

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

С.Г. Буряковський, В.В. Смірнов, Ар.С. Маслій,
Ан.С. Маслій, А.А. Тищенко

ЕЛЕКТРОПРИВОДИ СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ

Монографія

Київ
ДП «ІНФОТЕХ»
2023

УДК 625.1:621.313

Е 50

Рецензенти:

В.І. Мойсеєнко, д-р техн. наук, проф., УкрДУЗТ

О.П. Чорний, д-р техн. наук, проф., КрНУ ім. М. Остроградського

*Публікується згідно з рішенням вченої ради НТУ «ХП»
протокол № 6 від 07.07.2023 р.*

*Авторський колектив: С.Г. Буряковський, д-р. техн. наук, проф.,
В.В. Смірнов, канд. техн. наук, Ар.С. Маслій, канд. техн. наук, доц.,
Ан.С. Маслій, канд. техн. наук, А.А. Тищенко, канд. техн. наук, доц.*

Буряковський С. Г.

Е 50 Електроприводи стрілочних переводів / Буряковський С.Г., Смірнов В.В., Маслій Ар.С., Маслій Ан.С., Тищенко А.А. – Київ : ДП «ІНФОТЕХ», 2023. – 178 с.

В монографії розглянуті питання розвитку теоретичної та практичної складових створення сучасних типів стрілочних переводів та систем керування до них. Запропоновані математичні моделі як існуючих, так і перспективних типів стрілочних переводів з урахуванням впливу факторів навколишнього середовища та специфіки поведінки різних систем керування на основні якісних показників процесу переводу гостряків. На основі отриманих результатів запропоновані конкретні рішення для кожного типу стрілочного переводу, що забезпечують підвищення якості та керованості процесом переводу. Розроблено декілька діючих макетів стрілочних переводів, на яких доведено працездатність запропонованих розробок. Книга призначена для спеціалістів з СЦБ УЗ, наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються розробкою, або модернізацією стрілочних переводів, а також може бути корисною студентам і аспірантам ВНЗ.

Іл. 223. Табл. 16. Бібліогр. 74 назв.

УДК 625.1:621.313

ISBN 978-617-8027-09-4

© С.Г. Буряковський, В.В. Смірнов,
Ар.С. Маслій, Ан.С. Маслій,
А.А. Тищенко, 2023 р.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУПНА ЧАСТИНА.....	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ.....	7
1.1. Класифікація, побудова та робота стрілочних переводів.....	7
1.2. Стрілочні переводи залізниць.....	9
1.3. Електроприводи стрілочних переводів.....	31
1.4. Порівняльний аналіз електроприводів стрілочних переводів та критерії їх оцінки.....	34
РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРОПРИВОД СТРІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ З ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	36
2.1. Математична модель електроприводу стрілочного переводу, як багатомасова електромеханічна система.....	37
2.2. Система керування і принципи її побудови.....	53
2.3. Математична та імітаційна моделі системи керування.....	59
2.4. Синтез системи модального керування положення гостряків.....	63
2.5. Синтез системи модального керування зі спостерігачем стану положення гостряків.....	71
РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРОПРИВОД СТРІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ З АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ.....	79
3.1. Математична та імітаційна моделі.....	79
3.2. Скалярна й векторна системи керування.....	82
3.3. Процеси переводу гостряків зі скалярною та векторною системами керування в стаціонарному та нестаціонарному режимах.....	86
3.4. Система модального регулювання електроприводу.....	95
3.5. Синтез аналітичних залежностей оптимального керування методом регресійного аналізу.....	101
3.6. Експериментальні дослідження.....	109
РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОПРИВОД СТРІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ НА БАЗІ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ДВИГУНА.....	112
4.1. Математична та імітаційна моделі.....	112
4.2. Дослідження режимів роботи стрілочного переводу.....	118
4.3. Електропривод стрілочного переводу шпального типу.....	125
4.4. Експериментальні дослідження.....	139
РОЗДІЛ 5. ЕЛЕКТРОПРИВОД СТРІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ НА БАЗІ ЛІНІЙНИХ ДВИГУНІВ.....	144
5.1. Вибір типу і конструкції ЛД.....	144
5.2. Багатокритеріальна оптимізація геометричних параметрів ЛД.....	147
5.3. Математичне моделювання робочих процесів у ЛД.....	151
5.4. Синтез систем керування для електроприводів з ЛД.....	160
5.5. Експериментальні дослідження.....	168
ВИСНОВОК.....	172
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	173

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕП	– електропривод
СП	– стрілочний перевід
АД	– асинхронний двигун
ДПС	– двигун постійного струму
ВІД	– вентильно-індукторний двигун
ВІП	– вентильно-індукторний привод
ЛД	– лінійний двигун
ЛІД	– лінійний індукторний двигун
ЛДЕМТ	– лінійний двигун електромагнітного типу
ЕМС	– електромеханічна система
МП	– мікропроцесор
СК	– система керування
САР	– система автоматичного регулювання
СПР	– система підлеглого регулювання
ЕМП	– електромеханічний перетворювач
ШМ	– широтно-імпульсна модуляція
ШП	– широтно-імпульсний перетворювач
СК	– силовий комутатор
ПЧ	– перетворювач частоти
АН	– автономний інвертор напруги
Ш і ВШ	– швидкісні і високошвидкісні
ГА	– генетичний алгоритм
СО	– симетричний оптимум
ОНБ	– ортонормований базис
МНК	– метод найменших квадратів
ЗІ	– задатчик інтенсивності
РШ	– регулятор швидкості
МР	– модальний регулятор
СпС	– спостерігач стану
ШНМ	– штучні нейронні мережі

ВСТУПНА ЧАСТИНА

Вирішення завдання підвищення інтенсивності руху і, як наслідок, ефективності роботи залізниці безпосередньо пов'язане з пропускнуою спроможністю станцій, а отже роботи служб СЦБ. Ключовим елементом цього ланцюга є стрілочний перевід. Поставлені керівництвом Укрзалізниці завдання з технічного переозброєння галузі стали основою для розробки та впровадження нових систем залізничної автоматики. Розвиток техніки залізничної автоматики та вдосконалення технології її обслуговування значною мірою сприяє підвищенню безпеки руху та покращенню економічних показників діяльності залізниць. Особлива роль при цьому відводиться станційним системам телемеханіки. Ефективність функціонування цих систем багато в чому залежить від якості виконавчих пристроїв, важливе місце серед яких займають СП. Впровадження в життя швидкісного руху в Україні ставить завдання переходу на нові ефективніші, швидкодіючі та надійні типи СП. В умовах інтенсивного руху поїздів, а також магістрального швидкісного транспорту, релейна система керування стрілкою є обмежуючим фактором розвитку залізниць. Розроблені в середині минулого століття такі системи виконують прямий пуск двигуна стрілки, а далі процес переводу відбувається неконтрольовано, і лише при ударі гостряка об рамну рейку спрацьовує спеціальний механічний захисний пристрій. Релейно-контакторні системи СП, що застосовуються, морально і фізично застаріли і вимагають переходу на мікропроцесорну техніку. І, навпаки, мікропроцесорна техніка в порівнянні з релейними аналогами має нові функціональні можливості. Сучасні залізничні станції, оснащені системами мікропроцесорної централізації, припускають використання моніторів комп'ютерів в якості пультів чергового по станції, програмованих логічних контролерів в якості пристроїв, що прийшли на заміну релейним панелям керування і приводів СП, як безпосередніх виконавців переводу гостряків. Однак, як показує практика, ці можливості не завжди реалізуються повною мірою. Особливо явно ця проблема проявляється у сфері керування ЕП СП. Це зумовлено недостатнім теоретичним опрацюванням проблем, пов'язаних із застосуванням принципово нових систем керування, або електродвигунів.

Швидкісний та високошвидкісний і залізничний транспорт являє нерозривну сукупність рухомого складу, колії, систем електропостачання та керування. Одними з найважливіших ланок колії, що визначають швидкість руху, є СП, відмінні особливості яких полягають в підвищеній, в порівнянні зі звичайними залізницями, довжині гостряків і наявності рухомого осердя хрестовин, що забезпечують безпечність роботи електротранспорту. За кордоном для приводу гостряків та рухомого осердя хрестовин використовують, в основному, ЕП на основі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Очевидно, що різна ширина колії 1435 мм і 1520 мм не може не позначатися на параметрах і робочих властивостях ЕП СП. Тому розробки зарубіжних дослідників в цій області не можуть бути

безпосередньо перенесені на умови експлуатації в Україні. Разом з тим, на загальнопромислових ЕП в зв'язку з застосуванням нових електротехнічних матеріалів, новітніх технологій та розвитком перетворювальної техніки в даний час отримують широке розповсюдження системи з індукторними і лінійними електродвигунами, які завдяки унікальним властивостям конструкцій і можливостям систем керування забезпечують високу точність позиціонування робочого органу і необхідну керованість тягового зусилля. Однак, робота цих ЕП в системі СП для електротранспорту, де на різних ділянках по довжині ця керованість тягового зусилля особливо потрібна, ще недостатньо вивчена. Тим більше відсутнє наукове обґрунтування порівняння різних типів електромеханічних перетворювачів енергії для ЕП СП з метою вибору їх раціонального типу.

В роботі отримала розвиток теорія електромеханічного перетворення енергії в частині вибору типу ЕП СП, яка, на відміну від існуючих, з єдиних позицій і загальних критеріїв враховує особливості робочих характеристик і вплив на них геометричних і електрофізичних параметрів різних типів двигунів та дає можливість їх порівняння, що дозволяє визначити тенденцію переходу від двигунів ротативного типу – постійного струму, асинхронного і вентильно-індукторного до лінійних – електромагнітного типу та індукторного з мікропроцесорними системами керування, як ефективний шлях зниження масогабаритних параметрів ЕП і поліпшення його робочих властивостей за рахунок спрощення механічних ланок приводів СП. Також отримала розвиток теорія моделювання електромеханічних систем СП у напрямку створення узагальненої математичної моделі робочих процесів з урахуванням особливостей задіяних в них електродвигунів, які відрізняються принципом дії при спільності підходу до кінематичної лінії, а також дозволяють з єдиних позицій оцінити ефективність різних типів їх систем керування. В роботі удосконалено універсальний підхід до складання математичної моделі робочих процесів, що полягає у врахуванні параметрів електромеханічної системи та особливостей фрикційного навантаження в зоні контакту гостряк-подушка, який на відміну від існуючих дозволяє врахувати вплив нелінійностей на роботу пристрою в системах електротранспорту. Для існуючого ЕП СП на базі асинхронного двигуна за компонентами векторного критерію оцінки ефективності синтезована система оптимального керування і визначена оптимальна траєкторія швидкості руху гостряків, структура системи керування. Для оцінки ефективності роботи СП запропоновано узагальнений векторний критерій, складовими якого є значення часу переводу, пружної сили в робочій тязі, імпульсу удару гостряка, а також загальних втрат потужності системи, що наведені у відносних одиницях; за модулем цього критерію виконується остаточна оцінка ефективності використання конкретного типу ЕП СП. За векторним критерієм ефективності запропоновані раціональні області використання різних типів існуючих та перспективних ЕП СП.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ СТІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ

1.1. Класифікація, побудова та робота стрілочних переводів

Одним із найважливіших засобів керування рухом на залізницях світу є стрілочний перевід. Це основний вид будови для з'єднання двох рейкових колій в одну або для розгалуження одної колії на два напрямки й більше. Перша згадка про стрілочний перевід у зарубіжній літературі зустрічається в 1825 р. Такі стрілочні переводи керувалися за допомогою жорстких трубчастих тяг, що обмежувало дальність дії до 300 м.

Стрілочний перевід – це пристрій для перевodu потяга з однієї колії на іншу.

Його основні частини: стрілка, хрестовина і з'єднувальні рейки між ними. Стрілочні переводи розрізняються за типом рейок – Р43, Р50, Р65 і Р75, де цифри означають масу 1 метра рейки в кілограмах і за марками хрестовин – 1/6, 1/9, 1/11, 1/18. Знаменник дробу вказує у скільки разів довжина осердя хрестовини перевищує її ширину.

Стрілка – це частина стрілочного перевodu, яка має рамні рейки, гостряки та переводний механізм.

Стрілочний привод – це пристрій для перевodu гостряків стрілки і замикання їх у крайніх положеннях.

Отже привод є частиною стрілочного перевodu і повинен відповідати наступним вимогам:

- забезпечувати щільне прилягання притиснутого гостряка до рамної рейки у крайньому положенні;
- не допускати замикання стрілки при зазорі між притиснутим гостряком і рамною рейкою 4 мм і більше;
- відводити другий гостряк від рамної рейки на відстань не менше 125 мм.

Приводи, що експлуатуються на залізницях, мають фіксований хід перевідної тяги (шибера).

У зв'язку з тим, що замикання гостряків відбувається без урахування положення рамних рейок, необхідно:

- контролювати розмір зазору між вістрям і рамною рейкою;
- конструкція привода повинна забезпечувати задану потужність ходу гостряків;
- замикання гостряків у крайніх положеннях повинне здійснюватися з фіксованим зусиллям, яке б надійно виключало їх відхід від рамної рейки на відстань 4 мм і більше.

У процесі експлуатації привода можливе потрапляння снігу та інших сторонніх предметів між вістрями й рамною рейкою, тому привод повинен:

- забезпечити необхідне зусилля перевodu;
- мати захист від пошкоджень при заклинюванні стрілки в середньому положенні;
- забезпечити реверсування гостряків із середнього положення.

Величина зусилля переводу на переривнику тяги стрілки повинна бути достатньою для подолання опірності стрілочного переводу та пристрою замикання.

Нині у світі достатньо широко використовуються різноманітні типи стрілочних переводів. Їх об'єднують різні умови експлуатації, характер навантаження, типи систем керування та інші фактори, котрі визначають технічні вимоги до стрілочних приводів. Порівняння конструкцій і технічних характеристик вітчизняних і зарубіжних стрілочних приводів показує, що всі вони, незалежно від призначення і конструктивних особливостей, містять наступні функціональні блоки: систему керування приводом, двигун, механічну передачу, систему контролю положення, механізми замикання й порівняння положення контрольних пристроїв із положенням механізму, що замикає.

Відповідно до цього стрілочні приводи класифікуються: за видом енергії, що споживається для переводу гостряків; часом переводу стрілки; способом запирання гостряків; способом сприйняття взрису стрілки й типом пристрою контролю положення гостряків (рис. 1.1) [1].



Рисунок 1.1 – Класифікація стрілочних приводів

У залежності від сфери застосування стрілочні приводи на залізницях умовно підрозділяються на наступні основні групи: для звичайних стрілочних переводів із марками хрестовин 1/11 і крутіше, для станцій без високошвидкісного руху; для стрілочних переводів із пологими гостряками й рухливим осердям хрестовини високошвидкісних ділянок залізниць і для стрілок сортувальних гірок.

За видом енергії, що споживається, приводи бувають електромеханічні, електромагнітні, електропневматичні, електрогідрравлічні.

Електромеханічні приводи для переводу стрілок мають електродвигун і механічний редуктор, а електромагнітні - тягові електромагніти (соленоїди). Останні через дуже високу швидкість переводу важких гостряків стрілок

залізничного транспорту, яка викликає деформацію елементів стрілочного переводу, застосовують в основному для трамвайних стрілок.

Дія електропневматичних і електрогідравлічних стрілочних переводів базується на застосуванні пневматичних і гідравлічних двигунів. Перетворення енергії стисненого повітря або рідини в механічну роботу у цих приводів здійснюється в робочому циліндрі, що має поршень зі штоком. Останній через стрілочну тягу пов'язаний із гостряками стрілки. Переміщення поршня в циліндрі під дією стисненого повітря або рідини приводить до переводу стрілки. Контроль положення стрілок із такими двигунами здійснюється по кабельних лініях із використанням електричних контактів.

За запиранням гостряків розрізняють стрілочні приводи із внутрішнім і зовнішнім запиранням стрілочних гостряків. Механізм внутрішнього запирання конструктивно розміщується в корпусі привода, а зовнішнього поза приводом безпосередньо у стрілочних гостряків у вигляді окремого замкача, що керується приводом.

За способом сприйняття взриву стрілки, тобто її примусового переводу ребордами коліс рухомого складу під час пошерстного руху (позаштатна ситуація), приводи поділяються на взрізні й невзрізні. Взрізні приводи мають пристрій, який запобігає руйнуванню механізму привода при взрізі, котрий виконується у вигляді взрізного механізму з гнучким або жорстким зв'язком між елементами привода, які ведуть і яких ведуть, що забезпечують завчасно заданий опір переміщенню робочого шибера привода під дією коліс рухомого складу. Невзрізні приводи такого механізму не мають, завдяки чому вони більш прості й надійні, але під час взриву пошкоджуються.

За часом переводу стрілочні приводи можна розділити на швидкодіючі (час переводу стрілки до 1 с), із нормальним часом переводу (до 5 с) і повільнодіючі (понад 5 с).

Швидкодіючі приводи застосовують на сортувальних гірках і в маневрових районах станції, лініях із високим транспортним навантаженням, останні – на станціях, які обладнані електричною централізацією стрілок і сигналів здебільшого на під'їзних коліях підприємств залізничного транспорту (ППЗТ) і другорядних магістралях.

1.2. Стрілочні переводи залізниць

Корпорація National Trackwork (NTI) нещодавно освоїла випуск стрілочних перевідних механізмів типу 1002RG із прямокутними напрямниками (рис. 1.2), розроблені спеціально для сортувальних станцій залізниць першого класу, промислових під'їзних колій і приміських ліній із важким режимом роботи.

Цей стрілочний привод має ергономічний механізм ручного переводу з примусовим замиканням. Як стверджують спеціалісти NTI, привод 1002RG користується підвищеним попитом у залізниць, оскільки, він не вимагає великого обсягу робіт із технічного обслуговування й характеризується виключно плавним ходом рухомого складу під час руху в прямому напрямку.

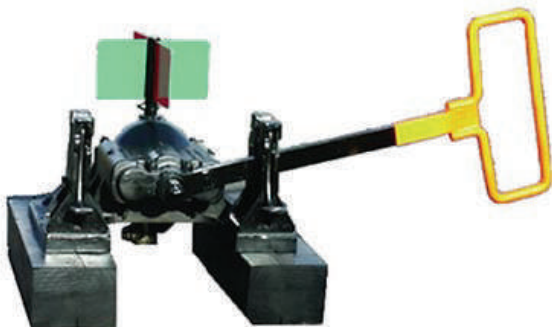


Рисунок 1.2 – Стрілочний привод 1002RG

Аналогічні системи експлуатуються в Германії на допоміжних коліях (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Ручний стрілочний привод допоміжної колії

У зарубіжній практиці найбільш розповсюдженими є електромеханічні приводи. Поряд із електромеханічними в експлуатації знаходяться й електрогідравлічні приводи.

На виставці REMSA компанія ABC Rail Products представила систему керування стрілочними переводами Automater. Вона має ручні перемикачі й гідравлічний виконавчий механізм. Одною з останніх розробок компанії є система керування стрілочними переводами по радіоканалу Model 4000.

Компанія Western-Cullen-Heyes виготовляє приводи стрілочних переводів із живленням від мережі змінного струму напругою 120 В й керуванням від EOM. На залізниці Burlington Northern Santa Fe (BNSF) використовується стрілочний перевід типу WCHT-72 з керуванням від вбудованого процесора. Як виконавчий орган застосований гідравлічний насос із приводним електродвигуном.

На федеральних залізницях Австрії введений в дію стрілочний перевід із гідравлічним переводним механізмом Hydrolink [2] (рис. 1.4 а, б).

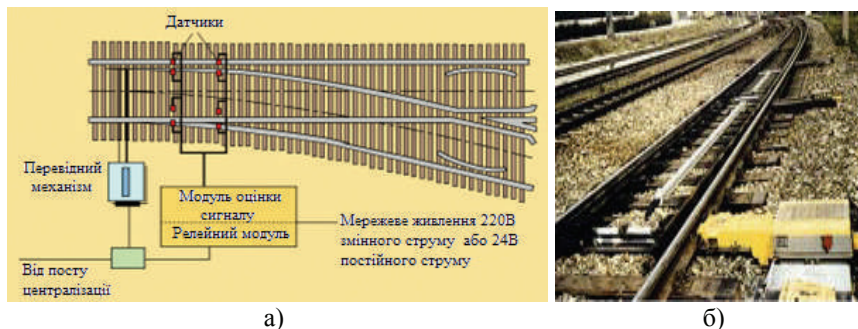


Рисунок 1.4 – Система СП Hydrolink:

а – компоновка СП, схема керування й контролю; б – загальний вид СП

У новому СП поєднуються переваги гідравлічного перевідного механізму Hydrolink і системи моніторингу IS 2000.

Компанія VAE (Австрія) запропонувала нові технічні рішення для переведу стрілок із довгими гостряками. Ці рішення в порядку ускладнення наступні:

- гідравлічна система передачі зусилля переведу від першого до наступних механізмів, що переводять і блокують;
- капсульований електрогідравлічний привод і передача в поєднанні з пристроями, що блокують і регулюють;
- поєднання системи приводу з індуктивним пристроєм безпеки.

Перше технічне рішення реалізоване в системі Hydrolink (рис. 1.5), у якій стандартний електричний двигун приводу з'єднаний з ковзною тягою звичайного перевідного пристрою й такого, що блокує. До ковзної тяги прикріплений гідравлічний циліндр, який створює тиск і передає зусилля переведу, що вимагається за технічними показниками.



Рисунок 1.5 – Система Hydrolink

Наступним кроком удосконалення пристроїв СП Hydrolink став перехід до системи Hydrostar (електрогідравлічний привод і гідравлічна передача), котра призначена для використання на високошвидкісних СП із дуже довгими гостряками і з кількома перевідними механізмами, встановленими в

різних перетинах гостряка. У цій конструкції відсутні елементи, що розміщуються на узбіччі колії, бо приводи, що регулюють та блокують пристрої, розміщуються в порожніх шпалах, а з'єднувальні трубопроводи укладені по осі колії між рейками.

Система Hydrostar (рис. 1.6) складається з чотирьох елементів: електрогідравлічного приводного блока; блоків здвоєних перевідних пристроїв і таких, що блокують; індикаторної тяги поблизу першого перевідного механізму; і додаткового блокувального пристрою, котрий встановлюється в тому випадку, коли по стрілці передбачено тільки пошерстний рух.



Рисунок 1.6 – Система Hydrostar

Компанія VAE розробила систему безпеки IS 2000 для експлуатації в поєднанні із системами Hydrolink і Hydrostar (рис. 1.7). Вона призначена для контролю крайнього положення і працює на безконтактній індуктивній основі. Датчики, що розміщені у відповідних точках стрілки, передають координати положення гостряків у спеціальний оціночний пристрій. Відмітною особливістю є те, що в системі IS 2000 немає рухливих деталей і таких, що зношуються, тому вона не потребує обслуговування й може бути встановлена на СП, що існують сьогодні.



Рисунок 1.7 – Система IS 2000

Електрогідравлічна система СП ECOSTAR служить для переводу гостряків стрілок і визначення їх положення, а також фіксації в кінцевих положеннях. Для гідравліки використовується замкнена система. У процесі розробки зверталась увага на те, щоб усі компоненти були виконані у вигляді доступної для огляду модульної конструкції і були легкодоступними. Таким чином, роботи з техобслуговування й ремонту можуть проводитися швидко й просто.

