

Міністерство освіти і науки України  
Центральноукраїнський національний технічний університет  
Факультет будівництва та транспорту  
Кафедра автоматизації виробничих процесів

«Допущено до захисту»  
Зав. кафедри АВП  
к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_Дідик О.К.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

на тему  
**«Автоматизована система керування ударно-вібраційним пристроєм»**

**«Automated shock-vibration device control system»**

Виконав здобувач вищої освіти ІІ курсу  
групи АК-21М (1,4)  
151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

\_\_\_\_\_Сіденко Я.Д.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

Керівник роботи  
д.т.н., професор

\_\_\_\_\_Кондратець В.О.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

Рецензент

\_\_\_\_\_ 2022 р.

м. Кропивницький

# ЗМІСТ

Вступ.....

1 Призначення та область застосування системи керування ударно-вібраційним пристроєм.....

1.1 Технологія виготовлення залізобетонних виробів та пристрої для ущільнення сумішей.....

2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу.....

2.1 Дослідження параметрів ударних імпульсів.....

2.2 Встановлення залежностей між параметрами УВУ шляхом проведення факторного експерименту.....

2.2.1 Оснащення для проведення факторного експерименту.....

2.2.2 Планування та проведення факторного експерименту.....

3 Розробка автоматизованої системи керування ударно-вібраційним пристроєм.....

3.1 Вибір двигуна.....

3.2 Вибір тиристорного перетворювача для ЕП постійного струму.....

3.3 Розрахунок елементів силової частини та СІФК тиристорного перетворювача.....

3.3.1 Вибір тиристорів.....

3.3.2 Розрахунок енергетичних показників перетворювача.....

3.3.3 Розрахунок зони перервних струмів.....

|                                                                                  |  |
|----------------------------------------------------------------------------------|--|
| 3.3.4 Розрахунок теплового режиму силових тиристорів та вибір охолоджувачів..... |  |
| 3.4 Розробка функціональної та структурної схеми привода.....                    |  |
| 3.4.1 Розрахунок основних параметрів силовій частини ланцюга ЕП.....             |  |
| 3.4.2 Розрахунок основних параметрів силовій частини ланцюга ЕП.....             |  |
| 3.5 Розробка принципової схеми приводу.....                                      |  |
| 3.5.1 Вибір схеми регулятора швидкості.....                                      |  |
| 3.5.2 Вибір регулятора струму.....                                               |  |
| 3.5.3 Синтез елементів регуляторів струму та швидкості.....                      |  |
| 3.5.4 Розробка логічного пристрою.....                                           |  |
| 4 Дослідження алгоритмічної схеми керування.....                                 |  |
| Висновок.....                                                                    |  |
| Література.....                                                                  |  |
| Додаток А. Охорона праці.....                                                    |  |

## ВСТУП

Широке використання легкого бетону – ефективного і досить дешевого будівельного матеріалу сприяє прискореному розвитку житлового і сільськогосподарського будівництва.

Зростаюче виробництво легко бетонних виробів указує на недостатню ефективність обладнання, що використовується на даному етапі. Проте існуючі рішення фахівців цієї галузі вказують на можливість і необхідність пошуку ефективних шляхів рішення цих задач при виробництві вказаних виробів.

Рішення проблеми формування легко бетонних виробів має два підходи, один з яких припускає застосування пластифікуючих домішок у сполученні з виміряним вібраційним впливом, а другий припускає використання формовочних установок з ударним впливом на суміш. До основної переваги першого підходу слід віднести використання існуючих віброплощадок. Однак вагомим недоліком застосування пластифікуючих домішок є їх висока ціна і дефіцитність, підвищення вимог до складових елементів бетонної суміші і технологічного обладнання для їх виготовлення.

До переваг другого підходу слід віднести можливість використання жорстких бетонних сумішей, меншу чутливість до неминучого відхилення якості складових формованої суміші, точності дозування і перемішування. Все це стає можливим при використанні сучасної елементної бази, нових методів та способів функціонування обладнання, що вирішують вказану проблему.

### Актуальність теми.

Виробництво і використання легких бетонів має важливе значення для зниження собівартості будівництва.

Слабкою ланкою в сучасній технології виготовлення такого бетону є процес ущільнення легко бетонної суміші, обумовлений невеликою щільністю частинок заповнювача, а для деяких видів сумішей і пружністю. Ці властивості вказаного заповнювача приводять до нерівномірного ущільнення суміші за висотою виробу і розпресування.

Проведення досліджень, направлених на розробку простого і працездатного обладнання для формування якісних виробів із легко бетонних сумішей, а також створення необхідних для цього керуючих пристроїв, є актуальною задачею сучасного виробництва.

Метою роботи є створення автоматизованої системи керування ударно-вібраційним пристроєм, що забезпечує якісне і продуктивне формування легко бетонних виробів.

Об'єкт і предмет досліджень. Об'єктом досліджень є процес ущільнення легкобетонних сумішей.

Предмет досліджень – автоматизована система керування ударно-вібраційним пристроєм.

Методи дослідження. Теоретичні та експериментальні дослідження. Експериментальні дослідження проводились з використанням сучасної вимірювальної техніки та обладнання з обробкою отриманих результатів за допомогою сучасних засобів ЕОМ. Теоретичні дослідження проводились з використанням сучасних моделюючих та обчислювальних оболонок з використанням регресійного аналізу.

Наукова новизна. Експериментально встановлено вплив висоти скидання на прискорення форм в ударно-струшуючих установках. Одержано залежності для вибору потужності двигуна при різних значеннях ваги, висоти скидання та частоти ударів.

Практична цінність. Запропонована нова конструкція ударно-вібраційного пристрою. Отримано графічні залежності роботи розробленої системи при статичному та динамічному навантаженні.

# **1 Призначення та область застосування системи керування ударно-вібраційним пристроєм**

## **1.1 Технологія виготовлення залізобетонних виробів та пристрої для ущільнення бетонних сумішей**

При виготовленні залізобетонних виробів використовують ефективну потокову форму організації виробничого процесу. Вона базується на наступних принципах:

- пропорційність процесів, тобто, за певний проміжок часу на всіх ділянках процесу обробляється однакова кількість виробів;
- ритмічність процесів – через однакові проміжки часу всі частини процесу повторюються;
- паралельність процесів – одночасне виконання всіх частин процесу виготовлення виробів;
- безперервність – неперервне протікання всіх частин процесу виготовлення та стадій обробки виробів.

В залежності від розміщення у просторі технологічного обладнання, предметів праці та працівників можливі два варіанти організації виробництва: 1) технологічне обладнання та робітники не переміщуються, а форми з виробами переміщуються; 2) форми нерухомі, переміщуються обладнання та робітники.

До першого варіанта організації процесу належать агрегатне та конвеєрне виробництво, до другого — стендове та касетно-стендове.

### **Агрегатне виробництво**

Формують вироби на спеціально обладнаних установках, які складаються з формоукладача, бетоноукладача, віброплощадки.

При агрегатному способі виробництва форми з виробами можуть зупинятися не на всіх робочих постах, а тільки на тих, які потрібні для

виготовлення виробів даного типу. Час перебування форми на кожному посту залежить від обсягу робіт, що виконуються на відповідній стадії процесу.

На рис. 1.1 представлено схему організації агрегатної технологічної лінії. Технологічний процес складається з п'яти робочих постів: огляду виробу; складання форми, очищення та змазування її; армування; заповнення форми бетонною сумішшю та ущільнення її; теплової обробки виробів.

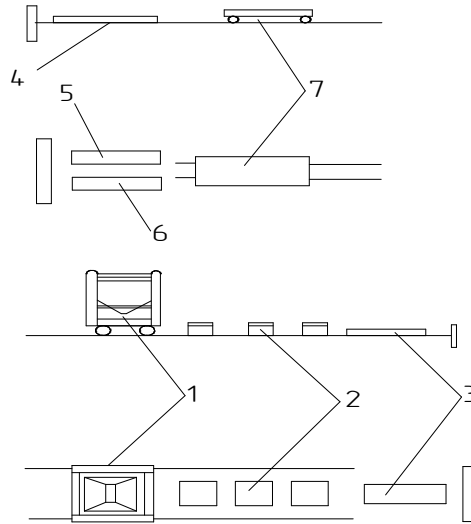


Рисунок 1.1 – Схема організації агрегатного виробництва:

1 – бетоноукладач; 2 – віброплощадка; 3 – пост армування; 4 – камера тепловологісної обробки; 5 – пост розпалублення; 6 – пост підготовки форм; 7 – візок самохідний

Операції даного технологічного процесу відбуваються паралельно на усіх постах лінії. Продуктивність такої агрегатної лінії визначається за середньою тривалістю циклу формування виробів, яка може коливатися в широких межах – від 10 до 50 хв.

Агрегатний спосіб найкраще відповідає умовам серійного виробництва, не потребує великих капітальних вкладень і дає можливість виготовляти вироби широкої номенклатури. Гнучкість агрегатного способу виробництва дає змогу заміною та переналагодженням обладнання здійснювати перехід від випуску виробів одного типу до випуску іншого.

На такій технологічній лінії виготовляють плоскі та ребристі плити перекриттів, колони, багатопорожнинні плити, напірні та ненапірні труби, опори ЛЕП та освітлення, колони кільцевого перерізу.

Недоліками агрегатної технології є необхідність переміщення технологічного оснащення від поста до поста за допомогою вантажопідйомних механізмів. Це вимагає посилення конструкцій форм, призводить до надмірного збільшення їхньої маси та є причиною утворення технологічних тріщин у незатверділому бетоні.

### Конвеєрне виробництво.

Це замкнене технологічне кільце, в якому форми переміщуються послідовно від одного технологічного поста до іншого із заданою швидкістю.

Умовою ефективного здійснення такого виробництва є однакові витрати часу на виконання робіт, після закінчення якого заготовки переміщують до іншого робочого поста. Такий період часу називають ритмом конвеєра.

За видом руху розрізняють конвеєри безперервної дії та крокової дії.

Принцип виготовлення виробів на конвеєрі безперервної дії застосовано на ВПС – вібропрокатних станах (рис. 1.2). Усі технологічні операції тут здійснюють на одному устаткуванні – пластинчастому конвеєрі, який безперервно рухається з постійною швидкістю.

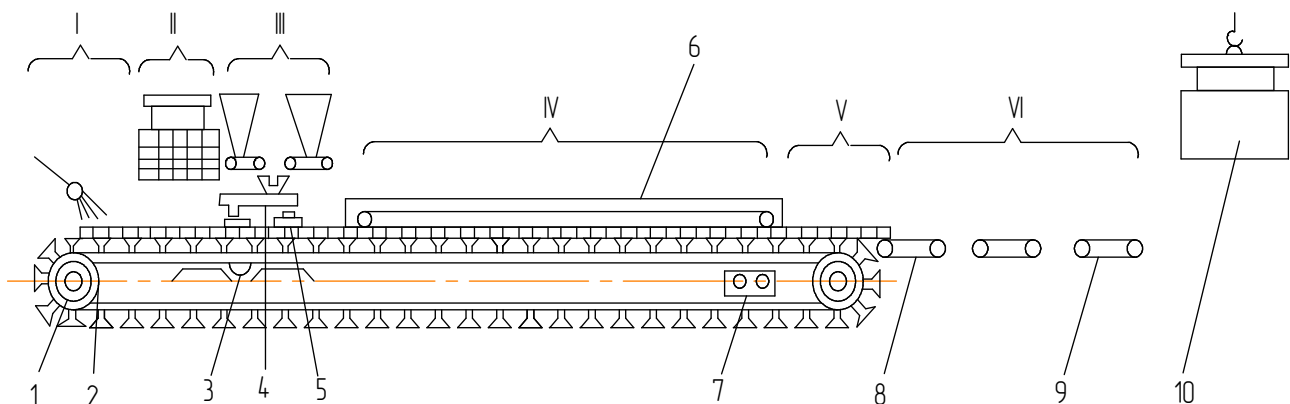


Рисунок 1.2 – Схема вібропрокатного стану:

1 – натягувальна станція; 2 – формувальна стрічка конвеєра; 3 – вібробрус;  
4 – бетонозмішувач; 5 – віброзагладжувальне устаткування; 6 – камера

теплової обробки; 7 – привод стана; 8 – обгінний рольганг; 9 – кантувач; 10 – знятий готовий виріб; зони: I – очищення й змазування формувальної стрічки; II – армування; III – формування; IV – теплової обробки; V – опоряджування виробів; VI – розпалублення.

В залежності від взаємного розміщення теплового агрегату та підготовчо-формувальної гілки розрізняють вертикально замкнений, горизонтально замкнений та похило замкнений конвеєри (рис. 1.3).

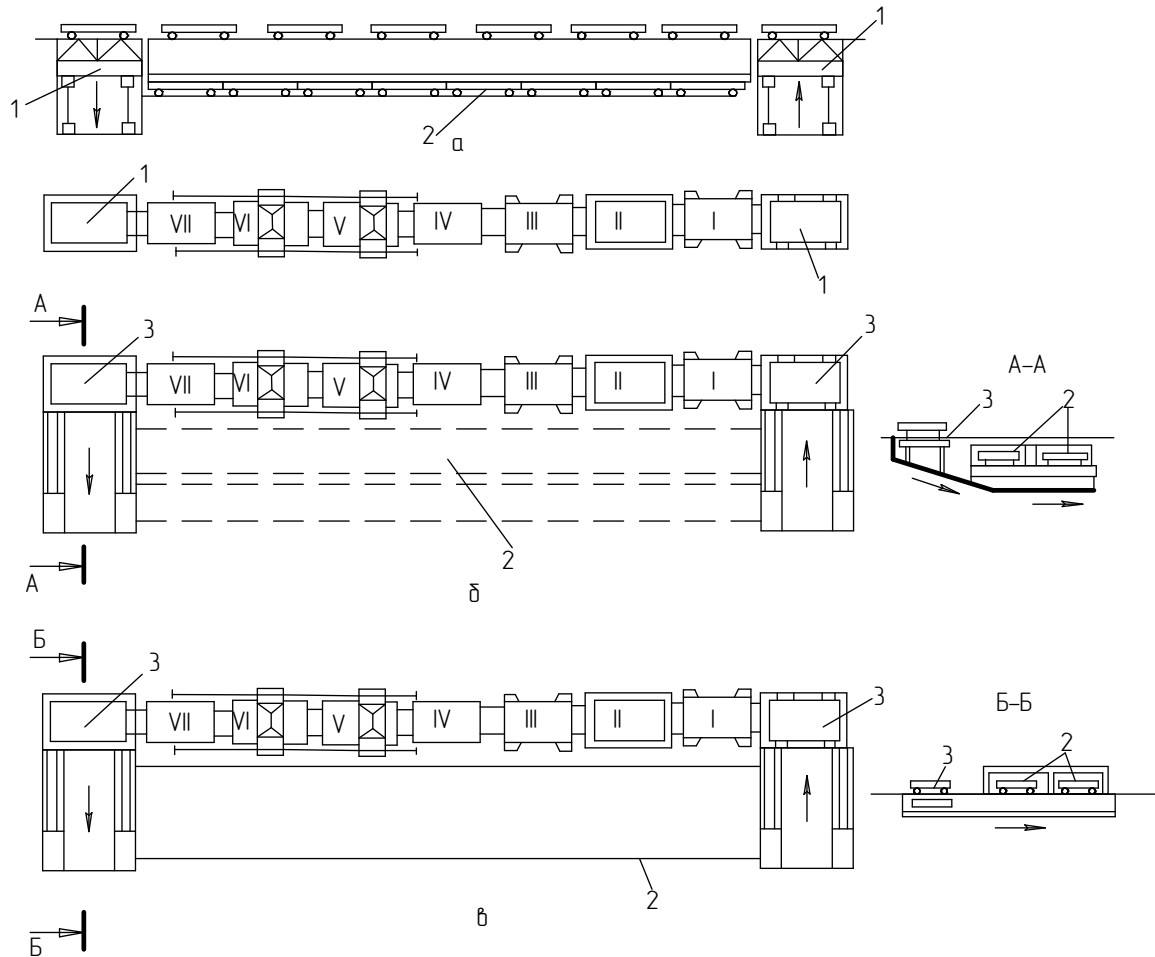


Рисунок 1.3 – Схеми конвеєрів крокової дії:

а – вертикально-замкнутого; б – похило-замкнутого; в – горизонтально-замкнутого; 1 – підіймач; 2 – щілинна камера теплової обробки; 3 – передавальний візок; пости: I – розпалублення виробів; II – кантування; III – очищення і змазування форми; IV – армування; V – формування; VI – укладання верхнього шару бетону та загладжування поверхні; VII – огляду виробів

Одним з різновидів конвеєрних ліній є круговий конвеєр. Він представляє собою поворотну круглу платформу з розміщеними на ній термоформами. Біля нього облаштовують технологічне обладнання для виконання відповідних робіт. Після виконання робіт на кожному посту кругового конвеєра платформа повертається на один крок.

На таких лініях виготовляється майже 40% усього обсягу виробництва збірного залізобетону для промислового та цивільного будівництва.

Конвеєрний метод дозволяє запровадити комплексну автоматизацію технологічних процесів, що дозволить підвищити продуктивність праці та збільшити випуск готової продукції.

Недоліком конвеєрних технологічних ліній є висока металомісткість.

### Стендове виробництво

В даному способі вироби виготовляють в нерухомих формах – стендах. Під час формування і до набуття бетоном потрібної міцності вироби залишаються нерухомими.

Така технологія рекомендується для виготовлення конструкцій, габаритні розміри і маса яких перевищують розміри і вантажність віброплощадок. Ефективним даний спосіб є при виготовленні великогабаритних попередньо-напружених виробів (рис. 1.4).

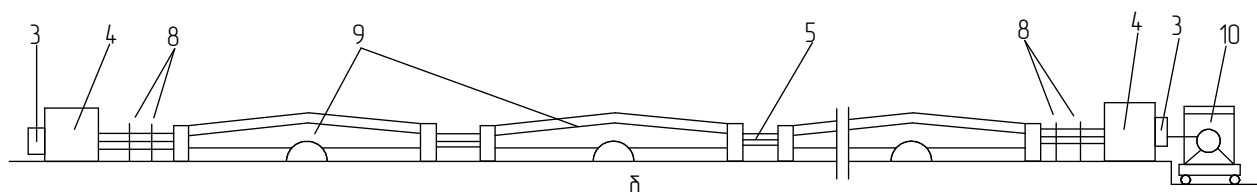


Рисунок 1.4 – Схеми стендів:

а – короткого; б – довгого; 1 – насосна станція; 2 – гідродомкрат; 3 – затискачі; 4 – упори; 5 — напружувана арматура; 6 — виріб; 7 — камера теплової обробки; 8 – діафрагми; 9 – термоформи; 10 – натягувальна станція

Тривалість такого технологічного циклу залежить від часу витримування виробів на стенді для набуття ними потрібної міцності і становить 1–2 доби.

Недолік – низьке використання виробничої площі.

## Касетний спосіб виробництва

Особливістю є те, що вироби формуються у вертикальному положенні в розсувних групових металевих формах – касетах, де вони перебувають до набуття бетоном заданої міцності.

Існують два способи організації касетного виробництва: касетно-стендовий і касетно-конвеєрний.

При касетно-стендовому способі виробництва (рис. 1.5) ланка робітників переходить від однієї нерухомої касетної форми до іншої, виконуючи всі технологічні операції.

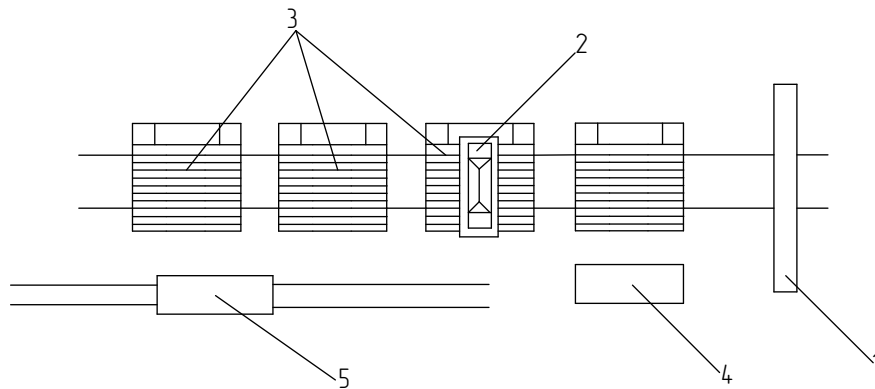


Рисунок 1.5 – Схема касетно-стендової лінії:

1 — тракт передачі бетонної суміші; 2— бетонороздавач; 3— касети з машиною для розпалублення; 4 — запас арматурних виробів; 5— візок для вивезення готових виробів

Касетним способом виготовляють внутрішні стінові панелі, плити перекриттів, сходові марші та інші вироби. Виготовлені у касетних формах вироби мають точні розміри і порівняно високу якість поверхонь.

Недолік – необхідність застосовувати рухливі бетонні суміші, що веде до надмірних витрат цементу, неоднорідності показників міцності по висоті виробів, а також несприятливі умови праці.

Для забезпечення якісних показників виробів даного напрямку особливе місце займають пристрої для ущільнення бетонних сумішей.

В КТБ Мосоргбудматеріали в результаті багато рокових досліджень і експериментального проектування низькочастотних резонансних ударно-вібраційних машин під керуванням доктора фіз.-матем. наук Крюкова Б.І. була створена серія формуючих машин типу ВПА та ВРА з шатунним приводом, який збуджується вертикально-напрямленими ударними коливаннями рухомої рами, на якій розміщені електромагніти для закріплення форм [1–3]. Ці пристрої використовують асиметричний віброударний режим коливань з частотою 8-11 Гц і амплітудами зміщення 6-8 мм. Вони показали непоганий технологічний ефект при формуванні деяких типів складених залізобетонних елементів. Маються рекомендації використання цих пристроїв для ущільнення ячеєчного бетону, які поки що не одержали реалізації.

Одержані результати підтвердили переваги низькочастотного вібровпливу з точки зору підвищення надійності обладнання та зниження рівня шуму. Подібні конструкції вібромашин мають резерви подальшого удосконалення. Їх також розробляють і пропонують для використання НДСП України (м. Київ) та Дніпропетровський національний університет.

До недоліків цих машин слід віднести підвищені габарити по висоті та велика теплоємність.

Роботами по вивченню можливостей ударної технології з точки зору можливостей створення ефективних ударних установок для якісного формування складених конструкцій із легко бетонних і пористих сумішей почали займатися під керівництвом К.А.Олехновича з середини шістдесятих років [4–8].

Аналіз роботи ударних столів типу “шок-стіл” на заводах складеного залізобетону показав стабільний динамічний режим при змінній масі виробів, що формуються, і відсутності розшарування суміші – найбільш цінні фактори для ущільнення легко бетонних і пористих сумішей. Такі недоліки ударних столів, як сильний шум та підвищена вібрація основи, були ліквідовані пружними прокладками певної жорсткості, які розміщені на нерухомій рамі установки.

В результаті такого технічного рішення після падіння рухомої рами на пружні прокладки прискорення її руху разом з формою відразу ж міняє

напрямок. При цьому сили інерції, як при деформації, так і при відновленні їх висоти, прижимають бетонну суміш до днища форми. Після кожного падіння рухома рама встигає зробити на пружних прокладках 2...3 затухаючі високочастотні коливання з невеликим зміщенням. Сполучення прискорення основного ударного імпульсу з додатковими динамічними впливами затухаючих коливань підвищує ефективність ущільнення.

В результаті “м’якого удару” рівень шуму від працюючої установки знижується до санітарних норм без додаткових захисних мір. Такі установки спочатку були названі віброструшуючими, але пізніша назва — “ударно-струшуючі”, більш точно відображає динамічний режим їх роботи.

Ударно-струшуючі установки перших модифікацій вантажопідйомністю 4 т показали можливість якісного ущільнення різних легко бетонних сумішей на заповнювачах з розвиненою жорсткою поверхнею. Подальші конструктивні рішення були направлені на удосконалення кулачкового механізму, підвищення вантажопідйомності і удосконалення окремих вузлів установок.

Останні модифікації цих установок — УСУ-8 вантажопідйомністю 8т з габаритами рухомої рами 2-6м та з рухомістю 3-4см (рис. 1.6) були встановлені в 1976 р. на двох технологічних лініях Гадячського заводу експериментального домобудування. Багаторокова експлуатація цих установок показала їх високу надійність, стабільність режиму ущільнення. Зважаючи на простоту пристрою, його надійність, невисоку ціну формуючого оснащення, а також сприятливі санітарно-технічні умови виробництва, завод є високорентабельним підприємством. Деталі житлових будинків садибного типу, які виготовляються на Гадячському експериментальному заводі домобудування мають дуже хорошу репутацію в нашій країні.

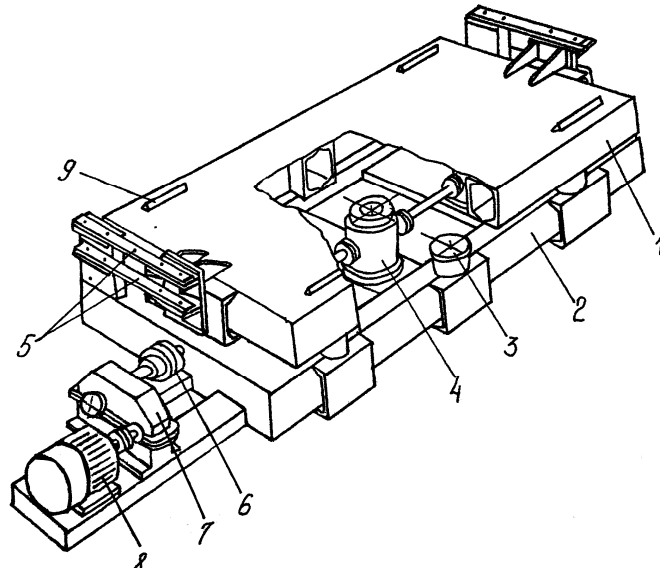


Рисунок 1.6 – Загальний вигляд ударно-струшуючої установки УСУ-8:

1– рухома рама, 2– опорна рама, 3– пружна прокладка, 4– кулачковий механізм КМ-3, 5– ресори підвіски, 6– муфта пружна, 7– редуктор, 8– приводний електродвигун, 9– упор для форми

При спостереганні і аналізі роботи установки УСУ-8 виявились деякі конструкторські недоліки, які відносяться до конструкції кулачкового механізму і розміщення ресорної підвіски.

Кулачковий механізм КМ-3 (рис. 1.7), який складається із зварного корпусу, прикріпленого до рами, в якому розміщені корпуси для підйому кулачкового вала з приводними півмуфтами на кінцях штовхача, всередині корпусу посаджені два підшипники, які контактують з кулачками, піддержуючої циліндричної пружини і пружної прокладки на кришці штовхача. Пустотілий штовхач має дві вертикальні напрямляючі прорізки, наявність яких викликає підвищене тертя між корпусом, кулачковим механізмом і штовхачем, а тому має місце тенденція до заклинювання, що знижує к.к.д. привода.

Недоліком ресорної підвіски установки УСУ-8 являється те, що ресори 5 (рис.1.6) кріпляться до стояка нерухомої рами 2, який, як показала експлуатація, не забезпечує потрібної жорсткості і збільшує металоємність установки. Ресорна підвіска розміщена вище робочої площини верхньої рами. Ця обставина ускладнює використання даних установок в агрегатно-поточних і

конвеєрних лініях. Крім того, відстань між ресорами по вертикалі була невелика, що збільшувало реакцію подовжнього стискання на одну ресору.

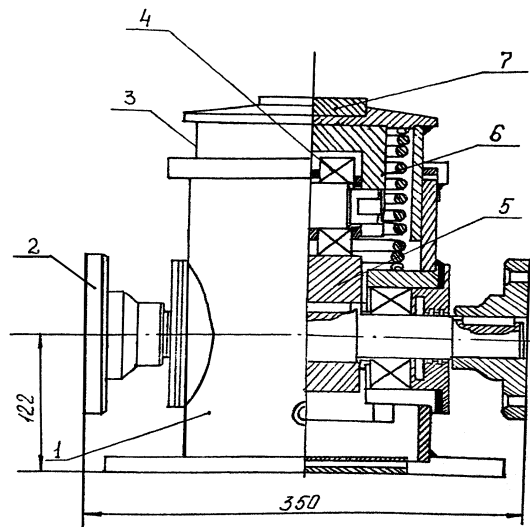


Рисунок 1.7 – Загальний вигляд кулачкового механізму КМ-3:

1– корпус, 2– приводні півмуфти, 3– штовхач, 4– підшипники штовхача, 5– кулачок, 6– піддержуюча пружина, 7– пружна прокладка штовхача

В результаті узагальнення досвіду експлуатації установок УСУ-8 було запропоновано конструктивні рішення, які направлені на ліквідацію цих недоліків. Штовхач коливаючого кулачкового механізму доцільно закріпити на кронштейні з шарнірно з'єднаними з ним проушинами на основі. Цим самим ліквідується тертя між корпусом кулачкового механізму і штовхачем.

Горизонтальні вітки ресорного чотириланника було вирішено роздвинути по вертикалі для зменшення реакції на одну ресору і опустити так, щоб горизонтальна площина, яка проходить через зону контакту кулачка з штовхачем, була розміщена між ними. Таке технічне рішення дає можливість, окрім зменшення реакції на одну опору, закріпити ресорний чотириланник до бічної стінки фундаменту і тим самим підвищити жорсткість кріплення і отже точність плоско паралельного переміщення рухомої рами.

Висвітлені в даному розділі питання дають основу для продовження подальших досліджень указанного напрямку. Так недостатньо вивчено ударний

вплив поодиноких ударних імпульсів, що може бути характерно для вібропристроїв, побудованих на основі штовхача з кулачковим механізмом.

Вирішення цих питань може бути здійснено на основі уточнених експериментальних і аналітичних досліджень. В зв'язку з цим необхідно провести дослідження у вказаних напрямках:

1. Дослідження динамічних параметрів ударно-вібраційної установки.
2. Розробка системи автоматичного керування режимами ущільнення на базі електропривода постійного струму.
3. Дослідження алгоритмічної структурної схеми керування електроприводом.
4. Проведення заходів з охорони праці.
5. Проведення економічної оцінки розробленої системи.

## **2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу**

### **2.1 Дослідження параметрів ударних імпульсів**

З підвищенням технологічної ефективності низькочастотних ударних впливів при ущільненні будівельних сумішей в різні часи було опубліковано багато тверджень. Однак такі ударні установки на практиці так і не одержали розповсюдження. Це відноситься перш за все до ударних столів (“шок столів”), які використовуються на деяких заводах складеного залізобетону. Причина полягає не в тому, що ефективність ударного ущільнення сумішей не виявилась досить високою в порівнянні з традиційними віброплощадками, як це припускалось, а тому, що ударні столи викликали неприйнятні умови праці по рівню шуму та вібрації на робочих місцях формовщиків-бетонщиків, хоч використовували масивні багатотонні фундаменти.

