. Снежко, В.И. Черненко // Электронная обработка материалов. – 1983. – № 2. – С. 25-28.
8. Ван Тран Бао. Механизм анодного искрового осаждения метал лов [Текст] / Ван Тран Бао и др. // Реферативный журнал "Химия". – 1978. – № 1. – С. 41.
9. Снежко, Л.А. Свойства анодно-искровых покрытий, сформированных на сплавах алюминия из щелочных электролитов [Текст] / Л.А.Снежко, Ю.В. Удовиченко, Л.С. Тихая // Физика и химия обработки материалов. – 1989. – № 3. – С. 93-96.
10. Федоров, В.А. Модифицирование микродуговым оксидированием поверхностного слоя деталей [Текст] / Федоров В.А. // Сварочное производство. – 1992. – № 8. – С. 29-30.
11. Каракозов, Э.С. Микродуговое оксидирование - перспективный процесс получения керамических покрытий [Текст] / Каракозов Э.С., Чавдаров А. В., Барыкин Н.В.// Сварочное производство. – 1993. – № 6. – С. 4-7.
12. Новиков, А.Н. Восстановление и упрочнение деталей из алюминиевых сплавов микродуговым оксидированием [Текст] / А.Н. Новиков, А.Н. Батищев, Ю.А. Кузнецов, А.В. Коломейченко. – Орел: Орел ГАУ, 2001. – 99 с.
13. Влияние микродугового оксидирования на фазовый состав и свойства покрытий алюминия [Текст] / [И.А. Казанцев, О.Е. Чуфистов, Голованова и др..] // Мат. 4-го собрания металловедов России. – Ч. I. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 1998. – С. 105-107.
14. Кузнецов, Ю.А. Износостойкость покрытий при микродуговом оксидировании алюминиевых сплавов [Текст] / Ю.А. Кузнецов // Использование научного потенциала вузов в решении проблем научного обеспечения АПК в России. Материалы Международной научно-практической конференции. – ОрелГАУ, 2001. – С. 229-230.
15. Новиков, А.Н. Технологические основы восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники из алюминиевых сплавов электрохимическими способами [Текст] / А.Н. Новиков. – Орел: ОрелГАУ, 2001. – 233 с.
16. Федоров, В.А. Влияние микродугового оксидирования на износостойкость алюминиевых сплавов [Текст] / В.А. Федоров, Н.Д. Великосельская // Трение и износ. – 1989. – Т. 10, №3. – С. 521-524.
17. Снежко, Л.А. Импульсный режим для получения силикатных покрытий в искровом разряде [Текст] / Л.А. Снежко//Защита металлов. – 1988. – Т. 16, № 3. – С. 365.
18. Малышев, В.Н. Физико-механические характеристики и износостойкость покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования [Текст] / В.Н. Малышев, С.Н. Булычев, Г.А. Марков // Физика и химия обработки материалов. – 1985. – № 1. – С. 82-87.
19. Федоров, В.А. Взаимосвязь фазового состава и свойств упрочненного слоя, получаемого при микродуговом оксидировании алюминиевых сплавов [Текст] / В.А. Федоров, Н.Д. Великосельская // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1991. – №3. – С. 29-30.
20. Петросянц, А.А. Кинетика изнашивания покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования / А.А. Петросянц, В.Н. Малышев, В.А. Федоров, Г.А. Марков // Трение и износ. – 1984. – Т. 5, № 2. – С. 350-354.
21. Кузнецов, Ю.А. Восстановление деталей газотермическими покрытиями с последующим упрочнением микродуговым оксидированием [Текст] / Ю.А. Кузнецов, А.Я. Коровин // Развитие села и социальная политика в условиях рыночной экономики: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию МГАУ. – Москва: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2001. – Ч. 1. – С. 143-144.
22. Коровин, А.Я. Технология восстановления и упрочнения деталей гидравлических шестерных насосов типа НШ-У микродуговым оксидированием: насоса [Текст] : дис. … канд. технич наук / Коровин Александр Яковлевич, Орловский государственный аграрный университет. – Орел, 2003. – 137 с.

Yuriy Kuleshkov, Prof., DSc., Mikhail Krasota, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Timofey Rudenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Alexander Matvienko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Application of micro-arc oxidation for a part hardening made of aluminium alloys and repaired by plastic deformation

The objective of the research is to analyse the scientific and technical information on hardening of parts of aluminium alloys by micro-arc oxidation, particularly the parts, which were repaired by hot plastic deformation.

This article presents the analysis of the possibility to apply a new method of hardening of working surfaces of parts by micro-arc oxidation to increase wearability of working surfaces of the parts made of aluminium alloys, in particular the bodies of gear pumps. The work presents the essence of the process of hardening of details by micro-arc oxidation and the main physical and chemical characteristics of the hardening coating. It was stated that the adhesive strength and mechanical characteristics of the coating largely depend on the condition of the surface under hardening, in particular on the method of preparatory processing.

It was established that the hardening coating of metal after plastic deformation gets better adhesive strength, thickness and hardness. The work presents basic information on micro-arc oxidation which will facilitate further application of the hardening method in repair industry.

micro-arc oxidation, hardening of aluminium alloys, plastic deformation, adhesive strength, wearability, micro-hardness of coating, ceramic metal

Одержано 25.01.17

УДК 621.74

В.М. Ломакін, доц., канд. техн. наук, В.В. Клименко, проф., д-р техн. наук, А.В. Ломакін
Кіровоградський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
E-mail: spherical@mail.ru
В.І. Дубодєлов, проф., д-р техн. наук, М.С. Горюк, ст. наук. сп-к., канд. техн. наук
Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, м.Київ, Україна

Дослідження впливу температури і швидкості руху розплаву на процес розчинення легуючих добавок в рідкому чавуні

Досліджено та вивчено вплив тепло-кінетичних та масо-обмінних процесів в магнітодинамічному міксері-дозаторі моделі МДН-6Ч на швидкість розчинення ферохрому у рідкому чавуні. Виконано розрахунки конвективної дифузії хрому та експериментальним шляхом встановлено раціональний режим роботи магнітодинамічної установки при отриманні розплавів легованого чавуну

легований чавун, хром, магнітодинамічний міксер, конвекція розплаву, дифузія

В.Н. Ломакин, доц., канд. техн. наук, В.В. Клименко, проф., д-р техн. наук, А.В. Ломакин
Кировоградский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина
В.И. Дубоделов, проф., д-р техн. наук, М.С. Горюк, ст. наук. с-к, канд. техн. наук
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина

Исследование влияния температуры и скорости движения расплава на процесс растворения легирующих добавок в жидком чугуне

© В.М. Ломакін, В.В. Клименко, А.В. Ломакін, В.І. Дубодєлов, М.С. Горюк, 2017

Исследовано и изучено влияние тепло-кинетических и массообменных процессов в магнитодинамическом миксере-дозаторе модели МДН-6Ч на скорость растворения феррохрома в жидком чугуне. Выполнены расчеты конвективной диффузии хрома и экспериментально установлен рациональный режимы работы магнитодинамической установки при получении расплавов легированного чугуна

легированный чугун, хром, магнитодинамический миксер, конвекция расплава, диффузия

Постановка проблеми. На стадії отримання хромового чавуну визначальними є теплові і фізико-хімічні процеси, що протікають між введеними добавками ферохрому і металевим розплавом.

В діючих технологіях питанням якісного приготування розплавів хромового чавуну приділяється недостатня увага. Незважаючи на значну конвекцію рідкого металу в промислових печах швидкість розчинення тугоплавких добавок відносно невелика і в ряді випадків визиває небажані затримки плавок. Самим розповсюдженим способом уведення в розплав невеликих добавок ферохрому пов'язаний із зануренням твердих його шматків у ківш з металом. При цьому для прискорення розчинення і гомогенізації розплав доцільно перемішувати, що здійснити гравітаційним, механічним або пневматичними способами досить складно.

Один із ефективних способів приготування розплавів чавуну, легованого хромом, полягає у застосуванні засобів магнітної гідродинаміки, зокрема магнітодинамічної установки моделі МДН-6Ч, коли метал-розчинник нагнітається по одному з каналів в робочий простір [1]. Доцільність застосування МГД-установки для приготування хромового чавуну пояснюється високим ККД такого агрегату при нагріванні рідкого металу і розчиненні уведеного ферохрому, можливістю здійснення інтенсивного регульованого перемішування чавуну і наступної дозованої його розливки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес засвоєння ферохрому при уведенні в ємність з металевим розплавом складається із трьох одночасних стадій: розчинення, дифузії у граничному шарі і конвективного переносу по об’єму ємності [2]. Спочатку тверда кірка намерзає на шматок ферохрому, а потім плавиться. При цьому тугоплавкий феросплав прогрівається за рахунок тепла, що підводиться від рідкого чавуну шляхом конвекції та тепла кристалізації на поверхні. Потім кірка розплавляється і при температурі плавлення ферохрому, набагато вищій ніж металу-розчинника, шматок феросплаву розчиняється без плавлення. Атоми хрому відриваються від кристалічної решітки і переходять в розплав з утворенням поблизу поверхні твердого тіла розчину. При цьому можливе утворення легкоплавких сполук.

Поставновка завдання. Задача дослідження полягала у визначенні раціонального поєднання температури маталу-розчинника і швидкості подачі розплаву із каналу в робочу ємність установки МДН-6Ч для отримання мінімального часу розчинення ферохрому і максимальної продуктивності при виплавці сплаву з заданою масовою часткою хрому.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення поставленої задачі були виконані розрахунки кінетики розчинення ферохрому в магнітодинамічній установці.

В механізмі розчинення технічних речовин, в даному випадку ферохрому, крім молекулярного переносу має місце технічна ерозія твердого зразка шляхом проникнення розплаву по порам структури в глибину матеріалу і відокремлення цілих зерен. У зв’язку з цим при розрахунку часу розчинення та інших параметрів, що характеризують процес, коефіцієнт D в формулах конвективної дифузії необхідно замінити на ефективний параметр розчинення $Ф$.

Для розрахунку швидкості розчинення ферохрому в чавуні і оцінки необхідних для реалізації такого процесу параметрів роботи магнітодинамічної установки можуть бути використані результати експериментальних досліджень і аналітичних розрахунків, виконаних в роботі [3]. Зокрема в ній наводяться експериментальні значення ефективних параметрів Ф дифузії хрому, що визначені методом обертового диска з рівнодоступною поверхнею. Зв'язок між питомою швидкістю розчинення і ефективним параметром дифузії хрому виражається наступною емпіричною формулою:

$$V_p = 0.62 \cdot \Phi^{\frac{2}{3}} \cdot \nu^{-\frac{1}{6}} \cdot \sqrt{W} \cdot \frac{C_н}{1 - C_н}, \quad (1)$$

де V_p – питома швидкість розчинення зразка ферохрому, кг/(м^{2}с);

Φ – ефективний параметр розчинення, м^2/с;

ν – кінематична в'язкість розплаву, м^2/с;

W – швидкість обертання диска, хв$^{-1}$;

$C_н$ – концентрація насичення хрому в залізі.

Час розчинення ($\tau_д$) шматків ферохрому розраховували по відомій емпіричній формулі [3]:

$$\tau_p = \frac{2{,}6 \cdot \rho_м^{0,5}}{\Phi^{\frac{2}{3}} \cdot \nu^{\frac{1}{6}} \cdot C_н} \cdot \sqrt{\frac{G_0}{U}}, \quad (2)$$

де $\rho_м$ – густина металу-розчинника, кг/м^3;

G_0 – маса шматка ферохрому, кг;

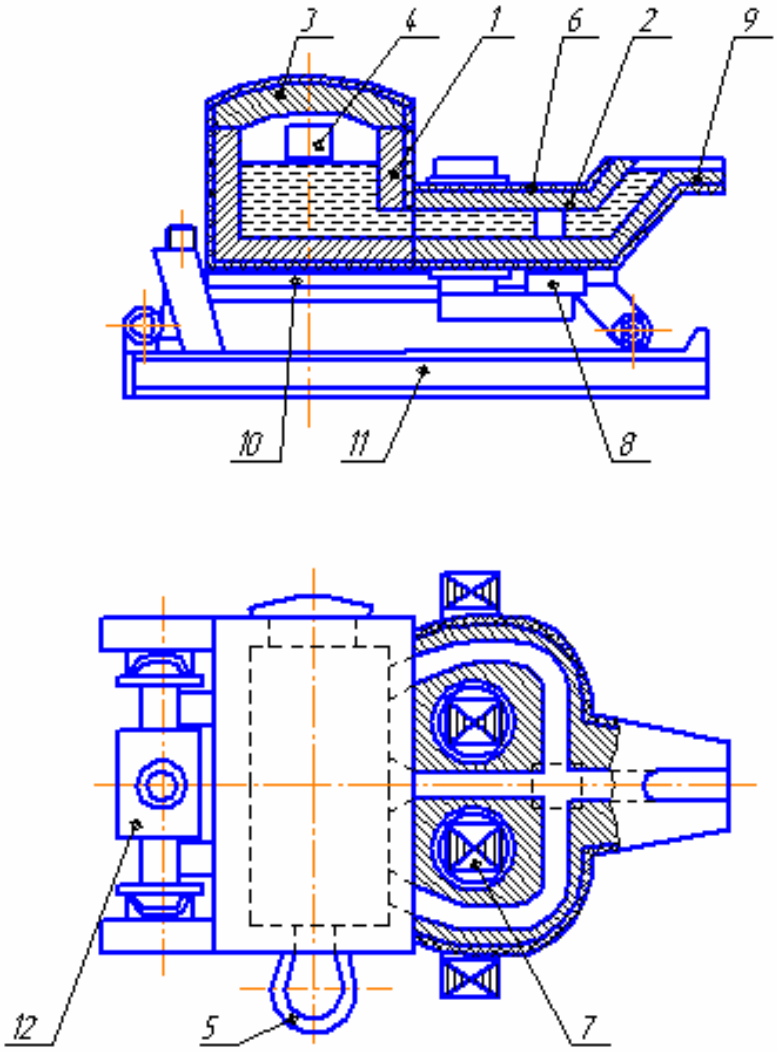
U – швидкість руху металу-розчинника, м/с.

Розрахунки розчинення ферохрому виконані для інтервалу швидкостей циркуляції рідкого металу в системі робоча ємність-канал МГД-установки (0,1–0,5 м/с), що можна отримати в магнітодинамічній установці моделі МДН-6Ч (рис. 1). При цьому було зроблено припущення, що температура розплаву постійна у часі і об'ємі. Результати виконаних розрахунків приведені нижче (рис. 2), при співставленні з експериментальними даними.

В обсяг дослідження входило також вивчення процесу легування чавуну хромом на натурних об'єктах. Чавун хімічного складу: вуглець – 3%, кремній – 2%, марганець – 0,25%, хром – 0,05%, сірка – 0,1%, фосфор – 0,1% виплавляли в дуговій печі ДСП – 6. Перед випуском металу із печі брали пробу на хімічний аналіз і вимірювали температуру чавуну.

Дослідження проводилось з використанням промислової установки МДН-6Ч. Для оцінки впливу електромагнітного перемішування на швидкість розчинення ферохрому і усереднення хімічного складу чавуну, розплав при температурі 1330º С зливали із печі у ківш, а потім заливали в установку МДН-6Ч. Далі розплав нагрівали до температур 1380-1420º С, що рекомендовано в роботі [3]. Зважування необхідної кількості ферохрому проводили з похибкою не більше 1%. Уведення добавок ферохрому здійснювали на поверхню рідкого металу. Замішування в розплав, розчинення і рівномірний розподіл реагенту по всьому об'єму чавуну забезпечувалось при перемішуванні, що створювалося дією електромагнітних сил в МГД-установці.

Потрібний вміст хрому в чавуні складав 0,55-0,60%. Проби на хімічний аналіз відбирались перед завантажуванням феросплаву, в процесі його розчинення без електромагнітного перемішування і в процесі розчинення з електромагнітним перемішуванням. Відбір проб виконували із тигля і зливного носка. Вміст хрому в чавуні визначали спектральним методом.



1 – тигель; 2 – індукційна магнітодинамічна одиниця; 3 – кришка тигля;
4 – вікно для скочування шлаку; 5 – жолоб для доливання металу;
6 – зварний корпус; 7 – індуктор; 8 – електромагніт; 9 – носок для зливу металу;
10 – рама; 11 – основа; 12 – механізм стабілізації рівня металу

Рисунок 1 – Схема магнітодинамічної установки моделі МДН-6Ч

При виконанні дослідження встановлено, що при завантажуванні ферохрому у розплав в робочій ємності установки МДН-6Ч має місце коливання температури. Для зниження таких коливань завантаження шихти виконувалось порціями. Коливання температури при цьому не перевищували ±30º С.

Результати дослідження представлено в табл. 1.

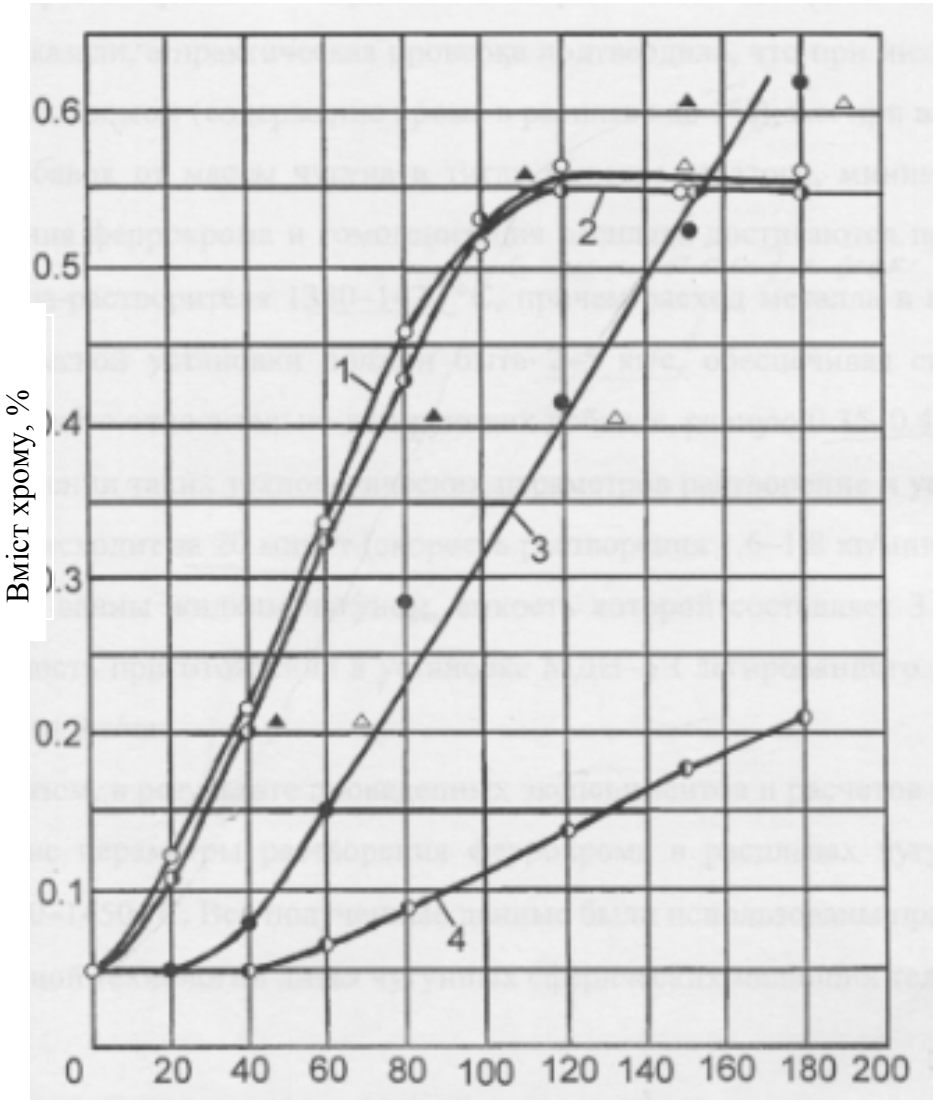
Таблиця 1 – Результати експериментів

Режим роботи МДН-6Ч	Час відбору проб з моменту завантаження феросплаву, (τ_{∂} ×0.1), с	Вміст розчиненого хрому у чавуні, мас. %	
		тигель	носок
Нагрівання без електромагнітного перемішування	Вихідний сплав	0,05	0,05
	20	0,05	0,05
	40	0,08	0,05
	60	0,15	0,06
	80	0,29	0,09
	100	0,36	0,12
	120	0,41	0,14
	150	0,52	0,18
	180	0,63	0,21
Нагрівання з електромагнітним перемішуванням (U=0.35-0.45 м/с)	Вихідний сплав	0,05	0,05
	20	0,12	0,11
	40	0,21	0,20
	60	0,34	0,33
	80	0,46	0,43
	100	0,51	0,52
	120	0,56	0,55
	150	0,55	0,55
	180	0,56	0,55

Згідно з даними табл. 1 електромагнітне перемішування рідкого металу ефективно впливає на прискорення процесу засвоєння чавуном хрому.

По отриманим експериментальним даним побудовані криві зміни масової частки хрому (рис. 2) в рідкому чавуні в залежності від часу розчинення ферохрому. Крім того, на тому ж рисунку показані розрахункові значення часу розчинення ферохрому до вмісту 0,2%, 0,4%, 0,55% і 0,60% хрому у чавуні.

Як видно на рис.2 розрахункові значення тривалості засвоєння чавуном тугоплавкого ферохрому добре узгоджуються з експериментальними даними. Розрахунки показали, а практична перевірка підтвердила, що при низькому легуванні чавуну хромом (вміст хрому в розплаві до 1%), мінімальний час розчинення ферохрому і гомогенізація розплаву досягаються при температурі металу-розчинника 1380-1420º С.



1 – тигель (з електромагнітним перемішуванням розплаву);
2 – носок (з електромагнітним перемішуванням розплаву);
3 – тигель (без електромагнітного перемішування розплаву);
4 – носок (без електромагнітного перемішування розплаву);
▲ – розрахунок (при швидкості перемішування розплаву 0,35-0,45 м/с);
Δ – розрахунок (при швидкості перемішування розплаву 0,15-0,25 м/с);
● – експеримент (без електромагнітного перемішування розплаву);
○ – експеримент (з електромагнітним перемішуванням розплаву)

Рисунок 2 – Зміна вмісту хрому в рідкому чавуні

Висновки. В результаті проведених експериментів і розрахунків отримані кінетичні параметри розчинення ферохрому в розплавах чавуну для температур 1350-1450º С. Витрата металу в каналі магнітодинамічної установки має бути ~2-5 кг/с, що забезпечує швидкість руху розчинника відносно шматків легуючих добавок на рівні 0,35-0,45 м/с. При дотриманні таких технологічних параметрів розчинення і засвоєння ферохрому у кількості 35 кг (~0,55-0,6% Cr на 6т чавуну-розчинника) відбувається за ~20 хв (швидкість розчинення 1,6-1,8 кг/хв) і продуктивність МДН-6Ч становить ~15 т/год хромового чавуну.

Список літератури

1. Гидродинамика и тепломассообмен процесса усвоения ферросплавов в металлическом расплаве [Текст] / А.С. Носков, А.Л. Завьялов, В.И. Жучков, А.В. Некрасов. – Свердловск: Препр. / АН СССР. Ин-т металлургии, 1987. – 68 с.
2. Физико-химические методы исследования металлургических процессов [Текст] / С.И. Филиппов, П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев, М.Г. Крашенников. – М.: Металлургия, 1968. – 551 с.
3. Должиков, А.А. Исследование процессов массопереноса при приготовлении жидких ферросплавов [Текст] / А.А. Должиков, А.М. Верховлюк // Сб. МГД в литейном произвдстве и металлургии. – К.: ИПЛ АН УССР, 1987. – С. 48-49.

Viktor Lomakin, Assos. Prof., PhD tech. sci., Vasil Klimenko, Prof., DSc., Andriy Lomakin
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
Viktor Dubodelov, Prof., DSc., Maksim Goryuk, Assos. Prof., PhD tech. sci.
Physical and technological Institute of metals and alloys academy of sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Investigation of the effect of temperature and speed of movement in the melt dissolution of alloying elements in the molten iron

The aim of the study was to determine the rational combination of the temperature of the metal-solvent and the rate of supply of the melt from the channel to the working capacity of the MDN-6CH unit in order to obtain the minimum dissolution time of ferrochrome and the maximum productivity in smelting the alloy with a given mass fraction of chromium.

It was explored and studied an influence of the heat-kinetic processes on a speed of ferrochromium dissolution in a liquid cast iron in a magnetodynamic mixer-feeder (MDN-6CH). It was done calculations of the chromium's convective diffusion and it was set the rational mode of magnetodynamic installation's operation when this installation was receiving a melt of the cast iron.

Calculations showed a practical test confirmed that at low doping iron with chromium (chromium content in molten less than 1%), minimum duration dissolution and homogenization of molten ferrochrome reached at the metal-solvent at a temperature 1380-1420º C. The consumption of metal in the channel of the magnetodynamic installation should be ~ 2-5 kg / s, which ensures the rate of movement of the solvent relative to the pieces of alloying additives at a level of 0.35-0.45 m/s.

alloy cast iron, chrome, magnetodynamic mixer, melt convection, diffusion

Одержано 19.04.17

УДК 621.432

С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук, С.С. Михайлюта, асп.
Ценральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
E-mail: marko60@ukr.net

Аналіз стану та перспективи розвитку технологічних методів зміцнення головок поршнів автотракторних двигунів

В статті розглянуто основні технологічні методи зміцнення головок поршнів автотракторних двигунів: вдосконалення складу і структури алюмінієвих сплавів і технології термічної обробки; застосування високоміцних вставок в зоні кільцевої канавки; розробка прогресивних систем масляного охолоджування поршня; армування алюмінієвих сплавів волокнами і дисперсними частинками, створення композиційної структури; розробка прогресивних конструкцій складового поршня; застосування зміцнюючих покриттів. Проаналізовано переваги та недоліки існуючих технологій. Виділено сучасні підходи що до моделі формування іонно азотованих поверхневих шарів, відзначено

© С.І. Маркович, С.С. Михайлюта, 2017

перспективність застосування методу іонного азотування з зазначенням переваг, шляхів розвитку та причин, що затрудняють широкому застосуванню даної технології в виробничому процесі.
автотракторні двигуни, головки поршня, вакуумне азотування в пульсуючому пучку плазми

С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук, С.С. Михайлюта, асп.
Центральноукраинский национальный технический университет, г.Кропивницкий, Украина
Анализ состояния и перспективы развития технологических методов укрепления головок поршней автотракторных двигателей

В статье рассмотрены основные технологические методы укрепления головок поршней автотракторных двигателей: совершенствование состава и структуры алюминиевых сплавов и технологии термической обработки; применение высокопрочных вставок в зоне кольцевой канавки; разработка прогрессивных систем масляного охлаждения поршня; армирование алюминиевых сплавов волокнами и дисперсными частицами, создание композиционной структуры; разработка прогрессивных конструкций составного поршня; применение укрепляющих покрытий. Проанализированы преимущества и недостатки существующих технологий. Выделены современные подходы что к модели формирования іонноазотованих поверхностных слоев, отмечена перспективность применения метода ионного азотирования с указанием преимуществ, путей развития и причин, что препятствуют широкому применению данной технологии в производственном процессе.
автотракторные двигатели, головки поршня, вакуумное азотирование в пульсирующем пучке плазмы

Удосконалення автотракторних двигунів внутрішнього згорання пов'язане з підвищенням експлуатаційних характеристик: тиск в камері згорання, числа оборотів колінчастого валу, питомої потужності на одиницю маси двигуна. Зростання експлуатаційних параметрів викликає неухильне підвищення робочої температури конструктивних елементів двигуна, особливо деталей циліндро поршньової групи [1].

Постановка проблеми. Посилювання режимів роботи машин і механізмів, зокрема зростання динамічних навантажень, викликає необхідність зниження маси деталей. Тому все більша перевага віддасться використовуванню в якості конструкційних матеріалів легким, але міцним металам і сплавам. Висока питома міцність і мала питома вага зумовили широке застосування в двигунобудуванні алюмінієвих сплавів. Проте великим недоліком цих матеріалів є низька теплостійкість. Рівень форсування сучасних автотракторних двигунів внутрішнього згорання досяг межі можливості алюмінієвих сплавів, що і є основним конструкційним матеріалом для виготовлення поршнів.

В результаті аналізу кінетики процесу горіння паливо-повітряної суміші у камері згорання автотракторних двигунів внутрішнього згорання встановлено, що постійна зміна тиску і температури призводить до пошкодження поверхні деталей циліндро пошньової групи, а саме головки поршня. Такий стан справ вимагає необхідність використання сучасних технологічних способів підвищення довговічності поршнів, тобто їх теплостійкості, та зростання питомої потужності двигуна в цілому [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні проблеми при розробці нових типів поршнів для карбюраторних і дизельних двигунів полягають в зниженні маси поршня, поліпшенні його теплового стану, підвищенні надійності і зносостійкості, зменшенні «шкідливого об'єму», визначуваного кільцевим зазором над першим поршневим кільцем, зниженні токсичних викидів, шуму і вібрацій.

Дефекти поршнів дизелів і бензинових двигунів внутрішнього згорання класифіковані і згруповані більше трьох десятків років тому [3], і на сьогоднішній день ситуація істотно не змінилася. До них відносяться: пошкодження днища, зони компресійних кілець, опорної поверхні поршня, а також пошкодження, пов'язані з поршневим пальцем і кромкою камери згорання.

У практиці двигунобудування щодо розробок поршнів склалися такі основні напрями: вдосконалення складу і структури Al - сплавів і технології термічної обробки; застосування високоміцних вставок в зоні кільцевої канавки; розробка прогресивних систем масляного охолоджування поршня; армування Al - сплавів волокнами і дисперсними частинками, створення композиційної структури; розробка прогресивних конструкцій складового поршня; застосування зміцнюючих покриттів.

Розглянемо переваги і недоліки цих напрямів. Чисельні дослідження направлені на підвищення механічних властивостей і зниження коефіцієнта термічного розширення матеріалів. Розробка жароміцних Al - сплавів йде по шляху їх легування Ni, Cu, Mg. Mn, V, Ti, B, Cr і Mo . Додаткове легування Cr і Mo забезпечує межу міцності $\sigma_в$ = 300 МПа і коефіцієнт термічного розширення $\alpha = 18 - 10^{-6}$ (19]. Проте підвищення вимог до довговічності сучасних дизелів показало неперспективність використання класичних Al-сплавів для виготовлення поршнів і традиційних методів їх виливання [4].

Проблему підвищення зносостійкості поршневої канавки вирішують заливкою чавунної високоміцної кільцевої вставки в зону верхньої поршневої канавки при виробництві поршня методом виливання. Як матеріал вставки застосовують високоміцні сплави Fe, леговані Cr, Ni, Cu. Mn і Mo [2,6].

Для підвищення зносостійкості верхньої поршневої канавки застосовують плазмово-дугову переплавку зони канавки з легуванням зони переплавки Ni, Cr, Fe на глибину до 10 мм з утворенням дисперсних твердих розчинів A1, Ni, Cr і Fe. У зоні переплавки механічною обробкою формують кільцеву канавку [3].

Високоміцна вставка підвищує зносостійкість і забезпечує рівномірність зносу деталей циліндро поршньової групи, але має ряд недоліків: збільшення маси поршня веде до зростання динамічної напруженості двигуна; погіршується тепловідвід з поршня через компресійне кільце у водоохолоджувану гільзу циліндра, що викликає підвищення загальної температури поршня в т.ч. зони верхньої поршневої канавки та інтенсивне відкладення вуглецю і закоксовування компресійного кільця; технологія лиття поршня з чавунною вставкою (так званий альфін-процес) в 2 рази дорожча, ніж лиття поршня без вставки [4].

Одним з напрямків підвищення довговічності поршня є застосування масляного охолоджування. З цією метою поршень виконується з кільцевою порожниною масляного охолоджування під днищем і в зоні поясу компресійних кілець. Застосування систем масляного охолоджування ускладнює конструкцію поршня і двигуна. При цьому прагнуть зменшити масу поршня без підвищення термічних напруг через відмінність коефіцієнту термічного розширення складових частин [5].

Розробляється напрямок створення складових поршнів. При цьому прагнуть зменшити масу поршня без підвищення термічних напруг через відмінність коефіцієнту термічного розширення складових частин. Конструкція складового поршня забезпечує прийнятний компроміс між його масою, механічними властивостями, довговічністю, оброблюваною і вартістю. Складові конструкції поршнів призначені для важко навантажених дизелів і забезпечують роботу з питомим тиском в з`єднаннях з поршневим пальцем більше 180 бар [10]. Подібна конструкція поршня складається з двох частин: високоміцної і жароміцної головки з поясом кільцевих канавок і бобишками під поршневий палець та "юбками" з A1-сплаву. Недоліки складових поршнів - ускладнення технології їх виготовлення, дорожчання виробництва, недостатня довговічність адгезійнного з'єднання різнорідних частин [7,6].

Одним з напрямів підвищення довговічності поршнів, зокрема підвищення зносостійкості кільцевої канавки - використовування армування за об'ємом Al - сплаву високо модульними волокнами і дисперсними частинками, тобто створення

композиційних матеріалів. У виробництві поршнів дизельних двигунів фірма Toyota використовує композити, зміцнені волокнами. Як зміцнююча арматура використовують короткі керамічні волокна $A1_2O_3 + SiO_2$ і Al_2O_3. До недоліків поршнів з композиційних матеріалів слід віднести знижені значення питомої теплопровідності і можлива загроза закоксовування кільця [6] .

Для зміцнення поршнів широке застосування знаходять покриття. Найбільш поширені гальванічні, хіміко-термічні, газотермічні методи, іонне плакування. Для захисту днища від прогару і зниження температури в зоні першої кільцевої канавки застосовують тверде анодування. Теплозахисне покриття на днище, що нанесено газотермічним методом, підвищує коефіцієнт корисної дії двигуна на 21%. Основний недолік, що властивий всім покриттям, полягає в їх розтріскуванні і відшаровуванні в умовах експлуатації [3,6].

Конструктивні особливості кільцевої канавки (висота в = 2 - 3 мм і глибина L > 5 мм) обмежують можливості традиційних технологій. Тому позитивні результати при зміцненні полиць кільцевої канавки одержані електронно-променевою, лазерною технологією, електроконтактним хромуванням, фрикційно-механічним натиранням, яке є варіантом хіміко-термічної обробки в твердій фазі і використовує тепло тертя [7].

Метод електронатирання застосовують для відновлення юбки поршня і отворів в бобишках під поршневий палець. Відновлюють поршня з зносом юбки до 0,15 мм. Процес поршня проходить при великих щільностях струму, що забезпечує високу продуктивність процесу. Для відновлення поршнів з алюмінієвих сплавів застосовують залізо - цинковий електроліт. Анод виготовляють з цинку. При застосуванні залізо - алюмінієвого електроліту анод виготовляють з сталі.

Метод плазмового переплаву для відновлення і зміцнення поршневих канавок полягає в тому що в середовищі газу аргону переплавляється частина алюмінієвого сплаву з одночасним введенням присадочного дроту, який містить легуючі елементи. В процесі переплаву відбувається взаємодія легуючого матеріалу з алюмінієвим сплавом з утворенням твердих термостабільних алюмінідів. В залежності від хімічного складу поршня і кількості легуючих елементів міцність переплаву збільшується в 1,2-1,3 рази, твердість в 1,3-2 рази, зностійкість в 1,5-4 рази [7].

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^oC, тиск $(1,33\text{-}13)10^2$ Па, робоча напруга коливається від 400 до 1000 В [9].

Метод іонного азотування має цілий ряд переваг: можливість отримання тільки дифузійного шару на поверхні, на відміну від класичного азотування в аміаку, де нітридний шар є джерелом внутрішніх напружень на межі розподілу фаз та викликає крихкість й відшарування зміцненого шару при експлуатації; підвищення зносостійкості оброблених деталей до 5 разів [8]; відсутність деформації деталей після обробки та високий клас чистоти поверхні, що виключає необхідні при застосуванні інших методів поверхневого зміцнення додаткові доводочні операції; можливість регулювання процесу азотування для оптимізації дифузійних шарів по будові, фазовому складу та властивостях; більш низька, ніж в інших методах, температура обробки, завдяки чому у матеріалах не відбувається структурних перетворень [9]; збереження твердості азотованого шару після нагрівання до 650°С; можливість обробки

виробів необмежених розмірів та форм; відсутність токсичності та забруднення навколишнього середовища; скорочення тривалості обробки у 2...5 разів за рахунок зменшення часу нагрівання та охолодження садки й ізотермічного витримування; скорочення витрат робочих газів у 20... 100 разів, електроенергії – у 4 рази, додаткових матеріалів - на 50 % порівняно з іншими методами [8,9].

Ще однією суттєвою перевагою методу іонно плазмового азотування є те, що він може застосовуватися на різних стадіях життєвого циклу деталей циліндро поршньової групи як при їх виробництві, так і при відновленні. Застосування його на ранніх стадіях дозволить уникнути використання у наступному більш дорогих та екологічно небезпечних методів. Крім того, метод іонно плазмового азотування може застосовуватись у комплексі з іншими методами поверхневого зміцнення . Проводяться дослідження закономірностей насичення азотом у тліючому розряді металічних покриттів, попередньо нанесених із рідинно металевого носія на сталеву поверхню. Завдяки таким покриттям з'являється можливість заліковування дефектів типу пор та мікро трішин шляхом дифузійного насичення поверхневого шару металу. Розробляється комбінована технологія зміцнення поверхонь конструкційних сталей, яка полягає у лазерному легуванні нітридо утворюючими елементами з наступним азотуванням. С приклади успішного застосування методу іонно плазмового азотування для поверхневого зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів [10,11,12,13].

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка на основі проведеного літературного аналізу циклу теоретичних та практичних задач для цілеспрямованого продовження досліджень із метою установлення поряд із раніше відомими нових наукових фактів, їх систематизації, узагальнення і на цій підставі створення технологічного процесу вакуумного азотування в пульсуючому пучку плазми, що дозволить змінювати будову й властивості у необхідному напрямку, створювати поверхневі шари із заздалегідь заданими механічними властивостями для різноманітних умов експлуатації автотракторних двигунів.

Науковою основою для раціонального та ефективного досягнення мети доцільно використати системний підхід, а саме сукупність принципів та положень, що дозволяють розглядати підвищення теплостійкості поршнів як єдину систему з узгодженням діяльності всіх її підсистем.

Аналіз літературних джерел що до моделі формування іонно азотованих поверхневих шарів показав, що на сьогоднішній день теоретичні положення процесу характерні двома підходами.

Згідно з першою моделлю, атоми металу у плазмі тліючого розряду сполучаються з азотом, утворюючи при цьому нітриди. Потім на поверхні вони розпадаються (під дією бомбардування її падаючим потоком). Таким чином, відповідно до першої моделі. Азот поступає у поверхню в результаті утворення нітридів.

За другою моделлю, ведучу роль у процесі азотування у тліючому розряді відіграють атомарні іони азоту. Вони експериментально виявлені у прикатодних шарах газового середовища.

Необхідно зазначити, що існуючі на даний час підходи щодо застосування методу іонноплазмового азотування використовують лише окремі потенційні можливості його інтенсифікації та підвищення ефективності. На сьогоднішній день залишаються невирішеними питання щодо "вузьких місць" методу, зокрема недостатньо високої швидкості насичення поверхневих шарів металу азотом (через низький робочий тиск газу) та можливості переходу тліючого розряду у дуговий, що може призвести до оплавлення поверхні деталі, яку обробляють

На основі класифікації та аналізу основних технологічних процесів зміцнення поверхневих шарів обґрунтовано, що використання вакуумного азотування в

пульсуючому пучку плазми є єдиним способом, який дозволяє керувати структурою поверхневого шару та механічними властивостями в залежності від умов їх експлуатації.

Основними проблемами, які гальмують реалізацію потенційних можливостей технології вакуумного азотування в пульсуючому пучку плазми для підвищення питомої потужності двигунів, є відсутність аналізу і синтезу процесу модифікації поверхневого шару поршнів з метою надання їм кращих механічних властивостей в будь-яких умовах експлуатації. Такий стан стримує науково обґрунтоване їх використання та гальмує широке розповсюдження високоякісної технології.

Визначення закономірностей впливу теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів на характеристики ізотермічної та термоциклічної повзучості алюмінієвого сплаву створить основу для розробки принципу управління технологічним процесом з метою отримання максимальних значень питомої потужності автотракторних двигунів внутрішнього згорання.

Виходячи з результатів проблемного аналізу впровадження високотехнологічного екологічно безпечного енергозберігаючого обладнання та технології вакуумного азотування в пульсуючому пучку плазми дозволить підвищити питому потужністьі автотракторних двигунів за рахунок застосування поршнів з теплозахисними покриттями в умовах серійного виробництва.

Науковою основою для раціонального та ефективного досягнення мети планується використати системний підхід, а саме сукупність принципів та положень, що дозволяють розглядати підвищення теплостійкості поршнів як єдину систему з узгодженням діяльності всіх її підсистем. В основу покладається вивчення кожного елементу системи в його зв'язку й у взаємодії з іншими елементами, спостерігати за змінами, шо проходять у системі, виявляти специфічні системні властивості, висувати обґрунтовані припущення відносно закономірностей розвитку систем та визначати оптимальний режим її функціонування.

При цьому планується вирішити такі основні наукові та прикладні задачі:

Вивчити особливості впливу технологічних та експлуатаційних факторів на довговічність поршнів автотракторних двигунів внутрішнього згорання.

Розробити технологічний процес формування теплозахисних дифузійних шарів на алюмінієвих сплавах на базі системного аналізу результатів дослідження їх структурно-фазового складу, напружено-деформованого стану, тонкої будови, кінетики руйнування та механічних властивостей.

Розробити методики випробування та провести комплексні дослідження, що пов'язані з визначенням закономірностей впливу параметрів технологічного процесу вакуумного азотування в пульсуючому пучку плазми на ізотермічну та термоциклічну повзучість алюмінієвих сплавів від одночасного впливу конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів.

Провести на основі аналізу і синтезу значень ізотермічної та термоциклічної повзучості алюмінієвих сплавів із зміцненими дифузійними шарами оптимізацію технологічного процесу їх формування.

Висновок. На основі класифікації та аналізу основних технологічних процесів зміцнення поверхневих шарів обґрунтовано, що використання вакуумного азотування в пульсуючому пучку плазми є єдиним способом, який дозволяє керувати структурою поверхневого шару та механічними властивостями в залежності від умов їх експлуатації.

Встановлено, що основними проблемами, які гальмують реалізацію потенційних можливостей технології вакуумного азотування в пульсуючому пучку плазми для підвищення питомої потужності двигунів, є відсутність аналізу і синтезу процесу

модифікації поверхневого шару поршнів з метою надання їм кращих механічних властивостей в будь-яких умовах експлуатації. Такий стан стримує науково обґрунтоване їх використання, гальмує широке розповсюдження високоякісної технології і надає широкі перспективи для подальших досліджень.

Список літератури

1. Гречихин, Л.И. Двигатели внутреннего сгорания: физические основы технической диагностики и оптимального управления [Текст] / Л. И. Гречихин. – Минск : Навука і тэхніка, 1995. – 270 с.
2. Шалай А.Н. Как повысить долговечность поршня? [Текст] / А.Н. Шалай // Двигателестроение. – 1996. – №2. – С. 42-51.
3. Пат. 5028493 США, кл. C22C21/00. P02P3/00. Aluminium Alloy locAlly having a composite portion. Опубл. 02.07.91.
4. Кравченко, В.И., Квитка А.Л, Шалай А.Н. Оценка надежности поршней с камерой сгорания типа ЦНИДИ [Текст] / В.И. Кравченко, А.Л. Квитка, А.Н. Шалай // Двигателестроение. – 1991. – №5. – С. 15- 18.
5. Пат. 1817817 СССР, МКИ P02P3/22. Составной поршень с масляным охлаждением для ДВС. Опубл. 23.05.93. БИ №19.
6. Пат. 61442А Україна. Спосіб відновлення поршнів і антифрикційна композиція для його здійснення. Дудчак В.П. Опуб. 17.11.2003 Бюл. № 11**.**
7. Murakami Shoji. Plasma jet spcayed Alumina coating on automobile piston // SAE Techn. Pap. Ser. – 1987, №870158, p. 179-184.
8. Азотирование и карбонитрирование [Текст] / Р. Чаттерджи-Фишер, Ф.-В. Эйзелл, Р. Хоффманн и др.; пер. с нем. В. А. Федоровича; под ред. А.В. Супова. – М.: Металлургия, 1990. – 279 с.
9. Ляшенко, Б.А. О достоинствах технологии вакуумного азотирования [Текст] / Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковский // Оборудование и инструмент. – 2005. – №12. – С. 45-47.
10. Afonso, A. Development of fiber reinforsed aluminium alloy for diesel piston application [Text] / A. Afonso, G. Ferran, F. Chi // SAE Techn. Pap. Ser. – 1991. – №910632. – P. 1-9.
11. Пат. 5449421 США, МКИ C22C21/00. Aluminium alloy composite material with intermetallic compound finely dispersed in matrix amond reinforcing elements. Опубл. 12.09.95.
12. Заявка 4019983 ФРГ, МКИ P02P3/04. Leichtmetallkolben. Опубл. 02.01.92.
13. Yamaguchi Hiroshi. Technology of hard anodization and test of coating //Intern. Combust. Engine. – 1990. – 2009, №12. – p. 57-62.

Sergey Markovich, Assos. Prof., PhD tech. sci, Sergey Myhajlyta, post-graduate
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis and prospects of development of technological methods of strengthening of heads of pistons of auto of tractor engines

A research purpose is development on the basis of the conducted literaternogo analysis of cycle of theoretical and practical tasks for purposeful continuation of researches with the purpose of establishment next to before known new scientific facts, their systematization, generalization and on that ground creation of technological process of a vacuum nitriding in the pulsating bunch of plasma which will allow to change a structure and properties in necessary direction, to create superficial layers with the preliminary set mechanical properties for various external of avtotraktornikh engines environments.