Компанії-виробники СП США працюють над дистанційним комп'ютеризованим керуванням стрілочними переводами й моніторингом їх стану, а також досліджують можливість висування на ринок стрілочних переводів із живленням від сонячних батарей, випробовують перевідні механізми, які вбудовуються в шпальний ящик. Так компанія Global Signaling, підрозділ корпорації General Electric (GE Transportation System, GETS), розробила СП типу Hydra-Switch 3000LP (рис. 1.8). Цей безредукторний перевідний механізм можна адаптувати до дистанційного керування по радіозв'язку або з використанням глобальної комунікаційної мережі. Він має гідравлічний привод, сервомотор котрого отримує живлення від сонячної батареї.



Рисунок 1.8 – Стрілочний привод Hydra-Switch 3000LP

Новою розробкою GETS Global Signaling є універсальний СП типу CTS2, який вбудовується у шпалу, тому він може бути застосований на високошвидкісних лініях. Основною перевагою СП шпальної конструкції є те, що механізми такого типу дозволяють здійснювати підбиття баласту спеціальними пересувними діагностичними комплексами в автоматизованому неперервному режимі без зупинок та переривання процесу в зонах зі складними зовнішніми конструкціями, які оснащені різного роду тягами й гідро- або пневмостанціями.

Корпорація Union Switch & Signal (US&S) продовжує вдосконалювати конструкцію своїх електромеханічних СП. Одним із них є перевідний механізм типу M-23E. У ньому застосований електронний мережевий контролер ECC – мікропроцесорний блок, що замінює собою механічні перемикачі ланцюгів, які застосовувалися в ранніх моделях СП серії M, і

такий, що забезпечує більш точний контроль за роботою привода, а саме індикацію помилкового спрацювання.

Також має місце й поєднання різних типів передавальних пристроїв. Останні розробки в Германії мають шарнірно-гвинтову передачу, котра забезпечує дещо більший ККД в порівнянні з черв'ячною. Шарнірно-гвинтова, або черв'ячна, пара дозволяє також здійснювати внутрішнє замикання. Передавальні механізми можуть конструктивно бути відкриті або міститися у спеціальному корпусі з маслом.

Подача обертального моменту здійснюється за допомогою передач шарнірно-гвинтового, конічного, циліндричного і кривошипно-шатунного типів.

Автоперемикачі СП у більшості країн об'єднують функції контролю й комутації робочого ланцюга. Використовуються контактні або безконтактні конструкції комутаційних елементів. Контактні системи ковзного, натискного або врубного типів знайшли розповсюджене застосування. У найновіших розробках для європейських залізниць використовуються кінцеві вимикачі, що мають миттєву дію.

Найбільший інтерес викликають розробки фірм Siemens S 90 і S 700 K, Bombardier Switch 2000. Вони багато в чому схожі й ілюструють тенденції в галузі. Гвинтова передача, що використовується в усіх указаних конструкціях, дозволяє істотно підвищити зусилля переводу, не збільшуючи потужності електродвигуна. Передачі цього типу мають додаткові втрати на тертя. Ця проблема вирішена за рахунок використання кульково-гвинтової пари, котра має кращі показники, ніж звичайна гвинтова.

Привод типу S 90 (рис. 1.9) має дуже складну конструкцію, яка поєднує в собі механізми різних типів.

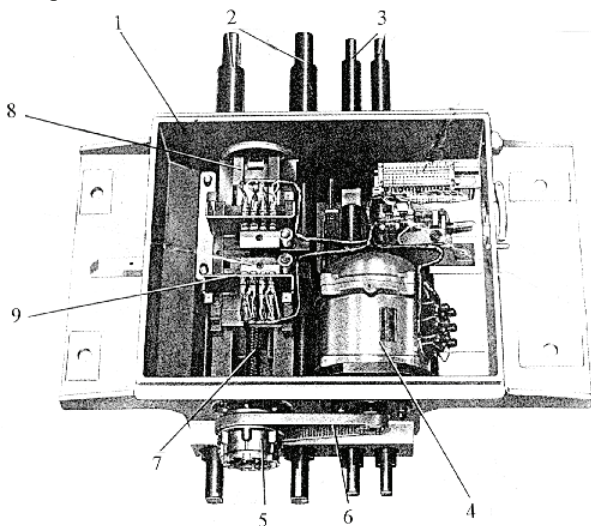


Рисунок 1.9 – Привод типу S 90 Siemens

Він складається з наступних вузлів і деталей: корпус (1); роздільний привод перевідних брусків (2), до котрих приєднуються контрольні лінійки (3); вал електромотора (4) з'єднується з шарнірно-гвинтовою передачею (5) за допомогою зубчатого ременя (6); гвинт (7) здійснює пересування перевідних брусків (2) від двигуна (3) через шарнірну передачу (5); привод обладнаний внутрішнім замикачем (8) і фрикційною муфтою; контроль положення гостряків здійснюється автоперемикачем (9); контрольний механізм із ковзними контактами фіксує положення контрольних лінійок (3).

Однією з найпоширеніших є конструкція привода S 700 фірми Siemens.

Конструкція може бути виконана у взрізному або невзрізному варіанті. Взрізний привод переходить у захищений стан, не пошкоджуючись навіть при достатньо великій швидкості руху поїздів на момент взрізу. Хід шибера може складати 150 чи 220 мм. Кінематична схема електропривода S700 наведена на рис. 1.10.

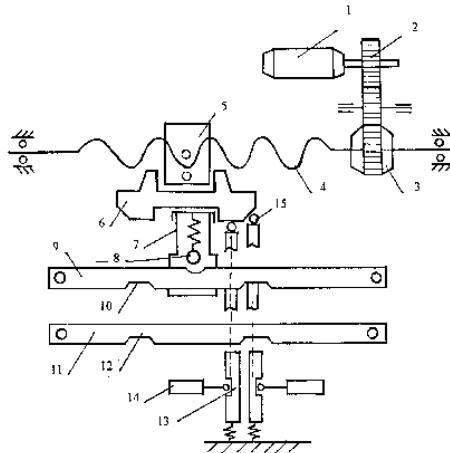


Рисунок 1.10 – Кінематична схема електропривода S700

Використання гвинтової механічної передачі достатньо перспективне тим, що вона допомагає фіксувати гостряки в крайніх положеннях у той час, як шестеренчасті передачі такої властивості не мають. Для підвищення ККД обертальний момент від гвинта на гайки передається не як у звичайних гвинтових парах, а через кульки в гайці.

Контрольні лінійки пересуваються в крайні положення при збігу двох умов: гостряки знаходяться в крайніх положеннях, і механічна передача здійснює повний цикл по переводу стрілки.

При переводі стрілки обертання вала електродвигуна 1 передається на гвинт 4 через шестерні 2 та фрикційну муфту 3. Обертання гвинта 4 приводить до пересування гайки 5 з кульками в горизонтальній площині. Гайка 5 пов'язана з кареткою 6, котра в свою чергу через взрізний пристрій 7, що підпружинений кулькою 8, пересуває шибера 9.

Електропривод розробки Bombardier Transportation [3] EBI Switch 2000 – невзрізний вбудований у шпалу стрілочний привод (рис. 1.11), є надійною системою, яка включає стрілочний замикач і систему контролю як для притиснутого, так і для відтиснутого гостряка стрілочного переводу (рис.1.12).

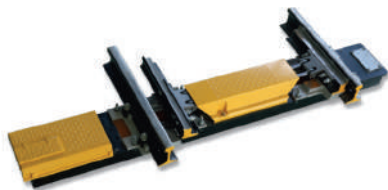
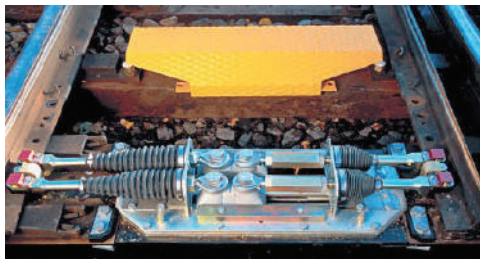


Рисунок 1.11 – Загальний вигляд стрілочного переводу EBI Switch 2000

Будь-який компонент системи EBI Switch 2000 може бути замінений менш ніж за 15 хвилин без зняття шпали. Електропривод цього типу планового технічного обслуговування й ремонту не потребує. EBI Switch 2000 випробуваний при експлуатації близько 10^6 циклів без відмов. Середній час напрацювання на відмову становить 10–15 років. Застосування частотного перетворювача, що програмується, дозволяє здійснювати рівномірний пуск і гальмування двигуна, контролювати струм і зупинити двигун у випадку неможливості доводу гостряків за певний час переводу.

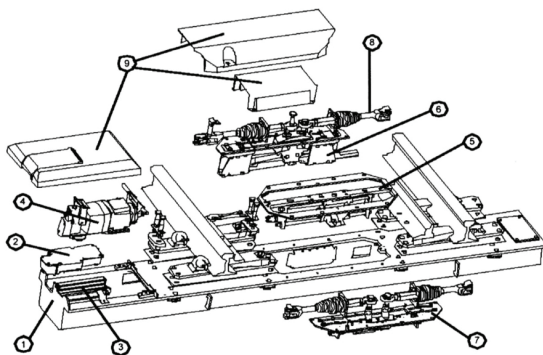


Рисунок 1.12 – Конструкція електропривода EBI Switch 2000

Конструкція електропривода EBI Switch 2000 включає: 1 – корпус; 2 – клемна коробка; 3 – перетворювач частоти; 4 – електродвигун; 5 – перевідний механізм; 6 – внутрішній замикач; 7 – безконтактні датчики контролю положення; 8 – з'єднувальні тяги; 9 – захисні кожухи.

Конструкція привода дозволяє змінювати зусилля переводу в межах $300 \div 1000$ кг і час у межах $0,5 \div 7$ с. Існує можливість змінювати хід шибера від 20 до 160 мм і місця установки (рис. 1.13).

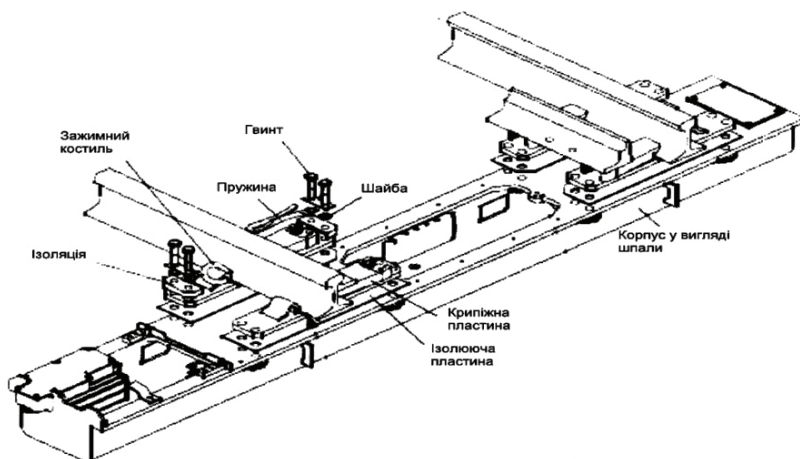


Рисунок 1.13 – Установка електропривода EB1 Switch 2000 у стрілочному переводі

Спеціально розроблений компактний стрілочний привод S 700 V (рис.1.14) монтується в порожньому брусі і вбудовується у власну камеру всередині порожньої шпалі. Для стрілок із більш ніж одним приводом можливе розширення з децентралізованим керуванням стрілкою. Стрілочний привод випускається як взрізного, так і невзрізного виконання, із двигуном постійного чи змінного струму.

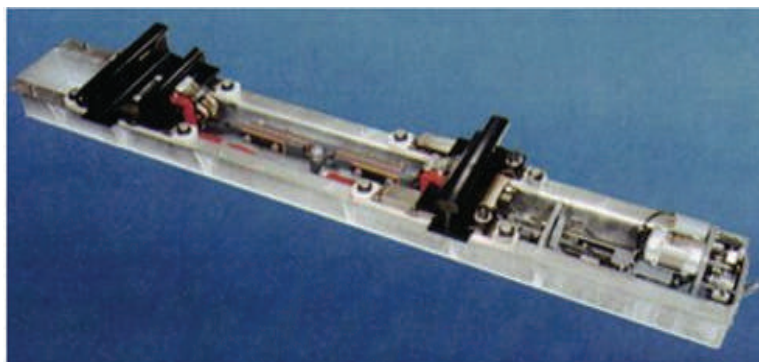


Рисунок 1.14 – Інтегральні стрілочні приводи серії S 700 V

Alstom Signaling пропонує перевідні механізми MET шпального типу, котрі входять у гамму пристроїв сигналізації й автоматики, яка отримала фірмову назву Smartway. Приклад продукції – перевідний механізм типу GM4000 з електричним приводом (рис. 1.15), котрий можна пристосовувати до різних варіантів укладки.

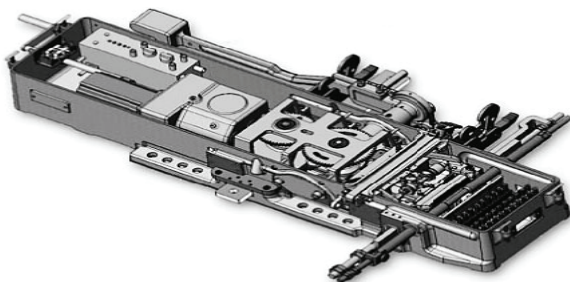


Рисунок 1.15 – Стрілочний привод типу GM4000

Варто зауважити, що для залізничних компаній характерне намагання отримати економічний ефект не в короткостроковому аспекті, а в тривалій перспективі. Основними виробниками засобів залізничної автоматики передбачається, що доля стрілочних приводів, що вбудовуються в шпалу, за наймінімальнішими розрахунками, буде зростати щорічно на 10% із відповідним зменшенням долі звичайних перевідних механізмів.

Ріст швидкостей руху поїздів викликав необхідність створення стрілочних переводів, призначених для швидкісного руху перш за все за прямим напрямком. Маються на увазі швидкості руху пасажирських поїздів до 300 км/г і вантажних до 160 км/г.

Специфіка роботи СП на швидкісних магістралях полягає в тому, що для підвищення комфорту пасажирів і безпеки руху використовуються дуже довгі гостряки (часто такі, що працюють на згин, без кореневого зчленування) і системи групового електропривода, що дозволяють рівномірно переміщувати робочий орган (рис. 1.16). Такі приводи повинні працювати синхронізовано, щоб у гостряках не виникало коливальних процесів або додаткових механічних навантажень, що призводять до втомних руйнувань. Їх кількість залежить від довжини гостряка (для хрестовини марки 1/11 – два, для 1/18 – три, для 1/22 – чотири і т.д.).



Рисунок 1.16 – Груповий електропривод на стрілочному переводі

Ще однією особливістю конструкції стрілочних переводів для швидкісного й високошвидкісного руху є наявність рухливого осердя, яке дозволяє забезпечити плавний перехід колісної пари з одної колії на іншу. У вітчизняних системах використовується хрестовина, яка не забезпечує плавності ходу рухомого складу по стрілочному переводу.

Розміщення і принцип роботи хрестовини з рухливим осердям показано на рис. 1.17. Тут: 1 – напрямок руху, 2 – хрестовина, 3 – колесо, 4, 10 – рухливе осердя, 5, 6 і 7 – елементи переводного пристрою. 8, 9, 11-13 – елементи автоматики.

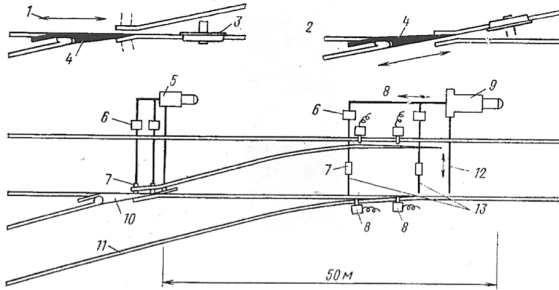


Рисунок 1.17 – Схема роботи СП з рухливим осердям

Приклад використання хрестовини з рухливим осердям на магістральних дорогах показаний на рис. 1.18. У цій хрестовині є два сумісно відлитих вусовика. Рухливе осердя складається з двох гострякових рейок. Зносостійкість цих двох віток осердя підвищується за допомогою загартування (до 320 - 340 одиниць по Бринеллю). У корені обох осередь зроблена випрессовка. По прямій і боковій коліях прийнятий звичайний стик. Коротка вітка осердя при переводі може мати поздовжнє зміщення відносно довгої вітки на 6 - 7 мм. Така конструкція вперше була застосована на швидкісній магістралі Синкансен в Японії.



Рисунок 1.18 – СП з рухливим осердям

Строки служби цих хрестовин у 2,5 - 3 рази більше строків служби звичайних, тому їх доцільно укладати не тільки на швидкісних, але й на вантажонапружених ділянках.

З метою підвищення плавності ходу поїзда при проходженні стрілки був створений стрілочний перевід із нахилом (рис. 1.19) для швидкостей руху в прямому напрямку до 200 км/ч. Така компоновка, звичайно, ускладнює конструкцію, але зате створює умови, при котрих напруження в обох кромках рейок близькі одне до одного, при цьому зменшуються напливи металу на голівці.



Рисунок 1.19 – Гостряк із нахилом, вигляд у поперечному перетині

На міжнародному ринку представлений цілий ряд фірм із різних країн, що виробляють стрілочні переводи для швидкісних і високошвидкісних ліній (зі швидкістю руху понад 300 км/год). Так, наприклад, фірма Фосло Кожифер (Франція) є піонером в сфері розробок підкладки з нахилом 1/20 або 1/40, що працюють як одне ціле зі стандартними рейками. Таким чином, знижуються витрати на обслуговування в процесі роботи, а також забезпечується великий комфорт для пасажирів за рахунок зменшення тряски.

У цьому типі стрілочного переводу використовуються гнучкі гостряки зі щільно скомпонованим (з нульовим зазором) стиком у корені – це дуже важливо для підвищення швидкостей руху. Покрашені й посилені стрілочні башмаки. Хрестовина прийнята суцільнолітою. Поверхням катання вусовиків надані поперечні обриси, що повторюють обриси коліс. У результаті цього колеса перекочуються з вусовиків на осердя (і навпаки) більш плавно. Це значить, що при великих швидкостях зростання сил на такій хрестовині менш інтенсивне, ніж на звичайних хрестовинах.

Однак для швидкостей 200 - 250 км/год потрібні принципово нові конструкції переводів, що дозволяють створити неперервну поверхню катання (тоді виключається шкідливий простір і, як наслідок, відпадає необхідність у контррейках).

Серія стрілочних переводів, що випускається компанією Фосло Кожифер, містить 14 різних видів продукту, призначених та адаптованих для специфічного сегменту ринку, наприклад, для звичайної чи швидкісної залізниці, суспільного транспорту або трамвайних шляхів. Фосло Кожифер є провідною компанією з виробництва й поставок гарнітури стрілочних переводів для баластного й плиткового залізобетонного шляху. Вони мають

запатентовану технологію, яка поширюється на суцільноліті марганцевисті хрестовини з рухливим осердям (рис. 1.20) і похилою поверхнею катання.



Рисунок 1.20 – Суцільноліті марганцеві хрестовини з рухливим осердям

Спеціальна технологія зварювання трьома металами приплавляє хрестовину до рейок, забезпечуючи абсолютну безперервність на прямій та боковій коліях (рис. 1.21) та інтегруючи стрілочний перевід у безстиківий шлях (Long Welded Rails - LWR).



Рисунок 1.21 – Суцільноліта марганцева хрестовина з привареними рейковими закінченнями

Інтегрована система керування стрілочним переводом (Easyswitch-R) (рис. 1.22), що розміщена всередині порожньої шпали, складається з двигуна, системи блокування VCC/VPM і пристрою моніторингу. Це забезпечує незрівнянну перевагу у випадках, коли простір обмежений, наприклад, у тунелях.



Рисунок 1.22 – Стрілочний перевід Easyswitch-R

Для контролю процесу переводу гостряків використовується різноманітна апаратура у вигляді датчиків і систем контролю. Зовнішній замикач VCC (Virtual Channel Connection – з'єднання віртуальних каналів) являє собою пристрій для індивідуального замикання й контролю положення гостряка (рис. 1.23). Два гостряки фіксуються індивідуально й контролюються в їх кінцевій позиції. Завдяки високому рівню надійності VCC цей пристрій широко застосовується на всіх типах залізниць, особливо на високошвидкісних лініях в усьому світі.



Рисунок 1.23 – Зовнішній замикач VCC, Франція

Зовнішній замикач VPM (рис. 1.24) для рухливого осердя фіксує його у хрестовині стрілочного переводу. Він прикріплений до опори й діє за тим же

принципом, що й VCC. VPM призначений для високошвидкісних магістралей (200 км/год і більше).



Рисунок 1.24 – Замикач рухливого осердя хрестовини VPM

Стрілочний детектор Paulvé (рис. 1.25) контролює роботу й переключення гостряків у стрілочних переводах.



Рисунок 1.25 – Стрілочний детектор Paulvé на високошвидкісній лінії

Серйозною проблемою для дослідників та служб експлуатації є те, що жодна фірма чи організація, яка виробляє стрілочні переводи, не наводить ні принципових, ні функціональних схем їх систем керування. У кращому разі дається інформація про тип приводного електродвигуна й кінематична схема із загальним виглядом.

В Україні, як і в усьому світі, широко використовуються різні типи стрілочних переводів. Найпримітивнішим і простим в експлуатації є ручний перевід. Він використовується на допоміжних коліях малих станцій, під'їзних коліях складів і на підприємствах залізничного транспорту, де має місце край низька інтенсивність руху. Загальний вигляд показаний на рис. 1.26.



Рисунок 1.26 – Ручний перевідний механізм для стрілочного переводу

Набагато більш широке розповсюдження отримали автоматизовані електромеханічні стрілочні переводи. В Україні і в країнах СНД в основному використовуються приводи із внутрішнім замиканням. Пристрої цього типу фіксують, як правило, тільки притиснення гостряка.

За видом комутації робочих і контрольних ланцюгів стрілки, що здійснюється безпосередньо в корпусі привода, вони підрозділяються на контактні (СП, СПГ, СПВ) й безконтактні (СПГБ). Пристрої з контактною комутацією достатньо прості, не потребують допоміжних перетворювачів, але мають менший ресурс роботи, можуть забезпечити дуже обмежений об'єм інформації про стан стрілки. Безконтактні датчики більш надійні, вони забезпечують розширення функцій, але вимагають більш складних схем керування й контролю роботи привода.

Як було вказано вище, час переводу є істотним показником у класифікації існуючих приводів. Швидкодіючі приводи забезпечують перевід гостряків із одного крайнього положення в інше та їх запирання менше ніж за 1 с. Нормально діючі приводи СП і СПВ переводять стрілку за 2-5 с, а в повільно діючих цей процес займає до 7 с і більше. Швидкодіючі електроприводи СПГ, СПГБ використовуються у пристроях гіркової централізації.

Конструкції електромеханічних приводів, котрі експлуатуються на залізниці, мають багато спільного. Протягом багатьох років деякі елементи привода вдосконалювались, але принципово конструкція привода не змінювалась, тому можна виділити основні його вузли: корпус, двигун, редуктор, фрикційний механізм, автоперемикач і механізм, що запирає.

