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

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри АВП
к.т.н., доцент
_____Олександр ДІДИК
“___“ _____2026 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему

«Двоконтурна система керування електроприводом при виготовленні бетону»

«Dual-circuit electric drive control system for concrete production»

Виконав: здобувач вищої освіти IV курсу
групи АК-22
151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології»
_____ Дмитро БЕСПАЛОВ
«___»_____ 2026 р.

Керівник роботи
д.т.н., професор
_____ Анатолій МАЦУЙ
«___»_____ 2026 р.

Рецензент
_____
«___»_____ 2026 р.

м. Кропивницький

ЗМІСТ

Вступ 3

1 Призначення та область застосування двоконтурної системи керування електроприводом 5

1.1 Технологія виготовлення залізобетонних виробів 5

2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу 16

2.1 Дослідження параметрів ударних імпульсів 16

3 Розробка двоконтурної системи керування електроприводом 32

3.1 Вибір електропривода 32

3.2 Вибір тиристорного перетворювача для ЕП постійного струму 33

3.3 Розрахунок елементів силової частини та СІФК тиристорного перетворювача 40

3.4 Розробка функціональної та структурної схеми привода 47

3.5 Розробка принципової схеми приводу 57

4 Дослідження алгоритмічної схеми керування 71

Висновок 82

Література 84

ВСТУП

Легкі бетони належать до числа найбільш поширених сучасних будівельних матеріалів, оскільки поєднують прийнятну вартість, невелику масу та достатні експлуатаційні характеристики. Їх використання сприяє підвищенню темпів зведення житлових будинків, виробничих споруд і об’єктів аграрного призначення. Важливими перевагами таких матеріалів є також хороші теплоізоляційні властивості та можливість зменшення навантаження на несучі елементи конструкцій, що позитивно впливає на економічність будівництва.

Постійне зростання попиту на вироби з легкого бетону та збільшення обсягів їх виготовлення свідчать про необхідність удосконалення технологічного обладнання, яке використовується на підприємствах галузі. Аналіз сучасних виробничих процесів показує, що наявні технічні засоби не завжди забезпечують високий рівень продуктивності, енергоефективності та якості готової продукції. Саме тому актуальним залишається пошук нових технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності формування та ущільнення бетонних сумішей.

Серед існуючих способів виготовлення легкобетонних виробів особливе місце займають технології, що базуються на механічному впливі на суміш у процесі формування. Один із підходів передбачає застосування пластифікувальних добавок разом із регульованими вібраційними навантаженнями. Інший напрямок ґрунтується на використанні спеціалізованих формувальних машин, які здійснюють ущільнення матеріалу за рахунок ударної дії. Перевагою першого варіанта є можливість використання вже встановлених на виробництві віброплощадок без значних конструктивних змін технологічної лінії. Разом із тим застосування пластифікаторів супроводжується додатковими фінансовими витратами, оскільки такі компоненти часто мають високу вартість і потребують стабільного постачання. Крім того, їх використання висуває більш жорсткі

вимоги до якості складових бетонної суміші та технічного оснащення підприємства.

У зв’язку з цим значний інтерес викликають установки ударного типу, які дозволяють забезпечити ефективне ущільнення матеріалу без необхідності використання великої кількості дорогих добавок. Впровадження таких технічних рішень сприяє підвищенню продуктивності виробничого процесу, покращенню фізико-механічних властивостей готових виробів і зменшенню собівартості їх виготовлення, що є важливим чинником підвищення конкурентоспроможності підприємств будівельної галузі.

Другий підхід до формування виробів із легкобетонних сумішей характеризується низкою суттєвих переваг, які роблять його перспективним для використання в умовах сучасного виробництва. Насамперед він забезпечує ефективну роботу з малорухомими та жорсткими бетонними сумішами, що дозволяє отримувати вироби з покращеними фізико-механічними характеристиками. Крім того, такий спосіб меншою мірою залежить від коливань властивостей вихідних компонентів, похибок дозування матеріалів та якості їх перемішування. Досягнення подібних результатів стало можливим завдяки впровадженню сучасних технічних засобів, використанню новітньої електронної бази, а також удосконаленню принципів побудови та керування технологічним обладнанням.

Виготовлення виробів із легких бетонів відіграє важливу роль у підвищенні економічної ефективності будівельної галузі. Застосування таких матеріалів дозволяє зменшити витрати на транспортування, скоротити навантаження на несучі конструкції будівель і споруд, а також знизити загальну вартість будівельних робіт. Додатковою перевагою є покращення теплоізоляційних характеристик об’єктів, що сприяє зменшенню енергоспоживання під час їх експлуатації.

Однією з найбільш складних технологічних операцій при виготовленні легкобетонних виробів залишається ущільнення бетонної суміші. Особливості цього процесу пов’язані з невеликою густиною пористих заповнювачів, а в

окремих випадках і з їх пружними властивостями. Унаслідок цього виникають труднощі із забезпеченням однакової щільності матеріалу по всьому об’єму виробу. Нерівномірний розподіл ущільнення може призводити до появи внутрішніх дефектів, зниження міцності готової продукції та виникнення явища часткового розширення суміші після завершення формування.

У зв’язку з цим особливої актуальності набувають наукові дослідження, спрямовані на створення надійних та економічно доцільних технічних засобів для виготовлення якісних легкобетонних виробів. Важливим напрямом удосконалення виробництва є розроблення ефективних формувальних установок і систем автоматичного керування, які забезпечують стабільність технологічного процесу, підвищують продуктивність обладнання та гарантують отримання продукції з прогнозованими характеристиками. Саме тому вдосконалення методів ущільнення та автоматизації процесів формування залишається одним із пріоритетних завдань сучасної будівельної індустрії.

Метою даної бакалаврської роботи є розроблення та дослідження двоконтурної системи автоматизованого керування електроприводом формувальної установки, призначеної для виготовлення виробів із легкого бетону. Запропоноване технічне рішення повинно забезпечувати стабільну роботу обладнання, підвищення якості формування продукції, а також покращення продуктивності технологічного процесу за рахунок оптимізації режимів роботи електромеханічної системи.

Об’єктом дослідження є технологічний процес виробництва легкобетонних виробів, який включає операції ущільнення та формування бетонної суміші. Особливу увагу приділено впливу параметрів роботи обладнання на якість готової продукції та ефективність функціонування виробничої лінії.

Предметом дослідження виступає двоконтурна система керування електроприводом формувальної установки, що забезпечує регулювання основних технологічних параметрів і підтримання необхідних режимів роботи виконавчого механізму. Використання такої структури керування дозволяє

підвищити точність відпрацювання заданих параметрів та покращити динамічні характеристики системи.

Проведення теоретичних досліджень здійснювалося із застосуванням сучасних програмних засобів математичного моделювання та комп'ютерного аналізу. Для оцінювання впливу різних факторів на характеристики електропривода використовувалися методи математичної статистики, регресійного аналізу та чисельного моделювання, що дозволило отримати достовірні результати та сформувати рекомендації щодо вибору параметрів системи.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні аналітичних і графічних залежностей, які дають можливість визначати необхідну потужність привідного двигуна з урахуванням маси ударної частини механізму, висоти її переміщення та інтенсивності ударних впливів. Отримані результати можуть бути використані під час проєктування та модернізації формувального обладнання для виробництва будівельних матеріалів.

Практичне значення роботи полягає у розробленні математичної моделі та отриманні графічних характеристик функціонування системи керування в умовах різних режимів навантаження. Виконані дослідження дозволяють оцінити поведінку електропривода як у сталих, так і в перехідних режимах роботи, що створює основу для підвищення надійності обладнання, зниження енергоспоживання та покращення техніко-економічних показників виробництва.

1 Призначення та область застосування двоконтурної системи керування електроприводом

1.1 Технологія виготовлення залізобетонних виробів

У сучасному виробництві залізобетонних конструкцій найбільшого поширення набула потокова організація технологічного процесу, яка забезпечує високу продуктивність праці, раціональне використання обладнання та скорочення тривалості виготовлення продукції. Застосування такого підходу дозволяє узгодити роботу всіх виробничих дільниць у єдину систему, де кожна технологічна операція виконується у визначеній послідовності та в чітко встановлені часові інтервали.

Ефективність потокового виробництва досягається завдяки збалансованості окремих етапів технологічного циклу. Це означає, що продуктивність кожної виробничої ланки повинна відповідати загальному темпу роботи підприємства, забезпечуючи однаковий обсяг обробки виробів протягом певного проміжку часу. Важливим фактором є також циклічне повторення технологічних операцій через рівні часові інтервали, що сприяє стабільності виробничого процесу та спрощує його планування.

Суттєвою особливістю потокового методу є одночасне виконання різних операцій на окремих виробничих постах. Поки одна партія виробів проходить формування, інша може перебувати на стадії ущільнення, теплової обробки або підготовки до транспортування. Така організація роботи забезпечує максимальне завантаження обладнання та зменшує непродуктивні простої.

Не менш важливим є забезпечення безперервного руху виробів між технологічними позиціями. Відсутність тривалих зупинок і затримок дозволяє підтримувати заданий ритм виробництва, підвищувати якість готової продукції та знижувати виробничі витрати. Саме тому потокова форма організації технологічного процесу вважається однією з найбільш ефективних для

підприємств, що спеціалізуються на виготовленні залізобетонних виробів у великих обсягах.

Організація виробничого процесу на підприємствах із виготовлення бетонних та залізобетонних виробів визначається взаємним розташуванням технологічного оснащення, виробів у процесі обробки та обслуговуючого персоналу. Залежно від цього застосовуються дві основні схеми виробництва. У першому випадку стаціонарними залишаються робочі місця та обладнання, тоді як форми з виробами послідовно переміщуються між окремими технологічними постами. В іншому варіанті форми розташовуються нерухомо, а необхідні механізми та працівники переміщуються до місця виконання операцій.

До першої схеми належать агрегатні та конвеєрні виробничі лінії, а до другої – стендові й касетно-стендові способи виготовлення продукції. Одним із найбільш поширених є агрегатний метод, при якому формування виробів здійснюється на спеціалізованих установках, оснащених обладнанням для укладання бетонної суміші, формування та вібраційного ущільнення.

Характерною особливістю агрегатного виробництва є можливість спрямовувати форми лише на ті робочі позиції, які необхідні для виготовлення конкретного виду продукції. Тривалість перебування виробу на кожному етапі визначається складністю та обсягом технологічних операцій. При цьому всі стадії процесу виконуються одночасно на різних постах лінії, що забезпечує безперервність виробництва та ефективне використання обладнання. Загальна продуктивність агрегатної лінії залежить від тривалості циклу формування виробів, яка зазвичай становить від 10 до 50 хвилин залежно від конструктивних особливостей продукції та прийнятої технології виготовлення.

Агрегатна технологія найбільш ефективно застосовується в умовах серійного випуску залізобетонної продукції, оскільки не потребує значних інвестицій у створення виробничих потужностей та забезпечує виготовлення

широкого спектра виробів. Однією з головних переваг такого підходу є його універсальність, що дозволяє шляхом переналаштування або часткової заміни обладнання швидко адаптувати виробництво до випуску продукції іншого типу. Це дає можливість підприємствам оперативно реагувати на зміну потреб будівельного ринку та ефективніше використовувати наявні виробничі ресурси.

На агрегатних лініях виготовляють різноманітні конструктивні елементи, серед яких плити перекриття різних типів, колони, трубні вироби, опори для ліній електропередач і систем зовнішнього освітлення, а також інші залізобетонні конструкції, що широко використовуються в промисловому та цивільному будівництві.

Разом із перевагами така технологія має певні недоліки. У процесі виробництва виникає потреба у транспортуванні форм та технологічного оснащення між окремими робочими постами із застосуванням підйомно-транспортних механізмів. Це обумовлює необхідність підвищення жорсткості та міцності форм, що, своєю чергою, призводить до збільшення їх маси. Крім того, переміщення незатверділих виробів може негативно впливати на структуру бетонної суміші та спричиняти появу дефектів, зокрема технологічних тріщин на ранніх стадіях твердіння.

Конвеєрне виробництво.

Конвеєрне виробництво являє собою замкнену технологічну систему, у межах якої форми або заготовки послідовно проходять через ряд робочих позицій із наперед визначеною швидкістю переміщення. Ефективність функціонування такої системи досягається за умови узгодженості тривалості виконання операцій на кожному посту. Після завершення необхідних технологічних дій вироби транспортуються на наступну ділянку виробничого процесу. Інтервал часу, через який здійснюється таке переміщення, прийнято називати ритмом роботи конвеєра.

Залежно від характеру транспортування виробів розрізняють конвеєрні системи безперервного та періодичного (крокового) типу. Технологія

безперервного формування широко реалізується на вібропрокатних станах. У таких установках усі основні виробничі операції виконуються на єдиному пластинчастому конвеєрі, який рухається без зупинок із постійною швидкістю. Це забезпечує високу продуктивність обладнання, рівномірність технологічного процесу та стабільну якість готових виробів.

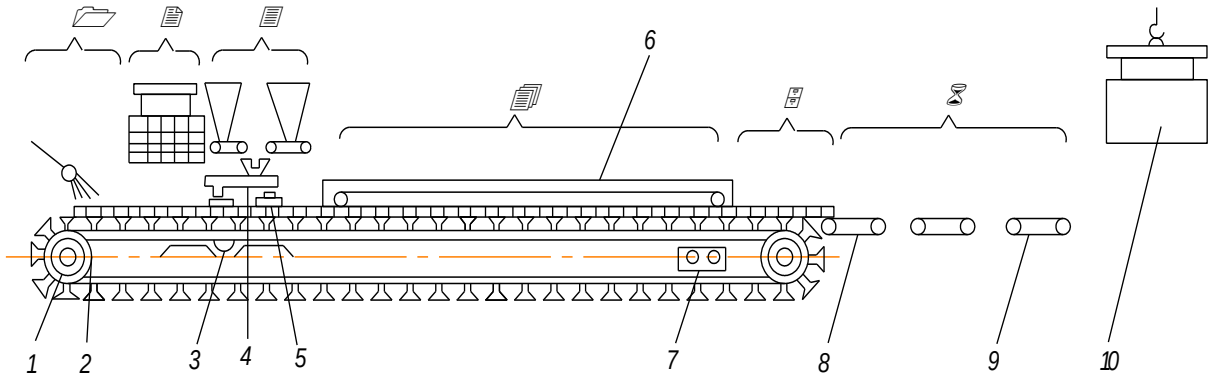


Рисунок 1.1 – Схема вібропрокатного стана:

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.

Одним із різновидів потоково-конвеєрного обладнання, що широко застосовується у виробництві залізобетонних виробів, є круговий конвеєр. Його конструкція включає обертову платформу, на якій встановлюються форми для виготовлення продукції. Навколо робочої зони розташовуються технологічні пости, оснащені необхідним обладнанням для виконання окремих виробничих операцій. Після завершення певного етапу обробки платформа переміщується на фіксований кут, забезпечуючи подачу форм до наступного робочого місця.

Застосування таких виробничих комплексів є досить поширеним, оскільки на їх основі виготовляється значна частина збірних залізобетонних

конструкцій, що використовуються під час спорудження промислових і цивільних об’єктів. Організація виробництва за конвеєрним принципом створює сприятливі умови для впровадження сучасних засобів автоматизації та механізації, що дозволяє підвищити ефективність технологічного процесу, зменшити трудомісткість операцій і збільшити обсяги випуску готової продукції.

Разом із численними перевагами конвеєрні лінії мають і певні недоліки. Одним із найбільш суттєвих є значні витрати металу на виготовлення конструктивних елементів обладнання, що призводить до підвищення вартості його створення та експлуатації. Це вимагає пошуку нових конструктивних рішень, спрямованих на підвищення економічної ефективності таких виробничих систем.

Стендове виробництво

За даною технологією формування залізобетонних виробів здійснюється у стаціонарних формах, розташованих на спеціальних стендах. Після укладання та ущільнення бетонної суміші конструкції залишаються на місці до моменту досягнення необхідних показників міцності, що виключає їх переміщення в процесі тверднення. Такий спосіб доцільно застосовувати під час виготовлення великогабаритних елементів значної маси, транспортування яких на віброплощадки або інші формувальні установки є технічно складним або економічно недоцільним.

Тривалість виробничого циклу визначається насамперед часом витримування виробів у формах і зазвичай становить від однієї до двох діб залежно від складу бетонної суміші, температурних умов та способу теплової обробки. Незважаючи на простоту організації технологічного процесу та можливість виготовлення масивних конструкцій, стендовий метод характеризується недостатньо ефективним використанням виробничих площ, оскільки значна частина цехового простору тривалий час зайнята формами з виробами, що набирають міцність.

Касетний спосіб виробництва

Характерною особливістю касетної технології є формування залізобетонних елементів у вертикальному положенні за допомогою розсувних металевих форм, об’єднаних у спеціальні касети. У таких формах вироби залишаються до моменту досягнення бетоном необхідної міцності, що забезпечує стабільність геометричних параметрів та збереження форми конструкції.

Організація виробництва за цією технологією може здійснюватися за касетно-стендовою або касетно-конвеєрною схемою. У першому випадку робоча бригада послідовно переміщується між стаціонарно встановленими касетами, виконуючи всі операції технологічного циклу, починаючи від підготовки форм і закінчуючи розпалубленням готових виробів.