The basic technological methods of strengthening of heads of pistons of auto of tractor engines are considered in the article: perfection of composition and structure of aluminium alloys and technology of heat treatment; application highly of strong insertions is in the area of circular ditch; development of the progressive systems of the oily cooling of piston; re-enforcement of aluminium alloys by fibres and dispersible particles, creation of composition structure; development of progressive constructions of component piston; application of strengthening coating. Advantages and lacks of existent technologies are analysed. Modern approaches are selected that to the model of forming of the ion nitrided superficial layers, perspective of application of method of the ionic nitriding is marked with pointing of advantages, ways of development and reasons which interfere with wide introduction of this technology in a production process.

an auto is tractor engines, heads of piston, vacuum nitriding in the pulsating bunch of plasma

Одержано 22.05.17

УДК 621.9.048.4

В.І. Носуленко, проф., д-р техн. наук, В.М. Шмельов, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
E-mail: 1shvm@mail.ru

Особливості електричної дуги в поперечному потоці рідини

Описано електричну дугу в поперечному потоці рідини. Наведено повна система рівнянь, що описує модель електродугової плазми, яка рухається, з умови припущення рівності температур усіх її компонентів. Основною задачею дослідження стало вивчення і опис особливостей і характеру взаємодії дуги з поперечним потоком рідини. Наведено кадри швидкісної кінозйомки дуги, що горить в поперечному потоці рідини в умовах розмірної обробки електричною дугою, яка переміщується по поверхні електродів, причому переміщення дуги носить дискретний характер, тобто дуга після деякого вистоювання на місці переміщується на іншу, частіше ближню ділянку, або ж виникає в іншому місці поміж електродами.
електрична дуга, магнітна індукція, електричне поле, силове поле, магнітне поле, трикутник взаємоперетворень, стовп дуги

В.И. Носуленко, проф., д-р техн. наук, В.Н. Шмелев, доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина
Особливості електричної дуги в поперечному потоці рідини

Описано электрическую дугу в поперечном потоке жидкости. Приведена полная система уравнений, которая описывает модель электродуговой плазмы, движущейся из условия предположения равенства температур всех ее компонентов. Основной задачей исследования стало изучение и описание особенностей и характера взаимодействия дуги с поперечным потоком жидкости. Приведены кадры скоростной киносъемки дуги, горящей в поперечном потоке жидкости в условиях размерной обработки электрической дугой, которая перемещается по поверхности электродов, причем перемещение дуги носит дискретный характер, то есть дуга после некоторого выстаивания на месте перемещается на другой, чаще ближайший участок, или же возникает в другом месте между электродами.
электрическая дуга, магнитная индукция, электрическое поле, силовое поле, магнитное поле, треугольник взаимопревращений, столб дуги

Постановка проблеми. Електрична дуга в поперечному потоці рідини раніше не була об'єктом досліджень. Проте досліджувалися дуги в поперечному потоці газу [1, с. 88…90]. За існуючими уявленнями, процеси в дузі, що обдувається, складні і різноманітні. В цілому цей комплекс взаємопов'язаних процесів можна описати системою рівнянь, які включають себе закони збереження мас, імпульсів, зарядів і енергії, закони електромагнітного поля і переносу, а також залежності термодинамічних і кінематичних властивостей і параметрів стану системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Повна система рівнянь, що описує модель електродугової плазми, яка рухається, з умови припущення рівності температур усіх її компонентів, може бути записана так [2, с. 14... 17]:

рівняння нерозривності

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\left(\rho \vec{\upsilon}\right) = 0 \qquad (1)$$

рівняння руху (імпульсів)

© В.І. Носуленко, В.М. Шмельов, 2017

$$\rho\frac{d\vec{v}}{dt}=\vec{g}\rho+\rho_e\vec{E}+\vec{j}\times\vec{B}-grad\ p+\vec{f}_\tau \tag{2}$$

рівняння енергії

$$\rho\frac{d\vec{\upsilon}}{dt}\left(h+\frac{\vec{\upsilon}^2}{2}\right)-\frac{\partial p}{\partial t}=\rho\vec{g}\cdot\vec{\upsilon}+\vec{j}\cdot\vec{E}+div\left(\lambda\ grad\ T\right)+q_r+q_\tau, \tag{3}$$

де, окрім загальноприйнятих позначок; ρ_e – густина зарядів;

q_r – потік випромінювання;

g – прискорення сили тяжіння;

f_τ – сила внутрішнього тертя

$$\vec{f}_\tau=\left(2\mu+\mu_1\right)grad\ div\,\vec{\upsilon}-\mu\ rot\ rot\,\vec{\upsilon}+\left[2\left(grad\,\mu\nabla\right)\vec{\upsilon}+div\vec{\upsilon}\cdot grad\mu_1+grad\mu\times rot\vec{\upsilon}\right]; \tag{4}$$

q_τ – робота сил внутрішнього тертя

$$q_\tau=div\left\{\mu\left[grad\frac{\vec{\upsilon}^2}{2}+\left(\vec{\upsilon}\nabla\right)\vec{\upsilon}\right]+\mu_1\vec{\upsilon}\,div\,\vec{\upsilon}\right\}, \tag{5}$$

де μ – в'язкість; $\mu_1=-\left(2/3\right)\mu$.

Електромагнітні величини пов'язані рівняннями Максвела і узагальненим законом Ома:

$$rot\,\vec{E}+\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}=0; \tag{6}$$

$$div\,\vec{D}=\rho_e; \tag{7}$$

$$div\,\vec{B}=0; \tag{8}$$

$$rot\,\vec{H}=j+\frac{\partial\vec{D}}{\partial t}; \tag{9}$$

$$\vec{j}=\sigma\vec{E}. \tag{10}$$

Магнітна індукція B і напруженість магнітного поля H, електрична індукція D і напруженість електричного поля E пов'язані співвідношеннями:

$$\vec{B}=\mu_e\vec{H}\ ;\ \vec{D}=\varepsilon_e\vec{E}, \tag{11}$$

де μ_e – магнітна проникність; ε_e – діелектрична постійна середовища.

Записана система рівнянь завершується рівнянням стану:

$$P=R_0\rho T\cdot M^{-1}, \tag{12}$$

де M – молекулярна вага;

R_0 – абсолютна газова постійна.

Постановка завдання. Описана система рівнянь повинна відображувати особливості електричної дуги в поперечному потоці рідини. Згідно викладеного, основною задачею дослідження повинно стати вивчення і опис особливостей і характеру взаємодії дуги з поперечним потоком рідини. При цьому основним фактором такої взаємодії, як зазначалось, є динамічний тиск потоку рідини.

Виклад основного матеріалу. Дуга в поперечному потоці рідини в умовах РОД горить при малих міжелектродних зазорах, що складають десяті долі міліметра. Течія рідини в таких зазорах має ряд особливостей. До того ж на гідродинамічний режим впливають і інші процеси: горіння розряду, який перемішується і змінюється за формою і розмірами, поява в рідині газоподібних і твердих включень, нагрівання рідини, зміна мікро- і макрогеометрії міжелектродного зазору. Відповідний аналіз і

розрахунки показують, що в умовах РОД можуть спостерігатись як ламінарний так і турбулентний режим руху рідини.

Як показують, зокрема, кадри швидкісної кінозйомки, дуга, що горить в поперечному потоці рідини в умовах РОД, переміщується по поверхні електродів, причому переміщення дуги носить дискретний характер, тобто дуга після деякого вистоювання на місці переміщується на іншу, частіше ближню ділянку, або ж виникає в іншому місці поміж електродами. Середня швидкість переміщення дуги приблизно на один порядок менша швидкості потоку рідини. Тобто можна розглядати такий випадок, коли дуга нерухома, а потік рідини обтікає її. Але в такому випадку потік рідини повинен чинити на стовп дуги (як і на будь яке інше стороннє тіло) механічну дію (тиск), характер якого відображено на рис.1 епюрою тисків. При цьому максимальний тиск потоку рідини на стовп дуги P_{max} являє собою динамічний тиск P_d.

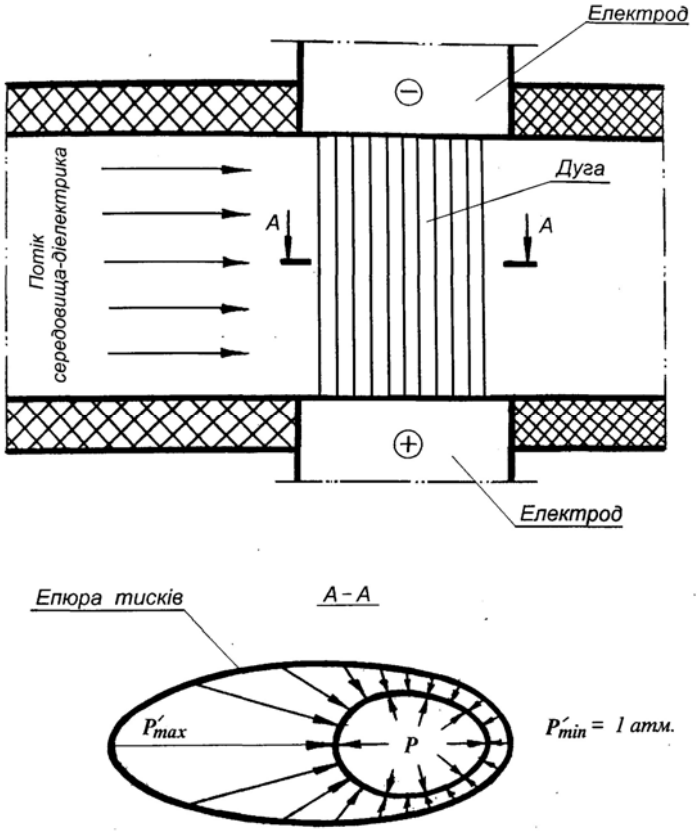
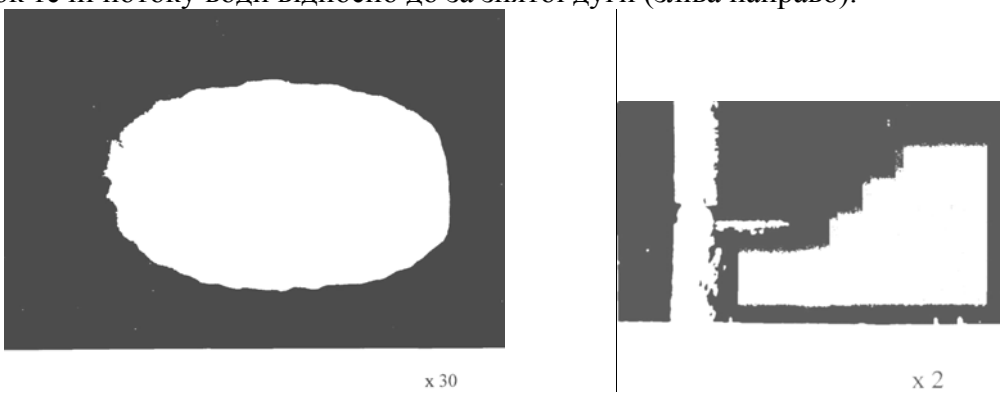


Рисунок 1 – Епюра тисків поперечного потоку рідини в стовпі дуги

Легко визначити, що максимальні тиски поперечного потоку рідини на стовп дуги можуть бути значними. Так, при горінні дуги в поперечному потоці води, що тече зі швидкістю 50 м/с, максимальний тиск потоку на стовп дуги складає 1,25 МПа, тоді як зі зворотної сторони дуги тиск води на стовп дуги не перевищує 0,1 МПа (1 атм.). Це обумовлює однобічний тиск потоку води на стовп дуги, в зв'язку з чим існування дуги, здавалось би, можливе лише в такому випадку, коли стовп дуги буде мати достатню "механічну міцність" (інакше він буде зруйнований), а поміж стовпом дуги і електродами будуть проявляти себе сили взаємного "механічного зчеплення" (оскільки інакше дуга повинна переміщуватись разом з потоком зі швидкістю потоку), що, як зазначалось, в дійсності не спостерігається. При цьому, чим більше динамічний тиск потоку, тим більшу "механічну міцність" повинен мати стовп дуги і тим більше повинні проявляти себе сили взаємного "механічного зчеплення" стовпа дуги з електродами. Проте, для таких припущень немає достатніх підстав. Тому особливого

пояснення вимагає факт існування дуги в поперечному потоці рідини. Для цього звернемось до даних експериментальних досліджень.

На рис 2, *а*. показано кадр швидкісної кінозйомки дуги, яка горить в поперечному потоці води поміж мідним анодом (розташований зверху, на знімку не показаний) і графітовим катодом (знизу); струм дуги I = 250 А, динамічний тиск потоку води $P_д$ = 0,3 МПа, частота кінозйомки 4000 кадр/с , експозиція 1/20000 с, збільшення в 30 разів. На рис. 2, *б.* приведено той же кадр швидкісної кінозйомки при збільшенні в два рази, що дозволяє визначити місцезнаходження дуги поміж електродами, а отже і напрямок течії потоку води відносно до за знятої дуги (зліва направо).



а) б)

а) власне дуги; б) дуги поміж електродами

Рисунок 2 – Кадр швидкісної кінозйомки дуги

Така дуга має достатньо чіткі оптичні межі і лише зліва зі сторони потоку рідини, що рухається, на ділянці максимального динамічного тиску потоку бічна поверхня стовпа дуги має розмитий контур, що свідчить про наявність у стовпа дуги деякої перехідної зони. Це дозволяє припустити, що в цій перехідній зоні відбувається інтенсивне термічне руйнування потоку за рахунок випаровування рідини теплом дуги, тобто має місце термічна взаємодія дуги з потоком. Результатом такої взаємодії є, як це зазначалось, саморегулювання геометричних і енергетичних характеристик дуги в функції динамічного тиску потоку. Пояснимо цей факт.

Стовп дуги може розглядатись як зрівноважена саморегулююча система. Пояснюється це наступним. «В плазмі стовпа дуги присутні частки трьох видів. Тому можна говорити про температури електронного T_e, іонного T_i і нейтрального T_a газів. У випадку, якщо вони відрізняються, рівновага є частковою. В крайньому випадку, коли температура всього комплексу часток стає однаковою, плазму називають ізотермічною, а термодинамічну рівновагу повною. Умовам повної рівноваги ідеально відповідають замкнені системи, Що ізольовані від оточуючого середовища. Дугу не можна віднести до їх числа, оскільки вона є типово відкритою системою, стаціонарний стан якої обумовлено рівністю енергії, що виділяється в ній та тією,що відводиться в оточуюче середовище. Проте стаціонарний стан таких систем задовольняє Умовам термодинамічної рівноваги, якщо витримується принцип детальної рівноваги, який потребує зворотності фізичних механізмів прямих і зворотних енергетичних процесів і рівності їх швидкостей. Практично це означає, що стовп дуги не може знаходитись в строгій термодинамічній рівновазі. Вона може бути лише приблизною. Проте її законами можна користуватись для опису стану такої системи» [3, с.31 ...32].

Відомо, що коли на систему, яка знаходиться в стані рівноваги, діяти зовнішнім фактором, що виводить систему з рівноваги, то рівновага зміщується в тому напрямку, при якому ефект зовнішньої дії послаблюється (принцип зміщення рівноваги Ле-

Шательє). Тому при горінні дуги в поперечному потоці рідини при зміні динамічного тиску потоку рідини в результаті процесів саморегулювання в дузі її характеристики повинні змінюватись таким чином, щоб ослабити ефект зовнішньої дії (ефект зміни динамічного тиску потоку) і забезпечити горіння дуги в нових умовах. І дійсно, як це було показано вище в результаті експериментальних досліджень, при збільшенні (зменшенні) динамічного тиску потоку рідини геометричні характеристики дуги, що визначаються площею поперечного перерізу і довжиною, зменшуються (збільшуються), а енергетичні характеристики дуги, які визначаються перш за все напруженістю електричного поля і густиною струму, збільшуються (зменшуються), що необхідно розглядати як результат саморегулювання геометричних і енергетичних характеристик дуги в функції динамічного тиску потоку.

Опишемо вірогідний фізичний механізм такого саморегулювання, що є результатом взаємодії дуги з потоком рідини. Описати таке явище в термінах Фундаментальних часток і їх взаємодії поки що неможливо. Тому розглянемо Що взаємодію з макроскопічної точки зору, з точки зору взаємодії двох систем Дуги і поперечного потоку рідини. Згідно уявлень сучасної фізики, будь-яка взаємодія реалізується через деякі поля.

Електрична дуга, як зазначалось, це породження того, що ми називаємо електричним полем, це матеріальна форма прояву електричного поля, це, на відміну від металевих провідників струму, «оголена» форма існування електричного поля, яке таким чином, має безпосередній контакт із зовнішнім середовищем, взаємодіючи з ним, і чим, власне, пояснюються тонкі механізми саморегулювання дуги в функції складу і стану зовнішнього середовища. Потік рідини – це силове поле. Нагадаємо, що силове поле – це будь-яка причина, що викликає рух чи зміну руху.

Таким чином, взаємодію дуги з потоком рідини (і взагалі будь-якого середовища-діелектрика) треба розглядати як взаємодію електричного поля, яке характеризується струмом I і такими енергетичними характеристиками як напруженість електричного поля E і густина струму j, та силового поля, яке характеризується динамічним тиском потоку P_d. Основним результатом будь-якої взаємодії є те, що системи, які взаємодіють, змінюються з певними наслідками. В нашому випадку в результаті взаємодії з поперечним потоком рідини спостерігається саморегулювання енергетичних характеристик дуги E і j в функції динамічного тиску потоку P_d. Тобто, в результаті взаємодії дуги (електричне поле) з потоком рідини (силове поле) змінюються характеристики дуги (електричного поля), змінюється її енергетична структура, змінюється стан плазми дугового розряду.

Так, наприклад, тиск плазми в стовпі такої дуги може досягати десятків і навіть сотень МПа. Щоб переконатись в цьому досить прийняти до уваги отримані значення E і j [4]. Але в такому випадку треба шукати силу, що стискує, утримує та зрівноважує тиск плазми в стовпі дуги. Залишаються також нез'ясованими і вимагають пояснення особливості існування дуги в умовах "механічної" взаємодії дуги з потоком. Наслідком взаємодії дуги з потоком є також факт Руху дуги в напрямку, поперечному до руху потоку рідини, який спостерігається, зокрема, при протіканні розряду між сталевими електродами при струмі I> 300...400 А і динамічному тиску потоку P_d> 0,3 МПа. Це також вимагає пояснень, але одночасно дозволяє більш визначено розглядати отриманий фізичний ефект взаємодії дуги з поперечним потоком рідини та дає підстави, щоб запропонувати наступну гіпотезу, яка пояснює всі наведені факти.

Згідно діючих уявлень, в даному випадку єдиною силою, яка може рухати дугу в напрямку, поперечному до руху потоку рідини, може бути тільки власне магнітне поле дуги. Причому, порівняно зі звичайними дугами типу зварювальних магнітна індукція

такого магнітного поля при інших рівних умовах (струм I і напруга U) помітно більша і є функцією не тільки струму (як це визначає закон Біо-Савара), але і динамічного тиску потоку, оскільки таке магнітне поле дуги рухає її в поперечному напрямку до напрямку руху потоку (при відсутності чи порівняно малих динамічних тисках поперечного потоку рідини такого не спостерігається). Визначеним в такому випадку є також напрямок вектора магнітної індукції такого магнітного поля дуги, що є несиметричним - він співпадає з напрямком руху робочої рідини (згідно правила лівої руки). Стає зрозумілою при цьому і «механічна» міцність такої дуги, бо потужне власне магнітне поле дуги відповідних характеристик, які визначаються динамічним тиском потоку, стискує, утримує і зрівноважує тиск плазми в стовпі дуги і, таким чином, забезпечує відповідну енергетичну структуру стовпа дуги, яка термічно руйнує потік рідини, що набігає на неї. Отримує пояснення також і наведений вище факт, коли дуга в поперечному потоці рідини рухається не разом з потоком і не з його швидкістю, бо знову таки, потужне власне магнітне поле Рухає дугу згідно розглянутого вище закону, сформульованого, як закон найменшого опору.

Тож, згідно викладеного, наявність власного потужного магнітного поля дуги, яка горить в поперечному потоці рідини (або іншого середовища-діелектрика), магнітна індукція якого (поля) є функцією не лише струму I, але й динамічного тиску потоку P_d, є наслідком і необхідною умовою існування дуги в екстремальних умовах поперечного потоку рідини. Визначимо магнітну індукцію такого поля.

На основі експериментальних даних можна зробити висновок, що магнітна індукція B власного поля дуги, яка горить в поперечному потоці середовища-діелектрика, пропорційна струму I і динамічному тиску потоку середовища-діелектрика P_d, залежить від напрямку потоку відносно стовпа дуги і може бути представлена виразом:

$$B = k \cdot I \cdot P_d \cdot \sin\alpha, \tag{13}$$

де k – коефіцієнт пропорційності, при відповідному виборі одиниць виміру k = 1;

α – кут між напрямком потоку і стовпом дуги; при горінні дуги в поперечному потоці середовища-діелектрика α = 90° і, відповідно, sinα=1.

Мовою векторної алгебри вираз (3.12) можна представити у вигляді:

$$\vec{B} = \vec{I} \times \vec{P}_d. \tag{14}$$

Отриманий вираз має принципове значення і важливі наслідки. Сформулюємо у найзагальнішому вигляді його фізичну суть. Приймемо до уваги, що I - це основна кількісна характеристика електричного поля, P_d - основна кількісна характеристика силового поля (яким є потік середовища-діелектрика).

Співвідношення (14) виражає, по суті, невідому раніше закономірність взаємодії електричного поля (дуги) і силового поля (потоку середовища-діелектрика), результатом якої є перетворення енергії електричного поля дуги в енергію власного магнітного поля прямо пропорційно векторного добутку струму дуги на динамічний тиск потоку середовища-діелектрика, яке (магнітне поле), в розглянутому нами випадку, стискує, утримує і зрівноважує тиск плазми в стовпі дуги високих енергетичних характеристик. Таким чином, в стовпі такої дуги (яка горить в поперечному потоці середовища-діелектрика) одночасно досягається одержання, і утримання плазми високих енергетичних характеристик.

Співвідношення (14) отримано нами для дуг в поперечному потоці середовища-діелектрика. Проте воно поширюється на всі дуги без виключення, бо завжди має місце взаємодія дуги із зовнішнім середовищем, яке характеризується відповідними

параметрами силового поля, а отже будь-яка дуга характеризується відповідними параметрами власного магнітного поля, що є функцією струму дуги та характеристик силового поля зовнішнього середовища. Таким чином електричну дугу можна розглядати не тільки як потужний перетворювач електричної енергії в тепло, але, зокрема, при горінні дуги в поперечних силових полях, ще і як ефективний перетворювач електричної енергії в енергію магнітного поля.

На відміну від існуючих уявлень про те, що магнітна індукція в усіх випадках є функцією тільки струму (закон Біо-Савара), вираз (14) установлює, що магнітна індукція є, окрім того, також результатом взаємодії електричного і силового полів, при якому енергія електричного поля перетворюється в енергію магнітного поля. Проте, якщо прийняти до уваги, що електричні і магнітні сили складають частини одного фізичного явища, - електромагнітної взаємодії часток [5, с. 276] і, відповідно, електричні і магнітні ефекти треба розглядати як різні сторони одного і того ж явища, що зветься електромагнетизмом, — зазначена закономірність не несе протиріч існуючим в цій області уявленням.

Зазначимо, що співвідношення (14) в відомих межах є аналогічним співвідношенням, що описують закон електромагнітної сили (закон Ампера) і закон електромагнітної індукції (закон Фарадея) з тією принциповою різницею, Що в першому випадку установлюється по суті, закон взаємодії електричного і Магнітного полів, результатом якої є перетворення енергії електричного поля в енергію силового поля; в другому випадку установлюється закон взаємодії силового і магнітного полів, результатом якої є перетворення енергії силового поля в енергію електричного поля; згідно запропонованої нами гіпотези установлюється закономірність взаємодії електричного і силового полів, результатом якої є перетворення енергії електричного поля в енергію магнітного поля, в зв'язку з чим така закономірність може бути названою законом магнітної індукції.

В аналогіях і спільності форм усіх зазначених закономірностей, в тому, що їх об'єднує і робить схожими, треба шукати спільність фізичної суті явищ, що розглядаються, яка (суть), очевидно, може бути сформульована як закономірність взаємоперетворення енергії електричного, магнітного і силових полів. В цьому зв'язку зручно прослідкувати за такими фактами взаємоперетворень енергій електричного *E,* магнітного *B* і силового *P* полів на умовній схемі (рис. 3), яка названа нами трикутником взаємоперетворення енергій електричного , магнітного і силового полів.

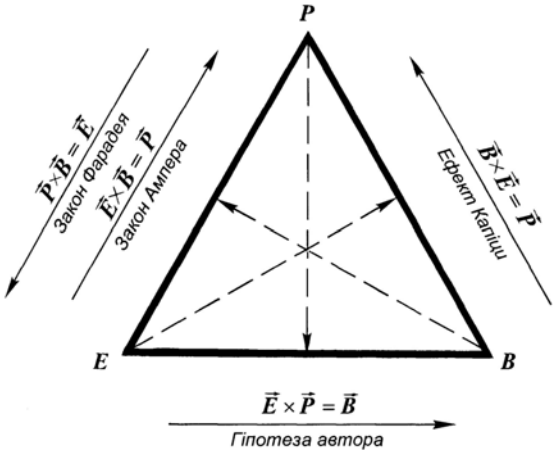


Рисунок 3 –Трикутник взаємоперетворень енергії електричного *E*, магнітного *B* та силового *P* полів

Якщо прийняти до уваги описані особливості дуги та запропоновану гіпотезу і, відповідно, співвідношення (14), то рівняння (2) і (3) приймають вигляд:

$$\rho \frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \vec{g}\rho + \rho_e \vec{E} + \vec{j} \times \vec{B}_* - grad\ p + \vec{f}_\tau , \quad (15)$$

$$\rho \frac{d}{dt}\left(h + \frac{\vec{\upsilon}^2}{2} \right) - \frac{\partial p}{\partial t} = \rho \vec{g}\vec{\upsilon} + \vec{j}\vec{E} + div(\lambda\ grad\ T) - div(\alpha\ \Delta T) - k\ \vec{j} \times \vec{P}_d + q_r + q_\tau , \quad (16)$$

де B_* – магнітна індукція власного магнітного поля дуги

$$\vec{B}_* = k_* \vec{j} \times \vec{P}_d , \quad (17)$$

де k і k_* – коефіцієнти розмірності;

α – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією;

ΔT – різниця температур.

Якщо наведену повну систему рівнянь (1 - 12 та 15, 16) максимально спростити, відкидаючи менш суттєві і залишаючи тільки найбільш важливі з них, то залишається ще достатньо складна система, розв‘язок якої наштовхується на значні математичні труднощі. Тому вона повинна стати об’єктом подальших досліджень.

Висновки: В підсумку зазначимо, що при реалізації дуги в поперечному потоці середовища-діелектрика, зокрема рідини, в результаті протікання в стовпі дуги процесів саморегулювання при збільшенні (зменшенні) динамічного тиску потоку енергетичні характеристики плазми в стовпі дуги (температура, концентрація часток, тиск) збільшуються (зменшуються); при цьому магнітна індукція власного магнітного поля дуги відповідно збільшується (зменшується), стискуючи, зрівноважуючи і утримуючи в стовпі дуги плазму отриманих високих енергетичних характеристик. Як наслідок, в стовпі такої дуги одночасно забезпечується як одержання, так і утримання плазми високих енергетичних характеристик, що в багато разів перевищує енергетичні характеристики плазми в стовпі відомих дуг і дозволяє розглядати таку дугу як якісно нове джерело тепла для науки і нових технологій.

Список літератури

1. Золотых, Б.Н. Физические основы электроискровой обработки металлов [Текст] // Б.Н. Золотых. – М.: Гостехиздат, 1953. – 107 с.
2. Теория термической электродуговой плазмы. Часть 1. Методы математического исследования плазмы / отв. редакторы: Жуков М.Ф., Коротеев А.С. – Новосибирск: Наука. – 1987. – 288 с.
3. Лесков, Г.И. Электрическая сварочная дуга [Текст] // Г.И. Лесков. – М: Машиностроение, 1970. – 335 с.
4. Носуленко, В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою [Текст] : Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07 “Процеси фізико-технічної обробки” / В. І. Носуленко. – К., 1999. – 32 с.
5. Фейман, Р. Фенмановские лекции по физике. Электричество и магнетизм [Текст] // Р. Фейман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М: Мир, 1977. – 300с.

Victor Nosulenko, Prof., DSc., Vitaliy Shmelyov, Assoc. Prof., Phd tech. sci.
Centralukrainian National Technical University, Kropivnitsky, Ukraine

Features of an electric arc in a cross flow of fluid

The paper purpose - Development of theoretical bases of an electric arc in a cross flow of fluid. Studying and the description of features and character of interaction of an arch with a cross flow of fluid.

In a paper describes an arc in a cross flow of fluid. Shows the complete system of equations that describes the model of electric arc plasma, moving from the condition that of equality of the temperatures of all her components. Shows frames from high-speed filming burning arc in a cross flow of fluid in conditions of dimensional processing by an electric arc, which moves along the surface of the electrodes, moving in an arc is discrete, that is, the arc after some standing in place moves to another, usually the nearest land, or arises in a different place between the electrodes.

Describes an electric arc in a cross flow of fluid as a source of magnetic energy. Described triangle interconversion energy magnetic, power, energy fields.

electric arc, magnetic induction, electric field, force field, magnetic field, triangle interconversions, the arc column

Одержано 13.05.17

УДК 621.981.02

Naser M. Elkhmri, Budar Mohamed R.F.
College of Engineering Technology – Janzour, Tripoli, Libya
Hamza Abobakr O.
Technical College of Civil Aviation & Meteorology, Tripoli, Libya
Igor Shepelenko, PhD
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
E-mail: *kntucpfzk@gmail.com*

Comparison between Experimental and Simulation Results of Bending Extruded Aluminum Profile

This paper focuses on the reliability of vehicle body structure made of aluminum alloy, it also investigates the influence of bending process on strength and forming quality of the part. The optimization of profile shape section during bending process is very crucial factor for the component reliability and forming quality. However, it is difficult to get ideal solution for optimization of forming process by using only theoretical analysis and experiments. Therefore numerical simulation based on finite element is used more and more to analyze the forming mechanism, to predict the defects and to optimize the process parameters. ABAQUS software shows detailed preprocessing steps of the profile design and formation followed by an accurate model to work on. The simulations allow investigating critical areas of the profile during the formation process. This paper studied the evolution of thickness deformation along the profile, the middle section was targeted since it is the most deformed area, then compared the variations of thickness between simulation and experiments in all cases using punch only and die-punch. The agreement between the experiments and the simulations is fairly good for most cases, which proves the validity of the established numerical model.
aluminum profile, bending process, numerical simulation, ABAQUS software

Насер М. Елкхмри, Будар Мохамед Р.Ф.
Инженерно-технологический колледж, Триполи, Ливия
Хамза Абобакр О.
Технический колледж гражданской авиации и метеорологии, Триполи, Ливия
И.В.Шепеленко, доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, Кропивницкий, Украина
Сравнение результатов экспериментов и расчетов моделирования изгиба штампованного алюминиевого профиля

В статье исследованы надежность конструкции кузова автомобиля из алюминиевого сплава, а также влияние процесса изгиба на прочность и качество штамповки детали. Оптимизация формы сечения профиля в процессе изгиба является важным фактором повышения надежности и качества изготовления деталей. Однако получение идеального решения при оптимизации процесса изгиба представляется сложным, используя лишь теоретический анализ и результаты экспериментов. Для анализа механизма формирования, прогнозирования дефектов и оптимизации параметров процесса изгиба возможно применение численного моделирования на основе метода конечных элементов. Программное обеспечение ABAQUS показывает этапы проектирования предварительной обработки профиля с последующим получением рабочей модели. Моделирование позволяет исследовать критические участки профиля в процессе их формирования. В статье исследовались наиболее деформированные области средней части профиля путем сравнения результатов моделирования и экспериментов. Корреляция между результатами моделирования и экспериментов доказывает обоснованность установленной численной модели.
алюминиевый профиль, процесс изгиба, численное моделирование, программное обеспечение ABAQUS

© Naser M. Elkhmri, Budar Mohamed R.F., Hamza Abobakr O., Igor Shepelenko, 2017

Introduction. In recent years aluminum profile is widely used in various fields such as aeronautics and automobile industries to get light product. As one of main forming process to obtain the profile part, bending becomes the major development direction of advanced plastic forming technology. The materials science, mechanics and computer application for manufacturing technology peristaltic the process of plastic forming technology and advanced numerical simulation [1]. The development of advanced forming technology in the promotion of science and technology, economic and defense modernization has an important role in the process. In the process of plastic bending profile, the product generally desire to achieve lightweight, high strength, high precision, high efficiency, low consumption and other requirements [2]. For this 21st century the plastic processing technology [3], research and development has advanced enormously, most developed for the automotive, aviation, and aerospace industry and has bringing a broad application prospects [4].

Source of project. In factory, the manufacturing process of parts such as machining, forming and welding will affect on the quality and service life of parts. Forming local of plate parts such as excessive thinning caused defect thickness deformation and cracks. Affecting the weld defects and temperature on the welding material properties and other factors such as local forming and welding deformation, will not only affect the appearance, will change the stress state and causing the error theory calculation model. So, the equation is; how to reduce or avoid these defects? To study this forming bending process is a meaningful subject.

This paper is based on above background, thickness deformation of bending extruded aluminum alloy profile, molded parts and analysis of the causes of defects is aim project research, the forming process of form and position at the same time of aluminum alloy profile into pieces to study thickness deformation on the part during the operation, explore and elimination of defect provides the reference for the design and manufacture of molding parts.

The object of study. The goal of this study is to optimize the bending process parameters and the profile section shape using numerical simulation. The simulation is realized using the finite element method software ABAQUS. The main contents of research work include ABAQUS, which uses to obtain an accurate model to work. The simulation gives information about the location of damage areas on the profile after bending. Also studied the evolution of thickness deformation along the profile, the middle section of profile was targeted since it is the area the most deformed. And compared the variations of thickness deformation between simulation and experiments results. There are similarities, but the values from the experiments are not accurate enough, and the simulation suffers from edge effect.

Analysis of finite element simulation. Generally, finite element simulation process is divided into the following;

Explicit algorithm. The explicit calculation also known as the central difference method, acceleration and velocity has the following hypothesis;

$$\ddot{u}_t = \frac{1}{\Delta t^2}\left(u_{t-\Delta t} - 2u_t + u_{t+\Delta t}\right) \tag{1}$$

$$\dot{u}_t = \frac{1}{2\Delta t}\left(u_{t-\Delta t} - u_{t-\Delta t}\right) \tag{2}$$

The two above-described relations is substituted into the equation of motion to get central difference method of recursive formula as follows;

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{1}{\Delta t}C\right)u_{t+\Delta t} = Q_t - \left(K_t - \frac{2}{\Delta t^2}M\right)u_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2}M - \frac{1}{2\Delta t}C\right)u_{t-\Delta t} \tag{3}$$

From above equation, at the current time only the displacement acceleration is related to the displacement of the previous time, the only means of solving current moment without iterative process [5].

Implicit algorithm. The implicit algorithm is relatively complicated, the widely used method is Newmark, the relationship between acceleration, velocity and displacement as follows;

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + \left[(1-\delta)\ddot{u}_t + \delta \ddot{u}_{t+\Delta t} \right] \Delta t \ , \tag{4}$$

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \dot{u}_t \, \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{u}_t + \alpha \ddot{u}_{t+\Delta t} \right] \Delta t^2 \ . \tag{5}$$

Substituted into the equations of motion can be obtained recursive formula as following;

$$\left(K_{t+\Delta t} + \frac{1}{\alpha \Delta t^2} M + \frac{\delta}{\alpha \Delta t} C \right) u_{t+\Delta t} = Q_{t+\Delta t} + M \left[\frac{1}{\alpha \Delta t^2} u_t + \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{u} + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{u}_t \right]$$
$$+ C \left[\frac{\delta}{\alpha \Delta t} u_t + \left(\frac{\delta}{\alpha} - 1 \right) \dot{u} + \Delta t \left(\frac{\delta}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{u}_t \right] \ . \tag{6}$$

From previous equation, the displacement, velocity and acceleration at any time are related to each other, this makes solving the equations of motion into a series of solving nonlinear equations, must be achieved through an iterative and simultaneous equations [6]. There are two problems need to be solved in the process of solution: first, is not necessarily can convergence of iterative process; second, simultaneous equations is possible to determine solution without terrible appearance. Therefore, for solving nonlinear implicit algorithm cannot guarantee the convergence. In addition, at each step of the calculation require iterative solution for equation of static equilibrium, the need to occupy a considerable amount of computing resources, disk space and memory [7].

ABAQUS software. ABAQUS/CAE is a finite element software, used complex system for modeling constraints and deformations [8]. It is composed of different modules; every module helps to describe the system. It is widely used in the vehicle, aerospace and industrial products. The product is popular with academic and research institutions due to the wide material modeling capability and the program's ability to be customized [9]. ABAQUS also provides a good collection of Multiphysics capabilities, such as coupled acoustic structural, piezoelectric and structural pore capabilities, making it attractive for production level simulations where needs multiple fields to be coupled.

Each complete finite element analysis depend on 3 separate stages;

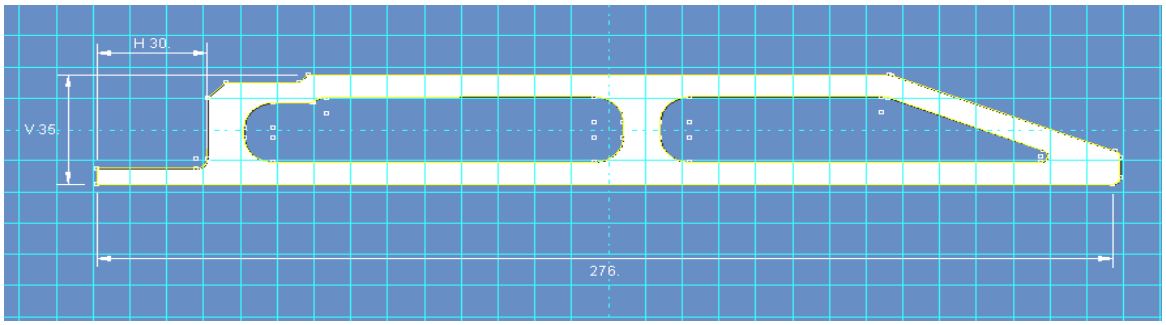
I. Pre-processing or modeling: This stage involves creating an input file which contains an engineer's design for a finite element analyzer.

II. Processing or finite element analysis: This stage produces an output visual file.

III. Post-processing or generating report, image, animation, etc. from the output file: This stage is a visual rendering stage.

Bending forming simulation & experimental verification

Characteristic of the profile part. In this paper we will work on vehicle structure profile as shown in the Picture 1, which made of aluminum alloy A6N01S with mechanical properties as shown in the table 1.



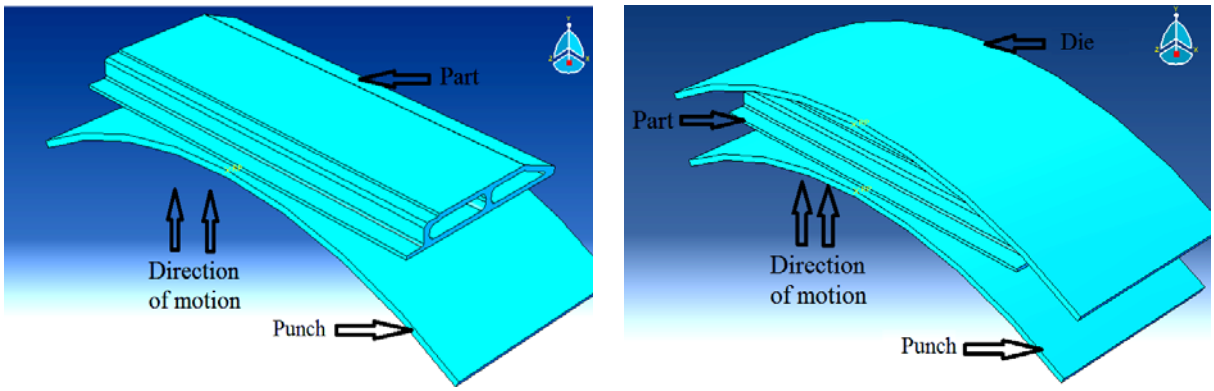
Picture 1 – Profile section size

Table 1 - Mechanical properties

Modulus of elasticity E / MPa	Yield strength $\sigma_{0.2}$/MPa	Poisson's ratio	Tensile strength (Mpa)	Strength coefficient K (Mpa)	Strain hardening Index n	Elongation %
66946	232.211	0.359	265.843	343.910	0.079 8	8

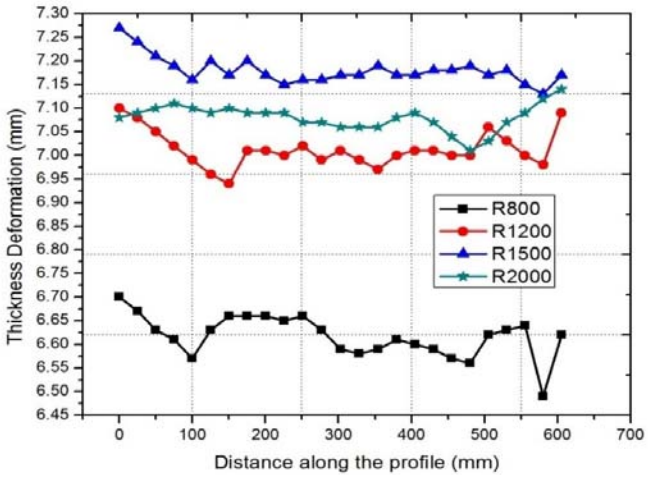
Many factors that affect the actual formation process, is not likely to be quite successful consistent with the application of the program, it is very complex. From here, to describe the process faster and more accurately, we choose the operation parameters is the key to control.

In this paper, the attention is paid to forming process and influence of die radius, therefore, in order to improve the computational accuracy and efficiency goals will use punch only & die-punch as shown in the Picture 2, by Using ABAQUS/CAE software, apply simulation process on the part such as (properties, assembly, step, interaction, load and mesh) can find the optimization amount of thickness deformation of the profile due to bending process for four types of radiuses (R800 – R1200 – R1500 – R2000) mm.



Picture 2 – Methods of bending

In the Picture 3, shown the thickness deformation along the profile of experimental results for all radiuses (R800 - R1200 - R1500 - R2000), where we can see from the graph most deformation is done at the ends of the profile, and the maximum thickness deformation for each radius is shown in the table 2, which notes that whenever die's radius increases, the value of thickness deformation decreases.

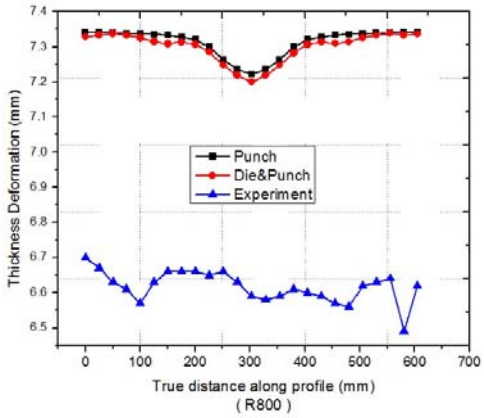


Picture 3 – Thickness deformation of experimental results for all radiuses

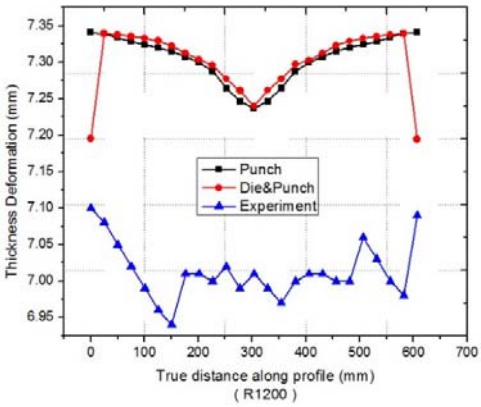
Table 2 - Experimental thickness deformation

Radius R (mm)	800	1200	1500	2000
Thickness Deformation (mm)	0.21	0.16	0.14	0.13

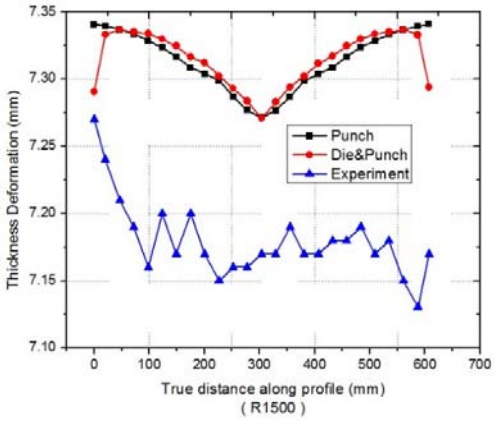
Comparison between thickness deformation of experimental results with thickness deformation of simulation results for each radius in punch only & die-punch.



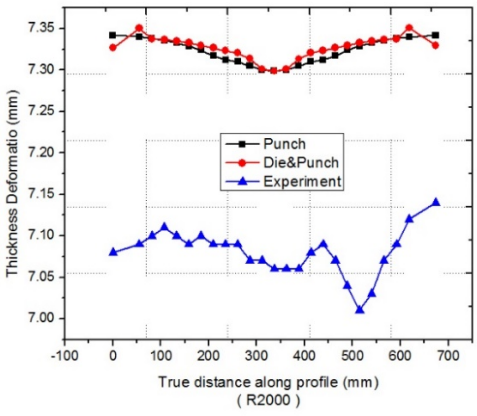
Picture 4 – Thickness deformation for radius (R800)



Picture 5 – Thickness deformation for radius (R1200)



Picture 6 – Thickness deformation for radius (R1500)

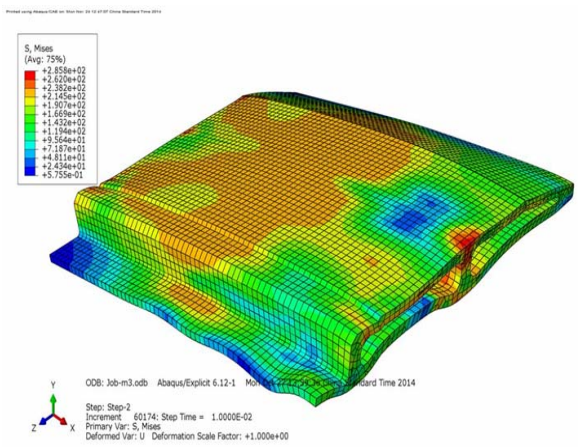


Picture 7 – Thickness deformation for radius (R2000)

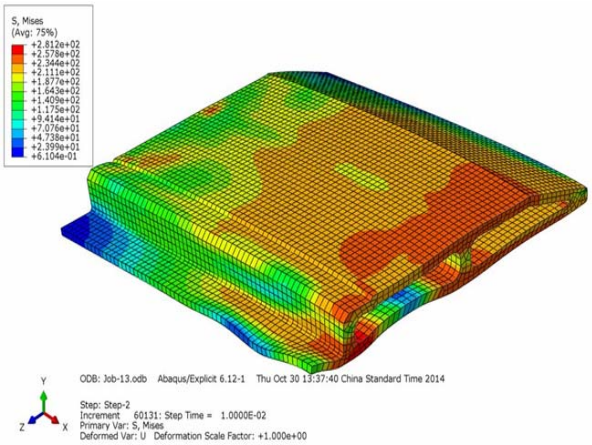
By focusing on the previous graphs, in case of radius R800 most thickness deformation done in the middle of profile. In bending process of radius R1200 and R1500, max. thickness deformation is occur in the middle of the profile when using punch only, while this deformation occur in the middle and ends of the profile in case of using die-punch. In radius R2000, when using punch only a small amount of thickness deformation done in middle of the profile, but in case of using die-punch the thickness deformation done at the ends and middle of profile, this refers to the contact between the punch and profile during bending process. In all cases, we note the amount of thickness deformation decreases whenever bending radius increase whether using punch only or using die-punch.

Table 3 - Max. Thickness Deformation of Simulation Results

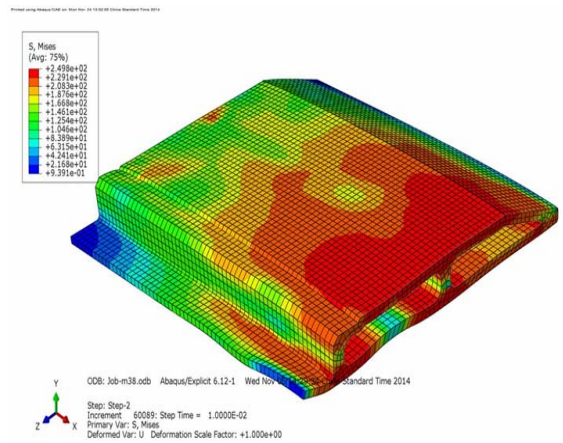
	R800		R1200		R1500		R2000	
Max. Thickness Deformation (mm)	Punch	Die-Punch	Punch	Die-Punch	Punch	Die-Punch	Punch	Die-Punch
	0.1204	0.1390	0.1045	0.1450	0.0697	0.0664	0.0430	0.0519



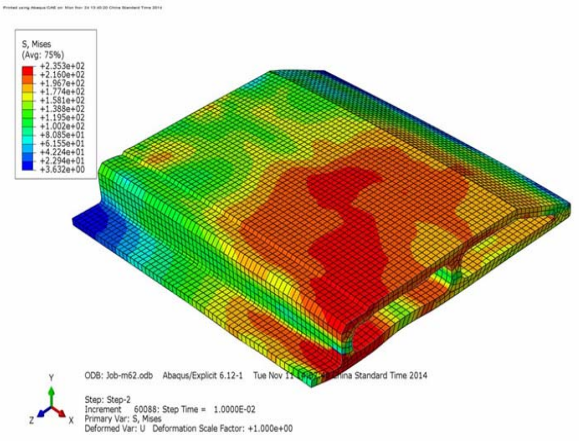
Picture 8 – Cross section in the middle of profile (R800)



Picture 9 - Cross section in the middle of profile (R1200)



Picture 10 - Cross section in the middle of profile (R1500)



Picture 11 - Cross section in the middle of profile (R2000)

When cut the profile from the middle, we notices clearly a distortion in the middle area during bending process as shown in the figures 8, 9, 10 and 11. The amount of distortion is greatest in case of R800 and this amount becomes less when bending radius becomes

bigger. Also this distortion causes irregularity in the external shape of the profile, this may cause problems during final assembly.