У першій конструкції привода СП-1 фрикційний пристрій розміщувався на валу двигуна, обмежувач ходу - на головному валу, конструкція редуктора була відкритою, контрольні лінійки пересувались в одному пазу, кут повороту ножових контактів автоперемикача істотно не обмежувався, а механізм, що запирає, не мав масляної ванни.

Указані конструкторські недоліки знижували надійність роботи за рахунок зникнення ножових контактів у кінці переводу і пошкодження колодок автоперемикача, заклинювання замикального механізму, швидкого зносу деталей передавального механізму. У наступних розробках СП-1а, СП-2, СП-2Р, СП-3, СП-6 указані недоліки були усунені: редуктор з'єднаний із фрикціоном і поміщений у закритий корпус із маслом, удосконалена конструкція автоперемикача й механізму, що запирає.

Найбільше поширення на залізниці отримав привод типу СП-6. На сортувальних гірках використовуються швидкодіючі приводи з контактним автоперемикачем СПГ-3 і безконтактним датчиком СПГБ-4. Підвищення швидкості переводу було досягнуто за рахунок подвійного підвищення напруги живлення двигуна постійного струму та зміни загального передаточного числа редуктора на 35,7 замість 70,5.

Енергетична діаграма електропривода типу СП-6 при номінальному навантаженні на шибєрі наведена на рис. 1.27: 1 – втрати в двигуні й редукторі, 2 – втрати в автоперемикачі, 3 – втрати в шибєрній парі, 4 – корисна потужність.

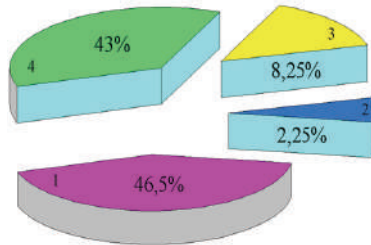


Рисунок 1.27 – Енергетична діаграма електропривода типу СП-6

Із діаграми (рис.1.27) видно, що корисна потужність електроприводів, що експлуатуються, складає всього 43%. При цьому значна частина енергії витрачається в двигуні (23%) й редукторі (20%).

Конструкція стрілочного електропривода СП-6 наведена на рис. 1.28.

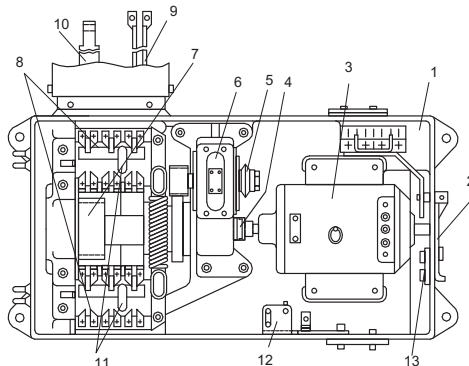


Рисунок 1.28 – Стрілочний привод типу СП-6 (вигляд зверху)

СП-6 включає наступні основні вузли й елементи: 1 – корпус; 2 – блокувальна заслінка з контактним ножем; 3 – електродвигун; 4 – з'єднувальна муфта; 5 – фрикційний механізм; 6 – редуктор; 7 – замикальний механізм; 8 – автоперемикач; 9 – контрольні лінійки; 10 – шибер; 11 – пристрій для обігріву контактів автоперемикача; 12 - штепсельна колодка для підключення освітлення; 13 – замок.

Електродвигун як перетворювач електричної енергії в механічну повинен забезпечувати перевід гостряків стрілки з одного крайнього положення в інше, а також вертання їх з яких-небудь проміжних положень. Його експлуатація передбачає специфічні вимоги. Двигун привода повинен мати значний початковий момент обертання, оскільки можливості для його розгону обмежені, а маса деталей, що обертаються й пересуваються, достатньо велика.

Робота привода має повторно-короткочасний режим, тривалість одного циклу роботи до 7 с.

Двигун повинен забезпечувати пересування як із крайніх, так і з середнього положення. Він повинен надійно працювати при перевантаженнях, витримувати підвищену напругу живлення.

Конструкція двигуна повинна бути простою, надійною, такою, що не вимагає виконання трудомістких робіт у процесі технічного обслуговування, мати достатньо високий коефіцієнт корисної дії. В електроприводах стрілочних переводів, як правило, використовуються машини постійного струму й асинхронні двигуни.

Електродвигун постійного струму типу МСП-0,15 є більш тихохідним і призначений для нормальнодіючих електроприводів, установлених на всіх типах стрілок, а МСП-0,25 призначений для установки у швидкодіючих і нормальнодіючих електроприводах для переводу стрілок важких і звичайних типів. Нові типи електродвигунів ДП-0,18 і ДП-0,25 застосовуються замість МСП-0,15 і МСП-0,25 відповідно.

Підключення всіх електродвигунів до зовнішньої мережі здійснюється за допомогою трьох затискачів, котрі розташовані у верхній частині корпуса. Для спрощення системи керування при реверсуванні кожен електродвигун має дві незалежні обмотки збудження (рис.1.29).

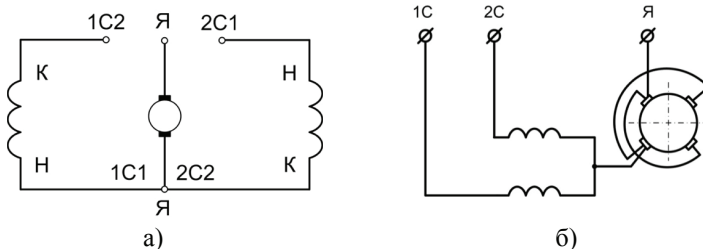


Рисунок 1.29 – Схема підключення електродвигунів типу: а –МСП і б –ДП

Числа 0,15, 0,18 і 0,25 указують на потужність, котру може розвинути двигун при номінальному навантаженні на валу в заданому режимі.

Електродвигуни змінного струму. Цей тип двигуна дуже поширений, але його тягові характеристики не відповідають у повній мірі встановленим вимогам до електродвигунів стрілочних електроприводів. Такі двигуни простіші за конструкцією, мають меншу масу, потребують для виготовлення менше міді, в них відсутні колектор і щітки, більш надійні в експлуатації та простіші в обслуговуванні.

Переваги стрілочних електродвигунів змінного струму:

- висока надійність і простота конструкції за рахунок відсутності колекторно-щіткового вузла;
- просте технічне обслуговування;
- стабільність швидкості обертання ротора, незалежно від напруги живлення;
- менші значення струму, що дозволяє підвищити дальність керування без дублювання жил;
- відсутність випрямного ефекту.

Недоліки:

- квадратична залежність моменту на валу від напруги живлення;
- необхідність більшого числа лінійних проводів;
- ускладнення схеми контролю протікання робочого струму.

Трифазний асинхронний електродвигун типу МСТ-0,25 з номінальною потужністю 0,25 кВт розрахований на напругу 127/220 В при увімкненні обмоток «трикутник»/«зірка».

Електродвигуни типів МСТ-0,3, МСТ-0,3А і ДАТ-0,3 встановлюються в електроприводах типу СП для переводу гостряків важких і звичайних стрілок електричної централізації, двигуни типу МСТ-0,6 встановлюються в електроприводах типу СП для переводу гостряків стрілок у маневрових районах. Електродвигуни МСТ призначені для роботи в повторно-короткочасному режимі. Зазначений ресурс електродвигунів стрілочних переводів - $5 \cdot 10^5$ переводів стрілок. Середній строк служби - 20 років.

Передавальний механізм здійснює передачу обертального моменту й перетворює обертальний рух вала електродвигуна в зворотно-поступальне переміщення шибера. Весь механізм має два каскади шестеренних передач із чотирма зубчатими парами. Завершує передачу шиберна шестерня з шиберам.

Маса і момент інерції всіх частин привода достатньо значна, тому потрібно вирішувати дві проблеми:

- подолання інерції передавального механізму й гостряків стрілки на початку переводу;
- гасіння кінетичної енергії механічної передачі привода в кінці переводу.

Для зменшення навантаження на валу електродвигуна на початку переводу зубчате колесо з'єднується з головним валом не жорстко, а з зазором у 46° .

Електродвигун спочатку навантажений тільки на частину передавального механізму, за рахунок чого він швидко набирає швидкість обертання.

Фрикційний механізм захищає двигун від перевантаження при недоведенні гостряків до рамної рейки (у випадку потрапляння стороннього предмета між гостряком і рейкою), а також для гасіння кінетичної енергії під час зупинки гостряків по закінченні кожного переводу стрілки.

Автоперемикач призначений для комутації контрольних і робочих ланцюгів у схемі керування електроприводом, основною функцією автоперемикача є забезпечення контролю положення гостряків стрілки.

Блок автоперемикача комутує контрольні й робочі ланцюги в схемі керування приводом. Безконтактний автоперемикач не має безпосереднього зв'язку з робочим ланцюгом. Тому можна стверджувати, що основною функцією автоперемикача є забезпечення контролю положення гостряків стрілки.

Робота автоперемикача базується на порівнянні двох процесів, які контролюють роботу механізму привода й переміщення гостряків стрілки.

Окремим класом є приводи гіркових стрілочних переводів.

При створенні нових конструкцій і модернізації діючих, зусилля розробників завжди направляються на підвищення рівня безпеки, відмовостійкості і розширення функціональних можливостей.

Нині в Україні освоєний випуск приводів нового покоління СП-6М (рис. 1.30), СП-Т, СП-Б.



Риунок 1.30 – Стрілочний привод нового покоління СП-6М

Конструкторами Київського заводу «Трансигнал» з 1991 року розпочатий випуск модернізованих електроприводів типу СП-6М. Стрілочні електроприводи СП-6М призначені для переводу стрілки в повторно-короткочасному режимі, запирання й контролю положення в неперервному режимі роботи стрілочного переводу в системах електричної централізації.

У 2002 році в Україні були розроблені нові приводи СП-Т і СП-Б. Таким чином, уся автоматика Укрзалізниці у складі елементної бази засобів СЦБ базується на приводах СП-3 і СП-6, а також модифікаціях на їх основі (СПГБ-4М, ВСП-150, СП-12У), в котрих по суті зміни радикально не торкнулись головних конструктивних вузлів, розроблених іще в СРСР в 1972 і 1983 рр.

Проблему відсутності сучасних переводів для швидкісного руху намагається вирішити ВАТ «Дніпропетровський стрілочний завод».

Стрілочний перевід проекту Дн 060.00.000. СП типу Р65 марки 1/18 проект Дн 060.00.000 із підтримуючими роликами, призначений для швидкісного руху, містить як нові компоненти, так і використовує елементи ранніх розробок. Наявність у конструкції хрестовини з неперервною поверхнею катання і зовнішніх замикачів гарантує безпеку руху по прямій колії до 200 км/год.

СП передбачений для укладки як на залізобетонні, так і на дерев'яні бруси. Загальний вигляд стрілочного переводу Дн 060.00.000 показаний на рис. 1.31.



Рисунок 1.31 – Загальний вигляд СП Дн 060.00.000

Стрілочний перевід проекту Дн 365.00.000. СП типу Дн 365.00.000 (рис. 1.32) має суцільнолиту хрестовину з приварними рейковими закінченнями й роликами, що підтримують, призначеними для полегшення переміщення гостряків. Конструктивна швидкість руху рухомого складу по прямій колії до 140 км/год. СП передбачений для укладки на дерев'яні бруси.



Рисунок 1.32 – Загальний вигляд СП Дн 365.00.000

Підтримуючі ролики, що використовуються для зменшення тертя при переводі, можуть бути легко й швидко встановлені на нові стрілочні переводи в колію. У результаті використання матеріалів високої якості в конструкції роликів, що підтримують, тривалість їх експлуатації обмежується тільки строком служби стрілочних переводів. Місце установки роликівих вузлів показано на рис. 1.33.



Рисунок 1.33 – Місце установки роликівих вузлів на СП Дн300.00.000.

Вузол роликів, що підтримують, складається з роликової опори з роликом, станини з одного боку, виготовленої з куткового профілю (75×75), до якої приварена з'єднувальна планка з отворами для кріплення вузла, а інший бік кріпиться безпосередньо до рамної рейки за допомогою клем. Ролик виготовлений зі сталі Ст.6 з наступним гартуванням зовнішньої поверхні, що забезпечує довговічність його експлуатації. Для ущільнення ролика з віссю застосовуються два сальникових кільця. Регулювання розміщення опори ролика здійснюється його переміщенням по гребінці, котра нарізана на кутках опори станини. Загальний вигляд ролика, що підтримує, встановленого на стрілочному переводі, наведений на рис. 1.34.



Рисунок 1.34 – Загальний вигляд підтримуючого ролика

Під час зміни напрямку руху по стрілочному переводу гостряк наїжджає на ролик і піднімається над підкладками з подушками, внаслідок чого знижується опір переміщення гостряка й усувається потреба змащування подушок. Розміщення ролика, що підтримує, гарантує, що сніг,

лід, забруднювачі і т. п. не впливають на його обертання. Роликовий вузол стійкий до широких коливань температури і негоди, наприклад, дощу, морозу й снігу. Застосування роликів, що підтримують, сприятливо впливає на роботу стрілочного переводу в комплексі з перевідним механізмом у важких експлуатаційних умовах.

Наведений вище огляд показав, що серед пристроїв стрілочних переводів з великою кількістю приводів різного типу (ручні, механічні, пневмо-, гідро- й електромеханічні) найбільш привабливими, з позиції керованості, екологічності, енергоефективності і масогабаритних показників є СП з електромеханічним приводом. Тому передусім слід сформулювати вимоги, які висуваються до них, а також зупинитись на описі як типів ЕП для СП у цілому, так і на їх складових – виконавчих механізмах і СК.

1.3. Електроприводи стрілочних переводів

Відповідно до вимог ПТЕ електропривод стрілочного переводу повинен забезпечувати перевід гостряків стрілки й механічне їх замикання у крайньому положенні. Очевидно, що для переміщення гостряків потрібен двигун і пристрої, які забезпечують перетворення обертального руху у зворотно-поступальний, що зменшує швидкість обертання й відповідно збільшує обертальний момент.

Також потрібно жорстко фіксувати гостряки в крайніх положеннях, щоб вони не змінювали свого стану відносно рамних рейок під час руху поїзда. Функціональна схема електропривода стрілочного переводу СП6, що експлуатується в даний час, наведена на рис. 1.35 [1].

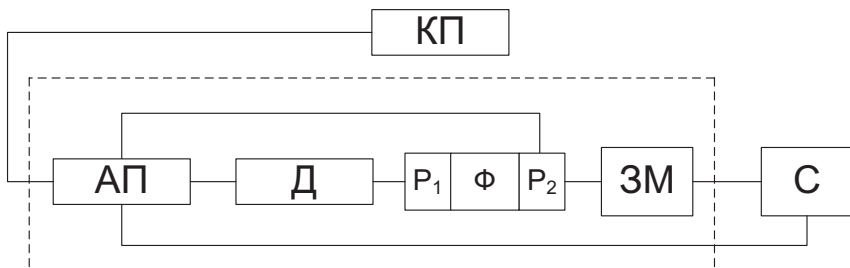


Рисунок 1.35 – Функціональна схема електропривода

Керуючий пристрій КП подає сигнал для двигуна й приймає інформаційний сигнал від засобів контролю.

Живильна напруга для двигуна Д надходить через автоперемикач АП. Перетворення обертального руху здійснюється передаточним механізмом, який має редуктори P1, P2 і фрикційний пристрій Ф.

Фрикційний пристрій захищає двигун від пошкоджень і перевантажень, а також із його допомогою можна здійснювати регулювання обертального моменту, який передається редукторами P1 і P2. Для механічної фіксації гостряків стрілки С в крайніх положеннях застосовується замикальний

механізм ЗМ. Автоперемикач механічно зв'язаний з гостряками й передаточним механізмом, за рахунок цього контроль положення стрілки можливий тільки при виконанні двох умов:

- роботи передавального механізму по переведенню стрілки;
- фактичному пересуванні гостряків на задану відстань.

Якщо вказані події будуть мати місце, то стає можливим формування контрольного сигналу для пристроїв керування. Коли хоча б одна з цих подій не буде виконана, АП перестає передавати сигнали контролю, що сприймається схемою керування як його втрата.

Для більш детального аналізу розглянемо алгоритм роботи привода, який був сформульований Ю.М. Резніковим.

На рис. 1.36, а показаний графік роботи стрілочного привода, який має ділянку розгону $0 - a$ й уповільнення $a - b$ (гальмування). Характерно, що швидкість як зростає, так і зменшується за лінійним законом. Оптимальне керування приводом за критерієм мінімізації часу переходу повинне бути до моменту t_1 , після чого настає режим гальмування до моменту t_2 , що означає кінець переходу.

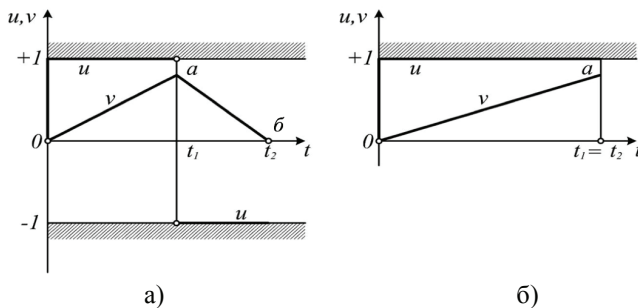


Рис. 1.36 – Процес роботи стрілочного електропривода за Резніковим: а – теоретичний закон керування; б – та, що застосовується на практиці

Проблема керування полягає в найбільш точному визначенні моменту переходу від розгону до гальмування. Помилки можуть призвести до відбою гостряків, їх недоводу, а також до незамкнення при ранньому переході в режим гальмування. У приводах, що діють, момент початку гальмування в точці a (рис. 1.36, б) забезпечується за рахунок обмеження ходу головної шестерні при одномоментному вимиканні живлення двигуна (на графіку цей час позначено t_2). Розширення можливостей керування можливе при збільшенні об'єму інформації, яку видає датчик контролю положення стрілки. Зараз же привод фактично тільки транспортує на фіксовану відстань гостряки, і його конструкція побудована за ознакою самодостатності. У процесі переведення не надходить інформація про переміщення гостряків, і тому зникнення й наступне відновлення зміненого контролю стрілки може бути сприйняте системою керування як переведення.

Досвід експлуатації стрілочних переводів показав, що використання існуючої кінематичної схеми не вирішило проблему віджимання гостряків.

Крім проблеми віджимання, існує також негативний процес збільшення зазорів в елементах кінематичної лінії стрілочного переводу, який у великій мірі відбувається з причини стрибкоподібного прикладання напруги живлення.

З огляду на це, можна зробити висновок про необхідність переходу від відсічки руху гостряків за допомогою блокування валу до їх розгону й гальмування із заданим темпом, тобто до електропривода, що регулюється є необхідною потребою сьогодення.

Час розгону (t_1) і момент часу, що визначає початок гальмування (t_2) у відповідності до рис. 1.37, безпосередньо впливають на динамічні показники електропривода, а також процеси збільшення зазорів і віджимання гостряками рамних рейок.

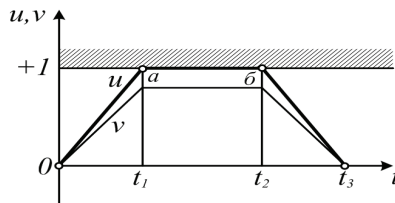


Рисунок 1.37 – Алгоритм роботи СП, який пропонується

Питання визначення моменту початку гальмування пропонується вирішити відповідно до технологічних вимог конкретних типів електроприводів стрілочних переводів.

Із аналізу наявних типів приводів видно, що за компоновкою існують стрілочні переводи з системами тяг і шпального типу, з редукторами і без них, одиночні й групові. Також вони підрозділяються на механічні, гідравлічні, пневматичні, електромеханічні, електрогідравлічні і електропневматичні.

Нині в Україні найбільш широко використовуються одиночні редукторні електромеханічні стрілочні переводи з системою тяг. У них встановлені або двигун постійного струму послідовного збудження, або асинхронний двигун із короткозамкненим ротором без системи керування, тобто здійснюється виключно прямий пуск. Двигун постійного струму має ряд недоліків, таких як: ціна (через велику кількість міді й складності у виготовленні), низька експлуатаційна ефективність (через необхідність періодичного обслуговування) і відносно низький ККД (у порівнянні з новими зразками машин змінного струму). Але для точного позиціонування й отримання потрібної швидкості переміщення гостряків стрілочного переводу можуть бути використані й інші типи електродвигунів з різними системами керування. До них відносяться вентильно-індукторні й лінійні. Для регулювання швидкості й положення гостряків можна використовувати універсальні системи керування як для нових, так і для існуючих електромеханічних систем.

Однак на сьогоднішній день не розроблена науково-технічна база для застосування цих електроприводів у стрілочних переводах, відсутні критерії якості їх роботи, а також не проведено їх порівняння. Таким чином, необхідно порівняти ефективність різних конструкцій стрілочних переводів, їх систем керування і приводних електродвигунів для оцінки доцільності їх використання в тих чи інших умовах експлуатації залежно від технологічних вимог.

У технічно розвинутих країнах перспективні розробки СП ведуться в напрямку створення шпальних конструкцій з гостряками підвищеної довжини і рухливими осердями хрестовин, що переміщуються груповим електроприводом на базі АД, який керується за допомогою перетворювача частоти (ПЧ). У той же час у доступних джерелах немає інформації про інші типи електроприводів із силовими комутаторами (СК), які могли б бути більш привабливими, ніж система ПЧ-АД з точки зору роботи механічної частини СП. Мова йде про систему СК – ВІД, котра дає більш високий момент на вході редуктора, або про систему ШПП – ЛД, котра забезпечує взагалі безредукторний привод.

1.4. Порівняльний аналіз електроприводів стрілочних переводів та критерії їх оцінки

З огляду видно, що існує велике різноманіття типів стрілочних переводів і видів приводних електродвигунів, які в них використовуються. Однак в Україні, як правило, використовується один тип із різними модифікаціями і вузьким сегментом приводних електродвигунів – ДПС і АД.

У якісному плані ЕП СП на базі асинхронних двигунів мають ряд переваг перед аналогічними переводами з машинами постійного струму, але в той же час приводний механізм СП морально застарів.

Особливо детального вивчення як приводних машин вимагають вентиляльні індукторні двигуни, котрі за рядом показників перевищують асинхронні двигуни, і, на думку багатьох дослідників, є перспективними, а також лінійні двигуни, які привертають до себе в останній час підвищену увагу спеціалістів, що працюють у галузі автоматизації технологічних процесів.

Як показав досвід створення електроприводів СП на базі різних типів двигунів і СК (ДПС, АД, ВІД, ЛД), кожний із типів має свої переважні галузі застосування у залежності від типу об'єкта, на якому він використовується.

З точки зору компоновки стрілочного переводу, очевидні переваги шпального варіанту, оскільки в цьому випадку можливе підбиття баласту в автоматичному режимі спеціальними машинами, зменшуються габарити й вага переводу, підвищується технологічність обслуговування й ремонту. А тому необхідно розглядати цю компоновку як найбільш пріоритетну в процесі створення нових типів електроприводів стрілочних переводів.