Касетний метод широко застосовується під час виготовлення внутрішніх стінових панелей, плит перекриття, сходових маршів та інших збірних залізобетонних конструкцій. Його використання дозволяє отримувати продукцію з високою точністю розмірів, рівною поверхнею та мінімальними відхиленнями від проєктних параметрів.

Разом із перевагами дана технологія має певні недоліки. Для якісного заповнення вертикальних форм необхідно використовувати достатньо рухливі бетонні суміші, що часто призводить до збільшення витрат цементу та виникнення нерівномірності міцнісних характеристик по висоті виробу. Крім того, окремі технологічні операції супроводжуються складними умовами праці для персоналу. У зв’язку з цим важливого значення набувають технічні засоби ущільнення бетонної суміші, від ефективності роботи яких значною мірою залежать якість, однорідність структури та довговічність готової продукції.

У конструкторсько-технологічному бюро «Мосоргбудматеріали» внаслідок тривалих наукових досліджень і дослідно-конструкторських робіт, виконаних під керівництвом доктора фізико-математичних наук Б. І. Крюкова, було розроблено ряд низькочастотних резонансних ударно-вібраційних установок типів ВПА та ВРА. Особливістю цих машин стало використання

шатунного механізму приводу, який забезпечував виникнення вертикально спрямованих ударних коливань рухомої рами. На зазначеній рамі встановлювалися електромагнітні пристрої для надійної фіксації форм під час технологічного процесу [1-3]. Робота обладнання базувалася на асиметричному віброударному режимі з частотою коливань у межах 8-11 Гц та амплітудою переміщень 6-8 мм. Практичні випробування підтвердили достатньо високу ефективність таких машин під час виготовлення окремих різновидів збірних залізобетонних конструкцій. Крім того, фахівцями було запропоновано застосування даних установок для ущільнення сумішей ніздрюватого бетону, проте широкого впровадження ця технологія поки що не отримала.

Проведені дослідження засвідчили, що використання низькочастотних коливань забезпечує низку переваг, серед яких важливе місце займають підвищення довговічності технологічного обладнання та зменшення акустичного навантаження на виробниче середовище. Разом із цим подібні вібраційні системи мають значний потенціал для подальшої модернізації та вдосконалення конструктивних параметрів. Роботи у цьому напрямі продовжують виконувати науково-дослідні організації та заклади вищої освіти України, зокрема наукові колективи Києва та Дніпра, які займаються створенням нових високоефективних засобів формування бетонних виробів.

До основних недоліків таких установок належать значні вертикальні розміри конструкції та висока теплова інерційність, що негативно впливає на енергоефективність виробничого процесу.

Дослідження, спрямовані на вивчення ударного способу ущільнення та оцінювання перспектив його використання для розроблення продуктивного обладнання, призначеного для формування виробів із легкобетонних і ніздрюватих сумішей, активно проводилися під керівництвом К.А. Олехновича починаючи з середини 1960-х років [4–8].

Досвід експлуатації ударних столів типу «шок-стіл» на підприємствах збірного залізобетону засвідчив їхню здатність забезпечувати стійкий режим роботи навіть за зміни маси виробів, що виготовляються, а також запобігати

розділенню компонентів суміші. Саме ці властивості мають особливе значення під час ущільнення легких бетонів і пористих матеріалів. Такі характерні недоліки ударних столів, як підвищений рівень шуму та передавання коливань на опорні конструкції, були суттєво зменшені завдяки використанню еластичних прокладок із попередньо визначеними параметрами жорсткості, встановлених між робочими та нерухомими елементами установки.

Унаслідок реалізації такого конструктивного рішення після контакту рухомої рами з еластичними прокладками напрямок її подальшого переміщення разом із формою миттєво змінюється на протилежний. За цих умов інерційні навантаження, що виникають як у процесі стискання пружних елементів, так і під час їх повернення до початкового стану, сприяють притисканню бетонної суміші до дна форми. Після кожного циклу падіння рама здійснює на пружних опорах декілька швидкозатухаючих коливань високої частоти з незначною амплітудою переміщення. Поєднання дії основного ударного імпульсу та додаткових коливальних впливів забезпечує інтенсивніше ущільнення суміші й покращує якість сформованого виробу.

Завдяки реалізації режиму так званого «м’якого удару» шумові характеристики обладнання суттєво зменшуються та відповідають встановленим санітарно-гігієнічним вимогам без застосування додаткових засобів шумозахисту. Перші установки такого типу отримали назву віброструшувальних, проте подальші дослідження особливостей їх функціонування показали, що термін «ударно-струшуючі» більш повно характеризує принцип дії та динамічні процеси, які відбуваються під час роботи обладнання.

Ударно-струшуючі установки ранніх поколінь, розраховані на навантаження до 4 т, підтвердили свою ефективність під час формування виробів із різноманітних легкобетонних сумішей, виготовлених із застосуванням заповнювачів із розвиненою шорсткою структурою поверхні. Отримані результати стали основою для подальшого вдосконалення конструкцій таких машин. Основна увага розробників була зосереджена на

модернізації кулачкових механізмів, збільшенні допустимого технологічного навантаження та покращенні експлуатаційних характеристик окремих конструктивних елементів обладнання.

Подальшим етапом розвитку стали установки типу УСУ-8 із вантажопідйомністю 8 т, оснащені рухомою рамою розміром 2×6 м і амплітудою переміщення 3-4 см (рис. 1.2). Такі агрегати були впроваджені у 1976 році на двох виробничих лініях Гадяцького заводу експериментального домобудування. Тривалий період практичного використання засвідчив високу довговічність обладнання, стійкість робочих параметрів та надійність процесу ущільнення бетонних сумішей. Завдяки нескладній конструкції, доступній вартості формувального оснащення та належним умовам праці підприємство забезпечувало економічно вигідне виробництво будівельної продукції. Вироби для малоповерхового житлового будівництва, що виготовлялися на Гадяцькому експериментальному заводі домобудування, здобули визнання завдяки своїй якості та експлуатаційній надійності.

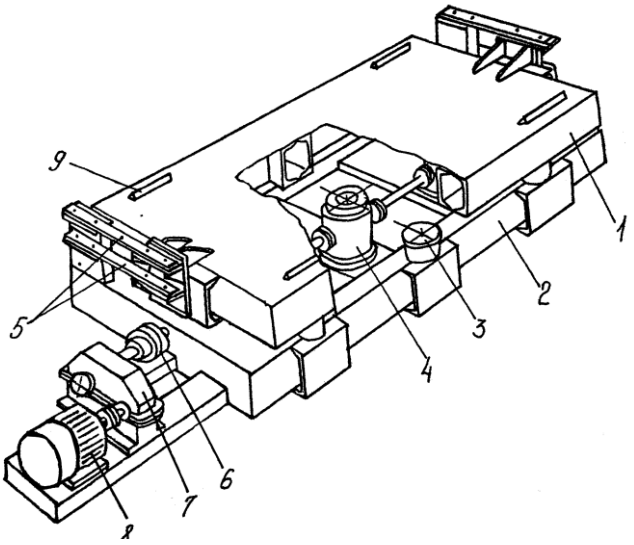


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд ударно-струшуючої установки УСУ-8: 1– рухома рама, 2– опорна рама, 3– пружна прокладка, 4– кулачковий механізм КМ-3, 5– ресори підвіски, 6– муфта пружна, 7– редуктор, 8– приводний електродвигун, 9– упор для форми

У процесі дослідження та оцінювання функціонування установки УСУ-8 було виявлено ряд конструктивних недосконалостей, пов’язаних із будовою

кулачкового вузла та особливостями розташування ресорної системи підвішування. Встановлено, що зазначені елементи негативно впливають на надійність роботи обладнання та його експлуатаційні характеристики.

Кулачковий механізм КМ-3 (рис. 1.3) являє собою конструкцію, до складу якої входить зварний корпус, жорстко закріплений на рамі установки. Усередині нього розташовані опори підйому кулачкового вала з приводними півмуфтами, змонтованими на кінцях штовхача. У корпусі встановлено два підшипникові вузли, що взаємодіють із кулачками, а також циліндричну пружину та еластичну прокладку, розміщену в кришці штовхача. Конструктивною особливістю порожнистого штовхача є наявність двох вертикальних пазів, які під час роботи спричиняють збільшення сил тертя між рухомими деталями механізму. Унаслідок цього виникає ймовірність заклинювання елементів вузла, що призводить до додаткових втрат енергії та зменшення ефективності привода.

Недосконаліть ресорної підвіски установки УСУ-8 полягає в тому, що ресори 5 (рис. 1.2) закріплені на стояках нерухомої рами 2, жорсткість яких виявилася недостатньою в умовах тривалої експлуатації. Таке конструктивне рішення сприяє збільшенню маси металоконструкції та ускладнює її виготовлення. Додатковим недоліком є розташування ресорного вузла над робочою поверхнею верхньої рами, що створює труднощі під час інтеграції обладнання до складу агрегатно-потокових або конвеєрних виробничих ліній. Крім того, незначна відстань між ресорами у вертикальному напрямку призводить до підвищення навантаження від поздовжнього стискання на окремі елементи підвіски, що може негативно позначатися на їх довговічності та надійності роботи установки в цілому.

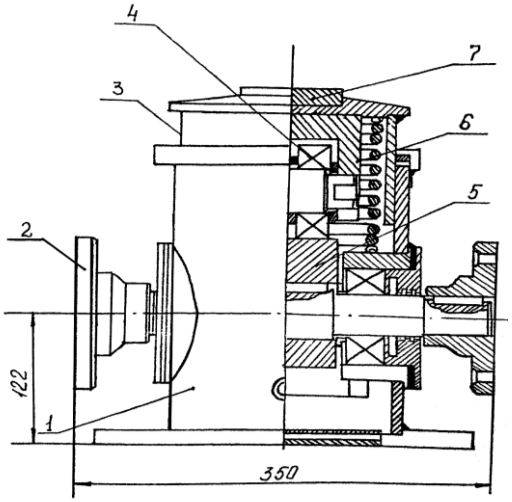


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд кулачкового механізму КМ-3:
1– корпус, 2– приводні півмуфти, 3– штовхач, 4– підшипники штовхача,
5– кулачок, 6– піддержуюча пружина, 7– пружна прокладка штовхача

На основі аналізу практичного досвіду використання установок УСУ-8 були розроблені удосконалені конструктивні рішення, спрямовані на усунення виявлених експлуатаційних недоліків та підвищення надійності роботи обладнання. Зокрема, запропоновано виконати кріплення штовхача коливального кулачкового механізму на спеціальному кронштейні, проушини якого шарнірно з’єднані з основою установки. Реалізація такого підходу дозволяє усунути небажану взаємодію між корпусом кулачкового вузла та штовхачем, що сприяє зменшенню втрат енергії на тертя і підвищенню довговічності механізму.

Для вдосконалення роботи ресорного чотириланкового механізму було запропоновано збільшити вертикальну відстань між його горизонтальними гілками, що забезпечує зниження навантаження, яке сприймається окремою ресорою. Одночасно передбачено зміну їх просторового розташування таким чином, щоб площина контакту кулачка зі штовхачем знаходилася між зазначеними елементами. Запропоноване технічне рішення не лише сприяє більш рівномірному розподілу силових навантажень, а й створює можливість закріплення ресорного чотириланника безпосередньо до бокової поверхні

фундаменту. У результаті підвищується жорсткість усієї конструкції, що позитивно впливає на точність плоскопаралельного переміщення рухомої рами та стабільність функціонування установки в цілому.

Розглянуті у цьому розділі теоретичні та практичні аспекти створюють підґрунтя для проведення подальших наукових досліджень у зазначеній галузі. Водночас низка питань залишається недостатньо опрацьованою, зокрема особливості впливу окремих ударних імпульсів на процес ущільнення суміші, що є характерним для вібраційного обладнання, конструкція якого базується на використанні штовхача з кулачковим приводом.

Отримання більш повних відомостей щодо зазначених процесів потребує виконання додаткових теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень. У зв’язку з цим доцільним є проведення наукових пошуків та дослідницьких робіт у визначених 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

Питання підвищення технологічної результативності ущільнення будівельних сумішей за допомогою низькочастотних ударних навантажень протягом тривалого часу привертало увагу багатьох дослідників. У науково-технічній літературі було опубліковано значну кількість робіт, у яких відзначалися переваги такого способу формування виробів. Незважаючи на це, подібні установки не набули широкого практичного застосування у виробничих умовах. Насамперед це стосується ударних формувальних столів, відомих також як «шок-столи», які експлуатувалися лише на окремих підприємствах збірного залізобетону. Основною причиною обмеженого використання стало не недостатнє ущільнення суміші порівняно з традиційними віброплощадками, а негативний вплив обладнання на виробниче середовище. Під час роботи таких установок виникали надмірні рівні шуму та вібрації, що суттєво погіршувало умови праці персоналу навіть за наявності масивних фундаментних конструкцій великої ваги.

Одним із перспективних шляхів усунення зазначених недоліків стала запропонована К.А. Олехновичем технічна ідея, яка передбачала встановлення пружних елементів між металевими поверхнями рухомої частини установки та її основою. Передбачалося, що таке конструктивне рішення дозволить зберегти високі значення прискорень, необхідних для ефективного ударного ущільнення бетонної суміші, одночасно зменшуючи передачу динамічних навантажень на опорні конструкції. Крім того, використання пружних прокладок мало сприяти зниженню рівня шуму під час роботи обладнання та забезпеченню більш сприятливих умов експлуатації формувальних установок у виробничих цехах.

Дослідно-промислові зразки ударно-струшувальних установок серії УСУ-8 продемонстрували високу технологічну результативність під час виготовлення виробів із легкобетонних сумішей у виробничих умовах. Разом із тим характеристики динамічних процесів у машинах ударної дії, конструкція яких передбачала використання пружних елементів, у лабораторних умовах практично не досліджувалися та не фіксувалися за допомогою спеціалізованих вимірювальних систем. Відсутність експериментально підтверджених даних стала причиною виникнення серед окремих науковців і фахівців галузі припущень щодо недостатньої ефективності ударної взаємодії через пружні прокладки та неможливості створення прискорень, необхідних для якісного ущільнення легкобетонних сумішей.

Проведення таких лабораторних експериментів було необхідним для отримання достовірної вихідної інформації про особливості роботи установок ударного типу, визначення їх основних динамічних параметрів і закономірностей функціонування. Отримані результати повинні були стати науково-технічною основою для подальшого проєктування та вдосконалення лабораторних зразків обладнання, а в перспективі – створення дослідно-промислових установок, призначених для ефективного ущільнення легкобетонних сумішей.

З цією метою було змонтовано пристрій, схема якого подана на рис. 2.1. На жорстко закріпленій на масивній фундаментній основі 1 металевій плиті 2 розміщено датчик прискорення 3. Аналогічний вимірювальний елемент 3 встановлено на металевому вантажі 4, який за допомогою міцної нитки 9 підвішується до лебідкового механізму 5. Вимірювальні датчики 3 з’єднані з вібровимірювальним комплексом 6, що передає сигнали до граничного вимірювача 7, а далі інформація надходить на осцилографічну установку 8 для подальшої реєстрації та аналізу. До металевої плити 2 через джерело живлення 10 напругою 1,5 В підключено електричний провід, другий кінець якого з’єднано з вимірювачем границі 7. Від цього пристрою прокладено ще один провідник до металевого вантажу 4. Така схема відзначається простотою

конструкції та високою надійністю роботи, забезпечуючи фіксацію моментів наявності або втрати контакту між вантажем 4, що падає, та плитою 2. Під час удару вантажу 4 по пружній прокладці електричний ланцюг замикається через її поверхню. Як демпфувальні елементи застосовувалися поширені промислові матеріали, зокрема листова технічна гума та транспортерна стрічка, товщина яких становила від 8 до 15 мм.