Conclusion. In this paper, permits to visualize the bending process of extruded aluminum profile, to know the problems that occur after bending process of the profile, such as thickness deformation and also, when cutting the profile from the middle, notes the presence of distortions in the internal shape of the profile due to bending process, this distortion increases whenever the radius decreases. Through the comparison between the experiments and simulation results, we can conclude that the optimization design which includes all the suitable parameters and in line with the actual manufacturing process of the profile, where faces less problems to obtain the best values of thickness deformation, when using die-punch of radius R1200.

Recommendation. Recommend to use ABAQUS software, its provide very convenient ways for modeling the profile. The simulation had to give us information about the location of critical area on the profile after bending process. It also helps to save money, time and effort to obtain the optimization results, which could be applied to the actual product in the industry.

To avoid distortion in the middle of the profile, we recommended to change the inner design of the profile with add support columns which help to reduce the amount of deformation taking into account that the weight and outer design of the profile are not changed.

References

1. Wang Yan Jin, DING Guo-hua, Wang Jun Nine, Aluminum car body manufacturing technology development status and prospects in China [J], welding, 2004 (10): 5-7.
2. Wu Liang group, sinus new, CSR Sifang: Road of independent innovation of high-speed train [J], to the world, 2008, 07: 50-54.
3. Mykhailo Chernovol. Appliances for FANT of cylinder liners/ Mykhailo Chernovol, Igor Shepelenko, Budar Mohamed R.F. // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин». 2016. – Вип.46. – С. 258-265.
4. Lvbi Feng, China's new generation of high-speed motor applications and integration manufacturing process technology [J], technological innovation and Herald, 2010, No.16: 85-87.
5. Miao Jin. Aluminum extrusions, sheet stretch forming simulation and contact problems. Beijing University of Aeronautics Postdoctoral Research Report, 2003.
6. Opheim B S. Bending of Thin-Walled Aluminum Extrusions [D]. Trondheim, Norway: Department of Structural Engineering, the Norwegian University of Science and Technology, 1996.
7. Lademo O G., Hopperstad O S, Pedersen K O. Modeling of plastic anisotropy in heat-treated aluminum extrusions[J], Journal of Material Processing Technology, 2002, 125-126.
8. Tryland T., Hopperstad O S, Langseth M. Design of experiments to identify material properties [J]. Materials and Design, 2000, 21:477-492.
9. Li S, Reid S R. Relationship between the elastic buckling of square tubes and rectangular plates [J]. Journal of Applied Mechanics, 1990, 57: 969.

Насер М. Елкхмрі, Будар Мохамед Р.Ф.
Інженерно-технологічний коледж, Тріполі, Лівія
Хамза Абобакр О.
Технічний коледж цивільної авіації та метеорології, Тріполі, Лівія
І.В. Шепеленко, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

Порівняння результатів експериментів і розрахунків моделювання вигину штампованого алюмінієвого профілю

У статті досліджені надійність конструкції кузова автомобіля з алюмінієвого сплаву, а також вплив процесу вигину на міцність та якість штампування деталі. Оптимізація форми перетину профілю в процесі вигину є важливим чинником підвищення надійності та якості виготовлення деталей. Метою

даної роботи є оптимізація параметрів процесу вигину штампованого алюмінієвого профілю, яка реалізовувалася чисельним моделюванням з використанням програмного забезпечення ABAQUS.

Програмне забезпечення ABAQUS засноване на методі кінцевих елементів для виконання віртуальних випробувань з використанням реалістичного моделювання, що допомагає скоротити витрати й час на розробку продукту, а також підвищити надійність виробів, що випускаються у машинобудуванні. Моделювання дозволяє знаходити та досліджувати критичні ділянки профілю в процесі їх формування. Використання програмного комплексу ABAQUS дозволило здійснити візуалізацію процесу вигину алюмінієвого профілю, дослідити дефекти, що виникають у процесі вигину профілю. Розглянуто найбільш деформовані області середньої частини профілю шляхом порівняння результатів моделювання й експериментів. Кореляція між результатами моделювання й експериментів доводить обґрунтованість встановленої чисельної моделі.

Для підвищення міцності алюмінієвого профілю рекомендовано змінити його внутрішню конструкцію, при цьому вага й дизайн профілю залишилися незмінним.

алюмінієвий профіль, процес вигину, чисельне моделювання, програмне забезпечення ABAQUS

Одержано 11.05.17

УДК 539.3

А.Ю. Лысых, канд. техн. наук
Первомайский политехнический институт НУК им. адмирала Макарова, г.Первомайск, Украина
E-mail: kobmargarita@mail.ru

Пространственное деформирование гибких конструкций, соединяющих судно-носитель и присоединенный объект

Приводится метод численного решения задачи колебания гибкого соединяющего звена морского назначения, основанный на совместном применении метода продолжения по параметру и метода Ньютона-Канторовича. Описаны способы приложения динамических нагрузок и постановки граничных условий. Приведены результаты решения задачи.

упругое деформирование, гибкий элемент, численные методы

А.Ю. Лисих, канд. техн. наук
Первомайський політехнічний інститут НУК ім. адмірала Макарова, м.Первомайськ, Україна

Просторова деформація гнучких конструкцій, які з'єднують судно-носій и приєднаний об'єкт

Розглянуто метод числового розв'язання задачі коливання гнучкої сполучаючої ланки морського призначення, побудований на сумісному застосуванні методу продовження по параметру і методу Ньютона-Канторовіча. Описані способи додавання динамічних навантажень і постановки граничних умов. Наведені результати рішення задачі.

пружна деформація, гнучкий елемент, чисельні методи

Постановка проблемы. Проблема транспортировки нефте- и газопродуктов с судна-носителя (СН) к присоединенному объекту (ПО) стала в последнее время особенно актуальной. Это обуславливает необходимость разработки и создания новых типов гибких конструкций, повышения их прочности и надежности. Таким соединяющим звеном могут быть гибкие армированные шланги, гибкие трубопроводы постоянной жесткости, гибкие бандажированные трубопроводы и т. п.

© А.Ю. Лысых, 2017

Сложные и тяжелые режимы работы системы СН-ПО сопряжены, как правило, с необходимостью специального изучения и определения действующих на них сил, учета сильной нелинейности разрешающих уравнений, возможности потери устойчивости равновесия, а также с требованием исследования поведения системы в закритических состояниях. Исследование этих процессов требует создания новых и модернизации известных математических моделей и алгоритмов, позволяющих, при определенных допущениях, оперативно определять напряженно-деформированное состояние гибкого соединяющего звена (ГСЗ) с помощью бортовых компьютерных систем.

ГСЗ представляют собой конструкции с усложненной геометрической структурой. Сложное очертание их осевой линии в произвольном временном отрезке эксплуатации вызвано различными факторами, в частности функциональным назначением конструкции. В общем случае криволинейные гибкие элементы подвергаются воздействиям произвольных статических (силовых или деформационных), а также динамических возмущений, обусловленных следующими факторами: силовым и кинематическим возбуждением гармонических колебаний; переносными, относительными и кориолисовыми силами инерции, вызванными сложным движением СН; гироскопическими силами; неконсервативными силами взаимодействия с внешними потоками; неоднородными центробежными силами инерции, возникающими при движении в ГСЗ.

Анализ последних исследований и публикаций. Решение таких задач оказывается возможным только современными методами нелинейного анализа, применение которых обуславливает выбор модификации разрешающих уравнений, обеспечивающих алгоритмичность и эффективность используемых подходов. До настоящего времени указанные исследования не получили необходимого развития из-за отсутствия достоверных математических моделей, которые могли бы достаточно просто и эффективно реализовываться в виде алгоритмов и программ для численного решения рассматриваемых задач.

Постановка задания. В данной работе рассматриваются вопросы напряженно-деформированного состояния ГСЗ некоторых конструктивных модификаций при действии статических или квазистатических нагрузок. В качестве базовой модели предлагается методика исследования деформирования гибких пространственно искривленных элементов, описанная в работах [1], [2]. При применении современных вычислительных алгоритмов с её помощью можно создать унифицированные методы исследования деформирования гибких подводных объектов, которые позволяют учитывать:

- неограниченность пространственного упругого деформирования;
- физико-геометрические параметры элементов с произвольными вдоль оси значениями изгибной и крутильной жесткостей;
- действие статических, квазистатических или динамических нагрузок, как угодно расположенных в пространстве;
- действие нагрузок от течения, волн, гидростатического давления.

Математическая модель базируется на известных подходах Лагранжа и Эйлера, которые описывают равновесие и деформирование гибкого элемента, его внешнюю и внутреннюю геометрию [4]. Ниже приведено краткое описание метода исследования.

Изложение основного материала. Введем исходные данные:

$\bar{n}$, $\bar{b}$, $\bar{\tau}$ – естественный трехгранник с единичными ортами главной нормали и касательной;

u, v, w – орты подвижного трехгранника;

$\bar{F}$, $\bar{M}$ – векторы внутренних усилий и моментов;

p, q, r – кривизны относительно орт подвижного трехгранника;

x, y, z – координаты независимой переменной s.

Представим систему разрешающих уравнений, которые описывают деформирование гибкого элемента, в таком виде:

$$x' = f(x, s, \lambda), \tag{1}$$

где $x(s) = (F_u(s), F_v(s), F_w(s), p(s), q(s), r(s), \tau_x(s), \tau_y(s), \tau_z(s), n_x(s); n_y(s), n_z(s), b_x(s), b_y(s), b_z(s), x(s), y(s), z(s))^T$ – вектор состояния (m=18),

f – вектор-функция правых частей системы уравнений;

λ – параметр интенсивности возмущения (нагружения).

Производная по s штрихом обозначена. Параметр λ может быть как действительным, так и формальным, отображающим количественные характеристики задачи.

Сформулированная таким образом в области $0 \le s \le S$ изменения независимой переменной s система разрешающих уравнений (1) имеет общий восемнадцатый порядок. Наличие шести первых интегралов

$$\left|\bar{\tau}\right| = 1,\ \left|\bar{n}\right| = 1,\ \bar{\tau}\bar{n} = 0,\ \bar{\tau} \times \bar{n} = \bar{b} \tag{2}$$

позволяет уменьшить ее порядок до двенадцатого. Методика решения поставленной задачи основана на совместном использовании метода продолжения по параметру и метода Ньютона-Канторовича. На краю s=0 интервала $0 \le s \le S$ изменения переменной s заданы шесть независимых краевых условий $\varphi\left[\bar{x}(0)\right] = 0$ и шесть вытекающих из первых интегралов уравнений связи $\bar{\theta}\left[\bar{x}(0)\right] = 0$. Для замыкания системы уравнений достаточно на краю s=S задать шесть независимых краевых условий $\bar{\psi}\left[\bar{x}(s)\right] = 0$. В сформулированных краевых уравнениях $\bar{\varphi}, \bar{\theta}, \bar{\psi}$ обозначают шестимерные векторы-функции.

Пусть при некотором значении λ=$\lambda^{(n)}$ известно решение $\bar{x}^{(n)}(S)$. Дадим малое приращение $\delta\lambda^{(n)}$ параметра λ. Тогда соответствующую ему вариацию $\bar{\delta}\bar{x}^{(n)}(S)$ решения $x^{(n)}(S)$ можно найти из линейного уравнения

$$\frac{d\delta\bar{x}^{(n)}}{ds} = \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{x}}\delta\bar{x}^{(n)} + \frac{\partial \bar{f}}{\partial \lambda}\delta\lambda^{(n)}, \tag{3}$$

полученного линеаризацией системы разрешающих уравнений. Краевые уравнения для функции $\delta(x)^{(n)}$ формируются линеаризацией начальных нелинейных краевых уравнений

$$\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \bar{x}}\delta\bar{x}^{(n)}(0), \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{x}}\delta\bar{x}^{(n)}(0), \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{x}}\delta\bar{x}^{(n)}(S) = 0. \tag{4}$$

Для построения $\delta\bar{x}^{(n)}(S)$ выберем среди составляющих $\delta\bar{x}_i^{(n)}(S)(i=1,2,3,...18)$ такие шесть компонент $\delta\bar{x}^{(n)}(S)$, любые значения которых $\delta_j^{(n)}(0)$ не изменяют первые два векторные уравнения системы (4). Перенумеруем неизвестные $\delta\bar{x}_i^{(n)}(s)(i=1,2,3,...18)$ так, чтобы индекс j принимал значения значения j =1,2,3,...6. Тогда решение задачи (4) можно представить в виде

$$\delta\bar{x}^{(n)}(s)=\bar{y}_\lambda\delta\lambda^{(n)}+Y(s)\delta\bar{c}^{(n)}, \tag{5}$$

где $\bar{y}_\lambda(s)$ – решение задачи Коши для системы

$$\frac{d\bar{y}_\lambda}{ds}=\frac{\partial\bar{f}}{\partial x}\bar{y}_\lambda+\frac{\partial\bar{f}}{\partial\lambda} \tag{6}$$

при нулевых начальных условиях,

Y(s) – матрица размера m×6 решений системы

$$\frac{d\nu}{ds}=\frac{\partial f}{\partial x}y \tag{7}$$

с начальными условиями $y_j(0)=(\delta_1^j,\delta_2^j,...,\delta_6^j)(j=1,2,...6)$ для независимых переменных, для других переменных – $y_i(0)(i=7,8,...,18)$.

Вектор постоянных $\delta c^{(n)}=\left\{\delta c_1^{(n)},\delta c_2^{(n)},...,\delta c_6^{(n)}\right\}$ подбирается из уравнений

$$\frac{\partial\overline{\psi}}{\partial\bar{x}}Y(S)\delta\bar{c}^{(n)}=-\frac{\partial\overline{\psi}}{\partial\bar{x}}\bar{y}_\lambda(S)\delta\lambda^{(n)}\ . \tag{8}$$

Выбирая состояние $x^{(n+1)},\lambda^{(n+1)}$ как порождающее, вариацией параметра λ его можно продолжить на величину $\delta x^{(n+1)}$. Построение матриц *Y(s)* на каждом шаге варьирования параметра λ осуществляется методом Рунге-Кутта четвертого порядка. Количество шагов интегрирования и точек дискретизации по длине элемента зависит от многих факторов: количества и характера действующих по длине нагрузок, меры нелинейности процесса и т.п. Практическая реализация метода осуществляется в виде программ расчета на ЭВМ. При этом продолжительность расчета в зависимости от сложности задачи не превышает 15-20 мин для ПЭВМ с оперативной памятью 260 Мбт и частотой 2100 МГц.

При постановке граничных условий могут рассматриваться различные варианты закрепления концов ГПЗ. Для данного случая принимаем, что масса СН и масса ПО несоизмеримы, то есть $m_{\text{СН}} >> m_{\text{ПО}}$, поэтому один из концов ГПЗ можно считать жестко защемленным, а другой – свободным. Деформирование гибкого упругого шланга за счет пространственного перемещения одного из его концов показано на рис. 1 в аксонометрической проекции и в проекциях на ортогональные плоскости.

Для такого случая деформирования принимались следующие граничные условия:

при s=0 $-F_u=0,\ F_v=0,\ F_w=0,\ p=p_0,\ q=q_0,\ r=r_0$;

при s=S $-\tau_x=\tau_x(0),\ \tau_y=\tau_y(0),\ n_z=n_z(0),\ F_u=0,\ F_v=0,\ F_w=0.$

При этом на любом этапе деформирования в любом сечении или в агрегатном состоянии возможен визуальный контроль на дисплее необходимых характеристик напряженно-деформированного состояния. В качестве примера можно привести график (рис. 2), отображающий значения внутренних усилий в поперечных сечениях.

В общем случае на ГСЗ действует целый комплекс различных нагрузок. Такой нагрузкой может быть набегающее подводное течение, действующее под изменяющимся углом к осевой линии ГСЗ. Величина такой нагрузки задается известными соотношениями из гидромеханики.

Изменение же угла атаки отслеживается перераспределением значения параметра нагружения λ между трехгранниками x, y, z; u, v, w; n, b, τ:

$$F_u = (P_x n_x + P_y n_y + P_z n_z)\cdot q/\sqrt{p^2+q^2} + (P_x b_x + P_y b_y + P_z b_z)\cdot p/\sqrt{p^2+q^2},$$
$$F_v = -(P_x n_x + P_y n_y + P_z n_z)\cdot p/\sqrt{p^2+q^2} + (P_x b_x + P_y b_y + P_z b_z)\cdot q/\sqrt{p^2+q^2}, \qquad (10)$$
$$F_w = P_x \tau_x + P_y \tau_y + P_z \tau_z.$$

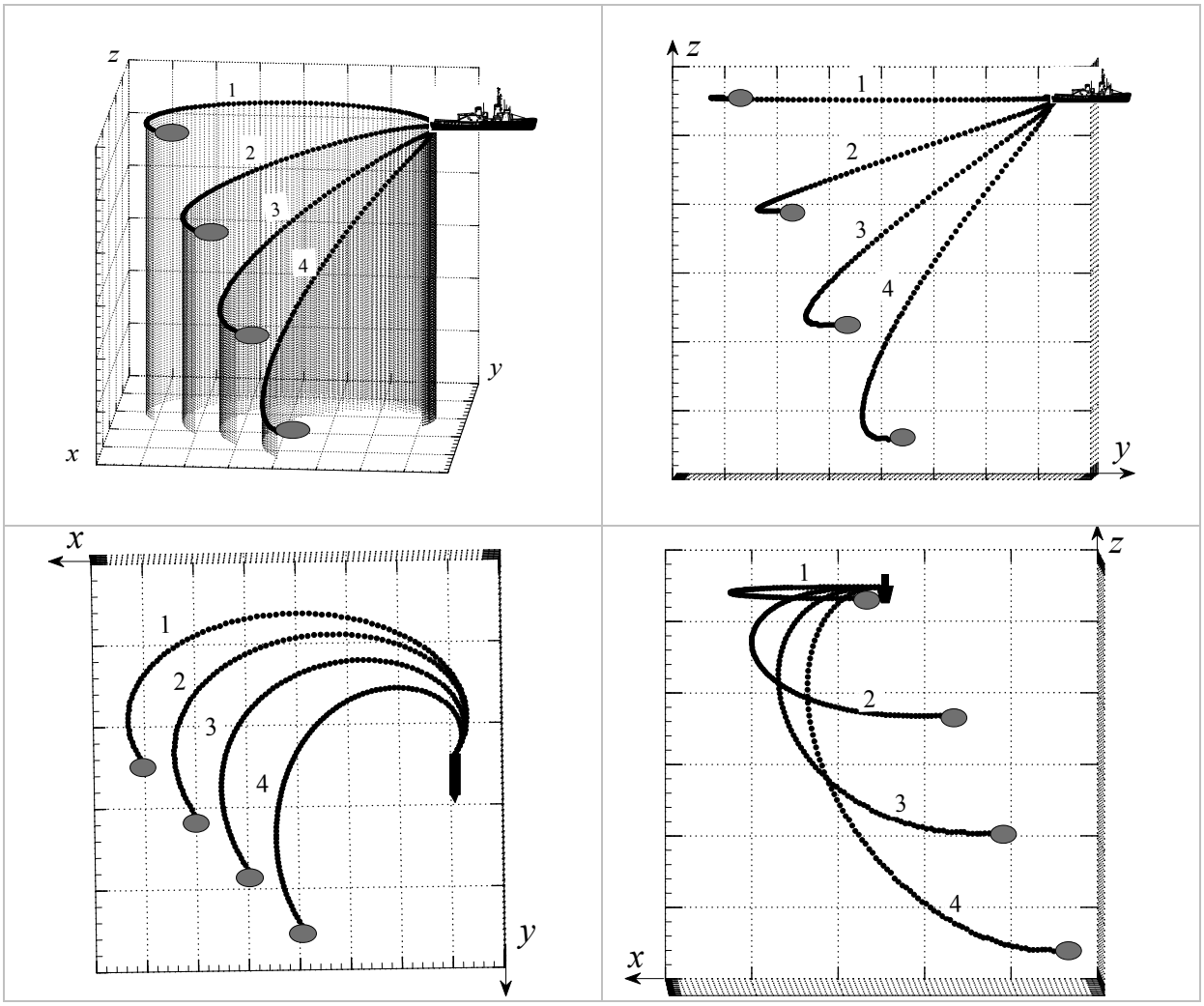


Рисунок 1 – Пространственные формы гибкой связи при перемещании свободного конца

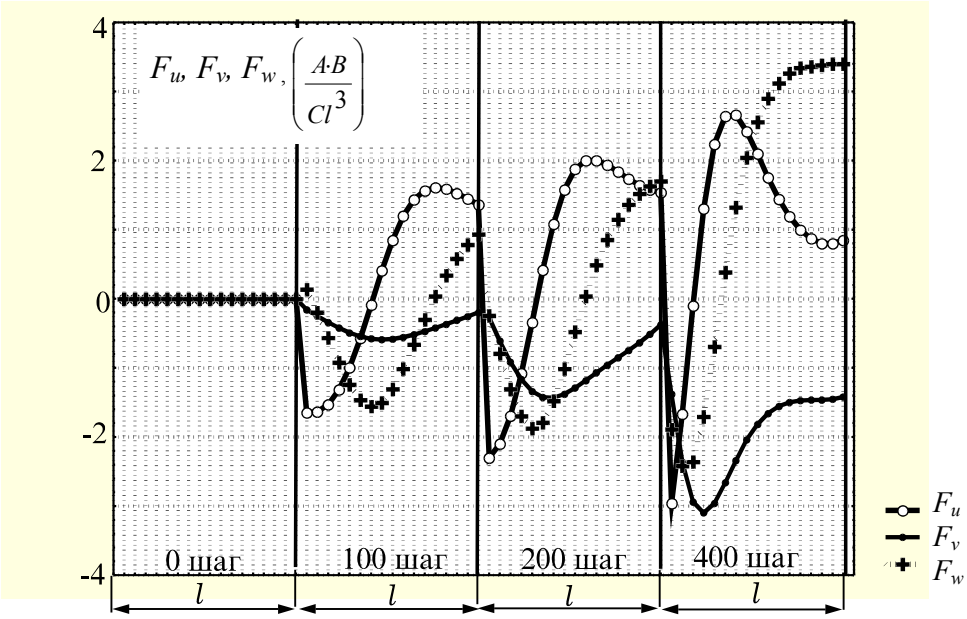


Рисунок 2 – Значения внутренних усилий на этапах деформирования

Задача динамического поведения гибкого криволинейного длинномерного элемента, связанного с судном-носителем, совершающим сложное пространственное движение, является довольно сложной, так как она описывается дифференциальными уравнениями с частными производными, в которые дополнительно включены переносные, относительные и кориолисовы силы инерции. Анализируя представленные в современной научной литературе данные о результатах решения таких задач, рассматриваемых в пределах упругости, можно отметить, что до настоящего времени не были разработаны универсальные аналитические подходы, позволяющие учитывать до конца основные эффекты, а также свойственные волновым и колебательным процессам, не решен ряд прикладных задач.

Выводы. Результаты решения ряда задач упругого деформирования и устойчивости гибких элементов со сложной пространственной геометрией позволяют сделать вывод, что с помощью разработанного метода можно исследовать изменение форм их упругого равновесия с учетом глубоких нелинейностей, а также анализировать устойчивость и закритическое поведение. Программы и алгоритмы позволяют адаптироваться к современным мощным программным пакетам типа Exel, Statistika и др. Достоверность метода проверена при решении ряда тестовых эадач, а также экспериментально.

Список литературы

1. Гайдайчук, В.В. Экспериментально-теоретическое исследование пространственного деформирования гибкого упругого кольца [Текст] / В.В. Гайдайчук, Э.Ю. Бурменко, В.И. Кравцов, В.Н. Самилов, И.С. Пилишенко. – К., 1988. – 19 с. – Деп. в УкрНИИНТИ 08.09.88, № 2268.
2. Гуляев В.И. Упругое деформирование гибких пространственно искривленных стержней [Текст] / В.В. Гайдайчук, В.Л. Кошкин, В.И. Кравцов // Известия ВУЗов. – 1988. – № 12. – С. 3-6.
3. Крижанівський, Є.І. Методологічні аспекти дослідження взаємозв′язку процесів деформації та руйнування трубопроводів [Текст] / Є.І. Крижанівський, Л.Я. Побережний // Нафтова і газова промисловість. – 2002. – № 5. – с. 37-44.
4. Кравцов, В.И. Механика гибких глубоководных систем [Текст] / В.И. Кравцов. – К.: Наукова думка, 1997. – 256 с.

Alla Lisikh, Phd tech. sci.
Pervomaisky polytechnic institute of the Mykolaiv university of shipbuilding of the name of admiral Makarov, Pervomaisk, Ukraine

Spatial deformation of flexible constructions, connecting ship-transmitter and the added object

Resilient deformation and stability of curvilinear flexible element of the marine setting is considered in the article, it is indicated on actuality of decision of this question.

The method of numerical decision of task of oscillation of flexible elements is offered with difficult spatial geometry, which allows to get the necessary parameters of the tensely-deformed state of flexible element at an action static and quasistatic tensions. For the decision of nonlinear regional task the method of continuation is used on a parameter jointly with the method of Newton-Kantorovish. Such approach allows effectively to use computational algorithms for the timely change of problem specification depending on technological necessities. By means of this methods it is possible to investigate the change of form of resilient equilibrium of flexible constructions taking into account deep non-linearity, to analyse stability and supercritical conduct. Examples of decision of such tasks which allow to draw conclusion about authenticity and efficiency of the used methods are made in the article.

The results of decision given in the article as computer graphics underline their authenticity, as one of signs of rightness of the got numerical decisions is convergence of differential equalizations.

resilient deformation, flexible element, numeral methods

Получено 10.05.17

УДК 621.9.048.4

О.Ф. Сіса, доц., канд. техн. наук, В.В. Пукалов, доц., канд. техн. наук, В.В. Юр'єв, асп.
Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна,
E-mail: sisaoleh@gmail.com

Технологія виготовлення порожнин високоміцних гайок спеціального призначення

Виконано обґрунтування технологічної схеми формоутворення поверхонь порожнини високоміцної гайки спеціального призначення, способом розмірної обробки електричною дугою з урахуванням особливостей фізичних механізмів їх утворення та гідродинамічних явищ в міжелектродному проміжку. Встановлені аналітичні зв'язки технологічних характеристик процесу розмірної обробки електричною дугою сталі 20Г2Р з режимами обробки і геометричними параметрами.

електрична дуга, гайка, технологія, технологічні характеристики, обладнання

О. Ф. Сиса, доц., канд. техн. наук, В.В. Пукалов, доц., канд. техн. наук, В.В. Юрьев, асп.
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницк, Украина

Технология изготовлениия полостей высокопрочных гаек специального назначения

Выполнено обоснование технологической схемы формообразования поверхностей полости высокопрочной гайки способом размерной обработки электрической дугой с учетом особенностей физического механизма образования и гидродинамических явлений в межэлектродном промежутке. Установлены аналитические связи технологических характеристик процесса размерной обработки электрической дугой стали 20Г2Р с режимами обработки и геометрическими параметрами.

электрическая дуга, гайка, технология, технологические характеристики, оборудование

© О.Ф. Сіса, В.В. Пукалов, В.В. Юрьев, 2017

Постановка проблеми. Складання і монтаж вузлів гірничої техніки є відповідальним і трудомістким процесом, а якість кріплення закладає надійність роботи у важких умовах. Вплив на надійність обладнання, в цілому чинять основні елементи та різьбові з'єднання , які є ресурсовизначальними, оскільки вони витримують значні динамічні навантаження, а головним фактором підвищення несучої здатності високонавантажених гайок є підвищення пружності різьби.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні машинобудівні виробництва пред'являють підвищені вимоги до надійності і довговічності продукції, до найбільш відповідальних деталей, при цьому особлива увага приділяється стану поверхневих шарів. Як відомо якісна оцінка цього стану виконується по ряду критеріїв, серед яких геометричні характеристики (мікрорельєф, хвилястість, шорсткість) і фізико-механічні властивості (структура , мікротвердість і т.п.), які формуються, як правило на фінішних операціях обробки. Однак існує велика кількість неконтрольованих експлуатаційних факторів, що впливають на працездатність та ресурсні характеристики гірничого обладнання. За результатами статистичного аналізу працездатність гірничого обладнання за коефіцієнтом відмов на підприємствах Кривбасу, встановлено, що одним з найбільш розповсюджених факторів є ослаблення болтових з'єднань: опор до рами, стяжних шпильок, кріпильних болтів корпусу підшипника [1].

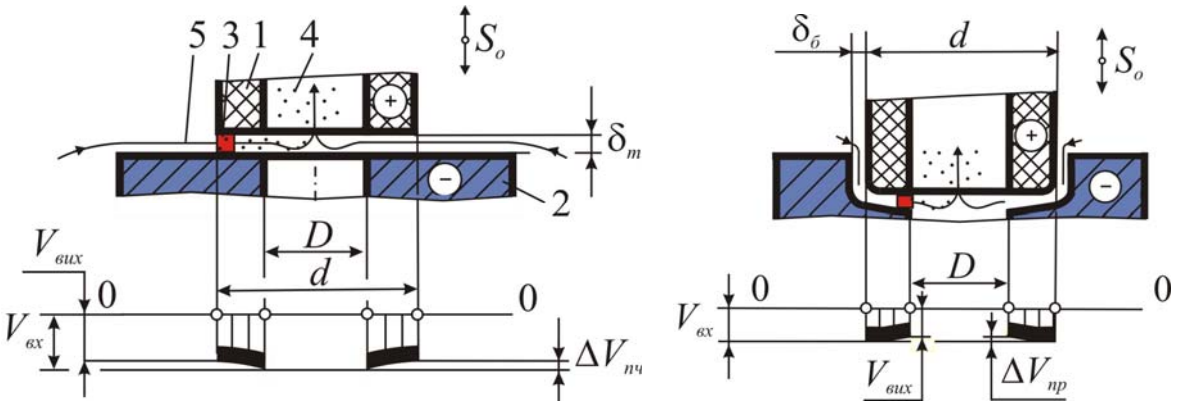
Для кріплення відповідальних вузлів гірничого обладнання застосовується високоміцний крепіж з класом міцності 8.8, 10.9, 12.9, у яких тимчасовий опір більше, або дорівнює 800 МПа. Високоміцний крепіж [2] виготовляють з сталі марок 35, 20Г2Р, 40Х, 65Г найчастіше застосовується сталь марки 20Г2Р. Сучасна технологія [3] виготовлення високоміцного крепіжу базується на застосуванні методів холодного або гарячого висаджування чи накатування різьби на спеціальних автоматах. В умовах одиничного або дрібносерійного виробництва для складання і кріплення відповідальних елементів гірничого обладнання застосовують спеціальні гайки з внутрішньою порожниною під спеціальний ключ для затягування, тому застосування технологій штампування таких гайок економічно невигідне із-за коштовності штампового оснащення. Технологія виготовлення спеціальних гайок складається з двох основних операцій: отримання заготовки спеціальної гайки і формування внутрішнього різьбового профілю. Заготовки з складною порожниною під спеціальний ключ виготовляють литвом. Однак наряду з цим відлиті заготовки мають недолік − підвищена газо-усадкова пористість. При формуванні внутрішнього різьбового профілю методом механічної обробки відбувається "вскриття" пор, які можуть бути ізольованими, або створювати систему наскрізних каналів, при цьому якість різьби погіршується, а значить у відповідальний момент у з'єднані призводе до послаблення різьбового з'єднання. Тому необхідно виготовляти високоміцні гайки спеціального призначення з заготовок які попередньо піддавалися пластичному деформуванню, а для отримання складнофасонних порожнин під спеціальний ключ гайок спеціального призначення застосовувати технології які будуть альтернативними штампуванню чи обробці різанням.

За роботами [4,5,6,7,8] відомий спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД), при якому енергія підводиться в зону обробки безперервно. Завдяки цьому, а також тому, що спосіб дозволяє вводити в зону обробки великі потужності електричного струму, даний спосіб володіє високою продуктивністю обробки. Так, за даними роботи [7] продуктивність обробки круглого отвору діаметром 30 мм (площа обробки 706 мм²) в матеріалі сталь 45 при силі струму A =1000А, досягає 27300 мм³⁄хв при Ra = 6,3 мкм та глибині зони термічного впливу в межах кількох сотих долей міліметра. Однак, впровадження у виробництво процесу РОД порожнин високоміцних

гайок спеціального призначення матриць стримується відсутністю експериментальних даних про взаємозв´язок технологічних характеристик даного процесу з електричним і електродинамічним режимами обробки та геометричними параметрами порожнин, які оброблюються. Проблема ще більш загострюється при отримані порожнини з визначеною шорсткістю поверхні та відповідним сладнофасонним профілем під ключ. Тому розробка технології і обладнання способу РОД для отримання складнофасонних порожнин під спеціальний ключ гайок спеціального призначення є актуальною.

Постановка завдання. Таким чином, метою досліджень є розробка технології та обладнання способу РОД порожнин високоміцних гайок спеціального призначення, як високоефективної альтернативи традиційним способам їх обробки.

Виклад основного матеріалу. В якості технологічної схеми формоутворення вибрана схема за принципом глухого прошивання і формування дна. Обробку здійснювали з використанням графітового електрода-інструмента (ЕІ, марка МПГ-7) при вибраній технологічній схемі формоутворення з прокачуванням органічного середовища в торцевому міжелектродному зазорі (МЕЗ) під технологічним тиском, за напрямком від перефірії до центру електрода-інструмента (рис.1). Предметом дослідження були такі технологічні характеристики: продуктивність обробки M, мм^3/хв; питома продуктивність обробки M_a, мм^3/А·хв; питома витрата електроенергії a, кВт·год/кг; бічний зовнішній МЕЗ δ, мм; відносний лінійний знос ЕІ γ, %; шорсткість обробленої поверхні Ra, мкм. Будування математичних моделей технологічних характеристик процесу РОД сталі 20Г2Р здійснювалось з застосуванням математичних методів планування експериментів, зокрема плану 2^{4-1}. На підставі апріорної інформації були відібрані фактори, що визначають режими обробки (сила технологічного струму I , А; статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор $P_{ст}$, МПа) та фактори, що визначають геометричні параметри обробки (площа обробки F, мм²; глибина обробки h, мм).



а б

а − початкова фаза обробки; б − проміжна фаза обробки (1 − графітовий ЕІ; 2 − сталева заготовка; 3 − електрична дуга; 4 − продукти ерозії; 5 − гідродинамічний потік)

Рисунок 1 – Технологічна схема формоутворення та епюри швидкостей потоку в торцевому МЕЗ
Джерело: розроблено автором

Усі фактори задовольняють умови керованості, операціональності та однозначності. Інші параметри процесу РОД були зафіксовані на постійному рівні: робоча рідина − органічне середовище; полярність обробки − зворотня; матеріал електрода-інструмента − електроерозійний графіт марки МПГ-7.

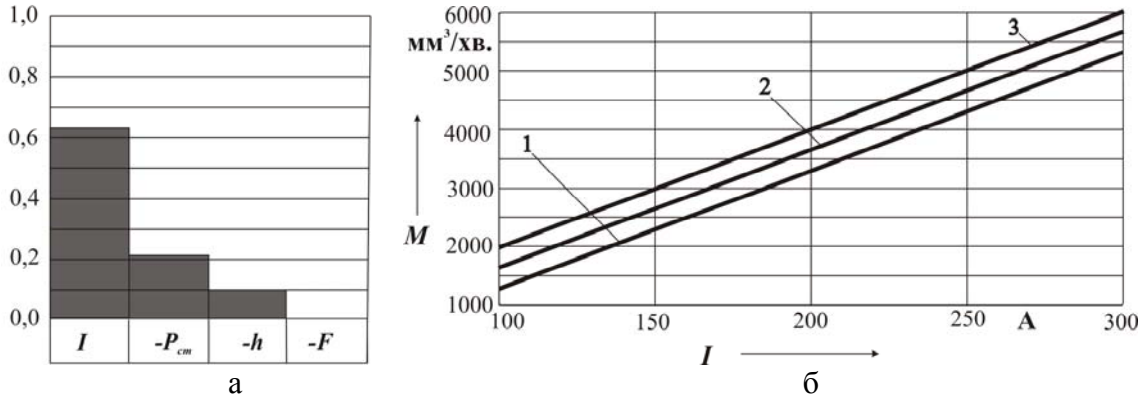
Таблиця 1 – Поліноміальні математичні моделі технологічних характеристик процесу РОД зразків із сталі 20Г2Р

Математична модель	Масштабні співвідношення факторів
Уніполярна РОД бічної поверхні зразка за формулою «графітовий ЕІ – сталь» з використанням способу зворотного прокачування	
$M = 3081 + 1488x_1 - 510x_2 - 392x_4$	$x_1 = (X_1 - 200)/100$ $x_2 = (X_2 - 1)/0{,}2$ $x_3 = (X_3 - 2550)/1550$ $x_4 = (X_4 - 12{,}5)/2{,}5$
$M_a = 19{,}699 + 3{,}487x_1 - 2{,}748x_2 - 2{,}492x_4$	
$a = 3{,}081 - 0{,}279x_1$	
$R_a = 12{,}82 + 5{,}324x_1 - 0{,}97x_2 + 0{,}513x_4$	
$\delta_{á} = 0{,}0209 - 0{,}00582x_2$	
$\gamma_{ё} = 0{,}969 - 0{,}36x_2 - 0{,}209x_4 - 0{,}088x_1 + 0{,}025x_3$	
де: $X_1 \to I$, А; $X_2 \to P_{cm}$, МПа; $X_3 \to F$, мм^2; $X_4 \to h$, мм	

Джерело: розроблено автором

В рамках експерименту: продуктивність M процесу РОД сталі 20Г2Р змінювалась в межах від 1360 до 6010 мм^3/хв.; питома продуктивність обробки M_a − від 12,55 до 30,92 мм^3/А·хв; питома витрата електроенергії a − 1,16 до 4,89 кВт·год/кг; бічний зовнішній МЕЗ δ − 0,020 до 0,055мм; відносний лінійний знос ЕІ γ − 0,48 до 1,89 %; шорсткість обробленої поверхні Ra − 6,3 до 25 мкм.

Із аналізу моделі (рис. 2) випливає, що на продуктивність обробки M найбільш впливає сила технологічного струму, із підвищенням якої продуктивність збільшується. Отже силу струму слід визначити головним керуючим фактором, а даний факт свідчить про теплову природу процесу РОД. Вплив площі обробки F на продуктивність значно менший, а статичний тиск P_{cm} та глибина обробки суттєвого впливу не створювали. Це дозволяє застосовувати спосіб РОД для обробки порожнин під спеціальний ключ високоміцних гайок спеціального призначення.



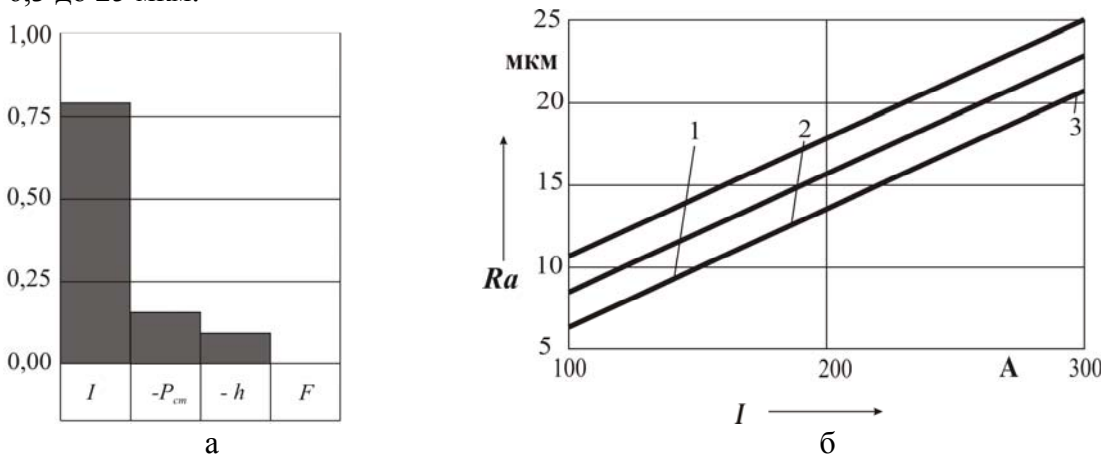
а б

а − ступінь впливу змінних факторів; б − залежність M від I; 1 − P_{cm} = 1,2 МПа; 2 − P_{cm} = 1,0 МПа; 3 − P_{cm} = 0,8 МПа

Рисунок 2 – Продуктивність M РОД бічної поверхні зразка за формулою "графітовий ЕІ- сталь" з використанням способу зворотного прокачування

Джерело: розроблено автором

Із моделі та (рис. 3) виходить, що шорсткість обробленої поверхні *Ra* в повній мірі визначається силою технологічного струму *I* (ступінь впливу – 78,3 %) та залежить від статичного тиску P_{cm}, а також глибини обробки *h*. Із підвищенням *I* шорсткість поверхні підвищується. Отже, сила технологічного струму *I* по відношенню до шорсткості обробленої поверхні *Ra* є головним керуючим фактором. Причому, чим менша сила технологічного струму, тим більша імовірність утворення лунок. При виконаних експериментальних дослідженнях шорсткість вимірювалася на периферійній частині торцевої поверхні зразка. В умовах експерименту вона змінювалася у межах від *Ra* −6,3 до 25 мкм.

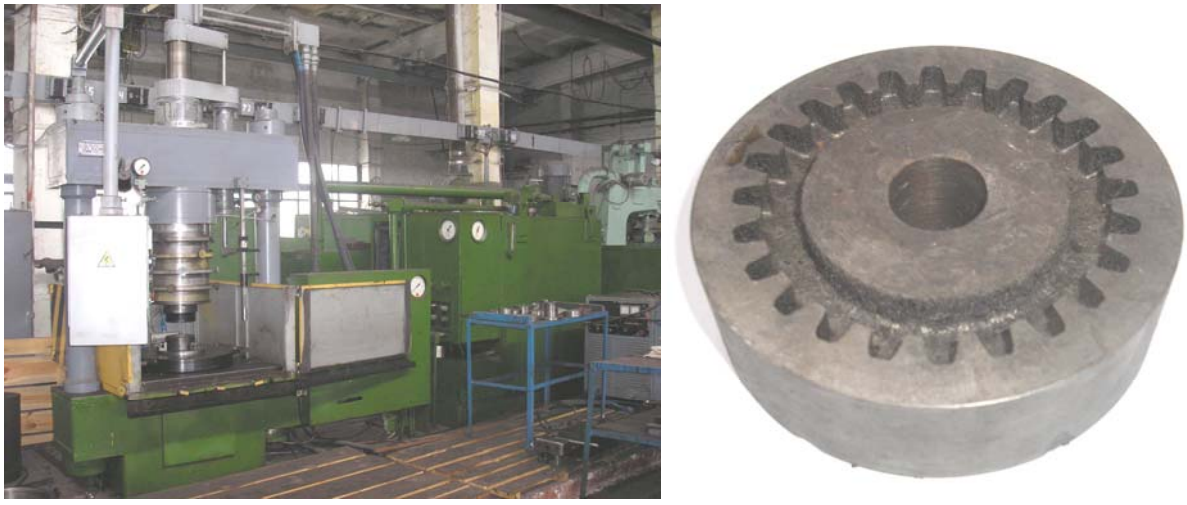


а б

а − ступінь впливу змінних факторів; б − залежність *Ra* від *I*; 1 − P_{cm} = 1,2 МПа; 2 − P_{cm} = 1,0 МПа; 3 − P_{cm} = 0,8 МПа

Рисунок 3 – Шорсткість обробленої поверхні *Ra* РОД бічної поверхні зразка за формулою “графітовий ЕІ- сталь” з використанням способу зворотного прокачування

Джерело: розроблено автором



а б

а − обробка на електроерозійному верстаті моделі "АМ-1" ПАТ "КЗГО" м. Кривий Ріг; б − заготовка з габаритними розмірами − зовнішнім діаметром *D* = 140 мм, висотою *H*= 70 мм, глибиною порожнини *h* = 15 мм високоміцної гайки спеціального призначення після обробки способом РОД графітовим ЕІ (*I* = 100 А, P_{cm} = 1,2 МПа, *F* = 4092 мм² , *h* = 15 мм)

Рисунок 4 − Випробування способу РОД порожнин високоміцних гайок спеціального призначення

Джерело: розроблено автором

Обробку порожнини під спеціальний ключ високоміцної гайки спеціального призначення (рис. 4, б), здійснювали графітовим ЕІ марки МПГ-7 при наступному режимі обробки: сила технологічного струму I = 300 А, напруга на дузі U = 25 В, статичний тиск органічної робочої рідини на вході потоку в міжелектродний зазор P_{cm} = 1,2 МПа, площина обробки F = 4092 мм² , полярність обробки зворотня (заготовка «мінус»), спосіб прокачування рідини крізь торцевий міжелектродний зазор − зворотній (від периферії до центра отвору заготовки. В результаті обробки порожнини під спеціальний ключ високоміцної гайки спеціального призначення з сталі 20Г2Р, була зафіксована продуктивність обробки М = 6010 мм^3/хв., що в 25…28 разів перевищує продуктивність елекроімпульсної обробки.

Висновки. Таким чином, експериментально доведена доцільність використання способу РОД для високопродуктивної обробки порожнин під спеціальний ключ високоміцних гайок спеціального призначення, що вимагає відповідно невеликих капіталовкладень в обладнання і технологію, забезпечить швидку окупність за рахунок значної продуктивності, призведе до помітної економії коштів на будь-якому виробництві виготовлення кріпильних виробів спеціального призначення.

Список літератури

1. Кіяновський, М.В. Дослідження впливу експлуатаційних факторів на працездатність гірничого обладнання [Текст] / М.В. Кіяновський, О.В. Бондар // Вісник КТУ – Кривий Ріг, 2010. – Вип. 25. – С.218−222.
2. Рудаков, В.П. Изготовление высокопрочных путевых гаек из стали 20Г2Р в условиях ОАО «Магнитогорский калибровочный завод [Текст] / В.П. Рудаков, А.П. Пестряков, И.В. Шиморенко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением: КШП ОМД. − 2005. − №3. − С. 18−21.
3. Штеле, В. Г. Разработка прогрессивной технологии штамповки высоких гаек [Текст] / В. Г. Штеле, И.В. Марченко, [и др.] // Омский научный вестник. Сер. "Приборы, машины и технологии". − Омск: ОмГТУ, 1997 - № 2(90). – С. 66−70.
4. Verfahren zur elektroerosiven Bearbeitung von Metallen: pat. 621279 Schweiz, B 23 P 1/06. / Nosulenko V. I., Mescheryakov G. N.; inhaber Kirovogradsky Institut Selskokhozyaistvtnnogo Mashinostroenia. Anmeldungsdatum 12.07.1977; Patentschrift verőffentlicht 30.01.1981.
5. Meshcheriakov, G. N. Physical and Technological Control of Dimensinal Machining / Meshcheriakov G. N., Nosulenko V. I., Meshcheriakov N. G., Bokov V. M. // Process and Metal Transfer. Annals of the CIRP Vol. 37/1/1988, p. 209-212.
6. Носуленко, В. И. Размерная обработка металлов электрической дугой [Текст] / В. И. Носуленко // Электронная обработка материалов. – 2005. – № 1. – С. 8–17.
7. Боков, В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою [Текст] / В.М. Боков. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс-ЛТД», 2002. – 300 с.
8. Носуленко, В. І. Комбинированные процессы металлообработки с использованием электрического дугового разряда как новые возможности и высокоэффективная альтернатива традиционной технологии [Текст] / П. Н. Великий, О. Ф.Сиса, О. С. Чумаченко // Сварщик. – 2001. – № 5. – С. 30−32.