Технічним вирішенням цього протиріччя була пропозиція К.А.Олехновича [9] – розміщення пружних прокладок між металевими співударяємими поверхнями рухомої рами і основи. Припускалося, що в цьому випадку можна забезпечити не менші значення прискорень ударного руху при значному зменшенні динамічного впливу на основу та одержати прийнятний робочий режим по рівню шуму.

Експериментально-промислові зразки ударно-струшуючих установок типу УСУ-8 підтвердили свою технологічну ефективність в умовах виробництва складених легко бетонних виробів. В той же час динамічні параметри ударних установок, які використовують пружні прокладки в лабораторних умовах вивчені не були і не реєструвалися за допомогою записуючої апаратури, що викликало у деяких інженерно-технічних і наукових працівників апіорні думки про неможливість одержання при ударі по пружним прокладкам

достатньо великих прискорень руху, які дозволяють ущільнювати легко бетонні суміші.

Такі лабораторні дослідження необхідно було виконувати з метою одержання початкових даних для створення лабораторних, а далі дослідно-промислових установок для ущільнення легко бетонних сумішей.

З цією метою було змонтовано пристрій, схема якого подана на рис. 2.1.

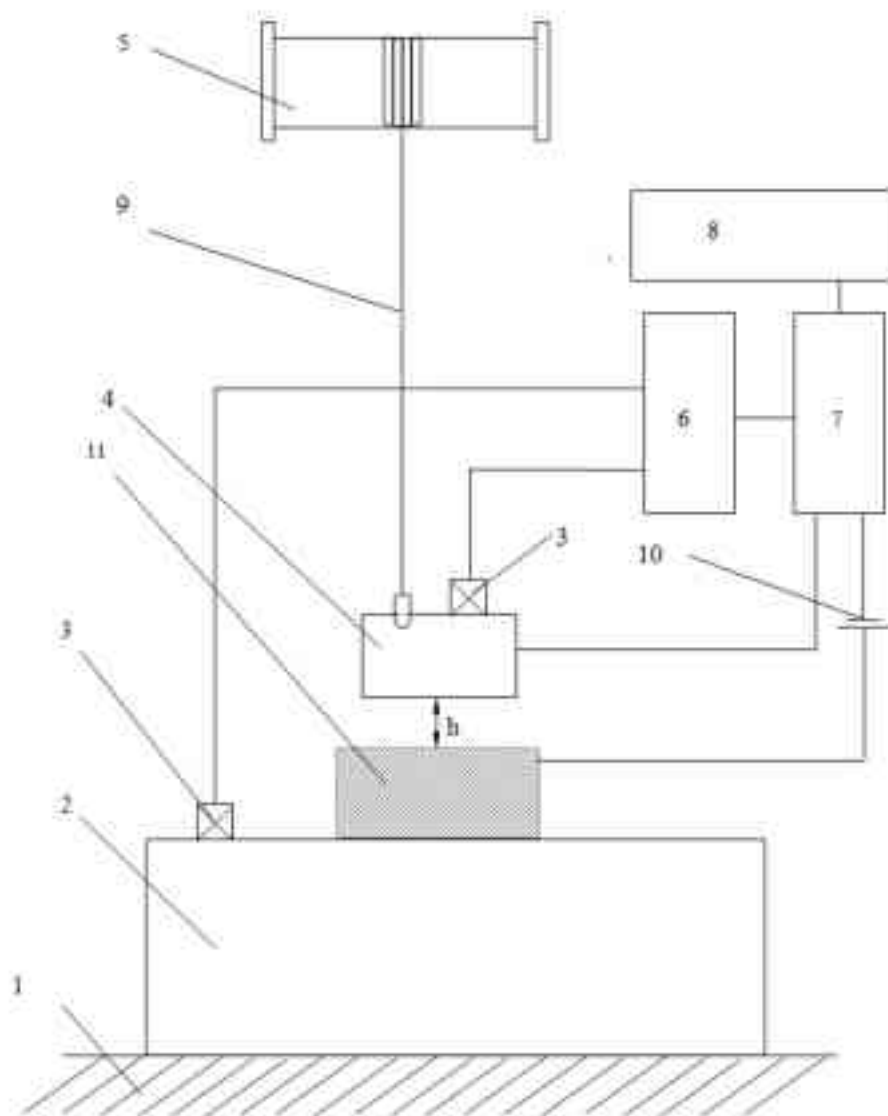


Рисунок 2.1 – Схема установки порівняльних досліджень одиночних ударних імпульсів

На замонолічену на масивному фундаменті 1 металеву плиту 2 встановлено датчик прискорень 3. Другий такий датчик 3 закріплений на металевій масі (складання) 4, яка підвішена на суровій нитці 9 до лебідки 5. Датчик 3 підключений до вібростандарту 6, який в свою чергу

з'єднана з вимірювачами границі 7, а від вимірювача границі 7 до осцилографічної установки 8. До фундаментної плити 2 через джерело струму 10 (1.5 В) під'єднано електропровід, другий кінець якого під'єднано до вимірювача границі 7. Від вимірювача границі 7 відходить другий провід, який з'єднаний з масою 4. Таким чином одержано просту надійну електросхему, яка дозволяє записувати наявність або відсутність контакту між падаючою масою 4 і фундаментною плитою 2. При падінні маси 4 на пружну прокладку провід пуд'єднується до її поверхні. В якості пружних прокладок використовувались широко розповсюджені матеріали: листова технічна гума і транспортерна стрічка товщиною від 8 до 15 мм.

Експерименти проводились наступним чином. Масу 4 за допомогою калібрів встановлюють на задану висоту і лебідкою вибирають підвісну нитку 9 до початку її підйому. Це положення фіксували храповиком лебідки 5. Потім калібри убирали і при включеній апаратурі для реєстрації 8 перепалювали нитку 9. Швидкість запису складає 500 мм/с, що дозволило записати повний період одиночного ударного імпульсу. Дослідження проводили при висотах скидання 2, 4, 6, 8, 10, 14 мм. В результаті були одержані осцилограми одиночних ударних імпульсів при ударі металу по металу (рис. 2.2) і при ударі металу об пружну прокладку (рис. 2.3). Канал осцилографа № 1 записував показання датчика прискорень 3, який установлений на фундаментній плиті 2, канал № 2 записував показання датчика 3, який встановлений на рухомій масі 4, канал № 3 записував наявність і час контакту між фундаментною плитою 2 і рухомою масою 4. Досліди багато раз повторювались. Як показав аналіз осцилограм (рис. 2.4), прискорення одиночних ударних імпульсів маси 4 при ударі метал об метал зростають з зростанням висоти скидання в границях від 5 g до 19 g. Зростає також і величина реакції фундаментної плити 2, що видно по величині прискорень, які записуються датчиком, що встановлений на плиті 2. Прискорення при цьому змінюється від 1 g, при висоті скидання 2 мм, до 18 g. при висоті скидання 14мм.

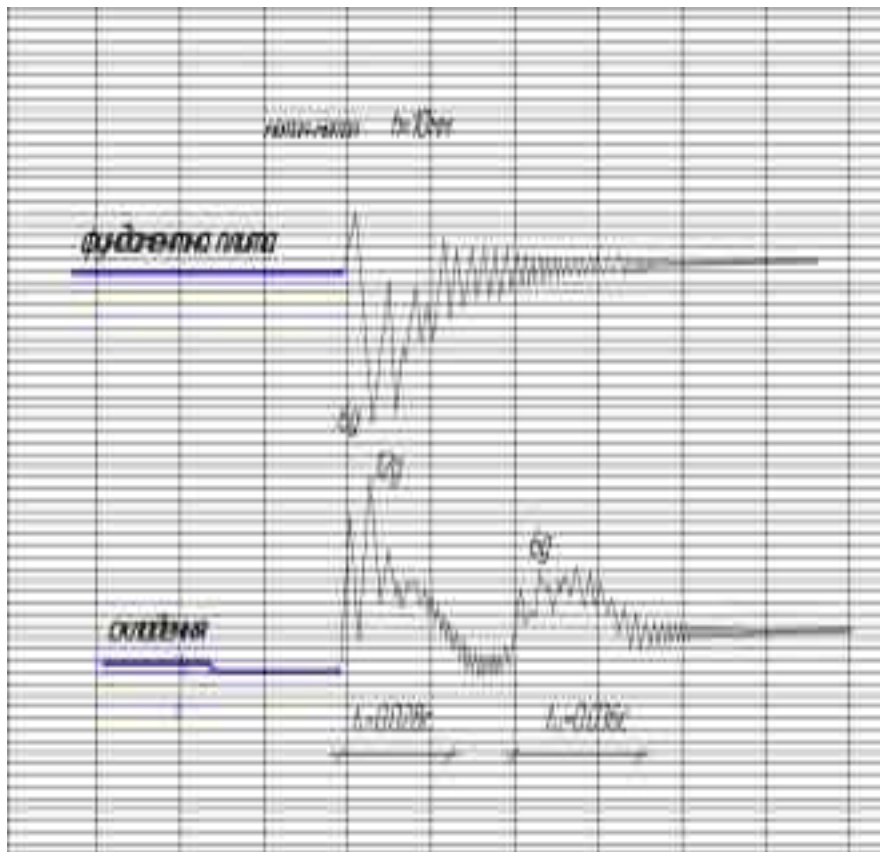


Рисунок 2.2 – Характерна осцилограмма одиночных ударных импульсов при ударе металл об металл

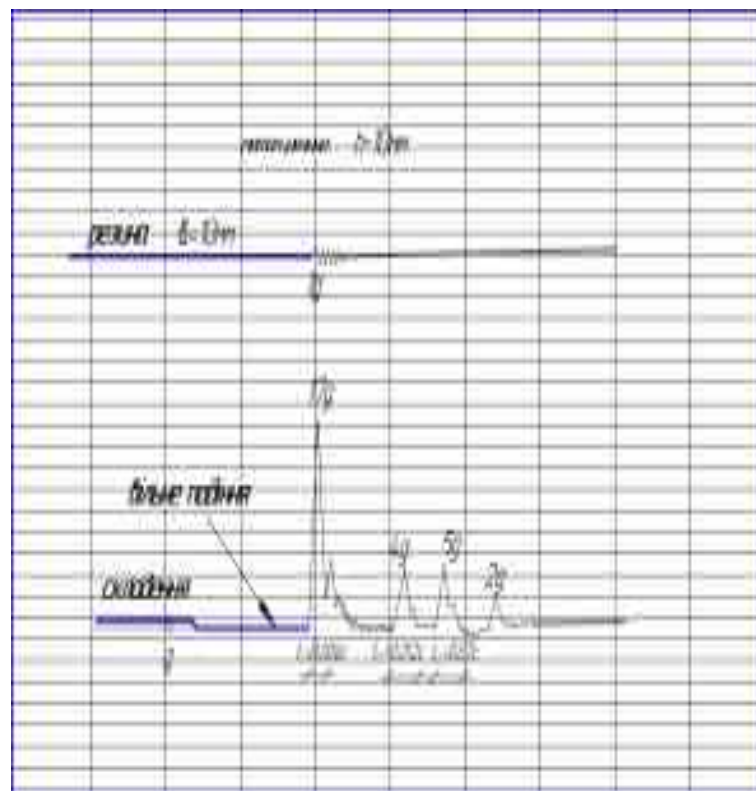


Рисунок 2.3 – Характерна осцилограмма одиночного ударного импульсу при ударе металла об пружну прокладку

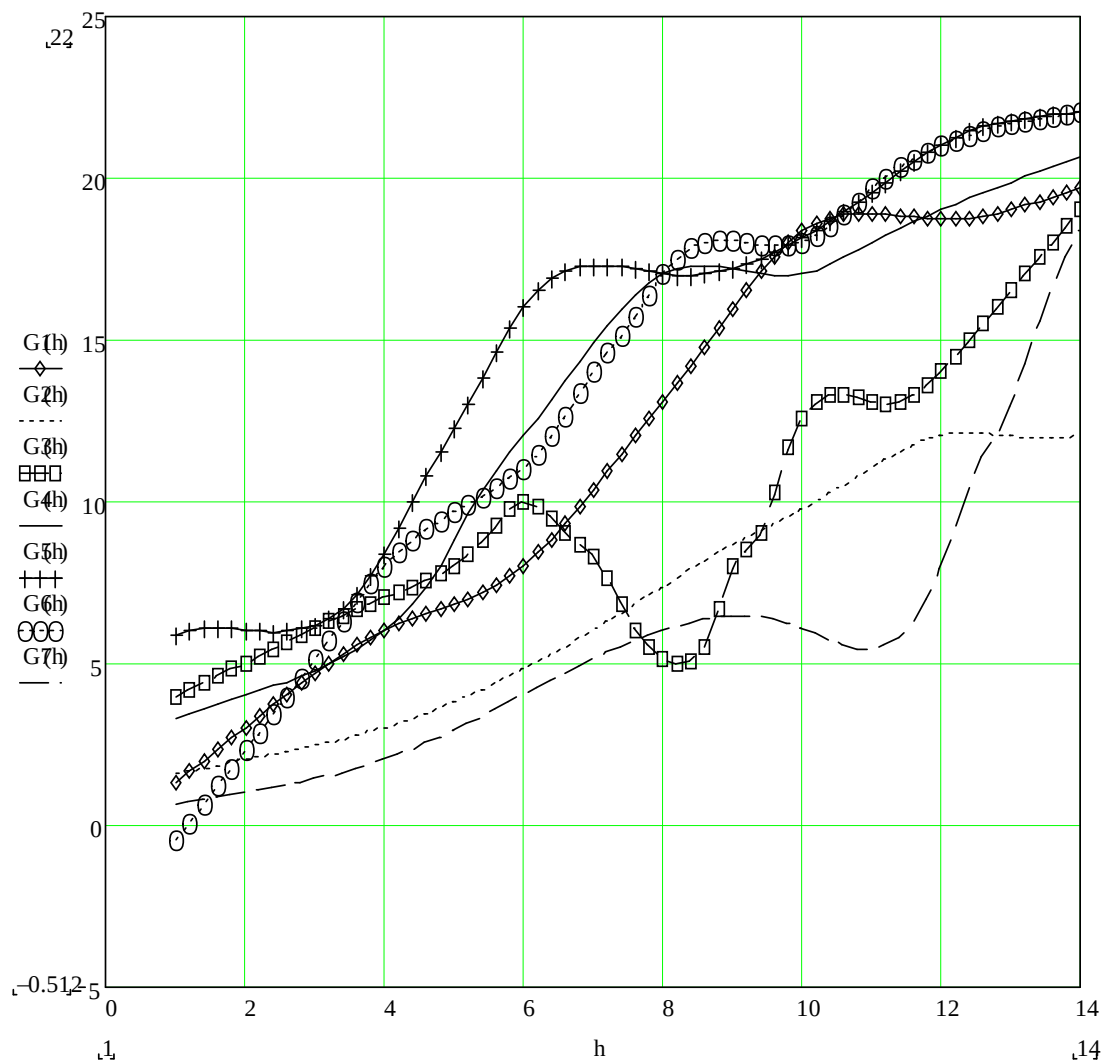


Рисунок 2.4 – Прискорення маси і фундаментної плити при одиничному ударному імпульсі

Це говорить про те, що значна частина кінетичної енергії при ударі маси 4 передається фундаментній плиті і далі на ґрунт.

При висотах падіння 12 - 14 мм і вище після заспокоєння власних коливань маси і фундаментної плити на осцилограмі видно повторний імпульс прискорень, що характеризує реакцію ґрунту на жорсткий удар.

Такий розподіл прискорень між рухомою масою і фундаментом наглядно підтверджує необхідність потужних фундаментів для установок типу "шок-столу", так як зареєстровано наявність значних прискорень фундаментної плити навіть при висотах падіння 2-4 мм. Крім цього динамічний імпульс при ударі металу об метал розсунений за часом і має пилкоподібну форму.

Тривалістю контакту і формою імпульсу можна пояснити передачу значної частини кінетичної енергії при ударі металу об метал на фундамент.

Одиночний ударний імпульс при ударі об пружну прокладку із транспортної стрічки чи гуми різної жорсткості значно відрізняється від жорсткого ударного імпульсу. Діапазон прискорень більш широкий від 2 g до 22 g. Характерною особливістю удару об пружні прокладки являється відсутність помітних прискорень на фундаментній плиті при висотах падіння рухомої маси до 10 мм. Незначна реакція фундаментної плити порядку 1-2 замічена при висотах 12-14 мм. Це пояснює більш високий ріст прискорень рухомої маси при зростанні висоти її скидання в порівнянні з ударом металу об метал. Якщо при висоті скидання рівній 4 мм, яка характерна для установок типу "шок-стіл", прискорення практично не відрізняється від прискорень, які одержують при ударі об пружну прокладку, то при зростанні висоти скидання прискорення рухомої маси при ударі об пружну прокладку вище, чим при ударі по металу. Окрім відсутності передачі динамічних імпульсів на фундамент, підвищена величина пікових прискорень рухомої маси пояснюється значно меншим часом її контакту з пружною прокладкою (0.01 - 0.014 с), ніж при ударі металу об метал (0.01 - 0.068 с). Окрім цього для одиночних ударних імпульсів об пружні прокладки являється характерним наявність повторних двох-трьох затухаючих імпульсів з різним періодом від 0.08 до 0.15 с в залежності від висоти скидання і типу пружної прокладки.

Істотні підвищення прискорень рухомої маси і її наступних затухаючих коливань, а також відсутність помітних реакцій фундаментної плити при висотах скидання до 10 мм дозволяє зробити висновок про доцільність використання ударно-струшуючих коливань на пружних прокладках в порівнянні з ударом металу об метал, які реалізуються в установках типу "шок-стіл".

Результати вище вказаних попередніх досліджень розкрили принципові можливості ударних коливань на пружних прокладках по досягненню значних

пікових прискорень і дозволили виявити початкові параметри для створення більш ефективної установки.

## **2.2 Встановлення залежностей між параметрами УВУ шляхом проведення факторного експерименту**

### **2.2.1 Оснащення для проведення факторного експерименту**

Для виявлення залежностей між потужністю двигуна, частотою ударів, висотою вільного падіння форми і величиною навантаження на ударну площадку було проведено факторний експеримент.

В основу досліджень покладено використання ударно-вібраційної установки УВУ-12А1 [10] (рис. 2.5. ) вантажопідйомністю 12т, новітні рішення якої подано в а.с. №1192996 [11].

У вказаній УВУ кулачковий привод на основі КМ-6, розташований по повздовжній осі рухомої рами, що включає окремі уніфіковані кулачкові механізми, кулачки яких розташовані в масляній ванні з централізованою заливкою масла. Таке технічне рішення суттєво спрощує виготовлення, монтаж, експлуатацію і технічне обслуговування установки. А використання пружних прокладок із трансформаторної стрічки, або гуми, дозволяє значно зменшити масу фундаменту.

Установка УВУ-12А1 складається із нижньої рами 1, верхньої рами 2, яка кріпиться безпосередньо чотирьохланковою ресорною підвіскою 3 до бокової стінки фундаменту установки і опирається на опори 4 нижньої рами 1.

Нижня рама 1 представляє собою зварну конструкцію із швелерів, на якій змонтований привод 11 і два кулачкові механізми 10, з'єднані між собою валом. Верхня рама 2 зварена із швелерів і накрита сталним листом, обвареним по периметру. Вздовж поздовжньої вісі рами з обох кінців до неї приварені опорні плити 5, до яких в свою чергу приварені підресорники 6 коробчатого перерізу. На підресорниках 6 в верхній і нижній їх частині

закріплені кінці ресор 3, вільні кінці яких прикріплюються до кронштейна 7, який кріпиться за допомогою болтів 8 і закладної деталі 9 до бокової стінки фундаменту. Закладна деталь виконана в вигляді замоноліченого відрізка швелера.

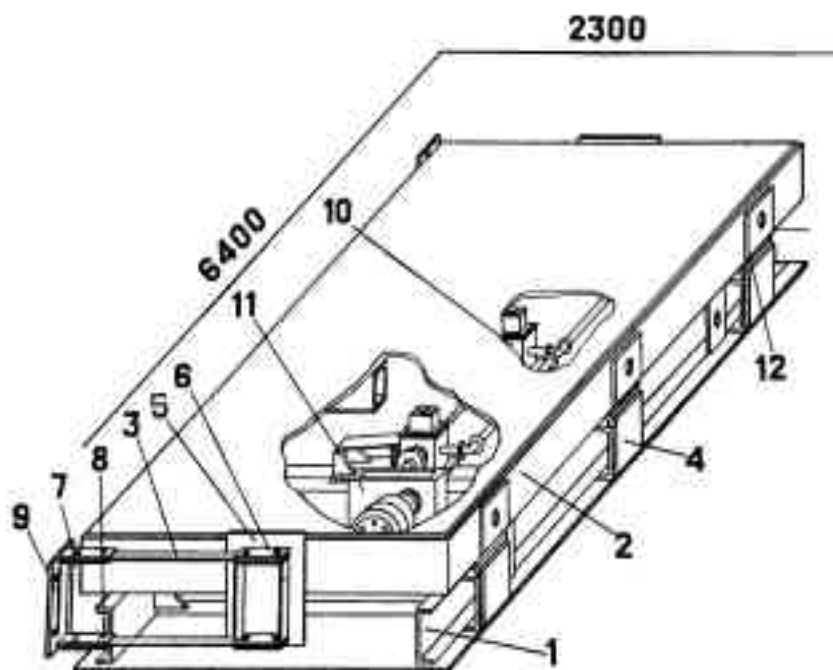


Рисунок 2.5 - Загальний вигляд ударно-струшуючої установки УВУ-12А1

Така конструкція кріплення ресорної підвіски до бокової стінки фундаменту дозволяє легко від'єднати верхню раму 2 від фундаменту, щоб відкрити доступ до кулачкового механізму 10 і їх приводу 11 для проведення планового технічного огляду і ремонту.

Регулювання висоти скидання верхньої рами проводиться шляхом підбору металевих прокладок 12, опор 4 нижньої рами 1, які входять в комплект поставки, а також за рахунок послаблення або натягування зведеної пружини 13 кулачкового вала 10.

Змінюючи тип пружної прокладки (із транспортної стрічки або гуми) її товщину і площу, можна добитись найбільш прийнятної величини пікового значення прискорення і необхідного характеру затухання коливань верхньої рами з установленою на ній формою для заданого складу суміші.

## **Технічні характеристики установки УВУ-12А1:**

1. Максимальна вантажопідйомність — 12 т.
2. Потужність електродвигуна — 11 кВт.
3. Число підйомів рами — 240 1/хв.
4. Висота підйому рами — 5-10 мм.
5. Спосіб кріплення рами — не кріпиться.
6. Маса установки — 4.9 т.
7. Об'єм фундаменту — 8 м<sup>3</sup>.

При проведенні досліджень регулювання висоти виконувалось за допомогою підкладання металевих пластин по 0.5 мм товщиною. Регулювання частоти проводилось шляхом зміни напруги лінійним автотрансформатором 8 в невеликих межах і контролювалось за допомогою вібровимірjuвальної апаратури 2 та осцилографа 3. Потужність розраховувалась на основі показів вольтметрів 7, що під'єднувались до виходу автотрансформатора, та датчика струму 9. Об'єднана структурна схема досліджень приведена на рис 2. 6. Більш точний підбір частоти виконується за рахунок резисторів 17.

Зміна маси плити проводилась за допомогою каліброваних вагів, що добавлялись або відбирались від загальної маси.

### **2.2.2 Планування та проведення факторного експерименту**

Для оптимізації об'єкта управління використовувалась математична модель ударно-вібраційної установки, яка визначалась безпосередньо проведенням експериментів з метою вияснення потужності, що витрачається на формування. Модель будувалась в вигляді полінома другого порядку з достатньою точністю, яка описує поведження об'єкта з параметрами трьох факторів:

$$\hat{y} = b_o + \sum_{i=1}^n b_i Z_i + \sum_{i,l=1}^n b_{il} Z_i Z_l + \sum_{i=1}^n b_{ii} Z_i^2, \quad (2.1)$$

де  $n$  – загальне число основних факторів.

Для одержання квадратичної моделі використовували результати експерименту, який проводився по плану другого порядку [12]. При цьому виконувались наступні умови:

- 1) похибки спостережень розподілені по нормальному закону з нульовим середнім і кінцевою дисперсією;
- 2) вхідні змінні вимірювались без похибки;
- 3) спостереження були незалежними і для обробки даних використовувався метод регресійного аналізу, причому обчислювальна процедура оцінювання невідомих коефіцієнтів рівняння регресії базується на методі найменших квадратів. При цьому в плані другого порядку фактори варіювались на 5-ти рівнях.

При побудові плану другого порядку враховувалась ідея шагового експерименту, в зв'язку з чим використовувалось центральне композиційне планування, що складається з трьох блоків, які включають:

- 1) точки повного або дробового факторного експерименту  $N_{cp} = 2n$ ;
- 2) "зіркові" точки (плани типу "хреста")  $N_{\alpha} = 2n$ ;
- 3) нульові (центральні) точки  $N_o$ . Загальне число точок  $N$  ЦКП визначено формулою [12]:

$$N = N_{cp} + N_{\alpha} + N_o. \quad (2.2)$$

Композиційність планів дозволила зекономити деяке число експериментів. В табл. 2.1, яка представлена в форматі Mathcad Professional 2000 [13], приведені точки плану другого порядку для трьох факторів, які варіювались на п'ятих рівнях, нормовані значення яких –  $\alpha$ ;  $-1$ ;  $0$ ;  $+1$ ;  $+\alpha$ .

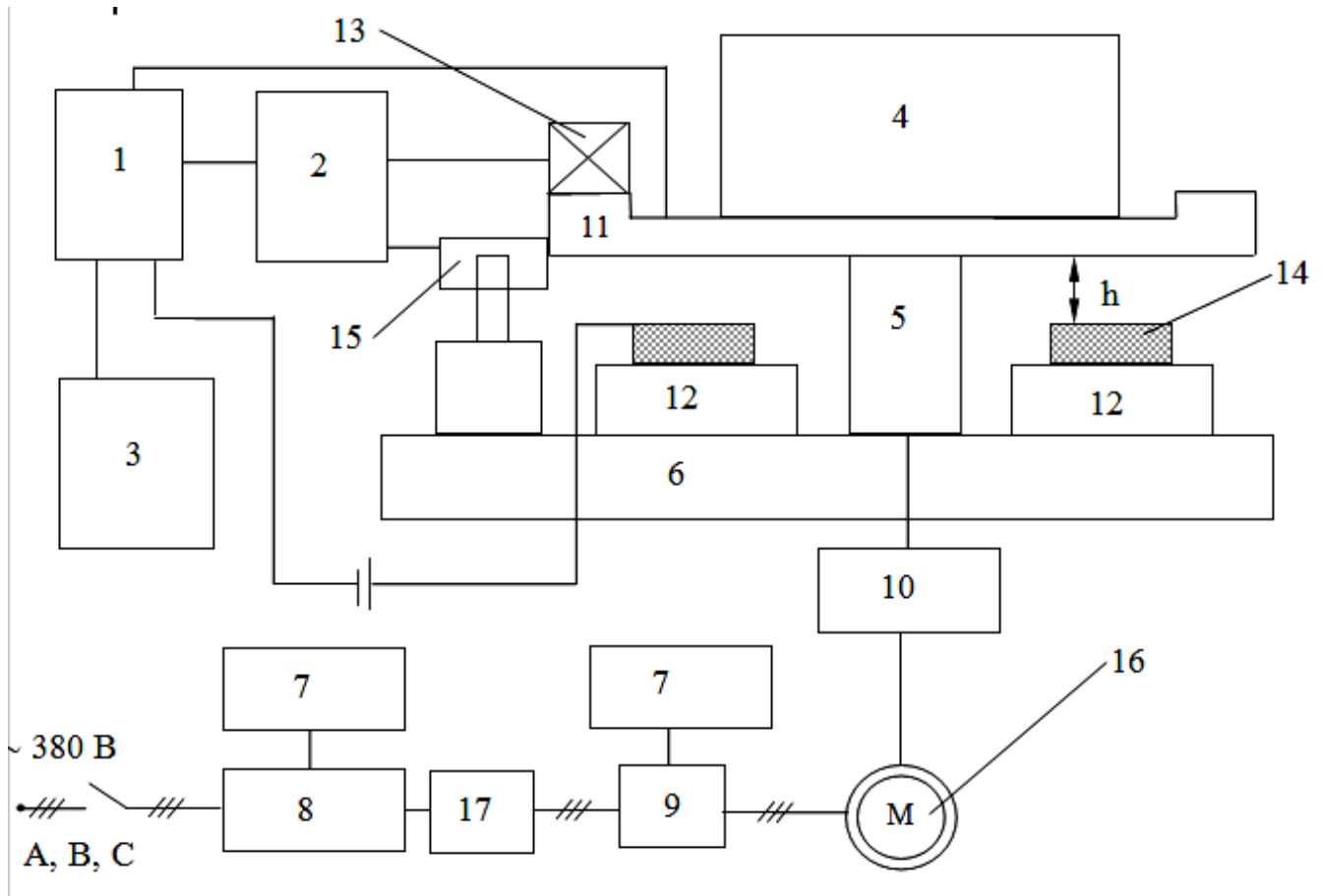


Рисунок 2.6 – Об’єднана структурна схема досліджень УСУ-12 для проведення факторного експеримента:

1– вибирач межі; 2– вібровимірювальна апаратура ВІ-5МА; 3– осцилограф світлопроменевий Н117/І; 4– форма зразка; 5– кулачковий механізм; 6– опорна рама; 7– вольтметр В7-40; 8 автотрансформатор АТС3-20; 9– датчик струму; 10– редуктор; 11– рухома рама; 12– рухома рама; 13– вібродатчик; 14– пружні прокладки; 15– датчик переміщення; 16– двигун; 17-ящик резисторів НФ1А

Основними факторами експерименту, що проводиться, являються:

$X_1$  – вага навантаження;

$X_2$  – висота вільного падіння ударно-вібраційної плити;

$X_3$  – частота ударів.