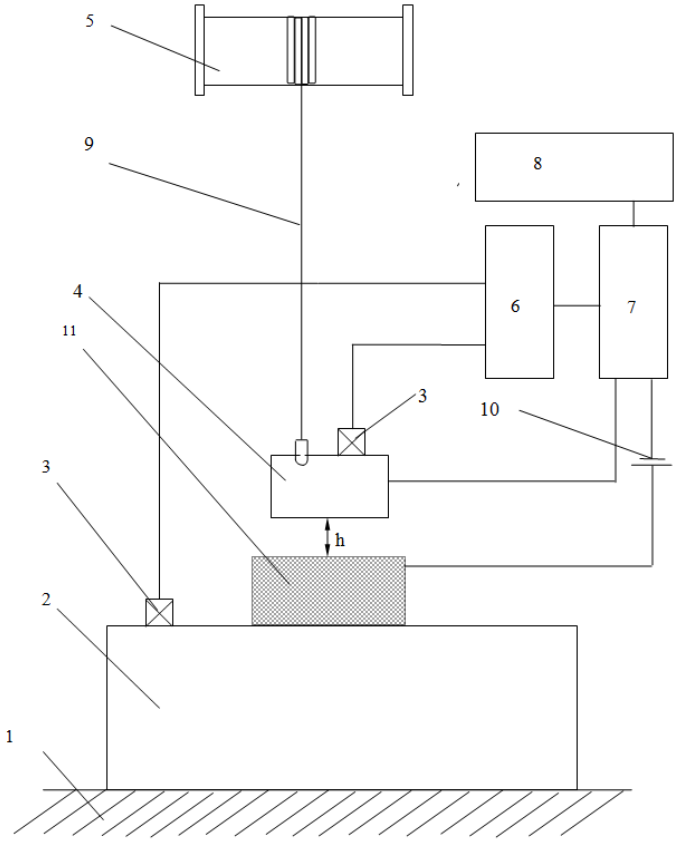


Рисунок 2.1 – Схема установки порівняльних досліджень одиночних ударних імпульсів

Експериментальні дослідження виконувалися за такою методикою. Рухому масу 4 за допомогою каліброваних прокладок встановлювали на необхідну висоту, після чого лебідкою натягували підвісну нитку 9 до моменту початку піднімання вантажу. Досягнуте положення фіксувалося за допомогою храпового механізму лебідки 5. Після вилучення калібрів та ввімкнення реєструвальної апаратури 8 здійснювали перепалювання нитки 9, що забезпечувало вільне падіння маси. Швидкість розгортки осцилографа становила 500 мм/с, що дало можливість зафіксувати повну тривалість

одиничного ударного імпульсу. Випробування проводилися при висотах падіння 2, 4, 6, 8, 10 і 14 мм. У результаті експериментів були отримані осцилограми поодиноких ударних впливів як при безпосередньому контакті металевих поверхонь (рис. 2.2), так і при взаємодії металу з пружним демпфувальним прошарком (рис. 2.3). Перший канал осцилографа використовувався для реєстрації сигналів з датчика прискорення 3, встановленого на фундаментній плиті 2, другий канал фіксував показання аналогічного датчика, розташованого на рухомій масі 4, а третій канал забезпечував запис моменту виникнення та тривалості контакту між плитою 2 і масою 4. Для підвищення достовірності отриманих результатів кожний дослід повторювався багаторазово.

Проведений аналіз отриманих осцилограм (рис. 2.4) показав, що зі збільшенням висоти скидання відбувається зростання прискорень, які виникають під час одиничних ударів рухомої маси 4 при контакті металевих поверхонь. Значення прискорення змінювалися в межах від 5 g до 19 g залежно від енергії удару. Одночасно спостерігалося збільшення реакції фундаментної плити 2, що підтверджується показаннями датчика, встановленого на її поверхні. Зафіксовані прискорення плити зростали від 1 g при висоті падіння 2 мм до 18 g при висоті 14 мм, що свідчить про суттєвий вплив енергії удару на динамічні навантаження елементів експериментальної установки.

Отримані результати свідчать, що під час ударної взаємодії рухомого елемента 4 істотна частка накопиченої кінетичної енергії передається опорній плиті, а згодом поширюється в основу через ґрунтовий масив.

За висоти падіння в межах 12-14 мм і більше після затухання власних коливальних процесів рухомої системи та фундаментної конструкції на осцилограмі фіксується додатковий імпульс прискорення, який відображає відповідну реакцію ґрунту на інтенсивний ударний вплив.

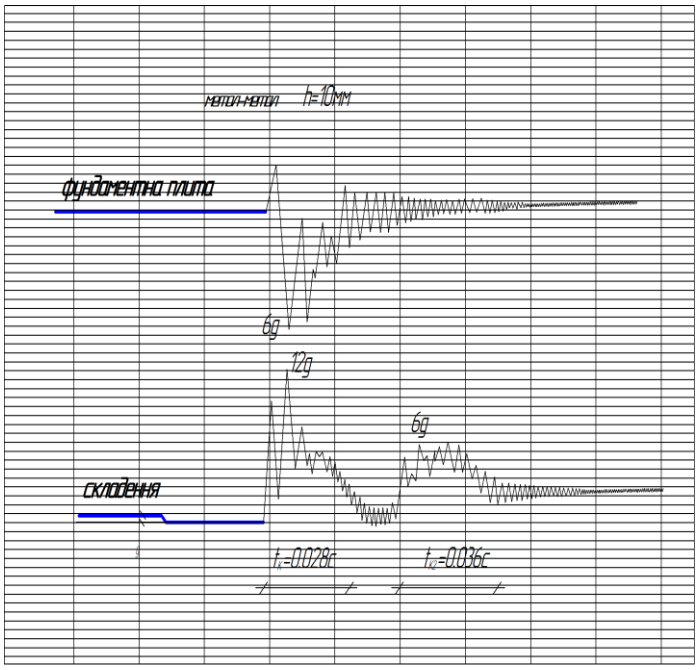


Рисунок 2.2 – Характерна осцилограма одиночних ударних імпульсів при ударі метал об метал

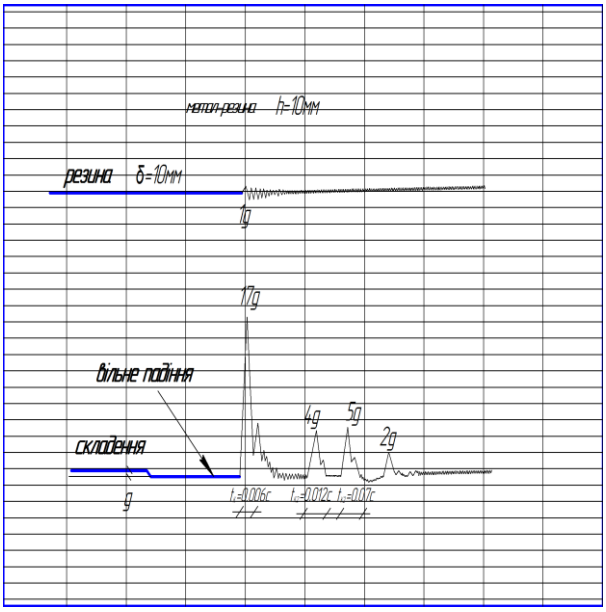


Рисунок 2.3 – Характерна осцилограма одиночного ударного імпульсу при ударі металу об пружну прокладку

Встановлений характер розподілу прискорень між рухомою частиною установки та фундаментною плитою переконливо підтверджує потребу в застосуванні масивних фундаментів для обладнання типу «шок-стіл», оскільки навіть за незначної висоти падіння 2-4 мм спостерігаються суттєві динамічні навантаження на основу. Додатково слід зазначити, що ударна взаємодія

металевих поверхонь характеризується імпульсом складної форми, який є розтягнутим у часі та наближається до пилкоподібного вигляду. Саме особливості тривалості контакту і конфігурації імпульсу значною мірою зумовлюють передачу вагомої частини енергії удару від металевих елементів до фундаментної конструкції.

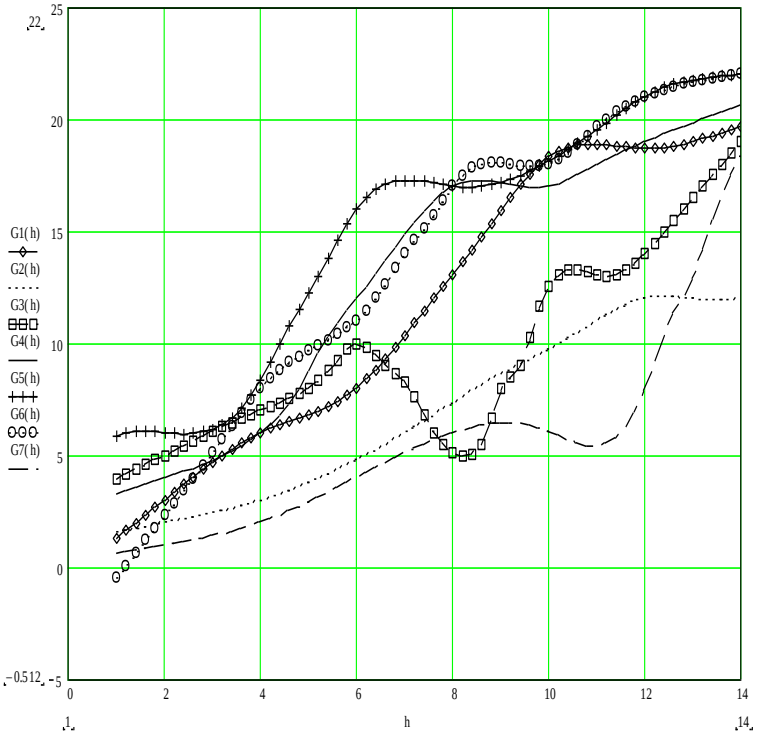


Рисунок 2.4 – Прискорення маси і фундаментної плити при одиничному ударному імпульсі

Ударний імпульс, що виникає під час взаємодії рухомої маси з еластичною прокладкою, виготовленою з транспортерної стрічки або гуми різної твердості, суттєво відрізняється від імпульсу, характерного для жорсткого контакту металевих поверхонь. При цьому діапазон прискорень змінюється в межах від 2 g до 22 g. Важливою особливістю такого способу передачі ударного навантаження є практична відсутність відчутних прискорень фундаментної плити за висоти падіння рухомої системи до 10 мм. Лише при збільшенні цього параметра до 12-14 мм спостерігається незначна реакція основи на рівні 1-2 g. Саме цим пояснюється інтенсивніше зростання прискорень рухомої маси зі

збільшенням висоти її падіння порівняно з випадком безпосереднього контакту металевих елементів. Якщо при висоті скидання 4 мм, що є характерною для установок типу «шок-стіл», значення прискорень практично збігаються, то подальше підвищення висоти призводить до того, що під час удару через пружний прошарок прискорення стають більшими, ніж при ударі металу по металу. Відсутність значної передачі динамічних навантажень на фундамент разом із підвищенням максимальних прискорень пояснюється значно меншою тривалістю контакту рухомої маси з еластичним елементом, яка становить 0,01-0,014 с, тоді як при безпосередній взаємодії металевих поверхонь цей показник досягає 0,01-0,068 с. Крім того, для ударів по пружних прокладках характерною є поява двох-трьох додаткових затухаючих імпульсів, період яких знаходиться в межах від 0,08 до 0,15 с і визначається висотою падіння та фізико-механічними властивостями прокладки.

Значне зростання прискорень рухомої системи та подальше виникнення затухаючих коливальних процесів, поряд із практичною відсутністю відчутних динамічних реакцій з боку фундаментної плити при висоті падіння до 10 мм, свідчить про ефективність застосування ударно-вібраційного режиму з використанням пружних елементів. Такий спосіб створення коливань має переваги над безпосереднім контактом металевих поверхонь, який використовується в установках типу «шок-стіл», оскільки забезпечує більш раціональну передачу енергії та зменшує негативний вплив на опорні конструкції.

Отримані результати попередніх експериментальних досліджень підтвердили перспективність використання ударних коливань, що реалізуються через пружні прокладки, для формування високих пікових прискорень. Проведений аналіз також дозволив визначити основні вихідні характеристики та конструктивні параметри, необхідні для розроблення удосконаленої установки з підвищеними показниками ефективності та продуктивності.

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

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}, \tag{3.1}$$

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

Потужність, що передається на вал привідного механізму за умов сталого режиму роботи та при номінальному навантаженні, визначається за таким співвідношенням

$$P_n = \frac{N}{\eta_P}, \tag{3.2}$$

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

$$n_d = n \cdot i, \tag{3.3}$$

де i – передавальне число редуктора, яке вибирається із стандартного ряду; $i = 4$; $n_d = 4 \cdot 4 = 16$ об/с, або $n_d = 16 \cdot 60 = 960$ об/хв.

По каталогу [16] вибираємо двигун 2ПН200LГУХЛ4 з такими параметрами

$P_n = 16$ *кВт*; $U_n = 440$ *В*; $n_n = 1000$ *об/хв*;

$\eta = 0.86$; $2p = 4$; $R_{ood} = 0.224$ *Ом*;

$R_я = 0.343$ *Ом*; $L_a = 12.0$ *мГн*; $R_{збуд} = 15.9$ *Ом*;

$I_п = 36.36$ *А*.

Електродвигуни серії 2П характеризуються високою стійкістю до короткочасних перевантажень, покращеними показниками швидкодії та стабільності роботи в перехідних режимах. У процесі їх удосконалення вдалося суттєво знизити рівень акустичного шуму та механічних коливань, що позитивно вплинуло на експлуатаційні характеристики. Крім того, такі двигуни відзначаються підвищеною довговічністю, надійністю функціонування та збільшеним терміном служби.

Нормальна робота даних електричних машин забезпечується за умови використання їх у безпечному виробничому середовищі, яке не створює ризику вибуху та не містить електропровідних пилових частинок. Повітряне середовище також не повинно містити хімічно активних газоподібних речовин і парів, здатних викликати корозію металевих елементів або погіршення ізоляційних властивостей обмоток та інших складових електродвигуна.

3.2 Вибір тиристорного перетворювача для ЕП постійного струму

Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму є одним із ключових завдань сучасних систем автоматизованого електропривода. Для реалізації ефективного керування широко застосовуються тиристорні перетворювачі, використання яких дозволяє забезпечити плавну зміну режимів роботи електродвигуна, підвищити енергетичну ефективність системи та покращити її експлуатаційні характеристики. Завдяки своїм перевагам такі перетворювачі набули значного поширення під час створення регульованих електроприводів постійного струму.

Зміна швидкості обертання двигуна постійного струму може здійснюватися кількома способами [17]:

- шляхом регулювання напруги, що подається на якір, за умови незмінного струму в колі збудження;

- зміною величини струму збудження при постійній напрузі на якорі;
- одночасним коригуванням напруги якоря та струму в обмотці збудження.

Регулювання напруги, що подається на якір двигуна, а також зміна струму в колі збудження здійснюються за допомогою керованих випрямних пристроїв. Найбільшого поширення в електроприводах набули однофазні та трифазні мостові схеми випрямлення, які забезпечують необхідні параметри живлення електричних машин постійного струму. У випадку керування через коло збудження потужність випрямляча є меншою, що дозволяє зменшити його масогабаритні характеристики та знизити вартість системи. Водночас значна електромагнітна інерційність обмотки збудження обумовлює повільнішу реакцію приводу на керуючі впливи, унаслідок чого його динамічні показники поступаються системам, у яких регулювання здійснюється через якірне коло. Тому вибір способу керування визначається особливостями технологічного процесу та вимогами до швидкодії електропривода.

Під час експлуатації механізмів, призначених для ущільнення бетонних сумішей, часто виникає потреба у зміні напрямку обертання виконавчого двигуна. Така необхідність зумовлена потребою контролювати рух робочої плити та обмежувати швидкість її опускання. Для забезпечення надійної роботи обладнання процес реверсування повинен супроводжуватися ефективним гальмуванням без різких динамічних навантажень, а подальший розгін двигуна має відбуватися плавно та без перевантаження механічних елементів приводу.

Зміна напряму обертання електродвигуна може реалізовуватися шляхом зміни полярності напруги на якорі або за рахунок реверсування струму в колі збудження. Практична реалізація таких режимів передбачає використання спеціальних комутаційних пристроїв, зокрема контактних перемикачів, встановлених у відповідних електричних колах. У сучасних системах автоматизованого керування для виконання реверсу широко застосовуються два керовані тиристорні перетворювачі, які забезпечують швидку зміну

режимів роботи електропривода, підвищують надійність системи та покращують якість регулювання швидкості обертання.

Принцип дії схеми, наведеної на рис.3.1, доцільно розглядати на основі графічних залежностей, поданих на рис.3.2, де відображено сукупність характеристик реверсивного тиристорного перетворювача для режимів випрямлення та інвертування електричної енергії. При побудові цих характеристик не враховувалася їх нелінійна поведінка в зоні малих значень струму I_d, що пов'язано з виникненням переривчастого режиму струму i_d перетворювача за реальних умов роботи, коли індуктивність згладжувального дроселя має скінченне значення ($L_d<\infty$). Враховуючи, що механічна характеристика двигуна постійного струму незалежного збудження $M=F(n)$ визначається величиною напруги на якорі та її зміною під впливом навантаження, представлене на рис.3.2 сімейство зовнішніх характеристик перетворювача можна також інтерпретувати як сукупність механічних характеристик електродвигуна. За умови незмінного струму збудження $I_{ов}=const$ частота обертання є пропорційною напрузі U_d, а електромагнітний момент залежить від струму якоря I_d. При цьому навантажувальний момент на валу електропривода M_n вважається сталим і таким, що не змінюється зі зміною швидкості обертання n.

Для даного способу керування характерним недоліком є значна тривалість спрацьовування контактора, яка може становити від кількох десятків до сотень мілісекунд, що негативно впливає на швидкодію системи та знижує ефективність її функціонування. Крім того, працездатність схеми значною мірою визначається надійністю комутаційного апарата, тому будь-які відмови або зношування контактора можуть призвести до порушення нормального режиму роботи всієї системи.

Удосконалена структура тиристорного електропривода реалізується із застосуванням двох тиристорних груп, що дають можливість змінювати напрямок струму в колі електродвигуна без використання механічних комутаційних апаратів. Такий тип перетворювача отримав назву реверсивного і

характеризується високою функціональністю під час автоматизованого керування електроприводом у різних режимах експлуатації. Залежно від особливостей побудови силової частини перетворювальні пристрої в системі можуть підключатися за перехресною або зустрічно-паралельною схемою, кожна з яких має свої конструктивні та експлуатаційні особливості.