Результати якісного порівняння різних типів приводів стрілочних переводів наведено у вигляді таблиць (табл. 1.1 – 1.3). Знак «+» відповідає випадку, коли за цим показником стрілочний перевід перевищує аналогі,

знак «←» – поступається, знак «±» – знаходяться на одному рівні. У таблиці наведено порівняння найбільш поширених систем: ручний, електро-гідро-пневматичний та електричний приводи.

Таблиця 1.1 – Співставлення різних типів приводів СП

<i>Критерій</i>	Ручний	Е-П-Г	ЕП
Швидкодія	–	±	±
Маса і габарити	+	±	+
Простота експлуатації	+	±	+
Надійність і ремонтпридатність	+	±	±
Автоматизація процесу	–	+	+

Таблиця 1.2 – Співставлення різних типів СП за компоновкою

<i>Критерій</i>	Традиційний	Шпальний
Маса й габарити	±	+
Простота експлуатації	±	+
Автоматизація підбиття баласту	–	+
Надійність і ремонтпридатність	±	+

Таблиця 1.3 – Співставлення СП з різними типами двигунів

<i>Критерій</i>	ДПС	АД	ВД	ЛД
Коефіцієнт корисної дії	±	+	+	+
Маса й габарити	±	±	+	+
Простота експлуатації	–	+	+	+
Надійність і ремонтпридатність	±	+	+	+
Загальний ККД системи	–	–	±	+

Із оцінок ефективності, наведених у таблицях 1.1 – 1.3, випливає висновок, що електропривод вигідно вирізняється серед інших видів, шпальна компоновка краща за традиційну з тягами і двигун постійного струму значно поступається іншим типам електродвигунів.

З огляду на проведений аналіз пропонуються наступні критерії оцінки якості роботи стрілочного переводу: час переводу гостряків (ts), величина імпульсу удару гостряків об рамну рейку в кінці переводу (M_i), величина пружної сили в робочій тязі у процесі переводу (F_{12}), величина електричних втрат електродвигуна (P_i) і величина сумарних втрат у системі (ΣP).

Однак ці показники не дозволяють надати перевагу якому-небудь із типів стрілочних переводів. Порівняння систем буде коректним тільки тоді, коли їх об'єднає «критеріальна» спільність, яка формулюється як однакова здатність відповідати певним функціональним вимогам.

Тому пропонується ввести узагальнений векторний критерій ефективності $K = [ts, F_{12}, M_i, \Sigma P]^T$, а кінцеву порівняльну оцінку ЕП СП пропонується здійснювати за модулем узагальненого векторного критерію

$$|K| = \sqrt{ts^2 + M_i^2 + F_{12}^2 + \Sigma P^2}.$$

РОЗДІЛ 2

ЕЛЕКТРОПРИВОД СТРІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ З ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Найбільш розповсюдженим в Україні залишається електропривод стрілочного переводу на базі двигуна постійного струму (ДПС). Для підвищення динамічних властивостей привода (максимальний пусковий момент) використовується двигун постійного струму послідовного збудження. Основною проблемою наявних приводів із ДПС є те, що електропривод залишається розімкнутим і некерованим. Це призводить до порушень ланок механічної частини стрілочного переводу.

Заміна всіх приводів сучасними системами неможлива як із фінансового, так і з технічного боку. Поряд із цим існує необхідність підвищення якості роботи стрілочних переводів. Очевидним є рішення про модернізацію існуючих електроприводів впровадженням нових систем керування в комбінації з наявними електромеханічними системами. Такі системи дозволять регулювати координати струму, швидкості й положення, підвищивши таким чином ефективність і надійність роботи стрілочних переводів.

Задача дослідження режимів роботи штатного електропривода стрілочного переводу з двигуном постійного струму вимагає створення математичної моделі об'єкта. Для цього необхідно розробити багатомасові моделі, які адекватно описують електричну і механічну підсистеми електропривода з урахуванням усіх технологічних особливостей: зазорів, пружностей та сил внутрішнього в'язкого тертя.

Експлуатація стрілочного переводу відбувається в різних погодних умовах при різних поєднаннях збурюючих факторів, тому необхідно враховувати змінне значення коефіцієнта тертя гостряків об подушки. Для коректного дослідження сил опору під час руху гостряків необхідно в навантаження включити реактивний момент із змінним значенням коефіцієнта тертя в допустимому діапазоні його зміни. Потрібно оцінити можливість появи фрикційних автоколивань в електроприводі і знайти методи боротьби з цим явищем.

Для ефективного керування процесом переведення гостряків необхідно створити систему керування штатним електроприводом, оцінити її ефективність і зробити висновок про можливості задоволення всіх або більшості вимог, що висувуються до сучасних електроприводів стрілочних переводів. Розв'язання цієї задачі можливе шляхом створення керувального комплексу на базі системи підпорядкованого регулювання з модальним керуванням і спостерігачем стану, як найбільш розповсюджених для цього типу двигуна. У ході експериментів на моделі слід дослідити всю можливу глибину регулювання за швидкістю в широкому діапазоні зміни моменту опору механізму.

2.1. Математична модель електроприводу стрілочного переводу, як багатомасова електромеханічна система

Стрілочні переводи, які застосовуються на залізницях України, як було сказано вище, в основному використовують як джерело механічної енергії електричні двигуни [1, 4]. Оскільки процес перетворення електричної енергії поля в механічну взаємозв'язаний, то стрілочний перевід являє собою ЕМС. Найбільш поширеним типом двигуна є ДПС. Доцільно визначити можливості регулювання ДПС для процесу переведення гостряків із одного положення в інше, задовольнивши при цьому всі вимоги щодо безпеки руху. Це може бути зроблено за критеріями оцінки якості процесу керування, котрі можуть бути різними: швидкість переведення, енергоефективність тощо. Для розв'язання цієї задачі необхідне проведення експериментів на обладнанні, яке експлуатується. Однак цей процес потребує значних витрат, часу підготовки і в ряді випадків неможливий з точки зору безпеки руху.

Кінематична схема стрілочного переводу (рис. 2.1) може бути представлена як дво- або тримасова електромеханічна система.

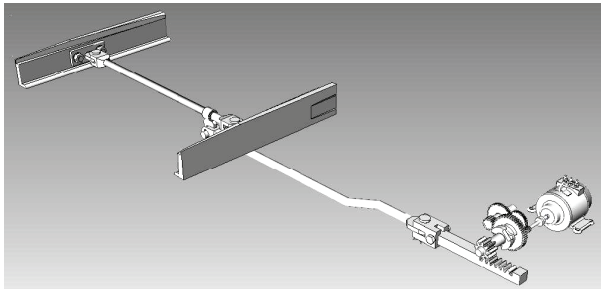


Рисунок 2.1 – Кінематична схема стрілочного переводу СП-6м

Для визначення параметрів і виду механічної частини розглядаються три варіанти її представлення: двомасова механічна підсистема (рис. 2.2, а), тримасова з послідовним з'єднанням пружних мас (рис. 2.2, б) і тримасова з паралельним з'єднанням пружних мас (рис. 2.2, в), де J_1 – момент інерції ротора двигуна; J_p – момент інерції редуктора, приведений до вала двигуна; $J_{\Sigma 1}$ – сумарний момент інерції першої маси; $M_{\text{об}}$, $F_{\text{об}}$ – електромагнітний момент і сила тяги двигуна відповідно; $\varphi_{\text{м.з.}}$, l_3 – технологічний зазор і зазор у кріпленнях тяг відповідно; F_{12} , F_{23} – пружні сили в робочій і міжгостряковій тягах відповідно; F_{c1} , F_{c2} – сили опору першого й другого гостряка відповідно; c_{12} , c_{23} – пружності робочої та міжгострякової тяг відповідно; β_{12} , β_{23} – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя робочої і міжгострякової тяг відповідно; $m_{\Sigma 2}$ – сумарна маса гостряків; m_2 , m_3 – друга і третя маси відповідно.

Із рисунка кінематичної схеми стрілочного переводу видно, що в двомасовій системі (рис. 2.2, а) першою масою $J_{\Sigma 1}$ виступає сумарний момент інерції двигуна, редуктора і шибера, приведених до вала двигуна. Другу масу складає сумарна маса гостряків і міжгострякової тяги $m_{\Sigma 2}$. Роль

пружного зв'язку c_{12} виконує робоча тяга, яка з'єднує шибер із першим гостряком. Перетворення обертального руху вала двигуна в поступальне переміщення гостряків здійснює шибер. Також у моделі враховані зазори в кінематичній передачі: технологічний зазор $\varphi_{m.з.}$ і зазори l_3 в місцях з'єднання тяги з шибером і гостряком.

Наявність міжгострякової тяги означає, що існує пружний зв'язок між першим і другим гостряком, тому доцільним є розгляд стрілочного переводу ще і як тримасової системи. У розрахунковій схемі з послідовним з'єднанням пружних мас (рис. 2.2, б) першу масу складають ті ж моменти інерції, що й раніше. Другою і третьою масою є перший і другий гостряк відповідно, а пружністю c_{12} і c_{23} . У цій структурі зазори (l_3) в кінематичній передачі можна відобразити точніше, бо вони присутні в кожному вузлі кріплення тяг.

Аналіз рис. 2.1 показує, що робоча тяга не упирається безпосередньо в перший гостряк, а з'єднується з ним з боку другого гостряка через міжгострякову тягу. Таким чином, допустимий розгляд механічної частини стрілочного переводу, як багатомасової розрахункової схеми з розгалуженням з'єднанням пружних мас, наведено на рис. 2.2.

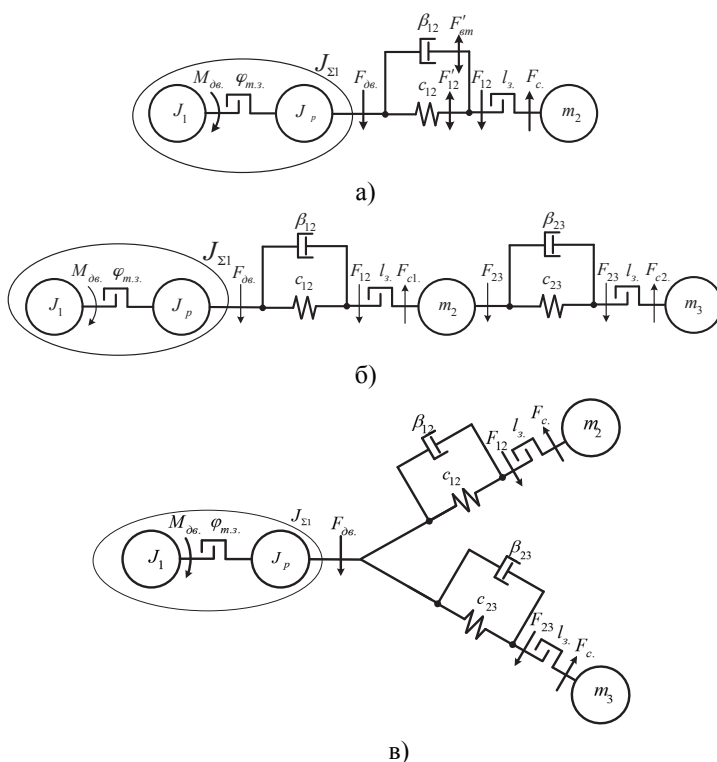


Рисунок 2.2 –Розрахункові схеми стрілочного переводу

У процесі переведення стрілки (рис. 2.3) гостряки 2 і 7 переміщуються по перевідній поверхні 1, далі показані - зв'язна (міжгострякова) тяга 3, робоча 4, контрольні тяги 5 і 6 стрілочної гарнітури і деталі кріплення.

Зусилля переведення стрілки витрачається на подолання опору частин, що переміщуються по перевідних поверхнях (подушках) 1, і опору в шарнірах.

Для визначення зусилля, необхідного для переміщення рухливих частин стрілки, потрібно визначати значення сили тертя, що виникає під час руху. Цю величину можна визначити наступним чином. Якщо розділити стрілку на n рівних елементів завдовжки l кожний і позначити через q_1, q_2, \dots, q_k вагу кожного елемента, то вага всіх елементів буде різною за рахунок зміни ваги частин гостряків 2 і 7.

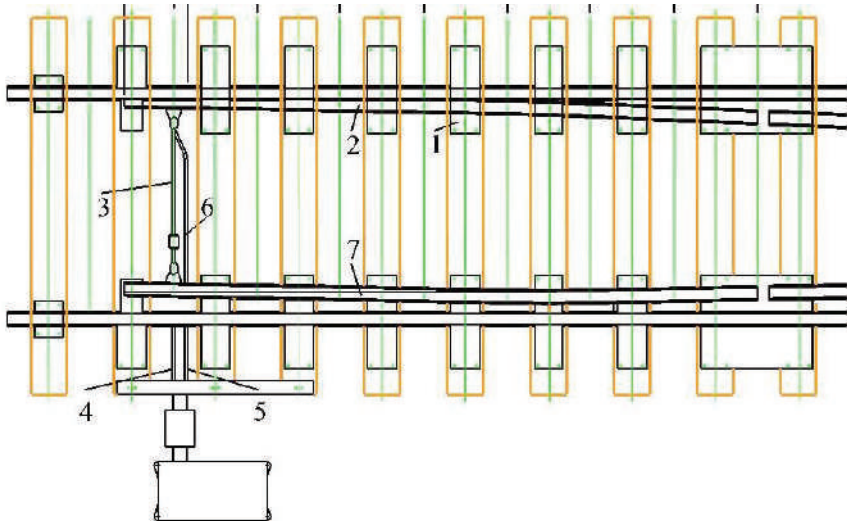


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд механізму переведення стрілки

Прийнявши припущення, що гостряк лежить на суцільній основі і коефіцієнт тертя між гостряками й основою однаковий по всій довжині гостряка і дорівнює ψ , визначимо сили тертя:

$$F_1 = \psi \cdot q_1, F_2 = \psi \cdot q_2, \dots, F_k = \psi \cdot q_k. \quad (2.1)$$

а також моменти сил відносно кореня гостряків:

$$M_1 = \psi \cdot q_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot l, M_2 = \psi \cdot q_2 \cdot \frac{3}{2} \cdot l, \dots, M_k = \psi \cdot q_k \cdot \frac{2k-1}{2} \cdot l. \quad (2.2)$$

Сумарний момент сили тертя визначається за виразом:

$$M_T = \sum_{k=1}^n M_k = \frac{1}{2} \cdot \psi \cdot l \cdot \sum_{k=1}^n q_1 + 3q_2 + \dots + (2k-1)q_k. \quad (2.3)$$

А тому, зусилля, котре необхідне для подолання сил тертя частин, які перемішують, складає

$$F = \frac{M_T}{L-a} = \frac{1}{2} \cdot \psi \cdot \frac{l}{L-a} \cdot \sum_{k=1}^n q_1 + 3q_2 + \dots + (2k-1)q_k. \quad (2.4)$$

Зробивши припущення, що $q_1 = q_2 = \dots = q_k = q$, отримаємо наближене значення сили F

$$F = \frac{1}{2} \cdot \psi \cdot q \cdot \frac{l}{L-a} \cdot \sum_{k=1}^n 1+3+\dots+(2k-1) = \frac{1}{2} \cdot \psi \cdot q \cdot n^2 \cdot \frac{l}{L-a}. \quad (2.5)$$

Якщо $L = l \cdot n$ і $Q = q \cdot n$, то

$$F = \frac{1}{2} \psi \cdot Q \cdot \frac{L}{L-a}, \quad (2.6)$$

де L – довжина гостряка; Q – загальна вага частин стрілки, яку переміщують.

Коефіцієнт тертя в шарнірах приймається рівним 1,1 [125, 183].

Тоді розрахункове зусилля переведення стрілки обчислюється за формулою

$$F = 1,1 \cdot \frac{1}{2} \psi \cdot Q \cdot \frac{L}{L-a} = 0,55 \cdot \psi \cdot Q \cdot \frac{L}{L-a}. \quad (2.7)$$

Найважливішою умовою гарантування безпеки роботи стрілки є підтримання величини зазорів кінематичної лінії переведення (рис. 2.4) в установлених інструкціями межах.

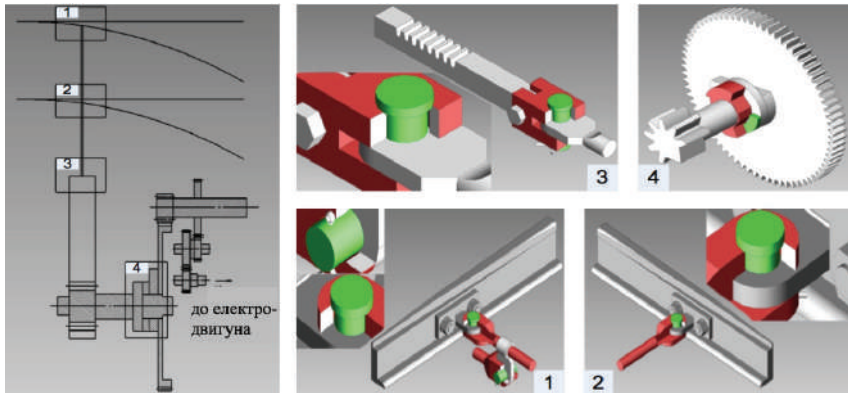


Рисунок 2.4 – Зазори в кінематичній лінії стрілочного переводу:

1, 2, 3 – в місцях кріплення тяг, 4 – технологічний зазор 46^0

Для безпечного руху коліс рухомого складу відстань між гостряком та рамною рейкою не повинна перевищувати 4 мм, і називається вона віджимом гостряків [5]. Внаслідок удару, при виборі технологічного зазору в 46^0 і нерегульованої швидкості переведення, з'єднання тяг поступово розбиваються, тоді зазори збільшуються. Дослідження, проведені під керівництвом М. Гржибовські на залізницях Латвії [6], показали, що швидкість зростання величини зазору в середньому складає 0,05 мм на місяць.

Математичне моделювання механічної частини електропривода здійснювалося класичними методами з урахуванням впливу зазорів і

наявності сили внутрішнього в'язкого тертя [7, 8]. У двомасовій розрахунковій схемі (рис. 2.2, а) пружна сила F'_{12} і сила внутрішнього в'язкого тертя F_{em} характеризуються нелінійною залежністю. Величина сумарної пружно-в'язкої сили визначається за формулою:

$$F_{12} = \begin{cases} 0, & \text{если } \text{sign}\Delta l \neq \text{sign}\Delta v \text{ и } |F_{em}| > |F'_{12}|; \\ F_{em} + F_{12}, & \text{если } \text{sign}\Delta l = \text{sign}\Delta v \text{ если } |F_{em}| \leq |F'_{12}|, \end{cases} \quad (2.8)$$

де $F'_{12} = c_{12} \cdot F_1(l)$ – пружна сила; $F_{em} = \beta_{12} \cdot \Delta v \cdot F_2(l)$ – сила в'язкого тертя; $F_1(l)$ и $F_2(l)$ – нелінійні функції;

$$F_{12} = \begin{cases} 0, & \text{если } \text{sign}\Delta l \neq \text{sign}\Delta v \text{ и } |F_{em}| > |F'_{12}|; \\ F_{em} + F_{12}, & \text{если } \text{sign}\Delta l = \text{sign}\Delta v \text{ если } |F_{em}| \leq |F'_{12}|, \end{cases} \quad (2.8)$$

$$F_1(l) = \begin{cases} 0 & \text{при } |\Delta l| \leq \frac{\Delta l_3}{2}; \\ \Delta l - \frac{\Delta l_3}{2} & \text{при } \Delta l > \frac{\Delta l_3}{2}; \\ \Delta l + \frac{\Delta l_3}{2} & \text{при } \Delta l < -\frac{\Delta l_3}{2}, \end{cases} \quad (2.9)$$

$$F_2(l) = \begin{cases} 0 & \text{при } |\Delta l| \leq \frac{\Delta l_3}{2}; \\ 1 & \text{при } |\Delta l| > \frac{\Delta l_3}{2}. \end{cases} \quad (2.10)$$

Аналогічно визначається пружно-в'язка сила F'_{23} в тримасовій моделі (рис. 2.2, б).

Реалізація математичної моделі здійснена у середовищі Simulink пакету MATLAB з огляду на її зручність, простоту й широку функціональність [9]. Для уніфікації досліджень роботи електропривода СП з різними типами електродвигунів модель представлена блоками відповідно до розрахункових схем (рис. 2.2). Таке подання структури ЕМС робить модель більш наочною і зручною для роботи.

$$\begin{cases} u = (L_r + L_e) \frac{di}{dt} + (r_r + r_e)i + e_r \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_o - M_c \\ e_r = k \cdot \omega \cdot \Phi_o \\ M_o = k \cdot i \cdot \Phi_o, \end{cases} \quad (2.11)$$

де $k = \frac{pN}{2\pi a}$ – конструктивний коефіцієнт.

У наведеній системі рівнянь усі коефіцієнти приймаються величинами постійними. Вихідними даними служать електричні й механічні параметри двигуна – індуктивність і опір ланцюгів якоря і збудження, а також момент інерції якоря.

Із загального вигляду стрілки (рис. 2.1) видно, що сумарний момент інерції, зведений до вала двигуна, має кілька складових: моменту інерції

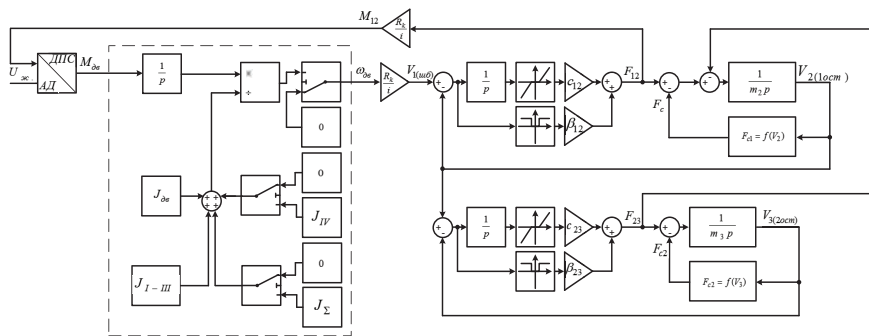


Рисунок 2.6 – Структурна схема тримасової моделі СП з послідовним з'єднанням пружних мас

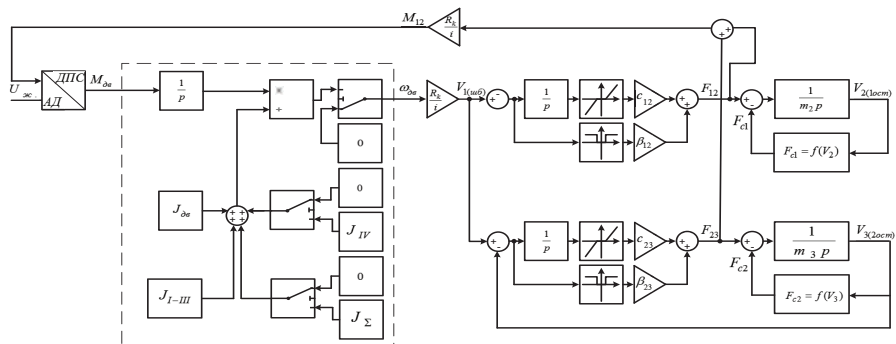


Рисунок 2.7 – Структурна схема тримасової моделі СП з розгалуженням з'єднанням пружних мас

Вигляд імітаційної моделі в середовищі MATLAB і отримані результати моделювання роботи електропривода стрілочного переводу з двигуном постійного струму наведені на рис. 2.8 – 2.11.