Точки плану другого порядку для трьох факторів

|    | 0 | 1        | 2        | 3        | 4     | 5     | 6     | 7  | 8  | 9  |
|----|---|----------|----------|----------|-------|-------|-------|----|----|----|
| 0  | 0 | 0        | 0        | 0        | 0     | 0     | 0     | 0  | 0  | 0  |
| 1  | 1 | -1       | -1       | -1       | 0.27  | 0.27  | 0.27  | 1  | 1  | 1  |
| 2  | 1 | 1        | -1       | -1       | 0.27  | 0.27  | 0.27  | -1 | -1 | 1  |
| 3  | 1 | -1       | 1        | -1       | 0.27  | 0.27  | 0.27  | -1 | 1  | -1 |
| 4  | 1 | 1        | 1        | -1       | 0.27  | 0.27  | 0.27  | 1  | -1 | -1 |
| 5  | 1 | -1       | -1       | 1        | 0.27  | 0.27  | 0.27  | 1  | -1 | -1 |
| 6  | 1 | 1        | -1       | 1        | 0.27  | 0.27  | 0.27  | -1 | 1  | -1 |
| 7  | 1 | -1       | 1        | 1        | 0.27  | 0.27  | 0.27  | -1 | -1 | 1  |
| 8  | 1 | 1        | 1        | 1        | 0.27  | 0.27  | 0.27  | 1  | 1  | 1  |
| 9  | 1 | -1.21541 | 0        | 0        | 0.75  | -0.73 | -0.73 | 0  | 0  | 0  |
| 10 | 1 | 1.21541  | 0        | 0        | 0.74  | -0.73 | -0.73 | 0  | 0  | 0  |
| 11 | 1 | 0        | -1.21541 | 0        | -0.73 | 0.75  | -0.73 | 0  | 0  | 0  |
| 12 | 1 | 0        | 1.21541  | 0        | -0.73 | 0.74  | -0.73 | 0  | 0  | 0  |
| 13 | 1 | 0        | 0        | -1.21541 | -0.73 | -0.73 | 0.75  | 0  | 0  | 0  |
| 14 | 1 | 0        | 0        | 1.21541  | -0.73 | -0.73 | 0.74  | 0  | 0  | 0  |
| 15 | 1 | 0        | 0        | 0        | -0.73 | -0.73 | -0.73 | 0  | 0  | 0  |

Перетворення розмірних незалежних факторів  $X_i$  в безрозмірні проводились по формулі:

$$Z_i = (X_i - X_{io}) / \Delta X_i, \quad (2.3)$$

$$\Delta X_1 = 20 \text{ кГ};$$

$$\Delta X_2 = 0.5 \text{ мм};$$

$$\Delta X_3 = 10 \text{ Гц}.$$

Це дало змогу легко побудувати ортогональну матрицю планування (МП), а верхні та нижні рівні варіювання  $Z_{ib}$  і  $Z_{in}$  в відносних одиницях рівні відповідно  $+1$  та  $-1$  незалежно від фізичної природи факторів, значень основних рівнів і інтервалів варіювання факторів  $\Delta X_i$ .

Якщо врахувати, що в нашому випадку використовувалось ортогональне центральне композиційне планування, де критерієм оптимальності плану являється ортогональність стовбців матриці планування, то всі оцінки коефіцієнтів визначались незалежно один від другого.

Із-за випадкового характеру зміни вихідної величини  $y$  в кожній точці доводилось проробити  $m$  паралельних дослідів і результати спостережень осереднювались.

$$\bar{X}_q = (X_{1q}, X_{2q}, X_{3q}), \quad (2.4)$$

де  $q = 1, 2, \dots, N$ ,

Середні значення кожного із дослідів представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Середні значення досліджуваного параметра

| m  | $Y_m$   |
|----|---------|
| 0  | 0       |
| 1  | 7.45697 |
| 2  | 7.46541 |
| 3  | 8.02762 |
| 4  | 8.04217 |
| 5  | 7.75414 |
| 6  | 7.76459 |
| 7  | 8.33221 |
| 8  | 8.34221 |
| 9  | 7.88682 |
| 10 | 7.90347 |
| 11 | 7.55027 |
| 12 | 8.2505  |
| 13 | 7.71868 |
| 14 | 8.08012 |
| 15 | 7.89604 |

Перевірка відтворюваності експерименту проводилась за допомогою критерію Кохрена. Тому, якщо врахувати, що в МП число паралельних дослідів однакове і прийнята гіпотеза про однорідність пострічкових оцінок дисперсій, то оцінку генеральної дисперсії визначали за формулами:

$$S_g^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (Y_{gk} - \bar{Y}_g)^2, \quad (2.5)$$

$$S_{\text{вс}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{g=1}^N S_g^2. \quad (2.6)$$

Значення емпіричного коефіцієнта  $G$  оцінювалось по критерію Кохрена за формулою:

$$G = \frac{\max_g S_g^2}{\sum_{g=1}^N S_g^2}, \quad (2.7)$$

який дорівнював **0.176**, що менше критичного  $G_{кр} = 0.79$  для  $\nu_{1\text{вс}} = 2$  та  $\nu_{2\text{вс}} = 8$  при рівні значимості **0.5%**.

Математичну модель було одержано на базі оцінки коефіцієнтів рівняння регресії:

$$b_i = \frac{1}{\sum_{g=1}^N Z_{ig}^2} \sum_{g=1}^N Z_{ig} \cdot \bar{Y}_g, \quad (2.8)$$

а дисперсія оцінок  $b_i$  коефіцієнтів по формулі:

$$S\{b_i\} = \frac{1}{m \sum_{g=1}^N Z_{ig}^2} \cdot S_{\text{вс}}^2. \quad (2.9)$$

Так як знаменник в двох останніх формулах в загальному випадку різний для різних груп оцінок ( $b_o$ ,  $b_i$ ,  $b_{ii}$ ,  $b_{il}$ ) коефіцієнтів, то оцінки дисперсії однакові тільки всередині даної групи оцінки коефіцієнтів (табл. 2.3).

Враховуючи значення критичного коефіцієнта Ст'юдента [14]  $t_{кр} = 3.0298$ , всі коефіцієнти рівняння регресії з меншим значенням  $t$  відповідають. Підставивши значення досліджуваного параметра та обчисливши значення критерію Фішера, упевняємось в адекватності прийнятої моделі. В інтегрованому середовищі MathCad можна, не проводячи спрощення громіздких виразів виведеної залежності, побудувати її графік. По результатам досліджень в оболонці MathCad будуємо графіки (рис. 2.7).

Коефіцієнти рівняння регресії та коефіцієнти  $t$ -критерію Ст'юдента

|  | $b_i$     | $t_i$      |
|--|-----------|------------|
|  | 7.8982    | 10454.4769 |
|  | 0.00581   | 8.9958     |
|  | 0.2879    | 445.5733   |
|  | 0.1497    | 231.7163   |
|  | - 0.00185 | 1.8075     |
|  | 0.0091    | 0.8887     |
|  | 0.00063   | 0.6143     |
|  | 0.00071   | 0.9359     |
|  | 0.00032   | 0.420      |

На основі проведених досліджень одиночних ударних імпульсів на УСУ-8 і досліджень з використанням факторного експерименту, проведених на УВУ-12А1, мною запропоновано нові оригінальні рішення [15], які лягли в основу побудови нової установки, що за параметрами може суттєво відрізняти попередні зразки.

В основу поставлено задачу підвищення точності регулювання ударно-вібраційного пристрою для ущільнення бетонної суміші, який містить нерухому раму і рухому, що закріплена на пружній ресорній підвісці. Кулачковий вал нерухомої рами проходить посередині пустотілих опорних коробів, за якими розташовані пружні прокладки, а під кулачковими штовхачами – пневматична камера і датчик тиску, який на виході з'єднаний з блоком керування амплітуди коливань, а останній сполучається з підсилювачем, котрий на виході з'єднаний з виконавчим механізмом, який сполучається з пневматичною камерою. Це дозволяє підвищити точність регулювання амплітуди коливань рухомої рами і таким чином підвищити якість процесу ущільнення.

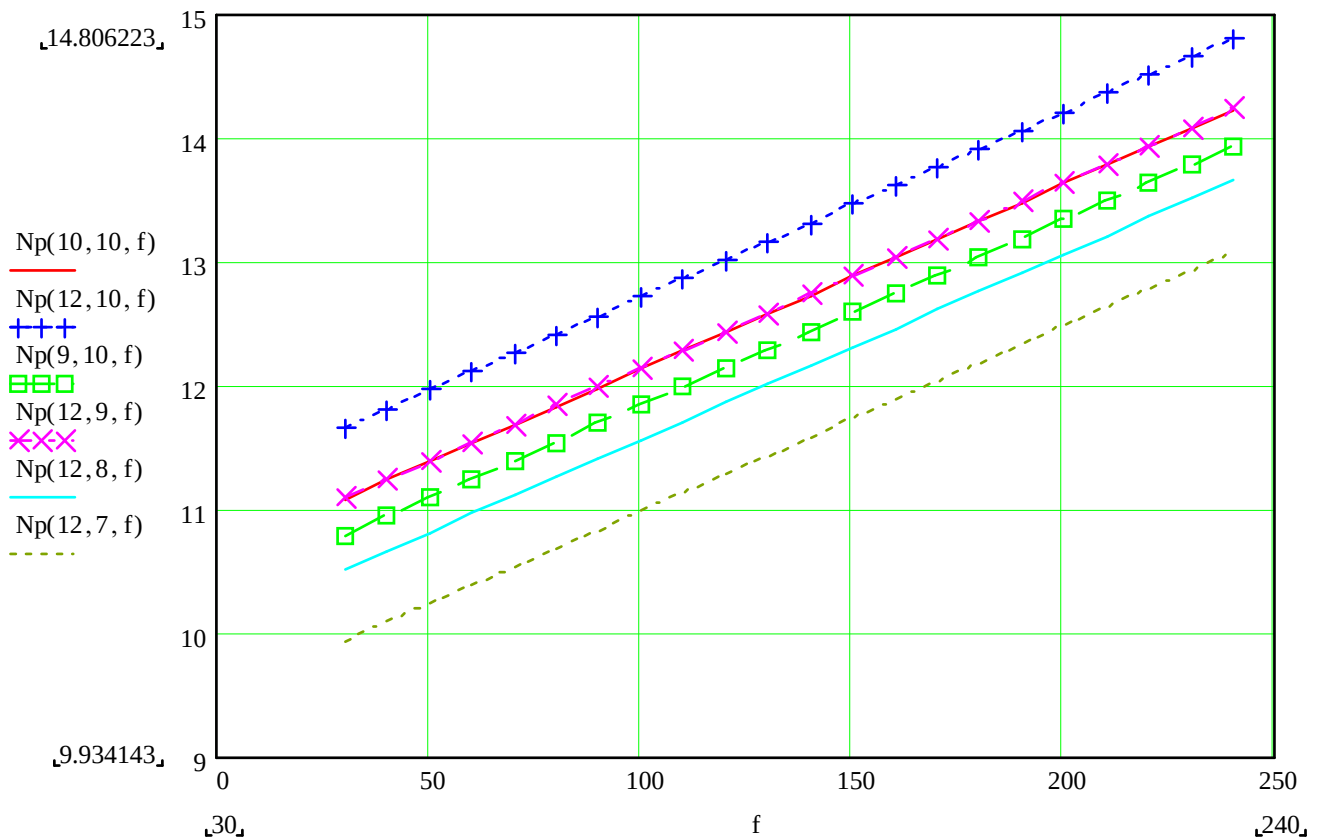


Рисунок 2.7 – Залежності потужності двигуна від частоти ударів при різних значеннях навантаження і висоти падіння

Спільними ознаками з прототипом є нерухома і рухома рама, закріплена на пружній ресорній підвісці. Кулачковий вал проходить посередині пустотілих опорних коробів опорної рами, на яких за їх довжиною розташовані пружні прокладки і під кулачковими штовхачами розташовані пневматичні опори, які сполучені з ресивером.

Можливість регулювання частоти може суттєво покращити технологічні аспекти формування легко бетонних виробів, для чого доцільно використати електропривод постійного струму. Потребами виробництва обґрунтовано необхідність використання 12-тонних УВУ, а прискорення, які необхідно мати, забезпечуються регулюванням висоти падіння рухомої рами до 10 мм. Частота ударів за результатами досліджень лежить в межах 30 - 240 ударів за хвилину.

## 3 Розробка системи керування ударно-вібраційним пристроєм

### 3.1 Вибір двигуна

Початкова частота обертання:

$$n = \frac{f}{60} = \frac{240}{60} = 4 \text{ об/с.}$$

Загальний діапазон частоти регулювання:

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}, \quad (3.1)$$

$$D = \frac{240}{30} = 8.$$

Потужність на валу привода при усталеному режимі та номінальній потужності знайдемо по формулі:

$$P_n = \frac{N}{\eta_p}, \quad (3.2)$$

де  $\eta_p = 0.97$  — к.к.д. редуктора (для зубчатого редуктора з опорами тертя - ковзання);

$N$  — потужність вібраційної установки.

Підставивши значення, отримаємо:

$$P_n = \frac{14.74}{0.97} = 15.2 \text{ кВт.}$$

Визначаємо потрібну частоту обертання двигуна за формулою:

$$n_d = n \cdot i, \quad (3.3)$$

де  $i$  — передавальне число редуктора, яке вибирається із стандартного ряду;

$$i = 4;$$

$$n_d = 4 \cdot 4 = 16 \text{ об/с, або } n_d = 16 \cdot 60 = 960 \text{ об/хв.}$$

По каталогу [16] вибираємо двигун 2ПН200ЛГУХЛ4 з такими параметрами:

$$P_n = 16 \text{ кВт}; \quad U_n = 440 \text{ В}; \quad n_n = 1000 \text{ об/хв};$$

$$\begin{aligned} \eta &= 0.86; & 2p &= 4; & R_{\text{дод}} &= 0.224 \text{ Ом}; \\ R_{\text{я}} &= 0.343 \text{ Ом}; & L_{\text{а}} &= 12.0 \text{ мГн}; & R_{\text{збуд}} &= 15.9 \text{ Ом}; \\ I_{\text{n}} &= 36.36 \text{ А}. \end{aligned}$$

У двигунів серії 2П підвищена перенавантажувальна здатність, покращені динамічні властивості, зменшені шум та вібрації, збільшені надійність та ресурс роботи.

При експлуатації навколишнє середовище повинно бути вибухобезпечне, не містити струмоведучого пилу, агресивних газів та парів у концентраціях, що руйнують метали та ізоляцію.

### 3.2 Вибір тиристорного перетворювача для ЕП постійного струму

Регулювання швидкості двигунів постійного струму займає важливе місце в автоматизованому електроприводі. Застосування з цією метою тиристорних перетворювачів являється одним із самих найсучасніших шляхів створення регульованого електропривода постійного струму.

Керування швидкістю двигуна постійного струму здійснюється трьома методами [17]:

- 1) зміною напруги на якорі при незмінному струмі обмотки збудження;
- 2) зміною струму обмотки збудження при незмінній напрузі якоря;
- 3) комбінованою зміною напруги на якорі та струму обмотки збудження.

Напругу на якорі, або струм обмотки збудження, змінюють за допомогою керуючих випрямлячів, з яких найбільше застосування отримали однофазні та трьохфазні мостові випрямлячі. При керуванні двигуном по ланцюгу обмотки збудження керований випрямляч робиться на меншу потужність та має малогабаритні та цінові показники. Через те, що електропривод має великі сталі часу обмотки збудження, то він має гірші динамічні властивості і є менш швидкодіючим, ніж при керуванні по ланцюгу якоря. Таким чином, вибір ланцюга керування визначається конкретними вимогами до приводу.

При роботі з механізмами ущільнення може бути необхідно міняти напрям обертання двигуна для затримання швидкості падіння плити. Для зміни напрямку обертання необхідно швидке та плавне гальмування та плавний набір швидкості.

Реверс напрямку обертання приводного двигуна може досягатися зміною полярності підведеної до якоря напруги, або зміною напрямку струму обмотки збудження. З цією метою в ланцюг якоря, або обмотки збудження, вводять контактний перемикач, або використовують два керовані тиристорні перетворювачі.

Роботу схеми на рис. 3.1 можливо проаналізувати за допомогою рис. 3.2, на якому приведені сумісні характеристики реверсивного тиристорного перетворювача, які відповідають режимам випрямлення та інвертування. Характеристики показано без урахування їх нелінійності в областях малих струмів  $I_d$ , які визначаються перервністю струму  $i_d$  перетворювача в цій області в умовах реальних значень індуктивності  $L_d < \infty$  згладжуючого дроселя. Оскільки механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження  $M = F(n)$  визначаються напругою, що прикладена до якоря, та характером її зміни в залежності від навантаження, то сімейство зовнішніх характеристик перетворювача на рис. 3.2 можна розглянути і як сімейство механічних характеристик двигуна (при  $I_{os} = \text{const}$ ,  $n \sim U_d$ ,  $M \sim I_d$ ) [18]. Момент навантаження на валу двигуна  $M_n$  приймається постійним та незалежним від частоти обертання  $n$ .

При цьому методі керування велика величина часу спрацювання контактора (десятки та сотні мілісекунд) погіршує такий показник, як швидкодія. Недоліком схеми є ще те, що надійність її роботи залежить від безвідмовної роботи контактора.

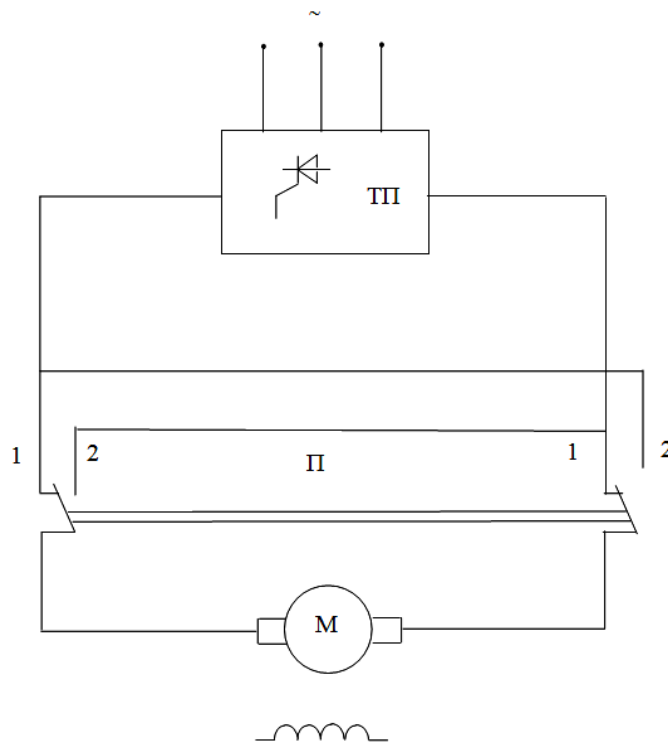


Рисунок 3.1 – Структурна схема реверсивного тиристорного перетворювача

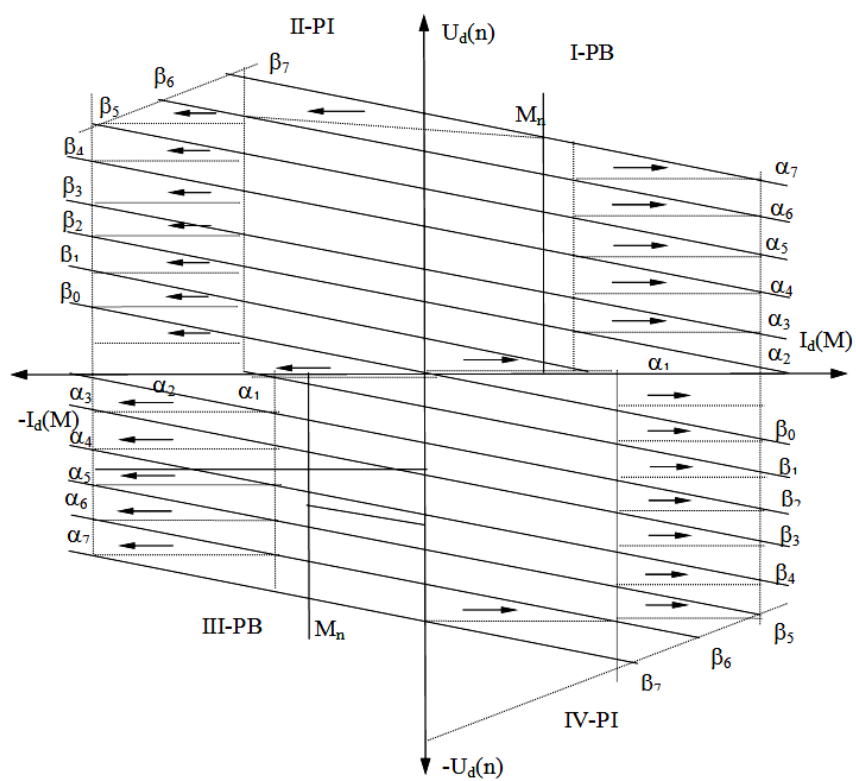


Рисунок 3.2 – Сумісні зовнішні характеристики реверсивного тиристорного перетворювача

Більш поліпшена схема тиристорного електропривода створена на основі двох тиристорних комплектів, які забезпечують протікання в ланцюзі двигуна струму того або іншого напрямку без застосування контактора. У такому перетворювачі, який називається реверсивним, створюються гарні умови для автоматичного керування приводом при різноманітних режимах його роботи. Перетворювачі, що входять в систему, можуть бути з'єднані двома способами - по перехресній або зустрічно-паралельній схемах, які для трифазного мостового перетворювача показані на рис.3.3.

Схеми відрізняються кількістю вторинних обмоток силового трансформатора. Через більш просту конструкцію трансформатора застосовують частіше зустрічно-паралельну схему, яку і використовуємо при подальшому аналізі.

Принцип окремого керування полягає у тому, що відкриваючі імпульси подаються на тиристори тільки однієї з двох тиристорних груп, яка в дану мить приймає участь в перетворенні струму. В перехідних режимах, коли вступає в роботу інша тиристорна група, припиняється подача відпираючих імпульсів на тиристори працюючої групи, а потім після деякої паузи, протягом якої проходить спадання струмів працюючої тиристорної групи до нуля та запирання її тиристорів, подаються відпираючі імпульси на тиристори групи, які вступають в роботу. Між кутами керування  $\alpha_I$  та  $\alpha_{II}$  (рис. 3.4) реверсивних груп витримується та ж умова узгодженого керування. Потрібне блокування в подачі відпираючих імпульсів здійснюється по системі керування перетворювачем з використанням датчиків струму.

Необхідність створення паузи в роботі тиристорних груп (до 1-10 мс в залежності від навантаження) приводить до деякого погіршення швидкодії приводу [19]. Але сучасні реверсивні перетворювачі з окремим керуванням повністю задовольняють вимогам більшості електроприводів.

За викладеним вище вибираємо за основу електропривод ЕТУ 3601-Д.

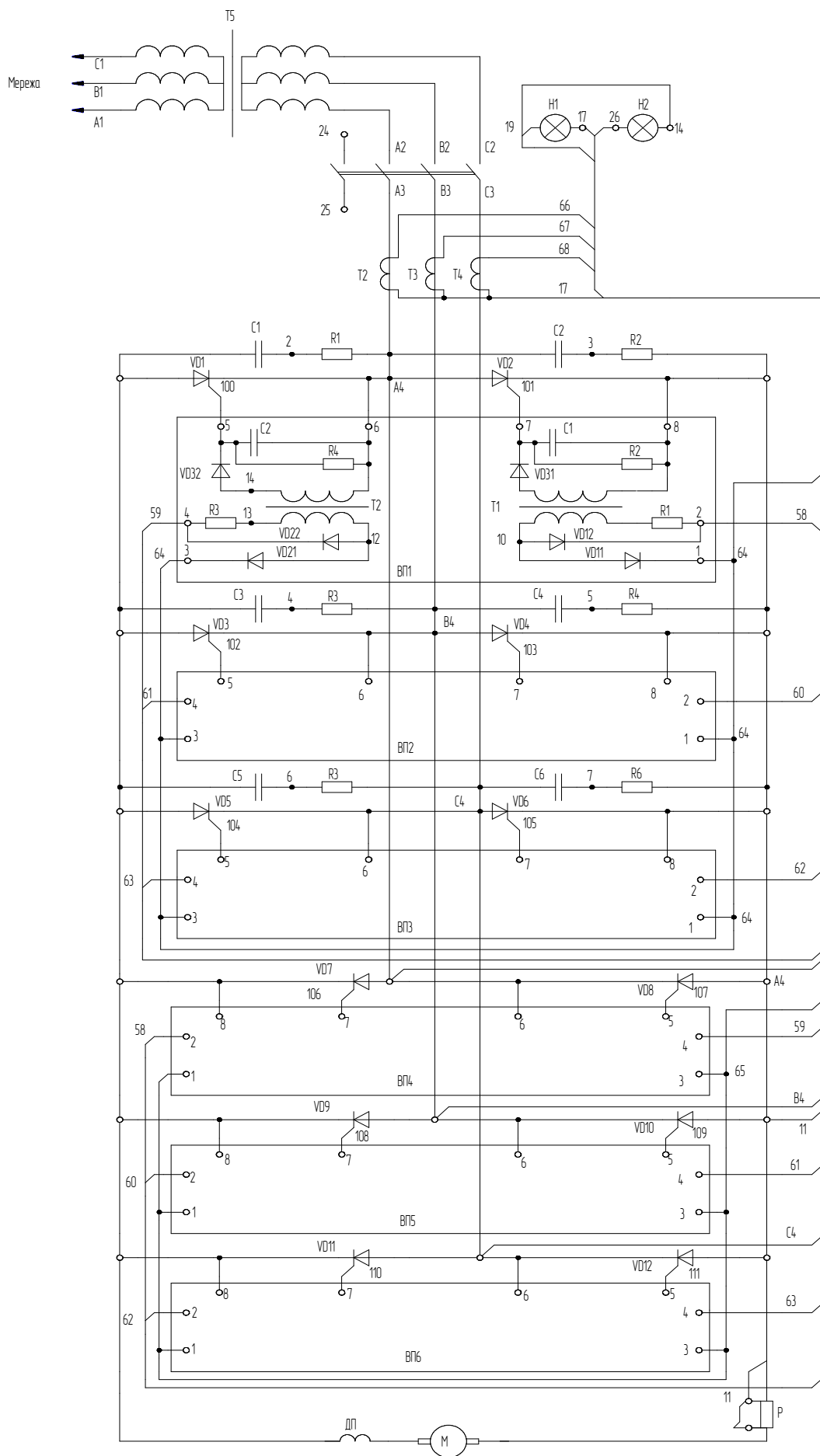


Рисунок 3.3 – Силовая часть электропривода

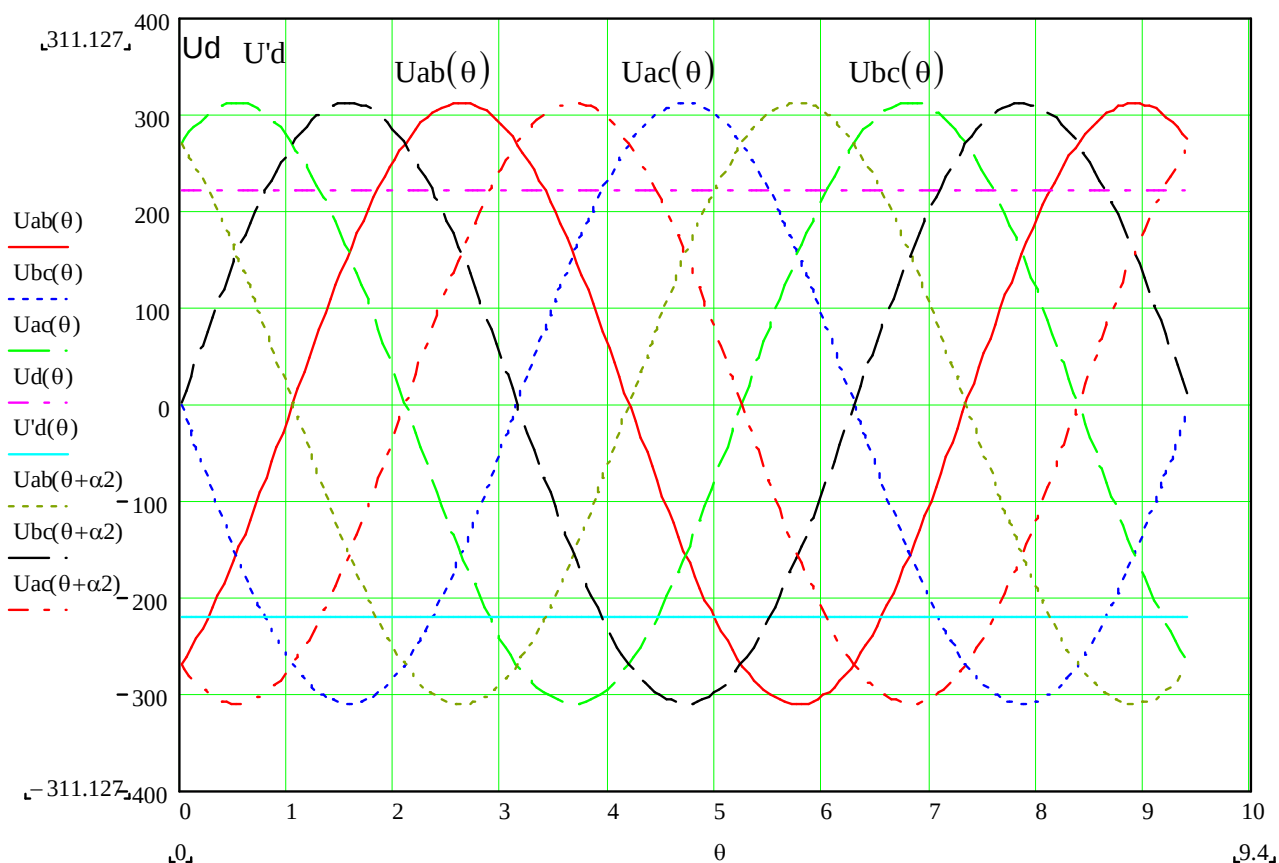


Рисунок 3.4 – Криві вихідної напруги реверсивних перетворювачів при сумісному та узгодженому керуванні

Електропривод в режимі регулювання частоти обертання забезпечує технічні характеристики у відповідності до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Характеристика електроприводу ЕТУ3601-Д

| Частота обертів двигуна | Похибка частоти обертів, % (не більше) |                                |                                      | Коефіцієнт нерівномірності обертів, Кн (не більше) |
|-------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                         | Сумарна похибка                        | Похибка при зміні навантаження | Похибка при зміні напрямку обертання |                                                    |
| До $0,1n_{\max}$        | 5                                      | $\pm 2$                        | $\pm 2$                              | 0,1                                                |
| До $0,01n_{\max}$       | 15                                     | $\pm 5$                        | $\pm 5$                              | 0,15                                               |
| До $0,001n_{\max}$      | 30                                     | $\pm 10$                       | $\pm 10$                             | 0,3                                                |

Електропривод забезпечує перевантаження по струму якоря двигуна, при цьому блок перетворювача допускає перевантаження по струму, рівне  $2,25 \cdot I_{\text{ном}}$  протягом 10 с в циклічному режимі при середньоквадратичному струмі не вище номінального і часу усереднювання не більш 10 хв.