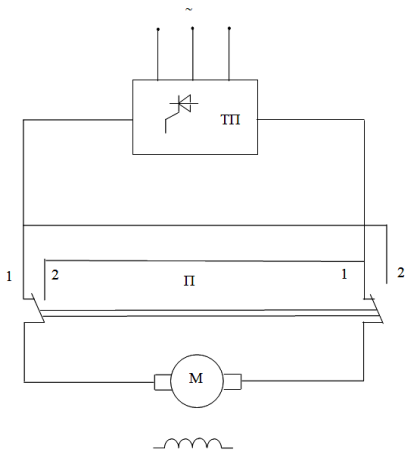


Рисунок 3.1 – Структурна схема реверсивного тиристорного перетворювача

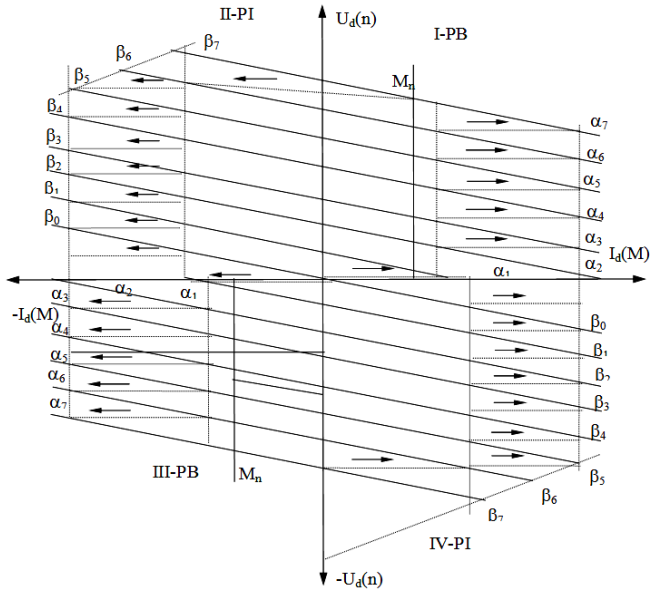


Рисунок 3.2 – Сумісні зовнішні характеристики реверсивного тиристорного перетворювача

Основна відмінність між зазначеними схемами полягає в необхідній кількості вторинних обмоток силового трансформатора. Практика використання показує, що завдяки простішій конструкції трансформаторного

обладнання та зменшенню матеріальних витрат більшого поширення набула зустрічно-паралельна схема з’єднання. Саме тому в подальшому дослідженні та аналізі роботи електропривода доцільно розглядати даний варіант побудови реверсивного тиристорного перетворювача.

Суть принципу роздільного керування полягає в тому, що керуючі сигнали надходять лише на тиристори тієї групи, яка в конкретний момент часу бере участь у процесі перетворення електричної енергії. Під час зміни режимів роботи, коли виникає потреба в підключенні іншої групи тиристорів, подача імпульсів на активну до цього групу припиняється. Після витримки певного часового інтервалу, необхідного для зменшення струму до нульового значення та повного закривання силових елементів попередньої групи, здійснюється подача керуючих сигналів на тиристори, які повинні розпочати роботу. При цьому між кутами керування α_I та α_{II} (рис. 3.3) обох реверсивних комплектів підтримується умова узгодженого регулювання. Реалізація необхідного блокування сигналів керування забезпечується системою керування перетворювача із застосуванням датчиків струму, що дозволяє контролювати стан силової схеми та запобігати одночасній роботі обох груп.

Потреба у введенні часової затримки між вимкненням однієї та ввімкненням іншої тиристорної групи, тривалість якої зазвичай становить від 1 до 10 мс залежно від характеру навантаження, певною мірою знижує швидкодію електропривода [19]. Незважаючи на це, використання реверсивних тиристорних перетворювачів із роздільним керуванням залишається ефективним технічним рішенням, оскільки вони забезпечують надійну роботу системи та повною мірою відповідають експлуатаційним вимогам більшості сучасних електроприводів.

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

Електроприводна система допускає роботу в режимі короткочасних перевантажень за струмом якоря електродвигуна. При цьому силовий перетворювач здатний витримувати струм, що досягає 2,25 від номінального значення, протягом 10 с у повторно-короткочасному режимі роботи за умови,

що середньоквадратичне значення струму не перевищує номінальний рівень, а інтервал усереднення становить не більше 10 хв.

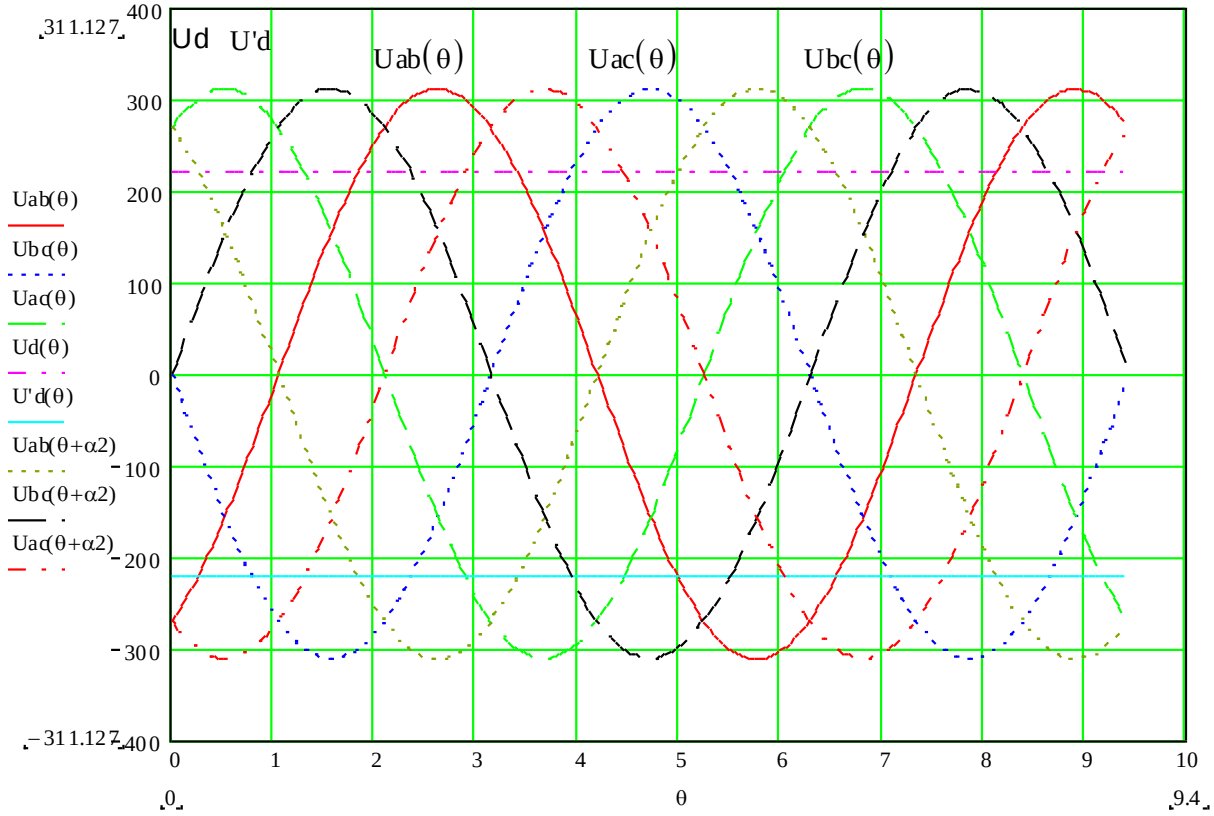


Рисунок 3.3 – Криві вихідної напруги реверсивних перетворювачів при сумісному та узгодженому керуванні

Після стрибкоподібної зміни механічного навантаження від режиму холостого ходу до номінального значення електропривод забезпечує відновлення швидкості обертання в межах встановленого допуску за час, що не перевищує 0,5 с. Вказана характеристика гарантується за умови, що частота обертання двигуна становить не менше половини номінальної.

У початковому діапазоні регулювання система керування характеризується достатньо високими динамічними показниками, а смуга пропускання замкненого контуру регулювання швидкості в лінійній області роботи становить щонайменше 100 рад/с, що забезпечує необхідну швидкодію та стійкість перехідних процесів.

Електроприводи зберігають стабільну працездатність за наявності нелінійних викривлень параметрів мережі живлення, величина яких може досягати 10 % від амплітуди сигналу при кутовій тривалості до 10 електричних градусів незалежно від положення спотворення на синусоїдальній кривій напруги. Така особливість забезпечує стійке функціонування системи в умовах погіршення якості електроенергії та підвищує надійність роботи обладнання.

Електроприводи сумісні з електродвигунами серій ПБСТ, 2П, а також з іншими машинами постійного струму, конструкція яких допускає підвищення швидкості обертання понад номінальне значення шляхом ослаблення магнітного поля збудження. При цьому параметри двигуна повинні відповідати встановленим вимогам щодо номінальної напруги та струму, а струм кола збудження не має перевищувати 5 А. Для виконань електроприводів, розрахованих на живлення від мереж із напругою 220 В, 230 В або 240 В, необхідною умовою є використання обмотки збудження двигуна, номінальна напруга якої становить 110 В.

Основні характеристики надійності електроприводів визначають їх здатність тривалий час виконувати задані функції із збереженням необхідних технічних параметрів та експлуатаційних показників.

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

3.3. Розрахунок елементів силової частини та СІФК тиристорного перетворювача

Вибір тиристорів

Дані для розрахунку тиристорного перетворювача приведені нижче.

Вхідні дані

Номінальна напруга	$U_{dn} = 440\ В$
Номінальний струм	$I_{dn} = 36.4\ А$
Напруга мережі	$U_{л} = 380\ В$

Коливання напруги мережі $\Delta U = \pm 10\ \%$

Діапазон зміни випрямленої напруги від U_{dn} до 0

Оскільки активна та індуктивна складові повного опору мережі мають незначні значення, їх впливом у подальших розрахунках можна знехтувати.

Визначимо найменше значення напруги живильної мережі, яке забезпечує отримання випрямленої напруги (U_{dn}=440) В. Навантажувальна характеристика трифазного мостового випрямляча при зміні кута керування в межах (\alpha = 0-60^\circ) наведена на рис. 3.4 та відображає залежність вихідних параметрів від режиму роботи перетворювача.

Для визначення необхідних параметрів скористаємося виразом для розрахунку випрямленої напруги [20]:

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

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

$$I_n = 50\ A; \qquad X_p = 0.095\ Ом; \qquad R_p = 22 \cdot 10^{-3}\ Ом.$$

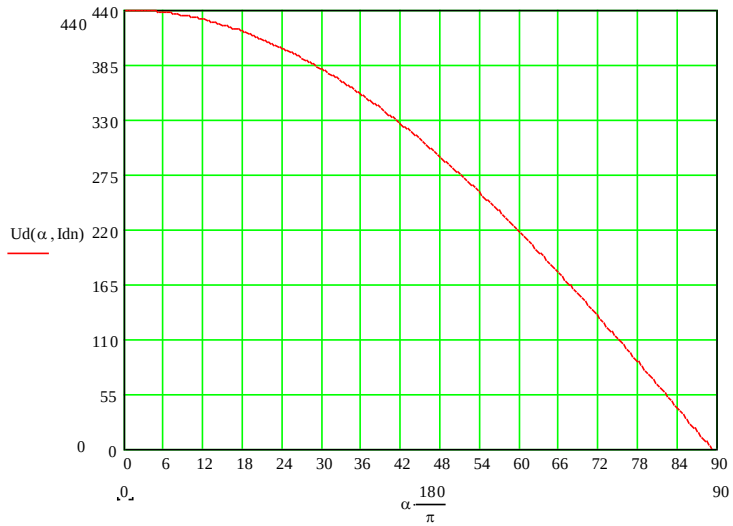


Рисунок 3.4 – Регулювальна характеристика перетворювача

Визначимо найменшу величину напруги живильної мережі, за якої тиристорний випрямляч здатний забезпечити на виході номінальну напругу Ud_n = 440 В при номінальному значенні струму навантаження I_{dn} = 36,4 А.

Прийнявши початковий кут керування $\alpha = 0$ отримаєм

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

Підставляємо числові значення і отримаємо

$$U_{\min} = \frac{440 + (3 \cdot 0.095/\pi + 1.75 \cdot 22 \cdot 10^{-3}) \cdot 36.4 + 2}{3\sqrt{2}/\pi} = 330.8 \; B.$$

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

Визначимо початковий кут регулювання з умови

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

Тоді

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

Підставимо числові значення

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

Здійснимо розрахунок основних характеристик тиристорів, що входять до складу випрямного пристрою. Для трифазного перетворювача значення середнього струму, який протікає через окремий тиристор, визначається відповідно до параметрів обраної схеми та режиму її роботи

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

$I_{a\,сер} = 36.4/3 = 12.12$ А.

З урахуванням запасу на пусковий струм вибираємо

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

$I_{a\,сер} = 12.12 \cdot 2.5 = 30.3\ А.$

Повторні напруги для трифазної мостової схеми

$$U_{повт} \geq 1.045 \cdot U_{dn}, \qquad (3.10)$$

$U_{повт} = 1.045 \cdot 440 = 460\ В.$

Беручи до уваги можливі відхилення напруги електричної мережі в межах 20 %, а також вплив комутаційних і компенсаційних перенапруг:

$$U_{повт\,max} = 1.5 \cdot U_{повт}, \qquad (3.11)$$

$$U_{повт\,max} = 1.5 \cdot 460 = 690\ В.$$

Вибираємо тиристор типу [21] *Т161-125-7-32*, що має такі параметри:

$I_{сер} = 125\ А$; $U_{повт} = 700\ В$; $\Delta U_a = 1.75\ В$;

$\Delta U/dt = 20\ В/с$; $t_{вим} = 25\ мкс$; $di/dt = 20\ А/мкс$;

$I_{уд\,доп} = 4000\ А$; $I_{кер} = 0.4\ А$; $I_{обер} = 20\ мА$.

Виконаємо перевірку обраного тиристора та струмообмежувального реактора на стійкість до дії ударного струму при виникненні глухого короткого замикання, що відбувається безпосередньо на вихідних затискачах перетворювального пристрою.

Амплітуда базового струму короткого замикання

$$I_{б\sim} = \frac{U_{\sim Нр}}{\sqrt{R_р^{\,2} + X_р^{\,2}}}, \qquad (3.12)$$

де $U_{\sim Нр} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\cdot}}{\sqrt{3}}$ $U_{\sim Нр} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{\sqrt{3}} = 310.27$ *В*.

Підставив числові значення

$$I_{б\sim} = \frac{310.27}{\sqrt{0.095^2 + 0.022^2}} = 3182$$ *А*.

Величину ударного струму при глухому зовнішньому короткому замиканні розраховують за такою залежністю

$$I_{уд} = I_{кс} \cdot i_{уд}^{*}, \qquad (3.14)$$

де $i_{уд}^{*}$ – коефіцієнт, що залежить від співвідношення $ctg\ \varphi_к = R_р/X_р$, який визначається по номограмам [22].

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

$I_{уд} = 3182 \cdot 0.95 = 3023\ А$.

$I_{уд} < I_{уд\ доп} = 4000\ А$.

Здійснюємо перевірку правильності вибору тиристора за допустимою максимальною швидкістю наростання напруги, використовуючи відповідний розрахунковий вираз

$$\frac{dU}{dt} \le \frac{\sqrt{2} \cdot U \cdot R_{Д}}{3 \cdot L_p}, \qquad (3.15)$$

де $R_д$ – активний опір вентилів, L_p – індуктивність реакторів

$$R_д = \Delta U_d / I_{сер}, \qquad (3.16)$$

$R_д = 1.75/125 = 0.014\ Ом$;

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

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

Тоді

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

$\frac{dU}{dt} < 20$ *В/мкс*.

Це означає, що реактор вибрано вірно.

3.4. Розробка функціональної та структурної схеми привода

Загальновідомо, що для електроприводів невеликої потужності, до яких не висуваються підвищені вимоги щодо швидкодії та динамічних характеристик, достатньо здійснювати регулювання лише одного параметра. У більшості випадків таким параметром виступає швидкість обертання електродвигуна.

Для приводів, що працюють у складніших режимах і потребують високої точності функціонування, а також якісних перехідних процесів, керування лише однією координатою є недостатнім. У таких системах необхідно забезпечувати погоджене регулювання кількох параметрів одночасно.

Найбільш поширеним є контроль кутової швидкості ротора та струму електродвигуна, що дозволяє покращити стійкість роботи приводу та забезпечити необхідні показники якості керування.

У сучасних системах автоматизованого електропривода застосовуються різні методи багатоконтурного регулювання, серед яких найбільшого поширення набули схеми паралельного та каскадного керування [23, 24].

Особливістю паралельного способу регулювання є необхідність організації такого алгоритму взаємодії між контурами, за якого активним залишається той контур, для якого поточне відхилення регульованого параметра від заданого значення є найбільшим. Це дозволяє забезпечити більш ефективне реагування системи на зміну режимів роботи та зовнішніх збурень.