Oleh Sisa, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Viktor Pukalov, Assoc. PhD tech. sci., Vitaliy Yuryev, post-graduate

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Technology of manufacturing of cavities of high-strength screw-nuts for special purposes

The article is devoted to the development of technology and equipment for the method of electric arc machining of cavities of high-strength screw-nuts for special purposes, as a highly effective alternative to traditional methods of processing.

In the conditions of a single and small-scale production, high-strength nuts of special purpose with an internal cavity under a special key for tightening are used to assemble and fasten the critical elements of mining equipment, therefore it is economically disadvantageous to use the technology of stamping such nuts because of the high cost of the die tooling. The technology for manufacturing of special screw-nuts consists of two basic operations: obtaining a special nut billet and forming an internal special profile.

An important factor in increasing the load-bearing capacity of high-loaded high-strength screw-nuts is to increase the elasticity of the thread. This is ensured by the grade of material and the quality of the steel billet. When developing technology and equipment, it is necessary to take into account the conditions that will ensure the production of high-quality threads and the formation of a reinforced cavity under a special tightening key with an appropriate surface roughness. Therefore, the method of dimensional processing by electric arc makes it possible to obtain hardened cavities with an appropriate roughness for a special tightening key.

It is established that the optimal parameters of the walls of the cavities of high-strength screw-nuts of special purpose at processing capacity M = 6010 mm³ / min., dimensional electric arc, there is a roughness Ra = 6,3..21 mkm, which provides the necessary geometric dimensions and surface quality.

It is proposed to receive cavities of high-strength screw-nuts of special purpose with a dimensional electric arc with a given roughness Ra = 6,3..21 mkm, side walls, which allows you to shoot large material allowances with the least time spent on processing. At the same time, the treatment cycle of the cavity of high-strength screw-nuts for special purposes decreased 10 times.

The feasibility study of the technological scheme for the formation of cavities of high-strength screw-nuts of a special purpose by the method of dimensional processing by an electric arc is made, taking into account the features of the physical mechanism of formation and hydrodynamic phenomena in the interelectrode gap. Analytical links of technological characteristics to the process of dimensional processing by an electric arc of steel 20G2P, with processing modes and geometrical parameters are established.

electric arc, screw-nut, technology, technological characteristics, equipment

Одержано 19.05.17

АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 621.391.83

Л.Г. Віхрова, проф., канд. техн. наук, В.А. Бісюк, викл., О.К. Дідик, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
E-mail: kntubisuk@ukr.net

Автоматичне керування тривалістю індукційного наплавлення

Розглянуто вплив швидкості переміщення деталі в полі індуктора на якість нанесеного композиційного покриття при неперервно-послідовному індукційному наплавленні.
неперервно-послідовне індукційне наплавлення, композиційне покриття

Л.Г. Віхрова, проф., канд. техн. наук, В.А. Бісюк, препод., О.К. Дідик, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, г.Кропивницкий, Украина
Автоматическое управление продолжительностью индукционной наплавки
Рассмотрено влияние скорости перемещения детали в поле индуктора на качество нанесеного композиционного покрытия при непрерывно-последовательной индукционной наплавке.
непрерывно-последовательная индукционная наплавка, композиционное покрытие

Постановка проблеми. В різних галузях сучасної промисловості знаходять широке застосування технології індукційного наплавлення зміцнювальних композиційних покриттів (КП) на робочі поверхні деталей. Вони дозволяють отримувати зносостійкі покриття з різними експлуатаційними властивостями: для роботи з ударними навантаженнями, для умов тертя ковзання, антифрикційні покриття, для роботи в агресивних технологічних середовищах, для умов інтенсивного абразивного зношування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Даний спосіб дозволяє отримувати захисні покриття із заданим комплексом властивостей як дрібносерійних партій так і при промисловому виробництві, що в свою чергу забезпечує істотне зниження собівартості продукції.

Найбільш важливим з технологічних факторів, що визначають структуру і властивості наплавлених покриттів при індукційному наплавленні, є температура плавлення діфузійно-легованого наплавочного порошку. Температури плавлення композиційних матеріалів (КМ) для індукційного наплавлення складають понад 1000°С, що значно впливає на якість одержуваного шару, так як нагрів до такої температури може призводити до інтенсивного окислення і до зниження якості наплавленого шару і основи.

Постановка завдання. Мета роботи – розглянути керування швидкістю переміщення деталі і її вплив на якість КП при неперервно-послідовному індукційному наплавленні.

Виклад основного матеріалу. На сучасному етапі розв'язання задач автоматизованого керування режимами індукційного нагрівання (ІН) при наплавленні

© Л.Г. Віхрова, В.А. Бісюк, О.К. Дідик, 2017

КП зводиться, як правило, до синтезу систем стабілізації того або іншого параметра процесу або створенню систем програмного регулювання. Загальні принципи побудови систем стабілізації температурного режиму встановленого для безперервно-послідовного нагрівання і вимоги до якості функціонування цих систем сформульовані в роботах [1, 2]. Як керуючий вплив у синтезованих АСК можуть бути використані: напруга джерела живлення, відносна швидкість переміщення виробу, частота струму. Найбільш розповсюдженим методом керування температурним режимом ІН є в даний час керування напругою джерела живлення нагрівача, що здійснюється з впливом на струм збудження генератора, зі зміною кута регулювання керованого випрямляча і стабілізацією перетворювача частоти, переключення ступенів напруги в установках з регульованими трансформаторами.

Розглянуті в [3, 4] ідеалізовані математичні моделі процесу індукційного нагрівання дозволяють з різним ступенем наближення до реального процесу вивчити статичні і динамічні характеристики об'єкта, необхідні при побудові АСК індукційним наплавленням.

У деяких практично важливих випадках, таких, наприклад, як широко застосовуване у виробництві наскрізне індукційне нагрівання заготовок промислової і більш високих (1000...10000 Гц) частот, достатню для практичних цілей точність дасть апроксимація процесу індукційного нагрівання математичною моделлю нагрівання теплотехнічно тонкого тіла. Дійсно, завдяки наявності внутрішніх джерел тепла рівномірність прогріву по перетину виробу в даному випадку значно вище, ніж при нагріванні зовнішніми джерелами (наприклад, газове нагрівання). При індукційному нагріванні зазначена рівномірність залежить від характеру зміни щільності індукторного струму по радіусу виробу. Закон розподілу щільності струму, у свою чергу, визначається параметром ξ , що характеризує ступінь прояву поверхневого ефекту.

Для наскрізного індуктивного нагрівання для розглянутого класу промислових нагрівачів $\xi = 4$. У цьому випадку температурний градієнт по радіусі заготовки має невелику величину і різниця температур поверхні і центра в процесі нагрівання в реальній ситуації ніколи не досягає критичного значення. Зазначене не відноситься до випадку прискореного нагрівання.

Завдяки такій специфічній особливості процесу наскрізного індукційного нагрівання оцінку температурного режиму можна здійснювати по середній по перетину заготовки температурі на виході з нагрівача, приймаючи її за єдиний параметр, що цілком характеризує тепловий стан об’єкта.

У свою чергу, середня по перетину температура масивної заготовки при її індукційному нагріванні може бути легко представлена (як інтегральний параметр) у формі температури еквівалентного тонкого тіла, теплофізичні характеристики якого визначаються через параметри реального об’єкта.

Така апроксимація дозволяє весь наступний аналіз динаміки досліджуваного процесу ІН і синтез оптимальних алгоритмів керування для розглянутого класу об’єктів виконати для моделі нагрівання теплотехнічно тонкого тіла, оцінюючи, де це необхідно, величину погрішності апроксимації.

Для аналізу передатних властивостей об’єкта ІН з врахуванням розподіленості керуючого впливу функцію залежності температури від координати та тривалості наплавлення $Q(x,t)$ запишемо у відхиленнях від сталого режиму, яке характеризується постійними швидкістю нагрівання $J = const$, температурою навколишнього середовища $\theta_{ср}(t) = \theta_1 = const$ і коефіцієнтом теплових втрат:

$$\frac{d\Delta\theta}{dt} + \upsilon\frac{d\Delta\theta}{dx} - kQ(x,t) + \beta_0\Delta\theta = 0 \ , \ \beta_0 = const \, , \tag{1}$$

де $\Delta\theta(x,0) = 0; \qquad \Delta\theta(0,t) = 0$

Застосовуючи до (1) перетворення Лапласа за часом t (оператор p) і по координаті (оператор s) і позначаючи двократні зображення $\theta(x,t)$ і *Q(x,t)* відповідно через $\theta(p,s)$ і *Q(p,s)* і одержимо

$$\Delta\theta(p,s) = \frac{k}{p + s\upsilon + \beta_0} Q(p,s) \ . \tag{2}$$

Вираз

$$R(p,s) = \frac{\Delta\theta(p,s)}{Q(p,s)} = \frac{k}{p + s\upsilon + \beta_0} \tag{3}$$

можна розглядати як передатну функцію об'єкта керування. (1) для розподіленого виходу *θ(x, t)* відносно розподіленого керування *Q(x,t)*, якщо під такою передатною функцією розуміти відношення двократних зображень вихідної і вхідної величин розглянутого об'єкта при нульових початкових умовах.

Передатна функція *R(p,s)* по (3) є аналогом звичайної передатної функції ланки першого порядку, яка у повній мірі характеризує динамічні властивості об'єкта керування описуваного рівнянням (1). використовуючи інтеграл згортання двох функцій , одержимо в результаті зворотного перетворення Лапласа по змінній *x* для *θ(x, t)* по (3):

$$\Delta\theta(p,x) = \frac{k}{\upsilon}\int_0^x e^{(x-\eta)\frac{-p+\beta_0}{\upsilon}} \ Q(p,\eta)d\eta \ . \tag{4}$$

Тут θ*(p,x)* і *Q(p,s)* звичайні зображення Лапласа відповідно для часу і координати $\Delta\theta(t,x)$ і *Q(t,x).*

Для об'єкта з розподіленими параметрами зв'язок між вихідними величинами об'єкта і керуючим впливом визначається з (4) на підставі операції згортання:

$$\Delta\theta(x,p) = \frac{k}{\upsilon} W(p,q,x)\, Q(p,x) \, , \tag{5}$$

де $W(p,q,x) = e^{(x-\eta)\frac{-\rho+\beta_0}{\upsilon}}$ (6)

є передатна функція об'єкта з розподіленими параметрами.

Реакція об'єкта Δθ*(p, x)* на довільний вхідний вплив *Q(p,x)* може бути знайдена послідовно застосуванням до (3) зворотного перетворення Лапласа за часом відповідно до теореми про згортання двох функцій з наступним використанням теореми зсуву для зображення по змінній *x*. У результаті згортання одержимо:

$$\Delta\theta(t,s) = L_p^{-1}[\frac{k}{p+s\upsilon+\beta_0}] = k\int_0^t \exp[(-s\upsilon+\beta_0)\,\tau]\,Q(t-\tau,s)\,d\tau, \quad (7)$$

$$\Delta\theta(t,x) = k\int_0^t L_s^{-1}[e^{-(s\upsilon+\beta_0)\tau} \quad Q(t-\tau,s)\,d\tau] = k\int_0^{\min t,t_0} \exp(-\beta_0\tau)\,Q(t-\tau,x-\upsilon\tau)\,d\tau. \quad (8)$$

Звідси маємо:

$$\Delta\theta(t,x) = \begin{cases} k\int_0^{t_0} e^{-\beta_0\tau}Q(t-\tau,x-\upsilon\tau)\,d\tau, & \forall t \le t_0 \\ k\int_0^{t} e^{-\beta_0\tau}Q(t-\tau,x-\upsilon\tau)d\tau, & \forall t \ge t_0. \end{cases} \quad (9)$$

Для окремого випадку зосередженого керування по сумарній потужності *P(t)* нагрівання і при заданому характері *F(x)* її розподілу по довжині нагрівача можна покласти *Q(t,x)=P(t)F(x),* звідки з (5) одержуємо відповідне вираження для передатної функції об'єкта:

$$W_u(p,x) = \frac{\Delta\theta(p,x)}{P(p,x)} = \frac{k}{\upsilon}\int_0^x e^{-(x-\eta)\frac{\rho+\beta}{\upsilon}} F(\eta)\,d\eta. \quad (10)$$

Крім потужності внутрішніх теплоджерел у якості ймовірних можливих впливів при дослідженні процесу ІН можна розглядати швидкість *v* просування металу відносно нагрівача і теплофізичні параметри виробів, що нагріваються.

При впливі по цих входах одержимо, лінеаризуючи математичну модель процесу індукційного нагрівання теплотехнічно тонкого тіла, рівняння об'єкта керування в приростах відповідно:

$$\frac{\partial\Delta\theta_\upsilon}{\partial t} + \upsilon\frac{\partial\Delta\theta_\upsilon}{\partial x} + (\frac{\partial\theta}{\partial x})_{t=0}\,\Delta\upsilon + \beta\Delta\theta_\upsilon = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial\Delta\theta_\beta}{\partial t} + \upsilon\frac{\partial\Delta\theta_\beta}{\partial x} + \theta_0(x)\,\Delta\beta + \beta\Delta\theta_\beta = 0. \quad (12)$$

При *v=const* і *β=const* рівняння відповідають вихідному сталому режиму нагрівання:

$\theta_0(x)$ і $(\frac{d\theta}{dx})_{t=0}$ - температурне поле і його градієнт для цього вихідного режиму;

$\Delta\upsilon(t)$ і $\Delta\beta(t)$ – вхідні впливи у відхиленнях від сталого значення *v=const* і *β=const*.

Передатні функції об'єкта керування по розглянутих каналах можуть бути отримані безпосередньо з (18)

$$W_\upsilon(p,x) = \frac{\Delta\theta_\upsilon(p,x)}{\Delta\upsilon(p)} = \frac{k}{\upsilon}\int_0^x e^{-(x-\eta)\frac{\rho+\beta}{\upsilon}} (\frac{d\theta W}{d\eta})_{t=0}\,d\eta, \quad (13)$$

$$W_{\beta}(p,x)=\frac{\Delta\theta_{\beta}(p,x)}{\Delta\beta(p)}=\frac{k}{\upsilon}\int_0^x e^{-(x-\eta)\frac{\rho+\beta}{\upsilon}}\theta_0(\eta)d\eta. \qquad (14)$$

Аналогічно, після зазначеної заміни *Q(x,t)* одержуємо вираження для відповідних реакцій $\Delta\theta(x,t)$ у формі (9). Функція $\theta_0(x)$ і $\left(\frac{d\theta(x)}{dx}\right)$ знаходяться як рішення, (1) і при:

$$d\theta/dt=0 \quad V(t)=V \quad \beta(x,t)=\beta \quad Q(x,t)=F(x)P(t)$$

для частного випадку сталої потужності нагрівання по довжині індуктора, коли в сталому режимі *Q(x,t)=P= const* у *і F(x)=1* у (1), маємо:

$$\theta_0(x)=\frac{kP}{\upsilon}(1-e^{-\beta\frac{x}{\upsilon}}) \qquad \left(\frac{d\theta(x)}{dx}\right)_{t=0}=\frac{kP}{\beta}e^{-\beta\frac{x}{\upsilon}}. \qquad (15)$$

Звідси з врахуванням (15) з (10) і (13), (14) знайдемо:

$$W_u(p,x)=\frac{k}{p+\beta}(1-k_0(x)\,e^{-p\frac{x}{\upsilon}}), \qquad (16)$$

$$W_{\upsilon}(p,x)=\frac{kP}{p}k_0(x)(1-e^{-p\frac{x}{\upsilon}}), \qquad (17)$$

$$W_{\beta}(p,x)=\frac{kP}{\beta_0}\left[\frac{1-k_0(x)e^{-p\frac{x}{\upsilon}}}{p+\beta_0}+\frac{k_0(x)}{p}(1-e^{-p\frac{x}{\upsilon}})\right] \qquad (18)$$

Для випадку рівномірного розподілу потужності джерел, що гріють, по довжині нагрівача побудовані частотні характеристики об'єкта по всіх основних каналах впливу згідно (16) – (18).

Висновки. З огляду на той факт, що точність нагрівання є необхідною умовою для забезпечення високої якості виробів і зниження браку та енерговитрат, необхідно розробити автоматичну систему керування АСК роботою установки індукційного наплавлення, яка забезпечить точне дотримання температури нагрівання та мінімально необхідну тривалість наплавлення.

Після запуску установки, якщо початкові параметри процесу наплавлення постійні і збуджуючі впливи навколишнього середовища мінімальні, то можна вважати, що система буде працювати у відносній рівновазі. Збуджуючі впливи будуть компенсуватись за допомогою програмно-технічних засобів в заданому інтервалі зміною тривалості витримки ділянки деталі, що підлягає наплавленню в полі індуктора при заданій температурі, або швидкістю переміщення деталі при неперервно-послідовному наплавленні.

Автоматична система керування, яка забезпечить достатньо точне та гнучке керування швидкістю переміщення деталі, напругою та частотою струму на індукторі дозволить витримувати оптимальну температуру нагрівання, мінімізувати час наплавлення, поверхня деталі буде прогріватися, що забезпечить високу якість покриття і дозволить зменшити енерговитрати процесу ІН.

Список літератури

1. Боль, А.А. Повышение качества индукционной наплавки путем оптимизации и автоматизации нагрева [Текст] / А.А. Боль, В.П. Тимошенко, В.Н. Коваль.– Изв. СО АН СССР. сер. Технических наук, 1989. – Вып. 1. – С. 85-90.
2. Бісюк, В.А. Автоматичне керування неперервно-послідовним індукційним наплавленням [Текст] / В.А. Бісюк, О.К. Дідик // Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2015. – Вип. 28. – С. 250-255.
3. Индукционная наплавка твердых сплавов [Текст] / В.Н. Ткачёв, Б.М. Фиштейн, Н.В. Казинцев, Д.А.Алдырев. – М.: Машиностроение, 1970. – 182с.
4. Гжвачевский, М. С. Математическое моделирование оптимального управления процессом индукционного нагрева [Текст] : автореф. дис. ... доктора физико-математических наук : спец. 05.13.16. / Гживачевский Марек Стефанович. – Москва, 1991. – 46 с.

Larysa Vihrova, Prof., Phd tech. sci., Viktor Bisuk, Lect., Olexandr Didyk, Assoc. Prof., Phd tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Automatic control of the duration of induction welding

With constant generator of high frequency working mode affect the temperature of the land induction welding surface by changing the speed of moving parts in the field of the inductor. This allows you to increase or decrease capacity enerhovnesku zone heating; provides a more even distribution of temperature on the surface of the part; Extra or reheat if the output of the inductor temperature treated area is insufficient for high quality welding.

Given the fact that the accuracy of heat is essential to ensure high product quality and reduce energy consumption and lack of need to develop an automated control system ASC induction welding installation work that will ensure strict observance of the heating temperature and the minimum required length of welding.

continuous-sequential induction welding, composite coating

Одержано 22.05.17

УДК 681.513.5

Oleksiy Lobok, Assoc. Prof., Phd phys.&math. sci., Boris Goncharenko, Prof., DSc.
National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine
Larisa Vihrova, Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
E-mail:VIHROVALG@ukr.net

Optimal control of linear dynamic distributed systems under uncertainty

The article considers the problems of synthesis of optimal control systems that operate in conditions of an uncertain information and are described by generalized equations in partial derivatives of parabolic type. Control has the form of feedback from the observed measurements for the implementation of which it is necessary to solve integral-differential equation of Riccati. Separately built distributed and concentrated limiting regulators and are recursive algorithm for determining the optimal control regarding changes in the number of observations. There is an algorithm designed for determining the required number of point regulators and their optimal location on the border of the field in which the quality criterion does not exceed a specified threshold.

minimax control, point boundary regulators, Sobolewski spaces, inequality of Rayleigh, bilinear form

© Oleksiy Lobok, Boris Goncharenko, Larisa Vihrova, 2017

А.П Лобок, доц., канд. физ.-мат. наук, Б.Н. Гончаренко, проф., д-р техн. наук
Национальный университет пищевых технологий, Киев, Украина
Л.Г. Вихрова, проф., канд. техн. наук
Ценральноукраинский национальный технический университет, г.Кропивницкий, Украина

Оптимальное управление линейными динамическими распределенными системами в условиях неопределенности

В статье рассмотрены задачи синтеза оптимального управления системами, функционирующими в условиях неопределенной информации и описываются обобщенными уравнениями в частных производных параболического типа. Управление имеет вид обратной связи от наблюдаемых измерений, для реализации которого необходимо решить интегро-дифференциальное уравнение типа Риккати. Отдельно построены, распределены и сосредоточены предельные регуляторы, а также приведен рекуррентный алгоритм определения оптимального управления по изменению числа наблюдений. Разработан алгоритм определения необходимого количества точечных регуляторов и их оптимальное расположение на границе области, при которых критерий качества не превышает заданного порогового значения.

минимаксное управление, точечные предельные регуляторы, Соболевские пространства, неравенство Рэлея, билинейная форма

Introduction. To ensure high quality of systems of regulation, it is necessary to use more precise mathematical models of control objects that take into account not only the time but also the spatial coordinates namely systems with distributed parameters. It is necessary to consider the problem of constructing regulators for the class of systems with distributed parameters of parabolic type, to find a constructive solution to the problem of minimax synthesis boundary distributed and point control, also to find algorithm to determine the number and the optimal location of point regulators.

Statement of the problem and analysis of recent researches. Tasks of minimax control for systems with lumped parameters are operating under conditions of uncertainty considered in [1, 2]. Using the methods of perturbation theory in [3, 4] we receive the solution of these problems for systems with distributed parameters with more general functions of value. There is conducted further development of the theory of minimax controlling with regard to systems with distributed parameters described by generalized equations of parabolic type and based on the ideas expressed in [5, 6].

Consequently, the purpose of research is a synthesis of minimax boundary distributed and point regulators of the observed variables, determining number and optimal location of point regulators.

The main material research. To formulate correct mathematical formulation of the problem, we enter the following notation: Q с Rn - limited open area with piecewise smooth boundary Γ; $QT=\{(x, t)$: x є Q, $0 < t < T\}$, $ST = \{(x, t)$: x є Γ, $0 < t < T\}$, де T ; $(\bullet,\bullet)((\bullet,\bullet)$ Γ) – scalar multiplication in Hilbert space $L2(Q)$ (L2(r)); (•,•) - Euclidean scalar multiplication; " T " – operation of transposing; " * " – conjugation operation of operators; Hk(Q), $Hk'k(QT)$ – Sobolewski spaces [7];

$$L_2(V,R^N)=\left\{f: f=\left[f_1,f_2,...,f_N\right]^T,\ \int_V \| f(x)\|^2_{R^N}\ dx<\infty\right\};r/L\left(V,H\right)$$ – space of continuous linear operators acting on a Hilbert space V in the Hilbert space H;

$A(t)$ – elliptic operator of the second order of the form:

$$A(t)=\sum_{i,j=1}^{n}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(a_{i,j}(x,t)\frac{\partial}{\partial x_j}\right)-a_0(x,t), \qquad (1)$$

where $a_0(x,t)$, $a_{i,j}(x,t)$ – functions that are defined in the cylinder and satisfy the following conditions: $a_0 \in C(Q_T)$, $a_{i,j} \in C^1(Q_T)$, $a_0 \geq 0$ almost everywhere in Q_T, $\sum_{i,j=1}^{n} a_{i,j}(x,t)\xi_i\xi_j \geq \alpha \sum_{i=1}^{n} \xi_i^2$, $\alpha > 0$ $\forall \xi_i \in R^1$ almost everywhere in Q_T;

$\partial/\partial\nu_A$ – corresponding to operator $A(t)$ of conormal derivative operator $\frac{\partial\varphi}{\partial\nu_A} = \sum_{i,j=1}^{n} a_{i,j}(x,t)\frac{\partial\varphi}{\partial x_j}\cos(\vec{n},x_i)$, where $\cos(\vec{n},x_i)$ – i – directional cosine of outer normal $\vec{n}$ to the border Γ of the area Ω.

Let the state of the system described by the function $\varphi(x,t)$, which satisfies the equation

$$\int_0^T \left\langle \varphi(t), W^*(t)\eta(t) \right\rangle dt = \int_0^T b(t;u(t),\eta(t))dt + m(f,\eta(0)) \quad \forall \eta(t) \in \Phi_T, \tag{2}$$

where $W(t) = \partial/\partial t - A(t)$; $m(f,\eta(0))$, $b(t;u(t),\eta(t))$ – continuous bilinear forms;

Φ_T – space of "test" functions $\eta(t)$ by the type of $\Phi_T = \left\{ \eta : \eta \in H^{2,1}(Q_T),\ \eta\big|_{S_T} = 0;\ \eta(x,T) = 0,\ x \in \Omega \right\}$; $u \in U$ – management functions ($U = L_2(S_T)$ – for distributed control limit; $U = L_2(S_T;R^N)$ – for management concentrated; $f \in L_2(\Omega)$ – unknown functions which belong area

$$S_f = \left\{ f : f \in L_2(\Omega),\ h(f,f) \leq 1 \right\}, \tag{3}$$

where $h(f,f)$ - symmetric positively defined quadratic form.

Note that by made assumptions for each management $u \in U$ solution of equation (2) exists and it is only in space $L_2(Q_T)$ [8].

Suppose that at some realization external disturbances $f \in S_f$ occur following dimensions of the system (2)

$$z_i(t) = l_i(t;\varphi(t)) = \left\langle l_i(t), \varphi(t) \right\rangle,\ z_i(t) \in L_2(0,T),\ i = 1,2,...,k, \tag{4}$$

where $l_i(t) \in L_2(Q_T)$, $i = 1,2,...,k$ – linearly independent functions.

The task is to find control $u(t)$ in a linear feedback from the observed signals $z(t) = \left[z_1(t), z_2(t), ..., z_k(t) \right]^T$ i.e. in the form

$$u(t) = R(t)z(t), \quad R(t) \subset L\left(L_2(0,T;R^k), U \right), \tag{5}$$

which minimizes the following functional in the equation solution (2)

$$I(u) = \sup_{f \in S_f} \left[q(\varphi(T),\varphi(T)) + \int_0^T \left(p(t;\varphi(t),\varphi(t)) + d(t;u(t),u(t)) \right) dt \right]. \tag{6}$$

There are presented the following notation as $q(\varphi(T),\varphi(T))$, $p(t;\varphi(t),\varphi(t))$ – symmetrical integrally defined quadratic forms, $d(t;u(t),u(t))$ – symmetric positively defined quadratic form. Formulated problem will be called optimization task of minimax management, and function $u(t) \in U$ that delivers infimum of functional (6) – minimax optimal control. Denote by $M, B(t), H, Q, P(t), D(t)$ operators, generated by bilinear and quadratic forms $m(f,\eta)$, $b(t;u(t),\eta(t))$, $h(f,f)$, $q(\varphi(T),\varphi(T))$, $p(t;\varphi(t),\varphi(t))$,

$d(t;u(t),u(t))$ accordingly. The main results of this work represented as the following theorem

Theorem 1.

A) Solution of minimax control problem (2), (5), (6) and minimax optimal management, that satisfy the necessary conditions of optimality is determined by the correlation (5) ,where operator of feedback $R(t)$ satisfies the equation:

$$\int_0^T \left(d(t;R(t)L(t)\psi(t),\Theta(t)L(t)\psi(t)) + b(t;\Theta(t)L(t)\psi(t),K(t)\psi(t)) \right) dt = 0 \qquad (7)$$

$$\forall\ \Theta(t) \in L\left(L_2(Q_T;R^k),U\right),$$

where $L(t) \in L\left(L_2(Q_T),L_2(Q_T,R^k)\right)$ – operator of type $L(t) = \langle l(t),\cdot \rangle$, which operates by the rule $L(t)\eta(t) = \langle l(t),\cdot \rangle \eta(t) = \langle l(t),\eta(t) \rangle$;

$\psi(t)$ – the solution of equation.

$$\int_0^T \left\langle \psi(t),W^*(t)\eta(t) \right\rangle dt = \int_0^T b(t;R(t)L(t)\psi(t),\eta(t))dt + m(l_{\max}(V),\eta(0)) \quad \forall\ \eta(t) \in \Phi_T, \qquad (8)$$

$l_{\max}(V) \in L_2(\Omega)$ – own function that corresponds to the maximum eigenvalues $\lambda_{\max}(V)$ of operator $V = H^{-1}M^*K(0)M$; $K(t)$ – self-adjoint positively defined operator that satisfies the equation:

$$\int_0^T \left\langle K(t)\eta(t),W(t)\zeta(t) \right\rangle dt + \int_0^T \left\langle K(t)\zeta(t),W(t)\eta(t) \right\rangle dt = \int_0^T b(t;R(t)L(t)\zeta(t),K(t)\eta(t))dt +$$

$$+\int_0^T b(t;R(t)L(t)\eta(t),K(t)\zeta(t))dt + \int_0^T d(t;R(t)L(t)\eta(t),R(t)L(t)\zeta(t))dt +$$

$$+\int_0^T p(t;\eta(t),\zeta(t))dt + q(\eta(T),\zeta(T)) \qquad \forall\ \eta(t),\zeta(t) \in \Phi_0, \qquad (9)$$

where $\Phi_0 = \left\{ \eta : \eta \in H^{2,1}(Q_T),\ \eta\big|_{S_T} = 0,\ \eta(x,0) = 0,\ x \in \Omega \right\}$.

For all that the value of the functional on the optimal management can be represented in the type:

$$I(u) = \lambda_{\max}(V) = \lambda_{\max}(H^{-1}M^*K(0)M). \qquad (10)$$

B) One of solving of the optimization problem (2), (5), (6), that satisfies the necessary conditions for optimality is determined by the correlation:

$$u_0(t) = R_0(t)z(t), \quad R_0(t) = -D^{-1}(t)B^*(t)K(t)l^T(t)\left\langle l(t),l^T(t) \right\rangle^{-1}, \qquad (11)$$

where $l(t) = \left[l_1(t),l_2(t),...,l_k(t)\right]^T$, $\left\langle l(t),l^T(t) \right\rangle = \left\{ \left\langle l_i(t),l_j(t) \right\rangle \right\}_{i,j=1}^k$ – matrix of Gramm [8];

$K(t)$ – the solution of the following equation:

$$\int_0^T \langle K(t)\eta(t), W(t)\zeta(t)\rangle dt + \int_0^T \langle K(t)\zeta(t), W(t)\eta(t)\rangle dt - q(\eta(T),\zeta(T)) =$$

$$= -\int_0^T \langle B(t)D^{-1}(t)B^*(t)K(t)\eta(t), K(t)\zeta(t)\rangle dt + \int_0^T p(t;\eta,\zeta)dt \quad \forall\ \eta(t),\zeta(t) \in \Phi_0. \quad (12)$$

The value of criterion on minimax management also is defined by the formula (10), where $K(t)$ in this case – is the solution of the equation (12). The proof of the theorem is not given here. We only note that it is based on the ideas of work and involves the use of Rayleigh roughness and methods of perturbation theory [10].

Note 1. If disturbances affect the system is not only at the initial time, but also at affect the all-time of regulation, then the problem discussed above (which was considered above) has no solution.

Note 2. Suppose that bilinear forms $b(t;u,\eta)$ and $d(t;u,u)$ has a type

$$b(t;u,\eta) = \begin{cases} -\int_\Gamma \int_\Gamma B(x,y,t)u(y,t)\dfrac{\partial\eta(x,t)}{\partial\nu_{A_x^*}}dxdy, & \text{if} \quad U = L_2(S_T), \\ -\sum_{i=1}^N u_i(t)\int_\Gamma b_i(x,t)\dfrac{\partial\eta(x,t)}{\partial\nu_{A_x^*}}dx, & \text{if} \quad U = L_2(S_T;R^N), \end{cases} \quad (13)$$

$$d(t;u,u) = \begin{cases} -\int_\Gamma \int_\Gamma D(x,y,t)u(x,t)u(y,t)dxdy, & \text{if} \quad U = L_2(S_T), \\ \big(D(t)u(t),u(t)\big), & \text{if} \quad U = L_2(S_T;R^N), \end{cases} \quad (14)$$

where $B(x,y,t)$, $D(x,y,t) \in L_2(0,T;L_2(\Gamma)\times L_2(\Gamma))$ moreover $D(x,y,t)$ – symmetric positively defined function;

$D(t)$ – symmetrical positively defined matrix which elements belong to the space $L_2(0,T)$;

$b_i(x,t) \in L_2(S_T)$; $u(t) = \big[u_1(t),u_2(t),...,u_N(t)\big]^T$, $u_i(t) \in L_2(0,T)$.

Then, using formally second Green's formula, the equation (2) can be interpreted as the boundary value problem of Dirichlet with the boundary control

$$\begin{cases} \dfrac{\partial\varphi(t)}{\partial t} = A(t)\varphi(t) \quad \text{in the area} \quad Q_T, \\ \varphi(0) = Mf \quad \text{in the area} \quad \Omega, \quad \varphi(t) = B(t)u(t) \quad \text{in the area} \quad S_T, \end{cases} \quad (15)$$

$$B(t)u(t) = \begin{cases} \int_\Gamma B(x,y,t)u(y,t)dy, & \text{if} \quad U = L_2(S_T), \\ \sum_{i=1}^N b_i(x,t)u_i(t), & \text{if} \quad U = L_2(S_T;R^N). \end{cases} \quad (16)$$

Note 3. If bilinear forms $b(t;u,\eta)$ and $d(t;u,u)$ satisfy correlation (13), (14), so the core $K(x,y,t)$ of an operator $K(t)$ which is the solution of equation (12), formally satisfy the following integral-differential equation of Riccati type

$$\frac{\partial K(x,y,t)}{\partial t} = -A_x^*(t)K(x,y,t) - A_y^*(t)K(x,y,t) + \\ + \int_\Gamma \int_\Gamma \frac{\partial K(x,\xi,t)}{\partial \nu_{A_\xi^*}} G(\xi,\eta,t) \frac{\partial K(y,\eta,t)}{\partial \nu_{A_\eta^*}} d\xi d\eta - P(x,y,t) \tag{17}$$

with initial and boundary conditions of the type

$$\begin{cases} K(x,y,T) = Q(x,y), & (x,y) \in \Omega_x \times \Omega_y; \\ K(x,y,t) = 0, & (x,y,t) \in \Gamma_x \times \Omega_y \times (0,T); \\ K(x,y,t) = 0, & (x,y,t) \in \Omega_x \times \Gamma_y \times (0,T), \end{cases}$$

where

$$G(x,y,t) = \begin{cases} \int_\Gamma \int_\Gamma B(x,\xi,t) D^{-1}(\xi,\eta,t) B(y,\eta,t) d\xi d\eta, & \text{if} \quad U = L_2(S_T), \\ B^T(x,t) D^{-1}(t) B(y,t), & \text{if} \quad U = L_2(S_T;R^N), \end{cases} \tag{18}$$

$Q(x,y)$, $P(x,y,t)$, $D^{-1}(x,y,t)$ – cores of operators Q, $P(t)$ and $D^{-1}(t)$ accordingly;

$B(x,t) = \left[b_1(x,t), b_2(x,t), ..., b_N(x,t)\right]^T$;

indices operators $A(t)$, $\partial/\partial \nu_A$ indicate at which variable these operators act.

Denote by $u^k(t)$ optimal minimax control (11), obtained at k measurements (4) and consider the problem of construction recurrent algorithm of definition optimal control of initial optimization problem relatively the change in the number of observations k. Solution of this problem is given by the following theorem.

Theorem 2. The optimal minimax management $u^k(t)$ is determined by the following recurrent procedure

$$\begin{cases} u^k(t) = u^{k-1}(t) + h_{k-1}^{-1}(t) F(t) V_{k-1}(t) l_k(t) \left(z_k(t) - l_k(t; F^+(t) u^{k-1}(t)) \right), \\ u^0(t) = 0, \qquad k = 1,2,..., \end{cases} \tag{19}$$

where $F(t) = -D^{-1}(t) B^*(t) K(t)$, $h_{k-1}(t) = \left\langle l_k(t), V_{k-1}(t) l_k(t) \right\rangle /$;

"+" – an operation of pseudoinversion operators [10];

$V_k(t) \in L\left(L_2(Q_T), L_2(Q_T)\right)$ – selfadjoint operator that satisfy the following recurrent equation

$$\begin{cases} V_k(t) = V_{k-1}(t) - h_{k-1}^{-1}(t) V_{k-1}(t) l_k(t) \left\langle V_{k-1}(t) l_k(t), \cdot \right\rangle, \\ V_0(t) = E, \end{cases} \tag{20}$$

where E – the identity operator.

The proof of the theorem is carried out by using formulas of inversion block matrix operators [7,10].

Note 4. If $l_i(t)$, $i=1,2,...,k$ – linearly independent orthonormal in the space $L_2(\Omega)$ system of functions, namely $\langle l_i(t), l_i(j)\rangle = \delta_{ij}$, where δ_{ij} – Kronecker symbol, then the optimal control satisfies the following recursive equation

$$\begin{cases} u^k(t) = u^{k-1}(t) + F(t)l_k(t)z_k(t), & k=1,2,3,..., \\ u^0(t) = 0. \end{cases} \tag{21}$$

Whereas the effectiveness of management is determined by the quality criterion for this control, then it is considered in more detail the value of the functional (6) on optimal control (11). According to Theorem 1 it is determined by the following expression

$$I(u_0) = \lambda_{\max}(H^{-1}M^*K(0)M), \tag{22}$$

where the operator $K(t)$ satisfy the equation (12).

It is obviously, that to calculate $I(u_0)$ in general is quite difficult as for this purpose we must solve two difficult problems. The first problem is solving Ricatti equation and the second is determination of the maximum eigenvalue of infinite measurable operator. Therefore, let us stop on some partial cases where the value is calculated rather simply.

1.Consider the case of a distributed control limit, namely a case when bilinear form $b(t;u(t),\eta(t))$ is given by the formula (13) on condition $U = L_2(S_T)$, in which $B(x,y,t) = b(x)\delta(x-y)$, where $\delta(x-y)$ – Dirac delta function. Bilinear and quadratic forms $m(f,\eta)$, $h(f,f)$, $q(\varphi(T),\varphi(T))$, $p(t;\varphi,\varphi)$, $d(t;u,u)$ define by the following way

$$m(f,\eta) = \int_\Omega m(x)f(x)\eta(x)dx, \quad h(f,f) = \int_\Omega h(x)f^2(x)dx, \quad d(t;\varphi,\varphi) = \int_\Gamma d(x)u^2(x,t)dx,$$
$$q(\varphi(T),\varphi(T)) = \int_\Omega q(x)\varphi^2(x,T)dx, \quad p(t;\varphi,\varphi) = \int_\Omega p(x)\varphi^2(x,t)dx,$$

where $q(x)\ge 0$, $p(x)\ge 0$, $h(x)>0$, $d(x)>0$.

Then in the assumption that $A(t)$ – self-adjoint independent of time t operator, namely $A(t) = A = A^*$ can be shown that the value of the functional is equal to $I(u_0) = \max\limits_{1\le i<\infty} \dfrac{m_i^2}{h_i}k_i$, where

$$k_i = \alpha_i^{-1}\left[\mu_i \frac{p_i\alpha_i - \lambda_i + \operatorname{th}(\mu_i T)}{(p_i\alpha_i - \lambda_i)\operatorname{th}(\mu_i T) + \mu_i} + \lambda_i\right], \quad \mu_i = \sqrt{\lambda_i^2 + \alpha_i q_i},$$
$$\begin{pmatrix} m_i \\ h_i \\ q_i \\ p_i \end{pmatrix} = \int_\Omega \begin{pmatrix} m(x) \\ h(x) \\ q(x) \\ p(x) \end{pmatrix} \omega_i^2(x)dx, \quad \alpha_i = \int_\Gamma \frac{b^2(x)}{d(x)}\left(\frac{\partial \omega_i(x)}{\partial \nu_{A_x}}\right)^2 dx.$$

In the last formulas marked:

$\operatorname{th}(\cdot)$ – hyperbolic tangent;

λ_i and $\omega_i(x) \in L_2(\Omega)$ – eigenvalues and corresponding orthonormal in the space $L_2(\Omega)$ the eigenfunctions of operator that satisfy the equation

$$\begin{cases} \langle \omega_i, A\eta \rangle = \lambda_i \langle \omega_i, \eta \rangle \qquad \forall\ \eta \in H^2(\Omega) \cap H_0^1(\Omega), \\ \omega_i(x) = 0,\ x \in \Gamma; \quad \lambda_i \to -\infty \ \text{ при } \ i \to \infty. \end{cases} \tag{23}$$

2. Now let bilinear form $b(t;u(t),\eta(t))$ is determined by the ratio (13), in which the set of admissible controls $U = L_2(S_T;R^N)$, namely lets consider a case of limit focused controls. Relatively quadratic forms $q(\varphi(T),\varphi(T))$, $p(t;\varphi(t),\varphi(t))$, $d(t;u(t),u(t))$ suppose that

$$q(\varphi(T),\varphi(T)) = \langle q,\varphi(T)\rangle^2, \quad p(t;\varphi(t),\varphi(t)) = 0, \quad d(t;u(t),u(t)) = \sum_{i=1}^{N} d_i(t)u_i^2(t),$$

where $q \in L_2(\Omega)$; $d_i(t) \in L_2(0,T)$, $d_i(t) > 0$.

Then, using the results of the work [6,9], it can be shown that the functional value (22) equal to

$$I(u_0) = \lambda_{\max}\left(\nu(0)H^{-1}M^*r(0)\left\langle M^*r(0),\cdot\right\rangle\right) = \nu(0)\left\langle H^{-1}M^*r(0), M^*r(0)\right\rangle, \tag{24}$$

where

$$\nu(t) = \left(1 + \int_t^T \alpha(\tau)d\tau\right)^{-1},\ \alpha(t) = \sum_{i=1}^{N}\frac{1}{d_i(t)}\left\langle b_i(t), \frac{\partial r(t)}{\partial \nu_A}\right\rangle_\Gamma^2,\ r(t) = \sum_{i=1}^{\infty} e^{\lambda_i(T-t)}\langle q,\omega_i\rangle\omega_i, \tag{25}$$

λ_i and ω_i – eigenvalues and the corresponding eigenfunctions of the operator A that satisfy the equation (23).

Consider now the point boundary control $u(t) \in U = L_2(S_T;R^N)$. For this in (13) put $b_i(x,t) = \delta(x - x_i)$, $x_i \in \Gamma$, $i = 1,2,...,N$. Then the equation (2) describes the system with point boundary controls. We note that this range of functions $b_i(x,t)$ allowed under certain restrictions on the dimension of space $\Omega \subset R^n$ and on condition a higher smoothness of "test" functions $\eta(t)$ in (2). In particular it is possible if you put $n \le 3$ and require that functions $\eta(t)$ belong not to the space $H^{2,1}(Q_T)$, as it was supposed above, but belong to more sleek space of functions $H^{4,1}(Q_T)$.

We introduce the following definition

$$J_N(x_1,x_2,...,x_N) = \inf_{u \in L_2(S_T;R^N)} \sup_{f \in S_f}\left[\langle q,\varphi(T)\rangle^2 + \int_0^T \sum_{i=1}^{N} d_i(t)u_i^2(t)dt\right] \tag{26}$$

and consider the problem of determining a such number of regulators N in the form of feedback (5) and of their optimum location $\left(x_1^0, x_2^0, ..., x_N^0\right)$, $x_i^0 \in \Gamma$ at which the condition is executed

$$J_N(x_1^0, x_2^0, ..., x_N^0) = \inf_{x_i \in \Gamma,\ i=1,2,...,N} J_N(x_1,x_2,...,x_N) < \varepsilon, \tag{27}$$

where $\varepsilon > 0$ – some pre-set threshold value.

Using Theorem 1 and the ratio (24), (25), there can prove fairness of the following theorem.

Theorem 3. The number of regulators by which the inequality is done satisfies condition $N \geq N_0$, where

$$N_0 = \left[\frac{\Delta - \varepsilon}{\varepsilon \beta \gamma} \right] + 1, \tag{28}$$

$$\Delta = \left\langle H^{-1} M^* r(0), M^* r(0) \right\rangle, \quad \beta = \sup_{x \in \Gamma} \int_0^T \left(\frac{\partial r(x,t)}{\partial \nu_{A_x}} \right)^2 dt, \quad \gamma = \min_i \left(\max_{t \in (0,T)} d_i(t) \right)^{-1}, \tag{29}$$

$[\cdot]$ – an entire part of number. All regulators should be concentrated at one point which is defined as follows

$$x_0 = \arg \sup_{x \in \Gamma} \int_0^T \left(\frac{\partial r(x,t)}{\partial \nu_{A_x}} \right)^2 dt. \tag{30}$$

Note 5. The last theorem can be formulated also the following way. In order to get performed inequality (27) it is need only one point regulator at the point (30) of total intensity $\sum_{i=1}^{N} u_i(t)$, $N \geq N_0$, where

$$u_i(t) = R_i(t) z(t), \qquad R_i(t) = -\frac{\nu(t)}{d_i(t)} \frac{\partial r(x,t)}{\partial \nu_{A_x}} \Bigg|_{x=x_0} \int_\Omega r(y,t) l^T(y,t) dy \left\langle l(t), l^T(t) \right\rangle^{-1}$$

functions $\nu(t)$, $r(x,t)$ determined by formulas (25), $z(t)$ – observations type of (4), and N_0 satisfying ratio (28).

Note 6. If $d_i(t) \equiv d = const > 0$, $i = 1,2,3,...$, then N_0 – minimal number of regulators that satisfy inequalities (27).

Conclusions. The solution of several problems of synthesis of optimal control of distributed systems of parabolic type, which operate under conditions of uncertainty, is proposed. In addition, the solution of the problem of optimal location of the point limiting regulators and determination of their number is given.

Acknowledgment. The work was done and financially supported at the Department of automation and intelligent control systems, computer systems automation faculty of the National University of Food Technologies in. Kiev, Ukraine.

References

1. Кириченко, Н.Ф. Минимаксное управление и оценивание в динамических системах [Текст] /Kirichenko, N.F. Minimax Control and Estimation in Dynamic Systems /Автоматика/ Automation /. – 1982. – №1. – P. 32 – 39.
2. Наконечный, А.Г. Минимаксные оценки параметров [Текст] / Nakonechny, A.G. Minimax estimation of parameters / Вычислительная и прикладная математика / Computational and Applied Mathematics /. – 1979. – Vol.39. – P. 17 – 24.
3. Наконечный, А.Г. Мінімаксне оцінювання функціоналів від розв'язку крайових задач для параболічних рівнянь при точкових спостереженнях [Текст] / Nakonechniy, A.G. Mynymaks evaluating functional solution of boundary value problems for parabolic equations with point observations/ Вісник Київського університету / Bulletin of Kiev University /, Серія фізико-математичні науки / Series of Physical-Mathematical Sciences /. – 2001. – Vol.1. – P. 191–196.
4. Наконечний, О.Г. Оцінювання параметрів в умовах невизначеності [Текст] / Nakonechny, O.H. Estimation of parameters in uncertainty // Наукові записки КНУ ім. Т.Г. Шевченка / Scientific notes KNU. TH Shevchenko /. – 2004. – Vol.7. – P. 102 – 112.

5. Лобок, А.П. Минимаксные регуляторы в системах с распределенными параметрами [Текст] / Loboc, A.P. Minimax regulators in systems with distributed parameters / Вестник Киевского университета. Моделирование и оптимизация сложных систем / Bulletin of the University of Kiev. Simulation and optimization of complex systems /. – 1983. – Vol.2. – С. 62 – 67.
6. Лобок, О.П. та інші. Синтез оптимального мінімаксного керування лінійними багатовимірними об’єктами за умови неточного і неповного їх вимірювання [Текст] / Loboc, A.P. and others. Synthesis minimax optimal control of linear multidimensional objects provided inaccurate and incomplete to measure / Збірник наукових праць КНТУ.: Кіровоград. / Proceedings of KNTU .: Kirovograd./ – 2013. – Vol 26. – P. 124 – 132.
7. Люстерник, Л.А. Элементы функционального анализа [Текст] / Lyusternik, L.A. Elements of functional analysis/ – М.: Наука /Science /, 1979. – 520 p.
8. Наймарк, М.А. Линейные дифференциальные операторы [Текст]/ Naimark, M.A. Linear differential operators. – М.: Наука, Science, 1969. – 526 с.
9. Лобок, О.П. Мінімаксне управління лінійними багатовимірними об’єктами зі стаціонарними зовнішніми збуреннями [Текст] / Loboc, A.P. and others. Minimax control linear multidimensional objects from stationary external perturbations / Наукові праці Національного університету харчових технологій. / Proceedings of the National University of Food Technologies./ – Київ: НУХТ / Kyiv: NUFT /. – 2013. – № 46. – P. 43 – 51.
10. Като, Т. Теория возмущений линейных операторов [Текст] / Kato, T. Perturbation theory for linear operators / – М.: Мир / Peace /, 1972. – 739 p.