Час повернення частоти обертання до діапазону допуску при ступінчастому прикладенні навантаження від холостого ходу до  $I_{\text{ном}}$  не більше 0,5 с, при частоті обертання не нижче  $0,5 \cdot n_{\text{ном}}$ .

У першій зоні регулювання смуга пропускання частот замкнутого контуру по частоті обертання і лінійній зоні не менше 100 рад/с.

Електропривод має наступні види захисту:

- а) максимально-струмовий від зовнішніх і внутрішніх коротких замикань;
- б) від перегріву двигуна при перевантаженнях;
- в) від пониження напруги мережі;
- г) від перенапруги.

Електроприводи забезпечують працездатність при нелінійних спотвореннях мережі живлення до 10% амплітудного значення і кутової тривалості 10 ел. град. в будь-якій точці синусоїди напруги.

Електропривод має:

- а) сигналізацію стану "включено" і "виключено";
- б) сигналізацію спрацювання максимально-струмового захисту і захисту від перегріву двигуна при перевантаженнях;
- в) блокування, що забезпечує нормальну роботу при будь-якій послідовності включення комутаційної і захисної апаратури, зокрема при включенні електроприводу загальним комутаційним апаратом.

Електроприводи забезпечують роботу з двигунами серій ПБСТ, 2П і іншими типами двигунів постійного струму, які допускають збільшення частоти обертання більшу за номінальну за рахунок ослаблення поля, у яких номінальний струм і номінальна напруга не перевищує  $U_n$  і  $I_n$ , а також номінальний струм обмотки збудження не перевищує 5 А. Причому для

виконання електроприводу по живлячій напрузі 220 В, 230 В і 240 В, напруга обмотки збудження двигуна повинна бути 110 В.

Показники надійності електроприводів:

- напрацювання на відмову не менше 4000 год.
- середній термін служби - 15 років.

### 3.3. Розрахунок елементів силової частини та СІФК тиристорного перетворювача

#### 3.3.1. Вибір тиристорів

Дані для розрахунку тиристорного перетворювача приведені нижче.

Вхідні дані

|                                    |                                |
|------------------------------------|--------------------------------|
| Номінальна напруга                 | $U_{dn} = 440 \text{ В}$       |
| Номінальний струм                  | $I_{dn} = 36.4 \text{ А}$      |
| Напруга мережі                     | $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ |
| Коливання напруги мережі           | $\Delta U = \pm 10 \%$         |
| Діапазон зміни випрямленої напруги | від $U_{dn}$ до 0              |

Активний та реактивний опір мережі досить малі.

Знайдемо мінімальну напругу мережі, яку необхідно для отримання  $U_{dn} = 440 \text{ В}$ . Навантажувальна характеристика трифазного мостового випрямляча у діапазоні кутів регулювання  $\alpha = 0 - 60^\circ$  має вид як на рис. 3.5.

Запишемо рівняння для випрямленої напруги [20]:

$$U_d = 3\sqrt{2}/\pi \cdot U_{\text{л} \min} \cdot \cos \alpha - (3 \cdot X_p / \pi + 1.75 \cdot R_p) \cdot I_d - \Delta U_a, \quad (3.4)$$

де  $R_p$  та  $X_p$  — активний та реактивний опір струмообмежуючих реакторів;  $\Delta U_a$  — втрати напруги на відкритих вентилях у першому наближенні,  $\Delta U_a = 2 \text{ В}$ . Вибираємо струмообмежуючий реактор ДРА 732, який має наступні параметри:

$$I_n = 50 \text{ А}; \quad X_p = 0.095 \text{ Ом}; \quad R_p = 22 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

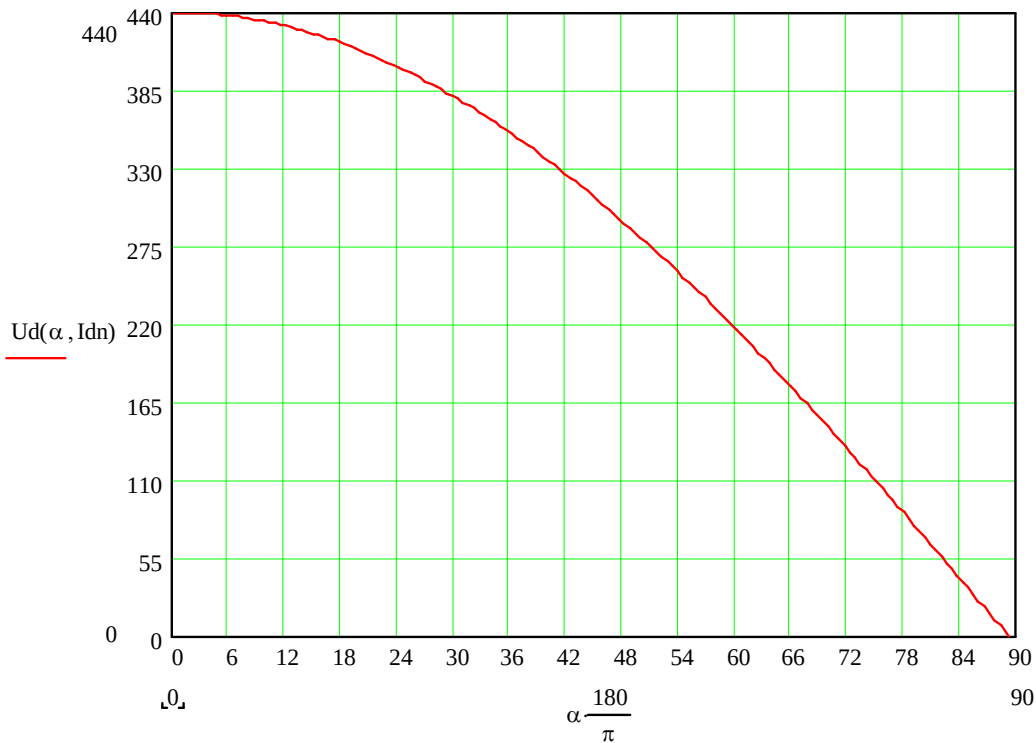


Рис. 3.5. Регулювальна характеристика перетворювача

Визначимо мінімальне значення напруги мережі, при якій тиристорний перетворювач забезпечить на виході  $U_{dn} = 440 \text{ В}$  при  $I_{dn} = 36.4 \text{ А}$ .

Прийнявши початковий кут керування  $\alpha = 0$  отримаємо:

$$U'_{\min} = \frac{U_{dn} + (3 \cdot X_p / \pi + 1.75 \cdot R_p) \cdot I_{dn} + \Delta U_a}{3\sqrt{2} / \pi}. \quad (3.5)$$

Підставляємо числові значення і отримаємо:

$$U'_{\min} = \frac{440 + (3 \cdot 0.095 / \pi + 1.75 \cdot 22 \cdot 10^{-3}) \cdot 36.4 + 2}{3\sqrt{2} / \pi} = 330.8 \text{ В}.$$

Це означає, що обрана схема при мінімальній напрузі мережі ( $U_{\text{л}} = 0.9 \cdot U_{\text{лн}} = 342 \text{ В}$ ) забезпечує напругу споживача, так як  $U'_{\min} < U_{\text{л}}$ .

Визначимо початковий кут регулювання з умови:

$$U_{dn} = 3\sqrt{2} / \pi \cdot U_{\text{л min}} \cdot \cos(\alpha_{\text{поч}}) - (3 \cdot X_p / \pi + 1.75 \cdot R_p) \cdot I_{dn} - \Delta U_a. \quad (3.6)$$

Тоді

$$\alpha_{\text{н}} = \arccos \frac{(U_{dn} + (\frac{3 \cdot X_p}{\pi} + 1.75 \cdot R_p) \cdot I_{dn} + \Delta U_a) \cdot \pi}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0.9 \cdot U_n}. \quad (3.7)$$

Підставимо числові значення:

$$\alpha_{\text{н}} = \arccos \frac{(U_{dn} + (\frac{3 \cdot 0.095}{\pi} + 1.75 \cdot 22 \cdot 10^{-3}) \cdot 36.4 + 2) \cdot \pi}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0.9 \cdot 380} = 14.7^\circ.$$

Визначим параметри тиристорів перетворювача. Для трифазної схеми перетворювача середній струм

$$I_{a \text{ сеп}} = I_{dn}/3, \quad (3.8)$$

$$I_{a \text{ сеп}} = 36.4/3 = 12.12 \text{ A}.$$

З урахуванням запасу на пусковий струм вибираємо

$$I_{a \text{ сеп}} \geq I_{a \text{ сеп}} \cdot 2.5, \quad (3.9)$$

$$I_{a \text{ сеп}} = 12.12 \cdot 2.5 = 30.3 \text{ A}.$$

Повторні напруги для трифазної мостової схеми:

$$U_{новт} \geq 1.045 \cdot U_{dn}, \quad (3.10)$$

$$U_{новт} = 1.045 \cdot 440 = 460 \text{ B}.$$

З урахуванням 20 % коливання мережі, а також компенсаційні перенапруження:

$$U_{новт \text{ max}} = 1.5 \cdot U_{новт}, \quad (3.11)$$

$$U_{новт \text{ max}} = 1.5 \cdot 460 = 690 \text{ B}.$$

Вибираємо тиристор типу [21] T161-125-7-32, що має такі параметри:

$$I_{сеп} = 125 \text{ A}; U_{новт} = 700 \text{ B}; \quad \Delta U_a = 1.75 \text{ B};$$

$$\Delta U/dt = 20 \text{ B/c}; \quad t_{вим} = 25 \text{ мкс}; \quad di/dt = 20 \text{ A/мкс};$$

$$I_{уд \text{ доп}} = 4000 \text{ A}; \quad I_{кер} = 0.4 \text{ A}; \quad I_{обер} = 20 \text{ mA}.$$

Перевіримо обраний тиристор та струмообмежуючий реактор на ударний струм глухого короткого замикання (коротке замикання на затискачах перетворювача).

Амплітуда базового струму короткого замикання:

$$I_{\bar{h}} = \frac{U_{-H_p}}{\sqrt{R_p^2 + X_p^2}}, \quad (3.12)$$

$$\text{де } U_{-H_p} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_c}{\sqrt{3}}, \quad (3.13)$$

$$U_{-H_p} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{\sqrt{3}} = 310.27 \text{ В.}$$

Підставив числові значення:

$$I_{\bar{h}} = \frac{310.27}{\sqrt{0.095^2 + 0.022^2}} = 3182 \text{ А.}$$

Ударний струм глухого зовнішнього короткого замикання визначається з виразу:

$$I_{y\partial} = I_{kc} \cdot i_{y\partial}^*, \quad (3.14)$$

де  $i_{y\partial}^*$  — коефіцієнт, що залежить від співвідношення  $\text{ctg } \varphi_k = R_p/X_p$ , який визначається по номограмам [ 22 ].

З номограми  $i_{y\partial}^* \approx 0.95$ . Тоді

$$I_{y\partial} = 3182 \cdot 0.95 = 3023 \text{ А.}$$

$$I_{y\partial} < I_{y\partial \text{ доп}} = 4000 \text{ А.}$$

Визначаємо вірність вибраного тиристора на максимальну швидкість наростання по формулі:

$$\frac{dU}{dt} \leq \frac{\sqrt{2} \cdot U_c \cdot R_{\bar{b}}}{3 \cdot L_p}, \quad (3.15)$$

де  $R_{\partial}$  — активний опір вентилів,  $L_p$  — індуктивність реакторів;

$$R_{\partial} = \Delta U_d / I_{cep}, \quad (3.16)$$

$$R_{\partial} = 1.75 / 125 = 0.014 \text{ Ом};$$

$$L_p = X_p / (2 \cdot \pi \cdot f), \quad (3.17)$$

$$L_p = 0.095 / (2 \cdot \pi \cdot 960) = 15.7 \text{ мкГн.}$$

Тоді

$$\frac{dU}{dt} \leq \frac{\sqrt{2} \cdot 380 \cdot 0.014}{3 \cdot 15.7} = 0.159 \text{ В/мкс.}$$

$$\frac{dU}{dt} < 20 \text{ В/мкс.}$$

Це означає, що реактор вибрано вірно.

### 3.3.2. Розрахунок енергетичних показників перетворювача

Розрахунок проводимо для номінальної напруги мережі  $U_{\text{лн}} = 380 \text{ В}$  та номінальних навантажень  $U_{\text{дн}} = 440 \text{ В}$ ,  $I_{\text{дн}} = 36.4 \text{ А}$ .

Початковий кут керування визначим з виразу

$$U_{\text{дн}} = 3\sqrt{2}/\pi \cdot U_{\text{лн}} \cdot \cos(\alpha_{\text{ноч}}) - (3 \cdot X_p/\pi + 1.75 \cdot R_p) \cdot I_{\text{дн}} - \Delta U_a, \quad (3.18)$$

$$\alpha_{\text{н}} = \arccos \frac{(U_{\text{дн}} + (\frac{3 \cdot X_p}{\pi} + 1.75 \cdot R_p) \cdot I_{\text{дн}} + \Delta U_a) \cdot \pi}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{лн}}}, \quad (3.19)$$

$$\alpha_{\text{н}} = \arccos \frac{(440 + (\frac{3 \cdot 0.095}{\pi} + 1.75 \cdot 0.022) \cdot 36.4 + 1.75) \cdot \pi}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 380} = 0.516 = 29.54^\circ.$$

Знайдемо кут комутації  $\gamma$ . Для цього запишемо вираз:

$$\cos(\alpha_{\text{ноч}}) - \cos(\alpha_{\text{ноч}} + \gamma) = K_{p2}, \quad (3.20)$$

$$\text{де } K_{p2} = \frac{2 \cdot r_{\text{дн}} \cdot X_p}{\sqrt{2} \cdot 380} = \frac{2 \cdot 36.4 \cdot 0.095}{\sqrt{2} \cdot 380} = 0.013, \quad (3.21)$$

$$\gamma = \arccos(\cos(\alpha_{\text{ноч}}) - K_{p2}) - \alpha_{\text{ноч}}, \quad (3.22)$$

$$\gamma = \arccos(\cos(0.516) - 0.013) - 0.516 = 0.026 = 1.46^\circ.$$

Розрахуємо зсув першої гармоніки струму відносно напруги мережі  $\varphi$ :

$$\varphi = \alpha_{\text{ноч}} + \gamma/2, \quad (3.23)$$

$$\varphi = 29.55^\circ + 1.46/2 = 30.28^\circ.$$

Коефіцієнт потужності перетворювача розрахуємо по формулі:

$$\lambda = K \cdot \cos(\varphi), \quad (3.24)$$

де  $K$ — коефіцієнт форми струму,  $K = 0.95$ .

Підставимо числові значення:

$$\lambda = 0.95 \cdot \cos(30.28) = 0.82.$$

Коефіцієнт корисної дії перетворювача знайдемо за формулою:

$$\eta = \frac{I_{dn} \cdot U_{dn}}{I_{dn} \cdot U_{dn} + \Delta U_a \cdot I_{dn} \cdot 2 \cdot m + I_{dn}^2 \cdot R_p \cdot m}, \quad (3.25)$$

де  $m = 3$  — число фаз.

Підставим числові значення в (3.25):

$$\eta = \frac{36.4 \cdot 440}{36.4 \cdot 440 + 1.75 \cdot 36.4 \cdot 2 \cdot 3 + 36.4^2 \cdot 0.022 \cdot 3} = 0.972.$$

Зовнішні характеристики перетворювача при різних значеннях кута  $\alpha$  зображено на рис. 3.6.

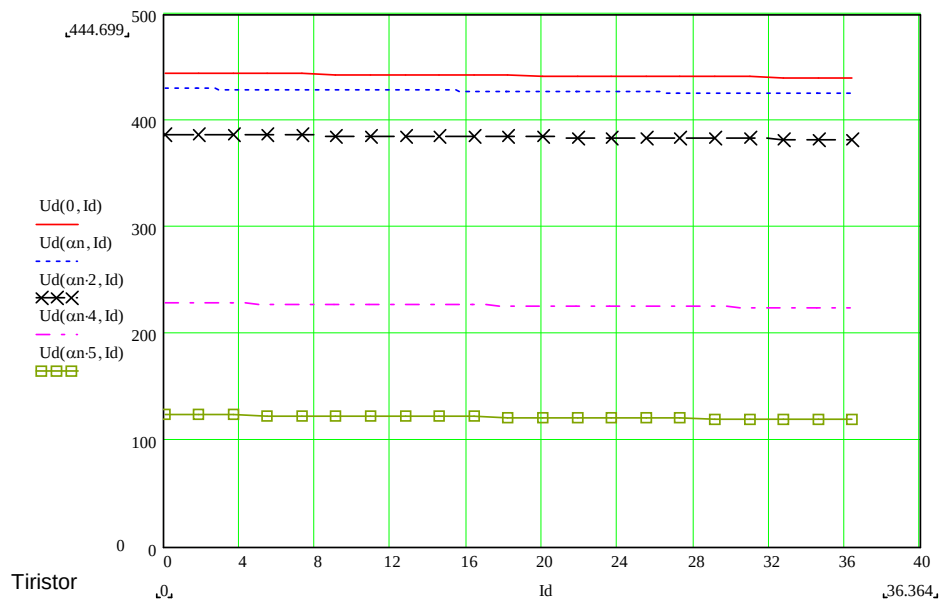


Рисунок 3.6 – Зовнішні характеристики перетворювача при різних значеннях кута  $\alpha$

### 3.3.3. Розрахунок зони перервних струмів

Для розрахунку зони перервних струмів запишемо формулу для граничного струму:

$$I_{dcp} = \frac{U_{d0}}{X_a + X_p} \cdot K_{cp}, \quad (3.26)$$

$$\text{де } X_a = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_a, \quad (3.27)$$

$$X_a = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0.0129 = 77.81 \text{ Ом};$$

$U_{d0}$  — максимальна випрямлена напруга,

$$U_{d0} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_c - (3 \cdot \frac{X_p}{\pi} + 1.75 \cdot R_p) \cdot I_{dn} - \Delta U_a. \quad (3.28)$$

$$U_{d0} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot 380 - \left(3 \cdot \frac{0.095}{\pi} + 1.75 \cdot 0.022\right) \cdot 36.4 - 1.75 = 506.73 \text{ В};$$

$$K_{cp} = (1 - \pi/p \cdot \text{ctg}(\pi/p)) \cdot \sin(\alpha_{\text{ноч}}), \quad (3.29)$$

де  $p = 2 \cdot m = 6$ .

Тоді  $K_{cp} = (1 - \pi/6 \cdot \text{ctg}(\pi/6)) \cdot \sin(29.55^\circ) = 0.046$ .

$$I_{dcp}(\alpha) = \frac{506.73 \cdot 0.046}{77.81 + 0.095} = 0.299 \text{ А}.$$

При  $\alpha = 90^\circ$   $I_{dcp}(\alpha) = 0.606 \text{ А}$ .

За допомогою оболонки Mathcad-2000 будемо залежність  $I_{dcp}(\alpha)$  (рис. 3.7).

Користуючись графіком залежності на рис. 3.7. визначаємо значення  $I_{dcp}$ . При вибраному двигуні та реакторах перервність струмів починається при навантаженні, яке складає наближено 1% від номінального.

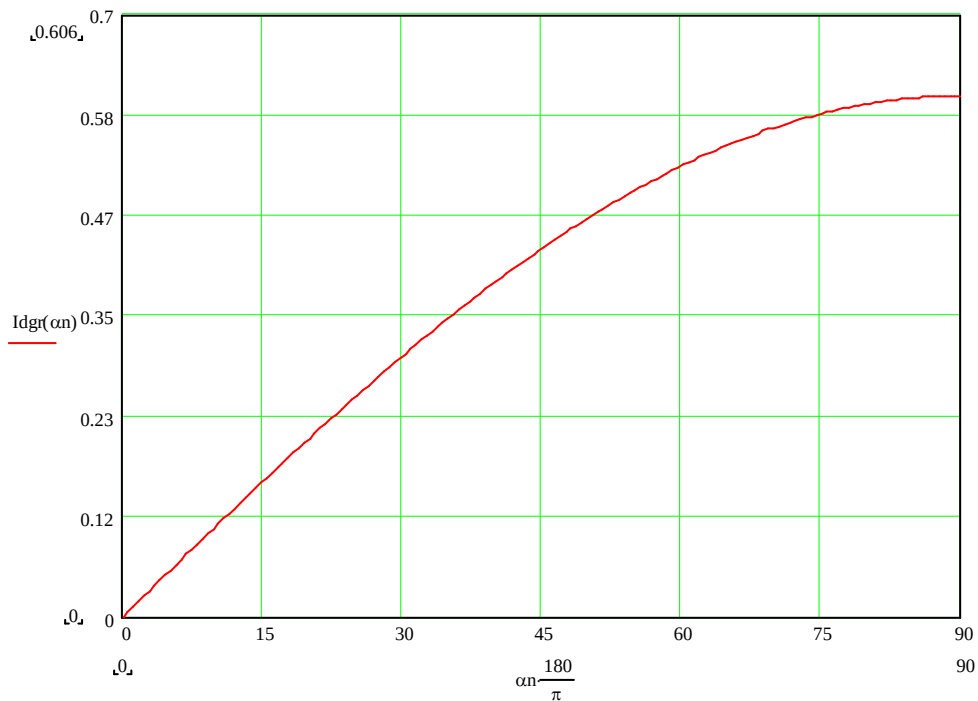


Рисунок 3.7 – Графік залежності  $I_{dcp}$  від кута  $\alpha$

### 3.3.4. Розрахунок теплового режиму силових тиристорів та вибір охолоджувачів

Номинальний тепловий режим вентиляного перетворювача забезпечується охолоджувальною системою, яка відводить теплову енергію, що утворюється в силових напівпровідникових приладах, та розсіює її в оточуючому повітрі. Тиристорний перетворювач повинен надійно працювати при температурі оточуючого повітря  $T_c = 45^\circ\text{C}$ . Максимальна робоча температура тиристора  $T_k = 85^\circ\text{C}$ .

Потужність, що розсіюється кожним тиристором, визначається за формулою:

$$P_{роз} = I_n \cdot \Delta U_a / 3, \quad (3.30)$$

$$P_{роз} = 36.4 \cdot 1.75 / 3 = 21.21 \text{ Вт}.$$

Тепловий опір охолоджувача, що забезпечує роботу, повинен бути:

$$R \leq \frac{T_h - T_c}{m_p \cdot K}. \quad (3.31)$$

Підставимо числові значення у (3.31):

$$R \leq \frac{85 - 45}{21.21} = 1.89.$$

Такий тепловий опір забезпечує охолоджувач алюмінієвий серії ОА-002 (по ТУ16-729-78), який має  $R_m = 0.64^\circ\text{C}/\text{Вт}$  при потужності, що розсіюється, не більше  $50\text{Вт}$  з природною конвекцією повітря.

При цьому температура корпусу приладу:

$$T_{кп} = P_{роз} \cdot R_m + T_c, \quad (3.32)$$

$$T_{кп} = 21.21 \cdot 0.64 + 45 = 58.6^\circ\text{C}.$$

Отримана температура корпусу приладу  $T_{кп}$  менша за максимальну робочу температуру тиристора  $T_k$ . Це означає, що охолоджувач ОА-002 задовольняє тепловому режиму роботи силових тиристорів.

### 3.4. Розробка функціональної та структурної схеми привода

Відомо, що тільки у малопотужних приводів з невисокими вимогами до динаміки, досить керувати тільки однією керованою величиною – найчастіше частотою обертання двигуна.

В інших випадках, щоб задовольнити вимогам точності та високої якості динаміки при одночасному дотриманні вимог, необхідне узгоджене керування декількома керованими величинами. Найчастіше такими величинами є частота обертання двигуна та струм двигуна.

Відомі схеми паралельного керування декількома величинами та підпорядковане або каскадне регулювання [23, 24].

Паралельне регулювання потребує такого перемикання контурів керування, щоб працюючим завжди був контур з більшим відхиленням керованої величини.

Підпорядковане керування двох або декількох величин засновано на тому, що зовнішній контур керування утворює сигнал завдання для внутрішнього контура. Внутрішній контур є ланцюгом зовнішнього контура та повинен враховуватись при оптимізації останнього. Усі контури керування постійно знаходяться в взаємодії, перемикання відсутні. Обмеження окремих керованих величин також може бути здійснено шляхом обмеження відповідних задаючих сигналів. Застосування пропорційно-інтегральних (ПІ) регуляторів та задовольняюча оптимізація контурів керування можливі за умови, якщо керований об'єкт так поділений на окремі блоки, що кожен контур регулювання має тільки одну велику сталу часу, яка повинна бути скомпенсована [23].

Останнім часом система автоматичного регулювання приводів з аналоговою обробкою сигналів застосовується найчастіше в підпорядкованому регулюванні. Цей принцип економічно вигідно реалізується на основі уніфікованих блоків, легко може бути доповнений допоміжними контурами регулювання.

Якірний перетворювач із збудником є основними елементами електроприводу. У перетворювачі відбувається перетворення змінної напруги

3-фазної живлячої мережі у постійну напругу, що подається на якір електродвигуна, і в якому здійснюються всі необхідні функції по управлінню потоком енергії з метою регулювання частоти обертання у функції сигналів задатчика частоти обертання.

У збуднику відбувається перетворення змінної напруги 1-фазної живлячої мережі в постійну напругу, що подається на обмотку збудження двигуна, причому при швидкості двигуна більшій за номінальну ослаблення поля виконується у функції ЕРС двигуна.

Функціональна схема електроприводу приведена на рис.3.8.

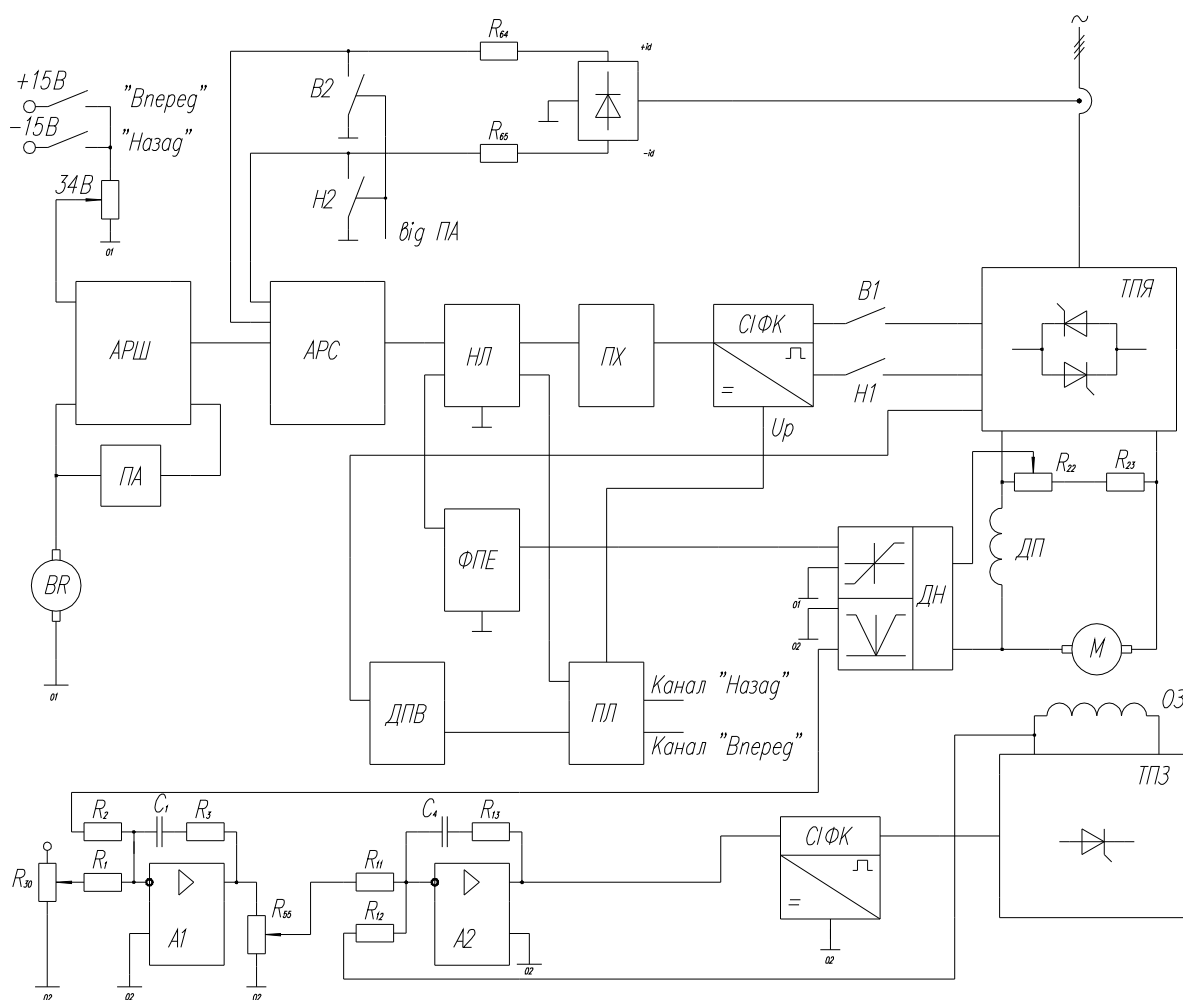


Рисунок 3.8 – Функціональна схема електроприводу ЕТУ3601-Д

Умовні позначення:

ТПЯ - тиристорний перетворювач якірний; СІФУ - система імпульсного фазового управління; ПХ - перемикач характеристики; НЛ - нелінійна ланка; ФПЕ - функціональний перетворювач ЕРС; АРС - адаптивний регулятор струму; АРШ - адаптивний регулятор швидкості; ПА - пристрій адаптації; ДПВ - датчик провідності вентилів; ПЛ - пристрій логічний; ДН - датчик ЕРС; ДП - додатковий полюс двигуна; М - електродвигун; ОЗЧ - обмотка збудження двигуна; ВР - тахогенератор; ДС - датчик струму перетворювача якірного; ТПЗ - тиристорний перетворювач збуджувача; Н1, Н2, Н3, В1, В2, В3 - ключі;  $U_p$  - напруга дозволу; ДСЗ - датчик струму збуджувача.