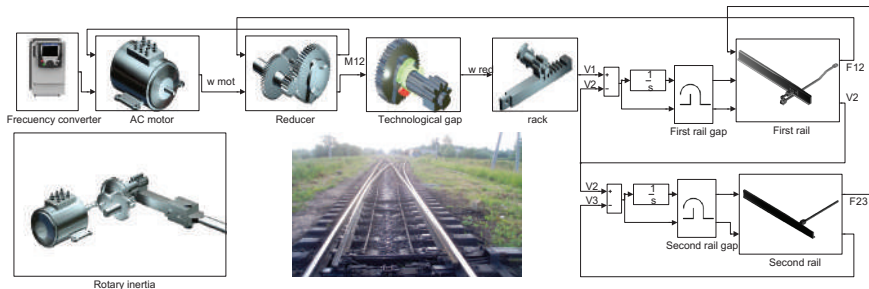


Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд тримасової моделі СП з двигуном постійного струму в середовищі розробки Simulink

Для роботи з імітаційною моделлю здійснена оцінка адекватності її реальному об'єкту. Для цього в лабораторії автоматички УкрДУЗТ до привода СП6 було підключене джерело живлення фірми Siemens і здійснений пуск без навантаження до номінальної швидкості за заданою тахограмою з часом розгону й гальмування близько 0,3 с.

Результати експерименту на стенді й на моделі наведені на рис. 2.9. Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що за основними координатами електропривода – струмом і швидкістю – помилка не перевищує 5%, а тому, модель адекватно описує об'єкт дослідження.

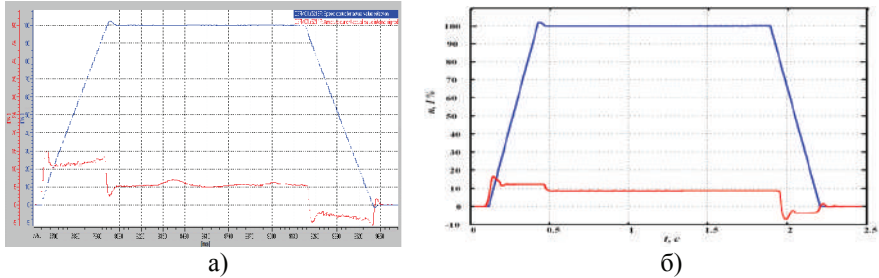


Рисунок 2.9 – Осцилограма руху привода стрілочного переходу:
а – експеримент на обладнанні Siemens; б – математична модель

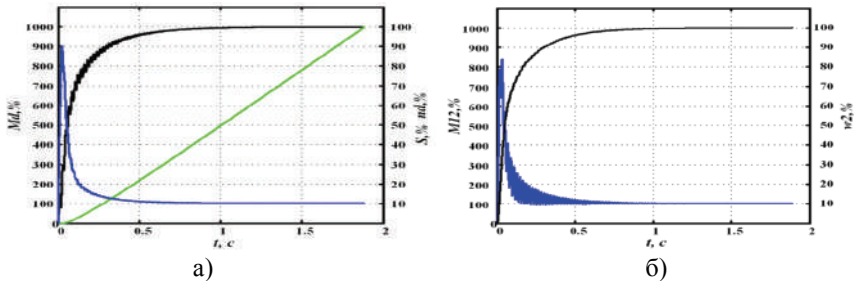


Рисунок 2.10 – Осцилограми перехідних процесів для двомасової системи:
а – кутова швидкість, момент двигуна постійного струму й переміщення гостряків; б – пружний момент другої маси і її кутова швидкість

На рис. 2.11 наведено осцилограми перехідних процесів для тримасової системи: а – кутова швидкість, момент і переміщення гостряків; б – пружний момент другої маси і її кутова швидкість; в – пружний момент третьої маси і її кутова швидкість.

Аналіз результатів моделювання (рис. 2.10 і 2.11) показав високу схожість процесів в електромеханічній системі СП як у дво-, так і в тримасовій структурній системі, тому далі будуть розглядатися обидві механічні системи без втрати якості оцінки.

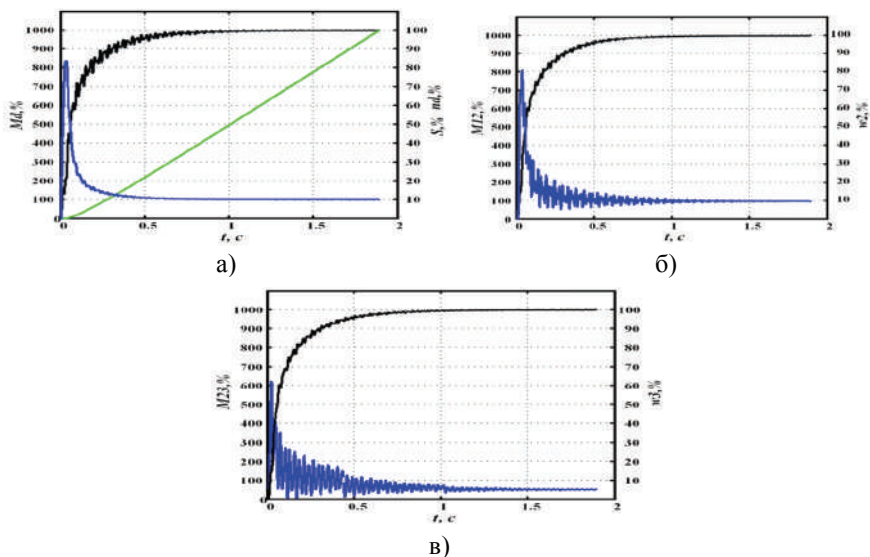


Рисунок 2.11 – Осцилограми перехідних процесів для тримасової системи

Оскільки СП працюють за різних погодних умов під впливом погодних факторів (опале сухе листя, дощ, сніг тощо), а також в умовах, коли відбувається просідання шпал і зміна геометрії стрілки в цілому, то мають місце випадки, коли гостряк контактує не з усіма перевідними подушками (рис. 2.12, а).

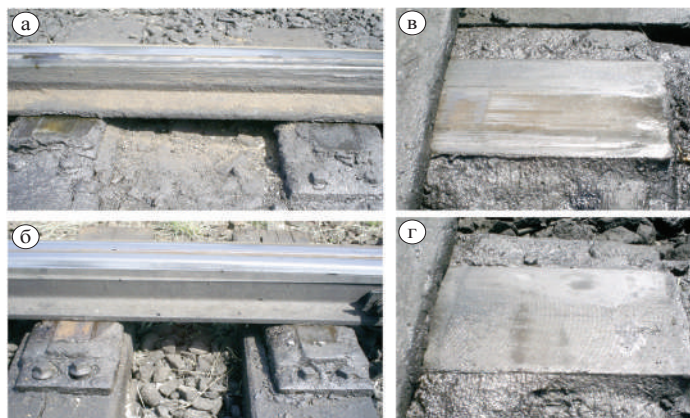


Рисунок 2.12 – Стан перевідних поверхонь СП

Також можливі випадки, коли перевідні поверхні можуть бути якісно змащені (штатний стан), змащені частково або не змащені взагалі (нештатний стан) (рис. 2.12, б). Гостро стоїть проблема забруднення перевідних

поверхонь у результаті потрапляння часточок вантажів, що перевозяться (пісок, вугільний пил, рудний пил, цемент, мазут, масло тощо). Тому коефіцієнт тертя не однаковий по всьому шляху руху гостряка, що призводить до складного характеру навантаження і створює умови для виникнення фрикційних автоколивань (рис. 2.12 в, г).

Величина коефіцієнта тертя може знаходитися в межах від 0,05 до 0,8 і залежить від технічного стану стрілки, якості мастила стрілочних подушок, чистоти обробки їх поверхонь і підшов гостряків, а також ряду інших факторів [13, 14]. Діапазон зміни величини коефіцієнта тертя по поверхні сталь-сталь наведений у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Діапазон зміни величини коефіцієнта тертя

Матеріали, що труться	Значення коефіцієнта тертя			
	спокою		ковзання	
	без мастила	з мастилом	без мастила	з мастилом
Сталь — сталь	0,8	0,5-0,4	0,15-0,3	0,05-0,18

З [13,14] для моделювання процесу переведення гостряків прийнятий діапазон зміни коефіцієнта тертя, який графічно поданий на рис. 2.13 у вигляді кривих, що залежать від швидкості проковзування.

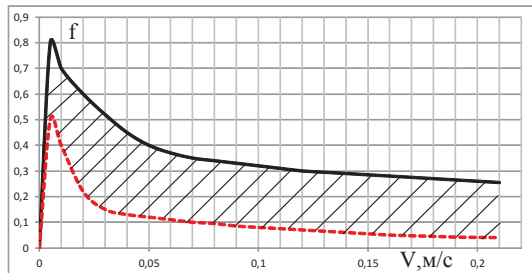


Рисунок 2.13 – Діапазон зміни коефіцієнта тертя

У процесі переведення гостряків СП коефіцієнт тертя поверхонь, що контактують, може знаходитися в заштрихованій області, обмеженій двома кривими. Під час моделювання [9] обрано різні значення коефіцієнта тертя і швидкості ковзання. Дослідження поведінки систем типу «пара тертя» [15] показали, що за певних умов у кінематичних лініях таких пристроїв можуть виникати фрикційні автоколивання. Причиною фрикційних автоколивань є динамічна нестійкість ЕМС з навантаженням, що містить падаючий відрізок, за умови знаходження робочої точки на цій ділянці [16]. У літературних джерелах [7, 15-17] залежність коефіцієнта тертя від швидкості проковзування, як правило, подається апроксимованою характеристикою у вигляді кусочно-лінійної функції (рис. 2.14).

У процесі переміщення робочої точки по механічній характеристиці навантаження в межах лінійної ділянки, наприклад, CD (рис.2.14, б), справедливо

$$M_O = M_{O0} + \beta_c \omega_{ck} \quad (2.13)$$

де M_O – момент опору; M_{O0} – нульовий момент; β_c – жорсткість характеристики навантаження, Н·м·с; $\omega_{ck} = \omega - \omega_n$, с⁻¹ – кутова швидкість, що відповідає зведеній лінійній швидкості проковзування, наприклад, колеса відносно рейки.

Якщо для більшості промислових механізмів режим проковзування є аварійним, то для стрілочного переводу це штатний процес, бо гостряк у результаті обертання вала приводного двигуна ковзає по перевідній поверхні. Швидкістю ковзання в цьому випадку слід вважати лінійну швидкість відповідної маси.

У процесі переміщення робочої точки по ділянці характеристики навантаження з негативним в'язким тертям в електромеханічну систему вводиться енергія коливань пружної сили або моменту, що призводить до зростання амплітуди пружних коливань від періоду до періоду, тобто до динамічної нестійкості. При цьому виді нелінійності механічної характеристики пари тертя (рис. 2.14, б) розхідний динамічний режим переходить в автоколивальний [15, 16].

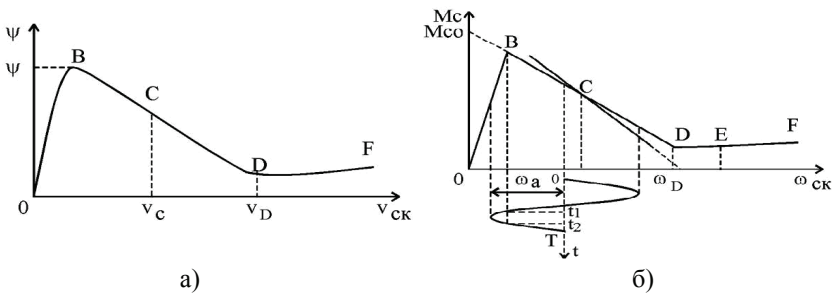


Рисунок 2.14 – Залежність коефіцієнта тертя у функції швидкості проковзування: а – кусочно-лінеаризована крива; б – поведінка ЕМС на падаючому відрізку характеристики тертя

Для реалізації умов, при яких можливе виникнення фрикційних коливань, пропонується скористатися двома способами – зміною кута нахилу падаючого відрізка характеристики тертя або зміною величини швидкості проковзування (рис 2.15).

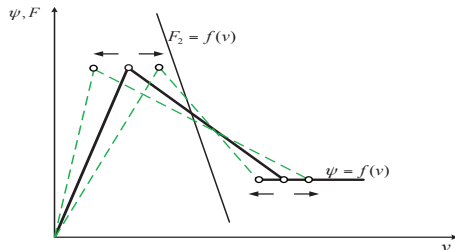


Рисунок 2.15 – Способи зміни параметрів характеристики навантаження

Оскільки зміна цих величин носить випадковий характер, то обидва способи є правомірними для математичного моделювання фізичних процесів.

Структурна схема тримасової моделі ЕП стрілочного переводу з урахуванням негативного в'язкого тертя представлена на рис 2.16.

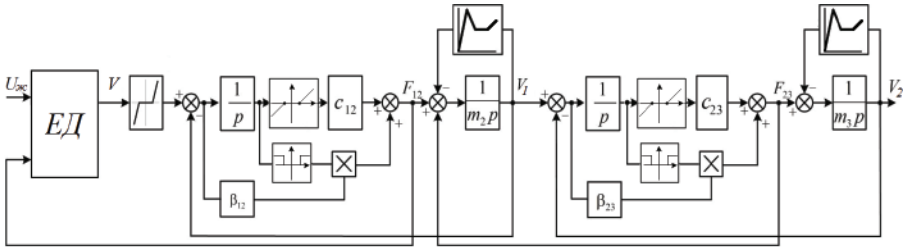


Рисунок 2.16 – Структурна схема тримасової моделі механічної частини ЕП з урахуванням характеристики навантаження

Під час досліджень на математичній моделі виявлено, що за умови сполучення деяких параметрів характеристики навантаження в кінематичній лінії стрілочного переводу можуть виникати фрикційні коливання швидкості і пружної сили в тягах. На рис. 2.17 подані різні види автоколивальних процесів пружної сили в тягах F_{12} .

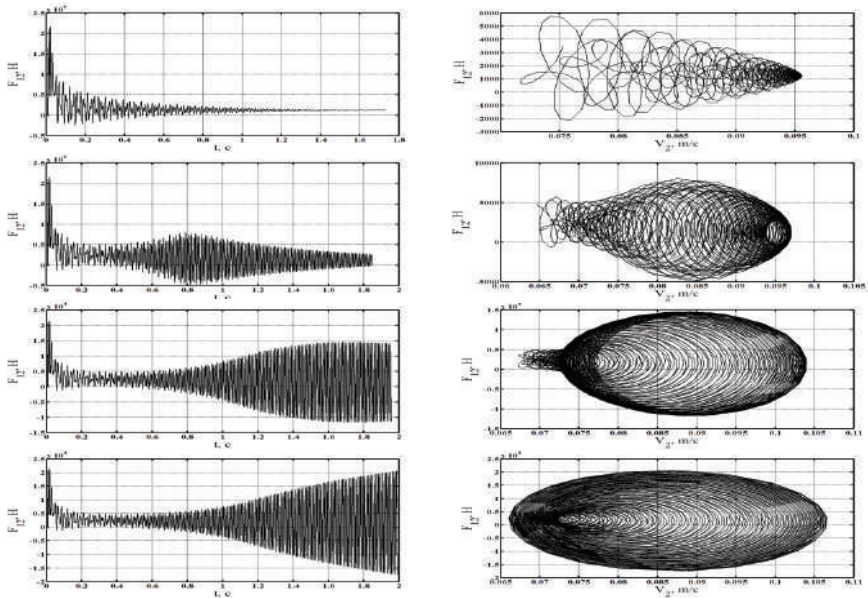


Рисунок 2.17 – Осцилограми автоколивальних процесів у кінематичній лінії стрілочного переводу

У [7, 15-17] показано, що автоколивальні режими можуть виникати в ЕП з двигунами постійного струму під час навантаження, аналогічного тому, що досліджується. На рис. 2.17 видно розвиток фрикційних коливань із м'яким самозбудженням у СП з двигуном постійного струму МСП-0,25. Залежно від кута нахилу падаючого відрізка характеристики навантаження процес переходить або до коливань з усталеною амплітудою, або із згасаючою. У цьому випадку можливий розвиток розхідних коливань, коефіцієнт динамічності котрих досягає 10 і більше.

Для визначення коливань пружної сили використовується амплітудний δ_A і частотний δ_f критерії коливальності:

$$\delta_A = \sum_{i=1}^n \frac{\|F_i - F_{norm}\|}{F_{norm}} \quad (2.14)$$

$$\delta_f = \sum_{i=1}^n \begin{cases} 0, & \text{sign}\left(\frac{dF_i}{dt}\right) + \text{sign}\left(\frac{dF_{i-1}}{dt}\right) \neq 0 \\ 1, & \text{sign}\left(\frac{dF_i}{dt}\right) + \text{sign}\left(\frac{dF_{i-1}}{dt}\right) = 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

де n – крок розрахунку моделі; F_i – значення пружної сили в i -тій точці, Н; F_{norm} – значення заданої сили опору руху, Н.

З (2.14) видно, що δ_A являє собою нормовану суму відхилень ординат миттєвих значень пружної сили від її заданого значення. Критерій δ_f базується на розрахунку суми кількості коливань досліджуваної кривої. Графічна інтерпретація критеріїв коливальності наведена на рис. 2.18.

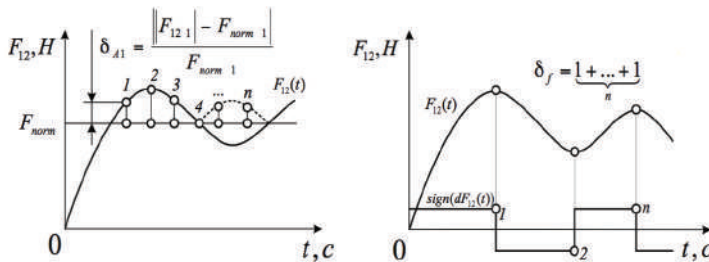


Рисунок 2.18 – Критерії коливальності

Використання (2.14) і (2.15) в комплексі дозволило отримати поверхні розподілу коливань пружної сили в тягах при зміні параметрів характеристики навантаження. Для зручності аналізу поверхні подані у вигляді площин. Результати наведено на рис. 2.19 – 2.21.

Беручи до уваги отримані результати, можна дійти висновку, що існує певна зона параметрів характеристики навантаження, коли можливий розвиток автоколивальних процесів у кінематичній лінії стрілочного переводу як із м'яким, так і з жорстким самозбудженням. Найбільший вплив здійснює абсциса початкової точки ділянки з негативним (світлий відтінок) в'язким тертям.

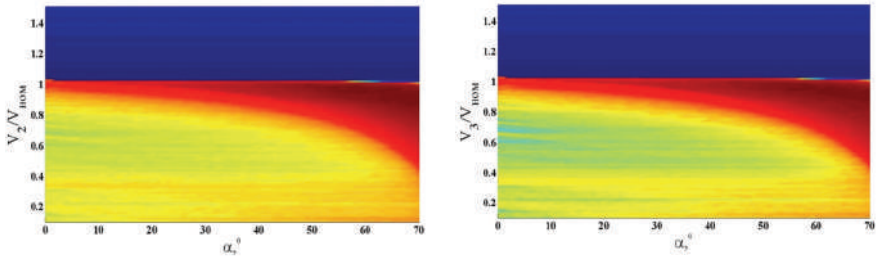


Рисунок 2.19 – Критерії коливальності пружної сили при

$$F_{c1} = f(V_2), F_{c2} = const$$

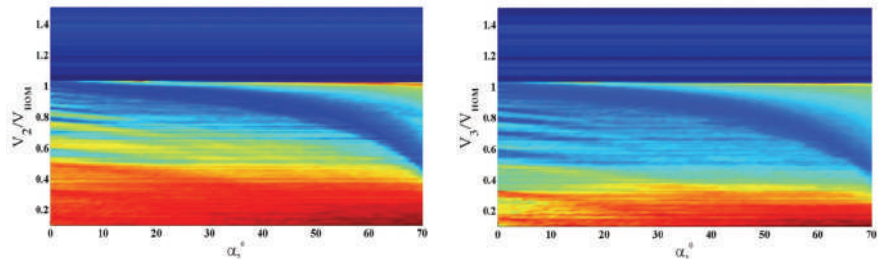


Рисунок 2.20 – Критерії коливальності пружної сили при

$$F_{c1} = const, F_{c2} = f(V_3)$$

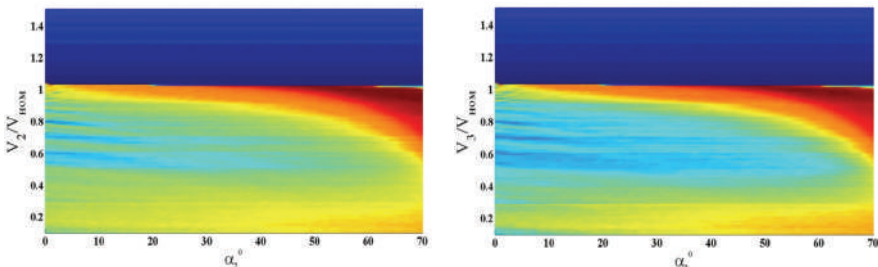


Рисунок 2.21 – Критерії коливальності пружної сили при

$$F_{c1} = f(V_2), F_{c2} = f(V_3)$$

Також має значення розміщення незмащеної перевідної поверхні. За відсутності мастила на першому гостряку зона можливих коливань ширша, що видно з рис. 2.19. Виникнення подібних явищ може дати пояснення прискореному зростанню зазорів у вузлах кріплень стрілочних тяг, а також хвилеподібним деформаціям перевідних поверхонь, по котрих рухаються стрілочні гостряки, що показані на рис. 2.22.

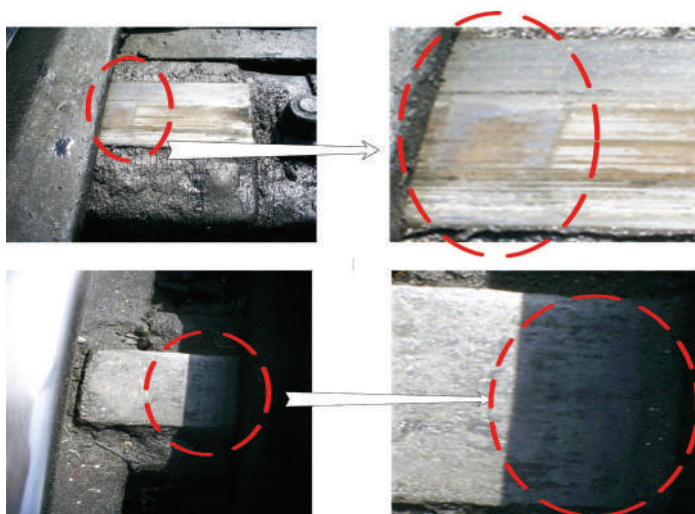


Рисунок 2.22 – Деформації перевідних поверхонь другого гостряка

Також коливання, що розходяться, можуть призводити до посилення ефекту «відбою» гостряком рамної рейки назовні при ударі в кінці переведення, наслідком чого може бути деформація стрілочних тяг і розширення колії. На рис. 2.23 наведені приклади таких деформацій.