О.П. Лобок, доц., канд. фіз.-мат. наук, Б.М. Гончаренко, проф., д-р техн. наук
Національний університет харчових технологій, м.Київ, Україна
Л.Г. Віхрова, проф., канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна

Оптимальне керування лінійними динамічними розподіленими системами в умовах невизначеності

У статті розглянуті задачі синтезу оптимального керування системами, що функціонують в умовах невизначеної інформації й описуються узагальненими рівняннями в частинних похідних параболічного типу. Реальні об’єкти керування в більшості випадків функціонують в умовах невизначеності. При цьому часто відносно збурень, що діють на об’єкт, відсутня достовірна інформація щодо характеру самих збурень. Проблема нелінійності об’єкта керування при наявності запізнювання впливає на характер керованих динамічних процесів і суттєво впливає на вигляд та складність шуканих керувань. В цьому випадку, як правило, віддають перевагу мінімаксному або гарантованому управлінню, яке забезпечує достатню якість перехідних процесів за найгірших зовнішніх збурень. Для того, щоб забезпечити високу якість систем регулювання, необхідно використовувати більш точні математичні моделі об'єктів управління, які враховують не тільки час, але й просторові координати, а саме - системи з розподіленими параметрами. У статті розглянуті питання про побудову регуляторів для класу систем з розподіленими параметрами параболічного типу, щоб знайти конструктивне рішення проблеми мінімакса кордону синтезу розподіленої системи і управління точкою, а також знайти алгоритм для визначення кількості та оптимального розташування регуляторів точок. Керування має вигляд зворотного зв'язку від спостережуваних вимірів, для реалізації якого необхідно розв'язати інтегро-диференціальне рівняння типу Ріккаті. Окремо побудовані розподілені та зосереджені граничні регулятори, а також наведено рекурентний алгоритм визначення оптимального керування стосовно зміни числа спостережень. Розроблено алгоритм визначення необхідної кількості точкових регуляторів та їх оптимальне розташування на границі області, при яких критерій якості не перевищує заданого порогового значення.

мінімаксне керування, точкові граничні регулятори, соболевські простори, нерівність Релея, білінійна форма

Одержано 17.04.17

УДК669.162.1

В. Й. Лобов, доц., канд. техн. наук, О.В. Митрофанов, асп.
Криворізький національний університет, м.Кривий Ріг, Україна
E-mail: mitrofanov.322@gmail.com

Аналіз енергетичних характеристик турбомеханізмів

Показано, що турбомеханізмиє енергоємними в порівняні з іншими технологічними об'єктами і агрегатами підприємства. Виконано порівняння втрат споживання електричної енергії вентиляторами, використовуючи паспортну номінальну корисну гідравлічну потужність з одної сторони івраховуючи,з іншої сторони,максимальні та мінімальні значення статичних коефіцієнтів корисної дії, статичного тиску та обсяги повітря, що відповідають значенням параметрів вентилятора в точках характеристик. При цьому розрахунок виконано для 25 режимів. Надані результати виконаних розрахунків, які визначають залежність енергоспоживання турбомеханізмами, які залежать від технічних параметрів і режимів роботи та може змінюватися в десятки разів.
газоповітряний потік, турбомеханізми, питоме енергоспоживання, мережа живлення, залежність, ефективність

В. И. Лобов, доц., канд. техн. наук, А.В. Митрофанов, асп.
Криворожскийнациональныйуниверситет, г.КривойРог, Украина
Анализэнергетических характеристик турбомеханизмов
Показано, что турбомеханизмы являются энергоемкими по сравнению с другими технологическими объектами и агрегатами предприятия. Выполнено сравнение потерь потребления электрической энергии вентиляторами, используя паспортную номинальную полезную гидравлическую мощность с одной стороны и учитывая, с другой стороны, максимальные и минимальные значения статических коэффициентов полезного действия, статического давления и объемы воздуха, которые соответствуют значениям параметров вентилятора в точках характеристик. При этом расчет выполнен для 25 режимов. Представлены результаты выполненных расчетов, которые определяют зависимость энергопотребления турбомеханизмов, которые зависят от технических параметров и режимов работы, и может изменяться в десятки раз.
газовоздушный поток, турбомеханизмы, удельное энергопотребление, сеть питания, зависимость, эффективность

Постановка проблеми. Електричну енергію у сучасному розвиненому суспільстві широко застосовують у виробничій сфері, сільському господарстві та побуті. Тепер навіть уявити важко, яким було б життя людей в умовах відсутності електроенергії. За її допомогою забезпечується виконання як основних, так и допоміжних технологічних операцій, шляхом використання різних механізмів і агрегатів. До такого обладнання відносяться турбомеханізми: вентилятори, насоси, повітродувки, димососи, компрессори та інші. Такі турбомеханізми, як димососи та вентилятори використовуються на фабриках огрудування в конвеєрних випалювальних машинах, а для нагнітання або видалення повітря в шахтах, в кар'єрах, або підприємствах гірничо-збагачувального комплексу, у металургійному виробництві та житлово-комунальному господарстві – вентилятори різної потужності. Як показують дослідження, турбомеханізми знаходять масове застосування, тому їх відносять до механізмів, котрі споживають значну частину електроенергії, що виробляється в країні, та в основному витрачається на електричний привід цих механізмів. Технічна

© В. Й. Лобов, О.В. Митрофанов, 2017

досконаліть турбомеханізмів у технологічному процесі в значній мірі визначають їх раціональне використання електроенергії, а економічність – дозволяє виконувати роботу, необхідну за технологічними умовами, з високими енергетичними показниками та найменшими енергетичними затратами.Так, як турбомеханізми є енергоємними в порівняні з іншими технологічними об'єктами та агрегатами підприємства, то вони потребують уточнення витрат електроенергії при різних навантаженнях і режимах роботи. Це надасть можливість визначити шляхи удосконалення по витратам електроенергії, так як раціональне використання та економне витрачання первинноїенергії, що є актуальною задачею для гарантування сталого розвитку, що дозволить зменшити її використання, тобто знизити собівартість готової продукції. Тому тема статті є актуальною і має наукове й практичне значення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Складність зняття реальних показників навантаження при забезпеченні турбомеханізмами технологічних режимів не дозволяє отримати контрольовані дані, які можуть бути використані для введення у систему автоматичного керування з метою економії електроенергії. Як показують дослідження, сучасний стан автоматизації турбомеханізмів не дає у повній мірі визначити шляхи економії електроенергії. На сьогоднішній день активно проводяться дослідження в області створення ефективних методів та засобів окремих механізмів і агрегатів, що не дозволяють комплексно для класу турбомеханізмів вирішити дану проблему. Так, наприклад, тема енергозбереження та енергоефективності розглядається окремо при роботі вентиляторних установок і є однією з основних тем, що в даний час обговорюються фахівцями [1-9]. Як показує аналіз відомих способів і пристроїв для керування електроспоживання різними механізмами, що відносяться до турбомеханізмів, кількість публікацій збільшується. Більших із них використовуються для зниження непродуктивних витрат електроенергії побутовими і виробничими споживачами. Так, наприклад, існує два способи покращення економічності роботи вентиляторів при часткових навантаженнях. Перший – зміна швидкості обертання колеса вентилятора, другий – використання направлених апаратів, які впливають на гідравлічну роботу вентилятора при постійній швидкості обертання. Проте таке керування вентиляторної установки забезпечує не значну економію споживчої електроенергії з мережі живлення [4-10].

Масштабні дослідження та розробка різних способів управління турбомеханізмами по збереженню витрат енергоносіїв, що витрачаються на виконання технологічних операцій, проводяться як за кордоном, так і в нашій країні при участі провідних технічних вузів, багатьох підприємств та організації [1-4]. Так, проведені наукові дослідження параметрів провітрювання діючих шахт за тривалий період їх експлуатації показали, що понад 40% шахт мають великий діапазон зміни кількості повітря, яке подається в підземні вироблення для їх провітрювання, а тиск для переміщення повітря по виробках змінюється в два і більше разів. Це призводить до того, що більш половини всіх вентиляторів працюють з ККД нижче 0,6. Експлуатація безперервно цілодобово працюючого вентилятора з низьким ККД призводить до надмірно великої витрати електроенергії. Знизити невиправдані витрати електроенергії можна, використовуючи на вентиляторах регульований електропривод. Наукові розробки та досвід експлуатації електрообладнання регульованого електроприводу на вентиляторних установках показав доцільність їх застосування, як з точки зору економічності роботи вентилятора, так і з точки зору настройки вентилятора на заданий режим роботи. Це відмічається у підготовленій НАН України праці «Стратегія енергозбереження в Україні ...», яка видана в 2006 році [11]. Як вказано у цій праці,

важлива роль у вирішенні цієї проблеми належить електроприводу, що споживає близько 70% всієї вироблюваної електроенергії.

Відомий спосіб, який дозволяє зменшити кількість спожитої електроенергії з мережи живлення за рахунок використання додаткової електроенергії, що отримується із енергії газоповітряного потоку відпрацьованих, вивільнених або видуваємих вентилятором технологічної установки [12-14].

Постановка завдання. Метою даної статті – виконати аналіз енергетичних характеристик по витратам електричної електроенергії існуючих турбомеханізмів при роботі в різних режимах та навантаженнях, щоб встановити реальне електроспоживання з мережі живлення цим обладнанням, обґрунтувати та намітити шляхи йогозниження.

Викладення основного матеріалу та результати. Для визначення споживаємої електричної енергії з живлячої мережі турбомеханізмами в різних режимах роботи розглянемо з них: вентилятори головного провітрювання для шахт (ВГП), часткового провітрювання та загального призначення; вентилятори газових котлів; димососи для конвеєрних випалювальних машин і котлів.

На залізорудних шахтах Криворізького басейну для провітрювання підземних виробок і поверхневих споруд застосовуються ВГП, вентилятори часткового провітрювання та вентилятори загального призначення. ВГП, що забезпечують подачу повітря всій шахті, відносять до головних вентиляторів, а забезпечення повітрям її крил належить допоміжним вентиляторам. ВГП є стаціонарним електромеханічним обладнанням шахт і призначені для руху повітряного струменя, що надходить в підземні виробки шахт. До допоміжних вентиляторів відносяться підземні вентилятори, які обслуговують один або кілька експлуатаційних дільниць або блоків, періодично переносяться в міру посування гірничих робіт. Різновидом вентиляторів для часткового провітрювання являються прохідницькі вентилятори, що призначені для провітрювання забоїв, стовбурів і пристовбурних виробок.

Вентилятори загального призначення, або як їх називають сантехнічними, застосовуються для переміщення повітря в системах припливно-витяжної вентиляції виробничих приміщень збагачувальних фабрик або фабрикогрудування, котельних агрегатів, калориферних установок, тощо. Для агломераційного виробництва та інших цехів металургійного заводу характерно широке використання ексгаустерів, димососів, повітродувок, турбокомпресорів. На агломераційних машинах стрічкового типу для випалу агломерату, або конвеєрних машин для випалу котунів гази, що відходять, відсмоктуються ексгаустерами (димососами), тобто вентиляторами, зазвичай відцентрових, що працюють на всмоктування, для видалення димових газів, пилу та інших шкідливих домішок. Відповідно такі технологічні машини розділяють на технологічні зонидля кращого використання тепла. Зони перекриті зверху спеціальними секціями горна та тепловий режим у кожній секції встановлюють, як правило, незалежно від режиму інших секцій. Гази з кожної зони відсисаються окремими димососами.

Класифікація газових котлів для опалення достатньо велика і різноманітна та відноситься до традиційних пристроїв, що не відчувають кардинальних змін ось уже багато років. За типом розміщення вони бувають настінними та підлоговими. Цей вид опалювальної техніки з'явився порівняно недавно, але вже встиг здобути чималих впроваджень. Котел газовий опалювальний настінного типу називають ще міні-котельні. І це не випадково: в невеликому корпусі ховається не тільки теплообмінник, пальник і пристрій управління, система безпеки, розширювальний бак, термометр, манометр, а й використання вентиляторів або димососів (ВГК). За способом виведення

відпрацьованих газів котли діляться на зразки з примусовою і природною тягою. У першому випадку видалення продуктів розпаду відбувається за допомогою вбудованого вентилятора, у другому – за рахунок тяги димаря. Теплообмінник виготовляється зазвичай із сталі або чавуну. Виділяють підлогові газові котли з надувними (змінними вентиляторами) і атмосферними пальниками. Перші – мають більш високий ККД і більш високу вартість. Другі – дешевше, та й працюють набагато тихіше.

Для електричного приводу ВГП використовують синхронні і асинхронні електродвигуни з фазовим або короткозамкненим ротором, які відносяться до основних споживачів електричної енергії. Для порівняння спожитої електроенергії вибрані шахтні вентилятори типів ВЦ, ВЦД і ВОД потужністю від 125 кВт до1600 кВт з частотою обертання валу від 375 об/хв. до 1500 об/хв., для газових котлів – ВЦ, ВЦД і ВОД потужністю від 125 кВт до1600 кВт з частотою обертання валу від 375 об/хв. до 1500 об/хв. та вентиляторів типів RR, R2E і WWK потужністю від 10 кВт до 75 кВт з частотою обертання валу від 2400 об/хв. до 2840 об/хв., а для димососів – ДН, Д, ДОД, ГД і ДГР потужністю від 11 кВт до1600 кВт з частотою обертання валу від 600 об/хв. до 1500 об/хв.

Витрати споживання електричної енергії для любої вентиляторної установки (турбомеханізму) визначають наступним чином:

$$P_{вит.} = \left[\frac{P_{ву} \times N_{год}}{100} \right] \times N_{дн.} \times N_{рік} \ , \qquad (1)$$

де $P_{ву}$ – номінальна корисна гідравлічна потужність, кВт;

$N_{год}$ – кількість годин роботи вентиляторної установки, год;

$N_{дн.}$ – кількість днів в місяці роботи вентиляторної установки, дн.;

$N_{рік}$ – кількість днів в рік роботи вентиляторної установки, дн.

Вентилятори ВГП працюють в рік практично цілодобово, за винятком святкових днів та їх технічного обслуговування, що в середньому на рік складає N рік = 360 днів. При цьому *Nгод* дорівнює 24 год, а *Nдн*. відповідно 30 днів у місяці, інші вентилятори мають інші терміни роботи. Параметр вентилятора *Рву*, що характеризує гідравлічну потужність, передану вентилятором переміщуваного їм повітрю і визначається в загальному випадку за формулою:

$$P_{ву.} = Q \times p_{sv} / 1000 . \qquad (2)$$

У формулі 2 прийнято: Q – обсяг повітря, що протікає в одиницю часу через вентилятор, віднесений до умов всмоктування. Відповідає об'ємній витраті повітря, $м^3 \cdot с^{-1}$; p_{sv} – статичний тиск, Па, що є різницею між повним тиском і динамічним тиском, розрахованим по середньо видаткової швидкості повітряного потоку на виході з дифузора вентилятора.

Для вентиляторів, вибраних порівняння, розраховано по формулі (1) втрати споживання електричної енергії, використовуючи паспортну номінальну корисну гідравлічну потужність. Проте, для визначення реального споживання електроенергії, наприклад, для ВГП необхідно враховувати найбільш раціональні та ймовірні режими їх експлуатації. Для цього розраховано питоме енергоспоживання ВГП, що визначається в нормальній області режимів роботи вентиляторів, використавши методику, наданої в [15] та зведеного графіка аеродинамічних характеристик,

побудованого відповідно з додатком 3 наданого в цьому ж документі. Для зведеного графіка використовуємо максимальні та мінімальні значення статичних коефіцієнтів корисної дії η_{si}, статичного тиску p_{svi} та обсяги повітря Q_i, що відповідають значенням параметрів вентилятора в точках характеристик для 25 режимів.

Питоме енергоспоживання E_i визначається для різних режимів роботи вентилятора та дорівнює відношенню потужності N_i, споживаної вентилятором при роботі в цій точці характеристики, до корисної гідравлічної потужності

$$E_i = \frac{N_i}{P_i} = \frac{Q_i \times p_{svi}}{1000 \times \eta_{si}} : \frac{Qi \times p_{svi}}{1000} = \frac{1}{\eta_{si}}, \quad (3)$$

де Q_i, p_{si}, η_{si} – значення параметрів вентилятора в точці характеристики. Розрахунок питомого енергоспоживання вентилятора проводиться за формулою:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{25} E_i}{25}. \quad (4)$$

Результати порівнянь характеристик для різних типів турбомеханізмів, представлені на рис.1 у відносних одиницях.

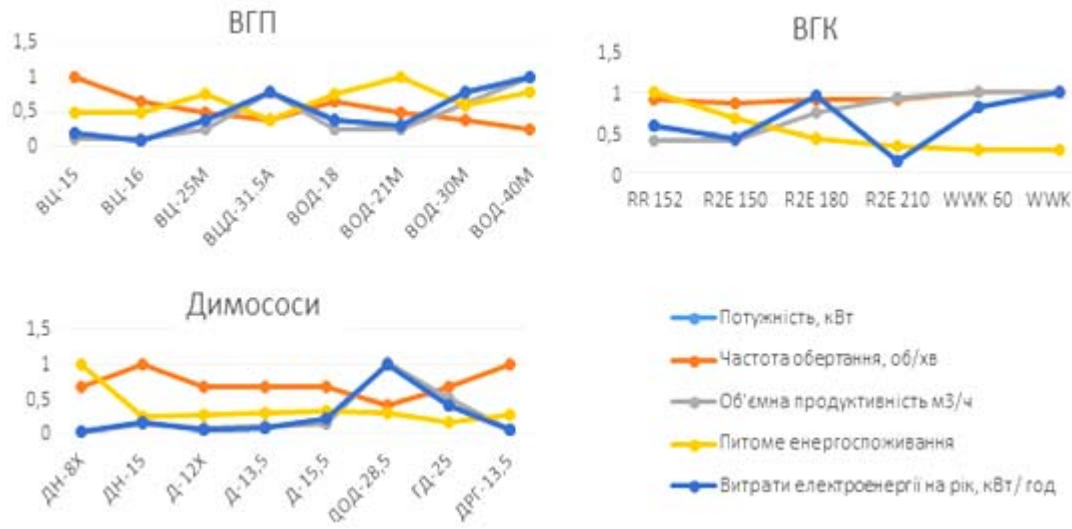


Рисунок 1 – Результати порівнянь характеристик для різних типів турбомеханізмів

Як видно з наданого графіка ГВП, представленого на рис.1, витрати електроенергії для шахтних вентиляторів ГВП в залежності від потужності електродвигунів на рік відрізняються майже у 13 разів та змінюються від 324000 до 4147200 кВт/рік, а питоме енергоспоживання, з урахуванням найбільш раціональних та ймовірних режимів їх експлуатації, змінюється приблизно 2, 6 рази, тобто від 1,2 до 3,1. Результати порівнянь для димососів представлені в залежності від потужності електродвигунів на рік відрізняються майже у 14 разів та змінюються від 285120 до 4147200 кВт/рік, а питоме енергоспоживання, з урахуванням найбільш раціональних та ймовірних режимів їх експлуатації, змінюється приблизно 7 разів, тобто від 0,36 до 2,5. Одночасно, як видно з наданого графіка ВГК, для цих механізмів в залежності від потужності електродвигунів на рік відрізняються майже у 3 рази та змінюються від 82944 до 194400 кВт/рік, а питоме енергоспоживання, з урахуванням найбільш

раціональних та ймовірних режимів їх експлуатації, змінюється приблизно 3 рази, тобто від 1,2 до 4,4.

Висновки. Для порівняння втрат споживання електричної енергії вентиляторами не достатньо використовувати паспортну номінальну корисну гідравлічну потужність. Реальне визначення споживання електроенергії турбомеханізмом повинно враховувати найбільш раціональні та ймовірні режими його експлуатації. Для розрахунку питомого енергоспоживання, що визначається в нормальній області режимів роботи турбомеханізму, необхідно використовувати максимальні та мінімальні значення статичних коефіцієнтів корисної дії, статичного тиску та обсяги повітря, що відповідають значенням параметрів вентилятора в точках характеристик. При цьому оптимально необхідно виконувати розрахунок для 25 режимів. Як показали результати дослідження, залежність енергоспоживання турбомеханізмами визначається технічними параметрамиі режимів роботи та може змінюватися в десятки разів, тому потребує розробки засобів і пристроїв автоматизації для її економії.

Список літератури

1. Голинько, В. И. Вентиляция шахт и рудников: учеб.пособие [Текст] / В. И. Голинько, Я.Я. Лебедев, О. А. Муха. – Д.: Национальный горный университет, 2012. – 266 с.
2. Чершаних, В.М. Системи електроприводу і автоматики шахтних стаціонарних машин та установок [Текст] / В.М. Чершаних. – М. : Надра, 1976. – 398 с.
3. Абрамов Ф.А. Автоматизация проветривания шахт [Текст] / Ф.А. Абрамов, В.А. Бойко. – Киев: Наукова думка, 1967. – 310 с.
4. Петров, Н.Н. Управление воздухоподачей для технологических нужд как источник энергосбережения [Текст] / Н.Н. Петров, Д.В. Зедгенизов // Промышленная энергетика. – 2000. – № 11. – С.42 – 49.
5. Зедгенизов, Д.В. Анализ способов регулирования режима работы тоннельных осевых вентиляторов [Текст] / Д.В. Зедгенизов, А.М. Красюк, Н.А. Попов // Метро. – 2000. – № 5-6. – С. 23-27.
6. Зедгенизов, Д.В. Управление синхронным электроприводом главного вентилятора при автоматизации проветривания шахт [Текст] / Д.В. Зедгенизов // Горный информационно-аналитическийбюллетень. - 2000. - № 8. – С. 72 - 76.
7. Суворов, М.В. Энергосберегающий комплекс управления тягодутьевыми механизмами котельной [Электронный ресурс] / М.В. Суворов // Энергосбережение. – № 3. –2004. – Режим доступа: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2501
8. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод тепловых производственных механизмов и технологических комплексов: учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений / 3-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. –576с.
9. Дымосос серии ST [Электронный ресурс]. –Режим доступу: http:// www.riello.su›products/img/ дымососST_3.pdf, свободный.
10. Электропривод как энергосберегающий фактор в промышленности и ЖКХ Украины / В.А. Барский, А.С. Бешта, Н.В. Горбачев, [и др.] // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – № 9(115). – С.2–11.
11. Спосіб отримання електроенергії.Патент України № 105303 U, опубл.2016.03.10,бюл. №5/2016. МПК F03D 1/04 (2006.01), F03D 9/25 (2016.01).
12. Спосіб отримання електроенергії.Патент України № 110298, опубл.2016.10.10,бюл. №19/2016. МПКG03D 5/00, F01B 1/00.

Viacheslav Lobov, Assoc. Prof., Phd tech. sci., Alexandr Mitrofanov, post-graduate
KryvyiRih National University, Kryvyi Rih, , Ukraine.

Analysis of energy characteristics of turbo-mechanisms

The purpose of this article is to analyze the characteristics of electrical power of turbo-mechanisms at work in different modes and loads, to establish the power consumption of equipment and find the ways to reduce it.

The comparison of electrical power loss consumption of fans using the nameplate nominal effective hydraulic power on the one hand and the maximum and minimum values of the static efficiency coefficient, static pressure and air volume corresponding to the values of fan parameters in the characteristic points on the

other hand is carried out. The calculation is performed for 25 modes. The results of the calculations which determine the dependence of turbo-mechanisms energy on technical parameters and operating conditions may ten times vary.

To define real power consumption of turbo-mechanisms we should take into account the most rational and possible modes of its operation.To calculate power intensity, defined in the normal turbo-mechanisms operating modes, we must use the minimum and maximum values of static efficiency, static pressure and air volume corresponding to the values of fan parameters performance.In this case we should perform the calculation for the 25 modes.The results of the study prove the dependence of turbo-mechanisms power of technical parameters and operating conditions which may vary by tens of times; therefore, it requires further investigation of equipment automation and devices for its saving.

air-gas flow, turbo-mechanisms, specific power supply, power system, dependence, efficiency

Одержано 12.03.17

УДК 681.513.5

Oleksiy Lobok, Assoc. Prof., Phd phys.&math. sci., Borys Goncharenko, Prof., DSc., Maryna Sych, post-graduate
National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine
Larysa Vihrova, Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
E-mail: VIHROVALG@ukr.net

Modeling of optimal automatic control of the process of biological clearing of polluted waters by fractional order regulators

The problem of modeling the control of the process of biological treatment of polluted waters using fractional $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - regulators is considered and solved. Optimum tunings of fractional regulators are obtained, the dynamics of transient processes of control action and the state of the purification system is investigated. Numerical simulation of fractional and classical control is carried out, a higher efficiency of fractional $PI^{\lambda}D^{\mu}$ regulators is shown.

fractional calculus, differentintegrator, optimal control, numerical modeling, bio-purification of waters

А.П. Лобок, доц., канд. физ.-мат. наук, Б.М. Гончаренко, проф., д-р техн. наук, М.А. Сыч, асп.
Национальный университет пищевых технологий, Киев, Украина
Л.Г. Вихрова, проф., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, Кропивницкий, Украина

Моделирование оптимального автоматического управления процессом биологической очистки загрязненных вод регуляторами дробного порядка

Решается задача числового моделирования управления процессом биологической очистки загрязненных вод с помощью дробных $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - регуляторов. Получены оптимальные настройки дробных регуляторов, исследована динамика переходных процессов управляющего воздействия и состояния очистной системы. Проведено численное моделирование управления дробными $PI^{\lambda}D^{\mu}$ и классическим PID - регулятором, показана более высокая эффективность дробных $PI^{\lambda}D^{\mu}$ регуляторов.

дробное исчисление, дифференитегратор, оптимальное управление, численное моделирование, биоочистка вод

© Oleksiy Lobok, Borys Goncharenko, Maryna Sych, Larysa Vihrova, 2017

Introduction. A fractional calculation deals with derivatives and integrals of random order (rational, actual and even complex). Riman, Liouville, Grünwald, Litnik [4,5,8] began in 17 century a fractional calculation to occupy. But especially actively the theory of fractional calculation develops in recent year, and the results of her widely drawn on in the areas of research of chaotic dynamics, dynamic neural networks with fractional orders, constructing (to the synthesis) of regulators of fractional orders in the theory of automatic control and others like that.

Operator, generalizing classical differential and integral operators, called the operator type

$$ {}_aD_t^{\gamma} = \begin{cases} d^{\gamma} / dt^{\gamma}, & \gamma > 0 \\ 1, & \gamma = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^{-\gamma}, & \gamma < 0 \end{cases}, \quad (1) $$

where γ – order fractional operator (real number);

a – a constant related to the initial conditions of the dynamic process.

Operator (1) derivativintehrator is so called because it combines two things at once – derivative and integral.

Formulation of the problem. Traditionally, the theory and practice of automatic control is focused on the use of classical differential or integral calculus, it is logical that the development of fractional calculus is needed opportunities to study the application of the laws of fractional fractional management and building controls and control systems identifying characteristics with them.

The purpose of the article. The article is not only a fractional comparison with classic controls and capabilities and efficiency of their application in automatic control, but the numerical simulation of control processes purification of contaminated water.

Presenting main material. This paper considers the problem of numerical modeling of process control biological wastewater treatment using activated sludge - regulators fractional order. Cleaning system (Fig. 1) consists of a bioreactor- aeration tank and clarifier sludge.

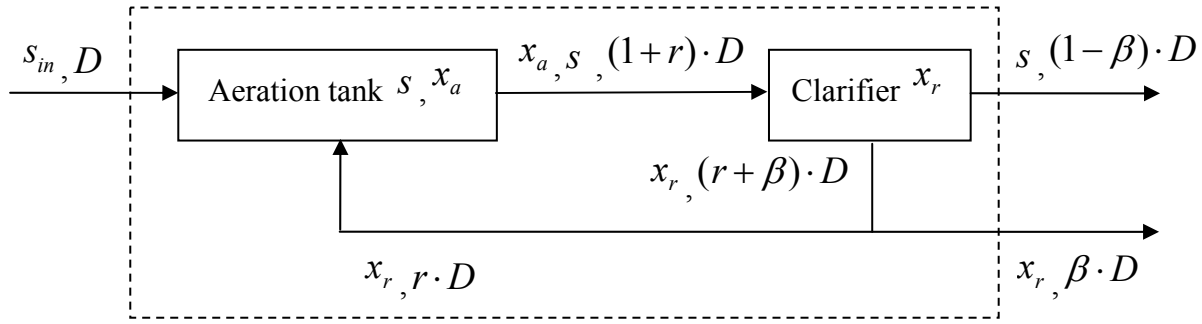


Figure 1 – Wastewater treatment process

A mathematical model describing water treatment for the scheme is obtained from materialbalance for aerator and clarifier as the following system of differential equations.

$$\begin{cases} \dfrac{dx_a(t)}{dt} = \mu(t)x_a(t) - D(t)(1+r)x_a(t) + rD(t)x_r(t), \\ \dfrac{ds(t)}{dt} = -\dfrac{\mu(t)}{Y}x_a(t) - D(t)(1+r)s(t) + D(t)s_{in}(t), \\ \dfrac{dx_r(t)}{dt} = -D(t)(\beta+r)x_r(t) + D(t)(1+r)x_a(t), \end{cases} \quad (2)$$

where $x_a(t)$, $s(t)$ – according biomass concentration and substrate in the bioreactor;

$x_r(t)$ – recirculation concentration of biomass;

$D(t)$ – dilution, defined as $D(t) = F(t)/V$, where $F(t)$ – volumetric flow rate;

V – volume bioreactor;

$s_{in}(t)$ – substrate concentration in the input stream;

Y – factor output (yield) biomass;

$\mu(t)$ – biomass specific growth rate, which is defined by Mono [3]

$$\mu(t) = \mu_{\max}\frac{s(t)}{k_s + s(t)}, \quad (3)$$

where μ_{max} – maximum specific growth rate biomass;

k_s – saturation constant, determined experimentally;

r, β – coefficients determined in accordance recirculating flow ratio and flow of waste biomass to the incoming flow;

x_{a0}, s_0, x_{r0} – according biomass concentration, substrate and recirculation of biomass at the initial time t_0;

$t_0 < t \le T$, T – end-time process control.

A value $s(t)$ (the concentration of the substrate in the bioreactor, which determines the quality of water) is selected as an adjustable parameter (output model). The system function dilution $D(t)$ is selected as controlling influence (action).

For the convenience the system (2) is written in vector form

$$\begin{cases} \dfrac{dx(t)}{dt} = f(x(t),u(t)), \qquad t_0 < t \le T, \\ x(t_0) = x^0, \end{cases} \quad (4)$$

where $$f(x(t),u(t)) = \begin{pmatrix} f_1(x(t),u(t)) \\ f_2(x(t),u(t)) \\ f_3(x(t),u(t)) \end{pmatrix}, \quad x(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_a(t) \\ s(t) \\ x_r(t) \end{pmatrix}, \quad u(t) = D(t), \quad (5)$$

$$f_1(x(t),u(t)) = \mu(x(t))x_1(t) - (1+r)x_1(t)u(t) + rx_3(t)u(t),$$

$$f_2(x(t),u(t)) = -\frac{\mu(x(t))}{Y}x_1(t) - (1+r)x_2(t)u(t) + s_{in}(t)u(t),$$

$$f_3(x(t),u(t)) = -(\beta+r)x_3(t)u(t) + (1+r)x_1(t)u(t),$$

$$\mu(x(t)) = \mu_{\max}\frac{x_2(t)}{k_s + x_2(t)}.$$

Adjustable parameter while written as

$$s(t) = x_2(t) = c^T x(t), \tag{6}$$

where $c = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}^T$.

Transformed system (4) is linearized in the vicinity of a given nominal control u^* and corresponding vector equilibrium $x^* = (x_1^*, x_2^*, x_3^*)^T$, in which $f(x^*, u^*) = 0$ and which is the solution of systems of nonlinear equations $f(x, u^*) = 0$ on vector x. We introduce the notation

$$\Delta x(t) = \begin{pmatrix} \Delta x_1(t) \\ \Delta x_2(t) \\ \Delta x_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1(t) - x_1^* \\ x_2(t) - x_2^* \\ x_3(t) - x_3^* \end{pmatrix} = x(t) - x^*, \quad \Delta u(t) = u(t) - u^*. \tag{7}$$

Then the system of equations linearized model (4) is represented as

$$\begin{cases} \dfrac{d\Delta x(t)}{dt} = A\Delta x(t) + b\Delta u(t), \\ \Delta x(t_0) = x^0 - x^*, \end{cases} \tag{8}$$

Considering the ratio (6) and symbols (7), the equation for the controlled variable (output model) can be written as $\Delta s(t) = c^T \Delta x(t)$, (9)

where $\Delta s(t) = s(t) - c^T x^*$.

Model management (8) has one input and one output. Known methods of stabilization required parameters is to use regulators in the feedback circuit as part of an automated control system. We use fractional $PI^\lambda D^\mu$- regulator [1,2] and compare its performance with classic *PID* - regulator.

Similar work [7, 9] $PI^\lambda D^\mu$- regulators represented as

$$\Delta u(t) = k_P\left(\Delta s(t)\right) + k_I\left({}_{t_0}D_t^{-\lambda}\Delta s(t)\right) + k_D\left({}_{t_0}D_t^{\mu}\Delta s(t)\right), \tag{10}$$

where k_P, k_I, k_D – adjustment coefficients regulator;

${}_{t_0}D_t^{-\lambda}\Delta s(t)$ – fractional derivative order λ;

${}_{t_0}D_t^{\mu}\Delta s(t)$ – fractional integral of order μ, moreover λ, μ – arbitrary real number in the interval, ie $\lambda, \mu \in (0,2)$. If $\lambda \geq 2$ or $\mu \geq 2$, then $PI^\lambda D^\mu$ - regulator takes high order, and structure it differs from the classical *PID* - regulator. The controller (10) is a generalized fractional - regulator. At $\lambda=1$ and $\mu=1$ are classic *PID* - regulator, if $\lambda=1$, $\mu=0$, we get *PI* - regulator, if $\lambda=0$, $\mu=1$ have *PD* - control and in $\lambda=0$, $\mu=0$ – *P* - regulator. These types of classic *PID* - regulators are special cases of fractional $PI^\lambda D^\mu$ - regulator (10). However $PI^\lambda D^\mu$ - regulator is more flexible and has the ability to better regulate (adjust) the dynamic properties of control systems. On $P-I-D$ - plane, this means that instead of "hops" between four fixed points (*P, PI, PD і PID* (Fig. 2)) the plane is the possibility of continuous movement ($PI^\lambda D^\mu$) between them.

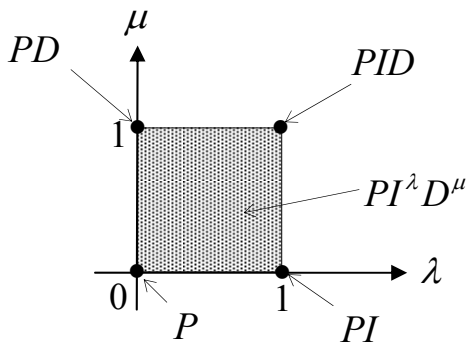


Figure 2 – $P-I-D$ - plane order fractional derivatives and integrals

Fractional derivatives and integrals defined as the limit

$$ {}_{t_0}D_t^{\alpha} f(t) = \lim_{h\to 0} h^{-\alpha} \sum_{j=0}^{\left[\frac{t-t_0}{h}\right]} (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(t-jh), \tag{11} $$

where $\binom{\alpha}{j}$ – binomial coefficients form $\binom{\alpha}{j} = \dfrac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(j+1)\cdot\Gamma(\alpha-j+1)}$, in which $\Gamma(x)$ – Euler gamma function view $\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} e^{-y} y^{x-1} dy$ (recall that in general, $x = k$ it is $\Gamma(k+1) = k!$);

$[\cdot]$ – floor and ceiling functions;

$h > 0$ – increase temporal coordinates (quantization).

If $\alpha > 0$, then correlation (11) defines a fractional derivative, if $\alpha < 0$, then – fractional integral. Therefore the relation (11) is also often called derivativintehrator as equation (1). Note also that in the entire orders α in (11) will end amount, while fractional α – an infinite number of members of the series.

Considering (9), $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - regulator (10) is written as the operator of the state $\Delta x(t)$

$$ \Delta u(t) = c^T \left(k_P \left(\Delta x(t) \right) + k_I \left({}_{t_0}D_t^{-\lambda} \Delta x(t) \right) + k_D \left({}_{t_0}D_t^{\mu} \Delta x(t) \right) \right). \tag{12} $$

and criterion as automatic control system functioning biological treatment –

$$ J_p = \int_{t_0}^{T} \left| \Delta s(t) \right|^p dt = \int_{t_0}^{T} \left| c^T \Delta x(t) \right|^p dt, \tag{13} $$

where $p > 0$ – option, which in practice is considered equal p =1 (module error) or p = 2 (Mean square error).

For the implementation of this numerical problem of optimal regulation do dedicated system (8), fractional $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - regulator (12) and criterion (13), breaking time interval $[t_0, T]$ on n parts of step $h = (T - t_0)/n$ (h–during quantization). The points breakdown in $[t_0, T]$ denote t_k, and the state of the system (8) in these times t_k – as $z_k = \Delta x(t_k)$.

Approximate continuous input $\Delta u(t)$ piecewise constant function: $\Delta u(t) = u_k$ at $t_k \le t < t_{k+1}$, $k = 0,1,2,...,n$, using a matrix of linear continuous system (8) and obtain its next discrete analog

$$\begin{cases} z_{k+1} = e^{Ah} z_k + A^{-1}(E - e^{-Ah}) b u_k, \qquad k = 0,1,2,...,n-1, \\ z_0 = x^0 - x^*, \end{cases} \tag{14}$$

where E – identity matrix, e^{Ah} – matrix exhibitor.

Next discrete fractional $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - regulator is represented as

$$u_k = c^T \left(k_P(z_k) + k_I \left(h^{\lambda} \sum_{j=0}^{k} w_j^{(-\lambda)} z_{k-j} \right) + k_D \left(h^{-\mu} \sum_{j=0}^{k} w_j^{(\mu)} z_{k-j} \right) \right). \tag{15}$$

Note that when $k = 0$, then a control signal is

$$u_0 = \left(k_P + k_I h^{\lambda} + k_D h^{-\mu} \right) c^T z_0 . \tag{16}$$

Quality criterion (13) is written in discrete form

$$J_p = \frac{h}{2} \left(\left| c^T z_0 \right|^p + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \left| c^T z_j \right|^p + \left| c^T z_n \right|^p \right). \tag{17}$$

Numerical simulation of control system of biological treatment search for the optimal regulator conducted at the following initial data: $s_{in} = 200$ [mg / l], $Y = 0.65$, $\mu_{\max} = 0.15$ [h^{-1}], $k_s = 100$ [mg / l], $r = 0.6$, $\beta = 0.2$, $u^* = 0.05$ [h^{-1}], $t_0 = 0$, $T = 1$ [h], вектор початкового стану системи (8) приймався рівним $x^0 = (x_1^0, x_2^0, x_3^0)^T = (286,\ 17,\ 568)^T$ [mg / l].

The method of exhaustive search with a uniform step to solving the problem of minimizing the criterion relative

$$I_p(\lambda, \mu) = \min_{k_P, k_I, k_D} J_p(k_P, k_I, k_D, \lambda, \mu) \tag{18}$$

parameters λ and μ. The results of the optimization method of exhaustive search criteria (18) are shown in the table 1.

Table 1 – Best shot settings fractional $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - and classical PID -regulators

p	λ	μ	k_P	k_I	k_D	$I_p(\lambda, \mu)$
1	1	1	–0.1381	–3.3019	–0.0016	0.0963
1	0.9750	0.750	–0.2231	0.0072	$-1.0847 \cdot 10^{-5}$	0.0854
2	1	1	–0.1294	–3.6445	– 0.0015	0.1184
2	0.9875	0.600	–0.2234	0.0068	$-3.1249 \cdot 10^{-6}$	0.0855

In the pages λ and μ orders are fractional derivatives and integrals regulators, in pages k_P, k_I, k_D – optimal settings of these controls in the last column - the minimum value of the criterion (18). Here are the results for comparison to classical optimization *PID* - regulator with $\lambda = 1$ and $\mu = 1$.

The results show that the objective function value $I_p(\lambda,\mu)$ ($p=1, p=2$) the optimal fractional $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - regulator less than the classic *PID* - regulator.

To study surface quality criterion $I_p(\lambda,\mu)$ Fig. 3 shows a graph of the criterion of fractional order derivatives (μ) and integrals (λ), used in fractional $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - law regulation (15).

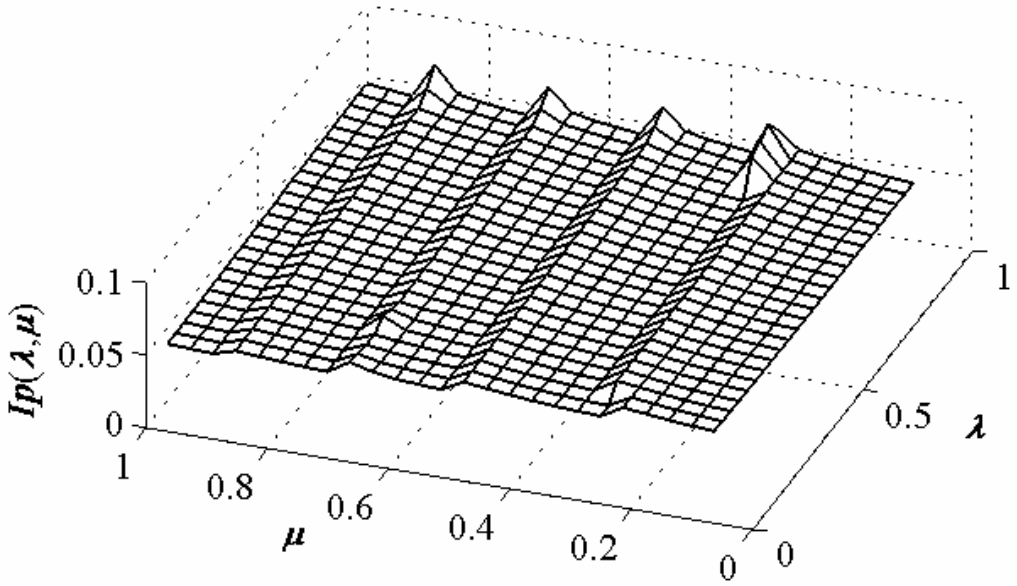


Figure 3 – Schedule surface of objective function $I_p(\lambda,\mu)$

With a package system MATLAB Optimization Toolbox following results were obtained. Figure 4 graphs optimum control functions (dilution rate of fluid flow) of water in biological purification classic *PID* - i $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - fractional regulators (15).

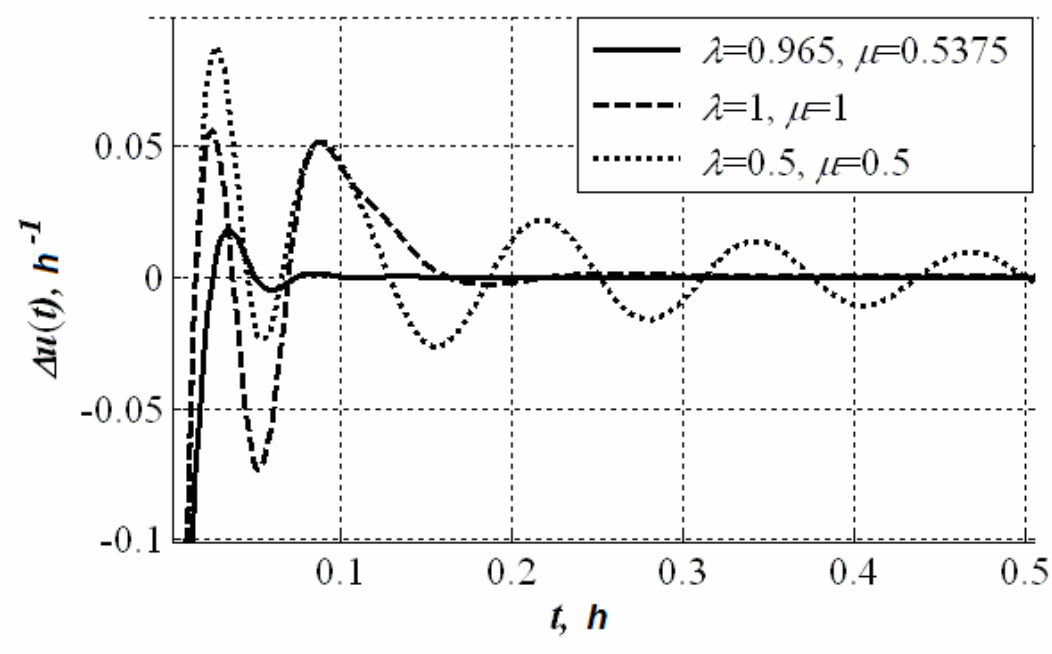


Figure 4 – Dynamics optimal fractional $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - controllers (speed dilution fluid flow) and classic *PID*-regulator ($\lambda=1, \mu=1$)

Figure 5 shows respective optimal transient (changing substrate concentration) of the system by criterion $J_2(k_P, k_I, k_D, \lambda, \mu)$.

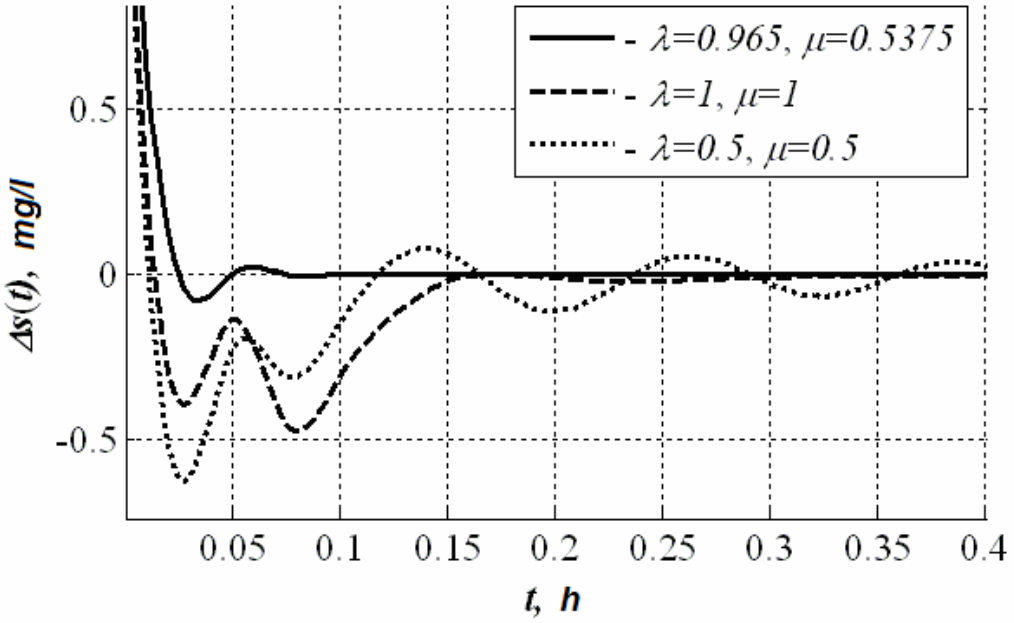


Figure 5 – Optimal transient changes in substrate concentration at different fractional $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - and classic PID - regulators

Comparative analysis of transient dynamics shows more speed and quality with optimal damping fractional $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - regulator ($\lambda = 0.965, \mu = 0.5375$) compared to the best classic PID - regulator ($\lambda = 1, \mu = 1$). It is seen that the optimal fractional controllers with accurate configuration settings λ (fractional order integral) and μ (fractional order derivative) are more efficient compared to classical PID - regulator.