Канал регулювання напруги на якорі виконаний по двухконтурній системи підлеглого регулювання струму і швидкості, де регулятор швидкості виконаний по адаптивній схемі із змінним коефіцієнтом посилення в залежності від частоти обертання двигуна для забезпечення стійкості в другій зоні регулювання.

В той же час в другій зоні регулювання здійснюється зниження максимального рівня вихідної напруги регулятора швидкості, і таким чином знижується уставка струмообмеження.

Канал регулювання збудження виконаний на пристрої управління БУ3509(В), який забезпечує регулювання приводу в другій зоні (швидкість вища номінальної).

Канал регулювання збудження складається з двох контурів: контура регулювання струму збудження і контура регулювання ЕРС двигуна і відповідно задатчиків струму збудження  $R_{55}$  і ЕРС двигуна  $R_{30}$ .

Виходячи з вище сказаного, можна зобразити також структурну схему приводного механізму (рис. 3. 9).

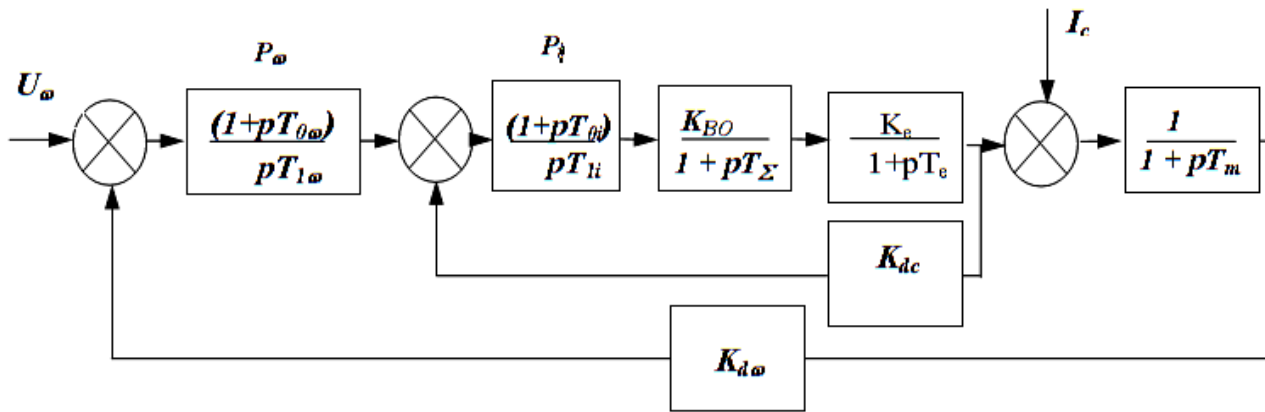


Рисунок 3. 9 – Електропривод постійного струму з контуром регулювання частоти обертання та підпорядкованим контуром струму

При достатньому коефіцієнті підсилення контура регулювання струму можна не враховувати дію проти-ЕРС двигуна так називаємим зворотнім зв'язком по ЕРС, так як проти-ЕРС двигуна, що є для контуру струму збурюючою дією, в цьому випадку мало впливає на властивості приводу. Тоді дана структура спрощується за рахунок останньої ланки та відповідає структурі на рис 3.10.

Сума паразитних сталих часу  $\tau_{\Sigma}$  врахована в передавальній функції перетворювача.

В суті для оптимізації в частотному діапазоні повинно виконуватись співвідношення:

$$\frac{1}{p \cdot T_M} \approx \frac{1}{1 + p \cdot T_M}.$$

В разі побудови такої системи регулювання, де не виконується це співвідношення, двигун втрачає свої природні властивості, необхідні для електропривода.

Процес пуску в системі проходить таким чином. Контур регулювання струму на початку змушує струм двигуна слідувати задаючому сигналу. Частота двигуна устанавлюється в відповідності з навантаженням. Зовнішній контур регулює частоту обертання відповідно заданому значенню, та виходячи з похибки регулювання частоти обертання створюється сигнал завдання

струму, в відповідності з яким і встановлюється струм двигуна. Обмеження завдання струму приводить до обмеження струму двигуна.

Якщо задане значення частоти обертання змінюється стрибком на велику величину, то виникає така велика похибка регулювання, що вступає в дію обмеження завдання струму. Двигун розганяється при одночасному обмеженні струму доки похибка регулювання частоти обертання не зменшиться на стільки, що значення струму стане рівним значенню заданого граничного  $I_{2p}$ .

Завдяки цьому стає можливим прямий пуск двигуна без недопустимого навантаження елементів схеми. Вибравши в якості регуляторів швидкості та струму ПІ-ланцюги, то зібрану на операційних підсилювачах схему регулювання на рис.3.10 можна перетворити в розрахункову схему.

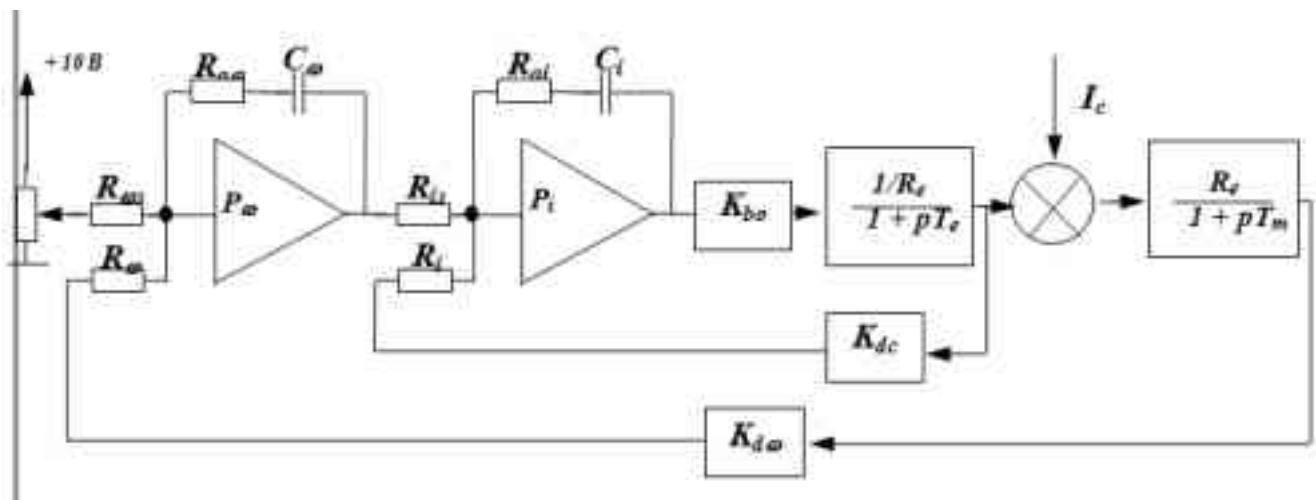


Рисунок 3.10 – Розрахункова схема двоконтурної системи підпорядкованого регулювання

### 3.4.1. Розрахунок основних параметрів силової частини ланцюга ЕП

Активний опір ланцюга якоря двигуна, приведений до температури 75°C визначаємо за формулою:

$$R_{\omega\omega} = [1 + K_t \cdot (75 - 20)] \cdot (R_{\omega} + R_{\omega\omega\omega}), \quad (3.33)$$

де  $K_t = 0.004$  — температурний коефіцієнт;

$R_{\omega}$  та  $R_{\omega\omega\omega}$  — опір ланцюга якоря двигуна.

Підставляємо числові значення:

$$R_{\partial\theta} = [1 + 0.004 \cdot (75 - 20)] \cdot (0.343 + 0.224) = 0.692 \text{ Ом.}$$

Активний опір струмообмежуючого резистора, що приведений до температури 75°C, визначимо за формулою:

$$R_p = [1 + K_t \cdot (75 - 20)] \cdot R_{p20}, \quad (3.34)$$

де  $R_{p20} = 0.0219 \text{ Ом}$  — активний опір струмообмежуючих резисторів.

Підставляємо числові значення:

$$R_p = [1 + 0.004 \cdot (75 - 20)] \cdot 0.0219 = 0.027 \text{ Ом.}$$

Приведений активний опір струмообмежуючих резисторів:

$$R_{mp} = 3 \cdot X_p / \pi + 1.75 \cdot R_p, \quad (3.35)$$

де  $X_p$  — індуктивний опір струмообмежуючих реакторів, Ом.

Підставляємо числові значення:

$$R_{mp} = 3 \cdot 0.095 / \pi + 1.75 \cdot 0.027 = 0.137 \text{ Ом.}$$

Еквівалентний опір якорного ланцюга визначимо за формулою:

$$R_E = R_{\partial\theta} + R_{mp}. \quad (3.36)$$

Підставимо числові значення:

$$R_E = 0.692 + 0.137 = 0.829 \text{ Ом.}$$

Еквівалентну індуктивність якорного ланцюга визначимо за формулою:

$$L_E = L_{\partial\theta} + L_p, \quad (3.37)$$

де  $L_{\partial\theta}$  — індуктивність якоря, Гн.

$$L_E = 0.0129 + 15.7 \cdot 10^{-6} = 0.014 \text{ Гн.}$$

Електромагнітна стала часу ланцюга:

$$T_E = L_E / R_E, \quad (3.38)$$

$$T_E = 0.014 / 0.829 = 0.017 \text{ с.}$$

Знайдемо приведений момент інерції механізму та двигуна  $J$ :

$$J = J_1 + J_2 \cdot (\omega_2 / \omega_1)^2, \quad (3.39)$$

де  $J_1$  — момент інерції, приведений до вала двигуна;  $J_2$  — момент інерції вала виконавчого механізму;  $(\omega_2 / \omega_1) = i$  — коефіцієнт передачі редуктора.

$$J_1 = J_{\partial\theta} + J_M + J_{Z1}, \quad (3.40)$$

де  $J_{\partial\partial} = 0.3 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  — момент інерції двигуна;  $J_M = 0.03 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  — момент інерції муфти;  $J_{Z1} = 11 \cdot 10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  — момент інерції вала шестерні Z1;

$$J_2 = J_{\text{вук}} + J_M + J_{Z2}, \quad (3.41)$$

де  $J_{Z2} = 86 \cdot 10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  — момент інерції вала шестерні Z2;  $J_{\text{вук}} = 2.6 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  — момент інерції виконавчого механізму.

Підставляємо дані у формули (3.40) — (3.41):

$$J_1 = 0.3 + 0.03 + 11 \cdot 10^{-6} = 0.33 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$J_2 = 2.6 + 0.03 + 86 \cdot 10^{-6} = 2.63 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Тоді:

$$J = 0.33 + 2.63 \cdot (1/4)^2 = 0.494 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Коефіцієнт пропорційності між струмом та моментом двигуна розрахуємо за формулою:

$$C_M = M_n / I_n, \quad (3.42)$$

де  $M_n$  — номінальний момент двигуна.

$$C_M = 152.8 / 36.36 = 4.202 \text{ (кг}\cdot\text{м/А)}.$$

Визначимо конструктивний коефіцієнт двигуна за формулою:

$$C_e = \frac{U_n - R_E \cdot I_n}{n_n}, \quad (3.43)$$

$$C_e = \frac{440 - 0.829 \cdot 36.36}{1000} = 0.41 \text{ (В}\cdot\text{хв/об)}. \quad (3.44)$$

Знайдемо числове значення електромагнітної сталої часу за формулою:

$$Tm = \frac{J \cdot R_E}{C_M \cdot C_e}. \quad (3.45)$$

Підставимо числові значення:

$$Tm = \frac{0.494 \cdot 0.829}{4.202 \cdot 0.41} = 0.238 \text{ с.}$$

Тепер знайдемо коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості за формулою:

$$K_{33} = \frac{U_{оп}}{n_{TP}}, \quad (3.46)$$

де  $n_n$  — номінальна швидкість двигуна, об/хв;  $n_{TT} = 1000$  об/хв — номінальна швидкість тахогенератора рівна  $n_n$

Підставляємо числові значення:

$$K_{33} = \frac{10}{1000} = 0,01.$$

Визначимо коефіцієнт підсилення випрямляча:

$$K_{BO} = \frac{U_{DB}}{U_{on\max}}, \quad (3.47)$$

Де  $U_{on\max} = 10$  В — опорна напруга схеми керування;

Підставивши у (3.47) дані одержимо:

$$K_{BO} = \frac{440}{10} = 44$$

Коефіцієнт датчика струму:

$$K_{\partial c} = U_{3c}/I_{пуск}, \quad (3.48)$$

де  $U_{3c} = 10$  В — максимальна напруга задатчика струму;  $I_{пуск} = 8 \cdot I_H$ .

Тоді:

$$K_{\partial c} = \frac{10}{8 \cdot 36,36} = 0,0344.$$

### 3.4.2. Розрахунок контура стабілізації за швидкістю

Рівняння механічної характеристики для розглядуваної системи можна отримати, якщо скласти систему рівняння:

$$\begin{aligned} U_{\partial x} &= U_{3c} - K_{33} \cdot \omega; & U_{d0} &= K_c \cdot U_{\partial x}; \\ U_{\partial \partial} &= U_{d0} - I \cdot R_{mp}; & U_{\partial \partial} &= E_{\partial \partial} + I \cdot R_{\partial \partial}; \\ E_{\partial \partial} &= C_E \cdot \omega; & M &= C_M \cdot I, \end{aligned} \quad (3.49)$$

де  $U_{3c}$  — задаюча напруга по швидкості, (0 ÷ 10 В);  $K_{33}$  — коефіцієнт зворотнього зв'язку по швидкості (0 ÷ 1);  $K_c$  — коефіцієнт підсилення системи;  $U_{d0}$  — напруга холостого ходу перетворювача;  $E_{\partial \partial}$ ,  $U_{\partial \partial}$ ,  $R_{\partial \partial}$  — ЕРС, напруга та активний опір двигуна;  $C_E$  — конструктивний коефіцієнт двигуна.

Розв'язуємо систему рівнянь (3.49):

$$\omega = \frac{E_{JB\%}}{I} = \frac{U_{JB\%} - I \cdot R_{JB\%}}{I} = \mathcal{K} \cdot U_{\dot{K}-} - \mathcal{K} \cdot U_{\dot{K}\dot{K}} \cdot \omega - \frac{M \cdot R_e}{C_M \cdot C_E}. \quad (3.50)$$

Перетворивши вираз (3.50) отримаємо:

$$\omega + K \cdot K_{\dot{K}\dot{K}} \cdot \omega = \mathcal{K} \cdot U_{\dot{K}-} - \frac{M \cdot R_e}{C_M \cdot C_E}. \quad (3.51)$$

Поділивши (3.51) на  $(1 + K \cdot K_{\dot{K}\dot{K}})$  одержимо:

$$\omega = \frac{K \cdot U_{\dot{K}-}}{1 + \mathcal{K} \cdot \mathcal{K}_{\dot{K}\dot{K}}} - \frac{M \cdot R_e}{C_M \cdot C_E \cdot (1 + K \cdot K_{\dot{K}\dot{K}})}, \quad (3.52)$$

$$\text{де } K = K_C / C_E. \quad (3.53)$$

Останній вираз (3.52) є механічною характеристикою замкненої системи. З цього виразу видно, що перший член правої частини виразу визначає кутову швидкість холостого ходу двигуна ( $\omega_0$ ), а другий — зміну кутової швидкості, обумовлену ростом навантаження:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (3.54)$$

Вираз для механічної характеристики розімкненої системи отримаємо з виразу (3.52), якщо прирівняти  $K_{\dot{K}\dot{K}} = 0$ :

$$\omega_{p\dot{H}\dot{K}} = K \cdot U_{\dot{K}-} - \frac{M \cdot R_e}{C_M \cdot C_E}. \quad (3.55)$$

Останній вираз легко перетворюється в вираз вихідної характеристики тиристорного перетворювача:

$$\omega_{pez} = U_{d0} \cdot \cos(\alpha) / C_E - I \cdot R_e / C_E. \quad (3.56)$$

Визначимо статизм системи:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\omega_0 - \omega_{nom}}{\omega_0} = M_{nom} \cdot \frac{R_e}{C_E \cdot C_M \cdot K \cdot U_{\dot{K}-}} = \\ &= \frac{M_{nom} \cdot R_e}{C_M \cdot K_C \cdot U_{\dot{K}-}} = \frac{I_n \cdot R_e}{K_C \cdot U_{\dot{K}-}} \end{aligned} \quad (3.57)$$

де  $K_C$  — добуток коефіцієнтів підсилення.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n_r / 60; \quad (3.58)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 1000 / 60 = 104.7 \text{ рад/с};$$

$$n_0 = U_r / C_e; \quad (3.59)$$

$$n_0 = 440/0.419 = 1049 \text{ об/хв};$$

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot n_0 / 60; \quad (3.60)$$

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot 1049 / 60 = 109.9 \text{ рад/с};$$

$$\delta = (\omega_0 - \omega) / \omega_0; \quad (3.61)$$

$$\delta = (109.9 - 104.7) / 109.9 = 0.047.$$

$$K_C = \frac{I_n \cdot R_e}{\delta \cdot U_{K-}}. \quad (3.62)$$

Прийmemo  $U_{zc} = U_{зстах} = 10 \text{ В}$ .

$$K_C = \frac{36.4 \cdot 0.567}{0.047 \cdot 10} = 44.$$

При  $U_{zc} = 1 \text{ В}$  отримаємо

$$\delta = \frac{I_n \cdot R_e}{K_C \cdot U_{K-}}, \quad (3.63)$$

$$\delta = \frac{36.36 \cdot 0.567}{44 \cdot 1} = 0.469 \text{ \%}.$$

Це забезпечує вимоги по стабілізації швидкодії.

### 3.5. Розробка принципової схеми приводу

#### 3.5.1. Вибір схеми регулятора швидкості

З розвитком мікросхемної техніки останнім часом регулятори систем керування ЕП частіше виконують на базі інтегральних операційних підсилювачів [25].

Цьому сприяє їх надійна та стабільна робота протягом довгого часу роботи, легкість налагоджування та обслуговування, порівняно мала ціна. Бажаний коефіцієнт підсилення та часова (частотна) характеристика легко відтворюються відомим способом – шляхом включення в ланцюг від'ємного зворотнього зв'язку частотно-залежних RC-ланцюгів. При цьому, якщо коефіцієнт підсилення самого операційного підсилювача на багато більше 1,

що на практиці легко здійснити, то підсилювальні та частотні властивості підсилювача зі зворотнім зв'язком не залежать від параметрів операційного підсилювача, а тільки від параметрів зворотнього зв'язку:

$$K_{vзз} = \frac{K_{von}}{1 + K_{von} \cdot \chi} \approx \frac{1}{\chi}, \quad (3.64)$$

де  $K_{vзз}$  — коефіцієнт підсилення (передачі) підсилювача зі зворотнім зв'язком;  $K_{von}$  — коефіцієнт підсилення операційного підсилювача;  $\chi$  — комплексний коефіцієнт зворотнього зв'язку.

На рис 3.11 приведена схема регуляторів швидкості (частоти обертання) та струму на операційних підсилювачах.

Мікросхема *K553УД1А* має наступні основні параметри [26]:

$$U_{живл} = 2 \times 15 \text{ В}; \quad U_{вихмах} = \pm 10 \text{ В};$$

$$U_{зм} = 7.5 \text{ мВ}; \quad K_p \geq 10^3;$$

$$R_{2n} \leq 2 \text{ кОм}; \quad R_{0вх} \geq 0.2 \text{ МОм}.$$

Розрахунок такого ПІ-регулятора зводиться до визначення сталої часу

$$T = R \cdot C, \quad (3.65)$$

$T_{0\omega} = R_{0\omega} \cdot C_{\omega}$  та  $T_{1\omega} = R_{\omega} \cdot C_{\omega}$ , а також  $K_y = R_{0\omega} / R_{\omega}$ . Діоди *VD1* та *VD2* потрібні для обмеження вхідної напруги.

Ланцюг резисторів *R2, R3, R4* принципової схеми АЕП.501.015.001 ЕЗ потрібен для компенсації можливого початкового  $U_{зм} = 7.5 \text{ мВ}$ . Регулятор швидкості виконаний на підсилювачі *DA1* з ланцюгом корекції *C4, R10*. Резистори *R1 ... R5, R19* забезпечують встановлення нуля підсилювача, ємність *C3* з'єднується паралельно з *C4*. Елементи *C1, C2, R11, R12* потрібні для стабільної роботи підсилювача. Резистори *R8, R9, R14* потрібні для введення зворотного зв'язку по швидкості (від тахогенератора).

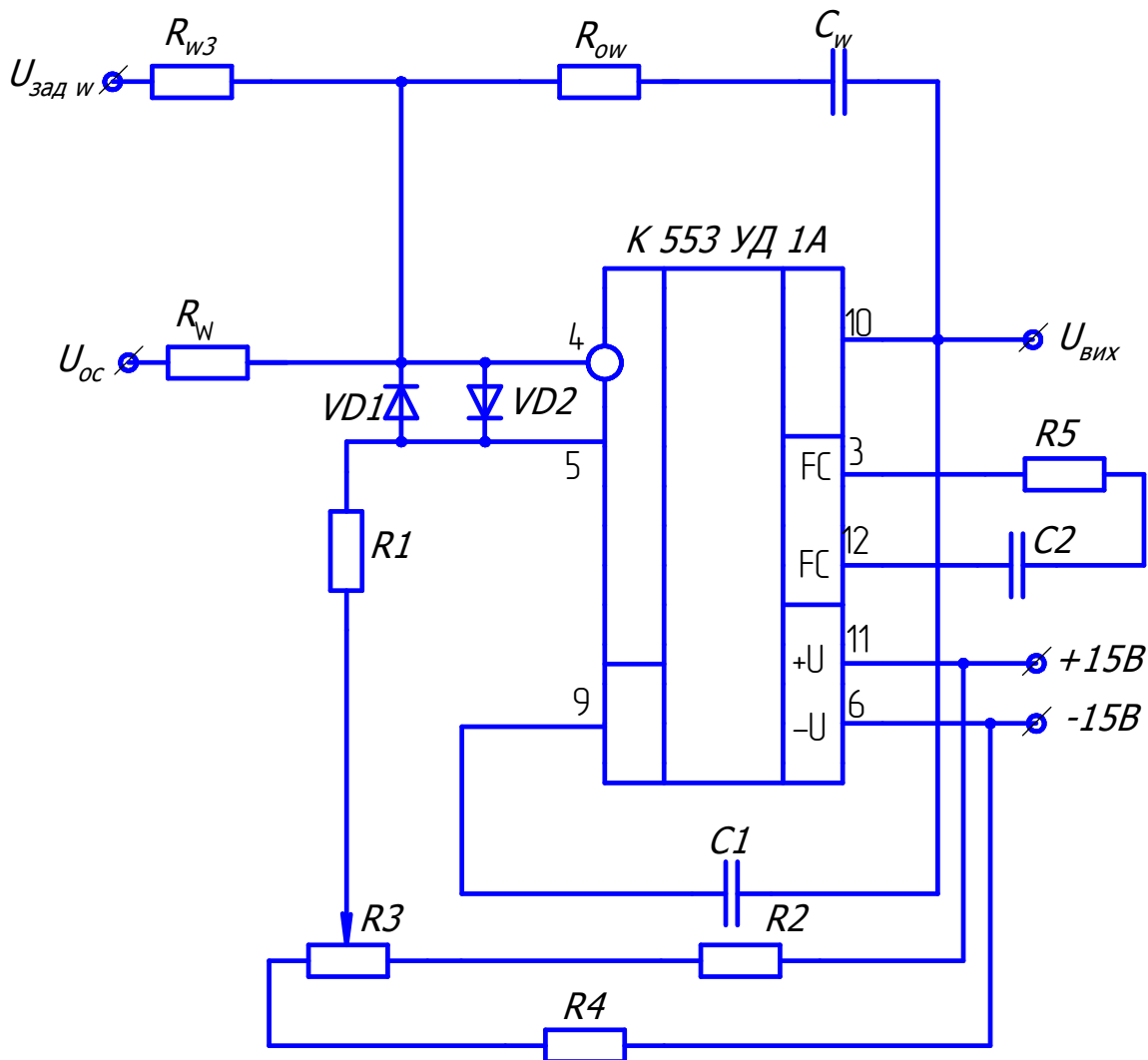


Рисунок 3.11 – Схема електрична принципова регулятора швидкості

Опір  $R_6$  потрібен для вводу задаючої напруги ( $10\text{ В}$ ). Опір  $R_7$  потрібен для вводу сигналу установочного переміщення.

### 3.5.2. Вибір регулятора струму

Вибрана раніше схема реверсивного перетворювача з окремим керуванням в порівнянні зі схемою реверсивного перетворювача з сумісним керуванням має наступні переваги:

- 1) відсутність урівняльних реакторів, що суттєво зменшує капітальні витрати та габарити;
- 2) відсутність урівняльного струму, який може бути досить великим.

Але недоліком окремого керування тиристорними групами є те, що під час реверсування необхідно проходити область переривистого струму вентильного

перетворювача. Через те, що коефіцієнт підсилення в цій області малий, то регулювання проходить повільно. Тому навіть розглянута схема ПІ-регулятора не підходить. Для усунення цього недоліка в схемі керування застосований адаптивний принцип керування струмом.

Відомо, що необхідність в адаптивному керуванні виникає, якщо який-небудь суттєвий параметр об'єкта регулювання змінюється в залежності від якоїсь характерної змінної стану системи.

Принцип адаптивного керування полягає в такій зміні параметрів регулятора, при якому на всій робочій області має місце оптимальне узгодження регулятора з об'єктом. На практиці адаптивне керування застосовується завжди, якщо параметри об'єкта змінюються більше ніж в 2 рази.

Принцип адаптації в нашому випадку полягає в тому, щоб малі сигнали зворотного зв'язку, що отримуються в зоні переривистих струмів, підсилювались значно більше, чим при великих струмах.

Іншими словами коефіцієнт підсилення регулятора струму повинен мати велике підсилення при малих сигналах, зменшуватись при підвищенні вхідного сигналу, тобто коефіцієнт передачі повинен мати арксинусну характеристику.

Така характеристика отримана за допомогою нелінійної ланки (НЛ), що ввімкнена послідовно з регулятором струму, який зібраний, як і регулятор швидкості, по схемі ПІ-регулятора (схема функціональна).

Адаптивний регулятор струму (АРС) дає можливість лінеаризувати структуру вентильного електропривода в режимі переривистих струмів та тим самим різко поліпшити динамічні властивості системи автоматичного регулювання.

АРС складається з регулятора струму (РС), нелінійної ланки (НЛ) та функціонального перетворювача ЕРС.

Керуюча напруга на виході АРС представляє суму сигналів, пропорційних величині струму та ЕРС двигуна

$$U_y = K_n \cdot U_{pc} + U_E.$$

Сигнал  $U_E$ , пропорційний ЕРС двигуна, формується за допомогою функціонального перетворювача ЕРС, який має арксинусну характеристику

$$U_E = \arcsin E.$$

Тут  $K_n$  — коефіцієнт передачі нелінійної ланки,  $E$  — ЕРС двигуна.

В однофазному приводі, де ЕРС пропорційна напрузі тахогенератора, на вхід функціонального перетворювача ЕРС можна подавати напругу  $TT$ .

Величина сигналу  $U_E$  встановлюється за допомогою резистора  $R_{16}$  при номінальній швидкості двигуна та холостому ході таким чином, щоб середнє значення вихідної напруги регулятора струму  $U_{pc}$  було рівне нулю.

При такому налагодженні сигнал  $U_{pc}$  стає пропорційним тільки струму двигуна, а тому обмеження його максимального рівня за допомогою резистора  $R_{33}$  забезпечує таке обмеження максимальної величини випрямленої напруги  $U_d - E = I_d \cdot R_e$ . Таким чином здійснюється обмеження максимально можливого струму двигуна (так називаємо упереджуюче струмообмеження).

Так як основне обмеження струму здійснюється шляхом обмеження сигналу задання струму ( $U_{pc}$ ) за допомогою резистора  $R_{17}$ , то допоміжне струмообмеження, як менш точне, використовується для обмеження величини першого викиду струму, якого основне струмообмеження не виключає.

Сам принцип адаптивного керування полягає в такій зміні параметрів регулятора, при якій у всій робочій області має місце оптимальне узгодження регулятора з об'єктом. Для цього необхідно розібратися в тому, що з себе представляє нелінійна ланка. Нелінійна ланка являє собою операційний підсилювачів, в ланцюг від'ємного зворотного зв'язку якого включено нелінійний ланцюг. Нелінійний ланцюг працює наступним чином.