Каскадний принцип регулювання двох чи більше параметрів ґрунтується на формуванні зовнішнім контуром сигналу завдання для внутрішнього контуру. При цьому внутрішній контур виступає складовою частиною зовнішньої системи керування, тому його динамічні характеристики необхідно враховувати під час налаштування та оптимізації всієї структури. Усі регулятори функціонують одночасно та взаємопов’язано, без переходу між окремими режимами роботи. Додатково забезпечення допустимих меж зміни регульованих параметрів може здійснюватися за рахунок обмеження відповідних сигналів завдання. Використання пропорційно-інтегральних регуляторів і досягнення належної якості регулювання можливі за умови такого поділу об’єкта керування на функціональні частини, за якого кожному контуру відповідає одна домінуюча стала часу, що підлягає компенсації [23].

На сьогоднішній день системи автоматичного керування електроприводами з аналоговою обробкою інформації найчастіше реалізуються саме за принципом підпорядкованого регулювання. Такий підхід забезпечує економічно доцільне впровадження завдяки використанню типових уніфікованих модулів, а також характеризується гнучкістю структури, що дозволяє без значних труднощів інтегрувати додаткові контури регулювання для покращення показників роботи системи.

Якірний перетворювач разом із пристроєм збудження належать до ключових складових електропривода. Функцією перетворювача є перетворення трифазної змінної напруги мережі живлення у випрямлену напругу постійного струму, яка надходить до якоря електродвигуна. Крім того, саме в цьому вузлі реалізуються основні алгоритми керування енергетичними потоками системи, що забезпечують підтримання та регулювання швидкості обертання вала відповідно до сигналів, які надходять від задавального пристрою.

Пристрій збудження призначений для перетворення однофазної змінної напруги мережі в постійну напругу, необхідну для живлення обмотки збудження двигуна. Під час роботи електропривода в режимах, коли частота обертання перевищує номінальне значення, регулювання магнітного потоку шляхом послаблення поля здійснюється залежно від величини електрорушійної сили двигуна, що дозволяє розширити діапазон регулювання швидкості та забезпечити стабільну роботу системи.

Функціональна схема електроприводу приведена на рис.3.7.

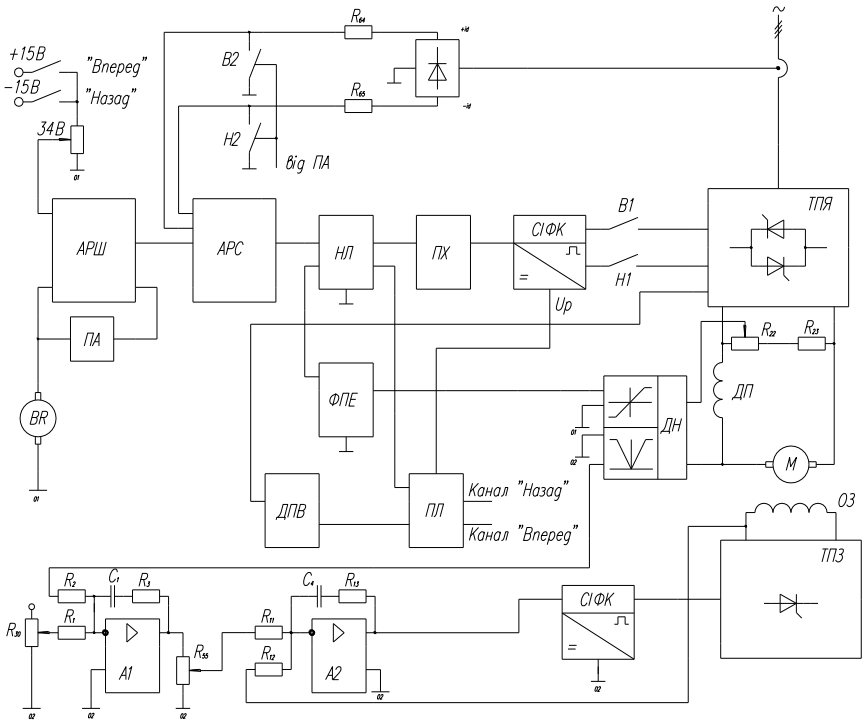


Рисунок 3.7 – Функціональна схема електроприводу ЕТУ3601-Д

Умовні скорочення, що використовуються: ТПЯ – тиристорний перетворювач кола якоря; СІФК – система фазово-імпульсного керування; ПХ – перемикач режимних характеристик; НЛ – нелінійний елемент; ФПЕ – функціональний перетворювач електрорушійної сили; АРС – адаптивний регулятор струму; АРШ – адаптивний регулятор частоти обертання; ПА – блок адаптації; ДПВ – датчик провідного стану вентилів; ПЛ – логічний модуль; ДН – вимірювач ЕРС; ДП – додатковий полюсний елемент електродвигуна; М – електрична машина постійного струму; ОЗЧ – обмотка збудження; BR – тахогенераторний датчик швидкості; ДС – датчик струму якірного перетворювача; ТПЗ – тиристорний перетворювач кола збудження; Н1, Н2, Н3, В1, В2, В3 – комутаційні ключі; Up – сигнал дозволу на роботу системи; ДСЗ – датчик струму в колі збудження.

Система керування напругою якоря побудована за принципом двоконтурного підпорядкованого регулювання, що включає внутрішній контур струму та зовнішній контур швидкості. При цьому регулятор швидкості реалізований за адаптивним алгоритмом, у якому коефіцієнт підсилення автоматично змінюється залежно від частоти обертання електродвигуна. Такий підхід дозволяє підтримувати необхідний запас стійкості приводу під час роботи у другому діапазоні регулювання.

Одночасно при переході до другої зони роботи передбачено зменшення граничного значення вихідного сигналу регулятора швидкості, внаслідок чого відбувається коригування допустимого рівня струму та зниження величини струмового обмеження для забезпечення надійної роботи електропривода.

Контур регулювання збудження містить два взаємопов’язані канали керування: контур стабілізації струму збудження та контур підтримання електрорушійної сили двигуна. Для задання необхідних параметрів використовуються відповідні пристрої налаштування струму збудження R55 та ЕРС двигуна R30, що забезпечують формування необхідних режимів роботи привода.

На основі проведеного аналізу принципів функціонування системи керування доцільно представити структурну схему електропривода, яка відображає взаємозв'язок основних елементів і контурів регулювання (рис. 3.8).

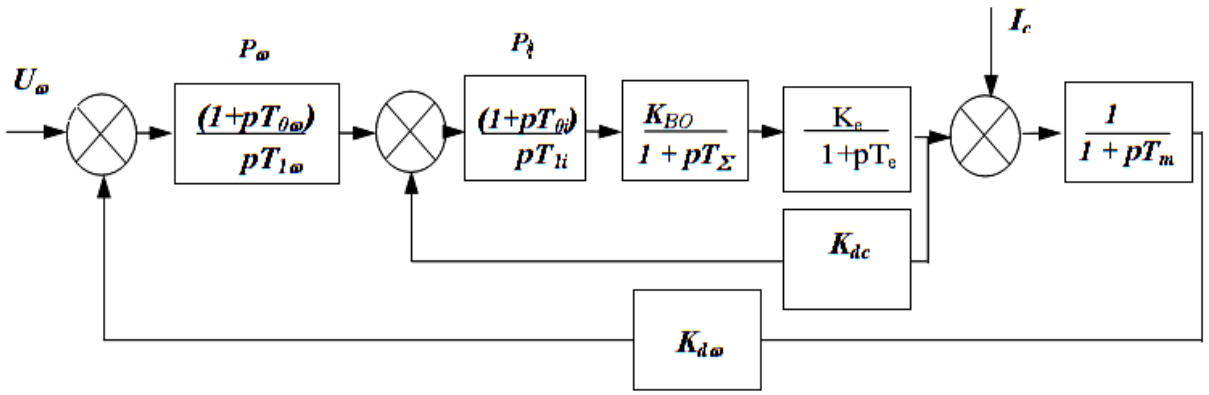


Рисунок 3.8 – Електропривод постійного струму з контуром регулювання частоти обертання та підпорядкованим контуром струму

За умови достатньо великого коефіцієнта підсилення в контурі регулювання струму вплив протиелектрорушійної сили двигуна можна вважати незначним і не враховувати дію зворотного зв'язку за ЕРС. Це пояснюється тим, що проти-ЕРС електродвигуна виступає для струмового контуру як зовнішнє збурення, проте при високому підсиленні її вплив на динамічні характеристики електропривода суттєво зменшується. За таких умов структурна схема системи спрощується шляхом виключення останньої ланки та набуває вигляду, наведеного на рис. 3.9.

Сумарний вплив паразитних сталих часу τΣ враховано у передавальній функції силового перетворювача, що дозволяє більш точно відобразити реальні динамічні властивості системи керування та особливості перехідних процесів.

Для забезпечення оптимальних показників роботи системи в заданому частотному діапазоні необхідно, щоб між основними параметрами контуру виконувалося таке співвідношення

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

Пуск електропривода в розглянутій системі відбувається за принципом підпорядкованого регулювання. На початковому етапі внутрішній контур керування струмом забезпечує відпрацювання двигуном сигналу завдання, підтримуючи необхідне значення струму. При цьому частота обертання ротора формується залежно від прикладеного навантаження. Зовнішній контур здійснює підтримання швидкості на рівні заданого значення, а на основі різниці між фактичною та заданою частотою генерується сигнал завдання для струмового контуру. Відповідно до цього сигналу встановлюється струм електродвигуна, а введення обмеження на його величину забезпечує захист привода від перевантажень.

У випадку різкої зміни заданої швидкості на значну величину виникає суттєве відхилення між необхідним і фактичним значеннями частоти обертання. За таких умов активується механізм обмеження струму, який не допускає перевищення встановленого граничного рівня. Процес розгону двигуна продовжується в режимі струмового обмеження доти, доки помилка регулювання швидкості не зменшиться до такого значення, за якого струм стане рівним допустимій межі Ігр.

Застосування такого підходу дозволяє виконувати безпосередній запуск електродвигуна без виникнення надмірних навантажень на силові елементи та компоненти системи керування. Якщо для реалізації контурів регулювання швидкості й струму використовуються ПІ-регулятори, то структурну схему керування, побудовану на базі операційних підсилювачів та наведену на рис. 3.10, можна подати у вигляді розрахункової моделі, придатної для подальшого аналізу та визначення параметрів системи.

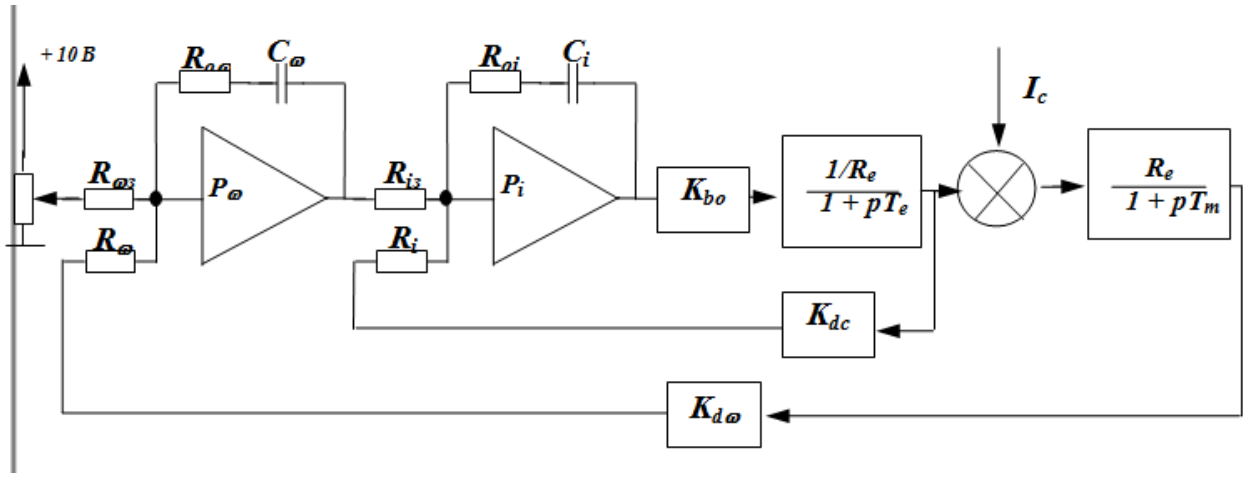


Рисунок 3.9 – Розрахункова схема двоконтурної системи підпорядкованого регулювання

3.5. Розробка принципової схеми приводу

Вибір схеми регулятора швидкості

У сучасних системах автоматичного керування електроприводами регулятори дедалі частіше реалізуються із застосуванням інтегральних операційних підсилювачів, що стало можливим завдяки стрімкому розвитку мікроелектроніки та напівпровідникових технологій [25].

Широке впровадження таких технічних рішень обумовлене високою надійністю функціонування, стабільністю параметрів упродовж тривалого періоду експлуатації, простотою налаштування та технічного супроводу, а також економічною доцільністю їх використання. Необхідне значення коефіцієнта підсилення та потрібні динамічні характеристики можуть бути сформовані за допомогою відомого методу введення від'ємного зворотного зв'язку, до складу якого входять RC-кола з частотнозалежними властивостями. За умови, що власний коефіцієнт підсилення операційного підсилювача значно перевищує одиницю, що легко забезпечується на практиці, параметри підсилювального каскаду із замкненим контуром визначаються переважно характеристиками кола зворотного зв'язку. Таким чином, вплив внутрішніх параметрів самого операційного підсилювача на підсилювальні та частотні

властивості системи стає незначним, а основну роль відіграють елементи кола зворотного зв’язку

$$K_{\text{взз}} = \frac{K_{\text{von}}}{1 + K_{\text{von}} \cdot \chi} \approx \frac{1}{\chi}, \qquad (3.18)$$

де $K_{взз}$ – коефіцієнт підсилення (передачі) підсилювача зі зворотнім зв'язком; K_{von} – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача; χ – комплексний коефіцієнт зворотнього зв’язку.

На рис. 3.10 подано структурну схему регуляторів струму та кутової швидкості електропривода, реалізованих на базі операційних підсилювачів.

Розрахунок такого ПІ-регулятора зводиться до визначення сталої часу

$$T = R \cdot C, \qquad (3.19)$$

$T_{0\omega} = R_{0\omega} \cdot C_{\omega}$ 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, утворений резисторами R2, R3 та R4 призначений для усунення впливу початкового зміщення напруги, величина якого може досягати Uзм = 7,5 мВ. Вузол регулювання частоти обертання реалізовано на базі операційного підсилювача DA1, до складу якого входить коригувальна RC-мережа, сформована елементами C4 і R10. Резистори R1–R5 та R19 використовуються для точного налаштування нульового рівня підсилювального каскаду, а конденсатор C3 підключається паралельно до конденсатора C4 з метою коригування частотних характеристик системи. Компоненти C1, C2, R11 і R12 забезпечують стійкий режим функціонування підсилювача та запобігають виникненню паразитних коливань під час роботи. Резистори R8, R9 і R14 формують канал від’ємного зворотного зв’язку за швидкістю, сигнал для якого надходить від тахогенератора, що дозволяє підвищити точність підтримання заданої частоти обертання електропривода.

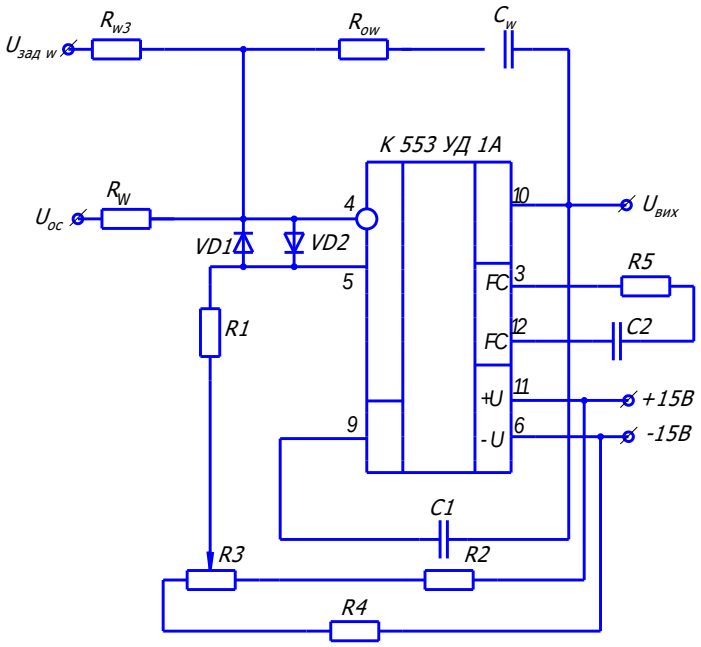


Рисунок 3.10 – Схема електрична принципова регулятора швидкості

Резистор R6 призначений для подавання опорного сигналу величиною 10 В на вхід схеми. Резистор R7 використовується для надходження сигналу, що відповідає заданому положенню виконавчого механізму.

Вибір регулятора струму

Обрана схема реверсивного перетворювача з роздільним керуванням тиристорними комплектами має низку переваг порівняно з варіантом, у якому використовується сумісне керування. Насамперед це пов’язано з відсутністю зрівнювальних реакторів, завдяки чому зменшуються масогабаритні показники обладнання та скорочуються витрати на його виготовлення і монтаж. Крім того, у такій схемі не виникають зрівнювальні струми між вентильними групами, величина яких за певних режимів роботи може досягати значних значень і негативно впливати на енергетичні показники електропривода.