Conclusions. The degree of fractional efficiency regulators and causes high sensitivity optimality criterion and transients on the order of fractional derivatives and integrals require further research.

References

1. Авсиевич, А.В. Моделирование систем автоматического управления с дробным ПИД-регулятором [Текст] / А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич // Вестник Самарского государственного технического университета, сер. техническое науки. – 2010. – №1(26). – С. 6-59.
2. Бутковский, А.Г. Дробное интегро-дифференциальное исчисление и его приложения в теории управления. II. Дробные динамические системы: моделирование и аппаратная реализация [Текст] / А.Г. Бутковский, С.С. Постнов, Е.А. Постнова // Автоматика и телемеханика. – 2013. – № 5. – С. 3-34.
3. Васильев, В.В. Дробное исчисление и аппроксимационные методы в моделировании динамических систем [Текст] / В.В. Васильев, Л.А. Симак // Научное издание. – К.: НАН Украины, 2008. – 256 с.
4. Нахушев, А.М. Дробное исчисление и его применение [Текст] / А.М. Нахушев. – М.: Физматлит, 2003. – 272 с.
5. Самко, С.Г. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения [Текст] / С.Г. Самко, А.А. Килбас, О.И. Маричев // Наука и техника. –Минск, 1987. – 688 с.
6. Учайкин, В.В. Метод дробных производных [Текст] / В.В. Учайкин // Артишок. – Ульяновск, 2008. – 512 с.
7. Podlubny, I. Fractional-order systems and PID controllers. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44: 208–214.

8. Podlubny, I. Fractional Differential Equations [Text] / Mathematics in Sciences and Engineering, Vol. 198. – Academic Press, 1999. – 340 p.
9. Vinagre, B.M., Petras I., Podlubny I., Chen Y.Q. Using fractional order adjustment rules and fractional order reference models in model-reference adaptive control. Nonlinear Dyn. 29(1–4), 269–279 (2002).

О.П. Лобок, доц., канд. фіз.-мат. наук, Б.М. Гончаренко, проф., д-р техн. наук, М.А. Сич, асп.
Національний університет харчових технологій, Київ, Україна
Л.Г. Віхрова, проф., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

Моделювання оптимального автоматичного керування процесом біологічного очищення забруднених вод регуляторами дробового порядку

Розглядається і розв'язується задача оптимального керування процесом біологічного очищення забруднених вод за допомогою дробових $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - регуляторів. Пропонується математичне моделювання процесу біологічного очищення як об'єкта керування, виводиться нелінійна динамічна модель керування та проводиться її лінеаризація. Модель керування має один вхід та один вихід. Вводиться до розгляду оптимальний критерій якості автоматичного керування за допомогою дробового регулятора функціонування біологічної системи очищення води. Отримані оптимальні параметри налаштування дробових $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - регуляторів. Досліджена динаміка перехідних процесів керувального впливу і стану системи очищення.

Чисельне моделювання дробового $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - і класичного PID - керування проведене для підтвердження більш високої ефективності дробових регуляторів, що відображено в результатах досліджень.

дробове числення, диферінтегратор, оптимальне керування, чисельне моделювання, біоочищення вод

Одержано 16.05.17

УДК 681.536.54

С.І. Осадчий, проф., д-р техн. наук, Д.М. Лужков, асп.
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
E-mail: srg2005@ukr.net

Шляхи модернізації систем автоматики холодильного устаткування з одним терморегулювальним вентилем

Стаття присвячена аналізу тенденцій підвищення ефективності холодильного устаткування за рахунок модернізації системи керування роботою терморегулювального вентиля. Показано, що холодильне обладнання фірми Danfoss підвищує ефективність утворення холоду за рахунок зміни уставки перегріву випарника. Головна ідея модернізації полягає у застосуванні системного підходу до розгляду холодильного устаткування у комплексі з холодильною камерою та продуктами, які зберігаються у ній. Для реалізації зазначеної ідеї у статті розроблена нова структурна схема системи охолодження продуктів як багатовимірної системи слідкування, яка функціонує в умовах зміни температури у холодильній камері, коливаннях тиску та температури хладагенту.

хладагент, випарник, структурна схема, вектор, збурення, регулятор

© С.І. Осадчий, Д.М. Лужков, 2017

С.И. Осадчий, проф., д-р техн. наук, Д.М. Лужков, асп.
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Пути модернизации систем автоматики холодильного оборудования с одним терморегулирующим вентилем

Статья посвящена анализу тенденций повышения эффективности ходильного оборудования за счет модернизации системы управления работой терморегулирующего вентиля. Показано, что холодильное оборудование фирмы Danfoss повышает эффективность образования холода за счет изменения уставки перегрева испарителя. Главная идея модернизации заключается в применении системного подхода к рассмотрению холодильного оборудования в комплексе с холодильной камерой и продуктами, которые хранятся в ней. Для реализации указанной идеи в статье разработана новая структурная схема системы охлаждения продуктов как многомерной системы слежения, которая функционирует в условиях изменения температуры воздуха в холодильной камере, колебаниях давления и температуры хладагента.

хладагент, испаритель, структурная схема, вектор, возмущение, регулятор

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Намагання підвищити ефективність сучасного промислового холодильного обладнання привело не тільки до вдосконалення конструкції його елементів [1, 2], зміни фізичних та хімічних властивостей хладагентів, але й до появи у їх складі вдосконалених засобів автоматизації, а саме електронних терморегулювальних вентилів (ТРВ) [3]. Як показано у статті [3], підвищення ефективності систем, розроблених фірмою Danfoss, пов'язане не тільки з використанням ТРВ, але й з застосуванням змінної уставки перегріву випарника. Однак, визначення, на скільки вичерпані можливості застосування такого способу формування програмного сигналу, потребує подальшого дослідження.

Аналіз стану досліджень в галузі холодильної техніки, результати якого висвітлені у авторефераті [4], вказує на необхідність застосування системного підходу [5] до визначення граничних можливостей підвищення ефективності сучасного холодильного обладнання. Такий підхід, з одного боку вимагає розглядати ефективність холодильного устаткування у комплексі з холодильною камерою, яка завантажена відповідними продуктами, та знаходиться під дією різноманітних зовнішніх та внутрішніх впливів, а з іншого потребує наявності формалізованого опису замкненої системи «об'єкт - регулятор».

Одним з класів такого формалізованого опису системи у сучасній теорії керування є структурна схема системи. Отже, проблема дослідження полягає у тому, щоб у результаті вивчення технічної документації [6] на прикладі холодильного устаткування фірми Danfoss скласти структурну схему системи автоматичного керування температури у продуктовій холодильній камері, яка знаходиться у торговому приміщенні супермаркету, та визначити на ній місця дії збурень в реальних експлуатаційних умовах.

Постановка завдання. Мета статті полягає у визначенні можливості та напрямків модернізації системи автоматичного керування холодильною установкою з одним ТРВ, яка оснащена мікро контролером типу Danfoss AK-CC 550, з метою зменшення втрат енергії при виробництві холоду.

Основний матеріал дослідження. Вивчення технічної документації [6] та ознайомлення з конструкцією холодильного устаткування з одним ТРВ фірми Danfoss дозволило визначити, що до складу функціональної схеми системи регулювання (рис. 1) входять мікроконтролер AK-CC 550 1, випарник 2, датчики температури S2-S6,

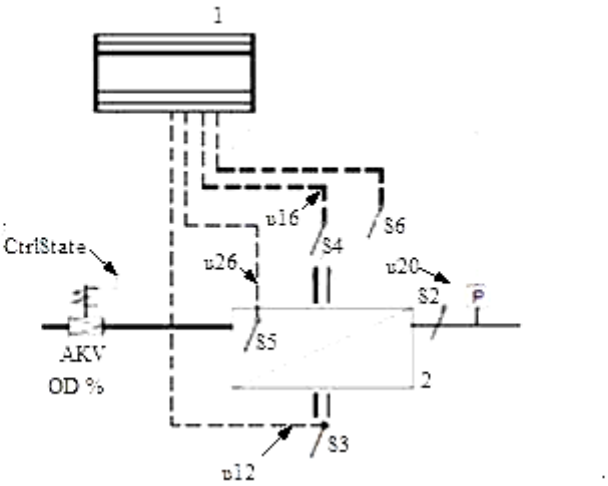


Рисунок 1 – Функціональна схема системи з одним ТРВ

терморегулювальний вентиль AKV. На відповідних входах мікроконтролера 1 діють сигнали: u_{12} про температуру повітря на вході до випарника 2, u_{16} про температуру повітря на виході з блоку 2, u_{26} про температуру на вході випарника, u_{20} про температуру хладагенту, які отримані з допомогою терморезистроних датчиків. При збільшенні комбінації температур повітря на вході та виході блоку 2 вище заданого рівня виникає сигнал CtrlState, який подається на блок AKV. Під дією зазначеного сигналу відбувається зміна положення вентилю. Сигнал, пропорційний степені відкриття цього вентилю OD% з датчику тиску P подається на вхід контролеру. Зміна положення вентилю викликає подачу хладагенту на вхід випарника. Випарювання хладагенту викликає охолодження поверхонь випарника та зменшення температур повітря u_{16} та u_{12}.

Як показали спостереження за сигналами у трактах керування цієї системи, розташованої у торгівельному приміщенні супермаркету, регулювання відбувається в умовах дії декількох груп неконтрольованих збурень (ψ_1, ψ_2, ψ_3) та супроводжується шумом вимірювання. Перша група збурень ψ_1 виникає в результаті коливань тиску хладагента при проходженні крізь вентиль та викликає коливання сигналу OD навколо заданого положення. Друга група ψ_2 з'являється у камері зберігання продуктів за рахунок коливань температури продукту при зміні його кількості, за рахунок потоків теплого та холодного повітря у приміщенні, а також за рахунок руху людей крізь зону охолодження. Неконтрольовані збурення цієї групи змінюють сигнал u_{12}. Збурення третьої групи позначені ψ_3. Вони виникають у випарнику під час випарювання та впливають на температуру хладагенту u_{20}.

Таким чином, система автоматичного керування температурою повітря у холодильній камері містить два тракти керування.

Перший тракт (рис. 2) призначений для стабілізації температури повітря. Програмний сигнал заданої температури повітря у холодильній камері $t_з$ подається на перший вхід регулятора Р. На другий вхід Р надходить сигнал зворотного зв'язку u_{17}, який обчислено у контролері за сигналами температур на виходах блоків камера + трубопровід від камери до випарника (К+Тр) та випарник + трубопровід від випарника до холодильної камери (В+Тр).

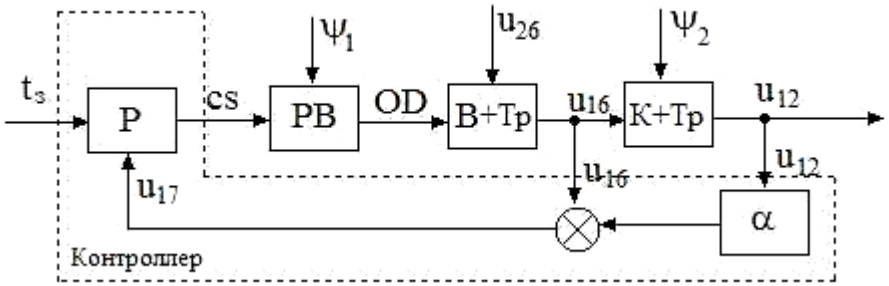


Рисунок 2 – Функціональна схема тракту стабілізації температури повітря

У результаті порівняння сигналів $t_з$ та u_{17} формується сигнал керування зміною стану ТРВ cs, який подається на керований вхід ТРВ та змінює положення вентилю. Зміна положення вентилю супроводжується дією неконтрольованого збурення ψ_1. Отримана таким чином комбінація сигналів OD змінює температуру повітря u_{16}, яке надходить до холодильної камери з випарника крізь трубопровід. Блок який характеризує вплив сигналів OD та температури випарника u_{26} на температуру повітря на вході до холодильної камери позначено В+Тр. Повітря з температурою u_{16} взаємодіє з продуктом та змінює свою температуру до величини, яку характеризує сигнал u_{12}. Зв'язок між корисним сигналом u_{16}, збуренням ψ_2 та температурою повітря на виході з холодильної камери характеризує блок К+Тр. Коефіцієнт α характеризує вплив температури повітря на виході камери на формування сигналу зворотного зв’язку u_{17}.

Другий тракт системи (рис. 3) призначений для виробництва холоду. Його входом також є сигнал пропорційний $t_з$, а виходом є сигнал u_{20}.

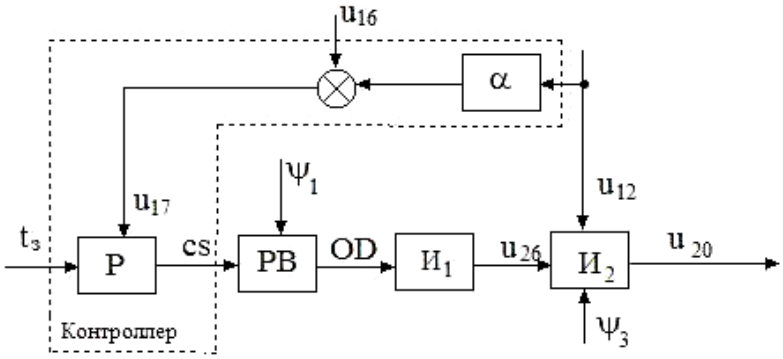


Рисунок 3 – Функціональна схема тракту виробництва холоду

Блоками $И_1$ та $И_2$ на функціональній схемі (рис. 3) позначені елементи системи, які характеризують зв'язок між положенням вентилю ТРВ OD та температурою випарника u_{26}, а також вплив зміни сигналів u_{26}, u_{12} та збурення ψ_3 на температуру хладагента u_{20}, яка виміряна на виході випарника.

Вивчення розроблених функціональних схем (рис.2) та (рис. 3) дозволяє зробити висновок, що система автоматичного керування температурою повітря у холодильній камері з одним ТРВ належить до багатовимірних систем автоматичного керування, оскільки перший та другий тракти керування впливають один на одного з допомогою сигналів u_{26}, u_{12}, u_{16}.

Процес формування сигналу cs згідно із описом [6] має нелінійний характер (рис. 4). При зростанні температури u_{17} вище за задане значення плюс допуск Δ

мікроконтролер АК-СС 550 формує сигнал cs на відкриття ТРВ. При зменшенні температури нижче $t_з$ сигнал cs встановлюється у нульове значення.

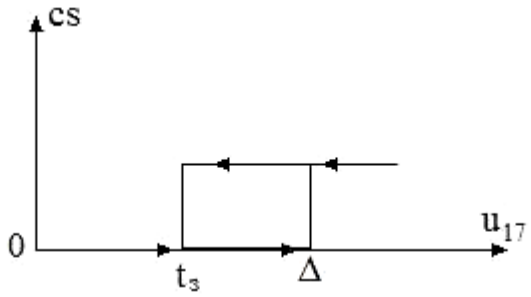


Рисунок 4 – Функція формування сигналу на зміну стану терморегулювального вентилю

Отримані таким чином результати дозволили застосувати положення статті [7] до функції на рис.4 та розробити на цій основі структурну схему лінеаризованої системи автоматичного керування температурою повітря у холодильній камері (рис.5).

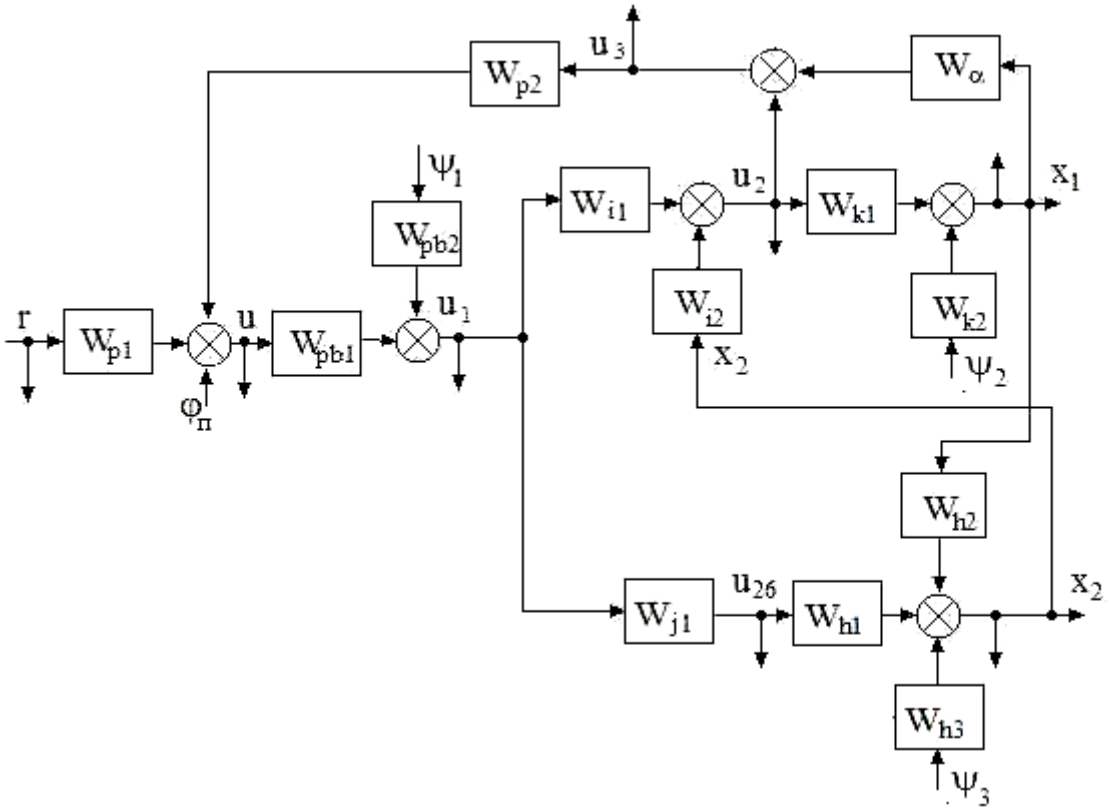


Рисунок 5 – Структурна схема системи керування температурою повітря у холодильній камері

На структурній схемі (рис.5) додаткові стрілки позначають сигнали, які вимірюються та реєструються при використанні мікроконтролера АК-СС 550. Функціональні блоки зі схем (рис.2), (рис.3) замінені передаточними функціями, що описують їх динаміку. Нелінійний регулятор Р заміщують [7] дві передаточні функції W_{p1} , W_{p2} та шум лінеаризації $\varphi_п$, які формують сигнал управління u за наступним рівнянням

$$u = W_{p1} r + W_{p2} u_3 ,$$

де $u=cs$; $r=t_з$; $u_3=u_{17}$.

Динаміку ТРВ характеризують також дві передаточні функції W_{pb1}, W_{pb2} та ψ_1, зв'язані між собою наступним співвідношенням

$$u_1 = W_{pb1}u + W_{pb2}\psi,$$

у якому

$$u_1 = OD.$$

Передаточні функції W_{i1} та W_{i2} визначають динаміку впливу зміни сигналу управління та температури хладагента на температуру повітря на вході до холодильної камери у відповідності з наступним виразом

$$u_2 = W_{i1}u_1 + W_{i2}x_2; \quad (1)$$

де $u_2=u_{16}$, $x_2=u_{12}$.

Модель динаміки холодильної камери, на вході якої діють сигнали u_2 та ψ_2, а на виході сигнал x_1 ($x_1=u_{12}$) , що відповідає рівнянню

$$x_1 = W_{k1}u_2 + W_{k2}\psi_2, \quad (2)$$

складається з передаточних функцій W_{k1}, W_{k2}.

Другий тракт керування характеризують передаточні функції W_{j1}, W_{h1}, W_{h2}, W_{h3} та неконтрольоване збурення ψ_3, які зв'язані наступним рівнянням балансу

$$x_2 = W_{h1}W_{j1}u_1 + W_{h2}x_1 + W_{h3}\psi_3 \ . \quad (3)$$

Як видно з рис. 5 система керування має багатовимірний об'єкт з двома перехресними зв'язками, які утворені передаточними функціями W_{h2} та W_{i2}. На вході зазначеного об'єкта діє один сигнал управління u_1 , а на виході два вихідні сигнали x_1, x_2. Отже, з позицій сучасної теорії керування доцільно здійснити опис роботи такої системи у векторно-матричній формі та виходячи з рівнянь (1)-(3) скласти наступні вектори вихідних сигналів системи

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix};$$

та збурень

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix}.$$

В такому разі рівняння (1)-(3) перетворюється на наступне матричне рівняння

$$Q_x x = Q_u u_1 + Q_\psi \psi, \quad (4)$$

де Q_x – матриця передаточних функцій розміру 2×2, що дорівнює

$$Q_x = \begin{bmatrix} 1 & -W_{k1}W_{i2} \\ -W_{h2} & 1 \end{bmatrix};$$

Q_u – матриця передаточних функцій вигляду

$$Q_u = \begin{bmatrix} W_{k1}W_{i1} \\ W_{h1}W_{j1} \end{bmatrix};$$

Q_ψ – матриця передаточних функцій впливу збурень

$$Q_{\psi} = \begin{bmatrix} W_{k2} & 0 \\ 0 & W_{h3} \end{bmatrix}.$$

В результаті множення лівої та правої частини рівняння (4) на обернену матрицю Q^{-1}_{x} визначено, що

$$x = F_u u_1 + F_{\psi}\psi\,, \tag{5}$$

де F_u – матриця передаточних функцій об'єкта керування від зміни положення ТРВ до вектору вихідних сигналів x

$$F_u = Q_x^{-1} Q_u\,;$$

F_{ψ} – матриця передаточних функцій об'єкта керування від вектору збурень ψ до вектору вихідних сигналів x

$$F_{\psi} = Q_x^{-1} Q_{\psi}\,.$$

Використання рівняння (5) дозволяє суттєво спростити структурну схему замкненої системи (рис. 6), визначити декілька напрямів підвищення якості роботи системи стабілізації температури та як наслідок зменшення втрат при виробництві холоду.

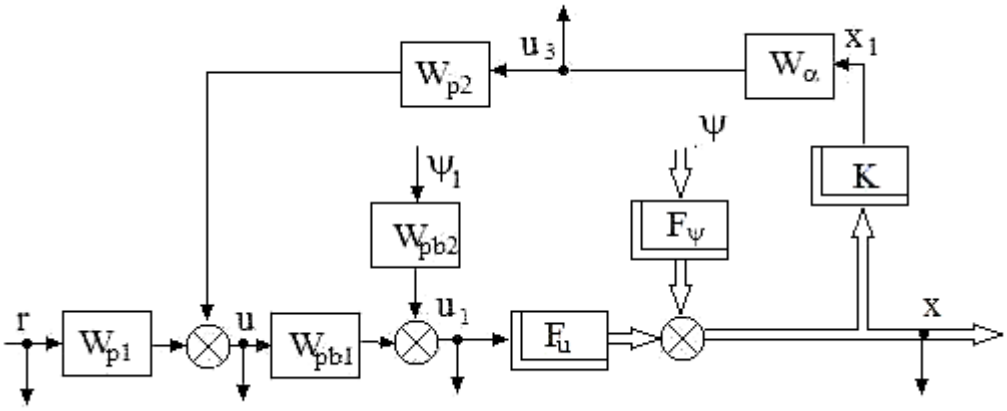


Рисунок 6 – Спрощена структурна схема системи

Перший напрям пов'язаний із тим, що в процесі роботи системи керування вимірюються обидві координати вектору x, а для стабілізації температури використовується лише одна. Отже, підвищити якість стабілізації можна за рахунок використання інформації про температуру хладагенту на виході випарника.

Другий напрям – збільшення кількості сигналів керування. Наприклад, забезпечити можливість зміни швидкості руху повітря крізь випарник.

Третій напрям стосується вдосконалення конструкції ТРВ та характеристик системи подачі хладагенту, які повинні бути спрямовані на зменшення неконтрольованого збурення ψ_1.

Четвертий напрям створення комбінованої системи стабілізації із зворотніми зв'язками за відхилення та за збуренням.

Висновки. Застосування системного підходу для дослідження складу системи автоматичної стабілізації температури у холодильній камері з одним ТРВ доводить можливість суттєво змінити проходження процесу керування за рахунок комплексного використання чотирьох напрямів модернізації системи керування. Реалізація

комплексного підходу вимагає використання експериментально-аналітичного методу проектування багатовимірних оптимальних систем стабілізації .

Отримані нові структурні схеми складають основу для адаптації відомих методів структурної ідентифікації динамічних об'єктів до визначення моделей динаміки неконтрольованих збурень, що діють на об'єкт керування в реальних експлуатаційних умовах.

Список літератури

1. Мизин, В.А. Инновационные методы повышения эффективности существующих типов кожухотрубных аппаратов [Текст] / В.М. Мизин, А.А. Цветков // Научн. журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». –2014. – №3. – С. 71-77
2. Корнивец, Д.В. Повышение эффективности холодильних установок с компрессорами «Битцер» [Текст] / Д.В. Корнивец // Холодильная техника. – 2011. – №10. – С. 22-26
3. Катраев, М.Ю. Повышение эффективности работы холодильной установки. Выбор алгоритма управления терморегулирующим вентилем [Текст] / Ю.М. Катраев // Холодильная техника – 2011. – №4. – С. 4-5
4. Эрлихман, В.Н. Разработка принципов повышения эффективности технологических процессов холодильных производств [Текст] : автореф. дис. … доктор техн. наук: 05.18.04, 05.18.12 / Эрлихман Владимир Наумович; Калининградский гос. техн. ун-т. – Калининград, 2005. – 49 с.
5. Згуровський, М.З. Основи системного аналізу [Текст] / М.З. Згуровський, Н.Д. Панкратова. – К.: Видавнича група BHV, 2007. – 544 с.
6. Контроллер испарителя AK-CC 550 для управления холодильными установками. Руководство пользователя. – Danfoos – RS.8E.N1.50. – 44 с.
7. Блохин, Л.Н. Нелинейные оптимальные системы схастической стабилизации [Текст] / Л.Н. Блохин, Л.С. Житецкий // Кибернетика и вычислительная техника. – 2003. – Вып. 139. – С.12-23.

Sergey Osadchy, Prof., DSc., Dmytro Luzshkov, post-graduate
Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitsky, Ukraine

Paths of Modernization of Automation Systems of the Refrigeration Equipment with a Single Thermal Adjusting Valve

This article is devoted to an analysis of the trends improve refrigeration efficiency by upgrading the control system of a thermostatic expansion valve.

It is shown that Danfoss refrigeration equipment increases the efficiency of the formation of the cold due to changes in the evaporator superheat setting. The main idea of upgrading is to use a systems approach to the consideration of refrigeration equipment in conjunction with the cooling chamber and the products which are stored in it. To realize this idea one has developed a new block diagram of the cooling system as a multidimensional follow-up system that operates in conditions of air temperature changes in the refrigerating chamber and fluctuations of the refrigerant temperature and its pressure.

The resulting new structural schemes form the basis for adapting known methods of structural identification of dynamical models of objects to determine the dynamics of uncontrolled disturbances acting on a control object in real operating conditions.

a refrigerant, an evaporator, a block diagram, a vector, a disturbance, a regulator

Одержано 23.02.17

УДК 621.311.1:620.92:620.98

П.Г. Плєшков, проф., канд. техн. наук, С.П. Плєшков, доц., канд. техн. наук, П.Г. Стець, здобувач
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
E-mail: petrstec1989@gmail.com

Оцінка можливостей використання термоелектричних модулів для часткового заміщення електропостачання від мережі у сільській місцевості Кіровоградської області

У статті розглядається можливість використання альтернативних джерел енергії загалом і термоелектричних модулів зокрема - для часткового заміщення електропостачання від мережі у сільській місцевості. Метою статті є оцінка можливості використання альтернативних джерел енергії для часткового заміщення електропостачання від мережі у сільській місцевості Кіровоградської області.

Проведено оцінку використання портативної низьковольтної термоелектрогенеруючої системи на основі елементів Пельтьє для утилізації тепла теплових втрат побутового опалення з використанням відходів лісівництва у якості паливного енергоресурсу.

У результаті розгляду потенціалу альтернативних джерел енергії визначено, що жодне з розглянутих альтернативних джерел енергії не здатне у повному обсязі задовольнити потреби споживача, слід розглядати лише можливість їх комплексного використання, та компонування не з готових модулів, а з окремо підібраних елементів – для зниження ціни обладнання, оскільки собівартість 1 кВт електроенергії у такій системі буде невиправдано високою у порівнянні з живленням від мережі навіть за перспективи зростання тарифу. Тому такі пристрої слід орієнтувати на використання в умовах – де доступ до живлення від мережі повністю унеможливлений.

термоелектричний модуль, елемент Пельтьє, когенерація, утилізація тепловтрат

П.Г. Плешков, проф., канд. техн. наук, С.П. Плешков, доц., канд. техн. наук, П.Г. Стець, соиск.
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий,Украина

Оценка возможностей использования термоэлектрических модулей для частичного замещения электроснабжения от сети в сельской месности Кировоградской области

В статье рассматривается возможность использования альтернативных источников энергии в общем и термоэлектрических модулей в частности - для частичного замещения электроснабжения от сети в сельской местности. Целью статьи является оценка возможности использования альтернативных источников энергии для частичного замещения электроснабжения от сети в сельской местности Кировоградской области.

Проведена оценка использования портативной низковольтной термоелектрогенеруючои системы на основе элементов Пельтье для утилизации тепла тепловых потерь бытового отопления с использованием отходов лесоводства в качестве топливного энергоресурса.

В результате исследования потенциала альтернативных источников энергии определено, что ни одно из рассмотренных альтернативных источников энергии не способно в полном объеме обеспечить снабжение потребителя, следует рассматривать лишь возможность их комплексного использования, и компоновки не из готовых модулей, а из отдельно подобранных элементов - для снижения цены оборудования, поскольку себестоимость 1 кВт электроэнергии в такой системе будет неоправданно высокой по сравнению с питанием от сети даже с учетом перспективы роста тарифа. Поэтому такие устройства следует ориентировать на использование в условиях - где доступ к питанию от сети полностью невозможен.

термоэлектрический модуль, элемент Пельтье, когенерация, утилизация теплопотерь

© П.Г. Плєшков, С.П. Плєшков, П.Г. Стець, 2017

Постановка проблеми. Тенденція до неперервного зростання вартості невідновлюваних паливних енергоресурсів набула особливої інтенсивності із загостренням кризи в енергетиці України. Відсутність можливості використання власного вугілля антрацитової групи для потреб енергетичної галузі промисловості на початку 2017 року навіть призвела до оголошення особливого стану в енергетиці рішенням РНБО від 16 лютого 2017 року «Про невідкладні заходи з нейтралізації загроз енергетичній безпеці України та посилення захисту критичної інфраструктури».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попередні дослідження особливостей застосування відновлюваних джерел енергії для заміщення живлення від мережі розглядались у роботі [1], а у роботах [2,3,4,5] розглянуто потенціал відновлюваних джерел для забезпечення споживача теплом, джерело [6] наводить параметри теплопродуктивності різнорідних типів деревини, у вищерозглянутих роботах окремо досліджуються вітрова, сонячна енергетика та використання низькопотенційного тепла ґрунту, але тематика використання термоелектричних перетворювачів, як частини когенераційної установки розглянуто не було, чого не достатньо для повноцінного прогнозування енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії.

Постановка завдання. Мета дослідження оцінка можливості використання альтернативних джерел енергії для часткового заміщення електропостачання від мережі у сільській місцевості Кіровоградської області.

Виклад основного матеріалу. У таких умовах альтернативні джерела енергії мають стати не лише доповненням до традиційного живлення від мережі, але й частково замістити її у випадку масованих віялових відключень – при порушенні балансу енергосистеми. В такому разі проектована система має складатись з невеликих портативних елементів незалежних від спеціалізованого джерела живлення, погодних умов та наявності кваліфікованого персоналу для її експлуатації чи ремонту у разі пошкодження. Також слід врахувати якумога більший ресурс робочого часу до необхідності профілактичного ремонту та низьку собівартість її складових, оскільки така система орієнтована на дрібного одноосібного споживача.

До найбільш поширених систем електропостачання з альтернативними джерелами енергії відносяться: вітрова енергоустановка, фотоелектрична енергоустановка, когенераційна система з двигунами Стірлінга, тепловий насос з перетворювачами тепла в електроенергію.

Когенераційна система з використанням двигунів Стірлінга може мати достатню для побутового користування потужність і не залежить від джерела паливних енергоресурсів, здатна утилізувати будь-який твердий горючий матеріал (для прикладу Viesmann-Vitotwin 300-W може живити невеликий заміський будинок – у ній один модуль котел-двигун продукує 1 кВт електроенергії, та 6 кВт теплової енергії). Проте собівартість обладнання в ній виявляється надмірно високою – 25-30 тис.грн. за 1 кВт встановленої потужності.

Вітрова електрогенаторна установка не задовольняє умові портативності, (для прикладу Dolphin D-800 з максимальною потужністю 900 Вт працює у межах швидкостей вітру від 3 до 18 м/с, потребує монтажу башти висотою від 4 м, та важить понад 23 кг, без урахування ваги станини). Також слід зауважити, що найбільш характерною середньодобовою швидкістю вітру на висоті до 20 м над поверхнею ґрунту на більшій частині Кіровоградської області (без урахування вітрових каналів, котрі є аномаліями кліматичної зони) протягом року розрахована за методикою [1] є 4 м/с, тобто така установка за незначним виключенням буде продукувати не більше 25%

своєї потужності, що становить близько 225 Вт – при собівартості установки від 13 до 17 тис. грн.

Теплонасосна система також функціонує лише в умовах довготривалого розміщення, і як правило вбудовується у опалювану будівлю, та не продукує електроенергію – якщо використовується окремо, без перетворювачів теплової енергії в електроенергію (елементи Пельтьє, двигуни Стірлінга). Теплонасосна система незважаючи на кращі початкові показники – для умов Кіровоградської області (крім місцевостей, де відносна вологість ґрунту протягом року не знижується нижче 75-80%) виявилась не ефективною у тривалій перспективі детальніше процес охолодження ґрунту розглядався у роботі [3]. Спостерігається переохолодження поверхневого та приповерхневого шарів ґрунту у весняно-зимовий період, що обумовлено порушенням аккумулюючої здатності нижніх шарів ґрунту [4] – внаслідок надмірного відбору тепла. Протягом чотирьох років з моменту установки їх тепловий режим стабілізується на рівні нижче природного на 2-4 С° в залежності від обводненості ґрунтів у місцевості установки теплонасосної системи.

Фотоелектрична система генерації електроенергії (для прикладу система складається з двох сонячних батарей PLM 250 Вт/24 В, інвертора Axioma energy 1500 ВА, та двох гелевих акумуляторних батарей MNG 100-12) потребує монтажу на незатінюваній поверхні, зокрема на даху будівель. Вона досить проста у монтажу, не потребує висококваліфікованого персоналу для обслуговування, але має високу собівартість (27,5 тис. грн.). Враховуючи географо-кліматичні умови Кіровоградської області розглянуті в роботі [1] (середньодобову опроміненість поверхні, кількість сонячних днів у місяці, висоту поверхні над рівнем моря) така установка буде продукувати у середньому 2,8 кВт*год за зимову добу, та 31,5 кВт*год за літню добу. Чого замало для задоволення потреб споживача – враховуючи його розташування у сільській місцевості та споживання ним 115~120 кВт у середньому на місяць.

Таким чином для типового одноосібного побутового споживача у сільській місцевості – експлуатація вищенаведених систем фінансово не виправдана для подібних споживачів.

Тому пропонується застування низьковольтної термоелектрогенеруючої системи на основі елементів Пельтьє для утилізації тепла теплових втрат побутового опалення з використанням відходів лісівництва у якості паливного енергоресурсу. У якості термоелектричного перетворювача пропонується система із низько вартісних (до 300 грн/шт.) елементів Пельтьє закріплених на еластичному корпусі і з'єднаних паралельно. Охолодження цих модулів пропонується виконати за допомогою алюмінієвих радіаторів, – один такий елемент при різниці температур холодної та гарячої сторін 50ºС продукує струм 1,3 А, напругою 5.5 В, і номінальною енергопродуктивністю 3.6 Вт*год. Параметри системи розраховані згідно з методикою наведеною у роботі [5].

Де струм, зокрема, виражається наступним рівнянням (1) [5]:

$$I_g = q^* \, \alpha T_0 \, ZT_0 (1 + m + ZT_0) \,, \qquad (1)$$

де I_g – генерований модулем струм;
q^* – тепловий потік через елемент Пельтьє;
Z – внутрішній опір елемента;
T_0 – термоелектрична добротність;
α – термоерс;

m - відношення опору навантаження $R_н$ до внутрішнього опору термоелемента $R_i = L/\sigma$, де L – довжина елемента, σ – питома електропровідність елемента.

У модулі пропонується використовувати 5 елементів Пельтьє, тому їх сумарна енергопродуктивність за вказаної вище різниці температур становитиме 18 Вт. Такий модуль навіть з урахуванням втрат на стабілізаторі – придатний для зарядки гелевих акумуляторів напругою 12 В, літій-полімерних батарей напругою 5 В. Також система містить інтегральний DC-DC перетворювач з мінімальною вхідною напругою 1,8 В та максимальною вихідною напругою 14 В – типу LM2621, та плату живлення для пристроїв з USB 3.0 інтерфейсом. Таким чином вищенаведена система спрямована на живлення світлодіодного освітлення, малопотужних споживачів постійного струму, зокрема пристроїв зв'язку, та малопотужних інкубаторів чи брудерів при врахуванні можливості живлення від постійного струму, з інфрачервоними керамічними нагрівальними елементами потужність не вище 50 Вт. Повна вартість такої системи з літій полімерною батареєю ємністю 3000 мА*год становитиме менше 2000 грн. Оскільки для вказаної термоелектричної системи відсутня спеціалізація за джерелом тепла – вона придатна для утилізації тепловтрати на виводах котлів парових систем опалення, і для широко застосовуваних у сільській місцевості Кіровоградської області плит, що опалюються дровами.

Приймемо до розгляду другий варіант – як більш розповсюджений, менш вартісний (при умові де для виробництва 1 Гкал за нормальних умов необхідно – 135,67 м^3 природного газу, що коштує станом на березень 2017 року – 1293 грн, для порівняння див. таблиці 1 та 2) та такий, що дозволяє використання у якості паливного енергоресурсу відходи лісівництва. Для опалення 100 м^2 приміщення в середньому необхідно 3 Гкал/місяць в незалежності від виду палива (дрова, вугілля, пелети чи газ).

У табл. 1 наведено результати порівняння собівартості та теплотворної здатності різного роду паливних енергоресурсів [6].

Таблиця 1 – Теплота згоряння різних видів палива (усереднені значення)

Тип палива	Теплота згоряння	Вартість
Дрова (якісні, сухі, з деревини дуба)	3200 ккал/кг	0,42 грн/кг
Пелети	4500 ккал/кг	1,2 грн/кг
Антрацит	7000 ккал/кг	1,5 грн/кг
Природній газ	8400 ккал/м3	4,7 грн/м^3

Піролізні котли, для вироблення 1 Гкал спалюють – 312 кг дров, приблизна вартість яких складе – 131 грн. Для одержання 1 Гкал у пелетному котлі з пелет (брикети), буде витрачено – 222 кг пелет, приблизна вартість яких становить – 266 грн. Вугільні котли для одержання 1 Гкал з використанням антрациту витрачають – 143 кг вугілля, що коштуватиме – 214 грн. У газових котлах для отримання 1 Гкал необхідно спалити 119 м^3 газу, - вартість складе – 1293 грн.

Результати порівняння різнорідних типів палива за обсягом витрати на отримання 1 Гкал теплової енергії, та різних видів дров за теплотворною здатністю, результати порівняння наведемо у табл. 2 та 3 [6]:

Таблиця 2 – Порівняння кількості палива та фінансових витрат для отримання 1 Гкал тепла

Вид паливного енергоресурсу	Обсяг спожитого ресурсу на отримання 1 Гкал.	Вартість 1 Гкал, грн
Дрова	312 кг	131
Брикети	222 кг	266
Антрацит	143 кг	214
Газ	119 м^3	1293

Таблиця 3 – Теплотворна здатність на один складометр дров

Дрова	Теплотворна здатність, кВт*год/кг	Теплотворна здатність, мДж/кг	Теплотворна здатність, МВт*год./склд.метр	Об'ємна щільність, кг/дм ^{3}	Щільність, кг/склд.метр
Ясеневі	4,2	15	2,0	0,69	480
Дубові	4,2	15	2,0	0,67	470
Березові	4,2	15	1,9	0,65	450

Показники теплотворної здатності дров різного ступеня висихання наведено в табл. 4 нижче [6]:

Таблиця 4 – Показники теплотворної здатності дров в залежності від вологості

Вологість дров,%	Теплотворність, ккал	Примітка
0	4400	Термічна сушка у сушильні
15	3634	Конвективна, природна сушка
20	3381	Природна сушка без обдуву
50	1863	Свіжої вирубки

Розглянемо наступний об’єкт – одноповерхова житлова будівля розташована у Маловисківському районі – загальною площею 175 м^2 з опаленням на основі дров’яної плити та парового котла об’ємом 85 л. Повний об’єм завантажувальної камери дров’яної плити даного об’єкту становить 0,45 м^3 Для досягнення температури поверхні труб на виході з парового котла рівної 50 $^\circ$С необхідне повне спалення двократного об’єму сухої деревини твердих порід дерева (дуб, ясен, осокір).

За умови використання обрізків дубових дров пошкоджених шкідниками деревини (відходи лісівництва) один цикл нагріву буде коштувати 160 гривень. При температурі навколишнього середовища 16 $^\circ$С без додаткового використання палива ця температура зберігається протягом 3 годин.

Детальніше динаміку зміни температур поверхонь модуля та труб наведено на рис. 1

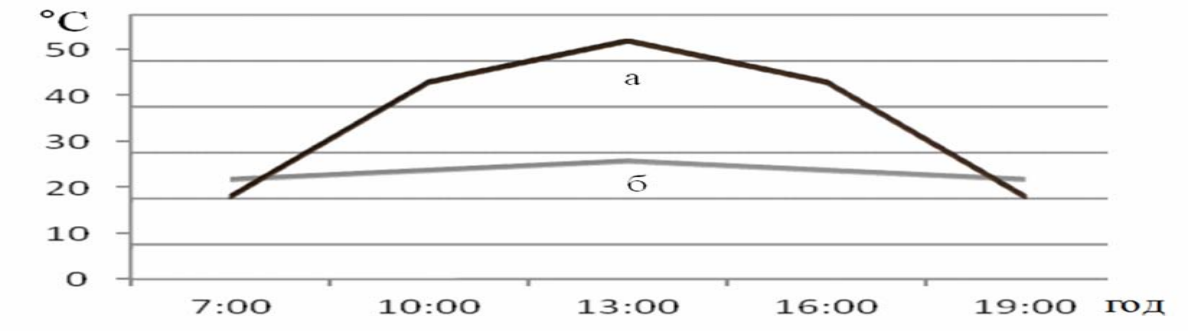


Рисунок 1 – Зміна температур поверхонь труб та термоелектричного модуля протягом циклу нагрів – спалення – охолодження

За таких умов (різниця температур гарячої та холодної сторін елементів становитиме 30°С) розглянутий вище термоелектричний модуль буде продукувати з одного елемента Пельтьє за одну годину роботи 0,85 А струм, напругою 2,5 В, а сумарна енергопродуктивність модуля з п'яти елементів за годину роботи складе всього лише 11 Вт. Враховуючи, що у процесі роботи модуля – поверхня труб парової системи опалення буде охолоджуватись, а сам модуль нагріватись його енергопродуктивність знизиться за другу годину роботи до 45% від номінальної (за різниці температур гарячої та холодної сторін елементів 23°С) , і до 15% від номінальної за третю годину роботи модуля. Тоді, - за один опалювальний цикл (розігрів-спалення-охолодження), що триває 9 годин – модулем буде згенеровано лише 0,027 кВт, чого замало навіть для часткового заміщення живлення від мережі, а також для індивідуального живлення малопотужних інкубаторів чи брудерів з інфрачервоним обігрівом котрі за найменшої потужності споживають 45~50 Вт*год, і достатньо лише для світлодіодного освітлення та заряджання мобільних пристроїв зв'язку. Враховуючи нестабільний характер генерованих вольтамперних характеристик модуля, його використання для заряджання літій-полімерних батарей без підвищуючого перетворювача-стабілізатора не є можливим оскільки може викликати їх швидке зношення і вихід з ладу. Детальніше вихідні характеристики модуля наведено на рис. 2.

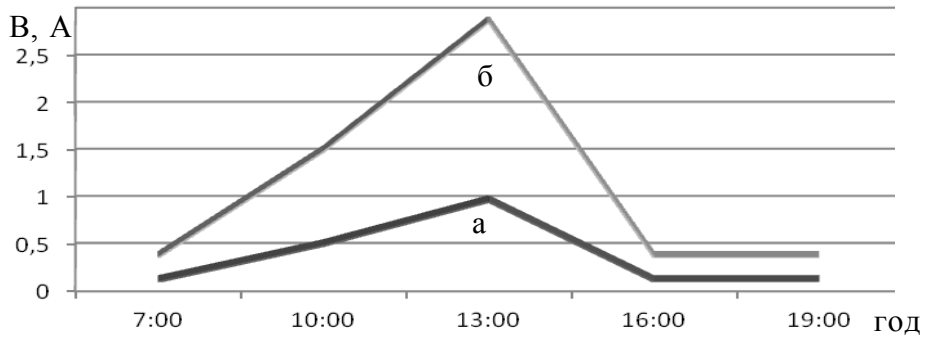


Рисунок 1 – Зміна вихідних характеристик модуля (а) – генерований струм, (б) – напруга, протягом циклу нагрів – спалення – охолодження

Висновок. Отже, з вищенаведеного отримуємо наступний висновок – жодне з розглянутих альтернативних джерел енергії не здатне у повному обсязі задовольнити потреби споживача, слід розглядати лише можливість їх комплексного використання, та компонування не з готових модулів, а з окремо підібраних елементів – для зниження

ціни обладнання, оскільки собівартість 1 кВт електроенергії у такій системі буде невиправдано високою у порівнянні з живленням від мережі навіть за перспективи зростання тарифу. Тому такі пристрої слід орієнтувати на використання в умовах – де доступ до живлення від мережі повністю унеможливлений.

Список літератури

1. Дослідження енергетичного потенціалу регіональних альтернативних джерел для оптимізації паливно-енергетичних балансів [Текст] / [Плєшков П.Г., Кубкін М.В., Серебренніков С.В. та ін.] // Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка. Техн. науки. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, 2013. – Вип. 141 – С. 54-57.
2. Визначення впливу тривалої експлуатації теплонасосоної системи на теплообмінні процеси у низькозволоженному ґрунті [Текст] / Стець П.Г., Плешков П.Г. - Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених "Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК" 21-22 листопада 2016 р., Київ, Україна. – К.: НУБІП України ННІ Енергетики, автоматики і енергозбереження, 2016. – 129 с.
3. Thermische Nutzung des Untergrunds: VDI 4640 Blatt 2. – VDI-Richtlinie, 2010. – 41 s. – (Düsseldorf 2000).
4. ASHRAE Handbook. 1999 HVAC Application. Chapter 31. Energy resources.
5. Иоффе, А.Ф. Термоэлектрическое охлаждение [Текст] / А.Ф. Иоффе, Л.С. Стильбанс, Е.К. Иорданшвили, Т.С. Ставицкая ; АН СССР, Ин-т полупроводников. – М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1956. – 108 с
6. Дрова. Особливості горіння дров різних порід деревини [Електронний ресурс]. – Режим доступа: http://bio.ukrbio.com/ua/articles/3336/

Petro Pleshkov, **Prof., Phd tech. sci., Sergiy Pleshkov, Assoc. Prof., Phd tech. sci., Petro Stets, applicant**
Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitsky, Ukraine

Evaluation of the possibilities of using thermoelectric modules for partial replacement of electricity from the grid in the rural area of the Kirovograd region

This article considers the possibility of using the alternative energy sources in general and thermoelectric modules in particular - for partial replacement of electricity supply from the network in rural areas. The purpose of the article is to research the possibility of using alternative sources of energy for partial replacement of electricity from the network in rural areas of the Kirovograd region.