При малому вхідному сигналі, а значить і при малому вихідному, всі діоди закриті. Коефіцієнт підсилення НЛ рівний коефіцієнту підсилення операційного підсилювача. При підвищенні  $U_y$  до величини, більшої величини прямої напруги на діоді,  $VD1$  відкривається та коефіцієнт підсилення стає рівним:

$$K_2 = (R_{35} + R_{36} + R_{37})/R_{34}. \quad (3.66)$$

При подальшому збільшенні вихідної напруги, а значить і падіння напруги на  $R_{35}$ , відкривається VD3, коефіцієнт підсилення стає рівним:

$$K_3 = (R_{36} + R_{37})/R_{34}. \quad (3.67)$$

При більшому вихідному сигналі коефіцієнт підсилення стає:

$$K_4 = R_{37}/R_{34}. \quad (3.68)$$

При зміні полярності сигналу таким же чином працюють діоди VD2, VD4, VD6. Перехідна характеристика НЛ отримана шляхом підстановки числових значень в формули (3.67), (3.68).

$$K_{u1} = 1000;$$

$$K_{u2} = (270 + 27)/4.7 = 60;$$

$$K_{u3} = 27/4.7 = 6.$$

Зі співвідношення:

$$K_{Ui} = \frac{\Delta U_{\text{вихі}}}{\Delta U_{\text{вхі}}} \quad (3.69)$$

витікає, що

$$\Delta U_{\text{вхі}} = \frac{\Delta U_{\text{вихі}}}{K_{Ui}}. \quad (3.70)$$

### 3.5.3. Синтез елементів регуляторів струму та швидкості

Розрахунок елементів проводиться по методиці налагодження комплектних тиристорних електроприводів БТУ 3601 при наступних умовах:

$$\begin{aligned} \omega_p &= 150 \text{ рад/с}; & A &= 0.823; \\ B &= 0.2; & C &= 0.7. \end{aligned}$$

Для регулятора струму (рис. 3.10) справедливі наступні співвідношення:

$$T_{oi} = T_e, \quad (3.71)$$

$$T_{oi} = R_{oi} \cdot C_i, \quad (3.72)$$

$$R_{oi} = \frac{\omega_p \cdot T_e \cdot R_e \cdot R_i}{C \cdot K_{\partial c} \cdot K_{\omega o}}. \quad (3.73)$$

В останньому виразі невідомо  $R_i$ . Воно дорівнює:

$$R_i = \frac{K_{\partial c} \cdot K_{\omega o} \cdot R_{iz}}{\omega_p \cdot T_e \cdot R_e \cdot \left( \frac{\omega_p}{C} - 1 \right)}. \quad (3.74)$$

Задавшись значенням  $R_{iz} = 47 \cdot 10^3 \text{ Ом}$  та підставивши числові значення, отримаємо:

$$R_i = \frac{0.0344 \cdot 44 \cdot 47 \cdot 10^3}{0.829 \cdot \left( \frac{150 \cdot 0.017}{0.7} - 1 \right)} = 146.2 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Величину  $R_{oi}$  визначим за формулою (3.73):

$$R_{oi} = \frac{150 \cdot 0.017 \cdot 0.829 \cdot 1.462}{0.7 \cdot 0.0344 \cdot 44} = 65.23 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

$$C_i = T_e / R_{oi}. \quad (3.75)$$

$$C_i = 0.017 / 65230 = 0.256 \cdot 10^{-6} = 0.256 \text{ мкФ}.$$

Для регулятора швидкості вірне наступне співвідношення:

$$R_{\omega\omega} = \frac{A \cdot T_m \cdot \omega_p^2 \cdot T_e \cdot R_{iz} \cdot R_{\omega}}{K_{\omega o} \cdot K_{\omega z} \cdot C^2 \cdot R_{oi}}. \quad (3.76)$$

В виразі (3.76) невідомо  $R_{\omega}$ . Визначимо його за формулою:

$$R_{\omega} = \frac{E_{TF}}{n_{TF}} \cdot \frac{n_n}{U_{\omega\omega}} \cdot R_{\omega\omega}. \quad (3.77)$$

Задамося  $U_{\omega\omega} = 10 \text{ В}$  та  $R_{\omega\omega} = 2.7 \text{ кОм}$  і розрахуємо  $R_{\omega}$ :

$$R_{\omega} = \frac{4}{1000} \cdot \frac{1000}{10} \cdot 2700 = 1080 \text{ Ом}.$$

Тепер розрахуємо  $R_{\omega\omega}$  за формулою (3.76);

$$R_{\omega\omega} = \frac{0.823 \cdot 0.238 \cdot 150^2 \cdot 0.017 \cdot 47 \cdot 10^3 \cdot 1080}{44 \cdot 0.01 \cdot 0.7^2 \cdot 6523} = 76.05 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Тоді:

$$C_{\omega} = \frac{A \cdot C}{B \cdot \omega_p \cdot R_{o\omega}}. \quad (3.78)$$

Підставляємо числові значення:

$$C_{\omega} = \frac{0.823 \cdot 0.7}{0.2 \cdot 150 \cdot 76.05 \cdot 10^3} = 2.528 \cdot 10^{-7} = 0.2528 \text{ мкФ}.$$

В принциповій схемі розраховані елементи мають наступні позначення:

$$\begin{aligned} R_{oi} &= R22 = 65.2 \text{ кОм}; & C_i &= C7 = 0.25 \text{ мкФ}; \\ R_{iz} &= R20 = 47 \text{ кОм}; & C_{\omega} &= C4 = 0.25 \text{ мкФ}; \\ R_{o\omega} &= R10 = 76 \text{ кОм}; & R_i &= R64 + R68 = 146.2 \text{ кОм}; \\ R_{\omega} &= R14 + R8 + R9 = 1.08 \text{ кОм}; & R_{\omega 3} &= R6 = 2.7 \text{ кОм}. \end{aligned}$$

ПІ-регулятор забезпечує регулювання без статичної похибки як стійких, так і нестійких об'єктів регулювання.

Для нього можна записати:

$$T_{oi} = R_{oi} \cdot C_i, \quad (3.79)$$

$$T_{li} = R_i \cdot C_i, \quad (3.80)$$

$$T_{o\omega} = R_{o\omega} \cdot C_{\omega}, \quad (3.81)$$

$$T_{1\omega} = R_{\omega} \cdot C_{\omega}, \quad (3.82)$$

Підставимо числові значення:

$$T_{oi} = R_{oi} \cdot C_i = 65.2 \cdot 10^3 \cdot 0.25 \cdot 10^{-6} = 0.017 \text{ с},$$

$$T_{li} = R_i \cdot C_i = 146.2 \cdot 10^3 \cdot 0.25 \cdot 10^{-6} = 0.037 \text{ с},$$

$$T_{o\omega} = R_{o\omega} \cdot C_{\omega} = 76 \cdot 10^3 \cdot 0.25 \cdot 10^{-6} = 0.019 \text{ с},$$

$$T_{1\omega} = 1.08 \cdot 10^3 \cdot 0.25 \cdot 10^{-6} = 0.273 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Тоді:

$$K_{\omega}(\omega) = \sqrt{\frac{R_{o\omega}^2 + \frac{1}{\omega^2 \cdot C_{\omega}^2}}{R_{\omega 3}^2}}, \quad (3.83)$$

$$K_i(\omega) = \sqrt{\frac{R_{oi}^2 + \frac{1}{\omega^2 \cdot C_i^2}}{R_{iz}^2}}. \quad (3.84)$$

У формули (3.83), (3.84) підставимо числові значення:

$$K_{\omega}(\omega) = \sqrt{\frac{(76 \cdot 10^3)^2 + \frac{1}{\omega^2 \cdot (0.25 \cdot 10^{-6})^2}}{(27 \cdot 10^3)^2}}, \quad (3.85)$$

$$K_i(\omega) = \sqrt{\frac{(65.2 \cdot 10^3)^2 + \frac{1}{\omega^2 \cdot (0.25 \cdot 10^{-6})^2}}{(47 \cdot 10^3)^2}}. \quad (3.86)$$

За допомогою оболонки Mathcad-2000 будемо графіки функцій  $K_{\omega}(\omega)$  та  $K_i(\omega)$  (рис. 3. 12, рис. 3.13).

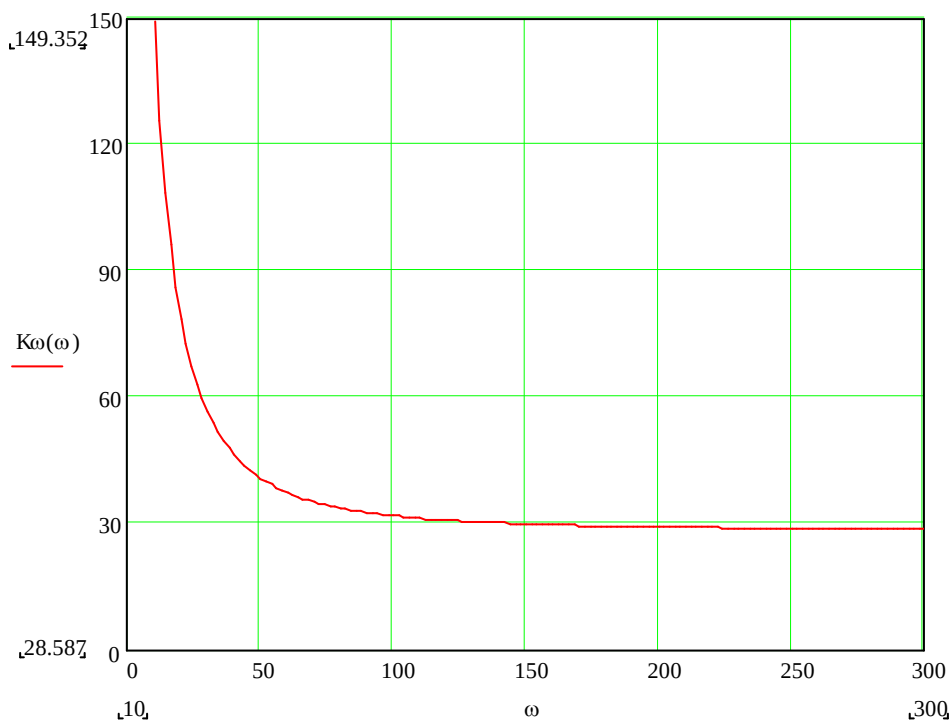


Рисунок 3.12 – Частотна характеристика ПІ-регулятора

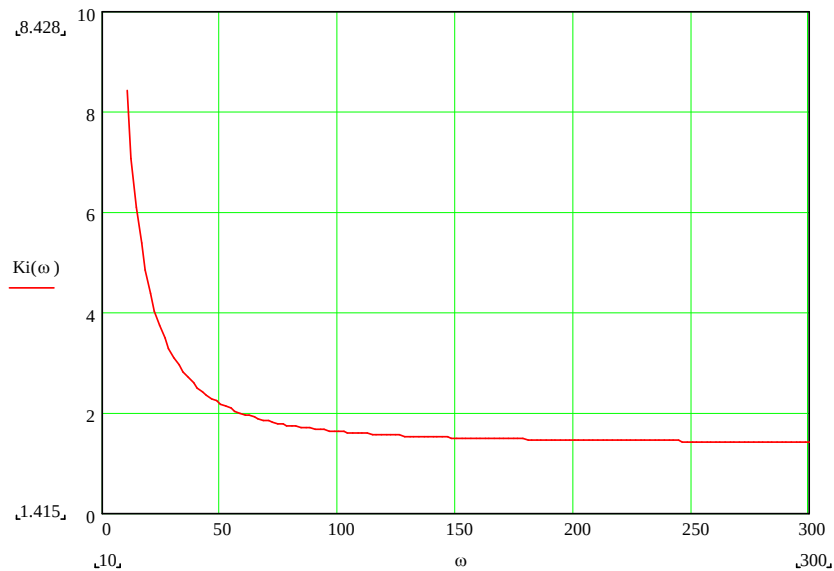


Рисунок 3.13 – Частотна характеристика регулятора струму

### 3.5.4. Розробка логічного пристрою

Другим недоліком окремого керування вентиляними групами є необхідність забезпечення безструмової паузи та відновлення їх запираючих властивостей. Безструмова пауза тривалістю  $(1 \div 10) \cdot 10^{-3} \text{ c}$  не погіршує суттєво динамічних властивостей електропривода, але спрощує його та знижує ціну. Для окремого керування комплектами силових вентилів в схемі застосовується логічний пристрій (ЛП).

Логічний пристрій реалізує керування силовими групами вентилів в реверсивних перетворювачах. ЛП повинен виконувати наступні функції:

- вибір потрібного напрямку роботи в залежності від знаку вхідного сигналу;
- включення відповідних ключів, що визначають потрібний напрям струму перетворювача;
- блокування входу ЛП сигналом датчика провідноостей тиристорів та керуючими імпульсами;
- створення витримки часу між зняттям імпульсів з раніше працювавшого комплекта та подачу їх на вступаючий в роботу комплект.

Функціональна схема логічного пристрою показана на рис. 3. 14. Вона містить в собі: нуль-орган (НО); елементи "Так-ні" (D1.1, D1.2) на вході тригера заданого положення (ТЗП); тригер ТЗП (D1.3, D1.4); елементи "Так-ні" (D2.1, D2.2) на вході тригера істинного положення (ТІП); ТІП (D2.3, D2.4); елементи співпадання на виході тригерів (D3.1, D3.2); елементи відліку витримки часу на перемикання (D3.3, C1, R3); елементи співпадання "Так-ні" (D3.4); загальні логічні ключі (КН, КВ).

Робота логічного пристрою пояснюється діаграмами напруг, що зображені на рис.3.15.

Сигнал  $U_{нл}$  потрапляє на вхід нуль-органа. При цьому від'ємний сигнал встановлює НО в положення "1", а додатній – в положення "0".

Якщо на блокуючому вході (13) маєсся сигнал "1" із датчика провідності тиристорів (ДП) та нема імпульсів з ФІ, то елементи співпадання D1.1, D1.2 дозволяють проходження сигналу НО на тригер заданого положення.

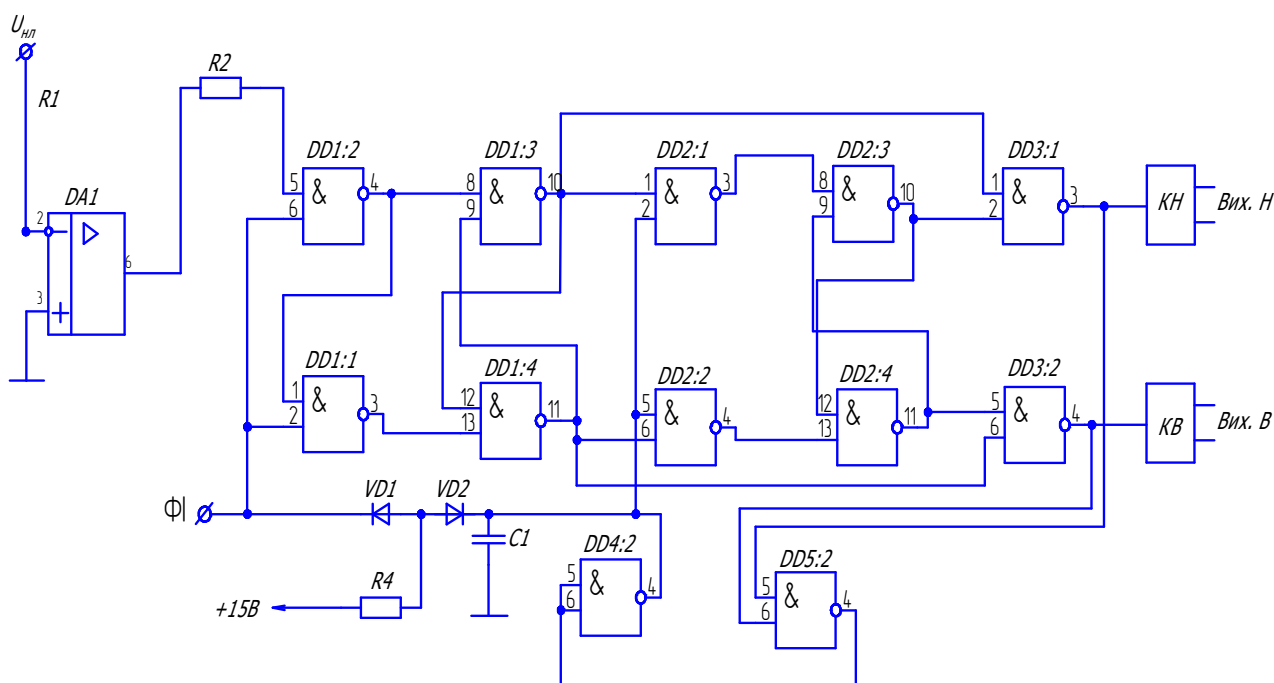


Рисунок 3. 14 – Функціональна схема логічного пристрою

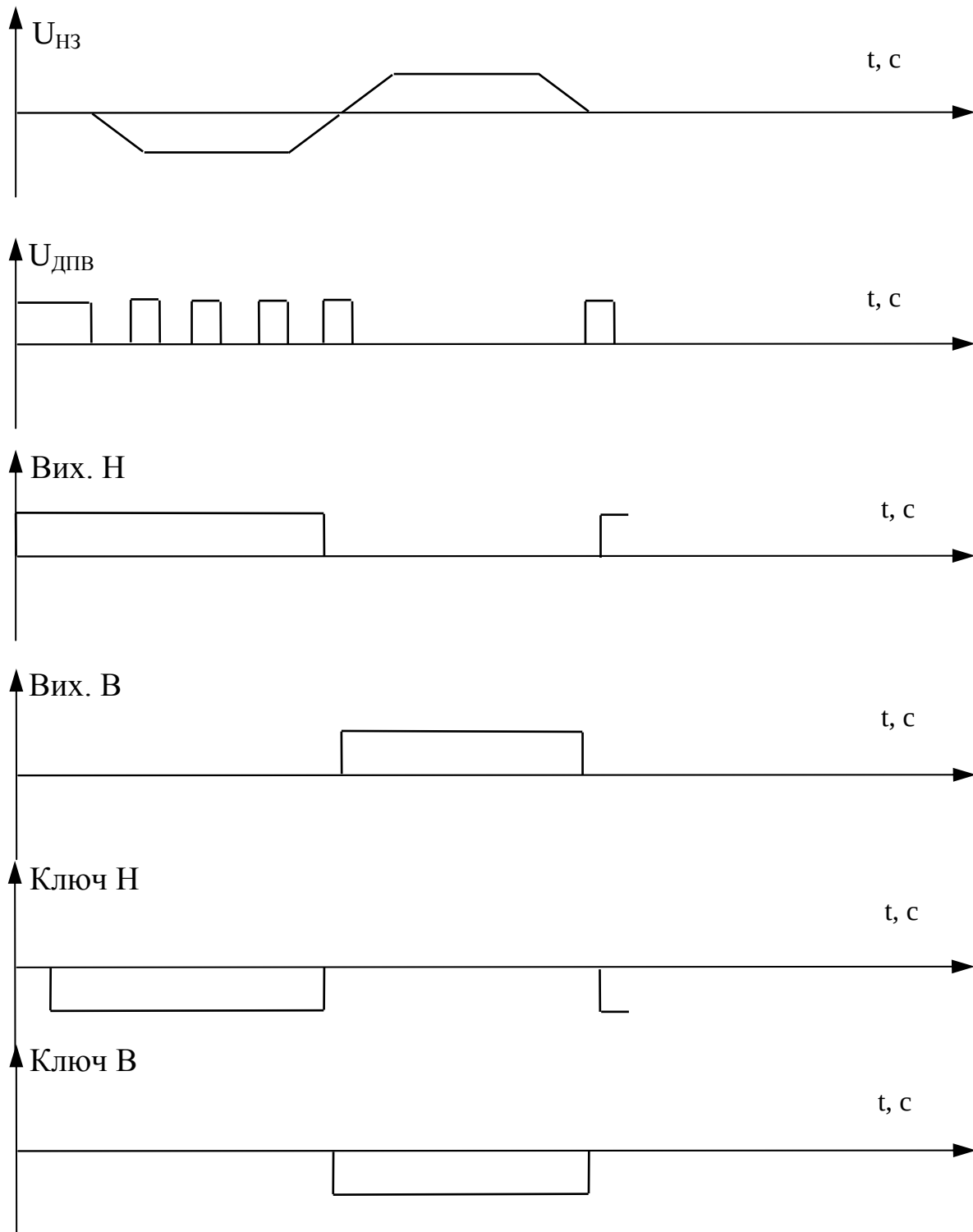


Рисунок 3.15 – Діаграми напруг логічного пристрою

Елементи співпадання D2.1, D2.2 при наявності на їх загальному вході сигналу "1" переводять тригер (ТІП) в положення відповідача тригеру ТЗП.

Виходи тригерів ТЗП та ТІП підключені на елементи співпадання D3.1, D3.2, які керують загальними ключами КН, КВ, а останні в свою чергу керують

трьома парами ключів: Н1, В1; Н2, В2; Н3, В3. Силові ключі Н1, В1 дозволяють видачу керуючих імпульсів на комплекти тиристорів "Назад", "Вперед".

Ключі Н2, В2 та Н3, В3 здійснюють переключення в ланцюгу зворотнього зв'язу по струму та на вході керуючого органа СІФК.

При наявності струму в силовому ланцюгу з ДП надходить на блокуючий вхід 13 сигнал "0", тим самим забороняючи проходження сигналу НО на вхід тригера ТЗП до зникнення струму.

При реверсуванні сигналу  $U_{пзв}$  реверсується сигнал на вході НО. Струм в силовому ланцюзі спадає. Та як тільки досягне нульового значення, то з ДП надходить сигнал "1", який дозволяє НО через елементи співпадання D1.1, D1.2 перевести тригер ТЗП в нове положення. На виході елементів співпадання D3.1, D3.2 настає відповідність (сигнал "1"), відключається ключ КН. Одночасно з виходу D3.4 знімається  $U_p$  та забороняється видача імпульсів ФІ і починається відлік витримки часу на приведення тригерів в нове положення. На вході D3.3 появляється сигнал "1", конденсатор С1 починає заряджатися, та як тільки напруга на ньому досягне рівня "1", то елементи співпадання D2.1, D2.2 переводять тригер ТП в положення, відповідаюче тригеру ТЗП. При цьому ввімкнеться ключ КВ. На виході елемента D3.4 з'явиться сигнал дозволу видачі імпульсів ФІ "1" тільки після включення одного з каналів пристрою.

Так після швидкого зняття імпульсів з каналу, який раніше працював, для надійності здійснюється короткочасова затримка видачі керуючих імпульсів по каналу нового напрямку струму, що виключає аварійне включення тиристорів через обмежену чутливість датчиків провідності.

Якщо під час відліку витримки на вхід НО надійде команда на ввімкнення в первинне положення, то тригер ТЗП повертається в первинне положення, відповідаюче тригеру ТП, та відразу дозволяє видачу керуючих імпульсів на тиристори попередньо обраного комплекту.

За даними досліджень, проведених в попередньому розділі, вибрано двигун постійного струму потужністю 16 кВт і реверсивний перетворювач на основі зустрічно-паралельної схеми з'єднання. Розраховано елементи силової частини та СІФК тиристорного перетворювача, а також енергетичні показники електропривода і тепловий режим роботи силових тиристорів. Коефіцієнт корисної дії розрахованої схеми складає 0.97.

Розроблено функціональну та структурну алгоритмічну схеми системи керування, для чого реалізовано двоконтурну схему підпорядкованого керування з контурами регулювання за струмом та швидкістю. Збурююча дія навантаження подана в виді струму збурення. Визначені всі параметри структурної алгоритмічної схеми системи. Статизм системи не перевищує 4.7%.

За розрахунковою схемою двоконтурної схеми вибрано тип мікросхем операційних підсилювачів та проведено розрахунок елементів схеми. Розраховано частотні характеристики схем ПІ-регуляторів струму і частоти. При побудові принципової схеми також проведено обґрунтування допоміжних вузлів схеми керування.

## 4 Дослідження алгоритмічної схеми керування

Дослідження ударно-вібраційного пристрою проводилось у середовищі імітаційного моделювання MATLAB – Simulink. З цією метою розроблено структурну схему електропривода ударно-вібраційного пристрою ущільнення суміші бетону.

Досліджено два варіанти структурної схеми: 1). Налагодженої на технічний оптимум; 2). Налагодженої на симетричний оптимум.

Проаналізуємо характеристики електропривода при налагодженні його на технічний оптимум

Роботу схеми дослідимо при різних формах зміни навантаження на валу двигуна: ступінчастої дії і періодичної імпульсної дії. Графік збурної дії ступінчастої форми зображений на рис. 4.1.

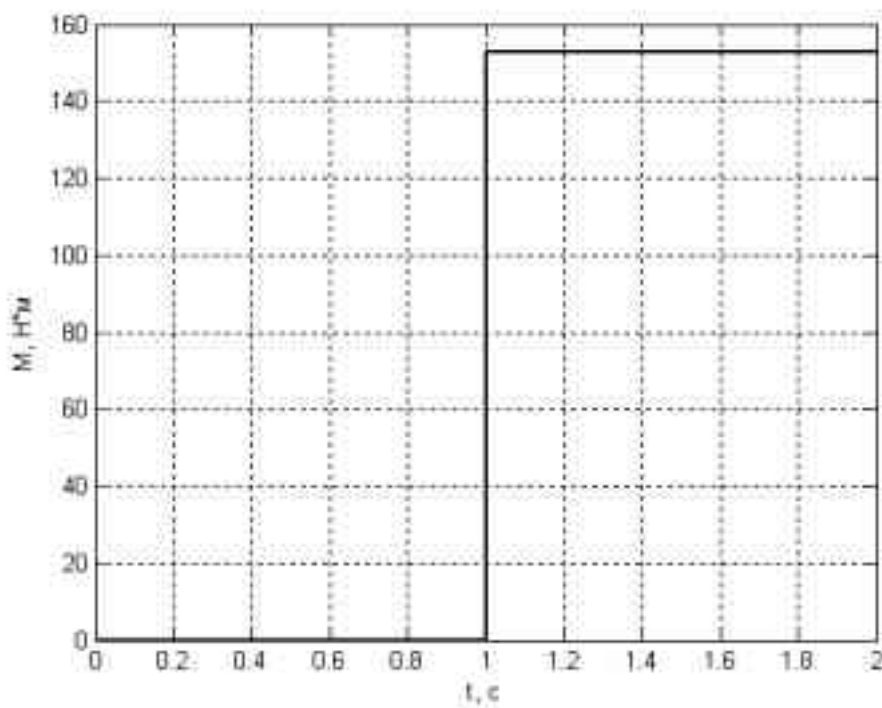


Рисунок 4.1 – Збурна дія системи ступінчастої форми

Моделювання зміни навантаження на вал двигуна за рахунок зміни моменту сил, діючих на кулачковий механізм, враховуючи форму та розміри кулачкового механізму, виконується за допомогою інерційної ланки, на вхід

якої подано періодичний імпульсний сигнал з частотою дії виконавчого механізму.

Діаграма збурної дії моменту сил для цього варіанта моделювання подана на рис. 4.2.

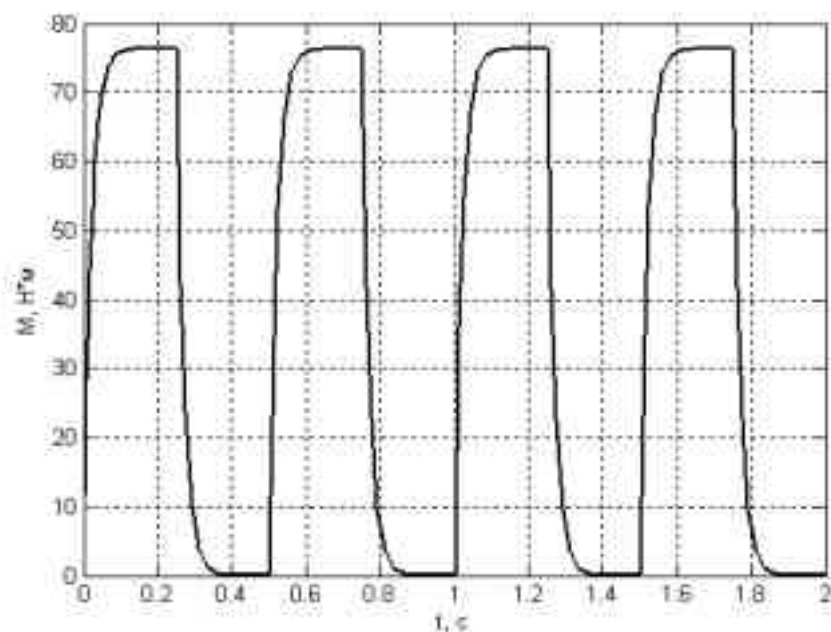


Рисунок 4.2 – Збурна дія системи періодичної імпульсної форми

Задатчик напруги керування виконаний за допомогою блока одиничної функції. Амплітуда задатчика установлювалась на рівні 2,5 В (рис. 4.3), що відповідає частоті обертання вала двигуна 250 об/хв.

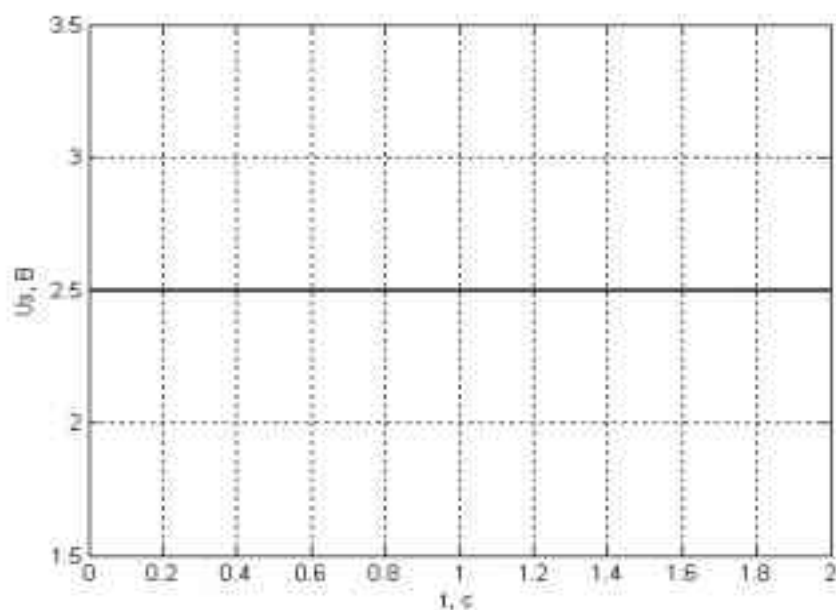


Рисунок 4.3 – Задаюча дія системи

Процес установлення струму в системі супроводжується викидом струму. Величина викиду струму обмежується струмообмежуючими реакторами і не перевищує як максимально допустимого для двигуна так і ударного струму для тиристорів. Залежність струму двигуна від часу для ступінчастої збурної дії приведена на рис. 4.4, а для періодичної імпульсної дії – на рис. 4.5.