Разом з тим система з незалежним керуванням вентильними групами не позбавлена певних недоліків. Під час зміни напрямку обертання електропривода робочий режим проходить через зону переривчастого струму перетворювача. У цій області динамічні властивості системи суттєво погіршуються через зменшення коефіцієнта передачі об’єкта керування, що призводить до сповільнення процесу регулювання. Саме тому використання

традиційного ПІ-регулятора не забезпечує необхідної якості перехідних процесів. Для підвищення швидкодії та стабільності роботи системи доцільно застосовувати адаптивний метод регулювання струму, який дозволяє автоматично коригувати параметри керування залежно від поточного режиму роботи електропривода.

Відомо, що адаптивні системи керування знаходять застосування у випадках, коли характеристики об’єкта не залишаються сталими, а змінюються під впливом внутрішніх або зовнішніх факторів. Необхідність використання такого підходу виникає тоді, коли один або декілька важливих параметрів системи залежать від певних змінних стану, що впливають на динаміку процесу регулювання та можуть призводити до погіршення якості керування за умови використання регуляторів із фіксованими налаштуваннями.

Суть адаптивного керування полягає у безперервному коригуванні налаштувань регулятора таким чином, щоб забезпечувалася його найкраща відповідність характеристикам об’єкта в усьому діапазоні роботи. Використання такого підходу є особливо доцільним у випадках, коли параметри об’єкта керування зазнають значних змін, зокрема перевищують двократне відхилення від номінальних значень.

Інакше кажучи, регулятор струму повинен забезпечувати високий коефіцієнт підсилення за невеликих вхідних впливів, поступово знижуючи його зі зростанням амплітуди сигналу. Таким чином, залежність коефіцієнта передачі від вхідного сигналу набуває форми, близької до арксинусоїдальної характеристики.

Реалізація зазначеної залежності досягається шляхом введення до структури системи нелінійного елемента, який послідовно з’єднується з регулятором струму. Сам регулятор побудований за принципом ПІ-регулювання, аналогічно регулятору швидкості, що забезпечує необхідну якість перехідних процесів.

Застосування адаптивного регулятора струму дозволяє суттєво зменшити нелінійність вентильного електропривода під час роботи в режимах

переривчастого струму, що позитивно впливає на швидкодію та стійкість системи автоматизованого керування.

До складу адаптивного регулятора входять регулятор струму, нелінійний коригувальний елемент і функціональний перетворювач електрорушійної сили, які спільно забезпечують формування необхідного керувального впливу.

Сутність адаптивного керування полягає в автоматичному коригуванні характеристик регулятора таким чином, щоб у межах усього діапазону функціонування системи забезпечувалося найкраще узгодження між керуючим пристроєм та об’єктом керування. Для більш глибокого розуміння принципу роботи такої системи необхідно розглянути особливості функціонування нелінійної ланки. Конструктивно вона реалізована на базі операційного підсилювача, до кола його від’ємного зворотного зв’язку підключено нелінійний елемент. Робота цього кола здійснюється за певним алгоритмом.

За незначних значень вхідного сигналу, коли рівень вихідної напруги також залишається малим, усі діоди перебувають у закритому стані. У такому режимі коефіцієнт підсилення нелінійної ланки визначається лише параметрами операційного підсилювача. Після збільшення керуючої напруги Uy до значення, що перевищує поріг прямого зміщення діода, елемент VD1 переходить у провідний стан, унаслідок чого змінюються характеристики кола зворотного зв’язку, а коефіцієнт підсилення набуває такого значення

$$K_2 = (R_{35} + R_{36} + R_{37})/R_{34}. \qquad (3.20)$$

У разі подальшого зростання вихідної напруги, що супроводжується збільшенням спадання напруги на резисторі R35, відбувається відкривання діода VD3, унаслідок чого коефіцієнт підсилення набуває такого значення

$$K_3 = (R_{36} + R_{37})/R_{34}. \qquad (3.21)$$

При більшому вихідному сигналі коефіцієнт підсилення стає

$$K_4 = R_{37}/R_{34}. \qquad (3.22)$$

У разі зміни полярності вхідного сигналу аналогічний принцип роботи реалізується діодами VD2, VD4 та VD6. Перехідну характеристику нелінійного

ланцюга визначено шляхом підстановки відповідних числових параметрів у вирази.

$K_{u1} = 1000$;

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

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

Зі співвідношення

$$K_{Ui} = \frac{\Delta U_{вихі}}{\Delta U_{вхі}} \qquad (3.23)$$

витікає, що

$$\Delta U_{вхі} = \frac{\Delta U_{вихі}}{K_{Ui}} . \qquad (3.24)$$

Розробка логічного пристрою

Ще одним суттєвим недоліком незалежного керування вентильними комплектами є потреба у забезпеченні інтервалу відсутності струму, необхідного для відновлення запірної здатності силових елементів. Наявність такої паузи тривалістю $(1\div10)\cdot10^{-3}$ с практично не впливає на швидкодію електропривода, проте дає можливість спростити структуру системи керування та зменшити витрати на її реалізацію. Для організації незалежного керування силовими вентильними групами в реверсивних схемах використовується логічний пристрій (ЛП).

Логічний пристрій призначений для координації роботи силових вентилів у складі реверсивного перетворювача. Його функціонування забезпечує автоматичне визначення необхідного режиму роботи відповідно до полярності вхідного сигналу, формування команд на вмикання відповідних комутаційних елементів для забезпечення заданого напрямку струму, заборону подачі сигналів керування за наявності інформації від датчика провідного стану тиристорів, а також створення необхідної часової затримки між вимкненням вентильного комплекту, що працював раніше, та подачею керувальних

імпульсів на комплект, який вводиться в роботу. Це дозволяє підвищити надійність роботи перетворювача та виключити можливість аварійних режимів під час перемикання напрямку струму.

Функціональна структура логічного вузла наведена на рис. 3.13. До її складу входять такі основні елементи: нуль-орган (НО), логічні елементи типу «Так-ні» D1.1 та D1.2, що формують вхід тригера заданого стану (ТЗС), тригер заданого стану на елементах D1.3 і D1.4, логічні елементи D2.1 та D2.2 на вході тригера істинного стану (ТІС), тригер істинного стану D2.3 і D2.4, вузли співпадання сигналів D3.1 та D3.2, коло формування часової затримки перемикання, яке включає D3.3, С1 та R3, елемент «Так-ні» D3.4, а також загальні логічні ключі КН і КВ.

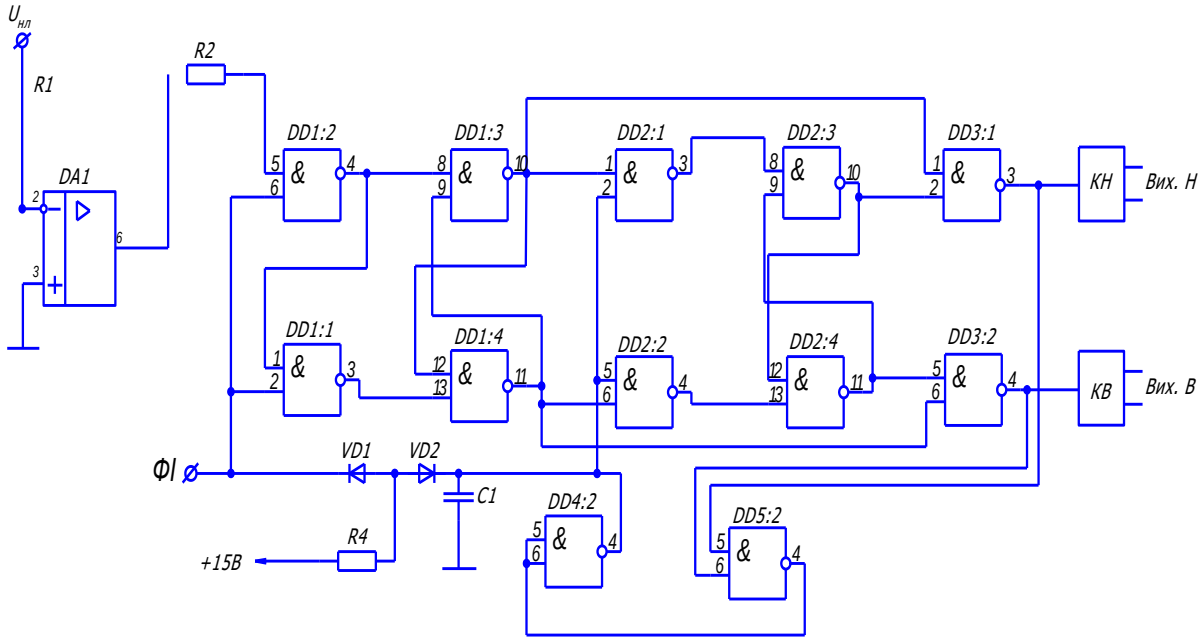


Рисунок 3. 13 – Функціональна схема логічного пристрою

Логічні елементи збігу D2.1 та D2.2 за умови надходження на їхній спільний вхід логічної одиниці забезпечують перемикання тригера ТІП у стан, який визначається поточним положенням тригера ТЗП. Такий принцип роботи дає змогу реалізувати необхідну послідовність функціонування системи керування та забезпечити узгоджену взаємодію між окремими вузлами схеми.

Вихідні сигнали тригерів ТЗП і ТІП подаються на входи логічних елементів D3.1 та D3.2, які здійснюють керування загальними комутаційними

ключами КН і КВ. У подальшому через ці ключі відбувається керування трьома групами силових комутаторів: Н1, В1; Н2, В2; Н3, В3. Пара ключів Н1 та В1 забезпечує формування і передачу керувальних імпульсів на тиристорні комплекти, що відповідають режимам реверсивного руху «Назад» та «Вперед».

Комутаційні елементи Н2, В2, а також Н3, В3 виконують функцію перемикання кіл зворотного зв'язку за струмом і впливають на роботу вхідного кола системи імпульсно-фазового керування СІФК, що дозволяє коригувати параметри функціонування електропривода залежно від обраного режиму роботи.

У разі протікання струму в силовому колі сигнал від датчика ДП надходить на блокувальний вхід 13 у вигляді логічного нуля. Це унеможливлює проходження сигналу НО до входу тригера ТЗП доти, доки струм у силовому колі повністю не припиниться, що підвищує надійність роботи схеми та запобігає виникненню помилкових перемикань.

Під час зміни полярності сигналу Uнзв відбувається реверсування керуючого сигналу на вході НО. У цей момент величина струму в силовому колі поступово зменшується. Після досягнення ним нульового рівня від датчика положення надходить логічний сигнал «1», який через елементи збігу D1.1 та D1.2 забезпечує перемикання тригера ТЗП у протилежний стан. У результаті на виходах елементів D3.1 і D3.2 формується сигнал відповідності, що призводить до вимкнення ключа КН. Одночасно на виході D3.4 зникає сигнал Up, блокується генерація імпульсів ФІ та запускається відлік часової затримки, необхідної для коректного переведення тригерів у новий режим роботи. На вхід елемента D3.3 надходить логічна одиниця, внаслідок чого починається процес заряджання конденсатора С1. Коли напруга на його обкладках досягає порогового значення логічного рівня «1», елементи збігу D2.1 і D2.2 виконують перемикання тригера ТІП у стан, що відповідає положенню тригера ТЗП. Після цього відбувається ввімкнення ключа КВ. Сигнал дозволу на формування імпульсів ФІ знову з'являється на виході елемента D3.4 лише після активації одного з робочих каналів пристрою, що

забезпечує правильну послідовність комутаційних процесів і підвищує надійність функціонування системи.

Після припинення подачі керуючих сигналів на канал, який до цього моменту перебував у робочому стані, з метою підвищення надійності функціонування системи вводиться невелика часова пауза перед формуванням імпульсів для каналу з новим напрямком протікання струму. Таке технічне рішення дає змогу запобігти помилковому спрацьовуванню тиристорів, що може виникати внаслідок недостатньої чутливості пристроїв контролю провідності та перехідних процесів у схемі.

У випадку, коли в процесі відпрацювання встановленої затримки на вхід НО надходить сигнал повернення до початкового режиму роботи, тригер ТЗП переводиться у вихідний стан, узгоджений зі станом тригера ТІП. Після цього без додаткових затримок відновлюється подача керуючих імпульсів на тиристори комплекту, який був активований до початку процедури перемикання, що забезпечує швидке повернення системи до попереднього режиму функціонування.

На основі результатів досліджень, наведених у попередньому розділі, для електропривода обрано двигун постійного струму номінальною потужністю 16 кВт та реверсивний тиристорний перетворювач, виконаний за зустрічно-паралельною схемою. Виконано інженерний розрахунок силових елементів перетворювача і системи імпульсно-фазового керування, а також визначено основні енергетичні характеристики привода та параметри теплових режимів силових напівпровідникових приладів. Проведені розрахунки показали, що коефіцієнт корисної дії спроєктованої системи досягає значення 0,97, що свідчить про її високу енергоефективність.

У процесі проєктування створено функціональну та структурно-алгоритмічну схеми системи автоматичного керування. Для забезпечення необхідних показників якості регулювання реалізовано двоконтурний принцип підпорядкованого керування, який включає внутрішній контур регулювання струму та зовнішній контур регулювання швидкості обертання. Вплив

навантаження враховано шляхом введення збурювального сигналу у вигляді струму навантаження. Для всіх ланок системи визначено необхідні параметри та коефіцієнти налаштування. Отримані результати підтвердили, що статична похибка системи не перевищує 4,7 %.

На підставі розробленої розрахункової моделі двоконтурної системи керування здійснено вибір типів операційних підсилювачів та виконано розрахунок параметрів елементної бази. Проведено аналіз частотних характеристик ПІ-регуляторів контурів струму та швидкості, що дозволило оцінити динамічні властивості системи. Під час розроблення принципової електричної схеми також виконано обґрунтування структури та призначення допоміжних вузлів, необхідних для надійної та стабільної роботи системи керування електроприводом.

4 Дослідження алгоритмічної схеми керування

Дослідження ударно-вібраційної установки виконувалося з використанням засобів комп'ютерного моделювання в програмному середовищі MATLAB Simulink. Для проведення аналізу була створена функціональна модель електропривода пристрою, призначеного для ущільнення бетонної суміші методом ударно-вібраційного впливу.

У процесі моделювання розглянуто два режими налаштування системи керування: перший відповідає технічному оптимуму, а другий – симетричному оптимуму.

Виконаємо аналіз динамічних характеристик електропривода за умови його налаштування відповідно до критерію технічного оптимуму.

Функціонування моделі розглянемо за різних законів зміни навантажувального моменту на валу електродвигуна, а саме при стрибкоподібному навантаженні та за дії періодичних імпульсів. Залежність збурювального впливу ступінчастого типу наведено на рис. 4.1.

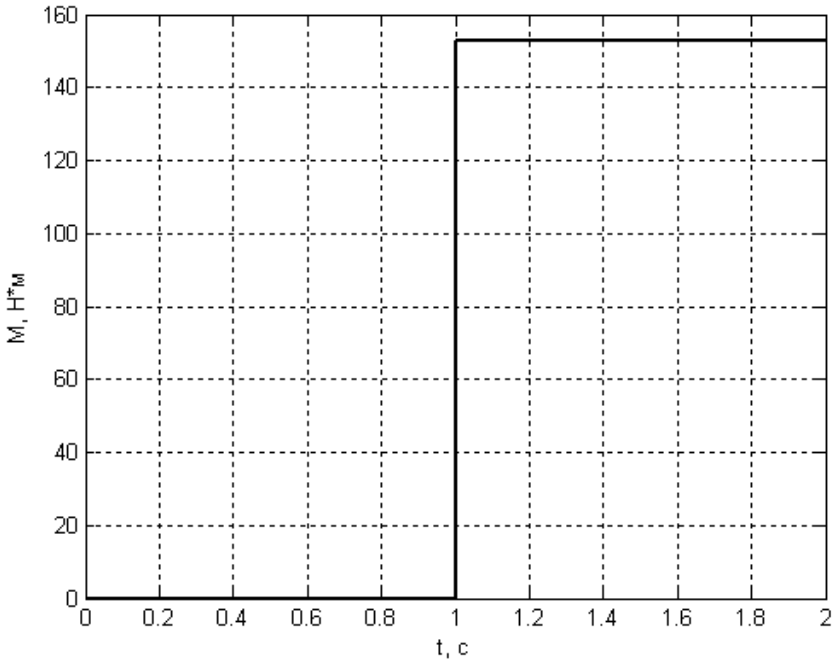


Рисунок 4.1 – Збурна дія системи ступінчастої форми

Імітація зміни механічного навантаження на вал електродвигуна, що виникає внаслідок варіювання крутного моменту, прикладеного до кулачкового вузла, з урахуванням його геометричних параметрів та конструктивних особливостей, здійснюється із застосуванням інерційної ланки. На її вхід надходить періодична послідовність імпульсів, частота якої відповідає режиму роботи виконавчого механізму.

Графічне представлення збурювального впливу крутного моменту для розглянутого способу моделювання наведено на рис. 4.2.