The use of a portable low-voltage thermoelectric-generating system based on Peltier elements for the utilization of heat losses heating in domestic heating systems using forestry wastes as a fuel energy resource was estimated in the article.

As a result of research into the potential of alternative energy sources, it is determined that none of the alternative energy sources considered is able to fully supply the consumer, and is recommended only consider the possibility of their integrated use, and the layout is not from ready modules, but from individually selected elements - to reduce the price Equipment, since the cost of 1 kW of electric power in such a system will be unreasonably high in comparison with the power supply from the grid, even taking into account the growth prospects of power supply cost. Therefore, such devices should be oriented to use in conditions - where access to power from the network is completely impossible.

a thermoelectric module, a Peltier element, cogeneration, heat loss utilization

Одержано 24.04.17

УДК 621-501.72

А.А. Стенин, проф., д-р техн. наук, О.М. Польшакова, ст. преп., Д.А. Гуменный, канд. техн. наук, С.А. Стенин
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина
E-mail: srg2005@ukr.net

Оценка деятельности экипажей летательных аппаратов при их подготовке на тренажерных системах

Статья посвящена разработке методики и алгоритма оценивания деятельности группы операторов по результатам выполнения упражнений на тренажере. Приведенные в ней результаты дают возможность получить в реальном масштабе времени либо оценки экипажа в целом по режимам и учебным задачам при наличии оценок отдельных членов экипажа, либо оценки каждого члена экипажа по режимам и учебным задачам при наличии оценок экипажа в целом.
летательный аппарат, экипаж, оператор, тренажер, оценка, структурно-логическая схема

О.А. Стєнін, проф., д-р техн. наук, О.М. Польшакова, ст. викл., Д.О. Гуменний, канд. техн. наук, С.О. Стєнін
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» ім. Ігоря Сікорського, м.Київ, Україна
Оцінювання діяльності екіпажів літальних апаратів при їх підготовці на тренажерних системах
Стаття присвячена розробленню методики та алгоритму оцінювання діяльності групи операторів за результатами виконання вправ на тренажері. Наведені у ній результати надають можливість отримати у реальному масштабі часу або оцінку екіпажу в цілому за режимами та навчальними завданнями при наявності оцінок окремих членів екіпажу, або оцінок кожного члену екіпажу за режимами та навчальними задачами при наявності оцінок екіпажу в цілому.
літальний апарат, екіпаж, оператор, тренажер, оцінка, структурно-логічна схема

Анализ основных публикаций и определение места исследований. Характеризуя деятельность экипажей летательных аппаратов (ЛА), нельзя не отметить следующее обстоятельство. Игнорирование взаимодействия в экипажах отдельных операторов может являться одной из причин снижения показателей качества работы системы «экипаж-ЛА» в целом [1].

Экипаж (группа операторов) является полиэргатической системой, качество функционирования которой определяется характеристиками не только отдельных операторов, но и коллектива как целого. Качество функционирования зависит от множества факторов, таких как слаженность коллектива, совместимость его членов, структура связей в коллективе, распределение функций и так далее [2, 3].

Для коллектива операторов, если он рассматривается как целое, гораздо сложнее получить количественные характеристики подобные характеристикам одного оператора, а некоторые характеристики вообще присущи только коллективу и не имеют аналогов для одного оператора. При анализе деятельности группы операторов, а также от того насколько неформальная структура группы совпадает с

© А.А. Стенин, О.М. Польшакова, Д.А. Гуменный, С.А. Стенин, 2017

формальной. В частности, формированию согласованных групп экипажей посвящена работа авторов [4]. Полученные ниже результаты касаются не только экипажей летательных операторов, но и любого коллектива операторов, управляющих сложными техническими системами.

Постановка задачи.Будем считать, что рабочие группы экипажей для обучения уже сформированы, тогда можно рассмотреть вопросы, касающиеся объединения (разделения) оценок при коллективной деятельности экипажа. Кроме того, будем выделять три уровня оценок: нижний (оценка по параметру); средний (оценка за режим (совокупность параметров)); верхний (оценка за учебную задачу (совокупность режимов)).

Задача оценки экипажей летательных аппаратов при их подготовке на тренажерных системах заключается в возможности получения в реальном масштабе времени либо оценки экипажа в целом по режимам и учебным задачам при наличии оценок отдельных членов экипажа, либо оценки каждого члена экипажа по режимам и учебным задачам при наличии оценок экипажа в целом.

Изложение основного материала. Для решения данной задачи необходимо иметь структурно-логическую схему взаимодействия операторов внутри экипажа, для которой примем в качестве функциональной единицы оценки деятельности экипажа отдельный режим.

Можно представить следующие основные варианты взаимодействия отдельных операторов экипажей при выполнении отдельного режима:

Вариант 1. Выполнение режима одним оператором.

Вариант2. Параллельное (автономное) выполнение режима несколькими операторами.

Вариант3. Параллельное (совместное) выполнение режима несколькими операторами.

Вариант 4. Последовательно-параллельное (автономное) выполнение режима несколькими операторами.

Вариант5. Последовательное выполнение режима несколькими операторами.

Вариант 6. Последовательно-параллельное (смешанное) выполнение режима несколькими операторами.

Вариант7. Параллельное (смешанное или совместно-автономное) выполнение режима несколькими операторами.

Вариант 8. Последовательно-параллельное (совместное) выполнение режима несколькими операторами.

На этих основных вариантах могут быть составлены более сложные комбинации взаимодействия операторов. Совокупность определенных режимов с полученными комбинациями взаимодействия операторов для конкретной учебной задачи и определяет структурно-логическую схему взаимодействия операторов экипажа для данной учебной задачи. Пример такой схемы, составленный для удобства дальнейшего рассмотрения из основных вариантов взаимодействия операторов, приведен на рис. 1. Здесь номер режима совпадает с номером варианта взаимодействия трех операторов при выполнении этого режима.

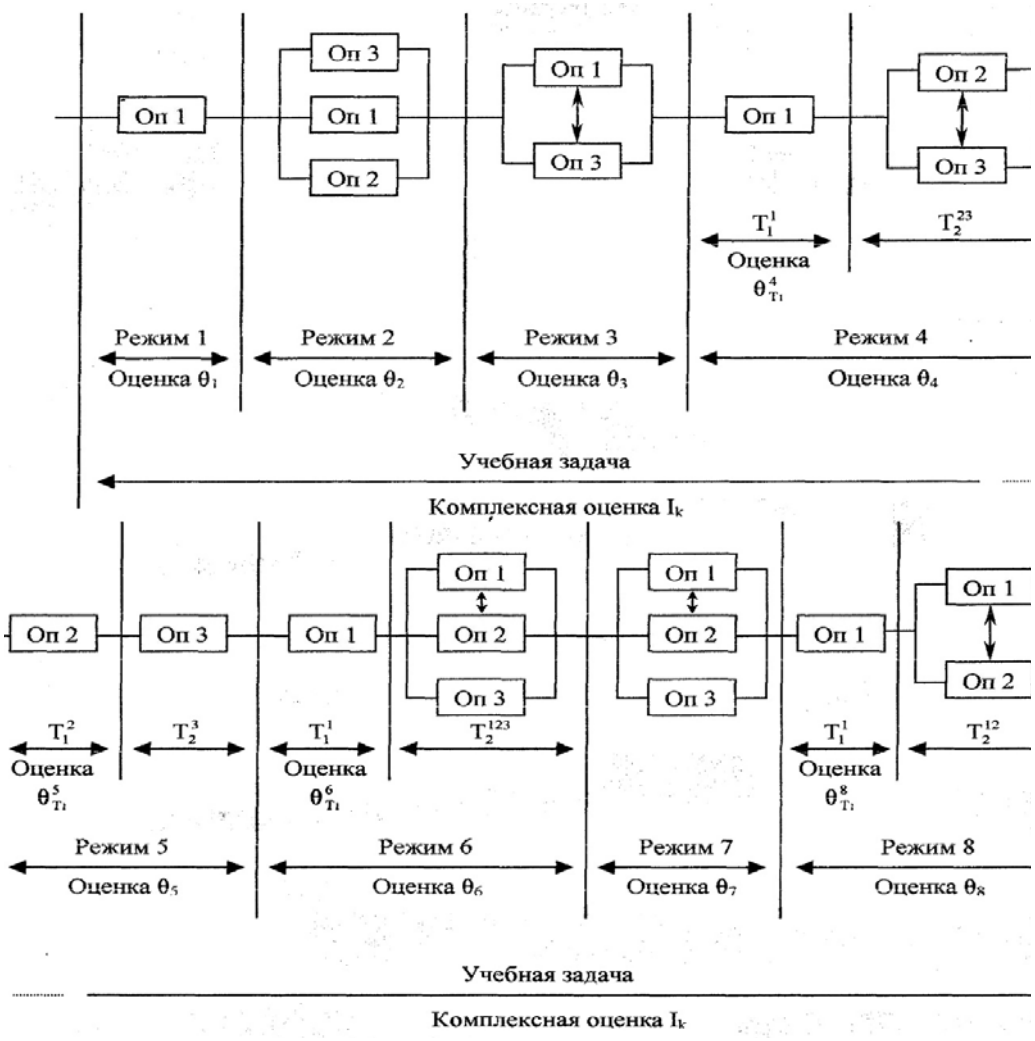


Рисунок 1 - Структурно-логическая схема взаимодействия операторов экипажа

Задача разделения оценок при коллективной деятельности операторов заключается в следующем: при наличии оценок деятельности экипажа по каждому режиму и всей учебной задаче в целом, выделить оценки каждого оператора при выполнении отдельных режимов и всей учебной задачи в целом.

Задача объединения оценок при коллективной деятельности операторов заключается в следующем: при наличии оценок деятельности отдельного члена экипажа по каждому режиму и всей учебной задаче в целом, определить оценки экипажа в целом при выполнении отдельных режимов и всей учебной задачи.

Рассмотрим вопросы разделения оценок при указанных ранее основных вариантах взаимодействия операторов в рамках отдельного режима. Пусть $\theta_l^{(j)}$ – оценка *j*-го оператора *l*-м режиме.

Вариант 1.

В этом случае оценка за режим является одновременно и оценкой конкретного оператора его выполняющего. В частности, для режима 1 (рис. 1) оценка первого оператора определяется как

$$\theta_1^1 = \theta_1, \tag{1}$$

второй и третий операторы не оцениваются.

Вариант 2.

Пусть число операторов равно *k*, а число контролируемых параметров равно *m*, причем первый оператор при управлении контролирует m_1 параметр, второй – m_2 и так далее, *k*-й оператор – m_k. Заданы коэффициенты значимости каждого параметра соответственно, то есть, заданы $\lambda_i,(i=\overline{1,m})$. Считаем, что на нижнем уровне формируются. Далее будем разделять три уровня оценки $I_i,(i=\overline{1,m})$ по каждому параметру. Так как работа операторов в данном случае независима, для оценки каждого из них необходимо агрегировать оценки только по контролируемым параметрам. Для этого необходимо пересчитать коэффициенты значимости следующим образом.

Для удобства коэффициенты значимости $\lambda_i,\left(i=\overline{1,m}\right)$ и оценки I_i можно представить как λ_{ij} и I_{ij}, $(i=\overline{1,m};j=\overline{1,k})$, где j — определяет номер оператора, а *i* – число контролируемых им параметров. Тогда перечисленные значения λ_{ij} определяются как

$$\overline{\lambda}_{ij}=\frac{\lambda_{ij}}{\sum\limits_{i=1}^{m_j}\lambda_{ij}},(j=\overline{1,k}). \quad (2)$$

Отсюда оценка j-го оператора за режим

$$\theta^{(j)}=\sum_{i=1}^{m_j}\overline{\lambda}_{ij}I_{ij},(j=\overline{1,k}). \quad (3)$$

В частности, для режима 2 (рис. 1) подобным образом оцениваются все три оператора, то есть рассчитываются оценки $\theta_2^{(1)},\theta_2^{(2)},\theta_2^{(3)}$.

Вариант 5.

Пусть имеется следующая цепочка из *k* операторов (рис. 2).

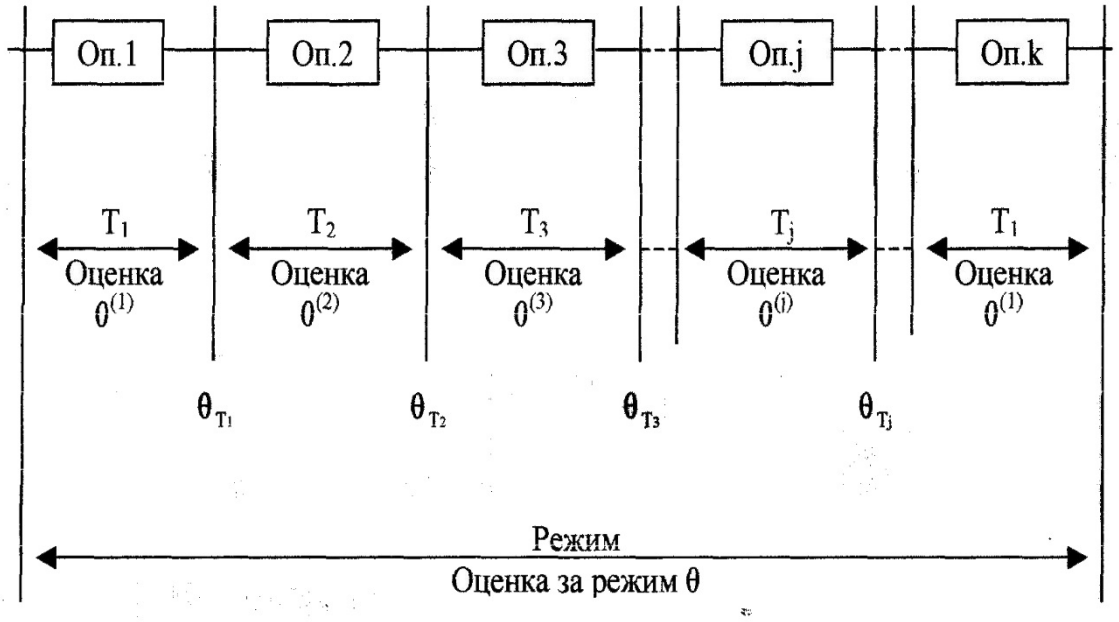


Рисунок 2 - Структурно-логическая схема для *k* работающих последовательно операторов

Все операторы при управлении, работают последовательно и контролируют *m* параметров.

В этом случае согласно алгоритмам раздела 2 на первом интервале T_1 оценка θ_{T_1} и является оценкой первого оператора в данном режиме

$$\theta^{(1)} = \theta_{T_1}. \tag{4}$$

На втором интервале оценка второго оператора оказывается независимой от оценки первого оператора. Беря за основу соотношения времени работы двух операторов и значение оценки θ_{T2}, определенное последовательной работой, оценку второго оператора можно определить следующей, полученной эмпирическим путем формулой

$$\theta^{(2)} = \theta_{T2} + \frac{T_2(\theta_{T2} - \theta_{T1})}{\sum_{i=1}^{2} T_i}. \tag{5}$$

Рассуждая аналогичным образом для следующих операторов, можно получить рекуррентное соотношение для оценки j-го оператора

$$\theta^{(j)} = \theta_{Tj} + \frac{T_j(\theta_{T2} - \theta_{T1})}{\sum_{i=1}^{2} T_i}, (j = \overline{1,k}). \tag{4}$$

Следует отметить, что не все к операторов обязательно будут работать в данном режиме и не всегда они располагаются в указанном порядке, В таком случае для работы рекуррентной формулы необходимо провести соответствующие преобразования. В частности, для режима 5 (рис. 1) таким образом оцениваются только операторы 2 и 3, то есть имеем $\theta_5^{(2)}, \theta_5^{(3)}$.

Вариант 3.

Разделение оценок при совместной работе нескольких операторов рассмотрим на примере работы двух операторов. Пусть они при управлении контролируют m параметров, из которых m_1 параметр являются определяющими при управлении для первого оператора (остальные, как правило, не имеют возможности их контролировать), а m_2 параметра являются определенными для второго оператора при тех же условиях. При совместном управлении существует определенное влияние (на практике, как правило, незначительное) изменения органов управления одного оператора на изменение значений контролируемых другим оператором параметров.

Такое допущение позволяет избежать сложных математических выкладок, и решить задачу в рамках предложенных в разделе 2 алгоритмов оценки и контроля.

При реализации данного режима по известным коэффициентам значимости $\lambda_i, (i = \overline{1,m})$ можно определить общую оценку за режим:

$$\theta = \sum_{i=1}^{m} \lambda_i I_i, \tag{6}$$

где I_i – значение критерия оценки на нижнем уровне, то есть по i-му параметру.

Полученную оценку можно представить как

$$\theta = \sum_{j=1}^{2} \theta_{\Delta}^{(j)}, \tag{7}$$

где

$$\theta_{\Delta}^{(j)} = \sum_{i=1}^{mj} \lambda_{ij} I_{ij}, (j = 1,2) \tag{8}$$

вклад *j*-го оператора в общую оценку за режим.

Влияние *j*-го оператора на общую оценку можно представить следующим коэффициентом:

$$\alpha_j = \frac{\theta_{\Delta}^{(j)}}{\theta} \ . \tag{9}$$

Если ввести нормированные коэффициенты λ_{ij}, рассчитанные аналогично формуле (2), то по формуле (3) можно рассчитать первое приближение оценки первого и второго операторов за режим, то есть $\tilde{\theta}^{(1)}$ и $\tilde{\theta}^{(2)}$.

Коррекция оценок каждого из двух операторов за режим проводится следующим образом:

$$\begin{aligned} \theta^{(1)} &= \tilde{\theta}^{(1)} + a_2(\theta - \tilde{\theta}_{\Delta}^{(2)}); \\ \theta^{(2)} &= \tilde{\theta}^{(2)} + a_1(\theta - \tilde{\theta}_{\Delta}^{(1)}). \end{aligned} \tag{10}$$

В случае k операторов формулы (8) и (10) имеют следующий вид:

$$\theta = \sum_{j=1}^{k} \theta_{\Delta}^{(j)}; \tag{11}$$

$$\theta^{(j)} = \tilde{\theta}^{(j)} + \sum_{\substack{i \neq j \\ i=1}}^{k} \alpha_i(\theta - \tilde{\theta}_{\Delta}^{(i)}). \tag{12}$$

В частности, для режима 3 (рис. 1) таким образом могут быть оценены операторы 1 и 3, то есть получены оценки $\theta_3^{(1)}$ и $\theta_3^{(3)}$.

Во всех остальных случаях, в том числе и в оставшихся основных вариантах, взаимодействия соответствующие на рис. 1 режимам 4, 6, 7, 8, разделение оценок производится сочетанием предложенных выше алгоритмов. Например, для режима 4 оценка каждого из трех операторов производится следующим образом:

1. Оценка оператора 1 определяется как $\theta_4^{(1)} = \theta_{T1}^4$.
2. По формуле (6) определяется общая оценка $\theta_4^{(2,3)}$ параллельной (автономной) работы операторов 2 и 3.
3. По формуле (3) определяется оценка $\theta_4^{(2)}$ и $\theta_4^{(3)}$ каждого из операторов 2 и 3.

В результате, для каждой учебной задачи на основании ее структурно-логической схемы можно получить оценки операторов в каждом режиме (разделение оценок). Так, для учебной задачи представленной на рис. 1 получаются следующие наборы оценок для каждого из операторов:

1-й оператор: $\theta_1^{(1)}, \theta_2^{(1)}, \theta_3^{(1)}, \theta_4^{(1)}, \theta_5^{(1)}, \theta_6^{(1)}, \theta_7^{(1)}, \theta_8^{(1)}$;

2-й оператор: $\theta_2^{(2)}, \theta_4^{(2)}, \theta_5^{(2)}, \theta_6^{(2)}, \theta_7^{(2)}, \theta_8^{(2)}$;

3-й оператор: $\theta_2^{(3)}, \theta_3^{(3)}, \theta_4^{(3)}, \theta_5^{(3)}, \theta_6^{(3)}, \theta_7^{(3)}$.

Поскольку каждая из учебных задач, решаемая операторами в процессе обучения, определяется совокупностью режимов, а следовательно совокупностью полученных оценок каждым оператором по каждому режиму, возникает необходимость получения результирующей оценки каждого оператора за выполнение конкретной учебной задачи, то есть возникает задача объединения оценок $\theta_l^{(j)}$.

Такое объединение целесообразно проводить по алгоритму формирования среднего уровня и верхнего уровня оценок, приведенному в работе авторов [5].

Выводы. Приведенные в данной статье результаты дают возможность получить в реальном масштабе времени либо оценки экипажа в целом по режимам и учебным задачам при наличии оценок отдельных членов экипажа, либо оценки каждого члена экипажа по режимам и учебным задачам при наличии оценок экипажа в целом. Полученные результаты касаются не только экипажей летательных операторов, но и любого коллектива операторов, управляющих сложными техническими системами.

Список литературы

1. Автоматизированные обучающие системы профессиональной подготовки операторов ЛА [Текст] / под ред. Шукшунова В.Е. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
2. Губинский, А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем [Текст] / А.И. Губский – Л.: Наука, 1982. – 270 с.
3. Зайцев, В.С. Системный анализ операторской деятельности [Текст] / В.С. Зайцев – М.: Радио и связь, 1990. – 120с.
4. Стенин, А.А. Социометрический поход к формированию экспертных групп на основе методов взаимной компетенции и диаграмм Вейча [Текст] / А.А. Стенин, А.Н. Губский, С.А. Стенин // Проблемы информационных технологий; Херсонский национальный технический университет. – 2012. – №2(012). – С. 6-10.
5. Стенин, А.А. Синтез иерархической структуры критериев оценки деятельности операторов сложных технических систем [Текст] / А.А. Стенин, С. А. Стенин, М.М. Ткач, А.Н. Губский, С.А. Стенин // Вісник НТУУ КПІ.-Інформатика та обчислювальна техніка. – К.: Век. – 2012. – №57. – С.40-45.

Alexandr Stenin, Prof., DSc., Olga Polshakova, Sr. Lect., Dmitryy Gumenniy, Phd tech. sci., Sergey Stenin

National Technical University of Ukraine "Kievskiy politechnichny institute" named after Igor Sykorsky, Kiev, Ukraine

Evaluation of the activity of crews of aircraft during their training on simulator

An effective means to improve the training of operators are automated training systems (ATS). In recent years, ATS in addition to traditional areas, such as aviation, aerospace, marine fleet are finding increasingly wide application in industry, energy and other sectors of the economy.

Improvement of operator perfomance is the subject of a number of sciences and, in particular, the theory of ergatic systems.

Outlined in this article, the results enable us to obtain real-time estimates of the crew in general, the modes and learning objectives in the presence of ratings of individual members of the crew, or the grades of every crew member on the modes and learning objectives in the presence ratings of the crew as a whole. The results relate not only to the crews of aircraft operators, but also to any group of operators that control complex technical systems.

aircraft, crew, operator, simulator, evaluation, structural-logical scheme

Одержано 05.04.17

УДК 681.513.5

Б.М. Гончаренко, проф., д-р техн. наук, О.П. Лобок, доц., канд. фіз.-мат. наук, М.А. Сич, асп.
Національний університет харчових технологій, м.Київ, Україна
Л.Г. Віхрова, проф., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний техничний університет, м.Кропивницький, Україна
E-mail: VIHROVALG@ukr.net

Математичне моделювання процесу біологічного очищення забруднених вод як об'єкта автоматичого керування

Наведені та обґрунтовані прийняті припущення при складанні математичної моделі процесу. Представлена і розглянута структурно-параметрична схема технологічного процесу біологічного очищення забруднених вод. Наведена в диференціальному вигляді математична модель та дані роз'яснення складових. Вибрані вхідна (керувальна) та вихідна (керована) величини моделі за каналом керувального діяння. З метою подальшого полегшення розв'язку наводяться вираз математичної моделі у векторному вигляді та вираз керованої величини. Проведена лінеаризація моделі та наведений її лінеаризований вигляд. Наведені вирази дискретних операторів критерія якості керування процесом очищення, дробового $PI^{\lambda}D^{\mu}$- регулятора та системи керування вцілому. Наведені результати чисельного моделювання системи керування процесом очищення води на основі розробленої моделі.
біологічне очищення води, математичне моделювання, оптимальне керування, чисельне моделювання, дробовий регулятор

Б.Н. Гончаренко, проф., д-р техн. наук, А.П. Лобок, канд. физ.-мат. наук, М.А. Сыч, асп.
Национальный университет пищевых технологий, Киев, Украина
Л.Г. Вихрова, проф., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, Кропивницкий, Украина
Математическое моделирование процесса биологической очистки загрязненных вод как объекта автоматического управления

Приведены и обоснованны принятые допущения при составлении математической модели процесса. Представлена и рассмотрена структурно-параметрическая схема технологического процесса биологической очистки загрязненных вод. Приведена в дифференциальном виде математическая модель и даны разъяснения её составляющих. Избранны входная (управляющая) и выходная (управляемая) величины модели по каналу управляющего воздействия. Для дальнейшего облегчения решения приводятся в векторном виде выражения математической модели и управляемой величины. Проведена линеаризация модели и приведен ее линеаризованный вид. Приведены выражения дискретных операторов критерия качества управления процессом очистки, дробного $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - регулятора и системы управления, а также результаты численного моделирования системы управления процессом очистки воды на основе разработанной модели.
биологическая очистка воды, математическое моделирование, оптимальное управление, численное моделирование, дробный регулятор

Вступ. Математичні моделі динаміки технологічних процесів в класичному вигляді передбачаються у формі системи диференціальних рівнянь. Але наразі застосування при синтезі автоматичних систем керування регуляторів дробових порядків в складі системи вимагає певного перетворення системи диференціальних

© Б.М. Гончаренко, О.П. Лобок, М.А. Сич, Л.Г. Віхрова, 2017

рівнянь. Бо дробове числення має одночасно справу з похідними і інтегралами довільного порядку (раціонального, дійсного і навіть комплексного). Тому приклад перетворення системи диференціальних рівнянь, а заодно і супутніх виразів дробового регулятора і критерія якості керування процесом очищення води уявляється досить актуальним.

Постановка задачі. Традиційно теорія і практика автоматичного керування орієнтовані на застосування при синтезі автоматичного керування технологічними процесами математичних моделей у вигляді системи класичних диференціальних рівнянь. Навіть з розвитком дробового числення, що фактично об'єднує диференціальне з інтегральним численням, і з застосуванням дробових законів керування, побудови дробових регуляторів і систем керування на їх основі залишається потреба у складанні математичних моделей у класичному диференціальному, хоч і перетвореному вигляді для синтезу сучасних систем автоматичного керування різноманітними технологічними процесами.

Постановка завдання. Метою статті є складання математичної моделі технологічного процесу на прикладі біологічного очищення забруднених вод та її відповідне перетворення до придатного при синтезі автоматичної системи керування вигляду.

Виклад основного матеріалу. У даній роботі розглянуто задачу математичного моделювання процесу біологічного очищення забруднених стічних вод активним мулом. Процес біоочищення як об'єкт керування будемо розглядати при наступних припущеннях:

• система працює в стаціонарному режимі, тобто вхідна і вихідна швидкості потоків постійні ($F_{in} = F_{out} = F$);

• швидкість подання рециркулюючого мулу пропорційна швидкості потоку процесу (*F*), тобто $F_r = r \cdot F$, де $r -$ коефіцієнт (ступінь, частка) рециркуляції активного мулу;

• потік видаляємого мулу з біореактора (надлишковий мул) вважається також пропорційним швидкості потоку (*F*), тобто $F_\beta = \beta \cdot F$, где β – коефіцієнт видалення надлишкового мулу;

• в рециркуляційному потоці активного мулу в біореактор відсутні субстрат і розчинений кисень;

• вихідний потік з аеротенках дорівнює сумі вихідного потоку відстійника і потоку рециркулюючого мулу;

• концентрація розчиненого кисню змінюється швидше в порівнянні зі зміною інших параметрів очисної системи і може вважатися постійною;

• очисна система складається з реактора-аеротенка і відстійника (рис. 1).

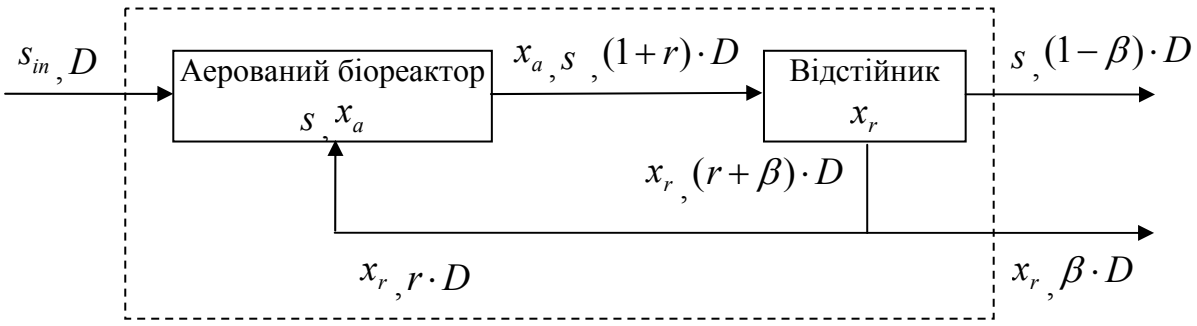


Рисунок 1 - Схема процесу очищення стічних вод

На рис. 1 зображений біореактор з сумішшю рідини і зважених твердих частинок. У біореакторі мікроорганізми розвиваються за рахунок органічних речовин субстрату. В результаті із забрудненої води видаляються органічні сполуки. Біореактором є перемішуваний аеротенк, в якому біологічно активні мікроорганізми (активний мул, біомаса) розчиняють (споживають) субстрат (органічні забруднюючі речовини). Зважені активні мікроорганізми відокремлюються в відстійнику (декантаторі). Частину концентрованої біомаси (мулу) повертають в біореактор, щоб підтримувати процес в системі. Для біосинтезу використовується кисень, що подається в біореактор. У відстійнику відбувається осадження твердих частинок біомаси, активний мул і очищена вода розділяються. Передбачається, що в відстійнику відсутня біореакція, а аеротенк є об'єктом ідеального змішування.

Математична модель, що описує очищення води за даною схемою, отримана на основі матеріального балансу для аератора і відстійника у вигляді наступної системи диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \dfrac{dx_a(t)}{dt} = \mu(t)x_a(t) - D(t)(1+r)x_a(t) + rD(t)x_r(t), \\ \dfrac{ds(t)}{dt} = -\dfrac{\mu(t)}{Y}x_a(t) - D(t)(1+r)s(t) + D(t)s_{in}(t), \\ \dfrac{dx_r(t)}{dt} = -D(t)(\beta+r)x_r(t) + D(t)(1+r)x_a(t), \end{cases} \quad , \tag{1}$$

де $x_a(t)$, $s(t)$ – відповідно концентрація біомаси і субстрату в біореакторі;

$x_r(t)$ – концентрація рециркуляційної біомаси;

$D(t)$ – ступінь розведення, який визначається як $D(t) = F(t)/V$, де $F(t)$ – об'ємна швидкість потоку, V – обсяг біореактора; $s_{in}(t)$ – концентрація субстрату у вхідному потоці;

Y – фактор виходу (прибутковості) біомаси;

$\mu(t)$ – питома швидкість росту біомаси, яка визначається за формулою Моно [3],

$$\mu(t) = \mu_{\max}\frac{s(t)}{k_s + s(t)} \ , \tag{2}$$

де $\mu_{\max}$ – максимальна питома швидкість росту біомаси;

k_s – константа насичення, що визначається експериментальним шляхом;

r, β – коефіцієнти, що визначають відповідно відношення рециркуляційного потоку і потоку відходів біомаси до вхідного потоку;

x_{a0}, s_0, x_{r0} – відповідно концентрація біомаси, субстрату і рециркуляційної біомаси в початковий момент часу t_0; $t_0 < t \le T$;

T – кінцевий момент часу керування процесом.

В якості керованого параметра (вихід моделі) виберемо величину $s(t)$ – концентрацію субстрату в біореакторі, яка визначає якість очищення води. В якості керувального впливу (дії) на систему виберемо функцію ступіню розведення $D(t)$.

Для зручності систему (1) запишемо у векторному вигляді [4]

$$\begin{cases} \dfrac{dx(t)}{dt} = f(x(t),u(t)), \qquad t_0 < t \le T, \\ x(t_0) = x^0, \end{cases} \tag{3}$$

де

$$f(x(t),u(t)) = \begin{pmatrix} f_1(x(t),u(t)) \\ f_2(x(t),u(t)) \\ f_3(x(t),u(t)) \end{pmatrix}, \quad x(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_a(t) \\ s(t) \\ x_r(t) \end{pmatrix}, \quad u(t) = D(t), \tag{4}$$

$$f_1(x(t),u(t)) = \mu(x(t))x_1(t) - (1+r)x_1(t)u(t) + rx_3(t)u(t),$$

$$f_2(x(t),u(t)) = -\frac{\mu(x(t))}{Y}x_1(t) - (1+r)x_2(t)u(t) + s_{in}(t)u(t),$$

$$f_3(x(t),u(t)) = -(\beta+r)x_3(t)u(t) + (1+r)x_1(t)u(t),$$

$$\mu(x(t)) = \mu_{\max}\frac{x_2(t)}{k_s + x_2(t)}.$$

Керований параметр при цьому запишеться так

$$s(t) = x_2(t) = c^T x(t), \tag{5}$$

де $c = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}^T$.

Лінеарізуючи перетворену систему (3) в околі заданого номінального керування u^* і відповідного йому вектора рівноважного стану $x^* = (x_1^*, x_2^*, x_3^*)^T$, при якому $f(x^*,u^*) = 0$ і який визначається як розв'язок системи нелінійних рівнянь $f(x,u^*) = 0$ щодо вектора x, введемо позначення

$$\Delta x(t) = \begin{pmatrix} \Delta x_1(t) \\ \Delta x_2(t) \\ \Delta x_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1(t) - x_1^* \\ x_2(t) - x_2^* \\ x_3(t) - x_3^* \end{pmatrix} = x(t) - x^*, \quad \Delta u(t) = u(t) - u^*. \tag{6}$$

Тоді лінеаризована система рівнянь моделі (3) представляється у вигляді

$$\begin{cases} \dfrac{d\Delta x(t)}{dt} = A\Delta x(t) + b\Delta u(t), \\ \Delta x(t_0) = x^0 - x^*, \end{cases} \tag{7}$$

З огляду на співвідношення (3) і позначення (7), рівняння для керованої змінної (вихід моделі) запишеться у вигляді

$$\Delta s(t) = c^T \Delta x(t), \tag{8}$$

де $\Delta s(t) = s(t) - c^T x^*$.

Лінеаризована модель керування (7) процесу біоочищення має один вхід $\Delta u(t)$ і один вихід у вигляді оператора від стану $\Delta x(t)$. Відомим способом стабілізації потрібних (вихідних) параметрів об'єкта керування є застосування регуляторів у зворотному зв'язку об'єкта в складі контура автоматизованої системи керування. Використаємо дробовий $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - регулятор [1,2], який представимо у вигляді

$$\Delta u(t) = k_P\left(\Delta s(t)\right) + k_I\left({}_{t_0}D_t^{-\lambda}\Delta s(t)\right) + k_D\left({}_{t_0}D_t^{\mu}\Delta s(t)\right), \tag{9}$$

За критерій якості автоматичного керування функціонуванням системи біологічного очищення води доцільно прийняти наступний оператор, з урахуванням якого знайдеться оптимальний розв'язок задачі.

$$J_p = \int_{t_0}^{T} \left|\Delta s(t)\right|^p dt = \int_{t_0}^{T} \left|c^T \Delta x(t)\right|^p dt, \tag{10}$$

де $p > 0$ – параметр, який на практиці приймають рівним $p = 1$ (модуль похибки) або $p = 2$ (середньоквадратична похибка).

Для чисельної реалізації сформульованої задачі оптимального регулювання дискретизуємо систему (7), дробовий $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - регулятор (9) і критерій (10), розбивши часовий інтервал $[t_0, T]$ на n частин з кроком $h = (T - t_0)/n$ (h – період квантування). Точки розбиття в $[t_0, T]$ позначимо через t_k, а стан системи (7) в ці моменти часу t_k – через $z_k = \Delta x(t_k)$.

Апроксимувавши неперервний вхідний сигнал $\Delta u(t)$ кусочно постійною функцією: $\Delta u(t) = u_k$ при $t_k \le t < t_{k+1}$, $k = 0,1,2,...,n$ і, використовуючи матрицю лінійної неперервної системи (7), отримаємо наступний її дискретний аналог

$$\begin{cases} z_{k+1} = e^{Ah} z_k + A^{-1}(E - e^{-Ah})bu_k, \qquad k = 0,1,2,...,n-1, \\ z_0 = x^0 - x^*, \end{cases} \tag{11}$$

де E – одинична матриця;

e^{Ah} – матрична експонента.

Далі дискретний дробовий $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - регулятор представимо у вигляді

$$u_k = c^T\left(k_P(z_k) + k_I\left(h^{\lambda}\sum_{j=0}^{k} w_j^{(-\lambda)} z_{k-j}\right) + k_D\left(h^{-\mu}\sum_{j=0}^{k} w_j^{(\mu)} z_{k-j}\right)\right). \tag{12}$$

Критерій якості (10) запишемо в дискретизованому вигляді

$$J_p = \frac{h}{2}\left(\left|c^T z_0\right|^p + 2\sum_{j=1}^{n-1}\left|c^T z_j\right|^p + \left|c^T z_n\right|^p\right). \tag{13}$$

Чисельне моделювання керованої системи біоочищення і пошук оптимального регулятора здійснювалися при наступних вихідних даних: $s_{in} = 200$ [*мг / л*], $Y = 0.65$, $\mu_{\max} = 0.15$ [*доб*$^{-1}$], $k_s = 100$ [*мг / л*], $r = 0.6$, $\beta = 0.2$, $u^* = 0.05$ [*доб*$^{-1}$], $t_0 = 0$, $T = 1$ [*доб*], вектор початкового стану системи (7) приймався рівним $x^0 = (x_1^0, x_2^0, x_3^0)^T = (286,\ 17,\ 568)^T$ [*мг / л*].

Використовувався метод повного перебору з рівномірним кроком для розв'язання завдання мінімізації критерію

$$I_p(\lambda, \mu) = \min_{k_P, k_I, k_D} J_p(k_P, k_I, k_D, \lambda, \mu) \tag{14}$$

відносно параметрів λ и μ. Результати оптимізації методом повного перебору критерія (13) представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Оптимальні налаштування дробового $PI^{\lambda}D^{\mu}$ та класичного PID - регуляторів

p	λ	μ	k_P	k_I	k_D	$I_p(\lambda,\mu)$
1	1	1	–0.1381	–3.3019	–0.0016	0.0963
1	0.9750	0.750	–0.2231	0.0072	$-1.0847\cdot10^{-5}$	0.0854
2	1	1	–0.1294	–3.6445	–0.0015	0.1184
2	0.9875	0.600	–0.2234	0.0068	$-3.1249\cdot10^{-6}$	0.0855

В стовпчиках λ и μ наведені порядки похідних і інтегралів дробових регуляторів, в шпальтах k_P, k_I, k_D – оптимальні налаштування цих регуляторів, в останньому стовпчику – мінімальне значення критерію (13). Тут же для порівняння наведені результати оптимізації для класичного PID-регулятора при $\lambda = 1$ и $\mu = 1$.

Результати показують, що значення цільової функції $I_p(\lambda,\mu)$ $(p=1, p=2)$ при оптимальному дробовому $PI^{\lambda}D^{\mu}$- регуляторі менші, ніж при класичному PID - регуляторі.

Порівняльний аналіз динаміки перехідних процесів показує більш високу швидкість і якість загасання при оптимальному дробовому $PI^{\lambda}D^{\mu}$ - регуляторі $(\lambda = 0.965, \mu = 0.5375)$ в порівнянні з оптимальним класичним PID - регулятором $(\lambda = 1, \mu = 1)$. Видно, що оптимальні дробові регулятори з точним налаштуванням параметрів λ (порядок дробового інтеграла) і μ (порядок дробової похідної) є більш ефективними порівняно з класичним PID - регулятором.

Висновки. Ступінь ефективності дробових регуляторів при застосуванні в складі системи автоматичного керування на основі класичної математичної моделі технологічного процесу і причини високої чутливості критерію оптимальності та перехідних процесів щодо порядків дробових похідних і інтегралів вимагають подальших досліджень.

Спиок литературы

1. Авсиевич, А.В. Моделирование систем автоматического управления с дробным ПИД-регулятором [Текст] / А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Техническое науки» . – 2010. – №1(26). – С. 6-59.
2. Дробное интегро-дифференциальное исчисление и его приложения в теории управления [Текст]. II. Дробные динамические системы: моделирование и аппаратная реализация / А.Г. Бутковский, С.С. Постнов, Е.А. Постнова // Автоматика и телемеханика. – 2013. – № 5. – С. 3-34.
3. Васильев, В.В. Дробное исчисление и аппроксимационные методы в моделировании динамических систем [Текст] / В. В. Васильев, Л. А. Симак ; НАН Украины, Ин-т проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова, Отд-ние гибрид. моделирующих и управляющих систем в энергетике. – К. : [б.и.], 2008. – 256 с.
4. Нахушев, А.М. Дробное исчисление и его применение [Текст] / А.М. Нахушев. – М.: Физматлит, 2003. – 272 с.

Borys Goncharenko, Prof., DSc., Oleksiy Lobok, Assoc. Prof., Phd phys.&math. sci., Maryna Sych, post-graduate
National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine
Larysa Vihrova, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Mathematical modeling of the process of biological purification of polluted waters as an object of automatic control

The assumptions made in the compilation of the mathematical model of the process are given and justified. The structural-parametric scheme of the technological process of biological treatment of polluted waters is presented and considered. A mathematical model is given in a differential form and explanations of its components are given. The input (control) and output (controlled) values of the model along the control action channel are selected. The expression of the mathematical model in vector form and the expression for the controlled quantity are given for further facilitating the solution. The linearization of the model is carried out and its linearized form is given. Expressions of discrete operators of the quality criterion for control of the cleaning process, fractional regulator and control system are given. The results of numerical simulation of the water treatment process control system based on the developed model are presented.

The degree of efficiency in the application of fractional regulators as part of the automatic control system based on classical mathematical model of the process and the reasons for the high sensitivity of optimality criterion and transients on the order of fractional derivatives and integrals require further research.

biological water purification, mathematical modeling, optimal control, numerical simulation, fractional regulator

Одержано16.05.17

УДК 621.313.333.2

Р.В. Телюта, доц., канд. техн. наук, С.П. Плешков, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
E-mail: teliuta.r@gmail.com

Принципи побудови моделі дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні

Представити принципипобудови моделі експериментального дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні.

В роботі запропонована методика дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні з короткозамкненим ротором у функції активної потужності, яка передається з валу електродвигуна робочій машині. Втрати активної потужності в електродвигуні знаходились як різниця активної потужності яку споживав електродвигун і потужності яка передавалась на вал електродвигуна. Перша потужність вимірювалась за допомогою комплекту контрольно-вимірювальних приладів, друга розраховувалась аналітичним шляхом за допомогою параметрів Г – подібної схеми заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна з урахуванням росту активного опору обмотки при нагріванні та виміряного ковзання.

Запропонована методика дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні дозволила встановити, що відхилення експериментальних даних від аналітичних розрахунків знаходяться в межах ±5,88%.

схема заміщення, параметри схеми заміщення, ковзання, споживана активна потужність, коефіцієнт втрат

Р.В. Телюта, доц., канд. техн. наук, С.П. Плешков, доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Методика исследования потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе

© Р.В. Телюта, С.П. Плешков, 2017

Представить принципы построения модели экспериментального исследования потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе.

В работе предложенная методика исследования потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе с короткозамкнутым ротором в функции активной мощности, которая передаётся из вала электродвигателя рабочей машине. Потери активной мощности в электродвигателе находились как разница активной мощности, которую потреблял электродвигатель, и мощности, которая передавалась на вал электродвигателя. Первая мощность измерялась с помощью комплекта контрольно-измерительных приборов, вторая рассчитывалась аналитическим путём с помощью параметров Г - образной схемы замещения одной фазы асинхронного электродвигателя с учётом роста активного сопротивления обмотки при нагревании и измеренного скольжения.

Предложенная методика исследования потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе позволила установить, что отклонения экспериментальных данных от аналитических расчётов находятся в пределах ±6 %.

схема замещения, параметры схемы замещения, скольжение, потребляемая активная мощность, коэффициент потерь

Постановка проблеми. В сьогоденні аналітичному дослідженню втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні присвячено цілий ряд ґрунтовних наукових робіт. Проте питання реального зменшення втрат потужності в електродвигуні залишається актуальним і на сьогоднішній день.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботах [1, 2] досліджена залежність втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції потужності на валу з урахуванням росту опору обмоток при нагріванні[3]. Проте результати вимагають експериментальної перевірки.

Постановка завдання.Представлення методики експериментального дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні.

Виклад основного матеріалу. Активна потужність, яку споживає асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, перетворюється в механічну $P_{мех}$, що складається з механічної потужності P_2, яка передається через вал робочій машині, механічної потужності P_m, яка передається в механічну систему електродвигуна, і механічної потужності $P_д$, що враховує додаткові втрати в електродвигуні, тобто

$$P_{мех} = P_2 + P_m + P_д . \quad (1)$$

Механічна потужність $P_{мех}$ може бути визначена в такий спосіб [2]:

$$P_{мех} = 3R_2'' \frac{1-s}{s} I'^2. \quad (2)$$

де R'' – приведений активний опір фази ротора, Ом;

I' – діюче значення сили електричного струму в колі схеми заміщення однієї фази електродвигуна, А;

S – відносне ковзання обертового магнітного поля електродвигуна.

Механічна потужність P_2, яка передається робочій машині, залежить від моменту опору робочої машини M_c й кутової швидкості обертання її вала ω, тобто

$$P_2 = M_c \cdot \omega. \quad (3)$$

Механічна потужність P_m, яка передається в механічну систему електродвигуна, залежить від моменту тертя механічної системи електродвигуна M_m-й кутової швидкості обертання її вала ω, тобто

$$P_m = M_m \cdot \omega. \quad (4)$$

Додаткові втрати активної потужності в електродвигуні можуть бути знайдені в такий спосіб:

$$P_д = P_{мх} - P_2 - P_m . \quad (5)$$

Інші сумарні втрати активної потужності P_{Σ} можуть бути знайдені, використовуючи схему заміщення асинхронного електродвигуна:

$$P_{\Sigma} = 3\left(R_1' + R_2''\right)I'^2 + 3R_1 I_0^2, \quad (6)$$

де R'_1, R''_2, R_1, – параметри схеми заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна, Ом;

I, I_0, I' – діючі значення сил електричних струмів гілок схеми заміщення однієї фази електродвигуна, А.

Перевіримо справедливість викладеного вище на прикладі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором типорозміру 4А100S2У3 з наступними каталожними даними: $P_{2н}$ = 4 кВт; $\eta_н$ = 0,865; $cos\varphi_н$=0,89; R'_1=1,509 Ом;x'_1=1,537 Ом; R''_2=1,006 Ом; x''_1=2,767 Ом;R_1= 1,485 Ом; x_1=1,513 Ом; x_μ= 0,95 Ом; $U_н$ = 220 В;$s_н$ = 0,033; $s_к$ = 0,28;$s_м$ = 0,8; $m_к$ = 2,5;$m_м$ = 1,6.

Аналіз проведемо для номінального режиму.

Визначаємо механічну потужність електродвигуна в номінальному режимі $P_{мехн}$ в такий спосіб:

$$P_{мехн} = 3R_2'' \frac{1-s_н}{s_н} I'^2_н, \quad (7)$$

де $s_н$ – номінальне ковзання магнітного поля електродвигуна щодо його ротора;

$I'_н$ – номінальна сила електричного струму в гілці схеми заміщення асинхронного електродвигуна, А.