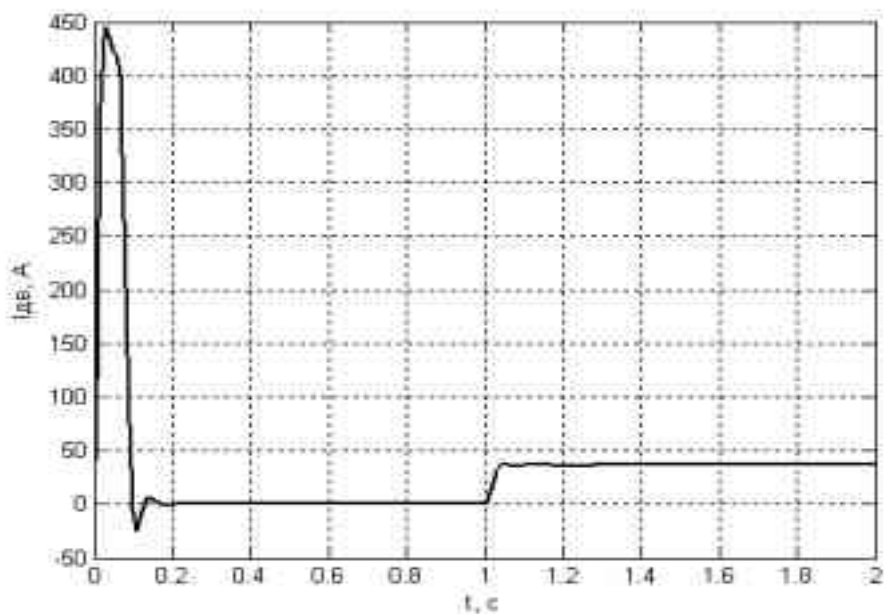


Рисунок 4.4 – Залежність струму двигуна від часу при навантаженні ступінчастої форми(система налагоджена на технічний оптимум)

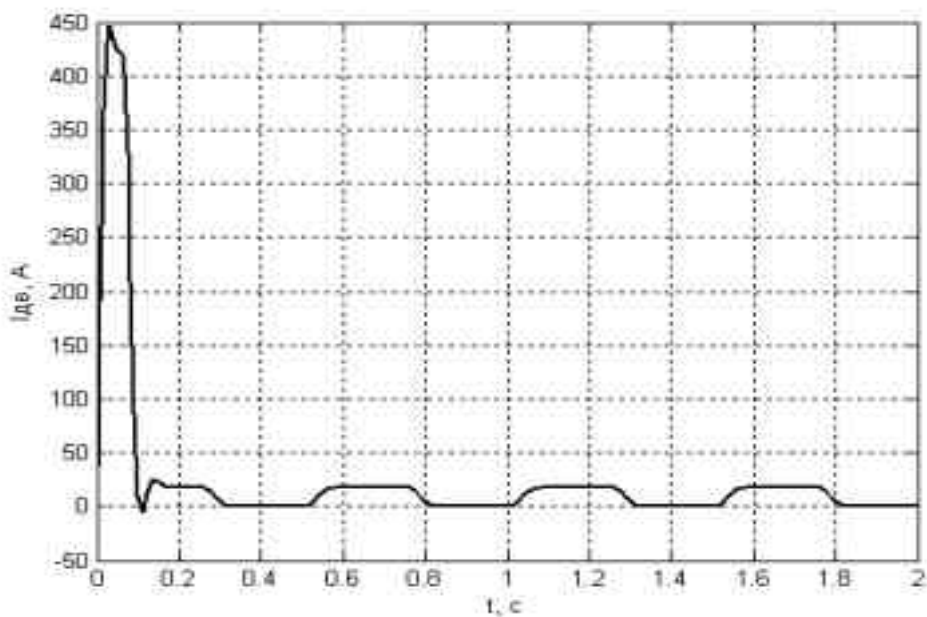


Рисунок 4.5 – Перехідний процес струму двигуна при періодичній імпульсній збурній дії(система налагоджена на технічний оптимум)

Зміну напруги на вході двигуна відображають графіки на рис. 4.6 і 4.7.

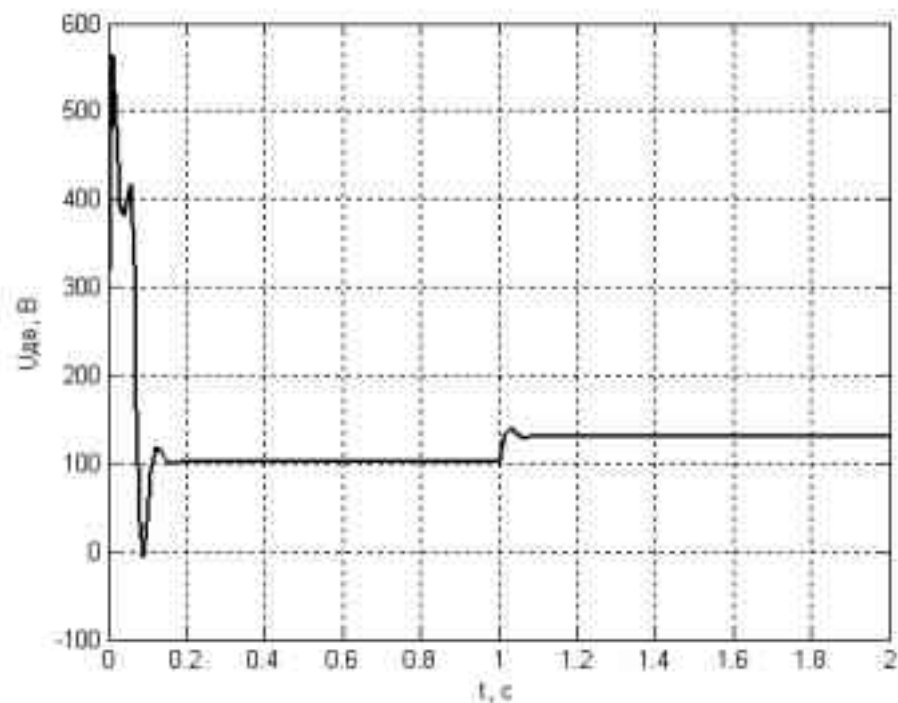


Рисунок 4.6 – Залежність напруги на вході двигуна від часу при навантаженні ступінчастої форми(система налагоджена на технічний оптимум)

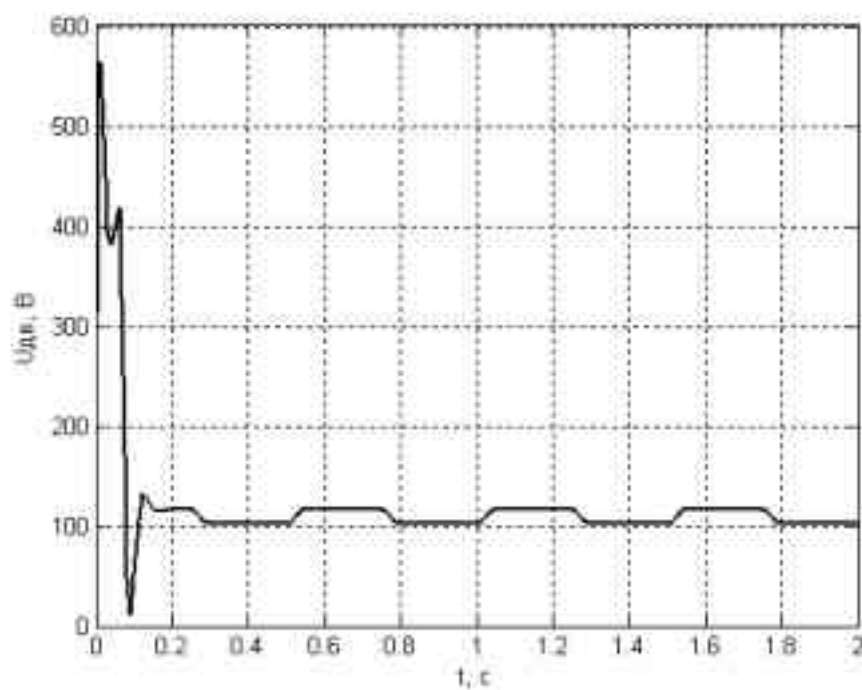


Рисунок 4.7 – Залежність напруги на вході двигуна від часу при періодичній імпульсній збурній дії(система налагоджена на технічний оптимум)

Перший графік описує перехідний процес напруги для збурної дії ступінчастої форми, а другий – для збурної дії періодичної імпульсної форми.

Перехідні процеси швидкості обертання вала двигуна при налагодженні системи на технічний оптимум подані на рис. 4.8 і 4.9.

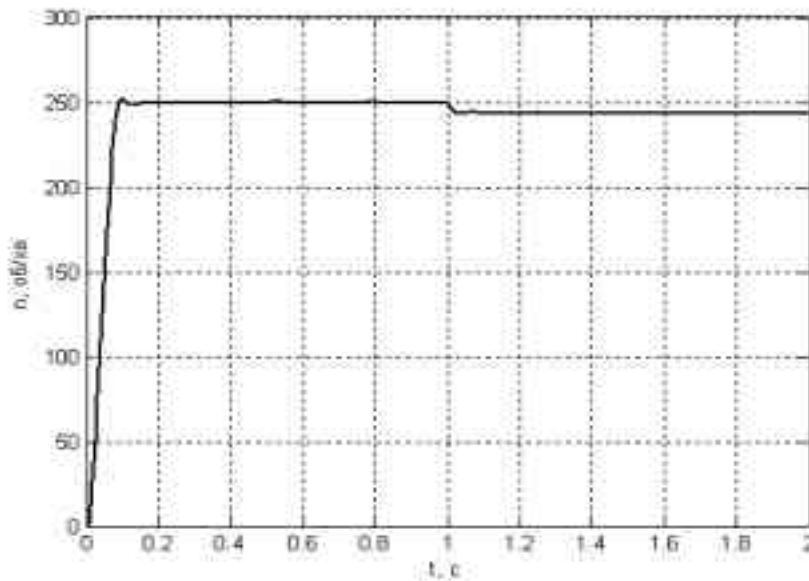


Рисунок 4.8 – Залежність швидкості обертання вала двигуна від часу при навантаженні ступінчастої форми(система налагоджена на технічний оптимум)

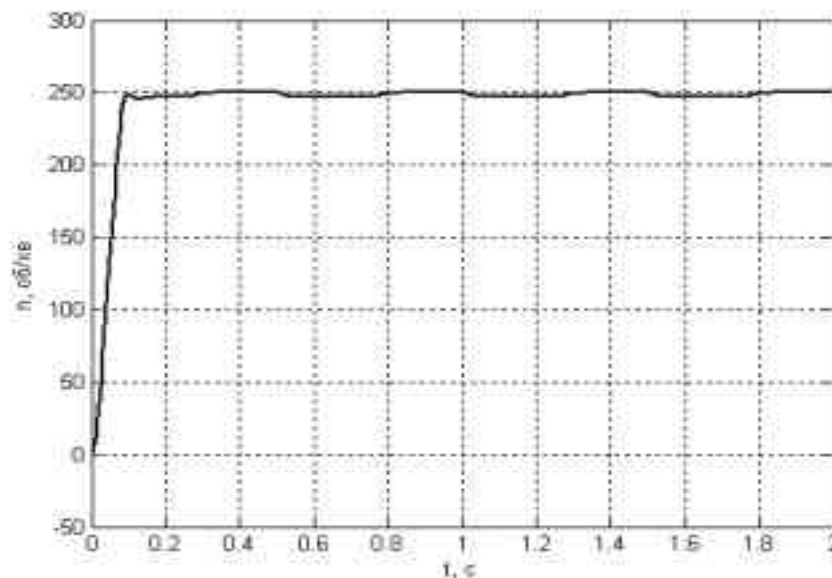


Рисунок 4.9 – Перехідний процес швидкості обертання вала двигуна при періодичній імпульсній збурній дії(система налагоджена на технічний оптимум)

При цьому перший графік ілюструє залежність частоти обертання вала двигуна від часу при навантаженні ступінчастої форми, а другий – при навантаженні періодичної імпульсної форми.

Перерегулювання за швидкістю обертання вала двигуна визначимо за формулою:

$$\sigma \% = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\text{уст}}}{\omega_{\text{уст}}} \cdot 100\%,$$

де  $\omega_{\max}$  – максимальне відхилення швидкості двигуна;  $\omega_{\text{уст}}$  – усталене значення швидкості обертання вала двигуна.

$$\omega_{\max} = \lim_{t \rightarrow \infty} (\omega(t)).$$

Для електропривода ударно-вібраційного пристрою ущільнення суміші бетону, налагодженого на технічний оптимум, перехідні процеси швидкості обертання вала двигуна мають такі характеристики:

- 1). Перерегулювання  $\sigma = 0\%$ ;
- 2). Час регулювання  $t_p = 0,12\text{с}$ ;
- 3). Статична похибка  $\Delta n = 4\text{ об/хв}$ .

Проаналізуємо характеристики електропривода при налагодженні його на симетричний оптимум

Уведення ПІ – ланки до складу регулятора швидкості дозволяє отримати другий варіант структурної схеми електропривода ударно-вібраційного пристрою ущільнення суміші бетону, який налагоджуємо на симетричний оптимум. Указане налагодження дозволяє звести статичну похибку практично до нульового значення.

Перехідний процес швидкості обертання вала двигуна при цьому буде мати вигляд як на рис. 4.10 (навантаження подається періодичної імпульсної форми).

Характеристики електропривода, налагодженого на симетричний оптимум (за результатами аналізу залежності  $n(t)$ ):

- 1). Перерегулювання  $\sigma = 5\%$ ;
- 2). Час регулювання  $t_p = 0,14\text{с}$ ;

3). Статична похибка  $\Delta n = 0$  об/хв.

Проведемо аналіз електроприводів, налагоджених на технічний і симетричний оптимуми, за критеріями стійкості.

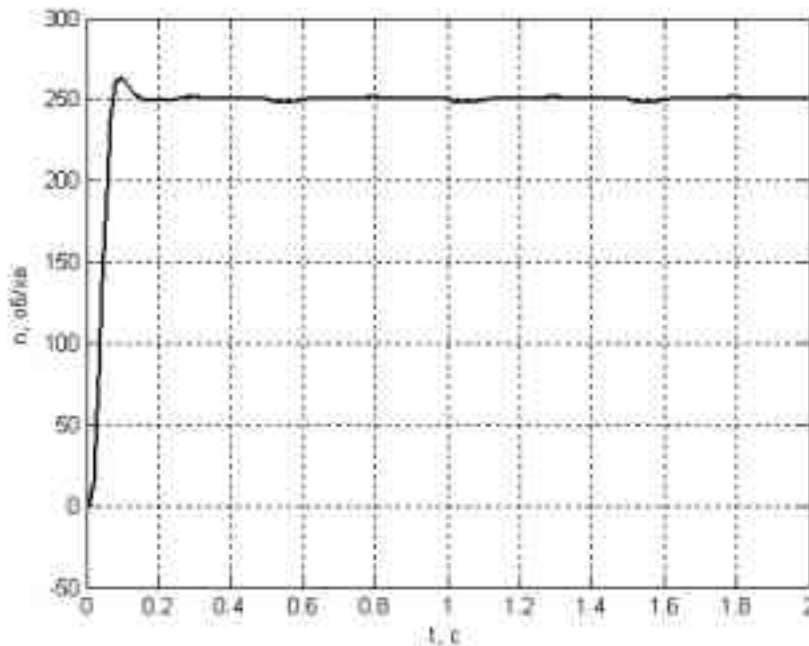


Рисунок 4.10 – Перехідний процес швидкості обертання вала двигуна при періодичній імпульсній збурній дії (система налагоджена на симетричний оптимум)

Розглянемо діаграму Боде (графіки ЛАЧХ і ФЧХ) для системи, налагодженої на технічний оптимум (рис. 4.11), і для системи, налагодженої на симетричний оптимум (рис. 4.12).

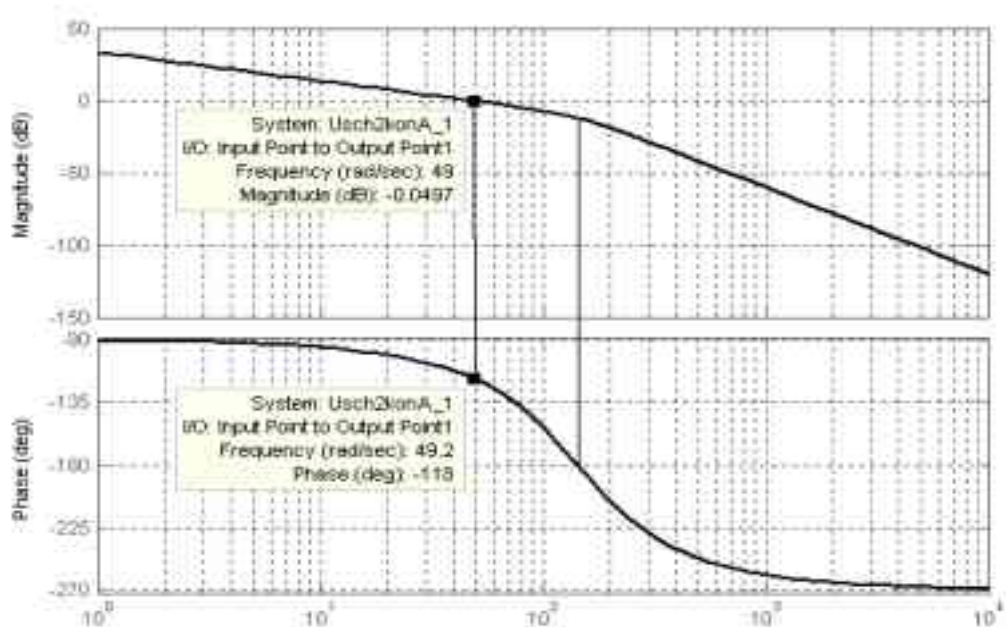


Рисунок 4.11 – Діаграма Бодє системи, налагодженої на технічний оптимум

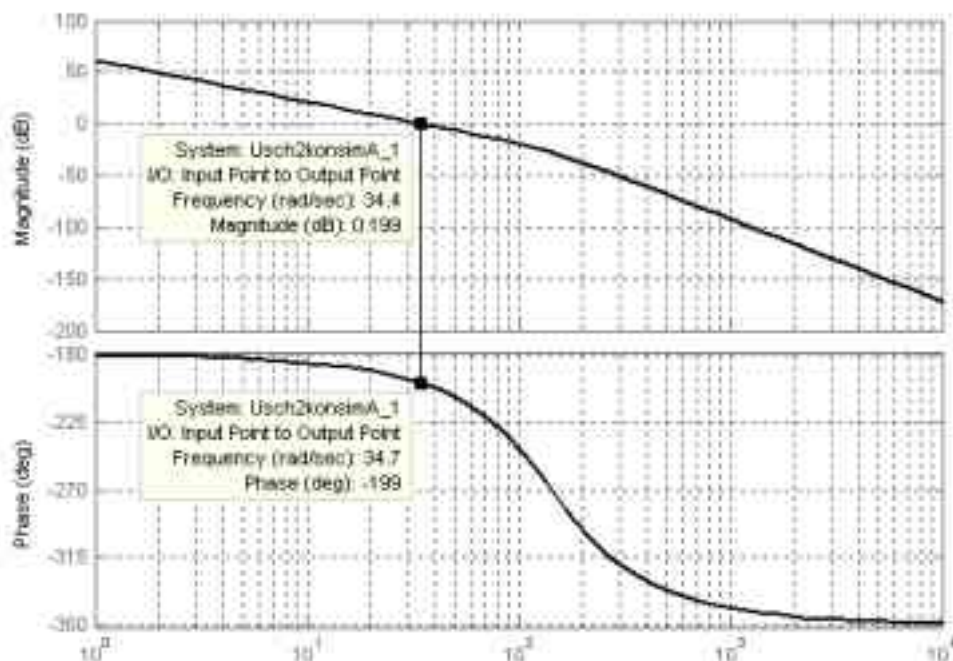


Рисунок 4.12 – Діаграма Бодє системи, налагодженої на симетричний оптимум

Запас за модулем визначається на частоті, при якій  $\arg G(j\omega) = -180^\circ$ . Позначимо цю частоту як  $\omega_1$ . Запас за модулем є величиною, оберненою  $|G(j\omega_1)|$ .

Оскільки  $\lg\left(\frac{1}{\alpha}\right) = -\lg\alpha$ , то запас за модулем можна також виразити в децибелах. Запас за модулем прийнято виражати в децибелах.

Запас за фазою визначається на частоті  $\omega_2$ , при якій  $|G(j\omega_2)|=1$  (або 0 дБ). Запас за фазою  $\varphi_m$  є різниця між  $G(j\omega_2)$  і  $-180^\circ$ . Таким чином, і запас за модулем, і запас за фазою можна визначити безпосередньо за діаграмою Боде для розімкнутої системи.

Розглянемо діаграму Найквіста для системи, налагодженої на технічний оптимум (рис. 4.13), і для системи, налагодженої на симетричний оптимум (рис. 4.14).

Запас за модулем. Якщо діаграма Найквіста для розімкнутої системи перетинає від'ємний напрямок дійсної осі в точці  $-\alpha$  і при цьому замкнута система стійка, то запас за модулем дорівнює  $1/\alpha$ . Якщо діаграма Найквіста має декілька перетинів від'ємного напрямку дійсної осі, то запас за модулем визначається за тією точкою, яка дає найменше значення  $1/\alpha$ .

Запас за фазою. Запас за фазою визначається найменшою величиною кута, на який необхідно повернути діаграму Найквіста, щоб вона пройшла через точку -1.

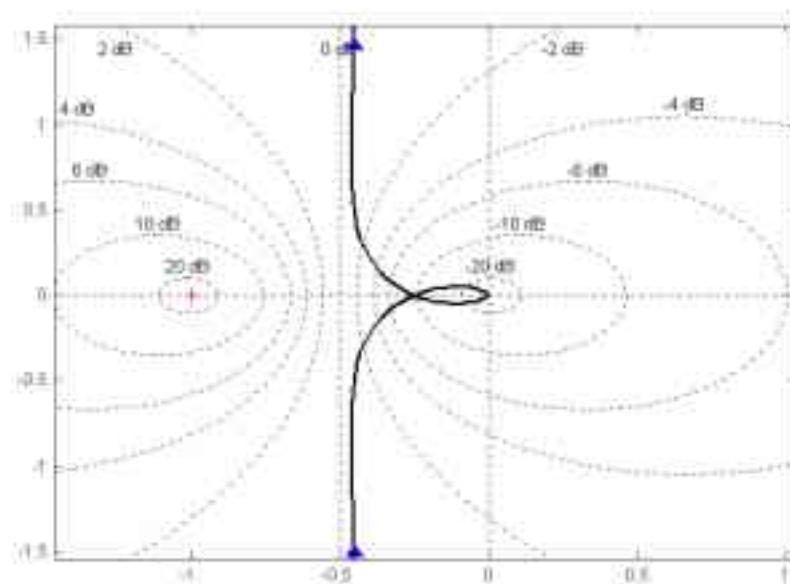


Рисунок 4.13 – Діаграма Найквіста системи, налагодженої на технічний оптимум

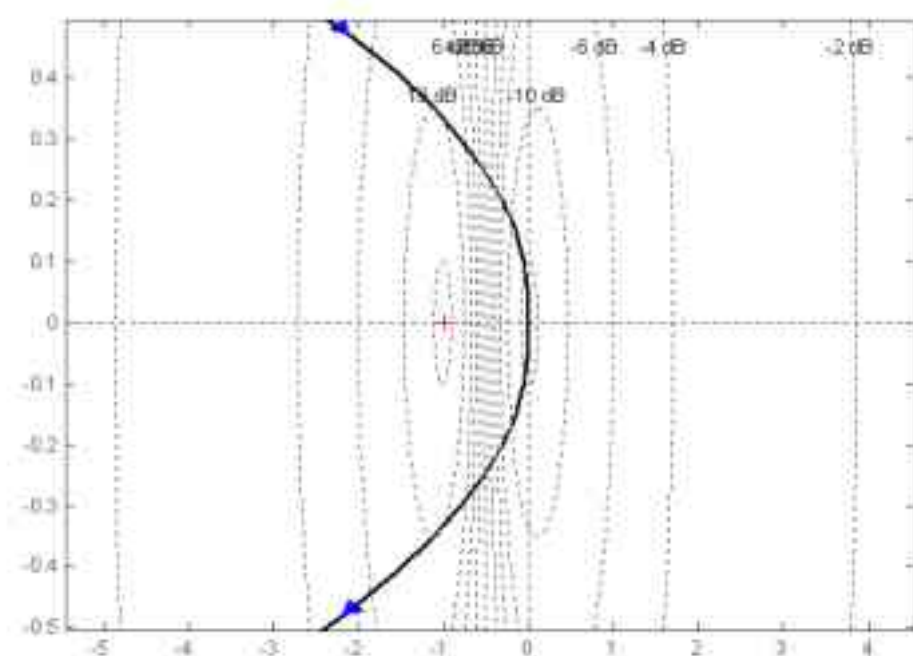


Рисунок 4.14 – Діаграма Найквіста системи, налагодженої на симетричний оптимум

З аналізу діаграм Найквіста ми також бачимо, що електропривод, налаштований як на технічний, так і на симетричний оптимум, має достатній запас стійкості як за модулем так і за фазою.

За результатами розробок, отриманих в попередньому розділі, в даному розділі проведено дослідження схеми керування електроприводом ущільнення бетонної суміші, для чого було використано інтегроване середовище MATLAB з використанням його розширення Simulink. Структурна алгоритмічна схема в зв'язку з цим доповнена допоміжними блоками. До неї також внесені блоки, які забезпечують динамічну зміну параметрів навантаження в процесі роботи системи.

Отримано діаграми роботи системи, за якими встановлено, що задаючи вхідний сигнал в межах  $(1 \div 10)$  В, маємо відповідну зміну частоти виконавчого механізму  $(100 \div 1000)$  ударів за хвилину.

Величина перерегулювання за частотою ударів при миттєвій зміні задаючої напруги не перевищує 5%, час регулювання становить 0.14 с. Збурна дія не призводить до помітних змін частоти.

Величина викиду струму обмежується струмообмежуючими реакторами і не перевищує як максимально допустимого для двигуна так і ударного струму для тиристорів.

Дослідження роботи системи проводилось не тільки за стрибкоподібною вхідною дією, а і за змінною напругою. При цьому процес устанавлення коливань майже закінчується за 0.2 с.

## ВИСНОВОК

Виробництво і використання легкобетонних виробів має важливе значення для зниження собівартості будівництва. Вирішення проблем, що стоять на шляху виготовлення таких виробів, тісно пов'язано із створенням ударно-вібраційних пристроїв та апаратури для їх керування. Конструктивні рішення багатьох проектів по створенню УВУ напрямлені на удосконалення окремих вузлів установок, однак недостатня вивченість впливу ударних імпульсів не дає можливості побудувати раціональні конструкції і керуючі пристрої. Існуючі аналітичні залежності для знаходження потужності двигуна не враховують широкого класу легкобетонних сумішей.

Для вирішення вказаних проблем було проведено дослідження динамічних параметрів ударно-вібраційних установок з використанням пружних прокладок. При цьому виявлено найбільш оптимальні межі висот скиду рухомої платформи, що становлять 5-10 мм. Для встановлення залежностей між потужністю двигуна, висотою вільного падіння форми, величиною навантаження і частотою ударів було проведено факторний експеримент на основі ортогонального центрального композиційного планування другого порядку з використанням інтегрованого середовища Mathcad Professional 2000, в результаті чого були побудовані необхідні залежності.

З метою більш ефективного керування процесом ущільнення бетонної суміші запропоновано оригінальні рішення побудови ударно-вібраційних пристроїв, а також сформульована необхідність використання систем керування електроприводом постійного струму. Для керування процесом ущільнення було використано двигун постійного струму потужністю 16 кВт і реверсивний перетворювач на основі зустрічно-паралельної схеми з'єднання. Розраховано елементи силової частини та показники електропривода і тепловий режим силових тиристорів. Розроблено функціональну, структурну та принципові схеми системи керування, реалізованої за двоконтурною схемою

підпорядкованого керування. Проведено детальне дослідження схеми керування електроприводом ущільнення бетонної суміші з використання інтегрованого середовища MATLAB.

За отриманими діаграмами встановлено, що при зміні вхідного сигналу в межах (1 - 10) В, зміна частоти виконавчого механізму лежить в межах (100 - 1000) ударів за хвилину. Час регулювання складає 0.14 с при зміні збурюючої дії, яка відповідає межам навантаження (0 - 12) т і висоті вільного падіння формуючого зразка (3-10) мм. Результатами досліджень підтверджено досягнення поставленої мети і технічного завдання за вхідними даними.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гусев Б.В. Основные направления развития вибрационного способа уплотнения бетонных смесей // Технология производства сборного железобетона в условиях низких температур: Сб. статей. Вып. 175/2.— Днепропетровск, 1975.— с. 3-23.
2. Олехнович К.А. Оптимизация динамических параметров ударно-встряхивающих установок / Полтав. инж.-строит. институт.— Полтава, 1980.— 9 с.—Деп. в Укр. НИИНТИ 9 октября 1980, № 2391, Реф. опубл. в рефер. журнале “Механика”, 1981, № 2, реф. № 2А77.
3. Ударно-встряхивающая установка грузоподъемностью 12 т / Паспорт УВУ-12А1-00.00.000 ПС ТУ, 1986.
4. Моделювання електромеханічних систем: Підручник/ Чорний О.П., ЛуговойА.В., Д.Й. Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В.— Кременчук, 2001.— 376с.
5. Дворкін Л.Й. Бетони спеціального призначення. К.: Кондор, 2018. 354 с.
6. Хоменко О.Г. Залізобетонні конструкції: навчальний електронний посібник. Глухів. 2017. – 208 с.
7. Технологія будівельного виробництва: навчальний посібник / В.М. Гуденко. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 481 с.
8. Гоц В.І. Бетонні та будівельні розчини: Підручник. — К., ТОВ УВПК «ЕксОб», К., КНУБА, 2003. — 472 с.
9. Волянський О. А. Технологія бетонних та залізобетонних конструкцій: Підручник у 2 ч.. — К.,Вища школа, 1994. — Ч 1. Технологія бетону. — 271 с.
10. Русанова Н. Г., Пальчик П. П., Рижанкова Л. М. Технологія бетонних та залізобетонних конструкцій: Підручник у 2 ч.. — К., Вища школа, 1994. — Ч 2. Виготовлення бетонних і залізобетонних конструкцій. — 334 с.
11. Кривенко П.В. Будівельне матеріалознавство / П.В.Кривенко. – К., 2004. – 659 с.

12. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : Підручник. — 2-ге вид., перероб. і доп. — К.: Либідь, 2007. — 656 с.
13. Зайцев Г.Ф. Теорія автоматичного управління / Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Бріцький О.І.; за ред. проф. Г.Ф. Зайцева. - К.: Техніка, 2002.- 688с.
14. Васюра А.С. Елементи та пристрої систем управління і автоматики. /Навчальний посібник. - Вінниця:, ВДТУ, 1999. – 157 с.
15. Власюк Г. Г. Автоматика та електропривод техніки реєстрації інформації/ Г.Г. Власюк, В.М. Співак, К.О. Трапезон, В.Б. Швайченко.- Київ:, Освіта України, 2010, 293с.
16. Глушков В.М. Введение в АСУ. К.: Техніка, 1974. 320 с.
17. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів : УАД, 2006. 336 с.
18. Босов Є. П , Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-є вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
19. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
20. Конституція України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80> (дата звернення: 05.11.2022).
21. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 17.11.2022).
22. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 26.10.2022).
23. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 09.11.2022).

## **Додаток А**

### **ОХОРОНА ПРАЦІ**

В Україні приділяється велика увага охороні праці, оскільки вона є запорукою забезпечення конституційного права громадян щодо збереження життя і здоров'я в процесі праці й невичерпним джерелом підвищення продуктивності праці.

Охорона праці (ОП) – система законодавчих актів, соціально-економічних, організаційних, технічних, гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці [17].

#### **А.1 Законодавчі та нормативні акти України з питань охорони праці**

Правовою основою законодавства щодо ОП є загальні Закони України, а також спеціальні юридичні акти. До загальних Законів, що визначають основні положення про ОП належать [17, 18, 19]: Конституція України [20]; Закони України: «Про охорону праці» [21]; «Основи законодавства України про охорону здоров'я»; «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення»; «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку»; «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування»; Кодекс цивільного захисту України (КЦЗ) [22]; Кодекс законів про працю України (КЗпП) [23].