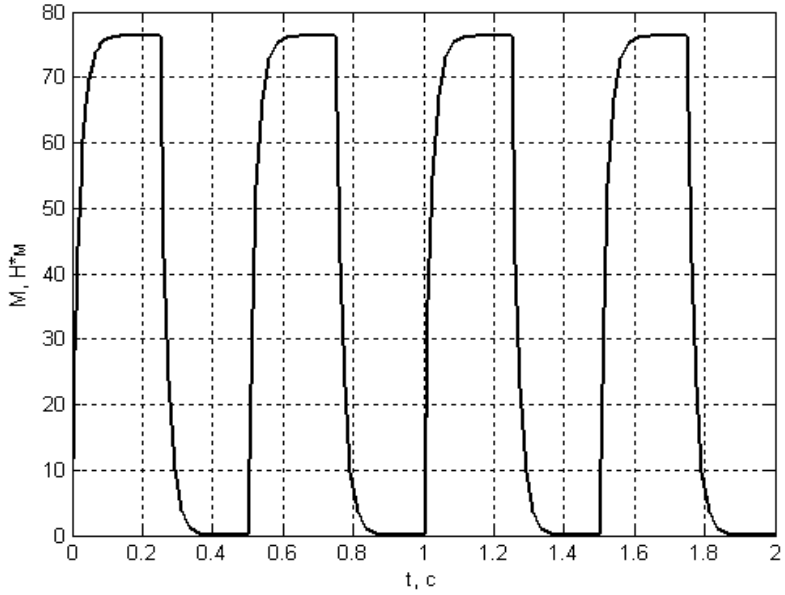


Рисунок 4.2 – Збурна дія системи періодичної імпульсної форми

Формування керувального сигналу здійснювалося за допомогою блоку одиничного стрибка. Значення амплітуди задавального сигналу було прийнято рівним 2,5 В (рис. 4.3), що забезпечує встановлення швидкості обертання вала електродвигуна на рівні 250 об/хв.

Під час перехідного процесу встановлення струму в електроприводі спостерігається короткочасне збільшення його значення понад усталений рівень. Амплітуда такого струмового сплеску обмежується за допомогою струмообмежувальних реакторів, завдяки чому її величина не перевищує гранично допустимих параметрів для електродвигуна та залишається меншою за допустимий ударний струм силових тиристорів. Часові характеристики

зміни струму двигуна при ступінчастому збурювальному впливі наведено на рис. 4.4, тоді як для випадку періодичного імпульсного збурення відповідні залежності подано на рис. 4.5.

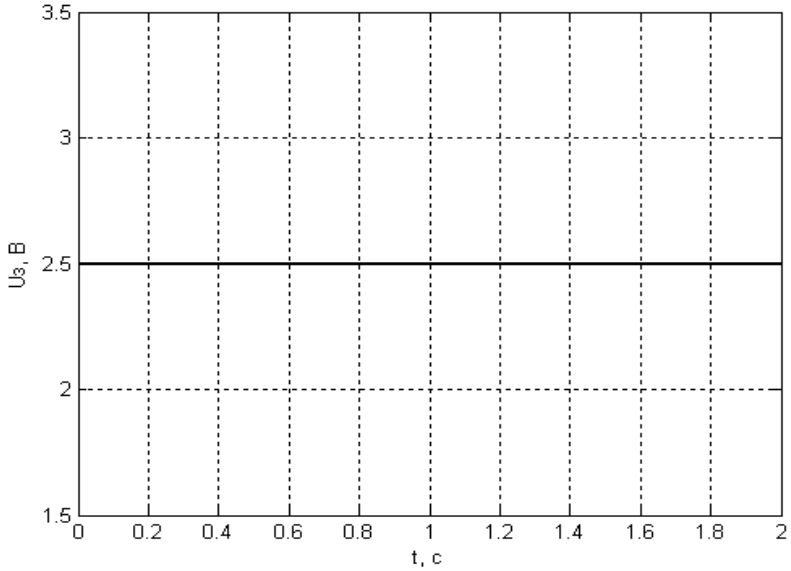


Рисунок 4.3 – Задаюча дія системи

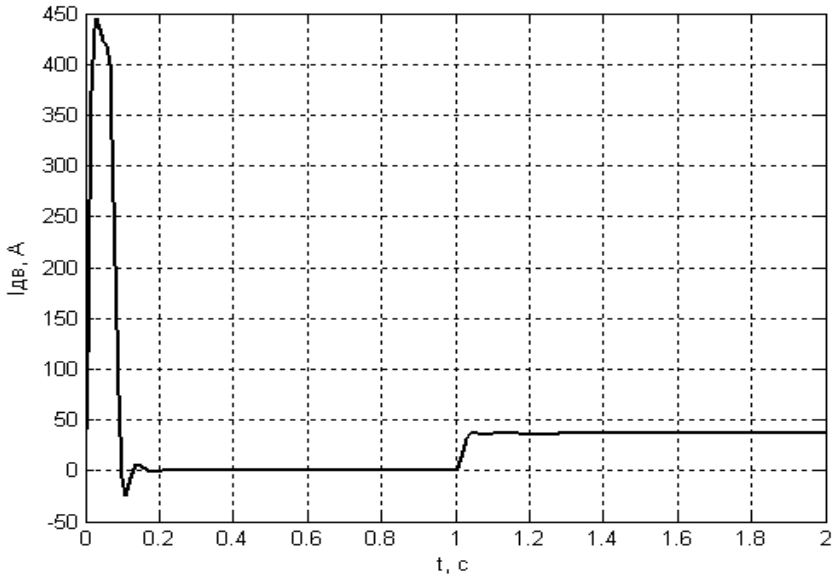


Рисунок 4.4 – Зміна величини струму електродвигуна в часі за ступінчастого характеру навантаження (система налаштована відповідно до умов технічного оптимуму):

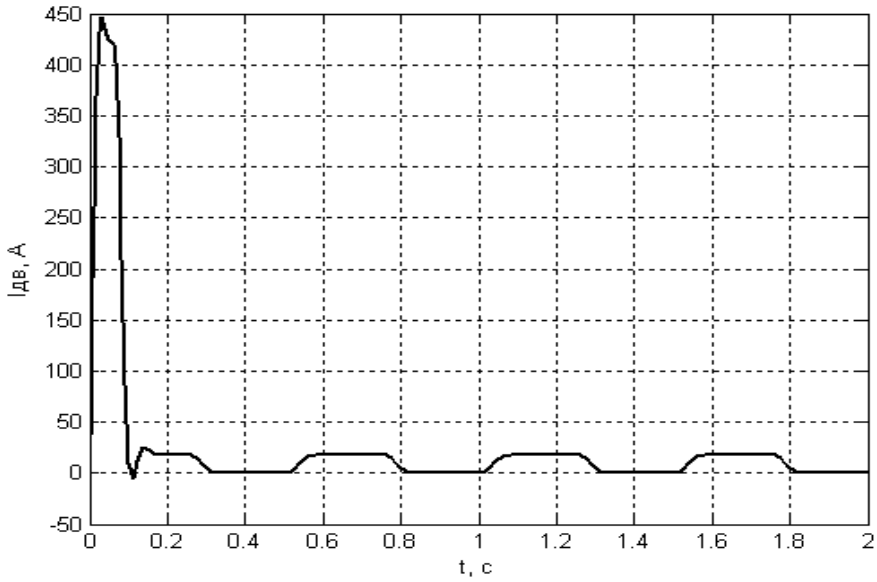


Рисунок 4.5 – Перехідна характеристика струму електродвигуна за умов дії періодичного імпульсного збурення (систему налаштовано відповідно до критерію технічного оптимуму).

Характер зміни вхідної напруги електропривода представлено на графічних залежностях, наведених на рис. 4.6 та рис. 4.7.

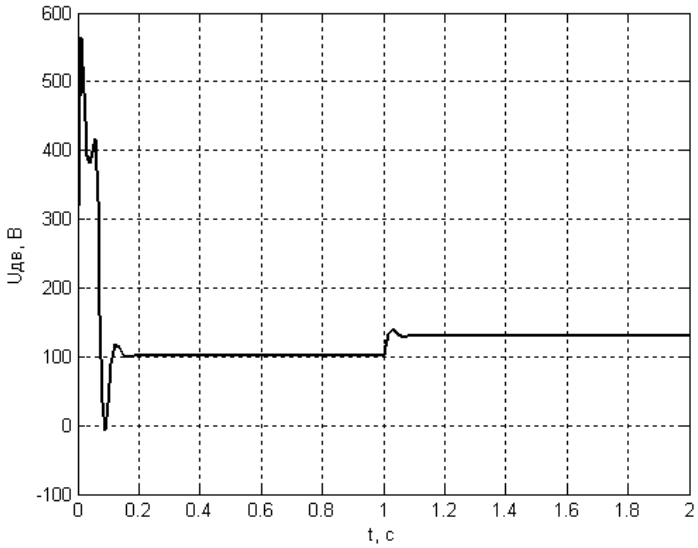


Рисунок 4.6 – Зміна вхідної напруги електродвигуна в часі за умови ступінчастого прикладання навантаження (система налаштована відповідно до технічного оптимуму).

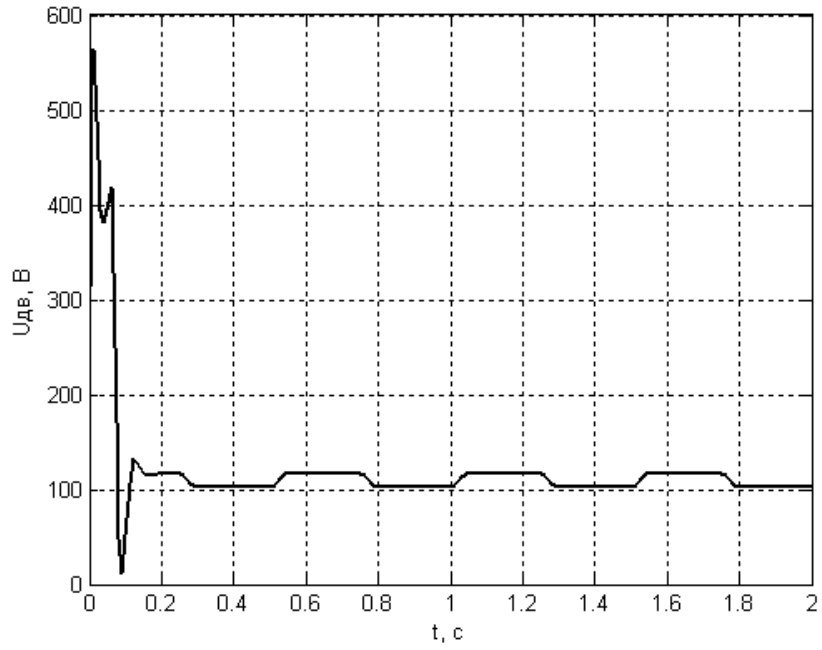


Рисунок 4.7 – Графік зміни вхідної напруги електродвигуна в часі за умов дії періодичного імпульсного збурення (система налаштована відповідно до технічного оптимуму)

Перший графік відображає динаміку зміни напруги під впливом ступінчастого збурення, тоді як другий характеризує реакцію системи на періодичний імпульсний сигнал збурювальної дії.

Перехідні характеристики кутової швидкості обертання ротора електродвигуна при налаштуванні системи відповідно до технічного оптимуму наведено на рис. 4.8 та 4.9.

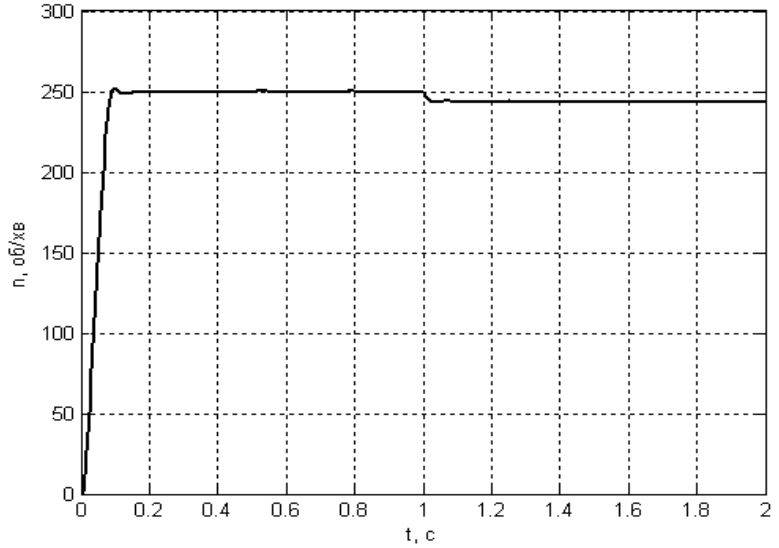


Рисунок 4.8 – Графік зміни частоти обертання вала електродвигуна в часі за умови ступінчастого характеру навантаження (налаштування системи виконано відповідно до технічного оптимуму):

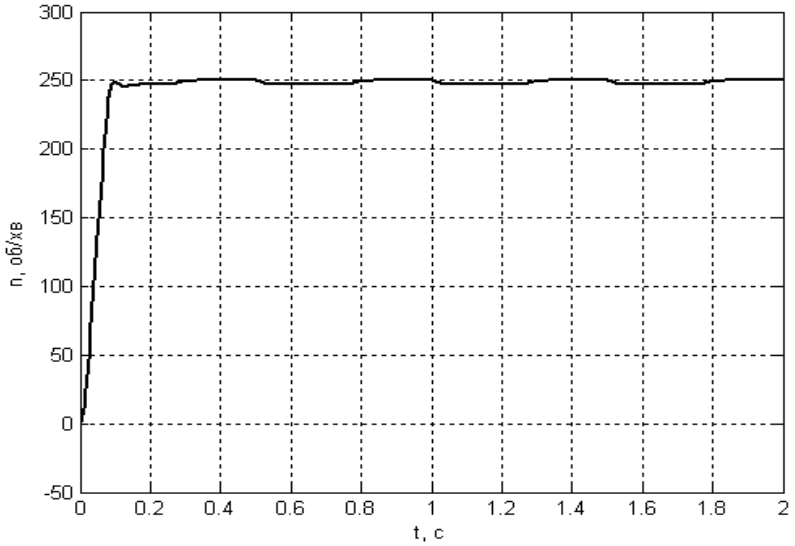


Рисунок 4.9 – Графік зміни кутової швидкості обертання валу електропривода під впливом періодичних імпульсних збурень (систему налаштовано відповідно до критерію технічного оптимуму)

Перший графік відображає зміну частоти обертання вала електродвигуна в часі за умов ступінчастого характеру навантаження, тоді як другий демонструє аналогічну залежність при дії навантаження у вигляді періодичних імпульсів.

Величину перерегулювання частоти обертання ротора електродвигуна розрахуємо за таким виразом

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

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

Для електромеханічного привода ударно-вібраційної установки, параметри якого налаштовані відповідно до умов технічного оптимуму, динамічні процеси зміни кутової швидкості обертання ротора електродвигуна характеризуються такими показниками:

1). Перерегулювання $\sigma = 0\%$;

2). Час регулювання t_p=0,12с;

3). Статична похибка $\Delta n = 4$ об/хв.

Проаналізуємо характеристики електропривода при налагодженні його на симетричний оптимум

Включення ПІ-регулятора до контуру керування швидкістю забезпечує формування іншого варіанта структурної схеми електропривода ударно-вібраційної установки для ущільнення бетонної суміші, налаштування якого виконується відповідно до критерію симетричного оптимуму. Застосування такого підходу дає можливість істотно підвищити точність регулювання та практично повністю усунути усталену похибку системи.

У цьому випадку графік зміни кутової швидкості обертання ротора двигуна під час перехідного режиму матиме вигляд, наведений на рис. 4.10, за умови дії навантаження у вигляді періодично повторюваних імпульсів.

Параметри електропривода, налаштованого за критерієм симетричного оптимуму, визначені на основі дослідження часової залежності n(t):

1). Перерегулювання $\sigma = 5\%$;

2). Час регулювання t_p=0,14с;

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

Виконаємо дослідження електроприводів, параметри яких налаштовані відповідно до технічного та симетричного оптимумів, з позиції оцінювання їх стійкості.

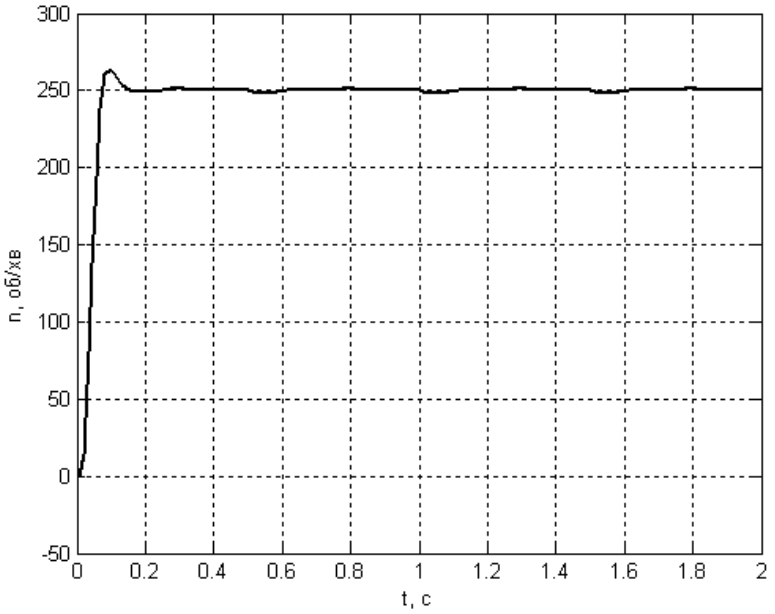


Рисунок 4.10 – Графік перехідного режиму зміни кутової швидкості обертання валу електродвигуна за умов дії періодичних імпульсних збурень (налаштування системи виконано відповідно до критерію симетричного оптимуму)

Проаналізуємо частотні характеристики у вигляді діаграм Боде, які включають логарифмічну амплітудно-частотну та фазо-частотну характеристики, для системи автоматичного керування, налаштованої за критерієм технічного оптимуму (рис. 4.11), а також для системи з параметрами, що відповідають симетричному оптимуму (рис. 4.12).