Рисунок 2.23 – Деформації зв'язної тяги: а – рівна тяга; б – вигнута тяга

Такі негативні явища, що протікають у кінематичній лінії стрілочного переводу, призводять до погіршення його динамічних характеристик, а також порушують періодичність огляду й ремонту механічної частини переводу, встановленої технічними інструкціями [5]. Існує вірогідність виникнення аварійних ситуацій у випадку, якщо електромеханік не здійснить вчасно огляд і не зможе виявити збільшення зазору, оскільки зовнішня рейка при цьому буде відстояти від рамної на відстані сумарної величини всіх зазорів.

Для визначення напрямку подальших досліджень потрібно виробити єдині критерії оцінки якості роботи електропривода стрілочного переводу. Як основні, в розділі 1 пропонувалося ввести наступні критерії: час переведення гостряків (ts), величина імпульсу удару гостряків об рамну рейку в кінці переведення (M_i), величина пружної сили в робочій тязі в процесі переведення (F_{12}), величина електричних втрат електродвигуна (P_i) і величина сумарних втрат у системі (ΣP)

$$ts = \int_0^{t_3} v_3(t) dt \quad (2.16)$$

Значення критерію F_{12} визначається за формулою

$$F_{12} = F_d - m \frac{dV_1}{dt} \quad (2.17)$$

де F_d – сила тяги двигуна на шибєрі, m – маса двох гостряків і зв'язної тяги; V_1 – швидкість руху шибєра.

Внаслідок стрибкоподібного зростання напруги живлення, під час удару в місці кріплення зв'язної тяги при виборці всіх зазорів, величина пружної сили (критерій F_{12}), різко зростає. Дуже повільне наростання напруги живлення затягує повний час переведення ts . А тому, потрібно знайти діапазон таких значень часу розгону t_1 , щоб вони забезпечували мінімум F_{12} при прийнятних значеннях ts .

Через велику швидкість гостряків у кінці переведення в результаті удару об рамну рейку відбувається витіснення його назовні. Під час тривалого гальмування відбувається зростання часу переведення, а якщо час гальмування короткий, то не вдається знизити кінетичну енергію до значень, які не призводять до «відбою гостряків». А тому, потрібно знайти такий діапазон значень моменту початку гальмування t_2 , котрий при незначному збільшенні часу переведення гостряків забезпечить зменшення величини удару в кінематичній лінії стрілочного переводу. Щоб оцінити силу удару при зіткненні рухомої маси системи двох гостряків, з'єднаних між собою тягою, об рамну рейку, що перебуває в спокої, вводиться величина, яка чисельно дорівнює імпульсу удару гостряків:

$$M_i = (m_1 + m_2 + m_{12}) \cdot v_2 \quad (2.18)$$

де m_1 – маса першої рейки; m_2 – маса другої рейки; m_{12} – маса робочої тяги; v_2 – лінійна швидкість другої рейки.

Світові тенденції розвитку техніки передбачають широке впровадження енергозберігаючих технологій. Тому цей аспект є четвертим критерієм оптимізації і чисельно дорівнює сумарному значенню електричних втрат P_i в обмотках електродвигуна за час роботи ts :

$$P_i = \int_0^{ts} (I_S^2 \cdot R_S + I_R^2 \cdot R_R) dt \quad (2.19)$$

де I_S – струм статора; R_S – активний опір обмотки статора; I_R – струм ротора (якоря); R_R – активний опір обмотки ротора (якоря).

Величина сумарних втрат у системі ($\Sigma P = P_i + \Delta P_{nom}$), враховує втрати у двигуні і механічні втрати в редукторі.

Отже, дослідження з оцінки впливу часу розгону t_1 , моменту початку гальмування t_2 й рівня сигналу задавання U передбачають знаходження діапазону допустимих значень цих параметрів на основі визначених вище критеріїв якості, а саме: повного часу переведення (ts), пружної сили в робочій тязі (F_{12}), імпульсу удару при зіткненні гостряків та рамної рейки (M_i) і сумарних електричних втрат у двигуні (P_i). Графічний зміст критеріїв F_{12} , M_i і ts за умови прямого пуску двигуна (для наявних систем) показаний на рис. 2.24.

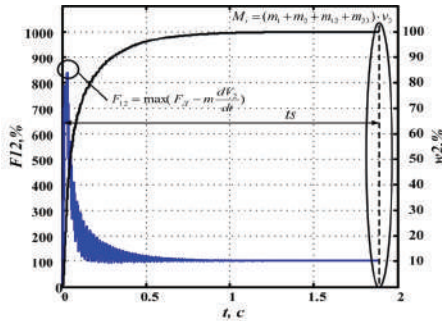


Рисунок 2.24 – Графічна ілюстрація критеріїв оптимізації

2.2. Система керування і принципи її побудови

У сучасній теорії автоматичного регулювання розроблено безліч різних систем керування електроприводами [18, 19], кожна з яких дозволяє досягти певних переваг. Тому доцільно провести аналіз системи керування, що експлуатується нині, і на її основі розробити нові системи з електродвигуном постійного струму. Усі системи керування електроприводами стрілочних переводів, що нині експлуатуються, є розімкнутими. Контроль переведення здійснюється спеціальними тягами, а електродвигун по закінченні переведення відключається автоперемикачем, по суті таким, що виконує функцію рубильника. Лише незначна частина приводів оснащена індукційними датчиками положення, і, як правило, це приводи гірок. Приклад наявної СК ЕП показаний на рис. 2.25.

Сучасний швидкісний залізничний рух диктує нові задачі перед СК ЕП стрілочного переводу:

- збільшення швидкості переведення стрілки в 3-7 разів (до 1 с);
- плавні розгін і гальмування електродвигуна зі зниженням швидкості перед зупинкою в кінці переведення стрілки, робота за заданою тахограмою;
- регулювання швидкості при переведенні гостряків для досягнення заданого часу переведення;
- діагностика в процесі переведення стрілки з можливістю візуалізації координат струму, швидкості й положення.

Для розв'язання задач синтезу замкнених систем електроприводів, що мають високу швидкодію і бажаний характер перехідних процесів, найбільш часто використовується метод синтезу послідовної корекції з підпорядкованим регулюванням координат або, скорочено, метод підпорядкованого регулювання [18, 19]. В основі цього методу лежить розробка багатоконтурних систем, коли в результаті синтезу кожен із контурів описується передатною функцією й забезпечує оптимальне керування своєю вихідною регульованою координатою за заданим критерієм.

Для побудови такої структурної схеми СПР електропривода стрілочного перевалу виділяють послідовність динамічних ланок, кожна з яких має на своєму виході відповідну регульовану координату – струм (I), швидкість (ω) і переміщення (S). Після цього синтезують контури регулювання, починаючи з контуру струму – першої внутрішньої (підпорядкованої) координати. Синтез зазвичай виконується з використанням активних послідовних коригувальних ланок (регуляторів). У результаті утворюється багатоконтурна (дво- або триконтурна) система підпорядкованого регулювання, побудована за ієрархічним принципом, як показано на рис. 2.27.

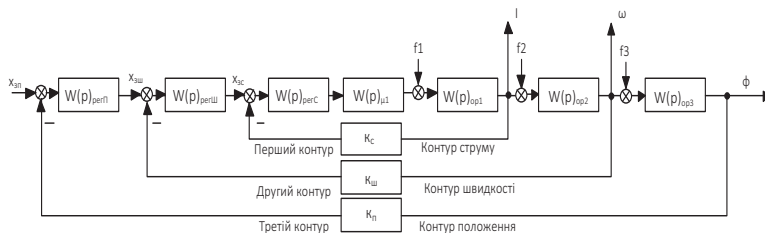


Рисунок 2.27 – Триконтурна СПР: i , ω , φ – регульовані координати, f_1, f_2, f_3 – збурюючі впливи

Також на користь вибору СПР вказує той факт, що в переважній більшості цифрових тиристорних перетворювачів, що випускаються промислово [DCM, Siemens, DCS, ABB], як стандарт, реалізована двоконтурна СПР швидкості обертання вала якоря і є вільний додатковий регулятор (так званий технологічний), який користувач застосовує і налаштовує відповідно до свого технологічного об'єкта [20].

Відповідно здійснимо синтез СПР стрілочного перевалу з двигуном постійного струму. Розрахункова структурна схема контуру струму наведена на рис. 2.28.

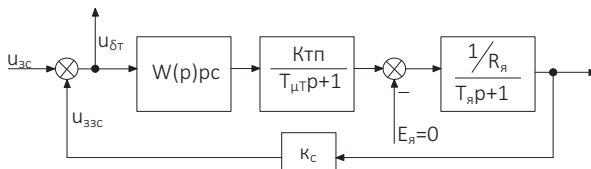


Рисунок 2.28 – Розрахункова структурна схема контуру струму

За умовами високої швидкодії й малого перерегулювання контур струму зазвичай налаштовується на модульний оптимум. У контурі струму об'єктом регулювання є якірний ланцюг двигуна, що являє собою аперіодичну ланку з великою постійною часу $T_{я}$, тобто

$$W(p)_{я} = \frac{1/R_{я}}{T_{я}p+1} \quad (2.20)$$

Тиристорний перетворювач, що живить якірний ланцюг двигуна, розглядається як аперіодична ланка з малою некомпенсованою постійною часу, що описується передатною функцією,

$$W(p)_{тп} = \frac{K_{тп}}{T_{\mu c}p+1} \quad (2.21)$$

де $K_{тп}$ – коефіцієнт посилення за напругою тиристорного перетворювача; $T_{\mu c} = T_{тп}$ – постійна часу тиристорного перетворювача, що визначається схемою випрямлення.

Розімкнутий контур струму, налаштований на МО, повинен мати передатну функцію

$$W(p)_{ксмo}^p = \frac{1}{a_{мс} \cdot T_{\mu c}p(T_{\mu c}p+1)} \quad (2.22)$$

де $a_{мс} = 1..4$ – коефіцієнт налаштування контуру струму на МО, $a_{мс} = 2$ – стандартний коефіцієнт.

Передатна функція контуру струму знаходиться, якщо прирівняти передатну функцію розімкнутого контуру струму і бажану передатну функцію, тобто $W(p)_{кc}^p = W(p)_{ксмo}^p$, або, в розгорнутій формі

$$W(p)_{pc} = \frac{K_{тп}}{T_{\mu c}p+1} \cdot \frac{1/R_{я}}{T_{я}p+1} \cdot K_c = \frac{1}{a_{мс} \cdot T_{\mu c}p(T_{\mu c}p+1)} \quad (2.23)$$

Тоді

$$W(p)_{pc} = \frac{T_{я}p+1}{a_{мс} \cdot \frac{K_{тп} \cdot K_c}{R_{я}} \cdot T_{\mu c}p} = \frac{T_{я}p+1}{T_{ic}p} = K_{pc} + \frac{1}{T_{ic}p} \quad (2.24)$$

де $T_{ic} = a_{мс} \cdot \frac{K_{тп} \cdot K_c}{R_{я}} \cdot T_{\mu c}$ – постійна часу інтегрування регулятора струму;

$K_{pc} = \frac{T_{я}}{T_{ic}}$ – коефіцієнт посилення регулятора струму.

Таким чином, регулятор струму являє собою пропорційно-інтегральну ланку (ПІ-регулятор).

Оскільки для стрілочних переводів вимоги до точності не дуже високі (допустима помилка до 4мм), а до динамічних характеристик, навпаки, висувають підвищені вимоги, то доцільно контур швидкості налаштувати на МО, бо в цьому випадку електропривод буде мати хороші динамічні показники якості.

У контурі швидкості об'єктом регулювання є механічна частина електропривода, що являє собою інтегровальну ланку з передатною функцією

$$W(p)_{я} = \frac{1/R_{я}}{T_{я}p+1} \quad (2.25)$$

Ланкою з малою некомпенсованою постійною часу є контур струму, що має передатну функцію другого порядку

$$W(p)_{\text{ксмо}}^p = \frac{1/K_c}{a_{\text{мс}} \cdot T_{\text{мс}} p (T_{\text{мс}} p + 1)} \quad (2.26)$$

Розрахункова структурна схема контуру швидкості наведена на рис.2.29.

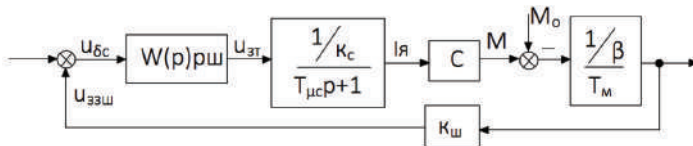


Рисунок 2.29 – Розрахункова структурна схема контуру швидкості

Для спрощення задачі синтезу контуру швидкості слід знизити порядок передатної функції контуру струму і прийняти, що контур струму має передатну функцію

$$W(p)_{\text{ксе}} = \frac{1/K_c}{a_{\text{мс}} \cdot T_{\text{мс}} p + 1} = \frac{1/K_c}{T_{\text{мш}} p + 1} \quad (2.27)$$

тобто $T_{\text{мш}} p = a_{\text{мс}} \cdot T_{\text{мс}}$ – некомпенсована постійна часу контуру швидкості. При цьому повна передатна функція контуру струму й керування еквівалентні за часом перехідного процесу $t_{\text{пп}}$.

Розімкнутий контур швидкості, налаштований на МО, повинен мати передатну функцію

$$W(p)_{\text{кшмо}}^p = \frac{1}{a_{\text{мс}} \cdot T_{\text{мш}} p (T_{\text{мш}} p + 1)} \quad (2.28)$$

де $a_{\text{мс}} - 1 \dots 6$ – коефіцієнт налаштування контуру швидкості на МО.

Передатна функція регулятора швидкості при налаштуванні контуру швидкості на МО знаходиться, якщо прирівняти передатну функцію розімкнутого контуру швидкості й бажану передатну функцію, тобто $W(p)_{\text{кш}}^p = W(p)_{\text{кшмо}}^p$,

$$W(p)_{\text{рш}} = \frac{1/K_c}{T_{\text{мш}} p + 1} \cdot C \cdot \frac{1}{\beta \cdot T_{\text{м}} p} \cdot K_{\text{ш}} = \frac{1}{a_{\text{мс}} \cdot T_{\text{мш}} p (T_{\text{мш}} p + 1)} \quad (2.29)$$

А тому, регулятор швидкості має передатну функцію

$$W(p)_{\text{ршмо}} = \frac{1/K_c}{T_{\text{мш}} p + 1} \cdot C \cdot \frac{1}{\beta \cdot T_{\text{м}} p} \cdot K_{\text{шс}} = \frac{K_c \cdot \beta \cdot T_{\text{м}}}{a_{\text{мс}} \cdot C \cdot K_{\text{ш}} \cdot T_{\text{мш}}} = K_{\text{рш}} \quad (2.30)$$

Таким чином, для налаштування контуру швидкості на МО слід застосовувати П-регулятор із коефіцієнтом посилення $K_{\text{рш}}$.

У режимі позиціонування система регулювання переміщує робочий механізм у положення, що задаються, і встановлює його в цих положеннях із потрібною точністю (точність позиціонування). Крім точності позиціонування, одним із основних показників якості системи позиціонування є характер перехідного процесу в околі заданої координати і час переміщення в задане положення. Вимагається, щоб перехідний процес в околі заданої координати був аперіодичним, тобто без перерегулювання, а

час переміщення робочого механізму з вихідного положення в задане був би мінімізований за рахунок оптимальної форми траєкторії руху.

Характер перехідного процесу при завершенні позиціонування визначається налаштуванням контуру регулювання положення. Формування траєкторії руху між вихідною та кінцевою точками позиціонування здійснюється за рахунок вибору форми регульованих характеристик регулятора швидкості [10, 18] й регулятора положення, а також обмеження значень координат струму та швидкості. Залежно від технологічного процесу система позиціонування може здійснювати малі, середні або великі переміщення; для стрілочного переводу як об'єкта регулювання такими є великі переміщення.

У режимі великих переміщень система працює з обмеженням струму якоря й обмеженням швидкості на допустимому рівні $\omega_{\max} \leq \omega_n$. Обмеження струму якоря й швидкості електродвигуна зазвичай реалізується за рахунок обмеження сигналів $u_{зс}$ і $u_{зш}$ на виході регуляторів струму й швидкості. Розрахункова структурна схема системи позиціонування наведена на рис. 2.30.

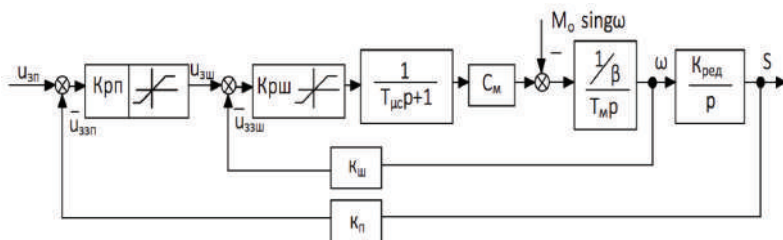


Рисунок 2.30 – Розрахункова структурна схема позиційного електропривода

Під час відпрацювання великих переміщень електропривод із максимальним прискоренням ε_p розганяється до максимальної швидкості ω_{\max} і з цією максимальною швидкістю рухається до заданої координати. При цьому прискорення $\varepsilon_p = 0$. У момент, коли сигнал керування на вході РШ проходить через нуль, тобто $u_{рш} = u_{зш} K_{ш} \omega_{\max} = 0$, електропривод переходить у режим гальмування, струм якоря і прискорення ε_t стають негативними й максимальними. Закінчення позиціонування протікає в лінійній зоні й має загальний аперіодичний характер.

Так як при налаштуванні контуру положення на МО система є статичною відносно збурювання за моментом, то точність позиціонування залежить від величини коефіцієнта посилення регулятора положення і від моменту опору. Щоб система точно переміщувала робочий механізм у задане положення, величина коефіцієнта посилення $K_{рп}$ повинна визначатися співвідношенням

$$K_{рп} = \frac{k_o}{k_{п}} \sqrt{\frac{4\varepsilon_0(1+M_o/M_{\max\text{доп}})}{S_{зп}(1-M_o/M_{\max\text{доп}})}} \quad (2.31)$$

де ε_0 – прискорення гальмування при $M_o = 0$.

Функціональна схема пропонованого комплексу керування ЕП СП на базі СПР наведена на рис. 2.31. Тут до розробленої СПР доданий командний елемент – пульт чергового по станції. У ній використовуються наступні параметри регуляторів СПР: регулятор положення: $K_{gr} = 1,43$; $T_{gr} = 0,13$; регулятор швидкості: $K_{rs} = 15$; $T_{rs} = 5$; регулятор струму: $K_{rt} = 0,43$; $T_{rt} = 33,63$.

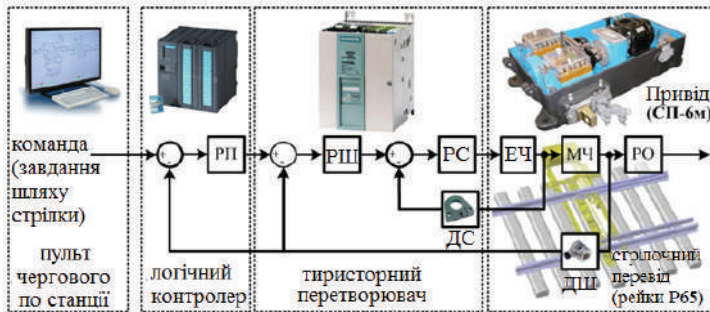


Рисунок 2.31 – Функціональна схема стрілочного переводу з СПР і ДПС

2.3. Математична та імітаційна моделі системи керування

Математична модель регульованого ЕП стрілочного переводу постійного струму має налаштування контуру положення на МО, контуру швидкості на МО, контуру струму на СО, враховує наявність пружного зв'язку у вигляді сполучної стрілочної тяги. Тиристорний перетворювач представлений аперіодичною ланкою. До складу СК включений задатчик інтенсивності аперіодичного сигналу задавання швидкості. Також вихід кожного контуру регулювання має обмеження за задаванням. Специфікою регулювання положення для об'єкта регулювання, що розглядається, є те, що повністю зупинити рухливу рейку не вимагається, оскільки для надійного спрацювання вузла запирання гостряка його необхідно з достатньою силою притиснути до рамної рейки. На переміщеннях з малою швидкістю для цього потрібні значні зусилля, що призведе до значного зростання струму якоря. Для недопущення такого режиму роботи СПР переведення стрілки закінчується не з нульовою швидкістю, а з дещо зменшеною. Величина швидкості під час замикання гостряків, при котрій не відбувається сильного удару об рамну рейку, лежить у межах 20...60%.

До плану експериментів на математичній моделі СПР положення гостряків регульованого стрілочного переводу доцільно включити такі режими роботи стрілочного переводу, які б були типовими або характерними для роботи реального обладнання. Це як погодні умови (наявність спресованого снігу), так і станційні вимоги щодо швидкості переведення (головні й бокові колії). У ході експериментів на моделі досліджено всю можливу глибину регулювання за швидкістю в широкому діапазоні зміни моменту опору механізму. Імітаційна модель СПР стрілочного переводу показана на рис. 2.32.

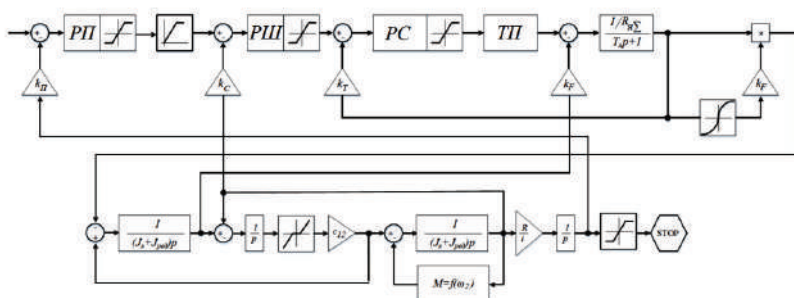


Рисунок 2.32 – Структурна схема імітаційної моделі СПР положення регульованого ЕП стрілочного переводу з ДПС

Оскільки існує певна кількість параметрів налаштування як СПР у цілому, так і положення гостряків, то проводити вивчення їх впливу доцільно, склавши план проведення експерименту:

1. Отримання осцилограм зміни координат струму статора, швидкості обертання вала двигуна в стаціонарному режимі:

1.1 . при «м'якому» задатчику інтенсивності (розгін до номінальної швидкості за 1,0 с) при задаванні швидкості 100% від номінальної; при задаванні швидкості 140% від номінальної;

1.2 при «жорсткому» задатчику інтенсивності (розгін до номінальної швидкості за 0,4 с): при задаванні швидкості 100% від номінальної; при задаванні швидкості 140% від номінальної.

2. Отримання осцилограм зміни координат струму статора, швидкості обертання вала двигуна й моменту опору в режимі потрапляння спресованого снігу:

2.1. при «м'якому» задатчику інтенсивності (розгін до номінальної швидкості за 1,0 с);

2.2. при «жорсткому» задатчику інтенсивності (розгін до номінальної швидкості за 0,4 с).

3. Отримання осцилограм зміни координат струму статора, швидкості обертання вала двигуна, моменту опору та пружного моменту в режимі потрапляння робочої точки механічної характеристики двигуна на падаючий відрізок характеристики навантаження при різних кутах її нахилу.

Реалізація пунктів 1 – 3 цього плану показана на рис 2.33 – 2.35.