Спеціальними юридичними актами в галузі ОП є: Міжгалузеві та галузеві нормативно-правові акти з питань охорони праці (НПАОП); Міждержавні стандарти Системи стандартів безпеки праці (ГОСТ ССБТ); Державні стандарти України (ДСТУ) з питань безпеки праці; Постанови та положення (норми), затверджені Міністерством охорони здоров'я України, стосовно окремих факторів виробничого середовища, певних технологічних процесів і конкретних виробництв; Нормативні акти з ОП, що діють в межах об'єкта господарювання

(підприємства); інші нормативно-правові акти, якими встановлюються загальнообов'язкові правила (норми) [17, 18].

В ст. 43 Конституції України записано [20]: «Кожен має право на працю, що включає можливість заробляти собі на життя працею, яку він вільно обирає або на яку вільно погоджується», «Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату, не нижчу від визначеної законом», «Використання праці жінок і неповнолітніх на небезпечних для їхнього здоров'я роботах забороняється».

Кожен, хто працює, має право на відпочинок (ст. 45 Конституції України) [20]. Це право забезпечується наданням днів щотижневого відпочинку, а також оплачуваної щорічної відпустки, встановленням скороченого робочого дня щодо окремих професій і виробництв, скороченої тривалості роботи у нічний час.

У тексті ст. 46 Конституції України вказано на те, що громадяни мають право на забезпечення їх у разі повної, часткової або тимчасової втрати працездатності, втрати годувальника, безробіття з незалежних від них обставин, а також у старості та в інших випадках, передбачених законом [20].

Одним з основоположних законодавчих документів в галузі ОП є Закон України «Про охорону праці» [21], дія якого поширюється на всі підприємства, установи і організації, незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на усіх громадян, що працюють, а також залучені до праці на цих підприємствах. Цей закон Верховна Рада України прийняла 14 жовтня 1992 року і кілька разів ще переглядала, вносячи правки й уточнення. Він визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян на охорону їх життя та здоров'я в процесі трудової діяльності. Також регулює, за участю відповідних державних органів, відносини між власником підприємства, установи, організації, або уповноваженим ним органом, та працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

Особливістю Закону України «Про охорону праці» є високий рівень прав та гарантій робітників. Вперше в історії держави робітникам було надано право відмовлення від роботи у випадку існування на виробництві загрози для їхнього здоров'я та життя. Розширено права робітників у соціальних гарантіях відшкодування збитків, у випадку пошкодження їх здоров'я на виробництві. Передбачається нова система фінансування охорони праці, формування системи страхування від нещасних випадків та профзахворювань, посилюється централізація планування. Договірне регулювання з питань охорони праці поставлено на високий рівень, передбачається участь громадських інституцій у цьому процесі. За державою закріплено функції управління охороною праці.

Закон України «Основи законодавства України про охорону здоров'я» [18] регламентує, з метою охорони здоров'я населення, організацію профілактичних медичних оглядів неповнолітніх, вагітних жінок, працівників підприємств, установ і організацій з шкідливими і небезпечними умовами праці, військовослужбовців та осіб, професійна чи інша діяльність яких пов'язана з обслуговуванням населення або підвищеною небезпекою для оточуючих.

Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» зобов'язує підприємства, установи та організації усувати, за поданням відповідних осіб державної санітарно-епідемічної служби, від роботи, навчання, відвідування дошкільних закладів осіб, які є носіями збудників інфекційних захворювань, хворих на небезпечні для оточуючих інфекційні хвороби, або осіб, які були в контакті з такими хворими, з виплатою у встановленому порядку допомоги з соціального страхування, а також осіб, які ухиляються від обов'язкового медичного огляду, або щеплення проти інфекцій, перелік яких встановлюється центральним органом виконавчої влади в галузі охорони здоров'я [17].

Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» був прийнятий 8 лютого 1995 року. В ньому відображені основні принципи державної політики в сфері використання ядерної енергії та матеріалів, а також

щодо основ радіаційного захисту населення [17, 19], зокрема:

- пріоритет захисту людини та навколишнього середовища від впливу іонізуючого випромінювання;
- забезпечення безпеки під час використання ядерної енергії;
- відкритість і доступність інформації, пов'язаної з використанням ядерної енергії тощо.

Основні принципи соціального страхування від нещасного випадку викладені у Законі України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування» [17, 18]:

- обов'язковий порядок страхування працівників, а також учнів та студентів навчальних закладів;
- сплату страхових внесків тільки роботодавцями;
- своєчасне та повне відшкодування шкоди потерпілим;
- надання державних гарантій застрахованим у реалізації їх прав і т. ін.

КЦЗ України [22], прийнятий 02 жовтня 2012 року об'єднав у собі правові норми кількох Законів України, що діяли раніше і часто дублювали окремі положення один одного, або, навіть, мали протиріччя. Зокрема: «Про пожежну безпеку», «Про цивільну оборону України», «Про аварійно-рятувальні служби», «Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру» та ін. Він регулює відносини, пов'язані із захистом населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій, реагування на них та визначає повноваження органів державної влади, права та обов'язки юридичних та фізичних осіб у цій галузі, незалежно від виду їх діяльності та форм власності чи громадянства.

Основні положення законодавства про працю, що регулюють всі ситуації, які виникають у трудових відносинах між роботодавцями і працівниками, відображені у КЗпП України. В КЗпП зазначені наступні положення [23]: забороняється залучати до надурочних робіт вагітних жінок і жінок, які мають дітей віком до трьох років (ст. 176), а також осіб молодших 18 років (ст. 192);

забороняється застосовування праці жінок на важких роботах і роботах із шкідливими або небезпечними умовами праці, а також на підземних роботах (ст. 174). В ст. 153 КЗпП зазначено про обов'язковість створення безпечних та нешкідливих умов праці. Кодекс спрямований на всебічну охорону трудових прав працюючих.

НПАОП, які до початку 2003 року носили назву Державні нормативні акти про охорону праці (ДНАОП), – це правила, норми, регламенти, положення, інструкції та інші документи, яким надано чинність правових норм, обов'язкових для виконання [17]. Серед них можна виділити ті, що найчастіше пов'язані з нашою професійною діяльністю [18]: Правила пожежної безпеки в Україні, Будівельні норми і правила (БНіП), Державні санітарні правила і норми (ДСанПіН), Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок, Порядок розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві, Порядок розслідування та обліку нещасних випадків невиробничого характеру та ін. Реєстр ДНАОП, що діють на території України, виданий Держнаглядохоронпраці в 1997 році. З 2003 року ведеться реєстр НПАОП, який постійно поповнюється.

ГОСТ ССБТ колишнього СРСР застосовуються на території України до їх заміни іншими нормативними документами, якщо вони не суперечать чинному законодавству України [17, 18]. Поступово їм на заміну вводяться національні державні стандарти – ДСТУ. ДСТУ почали розроблятися з 1992 року [18, 19].

Серед юридичних документів, затверджених МОЗ України, можна виділити наступні [18]: Положення про медичний огляд працівників певних категорій, Перелік важких робіт і робіт з шкідливими і небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці неповнолітніх, Граничні норми підймання і переміщення важких речей жінками, Граничні норми підймання і переміщення важких речей неповнолітніми та ін.

Власники підприємств, установ, організацій або уповноважені ними органи розробляють на основі НПАОП і затверджують власні положення, інструкції або інші нормативні акти про охорону праці, що діють у межах об'єкта господарювання (підприємства). Вони є обов'язковими для керівників, спеціалістів і робітників підприємства, а також для тимчасово залучених до праці осіб, студентів та учнів профтехучилищ, які проходять виробничу практику на підприємствах [17]. Держава Україна виступає гарантом створення безпечних і нешкідливих умов праці для працівників підприємств, установ і організацій всіх форм власності, тому нормативні акти, що діють в межах об'єкта господарювання (підприємства), та інші нормативно-правові акти можуть відхилятися від НПАОП лише у бік покращення умов для працюючого [17, 18].

#### **А.2 Шкідливі та небезпечні фактори виробництва, що впливають на обслуговуючий персонал при експлуатації ударно-вібраційного пристрою, та заходи щодо їх усунення або зменшення**

Технологічні процеси та керування ними у кар'єрах та на збагачувальних фабриках, де найчастіше застосовуються ударно-вібраційні пристрої, повинні здійснюватись у відповідності з технологічними інструкціями, які розроблені та затверджені головним інженером підприємства. Інструкції по безпечному веденню технологічних процесів складають, у відповідності з вимогами спеціальних правил та в залежності від складу обладнання і виду технологічного процесу. Безпека персоналу, зайнятого в цехах дроблення і подрібнення, забезпечується виконанням правил техніки безпеки і вимог санітарно-технічних норм, що передбачають необхідну температуру, вологість, освітленість і допустиму запиленість робочих місць.

При запуску машин та агрегатів має бути забезпечена повна безпека обслуговуючого персоналу. Для цього перед запуском обладнання в роботу

подається попереджувальний сигнал. З порядком подачі сигналів повинні бути ознайомлені всі працівники підприємства. Умовні позначення сигналів, що подаються, вивішуються на видному місці.

Значна кількість реагентів, які застосовуються у кар'єрах та на збагачувальних фабриках, відносяться до токсичних та отруйних речовин, що, проникаючи в організм людини через органи дихання, шлунково-кишковий тракт та шкіряні покрови, навіть в невеликих кількостях, порушують нормальну життєздатність організму та викликають отруєння. До таких реагентів відносяться: дітіосфат, вапняк, кальцинована сода, кремнієфторовий натрій, соляна та сірчана кислоти і т. д. При роботі з ними слід одягати спеціальний одяг, окуляри та гумові рукавиці. Руки потрібно змащувати нейтральним кремом з додаванням 3-5 % борної кислоти.

В робочій зоні в цехах дроблення і подрібнення підтримують температуру не нижче 14°C, а вологість повітря не вище 80 %. Норма штучної освітленості підлоги виробничих приміщень дробильно-сортувальних фабрик не нижче 10-20 люкс. Гранично допустимі концентрації: пилу нетоксичного – 10 мг/м<sup>3</sup>, пилу нетоксичного з вмістом кварцу більше 10 % – 2,0 мг/м<sup>3</sup>, марганцю та його з'єднання – 0,3 мг/м<sup>3</sup>, вапняку – 6,0 мг/м<sup>3</sup>.

Норми освітленості витримуються потрібним розміщенням у виробничому приміщенні достатньої кількості світильників. Норми запиленості забезпечуються шляхом застосування спеціальних заходів щодо знепилення дробильних цехів, де дроблення матеріалу на суху і транспортування продуктів дроблення супроводжується великим пиловиділенням. До таких заходів відносяться: обприскування матеріалу та герметизація місць пиловиділення з улаштуванням витяжної вентиляції, що відсмоктує запилене повітря.

Місцями пиловиділення є: приймальні воронки чи бункера, робочій простір дробарок, місця вивантаження дроблених продуктів із дробарок і місця завантаження на стрічкові конвеєри, грохоти, жолоби та живильники. У всіх цих

місцях пиловиділення відбувається внаслідок падіння з тієї чи іншої висоти кускуватого матеріалу, а потоки повітря, що при цьому виникають і рухаються в одному напрямку з потоком матеріалу, розповсюджують пил, що утворюється по виробничим приміщенням.

Безпечність і зручність обслуговування та ремонту обладнання забезпечуються улаштуванням огорожень навколо частин, що рухаються та майданчиків обслуговування, достатніх за розмірами для роботи експлуатаційного і ремонтного персоналу, розміщення на них запасних частин і знятих при ремонті деталей. Всі майданчики на висоті більше 0,3 м над підлогою повинні мати міцні перила висотою не менше 1 м. В нижній частині перила повинні мати суцільний бортик висотою не менше 180 мм. Розміщення машин в цехах має допускати вільне переміщення обслуговуючого персоналу, можливість доставки запасних частин до місць ремонту і прибирання демонтованих деталей. Труби і жолоба повинні бути вкриті під майданчиками чи підняті над проходами на висоту не нижче, ніж на 2 м від підлоги. Для ремонтних робіт і транспортування важких частин в цехах дроблення і подрібнення завжди монтуються мостові крани.

Згідно з правилами безпеки, всі частини машин, що рухаються чи становлять небезпеку, повинні огорожуватись. В цехах дроблення і подрібнення огорожуються: привод і передача всіх машин, приймальні і завантажувальні отвори дробарок і млинів, головні та хвостові барабани живильників і конвеєрів, конвеєри з боків по всій довжині.

Ширина головних проходів в цехах повинна бути не менше 1,5 м.

Ширина проходів після встановлення огорожень біля крупного устаткування і обладнання, що потребує уважного спостереження (дробарок, млинів, класифікаторів) повинна бути не менше 1,5 м, біля іншого устаткування – не менше 1 м, біля нерухомих частин устаткування – не менше 0,8 м.

Ширина проходів вздовж стрічкових конвеєрів шириною до 600 мм повинна бути не менше 0,8 м і вздовж більш широких конвеєрів – не менше

1,1 м. Приводні станції і кінцеві частини конвеєрів повинні мати доступ з трьох сторін, при ширині проходів не менше 1 м.

Пускові пристрої повинні розташовуватись таким чином, щоб особа, що вмикає машину в роботу, переглядала всі робочі майданчики і проходи біля машини, яка запускається у роботу. При централізованому розміщенні пускових пристроїв, машини вмикаються в роботу тільки за сигналом, що подається з місця установки машини. Вимикачі для зупинки завжди розташовуються біля самої машини. До пускових пристроїв довгих стрічкових конвеєрів рекомендується прикріплювати і протягувати вздовж конвеєра сталевий трос (діаметром 5-6 мм). З його допомогою можна зупинити конвеєр з будь-якої точки.

Більшість виробничих приміщень відноситься до особливо небезпечних, у відношенні ураження електричним струмом, тому при обслуговуванні електроустановок важливо дотримуватись правил безпеки. Безпека експлуатації електричного обладнання забезпечується організаційними та технічними заходами захисту.

До організаційних заходів захисту від ураження електричним струмом відносять: професійно-технічну підготовку висококваліфікованого електротехнічного персоналу та виконання організаційних і технічних заходів, які передбачені Правилами технічної експлуатації і техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів.

До технічних заходів захисту відносять: контроль за ізоляцією електрообладнання; забезпечення недосяжності струмопровідних частин; захисне заземлення; захисне занулення; захисне відключення; застосування електрообладнання, яке відповідає специфічним умовам навколишнього середовища.

Для усунення небезпеки, яка виникає при дотику до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою, згідно діючих правил, всі оголені струмопровідні частини, напруга яких перевищує безпечну, повинні бути закриті

або огорожені. Крім того, повинні бути передбачені надійні автоматичні блокування, які вимикають електроустановку. Якщо її струмопровідні частини стають досяжні дотику.

На збагачувальних фабриках зазвичай застосовують захисні заземлення. Для забезпечення цього важливого заходу безпеки металеві частини електроустановок, які в нормальному стані не знаходяться під напругою, з'єднують із заземленням – провідниками, які розташовані безпосередньо в землі. Послідовне приєднання заземлюючих об'єктів до заземленої мережі не допускається. Заземлюючий провід повинен бути захищений від механічних пошкоджень, а місця з'єднання проводів – досяжні для оглядів та випробувань.

На всіх збагачувальних фабриках із вибухо- та пожежонебезпечними виробництвами повинні бути розроблені та затверджені головним інженером інструкції, в яких містяться відомості про засоби та способи пожежогасіння у виробничих приміщеннях, складах та зовнішніх установках.

В залежності від виду пожежі, небезпеки технологічного процесу, площі виробничого приміщення та виду джерела спалахування, існує багато засобів пожежогасіння. Головний засіб гасіння пожеж – вода, але потрібно пам'ятати, що її не можна використовувати для ліквідації джерел спалахування на ділянках, які знаходяться під напругою.

Правила техніки безпеки розробляються для кожного робочого місця. Робітники повинні вивчити ці інструкції і виконувати всі вимоги, викладені в них. Спостереження за виконанням інструкцій з техніки безпеки здійснюється інженерно-технічним персоналом, бригадирами й майстрами. В інструкціях, окрім загальних вимог щодо безпеки роботи, викладаються і специфічні правила безпеки, які відносяться до конкретного робочого місця.

Загальні вимоги правил безпеки роботи в цехах дроблення і подрібнення.

1. Не працювати на пошкодженому устаткуванні чи пошкодженим інструментом. Не працювати при знятих огороженнях з частин, що рухаються.

2. Не змащувати машини на ходу, якщо маслянки не винесені в безпечне

місце. Не знімати ремені на ходу.

3. Не чистити устаткування на ходу. Не очищувати на ходу опорні ролики і кінцеві барабани ланцюгових конвеєрів.

4. Не підлазити під нижню гілку ланцюгового конвеєра і не перелазити через нього під час зупинки і на ходу. Для переходу через довгі конвеєри встановлювати спеціальні містки.

5. Спецодяг повинен бути зручний і відповідати особливостям роботи на даному робочому місці.

6. Не вмикати устаткування під час його ремонту. Електродвигуни машин, що ремонтуються, повинні бути знеструмлені, а пускові прилади закриті на замок, ключ від якого повинен знаходитись у бригадира, який відповідає за ремонт. На пускові прилади повинні бути повішані попереджувачі плакати.

7. Шуровку руди в бункерах проводити тільки крізь шуровочні отвори. Опускання людей в бункера забороняється. Для усунення зависання руди бункери повинні обладнуватися електровібраторами.

8. При грохоченні крупно кускової руди воронки перед грохотами повинні мати захисні кожухи, що не допускають випадкового викиду кусків.

9. При всіх зупинках вібраційних грохотів перевіряти закріплення дебалансних грузів на дисках.

Для забезпечення надійного захисту персоналу від враження електричним струмом обов'язково необхідно передбачити наявність захисного заземлення.

### **А.3 Розрахунок захисного заземлення електродвигуна ударно-вібраційного пристрою**

Захисним заземленням називається навмисне електричне з'єднання з землею або її еквівалентом металевих не струмопровідних частин, які можуть опинитися під напругою внаслідок порушення ізоляції електроустановки [17, 18, 19].

Призначення заземлення – перетворення замикання на корпус у замикання на землю, з метою зниження напруги дотику та напруги кроку до безпечних величин.

При наявності захисного заземлення опір замкненої на корпус фази визначається, в основному, опором заземлювального пристрою. Заземлювальний пристрій складається з металевих заземлювачів та з'єднувальних провідників.

За розташуванням відносно корпусів електрообладнання розрізняють два види заземлення – виносне і контурне [19]. При виносному заземленні заземлювачі винесені за межі майданчика, на якому знаходиться електрообладнання. Електроди контурного заземлювального пристрою розташовані по контуру майданчика або приміщення, на якому знаходяться електрообладнання, а також всередині.

В будівлях прокладають магістраль заземлення вздовж стін, до котрої під'єднують паралельно заземлюванні проводи від корпусів електрообладнання, що підлягає заземленню. Послідовне під'єднання заземлювального обладнання не допускається [18, 19].

Метою захисного заземлення є пониження потенціалу на корпусі електрообладнання до безпечної величини.

Сфера застосування: 3-фазні 3-провідні ланки з ізолюованою нейтраллю, однофазні 2-провідні ізолюовані від землі, а також постійного струму з ізолюованою середньою точкою обмоток джерела струму, мережі понад 1000 В змінного та постійного струму з будь яким режимом нейтралі.

Захисному заземленню підлягає обладнання в приміщеннях із підвищеною небезпекою та особливо небезпечних, а також у зовнішніх установках. Заземлення є обов'язковим при номінальній напрузі вище 42 В змінного струму та 110 В постійного струму, в приміщеннях без підвищеної небезпеки та напрузі 380 В та вище при змінному струмі та 440 В і вище при постійному струмі. У вибухонебезпечних приміщеннях заземлення виконується, незалежно від величини напруги.

Заземлюючий пристрій складається із заземлювачів та з'єднувальних провідників.

Розрізняють заземлювачі природні (конструкції з металу, які знаходяться в землі) та штучні.

Мета розрахунку захисного заземлення полягає у визначенні кількості електродів-заземлювачів і з'єднувальних провідників, їхніх розмірів та схеми розміщення в землі, при яких опір заземлювального пристрою розтікання струму або напруги дотику, при замиканні фази на заземленій частині електроустановки, не перевищує допустимих значень.

Початкові данні для розрахунку:

1. Об'єкт, що захищається – електродвигун.
2. Тип об'єкту, що захищається – стаціонарний.
3. Напруга мережі  $U = 380$  В.
4. Тип заземлюючого пристрою – вертикальний.
5. Розміри вертикальних заземлювачів (див. *рис. 1*):
  - довжина  $\ell_{\text{г}} = 3$  м;
  - діаметр труби  $d = 0,04$  м;
  - товщина стінки труби  $\delta_{\text{м}} = 0,0035$  м;
  - довжина  $L_{\text{з}} = L_{\text{з.с}}$  – згідно з розрахунками, м;
  - ширина з'єднувальної стрічки  $b_{\text{с}} = 0,04$  м.
6. Глибина закладання вертикального заземлення  $h_{\text{г}} = 0,8$  м, горизонтального –  $h_{\text{з}} = 0,8$  м.
7. Розташування заземлення попередньо приймаємо за чотирикутним контуром при кількості стержнів від 4 до 100 та в один ряд при кількості стержнів від 2 до 20.
8. Ґрунт – супісок; склад – однорідний, сухий.
9. Кліматична зона – IV.
10. Необхідно розрахувати захисне заземлення пристрою з електричним

опором  $R_3 \leq 4 \text{ Ом}$ .

### Розрахунок:

Визначаємо  $R_\epsilon$  – опір розтікання струму в одному вертикальному заземлювачі:

$$R_\epsilon = \frac{\rho}{2\pi \cdot \ell_\epsilon} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot \ell_\epsilon}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H + \ell_\epsilon}{4H - \ell_\epsilon} \right), \quad (\text{A.1})$$

де  $\rho$  – розрахунковий питомий опір ґрунту для вертикального заземлювача (визначається за формулою  $\rho = \rho_{\text{изм}} \cdot \Psi_3$ ).

$\rho_{\text{изм}}$  – питомий опір ґрунту (за табл. 7.2 з джерела [19] приймаємо  $\rho_{\text{изм}} = 300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ );

$\Psi_3$  – коефіцієнт сезонності для вертикального заземлювача (для даної кліматичної зони IV, згідно табл. 7.4 [19],  $\Psi_3 = 1,5$ )

Тоді  $\rho = 300 \cdot 1,5 = 450 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Також розрахуємо  $H$  – відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювача (рис. А.1):

$$H = h_\epsilon + \frac{\ell_\epsilon}{2}. \quad (\text{A.2})$$

Підставивши у співвідношення (А.2) числові значення, одержуємо:

$$H = 0,8 + \frac{3}{2} = 2,3 \text{ м.}$$

Тобто тепер, визначивши всі необхідні для розрахунку складові, можемо обрахувати:

$$R_\epsilon = \frac{450}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot 3}{0,04} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) = 127,7 \text{ Ом.}$$

Знаходимо  $n_{\text{ор}}$  – орієнтовану кількість заземлювачів, без врахування коефіцієнту використання  $\eta_\epsilon$ :

$$n_{op} = \frac{R_{\epsilon}}{R_{\partial} \cdot \eta_{\epsilon}}, \quad (A.3)$$

де  $\eta_{\epsilon}$  – розрахунковий коефіцієнт,  $\eta_{\epsilon} = 1$ .

Тоді  $n_{op} = \frac{127,7}{4 \cdot 1} = 31,93$ .

Для подальших розрахунків приймаємо  $n_{op} = 32$  шт.

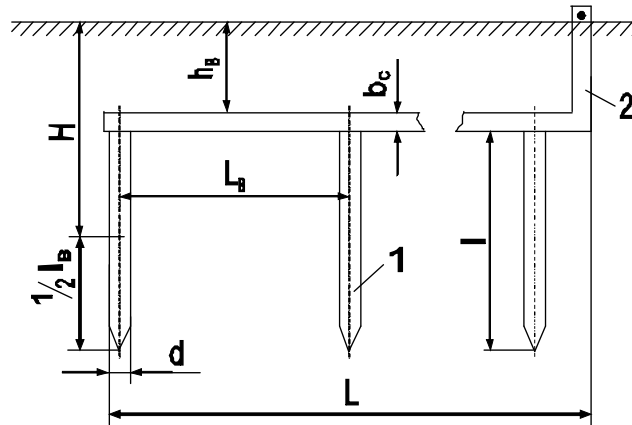


Рисунок А.1 – Схема позначення розмірів для розрахунку захисного заземлення:

1 – заземлювач; 2 – з'єднувальна стрічка;  $h_{\epsilon}$  – глибина закладення вертикальних заземлювачів;  $L$  – відстань між заземлювачами;  $H$  – відстань від середини заземлювача до поверхні ґрунту;  $l$  – довжина заземлювача;  $b_c$  – ширина стрічки

Визначаємо  $\eta_{\epsilon}$  при відношенні  $L_{\epsilon}/\ell_{\epsilon} = 1$  та при  $n_{op} = 32$  шт.

За табл. 7.5 [19] приймаємо  $\eta_{\epsilon} = 0,42$ .

Тоді, за аналогічною до (А.2) формулою, де замість одиничного значення коефіцієнта використання візьмемо  $\eta_d = 0,42$ , знайдемо  $n_{н.г}$  – необхідну кількість однакових вертикальних заземлювачів:

$$n_{н.г} = \frac{127,7}{4 \cdot 0,42} \approx 76 \text{ шт.}$$

Знайдемо тепер  $R_{\epsilon.c}$  – розрахунковий опір розтікання струму у вертикальних заземлювачах при  $n_{н.в} = 76$  шт.:

$$R_{\epsilon.c} = \frac{R_{\epsilon}}{n_{н.в} \cdot \eta_{\epsilon}} . \quad (A.4)$$

$$R_{\epsilon.c} = \frac{127,7}{76 \cdot 0,42} = 4 \text{ Ом.}$$

Визначимо  $R_{\epsilon}$  – опір розтікання струму для горизонтального заземлювача, розміщеного в ґрунті:

$$R_{\epsilon} = \frac{\rho}{2\pi \cdot \ell_{\epsilon}} \cdot \ln \frac{2 \cdot (\ell_{\epsilon})^2}{b_{\epsilon} \cdot h_{\epsilon}} , \quad (A.5)$$

де  $\ell_{\epsilon}$  – довжина горизонтального заземлювача.

Знайдемо  $\ell_{\epsilon}$  за наступною формулою:

$$\ell_{\epsilon} = 1,05 \cdot L_{\epsilon} \cdot (n_{н.в} - 1) . \quad (A.6)$$

Тобто, якщо з прийнятого рівняння  $L_{\epsilon}/\ell_{\epsilon} = 1$  визначимо  $L_{\epsilon}$  – відстань між вертикальними заземлювачами,  $L_{\epsilon} = 3$  м, можемо знайти

$$\ell_{\epsilon} = 1,05 \cdot 3 \cdot (76 - 1) = 236,25 \text{ м.}$$

Тобто тепер, знаючи всі необхідні складові, підрахуємо:

$$R_{\epsilon} = \frac{450}{2 \cdot 3,14 \cdot 236,25} \cdot \ln \frac{2 \cdot (236,25)^2}{0,04 \cdot 0,8} = 4,57 \text{ Ом.}$$

Знайдемо  $\eta_{\epsilon}$  – коефіцієнт використання горизонтального заземлювача при відношенні  $L_{\epsilon}/\ell_{\epsilon} = 1$  та при  $n_{н.в} = 76$  шт.

За табл. 7.6 [19] приймаємо  $\eta_{\epsilon} = 0,19$ .

Визначимо  $R_{\epsilon.c}$  – розрахунковий опір розтікання струму в горизонтальному заземлювачі з урахуванням коефіцієнта використання:

$$R_{\varepsilon.c} = \frac{R_{\varepsilon}}{\eta_{\varepsilon}} . \quad (\text{A.7})$$

$$R_{\varepsilon.c} = \frac{4,57}{0,19} = 24,04 \text{ Ом.}$$

Визначаємо  $R_{um.}$  – опір штучного заземлювача, якщо вважати, що штучний та природний заземлювачі з'єднані паралельно та загальний опір не повинен перевищувати норму опору заземлювача:

$$R_{um} = \frac{R_{\varepsilon.c} \cdot R_{\varepsilon.c}}{R_{\varepsilon.c} + R_{\varepsilon.c}} . \quad (\text{A.8})$$

$$R_{um} = \frac{4 \cdot 24,04}{4 + 24,04} = 3,43 \text{ Ом.}$$

За результатами розрахунків, складаємо схему контурного заземлення, що зображена на рис. А.2.

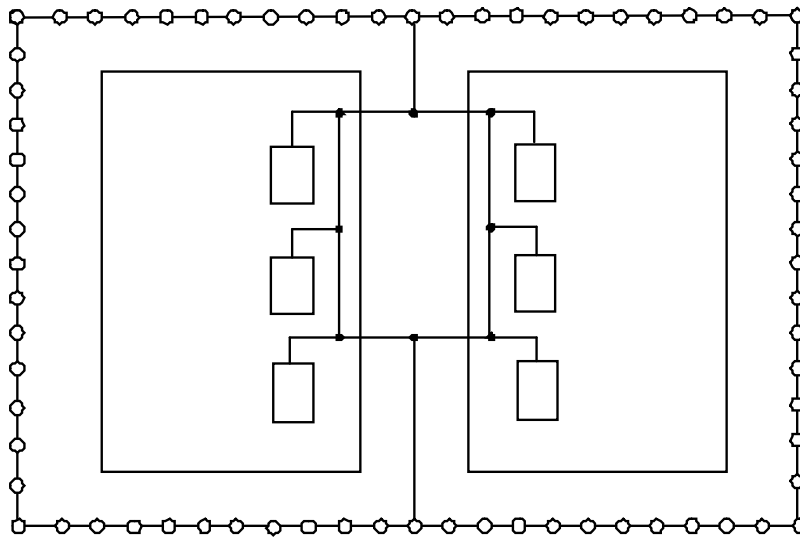


Рисунок А.2 – Схема контурного заземлення

Обираємо матеріал та поперечний перетин з'єднувальних провідників. За таблицями [19] обираємо стрічкову сталь перетину 48 мм, товщиною 4 мм. Також обираємо матеріал та поперечний перетин магістральної шини – це сталева шина товщиною 4 мм з перетином не менше 100 мм.