Останню знаходимо, користуючись схемою заміщення асинхронного електродвигуна:

$$I'_н = \frac{U_н}{\sqrt{\left(R_1' + R_2''/s_н\right)^2 + \left(x_1' + x_2''\right)^2}}, \quad (8)$$

де $U_н$ – номінальна фазна напруга електродвигуна, В.

Підставивши в (7) і (8) значення параметрів і фізичних величин, знаходимо:

$$P_{мехн} = 4112 \text{ Вт.}$$

Знаходимо сумарні втрати активної потужності в механічній системі електродвигуна P_mй додаткові $P_д$:

$$P_m + P_д = P_{мхн} - P_{2н}, \quad (9)$$

де $P_{2н}$ – номінальна активна потужність, яка передається робочій машині з вала електродвигуна, Вт.

Підставивши значення потужностей, одержимо:

$$P_m + P_д = 4112 - 4000 = 112 \text{ Вт.}$$

Знаходимо інші сумарні втрати активної потужності:

$$P_{\Sigma н} = 3\left(R_1' + R_2''\right)I'^2_н + 3R_1 I_0^2, \quad (10)$$

де $I_0 = \frac{U_н}{\sqrt{R_1^2 + \left(x_1 + x_\mu\right)^2}}$, (11)

Підставивши значення параметрів і фізичних величин в (10) і (11), одержимо:

$$P_{\Sigma н} = 3\left(1,529 + 1,006\right)6,815^2 + 3 \cdot 1,485 \cdot 2,28^2 = 350 + 23 = 373 \text{ Вт.}$$

Загальні сумарні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні при номінальному режимі роботи:

$$\Delta P_н' = P_{\Sigma н} + P_т + P_д. \quad (12)$$

Підставивши значення потужностей, одержимо:

$$\Delta P_н' = 373 + 112 = 485 \text{ Вт.}$$

Визначимо ці втрати за каталожним даними:

$$\Delta P_н = \frac{P_{2н}}{\eta_н} - P_{2н}. \quad (13)$$

Підставивши значення потужності й к.к.д., одержимо:

$$\Delta P_н = \frac{4000}{0,865} - 4000 = 624 \text{ Вт.}$$

Як бачимо, використовуючи каталожні дані, отримуємо втрати активної потужності в електродвигуні, значення яких перевищує отримані втрати розрахунковим шляхом. Це пов'язане з тим, що Г-подібна схема заміщення не враховує втрати в магнітопроводі. Тому знаходимо втрати в магнітопроводі на гістерезис і вихрові струми як різницю значень втрат активної потужності, отриманих за каталожним даними й розрахованих за параметрами схеми заміщення:

$$P_м = \Delta P_н - \Delta P_н' = 624 - 485 = 139 \text{ Вт.} \quad (14)$$

Визначаємо постійні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні при номінальному режимі роботи:

$$\Delta P_{const_н} = P_м + P_т + P_д + 3R_1 I_0^2. \quad (15)$$

$$\Delta P_{const_н} = 139 + 112 + 23 = 274 \text{ Вт.}$$

Визначаємо змінні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні при номінальному режимі роботи:

$$\Delta P_{\text{var}_н} = P_{\Sigma н} - 3R_1 I_0^2. \quad (16)$$

$$\Delta P_{\text{var}_н} = 373 - 23 = 350 \text{ Вт.}$$

Визначаємо коефіцієнт втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні як відношення постійних втрат до змінних втрат у номінальному режимі роботи:

$$a = \frac{\Delta P_{const_н}}{\Delta P_{\text{var}_н}} = \frac{274}{350} = 0,78. \quad (17)$$

На підставі викладеного приймаємо наступну методику аналітичного дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні з короткозамкненим ротором у функції активної потужності, яка передається з вала електродвигуна робочій машині, тобто $\Delta P = f(P_2)$:

1) задаємося значеннями ковзання магнітного поля щодо ротора s в межах від нуля до критичного значення $s_к$, у тому числі номінальним ковзанням;

2) визначаємо квадрат сили електричного струму гілки розрахункової схеми, у тому числі при номінальному ковзанні:

$$I'^2 = \frac{U_н^2}{\left(R_1' + R_2''/s\right)^2 + \left(x_1' + x_2''\right)^2}; \quad (18)$$

3) визначаємо механічну потужність, у тому числі при номінальному струмі:

$$P_{мех} = 3 \cdot R_2'' \frac{1-s}{s} I'^2; \quad (19)$$

4) визначаємо втрати активної потужності в механічній системі електродвигуна й додаткові:

$$P_m + P_д = P_{мехн} - P_{2н}; \tag{20}$$

5) визначаємо втрати активної потужності від намагнічувального струму:

$$P_0 = 3R_1 I_0^2, \tag{21}$$

$$I_0^2 = \frac{U_н^2}{R_1^2 + \left(x_1 + x_\mu\right)^2}; \tag{22}$$

6) визначаємо втрати активної потужності в основній гілці розрахункової схеми, у тому числі $P_{\Sigma н}$:

$$P_\Sigma = 3\left(R_1' + R_2''\right)I'^2; \tag{23}$$

7) визначаємо втрати активної потужності в електродвигуні при номінальному режимі роботи без обліку втрат у магнітопроводі:

$$\Delta P_н' = P_m + P_д + P_0 + P_{\Sigma н}. \tag{24}$$

8)визначаємо втрати активної потужності в електродвигуні при номінальному режимі роботи з каталожних даних:

$$\Delta P_н = \frac{P_{2н}}{\eta_н} - P_{2н}; \tag{25}$$

9) визначаємо втрати в магнітопроводі:

$$P_м = \Delta P_н - \Delta P_н'; \tag{26}$$

10) визначаємо сумарні втрати активної потужності в електродвигуні:

$$\Delta P = P_m + P_д + P_0 + P_\Sigma + P_м; \tag{27}$$

11) визначаємо механічну потужність, яка передається на вал робочої машини:

$$P_2 = P_{мх} - P_m - P_д. \tag{27}$$

Досліджуємо втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні з урахуванням росту активного опору обмотки при нагріванні.

Рівняння теплового балансу асинхронного електродвигуна, розглядаючи останній як гомогенне тіло, має такий вигляд:

$$Cd\tau + Л\tau dt = \Delta P dt, \tag{28}$$

де C – теплоємність двигуна, Дж/ºС ;

τ – перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища, ºС;

$Л$ – тепловіддача електродвигуна в навколишнє середовище, Дж/с·ºС;

ΔP – втрати активної потужності в електродвигуні, Вт;

t – поточний час, с.

Перепишемо рівняння (28) в іншому вигляді:

$$\frac{C}{Л}\frac{d\tau}{dt} + \tau = \frac{\Delta P}{Л}. \tag{29}$$

У сталому режимі рівняння (29) приймає вигляд:

$$\tau_y = \frac{\Delta P_y}{Л}, \tag{30}$$

де τ_y – стале перевищення температури обмотки, ºС;

ΔP_y – втрати активної потужності в електродвигуні в сталому режимі, Вт;

Останні запишуться в такий спосіб:

$$\Delta P_y = \Delta P_{с.н} + \kappa^2 \Delta P_{м.н}\left(1+\alpha\left(\tau_y + \vartheta_{ср} - 75\right)\right). \quad (31)$$

Підставляємо (31) в (30) і одержуємо:

$$\tau_y = \frac{\Delta P_{с.н} + \kappa^2 \Delta P_{м.н}\left(1+\alpha\left(\tau_y + \vartheta_{ср} - 75\right)\right)}{Л}, \quad (32)$$

Перетворимо (32) і одержимо:

$$\tau_y = \frac{\Delta P_{с.н} + \kappa^2 \Delta P_{м.н}\left(1+\alpha\left(\vartheta_{ср} - 75\right)\right)}{Л - \alpha\kappa^2 \Delta P_{м.н}}, \quad (33)$$

Вираз (33) у номінальному режимі приймає вигляд:

$$\tau_н = \frac{\Delta P_{с.н} + \Delta P_{м.н}\left(1+\alpha\left(\vartheta_{ср} - 75\right)\right)}{Л - \alpha \Delta P_{м.н}}. \quad (34)$$

звідки

$$Л = \frac{\Delta P_{с.н} + \Delta P_{м.н}\left(1+\alpha\left(\vartheta_{ср} - 75\right)\right) + \alpha\tau_н \Delta P_{м.н}}{\tau_н}. \quad (35)$$

Підставляємо (35) в (34) і одержуємо:

$$\tau_y = \tau_н \frac{\Delta P_{с.н} + \kappa^2 \Delta P_{м.н}\left(1+\alpha\left(\vartheta_{ср} - 75\right)\right)}{\Delta P_{с.н} + \Delta P_{м.н}\left(1+\alpha\left(\vartheta_{ср} - 75\right)\right) - \alpha\tau_н\kappa^2 \Delta P_{м.н}\left(\kappa^2 - 1\right)\right)}. \quad (36)$$

Рівняння (36) в іншому вигляді запишеться в такий спосіб:

$$\tau_y = \tau_н \frac{a + \kappa^2\left(1+\alpha\left(\vartheta_{ср} - 75\right)\right)}{a + 1 + \alpha\left(\vartheta_{ср} - 75\right) - \alpha\tau_н\left(\kappa^2 - 1\right)\right)}. \quad (37)$$

Втрати активної потужності в обмотках електродвигуна:

$$P_\Sigma = P_{\Sigma н}\left(1+\alpha\left(\tau_y + \vartheta_{ср} - 75\right)\right)\kappa^2. \quad (38)$$

Проведемо розрахунок втрат для електродвигуна 4А100S2У3, результати занесемо в табл. 1.

Таблиця 1 – Розрахунок втрат активної потужності для електродвигуна

s	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045	0,05	0,055	0,06
I^2,А	1,18	4,62	10,25	17,9	27,5	38,9	52,04	66,7	82,4	99,6	118,05	137,6
κ^2	0,025	0,1	0,22	0,38	0,59	0,83	1,12	1,43	1,77	2,14	2,54	2,96
$P_{мех}$, Вт	708	1380	2031	2647	3236	3795	4330	4831	5277	5711	6121	6506
$P_т + P_д$, Вт	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112
P_0, Вт	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
P_Σ, Вт	9	38	85	152	245	363	521	672	969	1302	1739	2362
τ_y, °С	36	39	45	53	64	78	97	100	152	193	244	317
$P_м$, Вт	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
ΔP_y, Вт	283	312	359	426	519	637	791	950	1243	1576	2013	2636
P_2, Вт	596	1268	1919	2535	3124	3683	4218	4713	5165	5599	6009	6394
$\kappa_в = \frac{\Delta P}{P_2}$	0,47	0,25	0,19	0,17	0,16	0,17	0,18	0,2	0,25	0,28	0,32	0,41

Була створена експериментальна установка рис. 1. Навантаження електродвигуна виконувалось за допомогою генератора постійного струму G2 з

реостатом навантаження Rн. Ковзання електродвигуна вимірювалося тахогенератором G1. Активна потужність, яку споживав електродвигун вимірювалась за допомогою комплекту КВП типу К – 50. В якості досліджуваного електродвигуна використовувався електродвигун М типорозміру 4А100S2У3, для якого досліджувались втрати активної потужності аналітичним шляхом. Втрати активної потужності в електродвигуні знаходились як різниця активної потужності яку споживав електродвигун і потужності яка передавалась на вал електродвигуна. Перша потужність вимірювалась за допомогою комплекту КВП, друга розраховувалась аналітичним шляхом за допомогою параметрів Г–подібної схеми заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна та виміряного ковзання. Результати наведені на рис. 2, на якому 1 – теоретична крива, 2 – експериментальна крива.

Експериментальне дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні.

Втрати активної потужності в електродвигуні:

$$\Delta P=P_1-P_2. \tag{39}$$

Механічна потужність на валу електродвигуна:

$$P_2=3R_2''\frac{1-s}{s}I'^2, \tag{40}$$

$$I'^2=\frac{U_н^2}{(R_1'+\frac{R_2''}{s})^2+(X_1'+X'')^2}.$$

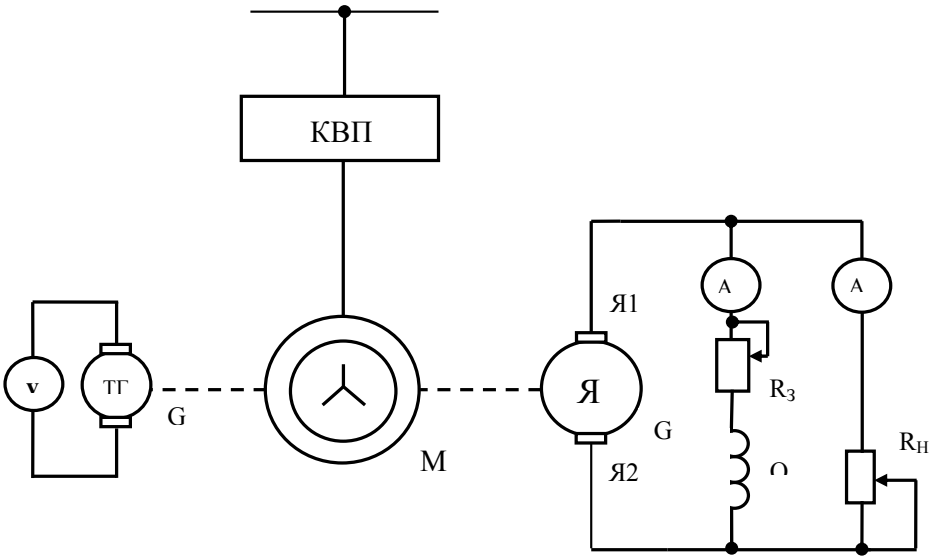


Рисунок 1 – Експериментальна установка дослідження втрат активної потужност і в асинхронному електродвигуні

Ковзання електродвигуна вимірюється і розраховується з допомогою тахометра, встановленого на валу електродвигуна; параметри схеми заміщення визначаються за каталожними (розрахунковим) даними.

Експериментальне дослідження втрат активної потужності приводилося в електродвигуні типорозміру 4А100S2У3. Електродвигун навантажувався генератором постійного струму. Результати занесені в таблицю 2[3].

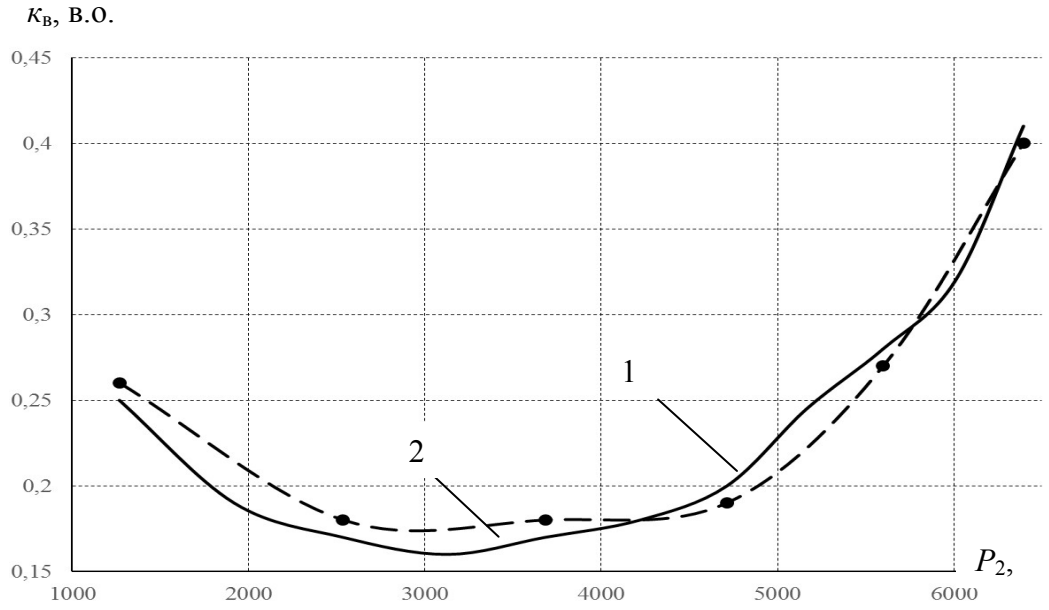
Таблиця 2 – Результати експериментального дослідження втрат активної потужності

s	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
U,B	220	220	220	220	220	220
I'^2,А	4,62	17,9	38,9	66,7	99,6	137,6
$P_{мех}$, Вт	1380	2647	3795	4831	5711	6506
n	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
P_2, Вт	1268	2535	3683	4713	5599	6394
P_1, Вт	1596	2987	4339	5615	7620	8924
ΔP, Вт	328	452	656	902	1481	2530
$\kappa_в = \frac{\Delta P}{P_2}$	0,26	0,18	0,18	0,19	0,27	0,40

Порівняння отриманих значень коефіцієнта втрат експериментальним шляхом з їх значенням, отриманим аналітичним шляхом [1], приведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати отриманих значень коефіцієнта втрат

s	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
$\kappa_в$ аналітика	0,25	0,17	0,17	0,2	0,28	0,41
$\kappa_в$ експеримент	0,26	0,18	0,18	0,19	0,27	0,40
$\sigma^2_{кв}$, %	4,06	5,88	5,88	5,03	3,57	2,44



1 – теоретична крива; 2 – експериментальна крива

Рисунок 2 – Залежність втрат активної потужності в електродвигуні у функції завантаження

Висновки. Запропонована методика дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні дозволила встановити, що відхилення експериментальних даних від аналітичних розрахунків знаходяться в межах ±5,88 %.

Список літератури

1. Овчаров, С.В. Исследование потерь в асинхронном электродвигателе [Текст] / С.В. Овчаров, Р.В. Телюта // Вісник Харківського національного технологічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, 2009. – Вип. 86. – 5 с.
2. Исследование потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе в функции скольжения [Текст] / В.В. Овчаров, С.В. Овчаров, Р.В. Телюта, О.В. Юдина // Вестник национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ ХПИ, 2009. – 8 с.
3. Телюта, Р. В. Методика экспериментального исследования потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе / Р. В. Телюта // Пр. Тавр. держ. агротехнол. ун-ту. – 2011. – Вип. 11, т. 3. – С. 133-136.

Ruslan Teliuta, Assoc. Prof., Phd tech. sci., Serhei Plieshkov, Assoc. Prof., Phd tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitsky, Ukraine

The principles ofresearch model constructionfor active-power losses is in an asynchronous electric

The principles ofresearch model constructionfor active-power losses in an asynchronous electric motor is shown in the article.

In process, the offered methodology of research of active-power losses is in an asynchronous electric motor with a short-circuited rotor in the function of active-power, that were transmitted to from the billow of electric motor the working machine. Losses of active-power in an electric motor calculated as a difference of active-power, which consumed by an electric motor and transmitted power on the billow of electric motor. The first power measured by complete set of control and measuring devices, the second calculated in analytical way by means of parameters of G - similar substituting chart for one phase of asynchronous electric motor taking into account the height of pure resistance of puttee at heating and measured sliding.

The offered methodology of research of active-power losses in an asynchronous electric motor allowed setting that deviations of experimental data from analytical calculations are within the limits of ±5,88 %.

chart of substitution, parameters of chart of substitution, sliding, active watts-in, coefficient of losses
Одержано 18.05.17

УДК 004.9

Д.В. Шингалов, асп., Є.В. Мелешко, доц., канд. техн. наук, Р.М. Минайленко, доц., канд. техн. наук, В.А. Резніченко, викл.
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
E-mail: elismeleshko@gmail.com

Методи автоматичного аналізу тональності контенту у соціальних мережах для виявлення інформаційно-психологічних впливів

У статті проводиться дослідження існуючих методів автоматичного аналізу настроїв користувачів в онлайнових віртуальних соціальних мережах, для виявлення найбільш придатних з них для розпізнавання інформаційно-психологічних впливів, заснованих на емотивній комунікації. Дослідження включає в себе огляд лексемного методу та методів машинного навчання. Зокрема розглянуто процедуру попередньої обробки тексту перед аналізом та категорії словників, що використовуються для аналізу. Наведено алгоритми навчання для класифікації тексту: метод опорних векторів, наївний класифікатор Бейєса, дерева прийняття рішень, метод максимальної ентропії та нейронні мережі. Запропоновано методи для поліпшення якості результатів автоматичного визначення тональності тексту.

соціальні мережі, аналіз настроїв, лексемний аналіз, машинне навчання

© Д.В. Шингалов, Є.В. Мелешко, Р.М. Минайленко, В.А. Резніченко, 2017

Д.В. Шингалов, асп., Е.В. Мелешко, доц., канд. техн. наук, Р.Н. Минайленко, доц., канд. техн. наук, В.А. Резниченко, преп.
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Методы автоматического анализа настроений в социальных сетях

В статье проводится исследование существующих методов автоматического анализа настроений пользователей в онлайновых виртуальных социальных сетях, для выявления наиболее подходящих из них для распознавания информационно-психологических воздействий, основанных на эмотивной коммуникации. Исследование включает в себя обзор лексемного метода и методы машинного обучения. В частности рассмотрено процедуру предварительной обработки текста перед анализом и категории словарей, используемых для анализа. Приведены алгоритмы обучения для классификации текста: метод опорных векторов, наивный классификатор Байеса, деревья принятия решений, метод максимальной энтропии, и нейронные сети. Предложены методы для улучшения качества результатов автоматического определения тональности текста.

социальные сети, анализ настроений, лексемного анализ, машинное обучение

Актуальність. Зростаюча популярність онлайнових соціальних мереж, таких як Twitter, Facebook, MySpace тощо, в останні роки викликало великий інтерес до аналізу настроїв їх користувачів. Аналіз тональності (настроїв) відноситься до класу методів, заснованих на обчислювальній обробці, що використовується для ідентифікації, вилучення та характеристики суб'єктивної інформації, наприклад, думок, виражених в тій чи іншій частині тексту, що дозволяє класифікувати ставлення автора до різних тем в позитивні, негативні або нейтральні категорії. Аналіз настроїв має безліч застосувань в різних галузях, включаючи бізнес-аналітику, політику, соціологію і т.д. Такі дані, як коментарі, блоги, твіти, відео і т.д., які висловлюють думки відносно різних тем і подій, пропонують величезні можливості для вивчення і аналізу людських думок і настроїв.

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження існуючих методів автоматичного аналізу настроїв та тональності мультимедійних даних і текстів у віртуальних соціальних мережах для виявлення найбільш придатних з них для розпізнавання пропаганди, агітації та інформаційно-психологічних впливів у контенті соціальних мереж, заснованих на емотивній комунікації.

Задача дослідження. На основі дослідження параметрів та характеристик методів автоматичного аналізу тональності контенту віртуальних соціальних мереж, таких як необхідність застосування словників, необхідність попередньої лінгвістичної обробки тексту та можливість застосування до різних типів даних, виділити найбільш придатні методи для розпізнавання пропаганди та інформаційно-психологічних впливів у контенті.

Зв'язок проблеми з важливими науковими та практичними задачами. Розглянута проблема пов'язана з важливими науковими та практичними задачами лінгвістичного аналізу тексту, аналізу соціальних мереж та машинного навчання. Вирішення проблеми якісного автоматичного аналізу настроїв у соціальних мережах дозволить автоматично виявляти інформаційно-емоційні впливи у контенті соціальних спільнот та вчасно реагувати на дані впливи.

Виклад основного матеріалу. Сучасна теорія аналізу та керування великими даними (Big Data) виокремлює два основних напрямки автоматичного аналізу настроїв – це методи на основі використання лексем і методи машинного навчання.

Перед застосуванням будь-якого з методів вилучення настрою, звичайною є практика попередньої обробки даних. Попередньо оброблені дані дозволяють забезпечити високу якість класифікації тексту і зменшити обчислювальну складність. Типова процедура попередньої обробки включає в себе наступні основні кроки:

– Розмітка за частинами мови. Цей процес дозволяє автоматично визначити кожне слово речення як частину мови: іменник, займенник, прислівник, прикметник,

дієслово, вигук і т.д. Мета полягає в тому, щоб витягти зразки тексту на основі аналізу частотних розподілів цих частин у мові.

– Зведення до кореня. Процедура відсікання суфіксів та закінчень від кореня. Кількість різних слів для аналізу зменшується, коли корінь схожих слів, наприклад, таких як "читати", "читач" і "читання" відображаються як одне слово “читати”.

– Видалення некорисних слів. Це слова, які несуть в собі сполучну функцію в реченнях, наприклад, прийменники, артиклі і т.д. Немає певного списку таких слів, але деякі пошукові машини, не використовують такі слова як, "є", "в", "який" і "на". Ці слова можуть бути видалені з тексту перед класифікацією, так як вони мають високу частоту появи в тексті, але не впливають на його емоційне навантаження.

– Обробка заперечень. Заперечення відноситься до процесу перетворення настроїв тексту з позитивного на негативний, або з негативного на позитивний.

– Токенізація в N-грами. Токенізація – це процес створення словнику зі слів тексту. Токенізація соціальних медіа-даних значно складніша, ніж токенізація звичайного тексту, так як вони містять численні смайли, URL-посилання, скорочення, які не можуть бути легко оцінені в тексті.

Лексемно-орієнтований підхід обчислює настрій заданого тексту в залежності від полярності слів або фраз у цьому тексті. Методика розрахунку настрою [1] полягає у наступному: після попередньої обробки тексту, відбувається перевірка маркера кожного слова на його полярність в лексиконі. Якщо слово не знайдено у лексиконі, тоді його полярність вважається нульовою. Після призначення балів полярності W всім словам, що містяться у тексті, остаточна оцінка S настрою тексту розраховується (1) діленням суми балів слів, які задають настрій тексту (крім нульових) на кількість m таких слів:

$$S = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} W_i , \qquad (1)$$

де W_i – бал полярності i-го слова; m – кількість слів, які задають настрій тексту.

Усереднення балу дозволяє отримати числове значення балу настрою у діапазоні від -1 до 1, де 1 означає сильний позитивний настрій, -1 означає сильний негативний настрій і 0 означає, що текст є нейтральним. Якість класифікації багато в чому залежить від якості словника.

Словники можуть бути створені з використанням різних методів [2]:

– Вручну побудовані словники [3] (простий, але не дуже швидкий метод). Наприклад General Inquire [4], який складається зі слів суспільствознавчих категорій для контент-аналізу. Ці категорії аналізу контенту намагаються охопити тон, ставлення, зовнішній вигляд.

– Словники з підготовлених даних бувають напівавтоматичними (наприклад, використовують такі ресурси, як WordNet [5] або UNL [6]), або автоматичними, коли словник може бути отриманий автоматично через асоціацію, де оцінка для кожного нового прикметника розраховується з використанням частоти близькості від прикметника до одного або більшої кількості затравочних слів.

Як зазначено в [9], *методи машинного навчання для аналізу текстів* – це сукупність методів, заснованих на алгоритмах штучного інтелекту, які використовують для навчання дані раніше помічені як позитивні, негативні або нейтральні.

У спрощеному вигляді, задача класифікації текстів може бути описана наступним чином – задано набір маркованих даних:

$$T_{data} = \{(t_i, L_i),...(T, n)\}, \quad (2)$$

де кожен текст належить до набору даних T і мітка L_i є попередньо встановленим класом всередині групи класів L, мета полягає в тому, щоб побудувати алгоритм навчання, який буде приймати в якості вхідних даних навчальний набір T_{data} і створити модель, яка буде точно класифікувати немарковані тексти t_i у кількості n.

Найпопулярніші алгоритми навчання для класифікації тексту – це метод опорних векторів [7], наївний класифікатор Баєса [8] , дерева прийняття рішень [9, 10], метод максимальної ентропії [11] та нейронні мережі [12].

Метод опорних векторів (SVM) [7] – це метод навчання з учителем, що використовується для бінарної класифікації. Даний алгоритм машинного навчання будує розділяючу поверхню у гіперпросторі з точок (об'єктів вибірки), що лежать між полярними підмножинами, тобто розмежовує класи. Точки побудованої поверхні називаються опорними векторами. Цей класифікатор може замінювати нейронні мережі, але має дуже повільний процес навчання.

Знаходження параметрів SVM відповідає опуклій оптимізації. Завдання класифікації, як правило, включає в себе поділ даних на навчальні та тестові набори. Кожен екземпляр в навчальному наборі містить одне «цільове значення» (тобто клас-мітку) і кілька «атрибутів» (функції спостереження за змінними). Метою SVM є вироблення моделі (на основі навчальних даних), яка визначає цільове значення тексту, та побудова оптимальної розмежувальної гіперплощини. SVM для класифікації використовується, щоб знайти лінійну модель такого вигляду:

$$y(x) = \omega^{\gamma} x + b, \quad (3)$$

де x вхідний вектор, ω і b є параметрами, які можуть бути скориговані для певної моделі, що оцінюється емпіричним шляхом, γ – вектор двоїстих змінних.

Для простої лінійної класифікації завдання полягає в тому, щоб звести до мінімуму функцію помилок, що визначається рівнянням:

$$C\sum_{n=1}^{N} \xi_n + \frac{1}{2}\|\omega\|^2 \to \min, \quad (4)$$

де C – обрана константа;

ω – вектор коефіцієнтів;

ξ – параметр для обробки неподільних даних (входів);

n – номер процедури навчання.

Дерева рішень [9, 10] можуть бути адаптовані до практично будь-якого типу даних, тому цей спосіб широко використовується в алгоритмах машинного навчання. При контрольованому машинному навчанні використовується алгоритм, який ділить підготовлені дані на більш дрібні частини, з метою визначення моделі, яка може бути використана для класифікації. Дані потім представляються у вигляді логічних структур, подібних до древовидної, які можуть бути легко зрозумілі без будь-яких статистичних знань. Алгоритм особливо добре підходить для випадків, коли може бути знайдено багато ієрархічних категоріальних відмінностей. Вони побудовані з використанням евристичних алгоритмів, які називають рекурсивним розбиттям. Це, як правило, відомо, як підхід «розділяй і володарюй», оскільки він використовує значення функцій для поділу даних на менші підмножини подібних класів. Структура дерева рішень

складається з кореневого вузла, який представляє собою весь набір даних, рішень вузлів, які виконують обчислення і листових вузлів, які здійснюють класифікацію.

Для того, щоб класифікувати невідомий екземпляр, дані передаються через дерево. На кожному вузлі рішення певної функції, отриманої з вхідних даних, порівнюються з константою, яку було визначено на етапі підготовки. Обчислення, яке відбувається в кожному вузлі рішення, зазвичай, порівнює обрану функцію з цією, заздалегідь заданою, константою, тоді рішення буде ґрунтуватися на функції, створюючи два способи поділу на дереві. Дані будуть, в кінцевому підсумку, проходити через ці вузли рішення до тих пір, доки не досягнуть листового вузла, який представляє собою визначений клас. Є багато різних реалізацій і варіантів алгоритму дерев рішень, такі як, Random Forest та метод J48, який є реалізацією Java алгоритму C4.5. Для виявлення спаму, пропаганди, інформаційно-психологічних впливів дерева прийняття рішень на практиці застосувати неможливо, оскільки вони не підтримують інкриментого навчання. Можна взяти великий об’єм даних та побудувати для нього дерево рішень, але врахувати нові повідомлення даний метод не зможе, оскільки для нових даних його доведеться кожен раз навчати заново.

В якості найпростішого методу для класифікації тональності тексту, а також фільтрації спаму, використовується *наївний класифікатор Баєса* [8]. У даному класифікаторі використовується теорема Баєса для визначення ймовірності приналежності елемента вибірки до одного з класів при припущенні незалежності ознак. Для підвищення якості класифікації застосовується метод *максимальної ентропії* [11]. Класифікатор максимальної ентропії є класифікатором ймовірності, який належить до класу експоненціальної моделі. На відміну від наївного класифікатора Баєса, він не припускає, що ознаки умовно незалежні одна від одної. Цей класифікатор засновано на принципі максимальної ентропії усіх моделей, які відповідають даними навчання з найбільш рівномірним розподілом. Класифікатор максимальної ентропії може бути використаний для вирішення великої кількості різноманітність завдань класифікації тексту, таких як виявлення спаму, сленгу, тематичної класифікації тощо.

Для автоматичного визначення емоційного забарвлення контенту соціальних мереж можна використовувати *нейронні мережі* [12]. За допомогою нейронних мереж можна проводити аналіз емоційного навантаження смайлів та картинок, що постяться у соціальних мережах, а також аналіз емоційного забарвлення текстових даних.

Перевагами застосування нейронних мереж є: можливість рішення задач при невідомих закономірностях, здатність до навчання, стійкість до шумів у вхідних даних.

Алгоритми навчання штучних нейронних мереж поділяються на алгоритми навчання з учителем та без учителя. Навчання нейронної мережі в першу чергу полягає в зміні вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків між нейронами.

Для аналізу текстових даних, доцільно застосовувати глибоке навчання рекурентних нейронних мереж, яке не викликає складнощів із перенавчанням, на відміну від згороточних та повнозв’язних нейромереж.

Переваги та недоліки досліджених методів автоматичного визначення тональності контенту у віртуальних соціальних мережах представлені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз методів автоматичного визначення тональності у текстах та мультимедійних даних

Назва методу	Необхідність застосування словників	Необхідність попередньої лінгвістичної обробки тексту	Можливість застосування до різних типів даних	Можливість застосування для виявлення інформаційно-психологічних впливів
Лексемний метод	+	+	Тільки до текстів	+
Метод опорних векторів	–	–	До різних типів даних	+
Дерева прийняття рішень	–	+	До різних типів даних	–
Наївний класифікатор Баєса	+	–	Тільки до текстів	+
Метод максимальної ентропії	+	–	Тільки до текстів	+
Нейронні мережі	–	–	До різних типів даних	+++

Висновки. Дослідження методів автоматичного аналізу настроїв в соціальних мережах показало, що найбільш придатними для виявлення у текстах та мультимедійних даних інформаційно-психологічних впливів, заснованих на емотивній комунікації, є нейронні мережі, оскільки вони не потребують складання словників, обов'язкової попередньої лінгвістичної обробки текстів, можуть застосовуватися до різних типів даних та здатні здійснювати класифікацію за декількома категоріями, що дозволить виявляти різні типи інформаційно-психологічного впливу. Також для поставленої задачі можна використовувати лексемний метод, метод опорних векторів, наївний класифікатор Баєса та метод максимальної ентропії. Недоліком методу опорних векторів є те, що він здійснює бінарну класифікацію, яка дозволить розділити дані тільки на дві категорії: дані без інформаційно-психологічних впливів та дані з інформаційно-психологічними впливами. Основний недолік наївного класифікатору Баєса – неможливість врахування залежності результату від комбінації ознак (слів). Спільним недоліком лексемного методу, наївного класифікатору Баєса та методу максимальної ентропії є необхідність складання словників, що вимагає тісної співпраці з лінгвістами.

Слід зазначити, що будь-який з методів автоматичної класифікації тексту не може дати беззаперечних результатів. Помилки даних методів пояснюються наступними проблемами: орфографічними помилками у тексті, відсутністю зв'язків у тексті. Також не завжди про ставлення автора можна сказати за наявністю або відсутністю позитивних, негативних або нейтральних відгуків.

Для поліпшення автоматичного визначення тональності тексту доцільно використовувати декілька систем класифікації, гібридні методи класифікації. Також, для підвищення якості роботи класифікаторів треба забезпечити автоматичне виправлення орфографічних помилок, вдосконалювати словники (для методів,

заснованих на словниках) і навчальні вибірки (для методів машинного навчання). Також можна підвищити точність роботи алгоритмів автоматичної класифікації тексту, застосовуючи існуючі розробки з автоматичного реферування, виявлення кореферентності тощо.

Список літератури

1. Stone, P. A computer approach to content analysis: Studies using the general inquirer system [Text] / P. Stone, E. Hunt // Spring Joint Computer Conference, AFIPS '63 (Spring) / P. Stone, E. Hunt. – New York: ACM, 1963. – С. 241–256.
2. Lexicon-based methods for sentiment analysis [Text] / [M. Taboada, J. Brooke, M. Tofiloski та ін.]. // Computational linguistics. – №37. – С. 267–307.
3. Wiebe, J. Learning subjective adjectives from corpora [Text] / J. Wiebe // In Proceedings of the Seventeenth National Conference on Artificial Intelligence and Twelfth Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence / J. Wiebe., 2000. – С. 735–740.
4. Guthrie, D. Unsupervised detection of anomalous text. [Text] : дис. докт. філос. наук / Guthrie D. – Sheffield, 2008. – 186 с.
5. Hayashi, Y. A Dictionary Model forUnifying Machine Readable Dictionaries and Computational Concept Lexicons [Text] / Y. Hayashi, T. Ishida // LREC / Y. Hayashi, T. Ishida., 2006. – С. 1–6.
6. Boudhh, S. Unification of universal word dictionaries using WordNet ontology and similarity measures [Text] / S. Boudhh, P. Bhattacharyya, // In Proceedings of the 5th International Conference on Global WordNet / S. Boudhh, P. Bhattacharyya,. – Mumbai, 2010. – С. 1–7.
7. Cortes, C. Support-vector networks. [Text] / C. Cortes, V. Vapnik // In Machine Learning / C. Cortes, V. Vapnik. – Hingham: Kluwer Academic Publishers, 1995. – (volume 20). – С. 273–297.
8. Narayanan, V. Fast and accurate sentiment classification using an enhanced naive bayes model. [Text] / V. Narayanan, I. Arora, A. Bhatia // Intelligent Data Engineering and Automated Learning IDEAL / V. Narayanan, I. Arora, A. Bhatia. – Berlin: Springer, 2013. – (volume 8206 of Lecture Notes in Computer Science). – С. 194–201.
9. Mitchell, T. Machine Learning [Text] / T. M. Mitchell. – New York: McGraw-Hill, 1997. – 414 с.
10. Schmid, H. Probabilistic part-of-speech tagging using decision trees [Text] / H. Schmid // In International Conference on New Methods in Language Processing / H. Schmid. – Manchester, 1994. – С. 44–49.
11. Patel, D. Sentiment Analysis using Maximum Entropy Algorithm in Big Data. [Text] / D. Patel, S. Saxena, T. Verma. // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2016. – №5. – С. 8355–8361.
12. Vyrva, N. Sentiment Analysis in Social Media. Master's Thesis in Computer Science [Text] / N. Vyrva. – Halden: Ostfold University College, 2016. – 82 с.

Dmitry Shyngalov, post-graduate, Yelyzaveta Meleshko, Assoc. Prof., Phd tech. sci., Roman Mynaylenko, Assoc. Prof., Phd tech. sci., Vitaliy Reznichenko, Lect.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Methods of automated sentiment analysis on social networks

The article analyzes existing methods of automatic analysis of sentiments in online virtual social networks, for to identify methods that can determine the information-psychological influences, based on emotive communication.

The analysis includes a review of lexical method and methods of machine learning. Specifically there are considered procedure of preprocessing text before the analysis and categories of dictionaries used for analysis. The algorithms for classification study the text are given: the method of support vectors, naive Bayesian classifier, decision tree method of maximum entropy, and neural networks.

Methods to improve the quality of results of automatic determination of the tone of the text are proposed.

social networks, sentiment analysis, lexical analysis, machine learning

Одержано 15.05.17

ЗМІСТ

ТЕХНІКА В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОМУ ВИРОБНИЦТВІ

В.І. Дирда О.А.Черній, О.А. Жидик
Дослідження експлуатаційної надійності тракторів JOHN DEERE серії 8320R в умовах України 3

О.І. Кепко , А.В. Войтік,О.С. Пушка, І.О. Лісовий
Статична математична модель теплового балансу зерносушарки 10

Ю.О. Ковальчук, О.С. Пушка, А.В. Войтік
Вплив поглинаючих покриттів на глибину лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки зі сталі 45..... 16

О.В. Оришака, В.І. Гуцул, А.М. Артюхов
Теоретичне дослідження регулятора витоку сипкого матеріалу..... 22

А. А. Панков
Энергетические показатели рабочего процесса высевающих аппаратов и систем..... 28

М.М. Студент, Я.Я. Сірак, С.І. Маркович
Трибологічна поведінка ПЕО шарів у парі зі сталями 45 та У 8..... 36

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

В.М. Боков
Електродугове різання металів бідротовим електродом-інструментом 44

А. М. Кириченко, Аль Ібрахімі Метак
Багатокоординатний верстат з надлишковим механізмом паралельної структури та спеціальним робочим органом..... 57

Ю.В. Кулєшков, Є.В. Магонець, К.Ю. Кулєшкова, М.В. Красота, Т.В. Руденко
Аналіз теоретичних досліджень геометричних параметрів відсіченої порожнини шестеренного насоса 64

В.В. Клименко, Н.В. Ковальчук, В.І.Кравченко
Експериментальна оцінка ефективності регенерації картриджів побутових фільтрів доочистки питної води..... 76

Ю.В. Кулєшков, М.В. Красота, Т.В. Руденко, О.О. Матвієнко
Використання мікродугового оксидування при зміцненні деталей з алюмінієвих сплавів, відновлених пластичним деформуванням 83

В.М. Ломакін, В.В. Клименко, А.В. Ломакін, В.І. Дубодєлов, М.С. Горюк
Дослідження впливу температури і швидкості руху розплаву на процес розчинення легуючих добавок в рідкому чавуні 90

С.І. Маркович, С.С. Михайлюта
Аналіз стану та перспективи розвитку технологічних методів зміцнення головок поршнів автотракторних двигунів 96

В.І. Носуленко, В.М. Шмельов
Особливості електричної дуги в поперечному потоці рідини 103

Насер М. Елкхмрі, Будар Мохамед Р.Ф., Хамза Абобакр О., І.В. Шепеленко
Порівняння результатів експериментів і розрахунків моделювання вигину штампованого алюмінієвого профілю 111

А.Ю. Лысых
Пространственное деформирование гибких конструкций, соединяющих судно-носитель и присоединенный объект 118

О. Ф. Сіса, В.В. Пукалов, В.В. Юр'єв
Технологія виготовлення порожнин високоміцних гайок спеціального призначення 124

АВТОМАТИЗАЦІЯ

Л.Г. Віхрова, В.А. Бісюк, О.К. Дідик
Автоматичне керування тривалістю індукційного наплавлення..... 131

Oleksiy Lobok, Borys Goncharenko, Larisa Vihrova
Optimal control of linear dynamic distributed systems under uncertainty 136

В.Й. Лобов, О.В. Митрофанов
Аналіз енергетичних характеристик турбомеханізмів 146

Olexsiy Lobok, Borys Goncharenko, Maryna Sych, Larysa Vihrova
Modeling of optimal automatic control of the process of biological clearing of polluted waters by fractional order regulators 152

С.І. Осадчий, Д.М. Лужков
Шляхи модернізації систем автоматики холодильного устаткування з одним терморегулювальним вентилем 160

П.Г. Плєшков, С.П. Плєшков, П.Г. Стець
Оцінка можливостей використання термоелектричних модулів для часткового заміщення електропостачання від мережі у сільській місцевості Кіровоградської області..... 168

А.А.Стенин, О.М.Польшакова, Д.А.Гуменный, С.А.Стенин
Оценка деятельности экипажей летательных аппаратов при их подготовке на тренажерных системах.....175

Б.М. Гончаренко, О.П. Лобок, М.А. Сич, Л.Г. Віхрова
Математичне моделювання процесу біологічного очищення забруднених вод
як об'єкта автоматичого керування 182

Р.В. Телюта, С.П. Плешков
Принципи побудови моделі дослідження втрат активної потужності
в асинхронному електродвигуні 188

Д.В. Шингалов, Є.В. Мелешко, Р.М. Минайленко, В.А. Резніченко
Методи автоматичного аналізу тональності контенту у соціальних мережах
для виявлення інформаційно-психологічних впливів 196

CONTENT

MACHINERY IN AGRICULTURAL PRODUCTION

Vitaliy Dyrda, Olexandr Chernii, Olexandr Zhydyk
Research of operational reliability of john deere tractors series 8320r in the conditions of Ukraine 3

Oleg Kepko, Andriy Voytik,Olexsandr Pushka, Ivan Lisoviy
Mathematical model of static dryer heat balance 10

Yuriy Kovalchuk, Olexandr Pushka, Andriy Voitik
Effect of absorbing coatings on the depth of laser processing of agricultural machinery parts from steel 45 16

Oleh Oryshaka, Vasily Gutsul, Anatoly Artiuhov
Theoretical investigation of the conical outflow regulator of free-flowing material 22

Andrij Pankov
The energy characteristics of the working process of seeding machines and systems 28

Muhajlo Student, Yaryna Sirak, Sergey Markovich
Tribological characteristics of plasma-electrolyte layers in pairs with steels 45 and U8 36

INDUSTRY MACHINE BUILDING

Viktor Bokov
Electric arc metal cutting with by-wire electrode-tool 44

Andriy Kyrychenko, Methaq Alibraheemi
Multi-axis machine tool with redundant parallel manipulator and custom end effector 57

Yuriy Kuleshkov, E. Magonets, Ksenia Kuleshkova, Mikhail Krasota, Timofey Rudenko
Analysis of theoretical studies of geometric parameters of the cut-off housing the of gear pump 64

Vasyl Klymenko, Natalia Kovalchuk, Volodymyr Kravchenko
Experimental evaluation of the efficiency of regeneration of cartridges of household filters for post-treatment of drinking water 76

Yuziy Kuleshkov, Mikhail Krasota, Timofey Rudenko, Alexander Matvienko
Application of micro-arc oxidation for a part hardening made of aluminium alloys and repaired by plastic deformation 83

Viktor Lomakin, Vasil Klimenko, Andriy Lomakin, Viktor Dubodelov, Maksim Goryuk
Investigation of the effect of temperature and speed of movement in the melt dissolution of alloying elements in the molten iron 90

Sergey Markovich, Sergey Myhajlyta
Analysis and prospects of development of technological methods of strengthening of heads of pistons of auto of tractor engines 96

Victor Nosulenko, Vitaliy Shmelyov
Features of an electric arc in a cross flow of fluid 103

Naser M. Elkhmri, Budar Mohamed R.F., Hamza Abobakr O., Igor Shepelenko
Comparison between Experimental and Simulation Results of Bending Extruded Aluminum Profile 111

Alla Lisikh
Spatial deformation of flexible constructions, connecting ship-transmitter and the added object 118

Oleh Sisa, Viktor Pukalov, Vitaliy Yuryev
Technology of manufacturing of cavities of high-strength screw-nuts for special purposes 124

AUTOMATION

Larysa Vihrova, Viktor Bisuk, Olexandr Didyk
Automatic control of the duration of induction welding 131

Oleksiy Lobok, Borys Goncharenko, Larysa Vihrova
Optimal control of linear dynamic distributed systems under uncertainty 136

Viacheslav Lobov, Alexandr Mitrofanov
Analysis of energy characteristics of turbo-mechanisms 146

Olexsiy Lobok, Borys Goncharenko, Maryna Sych, Larysa Vihrova
Modeling of optimal automatic control of the process of biological clearing of polluted waters by fractional order regulators 152

Sergey Osadchy, Dmytro Luzshkov
Paths of Modernization of Automation Systems of the Refrigeration Equipment with a Single Thermal Adjusting Valve 160

Petro Pleshkov, Sergiy Pleshkov, Petro Stets
Evaluation of the possibilities of using thermoelectric modules for partial replacement of electricity from the grid in the rural area of the Kirovograd region 168

Alexandr Stenin, Olga Polshakova, Dmitryy Gumenniy, Sergey Stenin
Evaluation of the activity of crews of aircraft during their training on simulator 175

Borys Goncharenko, Oleksiy Lobok, Maryna Sych, Larysa Vihrova
Mathematical modeling of the process of biological purification of polluted waters as an object of automatic control 182

Ruslan Teliuta, Serhei Plieshkov
The principles ofresearch model constructionfor active-power losses is in an asynchronous electric 188

Dmitry Shyngalov, Yelyzaveta Meleshko, Roman Mynaylenko, Vitaliy Reznichenko
Methods of automated sentiment analysis on social networks 196

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
КІРОВОГРАДСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

ТЕХНІКА В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОМУ ВИРОБНИЦТВІ, ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ

В и п у с к 30

Відповідальний за випуск І.В. Шепеленко

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 29.05.2017р. Формат 60х84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 26,25
Тираж 300 прим. Зам. № 0195