З рис. 2.33 а, б видно, що час переведення гостряків при підвищенні задавання на 40% пропорційно зменшується з 2,5 с до 2 с (тобто на 20%). При цьому через застосування «м'якого» ЗІ з часом розгону 1,0 с пусковий струм невеликий і складає $1,27 I_n$, що є безсумнівною перевагою цього набору налаштувань СПР, оскільки механічна частина об'єкта регулювання не відчуває перевантажень, а тому, технічне обслуговування можна проводити рідше.

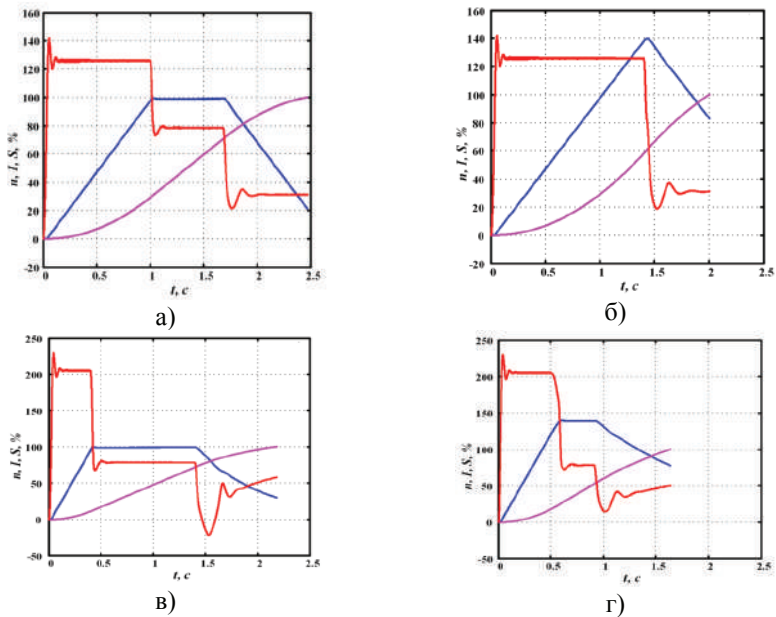


Рисунок 2.33 – Координати ЕП СП в штатному режимі при «м'якому» ЗІ і заданні швидкості: а – 100%, б – 140% від номінальної; при «жорсткому» ЗІ і заданні швидкості: в – 100%, г – 140% від номінальної

Рис. 2.33 в, г показує, що у разі необхідності зменшення часу переведення можна встановити час ЗІ до «жорсткого» рівня в 0,4 с, що дозволяє домогтися скорочення часу переведення до 1,7 с. Однак у цьому випадку пусковий струм зростає до високих значень у $2,05 I_n$, що не кращим чином позначається на механічній частині, але в цьому випадку це неминучий недолік.

А значить, шляхом таких налаштувань СПР положення гостряків СП, як час ЗІ й обмеження задавання швидкості можна домогтися скороченням часу переведення на 32% (з 2,5 с до 1,7 с), обмеживши струм статора при цьому на рівні $2,1 I_n$, що є допустимим рівнем перевантаження для СП електродвигунів, що використовуються на залізниці сьогодні.

Рис. 2.34 показує, як зміняться координати електропривода СП при потраплянні спресованого снігу між гостряком і рамною рейкою, що характерне для роботи СП в зимовий період. Причому таке потрапляння найбільш вірогідне в кінці переведення, коли рухливий гостряк згрібає все накопичене перед ним до рамної рейки. Отже, як видно з рис 2.34 а, б, збільшення моменту опору в 2 рази (моделювання грудки спресованого снігу) незадовго до гальмування не приводить до істотних змін у часі переведення, бо просадка швидкості складає не більше 5%, а збільшення часу

переведення – не більше 1%. Струм статора при цьому, як у випадку «м'якого», так і «жорсткого» ЗІ, досягає пікової величини в $2,1 I_n$, однак це й дозволяє звести до мінімуму просадку швидкості. Тому можна зробити висновок про гарантований час переведення стрілок у зимовий період року, і взагалі, в умовах роботи механіки під відкритим небом. Така характеристика СПР є важливою в умовах швидкісного руху.

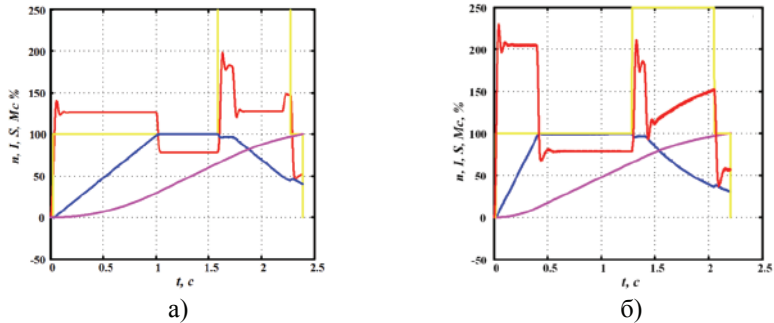


Рисунок 2.34 – Координати ЕП СП в режимі заклинювання:
а – при «жорсткому» ЗІ, заданні швидкості 100% від номінальної;
б – при «м'якому» ЗІ, заданні швидкості 100% від номінальної

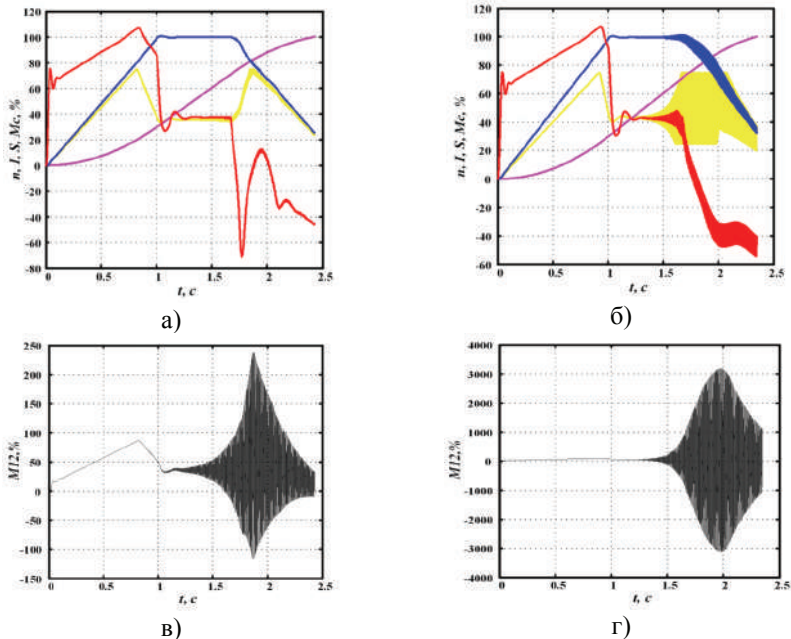


Рисунок 2.35 – Координати ЕП СП в нестационарному режимі (автоколивання) при різних кутах нахилу падаючого відрізка характеристики навантаження

Аналіз роботи СП в нестационарних режимах, рис.2.35 а, б, говорить про наявність проблеми виникнення фрикційних коливальних режимів під час роботи СП. Розвиток автоколивального процесу з м'яким самозбудженням може призводити до коефіцієнта динамічності пружного моменту до 24 (рис. 2.35, б, г), що призводить до швидкого виходу з ладу механічних вузлів СП. При цьому засобами СПР компенсувати такий негативний режим роботи неможливо, потрібні спеціальні структури й методи побудови СК [20, 21].

2.4. Синтез системи модального керування положення гостряків

До числа основних вимог, які висуваються до електропривода стрілочного перевodu, відносяться високі показники надійності роботи, а також точності та швидкодії при керуванні рухом гостряками. Однак для забезпечення потрібної якості керування в системах із пружними зв'язками використання принципів підпорядкованого регулювання координат не завжди ефективне. У зв'язку з цим досить правомірно ставити питання про дослідження системи керування електроприводом стрілочного перевodu з модальним регулятором (МР). Як показано у роботах [19, 22, 23], в ЕМС стрілочного перевodu при роботі в нестационарних режимах можуть виникати автоколивальні процеси, що призводять до передчасного зносу механічного обладнання. Досить ефективним методом їх зменшення є модальне керування, оскільки воно дозволяє визначити бажаний характеристичний поліном системи.

Задача модального керування ставиться наступним чином [19]. Для вихідної лінійної стаціонарної системи

$$\dot{x} = Ax + Bu, \text{ де } x \in R^n, u \in R^r \quad (2.32)$$

бажане розміщення полюсів на комплексній площині може бути забезпечене введенням лінійного зворотного зв'язку за станом. Відповідний закон керування математично позначимо наступним чином: $u = g - Kx$. Тут g – вектор задавальних впливів, а K – $(n \times n)$ матриця зворотного зв'язку. Якщо u і g – скаляри, то K – матриця-рядок, елементи якої являють собою коефіцієнти зворотних зв'язків по всіх складових вектора x . Вихідна система і зворотний зв'язок утворюють замкнуту систему, рівняння якої

$$\dot{x} = (A - \tilde{B}k)x + Bg, \quad \tilde{B} = \beta B. \quad (2.33)$$

Задача полягає у знаходженні такої матриці коефіцієнтів зворотних зв'язків, щоб система (2.33) мала бажане розміщення полюсів на комплексній площині, тобто бажаний характеристичний поліном $D_{*}(p)$:

$$D_0(p) = \det(pE - \tilde{A}) = D_{*}(p) \quad (2.34)$$

Методика синтезу модального регулятора для системи з одним входом полягає в наступному [22]:

1. Складається математичний опис вихідної системи у формі (2.32) і визначаються матриці A, B .
2. Перевіряється керованість пари (A, B) .

3. Записується вираз для матриці $K = [k_1 \dots k_n]$, матриці $\tilde{A} = A - BK$ і характеристичного полінома замкнутої системи $D_0(p)$.

4. Обирається тип бажаного характеристичного полінома $D_{ж}(p)$ беручи до уваги вимоги до виду перехідної характеристики системи.

5. Для полінома зворотного типу й ступеня, що дорівнює порядку системи, визначаються коефіцієнти f_1, \dots, f_{n-1} з довідника.

6. Визначається середньгеометричний корінь ω_0 , беручи до уваги вимоги до швидкодії системи.

7. Обчислюються коефіцієнти бажаного полінома $d_i = f_i \omega_0^i (i = 1, \dots, n, f_n = 1)$.

8. Прирівнюються коефіцієнти при однакових степенях p бажаного й фактичного характеристичного полінома, складається система з n лінійних алгебраїчних рівнянь. Розв'язуючи її, знаходяться шукані елементи k_1, \dots, k_n матриці K .

Структурна схема керування електроприводом із модальним регулятором показана на рис. 2.36: Ω_3 – задане значення швидкості; U_y, U – керувальна й вихідна напруги силового перетворювача; I_a – струм якорного ланцюга електродвигуна; Ω_1, Ω_2 і $\Delta\varphi$ – кутові швидкості й різниця кутових переміщень валів електродвигуна й робочого органа; M_o – момент опору, $K_{сп}$ і $T_{сп}$ – коефіцієнти передачі і постійна часу силового перетворювача напруги, R_a і T_a – активний опір і постійна часу якорного ланцюга, C – конструктивна постійна двигуна, J_1 і J_2 – моменти інерції ротора двигуна й робочого органа відповідно, C_{12} і b – зведений коефіцієнт жорсткості й коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя кінематичної передачі, $k_1 \dots k_4$ – коефіцієнти регулятора.

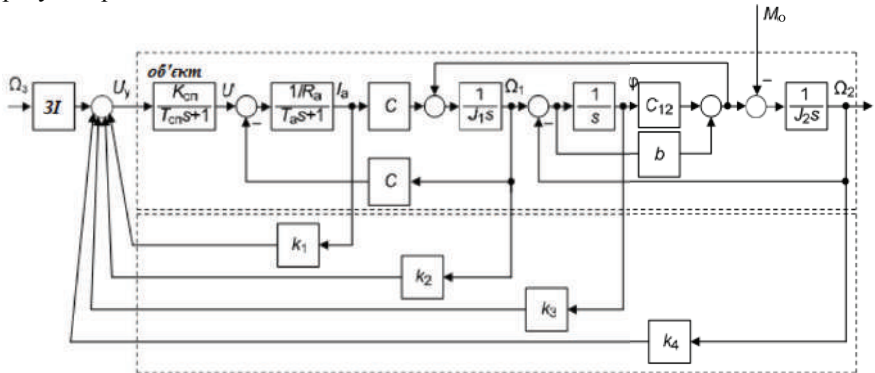


Рисунок 2.36 – Структурна схема двомасової ЕМС з модальним регулятором

За методикою синтезу модального регулятора для системи з одним входом здійснимо математичний опис вихідної системи у формі (2.32).

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= -\frac{b}{J_1}x_1 - \frac{1}{J_1}x_2 + \frac{b}{J_1}x_3 + \frac{K_{kt}C_m}{J_1}u \\
 \dot{x}_2 &= cx_1 - cx_3 \\
 \dot{x}_3 &= \frac{b}{J_2}x_1 + \frac{1}{J_2}x_2 - \frac{b}{J_2}x_3 \\
 \dot{x}_4 &= K_{red}x_3
 \end{aligned} \tag{2.35}$$

Перейдемо до матричної форми й визначимо матриці A і B :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J_1} & -\frac{1}{J_1} & \frac{b}{J_1} & 0 \\ c & 0 & -c & 0 \\ \frac{b}{J_2} & \frac{1}{J_2} & -\frac{b}{J_2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{red} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_{kt} \cdot C_m}{J_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [u] \tag{2.36}$$

де

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J_1} & -\frac{1}{J_1} & \frac{b}{J_1} & 0 \\ c & 0 & -c & 0 \\ \frac{b}{J_2} & \frac{1}{J_2} & -\frac{b}{J_2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{red} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{K_{kt} \cdot C_m}{J_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.37}$$

Оскільки об'єкт четвертого порядку і має один вхід, то матриця зворотного зв'язку K є рядком з елементами K_1, K_2, K_3, K_4 ,

Тоді:

$$\tilde{A} = A - BK = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J_1} & -\frac{1}{J_1} & \frac{b}{J_1} & 0 \\ c & 0 & -c & 0 \\ \frac{b}{J_2} & \frac{1}{J_2} & -\frac{b}{J_2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{red} & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{K_{kt} \cdot C_m}{J_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [K_1 \quad K_2 \quad K_3 \quad K_4] =$$

$$= \begin{bmatrix} -\frac{b}{J_1} - \frac{K_{kt} \cdot C_m \cdot K_1}{J_1} & -\frac{1}{J_1} - \frac{K_{kt} \cdot C_m \cdot K_2}{J_1} & \frac{b}{J_1} - \frac{K_{kt} \cdot C_m \cdot K_3}{J_1} & -\frac{K_{kt} \cdot C_m \cdot K_4}{J_1} \\ \frac{c}{J_2} & \frac{0}{J_2} & -\frac{c}{J_2} & 0 \\ \frac{b}{J_2} & \frac{1}{J_2} & -\frac{b}{J_2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{red} & 0 \end{bmatrix}$$

Далі повинно виконуватися рівняння:

$$\det(pI - \tilde{A}) = \begin{bmatrix} p + \frac{b}{J_1} + \frac{K_{kt} \cdot C_m \cdot K_1}{J_1} & \frac{1}{J_1} + \frac{K_{kt} \cdot C_m \cdot K_2}{J_1} & \frac{b}{J_1} + \frac{K_{kt} \cdot C_m \cdot K_3}{J_1} & + \frac{K_{kt} \cdot C_m \cdot K_4}{J_1} \\ -c & p & c & 0 \\ -\frac{b}{J_2} & -\frac{1}{J_2} & p + \frac{b}{J_2} & 0 \\ 0 & 0 & -K_{red} & p \end{bmatrix}$$

$$D(p) = \det(pI - \tilde{A}) = p^4 + d_1p^3 + d_2p^2 + d_3p + d_4,$$

де

$$\begin{aligned}
 d_1 &= \frac{b}{J_2} + \frac{b}{J_1} + \frac{K_{kt} \cdot C_m \cdot K_1}{J_1} \\
 d_2 &= \frac{c}{J_2} + \frac{bK_{kt} \cdot C_m \cdot K_1}{J_1 J_2} + \frac{c}{J_1} + \frac{cK_{kt} \cdot C_m \cdot K_2}{J_2} + \frac{bK_{kt} \cdot K_3}{J_1 J_2} \\
 d_3 &= \frac{K_{kt} \cdot C_m \cdot cK_1}{J_1 J_2} + \frac{K_{kt} \cdot C_m \cdot cK_3}{J_1 J_2} + \frac{K_{red} \cdot K_{kt} \cdot C_m \cdot bK_4}{J_1 J_2} \\
 d_4 &= \frac{K_{red} \cdot cK_{kt} \cdot C_m \cdot bK_4}{J_1 J_2}
 \end{aligned}$$

За бажаний характеристичний поліном $D_{ж}(p)$ приймаємо стандартний поліном четвертого порядку:

$$D_{ж}(p) = p^4 + f_1 \omega_0 p^3 + f_2 \omega_0^2 p^2 + f_3 \omega_0^3 p + \omega_0^4 \quad (2.38)$$

Визначаємо коефіцієнти для полінома Баттерворта:

$$f_1 = 2,613$$

$$f_2 = 3,414$$

$$f_3 = 2,613$$

для біноміального полінома:

$$f_1 = 4$$

$$f_2 = 6$$

$$f_3 = 4$$

Знаходимо середньгеометричний корінь ω_0 , для цього прирівнюємо $D(p) = D_{ж}(p)$, отримаємо:

$$d_1 = f_1 \omega_0$$

$$d_2 = f_2 \omega_0^2$$

$$d_3 = f_3 \omega_0^3$$

$$d_4 = \omega_0^4$$

Прирівнюючи коефіцієнти, проводимо необхідні перетворення, отримуємо алгебраїчне рівняння для коефіцієнта зворотного зв'язку K_3 .

$$K_3 = \frac{f_3 \omega_0^3 c - c^2 \frac{1}{J_2} f_1 \omega_0 + c^2 \left(\frac{1}{J_2}\right)^2 b + c^2 \frac{1}{J_2} b \frac{1}{J_1} - b \omega_0^4}{c^2 \frac{1}{J_2} K_{kt} C_m \frac{1}{J_1}} \quad (2.39)$$

Прирівнюємо K_3 до 0 і знаходимо ω_0 .

Однак застосування законів модального керування для синтезу регуляторів багатомасових систем є достатньо громіздким і вимагає в кожному випадку спеціального аналізу. У такому випадку в складних пружно-масових системах, якою є ЕМС СП, для спрощення розрахунків регулятора пропонується застосувати синтезований регулятор для одномасової системи, функціональна схема котрого показана на рис. 2.37. При цьому цей регулятор повинен забезпечити потрібні характеристики перехідних процесів. За методикою синтезу модального регулятора здійснимо математичний опис для одномасової системи.

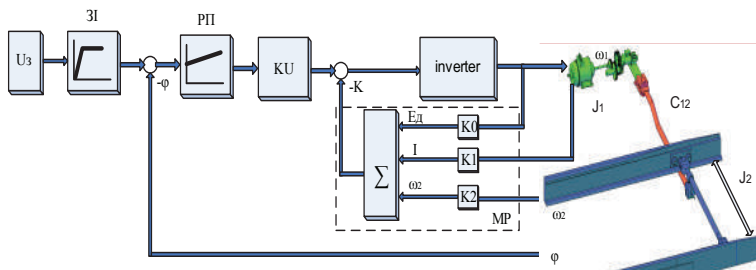


Рисунок 2.37 – Функціональна схема системи модального керування двомасовою системою СП

На функціональних схемах введені наступні позначки: U_3 - напруга завдання положення; ЗІ – датчик інтенсивності; РІ, РШ, РС – регулятори положення, швидкості та струму відповідно; inverter – тиристорний перетворювач, ω_1 , ω_2 – швидкості першої і другої маси, φ – фактичне положення другої маси (значення за датчиком), J_1 – момент інерції першої маси (двигун і редуктор); J_2 – момент інерції другої маси (два гостряки), C_{12} – пружність робочої тяги; МР – модальний регулятор із коефіцієнтами $K_0 \dots K_2$; КУ – коефіцієнт підсилення за керуванням.

Модальний регулятор встановлюється у зворотному зв'язку і є безінерційним. На його вході здійснюється алгебраїчне підсумовування всіх зворотних зв'язків по вектору стану. Задача синтезу модального регулятора полягає у знаходженні такої матриці коефіцієнтів зворотних зв'язків, щоб замкнута система керування мала такий вигляд:

$$\dot{X} = (A - BK)X + BV \quad (2.40)$$

і мала бажане розміщення полюсів на комплексній площині, тобто бажаний характеристичний поліном

$$F_0(p) = \det(pI - A + KB) = G_{ж}(p) \quad (2.41)$$

де V – матриця завдання; K – матриця, яка складається з коефіцієнтів зворотного зв'язку; X – вектор стану; pI – одинична матриця, $G_{ж}(p)$ – бажаний характеристичний поліном.

Найбільш поширеними із стандартних форм характеристичного полінома є: розподіл Бесселя, розподіл Баттерворта, біноміальний розподіл, мінімум інтегральної квадратичної помилки та ін. Під час дослідження динаміки стрілочного переводу, при різних варіантах навантаження, найкращі результати, стосовно стійкості і коливальності перехідного процесу, показав розподіл Баттерворта, тому за бажаний характеристичний поліном $G_{ж}(p)$ приймаємо фільтр Баттерворта третього порядку:

$$G_{ж}(p) = p^3 + 2\omega_0 p^2 + 2\omega_0^2 p + \omega_0^3 \quad (2.42)$$

Після визначення матриць A , B й порівняння коефіцієнтів при відповідних ступенях p отримаємо наступне рівняння й формули коефіцієнтів:

$$F_0(p) = \det(pI - A + KB) = p^3 + k_2 \cdot p^2 + k_1 \cdot p + k_0 \quad (2.43)$$

де k_0, k_1, k_2 – коефіцієнти зворотного зв'язку;

$$k_2 = \left(-\frac{1}{T_\mu} - \frac{1}{T_E} + 2\omega_0\right) \cdot \frac{T_\mu}{K_{\text{ТП}}} \text{ – за напругою ТП;}$$

$$k_1 = \left(-\frac{1}{T_M \cdot T_\mu} - \frac{K_{\text{ТП}} \cdot k_2}{T_E} - \frac{1}{T_E \cdot T_\mu} + 2\omega_0^2\right) \cdot \frac{R_E \cdot T_E \cdot T_\mu}{K_{\text{ТП}}} \text{ – за струмом;}$$

$$k_0 = \left(-\frac{1}{T_M \cdot T_\mu \cdot T_E} - \frac{K_{\text{ТП}} \cdot k_2}{T_M \cdot T_\mu \cdot T_E} + \omega_0^3\right) \cdot \frac{T_M \cdot T_\mu \cdot T_E \cdot C \cdot \Phi_H}{K_{\text{ТП}}} \text{ – за швидкістю;}$$

де T_E, T_M – відповідно електромагнітна й електромеханічна постійні часу привода; $K_{\text{ТП}}$ – коефіцієнт підсилення ТП; R_E – еквівалентний опір силового ланцюга привода; $C\Phi_H$ – коефіцієнт двигуна; T_μ – постійна часу ТП; ω_0 – власна частота коливань системи.