Запас стійкості за амплітудою визначають на частоті, для якої виконується умова . Цю частоту надалі позначимо як $|G(j\omega_1)|$. Величина запасу за модулем є обернено пропорційною до значення на зазначеній частоті.

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.

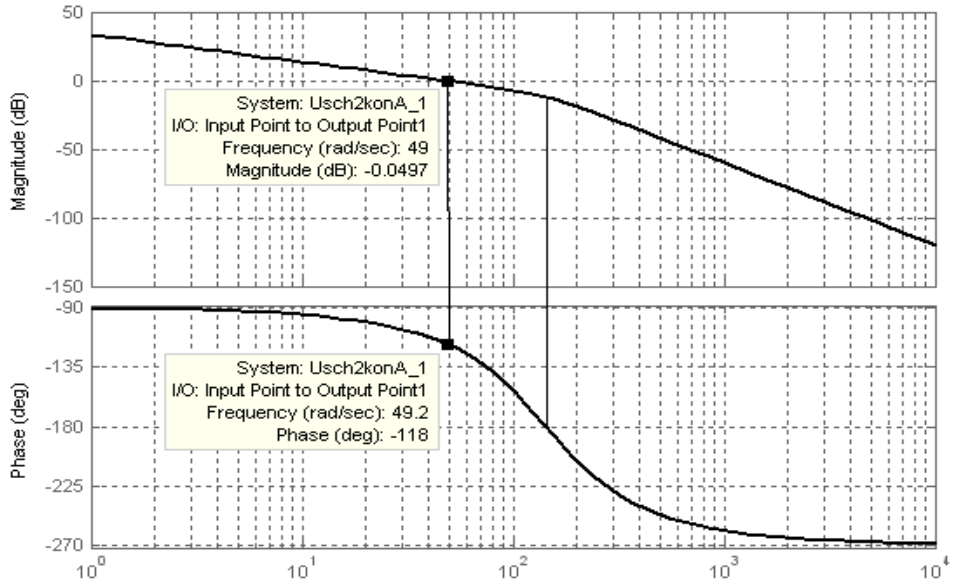


Рисунок 4.11 – Діаграма Боде системи, налагодженої на технічний оптимум

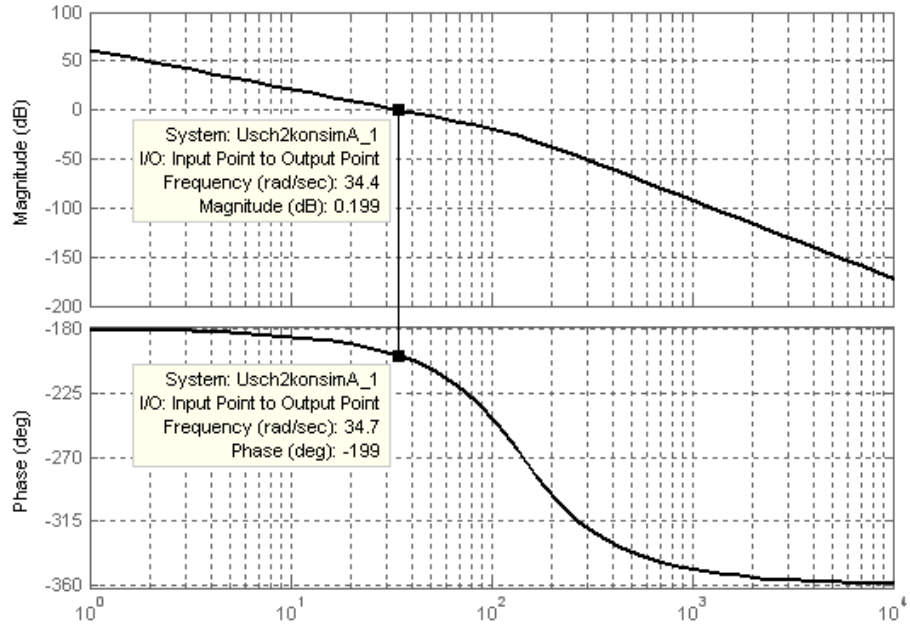


Рисунок 4.12 – Логарифмічна частотна характеристика (діаграма Боде) системи керування, налаштованої відповідно до критерію симетричного оптимуму

Запас за фазою визначається на частоті ω_2, при якій $|G(j\omega_2)|$=1(або 0 дБ). Запас за фазою φ_m є різниця між $G(j\omega_2)$ і -180^0. 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 амплітудою. У випадку, коли амплітудно-фазова характеристика розімкненої системи перетинає від'ємну частину дійсної осі в точці і при цьому замкнений контур залишається стійким, величина запасу за амплітудою визначається як обернене значення до модуля цієї точки. Якщо крива Найквіста має декілька точок перетину з від'ємною дійсною віссю, для оцінки запасу використовують той перетин, для якого значення є найменшим. Такий підхід дозволяє врахувати найбільш критичний режим роботи системи та об'єктивно оцінити її стійкість.

Запас за фазою. Даний показник характеризує додатковий кутовий зсув, який може бути внесений у систему до моменту втрати нею стійкості. Його визначають як мінімальний кут повороту амплітудно-фазової характеристики, за якого крива Найквіста досягає критичної точки з координатами (-1; 0). Чим більшим є запас за фазою, тим вищою вважається здатність системи зберігати стійкий режим функціонування при зміні параметрів або зовнішніх впливах.

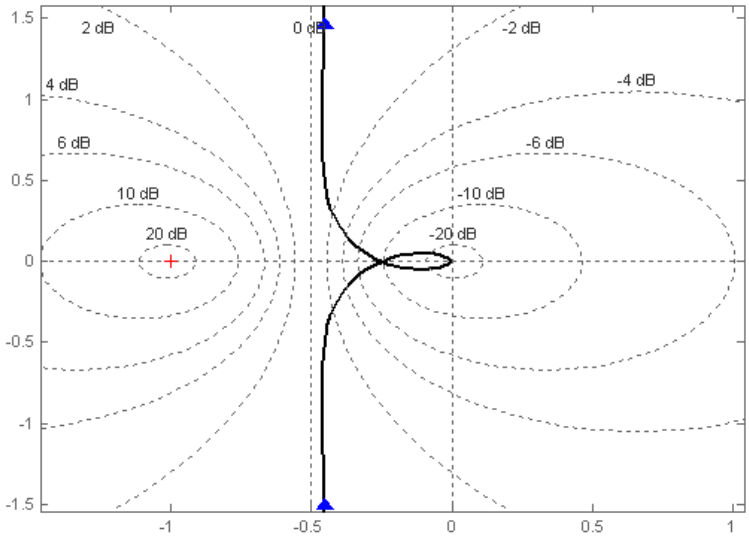


Рисунок 4.13 – Діаграма Найквіста системи, налагодженої на технічний оптимум

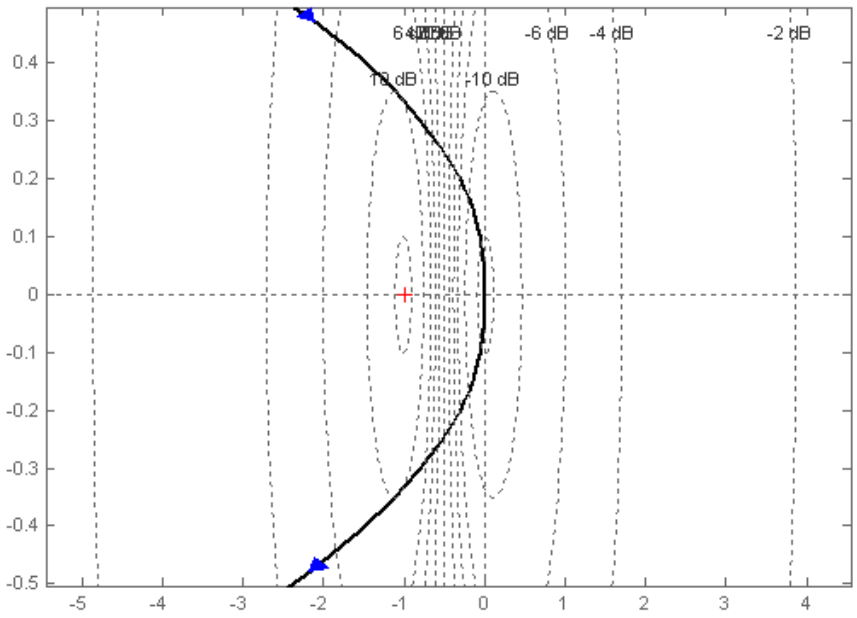


Рисунок 4.14 – Частотна характеристика Найквіста для системи автоматичного керування, налаштованої відповідно до критерію симетричного оптимуму.

Аналіз частотних характеристик у вигляді діаграм Найквіста показує, що система електропривода, налаштована відповідно до критеріїв технічного та симетричного оптимуму, характеризується достатнім рівнем стійкості. Це підтверджується наявністю необхідних запасів за амплітудою і фазовим зсувом, що забезпечує надійну роботу привода в умовах зміни режимів функціонування та зовнішніх впливів.

Спираючись на результати, отримані під час попередніх досліджень, у даному розділі виконано моделювання системи керування електроприводом, призначеним для ущільнення бетонної суміші. Для проведення досліджень було використано програмний комплекс MATLAB та середовище візуального моделювання Simulink, яке дозволяє детально аналізувати динамічні процеси в автоматизованих системах. У зв’язку з цим структурну схему моделі було розширено додатковими функціональними елементами, а також включено спеціальні блоки, що забезпечують можливість зміни параметрів навантаження

безпосередньо під час роботи системи, що дозволяє більш точно відтворити реальні умови експлуатації електропривода.

За результатами моделювання побудовано часові характеристики функціонування системи, аналіз яких показав, що при подачі керуючого сигналу в діапазоні від 1 до 10 В забезпечується пропорційна зміна частоти роботи виконавчого механізму в межах від 100 до 1000 ударів за хвилину. Отримані залежності підтверджують коректність роботи системи керування та її здатність підтримувати задані режими функціонування.

Аналіз перехідних процесів показав, що максимальне перевищення встановленого значення частоти під час різкої зміни керувальної напруги не перевищує 5 %, а тривалість виходу системи на усталений режим становить близько 0,14 с. Дія зовнішніх збурень практично не впливає на частоту роботи механізму, що свідчить про достатню стійкість та якість регулювання.

Пікові значення струму обмежуються за допомогою струмообмежувальних реакторів, унаслідок чого вони залишаються в допустимих межах як для електродвигуна, так і для силових тиристорних елементів. Це забезпечує надійну роботу приводу та підвищує довговічність електрообладнання.

Дослідження динамічних характеристик системи виконувалося не лише за умов стрибкоподібної зміни вхідного сигналу, а й при плавній зміні напруги керування. Результати моделювання засвідчили, що перехідний процес у цьому випадку характеризується високою швидкодією, а формування сталого режиму роботи практично завершується протягом 0,2 с.

ВИСНОВОК

Виготовлення та практичне застосування виробів із легких бетонів відіграє важливу роль у зменшенні витрат на виконання будівельних робіт і підвищенні економічної ефективності будівельної галузі. Розв'язання технологічних завдань, пов'язаних із виробництвом таких матеріалів, значною мірою залежить від розроблення та вдосконалення ударно-вібраційних установок, а також систем автоматизованого керування їх роботою. Більшість сучасних конструкторських розробок у сфері створення УВУ орієнтована на модернізацію окремих елементів обладнання, проте недостатній рівень дослідження процесів впливу ударних навантажень на бетонні суміші обмежує можливості проєктування оптимальних конструкцій і ефективних засобів керування технологічним процесом. Наявні розрахункові методики визначення потужності привідних двигунів не повною мірою враховують різноманітність властивостей легкобетонних сумішей, що може негативно впливати на точність інженерних розрахунків і ефективність роботи обладнання.

Для усунення зазначених недоліків були виконані дослідження динамічних характеристик ударно-вібраційних установок, оснащених пружними демпфувальними елементами. У ході проведених експериментів визначено раціональний діапазон висоти падіння рухомої платформи, який знаходиться в межах від 5 до 10 мм та забезпечує ефективне ущільнення бетонної суміші. Для встановлення функціональних залежностей між потужністю привідного двигуна, висотою вільного переміщення форми, прикладеним навантаженням і частотою ударних впливів було використано методику факторного експерименту, побудовану на основі ортогонального центрального композиційного плану другого порядку. Обробка отриманих результатів здійснювалася із застосуванням програмного комплексу Mathcad Professional 2000, що дозволило отримати математичні моделі та графічні залежності досліджуваних параметрів.

Для підвищення ефективності регулювання процесу формування та ущільнення бетонної суміші були запропоновані вдосконалені конструктивні рішення ударно-вібраційного обладнання, а також обґрунтовано доцільність застосування систем автоматизованого керування електроприводом постійного струму. Як виконавчий механізм використано електродвигун потужністю 16 кВт у поєднанні з реверсивним тиристорним перетворювачем, побудованим за зустрічно-паралельною схемою. У процесі проєктування виконано розрахунок силових елементів, визначено основні технічні показники електропривода та проаналізовано теплові режими роботи силових тиристорів. Розроблено функціональну, структурну та принципову схеми системи автоматичного керування, реалізованої за двоконтурним принципом підпорядкованого регулювання. Дослідження динамічних властивостей створеної системи проводилося із використанням програмного середовища MATLAB, що дало можливість оцінити її працездатність у різних режимах експлуатації.

Аналіз отриманих часових діаграм показав, що зміна керуючого сигналу в інтервалі від 1 до 10 В забезпечує регулювання частоти роботи виконавчого механізму в межах від 100 до 1000 ударів за хвилину. Встановлено, що тривалість перехідного процесу становить близько 0,14 с за умов зміни збурювального впливу, який відповідає навантаженню від 0 до 12 т та висоті падіння формувального елемента в межах 3–10 мм. Результати проведених досліджень підтвердили правильність прийнятих технічних рішень, працездатність розробленої системи та відповідність отриманих характеристик поставленим вимогам і вихідним параметрам проєктування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Моделювання електромеханічних систем: Підручник/ Чорний О.П., ЛуговойА.В., Д.Й. Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В.– Кременчук, 2001.– 376с.

2. Дворкін Л.Й. Бетони спеціального призначення. К.: Кондор, 2018. 354 с.

3. Хоменко О.Г. Залізобетонні конструкції: навчальний електронний посібник. Глухів. 2017. – 208 с.

4. Технологія будівельного виробництва: навчальний посібник / В.М. Гуденко. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 481 с.

5. Гоц В.І. Бетонні та будівельні розчини: Підручник. – К., ТОВ УВПК «ЕксОб», К., КНУБА, 2003. – 472 с.

6. Волянський О. А. Технологія бетонних та залізобетонних конструкцій: Підручник у 2 ч.. – К.,Вища школа, 1994. – Ч 1. Технологія бетону. – 271 с.

7. 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.

8. Кривенко П.В. Будівельне матеріалознавство / П.В.Кривенко. – К., 2004. – 659 с.

9. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.

10. 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.

11. Васюра А.С. Елементи та пристрої систем управління і автоматики. /Навчальний посібник. - Вінниця:, ВДТУ, 1999. – 157 с.

12. 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.

13. Санніков Д. Г., Гоц В. І. Технологія будівельного виробництва : підручник. Київ : КНУБА, 2018. 416 с.

14. Бойко В. С., Ковальчук О. В. Автоматизація технологічних процесів і виробництв : навч. посіб. Київ : Ліра-К, 2021. 392 с.

15. Кузьо І. В., Степанюк П. Д. Автоматизація виробничих процесів : підручник. Львів : Львівська політехніка, 2020. 356 с.

16. Бендера І. М. Автоматизація технологічних процесів у промисловості : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2019. 304 с.

17. Пальчевський Б. О. Моделювання та автоматизація технологічних процесів : монографія. Львів : Львівська політехніка, 2000. 352 с.

18. Волянський О. А. Технологія бетону : навч. посіб. Київ : Вища школа, 1994. 271 с.

19. Руденко Д. В. Фізико-хімічні основи технології модифікованого бетону для споруд спеціального призначення : монографія. Київ, 2020. 320 с.

20. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Будівельне матеріалознавство : підручник. Рівне : НУВГП, 2017. 448 с.

21. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Проектування складів бетону : навч. посіб. Київ : Основа, 2015. 256 с.

22. Пушкар Т. А. Технологія бетонних та залізобетонних конструкцій : навч. посіб. Харків : ХНУБА, 2019. 312 с.