До переваг модального керування можна віднести: можливість отримати будь-яке демпфування і швидкодію «в малому» в лінійному електроприводі будь-якої складності; досягнення будь-якої складності механічної характеристики при заданому демпфуванні; робастність системи керування.

Недоліки модального керування: бажана динаміка досягається «в малому»; велике число координат, що вимірюються, тобто підвищена потреба в датчиках.

Не всі змінні стани об'єкта можуть бути доступні для вимірювання через складність або недостатню точність відповідних датчиків. Для таких систем керування застосовують спеціальні динамічні підсистеми, що називаються спостерігачами.

На імітаційній моделі досліджена система керування стрілочного переводу з модальним регулятором. Для аналізу цієї системи проведені дослідження тих режимів роботи електропривода стрілочного переводу, як і для системи СПР:

- 1) Робота в номінальному режимі при різних ЗІ.
- 2) Робота стрілочного переводу, коли на крайньому гостряку з'явилося утворення льоду або запресувався сніг між гостряком і рейкою.
- 3) Робота стрілочного переводу при потраплянні робочої характеристики електропривода на падаючий відрізок характеристики тертя.

З рис. 2.38 а, б видно, що час переведення стрілочних гостряків при підвищенні завдання на 40% пропорційно зменшується з 2,42 с до 1,92 с (тобто на 20%), що на 3,2% менше, ніж у системі СПР.

При цьому через застосування «м'якого» ЗІ з часом розгону 1,0 с. пусковий струм невеликий – 1,27 I_n і має таке ж значення, як у системі СПР. Із результатів моделювання також випливає, що синтезований модальний регулятор дозволяє досягти меншого перерегулювання по координатах швидкості і струму, ніж у системі СПР. Значення швидкості в момент гальмування при заданій швидкості 140% від номінальної більше на 20%, ніж у системі СПР, що призведе до підвищеного зносу механічної частини.

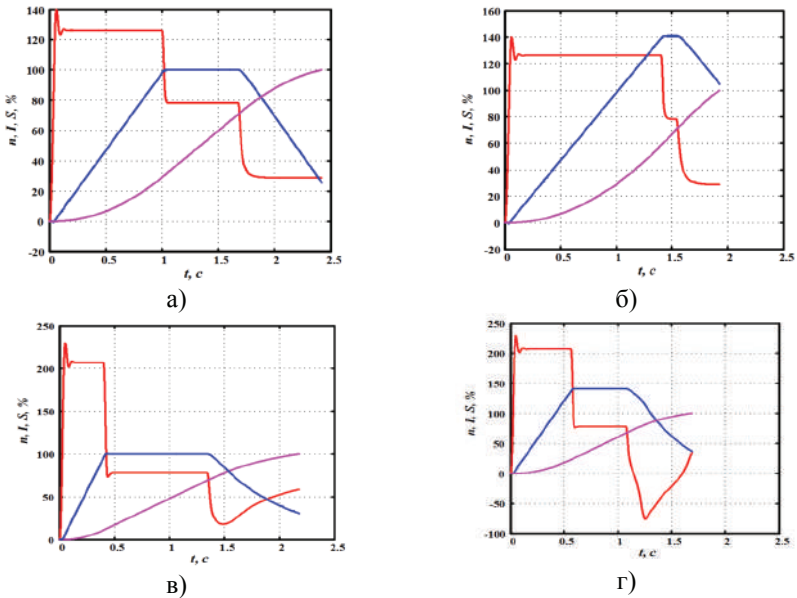


Рисунок 2.38 – Координати ЕП СП в штатному режимі, при «м'якому» ЗІ і заданні швидкості: а – 100%, б – 140% від номінальної; при «жорсткому» ЗІ і заданні швидкості: в – 100%, г – 140% від номінальної

Рис. 2.38 в, г показує роботу стрілочного переводу з «жорстким» ЗІ, що дозволяє домогтися скорочення часу переведення до 1,7 с. Час переведення і значення пускового струму мають такі ж значення, як і в системі СПР, однак значення швидкості в момент гальмування в системі з модальним регулятором при заданні швидкості 140% від номінальної на 49% менше, ніж у системі СПР. Це значить, що удар гостряка об рейку при гальмуванні буде менший, внаслідок чого знос механічної частини теж буде меншим. При спробі ж переналаштувати систему і збільшити час переведення гостряка вона стає нестійкою.

На рис. 2.39 видно, що досліджувана система з модальним регулятором поводить себе ідентично системі СПР, вибиває сніг чи лід, що потрапив між гостряком і рейкою, при цьому з'являється незначна просадка координати швидкості і кидок координати струму. Моделювання грудки снігу виконується аналогічно системі СПР. Просадка швидкості складає не більше 4%, а збільшення часу переведення – не більше 1%. При цьому кидок струму, як у випадку «м'якого», так і «жорсткого» ЗІ, при вибиванні снігу між рейкою і гостряком на 13% менший, ніж у системі СПР.

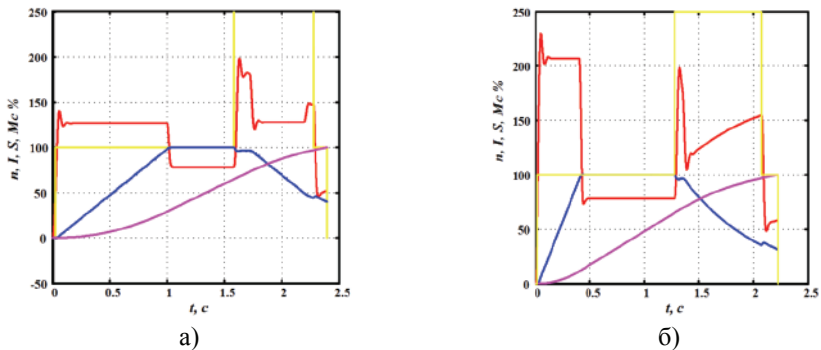


Рисунок 2.39 – Координати ЕП СП в режимі заклинювання: а – при «жорсткому» ЗІ, заданні швидкості 100% від номінальної; б – при «м'якому» ЗІ, заданні швидкості 100% від номінальної

З рис. 2.40 а – г виходить, що при потраплянні характеристики ЕП на падаючий відрізок характеристики тертя в системі з модальним регулятором, як і в системі СПР, виникають фрикційні автоколивання з коефіцієнтом динамічності до 28. При малих кутах нахилу характеристики тертя коефіцієнт динамічності менше в системі з МР, ніж у СПР, при збільшенні кута нахилу коефіцієнт динамічності більше в системі з МР.

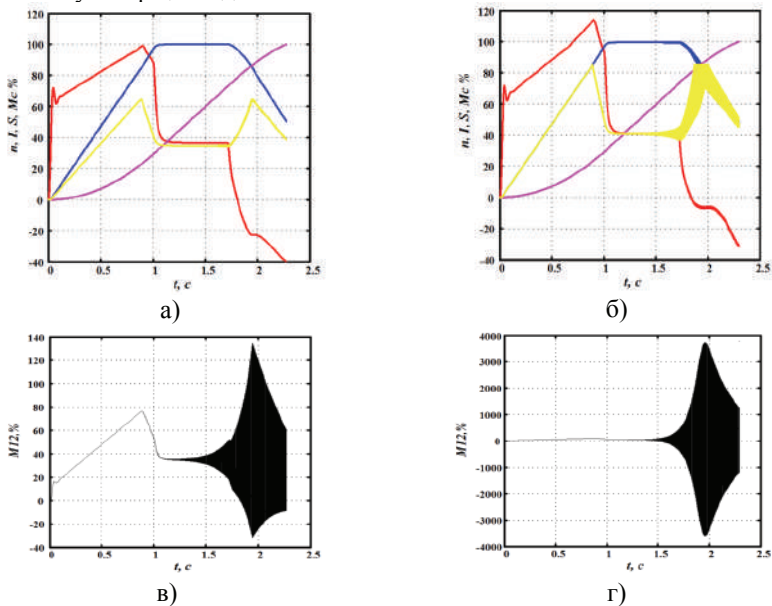


Рисунок 2.38 – Координати ЕП СП в нестационарному режимі (автоколивання) при різних кутах нахилу падаючого відрізка характеристики навантаження в системі з МР

2.5. Синтез системи модального керування зі спостерігачем стану положення гостряків

Що стосується складних об'єктів керування з високим порядком характеристичного полінома, в яких модальне керування видається найбільш ефективним, то потрібна велика кількість координат для синтезу такого регулятора.

У складі системи керування найдорожчими пристроями є датчики, особливо тензодатчики для вимірювань пружного моменту. Також не всі змінні можуть бути доступні для прямого вимірювання, наприклад: зусилля, що передаються через механічну передачу, магнітний потік двигуна. Тому для практичної реалізації модального регулятора важкодоступні для вимірювання змінні стану визначають непрямим способом. Із цією метою використовують так звані спостерігаючі пристрої, або спостерігачі стану.

Спостерігаючі пристрої виконують функцію ідентифікації всього об'єкта керування або його частини і являють собою математичну модель. На відміну від звичайної розрахункової моделі, спостерігач працює в реальному часі, має загальні з об'єктом спостереження фізичні вхідні змінні, доповнюється зворотним зв'язком за різницею між доступними для вимірювання вихідними змінними об'єкта керування і їх математичними оцінками.

Розробка спостерігача полягає в такому виборі структури і параметрів матриці L , щоб помилка $\Delta Y = Y(t) - \hat{Y}(t)$, а також помилка оцінювання (відновлення) координат об'єкта $\Delta X = X(t) - \hat{X}(t)$ за мінімальний час прагнула до нуля. Спостерігач називається асимптотичним тому, що при $t \rightarrow \infty$, $\Delta X \rightarrow 0$.

Рівняння стану n -мірного спостерігача мають вигляд:

$$\dot{\hat{X}}(t) = [A - LC]\hat{X}(t) + LY(t) + BU(t) \quad (2.44)$$

З рівняння (2.44) побудована функціональна схема СпС рис. 2.41 як замкнута система із двома входами, але $U(t)$ і $Y(t)$ одним виходом $X(t)$. Якщо є можливість бажаним чином задаватися власними значеннями матриці (слідом матриці) замкнутого СпС $[A - LC]$, то це приводило б до мінімізації помилки відновлення ΔX вектора стану об'єкта $X(t)$.

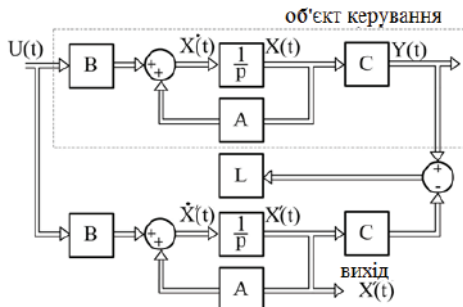


Рисунок 2.41 – Функціональна схема СпС

Необхідно відмітити, що при створенні спостерігача перш за все треба визначити, чи є вихідна система (об'єкт) повністю такою, що спостерігається. Для цього обчислюється матриця спостереженості:

$$Qn = \begin{bmatrix} C^T & A^T C^T & (A^T)^2 C^T & \dots & (A^T)^{n-1} C^T \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Також визначається її ранг: $\text{Rang} Qn = n$.

Рівняння стану n - мірного спостерігача має вигляд

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x}(t) + Ly(t) + Bu(t) \quad (2.46)$$

де: \hat{x} - вектор стану об'єкта, \hat{y} - вихід об'єкта, $F_{ip}(s) = \frac{K_{III}}{T_\mu \cdot s + 1}$

$$F_a(s) = \frac{1/R_a}{T_a \cdot s + 1}, \quad F_j(s) = \frac{1}{T_j \cdot s + 1}.$$

Складаємо опис об'єкта у формі змінних стану і запишемо матриці A , B і C . Система електропривода зі спостерігачем «тиристорний перетворювач – двигун» описується наступною системою диференціальних рівнянь, представлених у просторі стану,

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{C \cdot \Phi_n}{J} \cdot I \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{C \cdot \Phi_n}{L} \cdot \omega - \frac{R_E}{L} \cdot I + \frac{1}{L} \cdot E_d; & \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u; & y = C \cdot x \\ \frac{dE_d}{dt} = \frac{1}{T_\mu} \cdot E_d + \frac{K_{III}}{T_\mu} \cdot U_y \end{cases} \quad (2.47)$$

де:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{C \cdot \Phi_n}{J} & 0 \\ -\frac{C \cdot \Phi_n}{L} & -\frac{R_E}{L} & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_\mu} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{K_{III}}{T_\mu} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} \omega \\ I \\ E_d \end{bmatrix}^T, \quad L = \begin{bmatrix} l_0 \\ l_1 \\ l_2 \end{bmatrix}.$$

Подальший синтез спостерігача зводиться до визначення коефіцієнтів матриці. Показана вище система рівнянь має наступну передатну функцію в розімкненому стані

$$W(p) = \frac{K_{III} \cdot K_D}{(T_\mu p + 1) \cdot (T_M \cdot T_E p^2 + T_M p + 1)} \quad (2.48)$$

з огляду на яку легко записати загальне диференціальне рівняння, що має порядок n ,

$$T_M \cdot T_E \cdot T_\mu \frac{d^3 \omega}{dt^3} + T_M \cdot (T_E + T_\mu) \cdot \frac{d^2 \omega}{dt^2} + (T_M + T_\mu) \frac{d\omega}{dt} + \omega = K_{III} K_D U_y \quad (2.49)$$

Рівняння (2.49) може бути подане у вигляді:

$$\frac{d^3 \omega}{dt^3} + \frac{(T_E + T_\mu)}{T_E \cdot T_\mu} \cdot \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{(T_M + T_\mu)}{T_E \cdot T_M \cdot T_\mu} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{T_E \cdot T_M \cdot T_\mu} \cdot \omega = \frac{K_{III} K_D U_y}{T_E \cdot T_M \cdot T_\mu}.$$

З наведеної вище передатної функції знаходимо коефіцієнти a_0 , a_1 , a_2 для характеристичного рівняння.

$$H(p) = p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p^1 + a_0 \quad (2.50)$$

$$\text{де: } a_0 = \frac{1}{T_M \cdot T_E \cdot T_\mu}, \quad a_1 = \frac{T_M + T_\mu}{T_M \cdot T_E \cdot T_\mu}, \quad a_2 = \frac{T_E + T_\mu}{T_E \cdot T_\mu},$$

Подання матриці стану А в кіничній формі фазової змінної:

$$A^* = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 \end{vmatrix} \quad (2.51)$$

З рівняння (2.51) записується подання матриць А і С в поєднаній формі фазової змінної, тобто у вигляді

$$A_* = \begin{vmatrix} 0 & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & -a_1 \\ 1 & 1 & -a_2 \end{vmatrix}, C = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Для синтезу спостерігача повного порядку вибираємо бажаним поліном, в якості якого застосовуємо поліном Баттерворта

$$H_{жс}(p) = p^3 + 2\omega_{0H} \cdot p^2 + 2\omega_{0H}^2 \cdot p + \omega_{0H}^3 \quad (2.52)$$

де $\beta_0 = \omega_{0H}^3$, $\beta_1 = 2\omega_{0H}^2$; $\beta_0 = 2\omega_{0H}$, ω_{0H} - власна частота спостерігача.

Виберемо в якості компонентів вектора коефіцієнтів зворотного зв'язку в спостерігачі L розмірності $n \times 1$ числа $\beta_i - a_i$

$$L_* = \begin{vmatrix} l_{*0} \\ l_{*1} \\ l_{*2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \beta_0 - a_0 \\ \beta_1 - a_1 \\ \beta_2 - a_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \omega_{0H}^3 & \frac{1}{T_M \cdot T_E \cdot T_\mu} \\ 2\omega_{0H}^2 & \frac{T_M + T_\mu}{T_M \cdot T_E \cdot T_\mu} \\ 2\omega_{0H} & -\frac{T_E + T_\mu}{T_E \cdot T_\mu} \end{vmatrix} \quad (2.53)$$

Для отримання матриці зворотного зв'язку спостерігача L у вихідному базисі обчислимо спочатку матрицю P_H перетворення рівнянь стану об'єкта до рівнянь, записаних у сполученій каноничній формі фазової змінної.

$$P_H = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & 1 \\ a_2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{vmatrix} \quad (2.54)$$

де $C = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$;

$$CA = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 & \frac{C\Phi_n}{J} & 0 \\ -\frac{C\Phi_n}{L} & \frac{R_E}{L} & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_\mu} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & \frac{C\Phi_n}{J} & 0 \end{vmatrix};$$

$$CA^2 = CA \cdot A = \begin{vmatrix} -\frac{(C\Phi_n)^2}{JL} & \frac{(C\Phi_n) \cdot R_E}{JL} & \frac{C\Phi_n}{JL} \end{vmatrix}.$$

Зворотна матриця може бути визначена за формулою

$$P_H^{-1} = \frac{1}{\det P_H} \cdot (AdjP_H)^T \quad (2.55)$$

де придана матриця

$$(AdjP_H)^T \begin{vmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \Delta_{13} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \Delta_{23} \\ \Delta_{31} & \Delta_{32} & \Delta_{33} \end{vmatrix}$$

виходить із матриці P_H заміною кожного елемента P_{ij} його алгебраїчним додатком Δ_{ij} з наступним транспортуванням отриманої матриці.

Для визначення P_H знайдемо

$$\det P_H = - \frac{(C\Phi)^2}{J^2 L}.$$

З огляду на сказане вище $AdjP$ можна подати так:

$$AdjP = \begin{vmatrix} 0 & 0 & -\frac{(C\Phi_n)}{J} \\ 0 & -\frac{(C\Phi_n)}{JL} & \frac{a_2 \cdot C\Phi_n}{J} - \frac{R_E(C\Phi_n)}{JL} \\ \frac{JL}{(C\Phi_n)} & \frac{a_2 \cdot C\Phi_n}{JL} & (a_1 - \frac{(C\Phi_n)^2}{JL}) \cdot \frac{(C\Phi_n)^2}{J} - a_2^2 \frac{C\Phi_n}{J} - a_2 \cdot \frac{(C\Phi_n)R_E}{JL} \end{vmatrix} \quad (2.56)$$

$$P_H^{-1} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{(C\Phi)} \\ 0 & \frac{J}{(C\Phi)} & -\frac{a_2 J}{(C\Phi)} \\ \frac{JL}{(C\Phi)} & \frac{JL}{(C\Phi)} \cdot (\frac{R_E}{L} - a_2) & \frac{JL}{(C\Phi)} \cdot (\frac{(C\Phi)^2}{JL} - a_2^2 - a_1 - a_2 \cdot \frac{R_E}{L}) \end{vmatrix} \quad (2.57)$$

Матриця зворотного зв'язку спостерігача L у вихідному базисі визначається за формулою

$$L = P_H^{-1} \cdot L^* = P_H^{-1} \begin{vmatrix} \beta_0 & -a_0 \\ \beta_1 & -a_1 \\ \beta_2 & -a_2 \end{vmatrix} \quad (2.58)$$

На підставі рівності $H(p) = H_{ж}(p)$ складається система рівнянь $a_i = \beta_i$, $i = 1, 2, 3$. Розв'язуючи цю систему алгебраїчних рівнянь, знаходимо шукані елементи (l_0, l_1, l_2) матриці L

$$l_0 = 2 \cdot \omega_{0H} - \frac{T_E + T_M}{T_E \cdot T_M}; \quad l_0 = \frac{J}{C \cdot \Phi_n} \cdot (2\omega_{0H}^2 - a_1 - 2 \cdot a_2 \cdot \omega_{0H} + a_2^2);$$

$$l_0 = \frac{J \cdot L}{C \cdot \Phi_n} \cdot \left[\omega_{0H}^3 - a_0 + (\frac{1}{T_3} - a_2) \cdot (2\omega_{0H}^2 - a_1) + (a_2^2 + \frac{1}{T_E \cdot T_M} - a_1 - \frac{a_2}{T_E}) \cdot (2\omega_{0H} - a_2) \right]$$

Отримаємо рівняння стану спостерігача з урахуванням отриманих значень матриць і коефіцієнтів:

$$\begin{pmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{I} \\ \hat{E}_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_0 & \frac{C \cdot \Phi_H}{J} & 0 \\ -\left(\frac{C \cdot \Phi_H}{L} + l_1\right) & -\frac{R_E}{L} & \frac{1}{L} \\ -l_2 & 0 & -\frac{1}{T_\mu} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{I} \\ \hat{E}_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_0 \\ l_1 \\ l_2 \end{pmatrix} \cdot \omega(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{K_{III}}{T_\mu} \end{pmatrix} \cdot U_y, \quad (2.59)$$

З огляду на отримані залежності (2.59) на рис. 2.42 зображена функціональна схема асимптотичного спостерігача третього типу для системи електропривода постійного струму сумісно з синтезованим модальним регулятором.

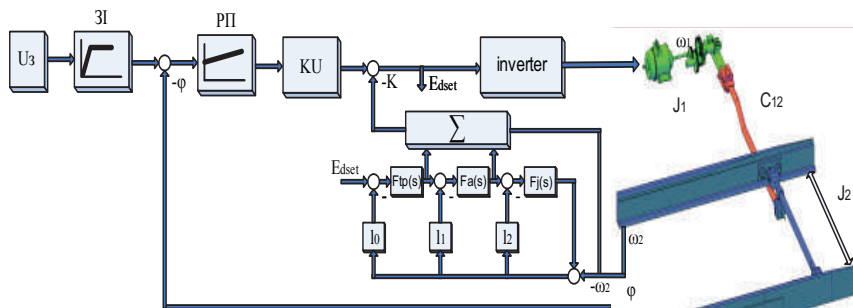


Рисунок 2.42 – Функціональна схема системи «об’єкт-спостерігач»

Для ілюстрації практичного виконання методики синтезу системи модального керування зі спостерігачем моделювалися різні режими роботи електропривода стрілочного переводу за вказаною вище структурною схемою в середовищі пакета MATLAB. Проведено аналіз режимів роботи стрілочного переводу, і побудовані осцилограми основних координат. При варіації параметрів ЗІ відбувається суттєва зміна динамічних характеристик, а в деяких випадках система втрачає стійкість. Загалом показники, що досліджувалися, мають аналогічний характер протікання процесу, як і в системі з модальним регулятором, з урахуванням деяких особливостей. Системи з синтезованим модальним регулятором і спостерігачем для одномасової системи мають незначну перевагу перед СПР, яке складається в меншому перерегулюванні координати швидкості і меншій амплітуді координат швидкості і струму в нестационарних режимах. Однак застосування МР і СпС буде створювати додаткові труднощі, пов’язані з синтезом модального регулятора, спостерігача стану для багатомасових систем і їх застосуванням на стандартних приводах стрілочних переводів. Із (рис. 2.43 а, б) видно, що при «м’якому» ЗІ час переведення стрілки такий же, як і в системі з МР, але менше на 3,8%, ніж у СПР. При цьому кидок струму на 6,7% більше, ніж у системі з МР і СПР. Перерегулювання менше, ніж у СПР, але більше, ніж в МР. При «жорсткому» ЗІ (рис. 2.43 в, г) найменший час переведення складає 1,7 с. Значення швидкості при гальмуванні в системі

зі спостерігачем, за заданої швидкості 140% від номінальної, на 49% менше, ніж у системі СПР.

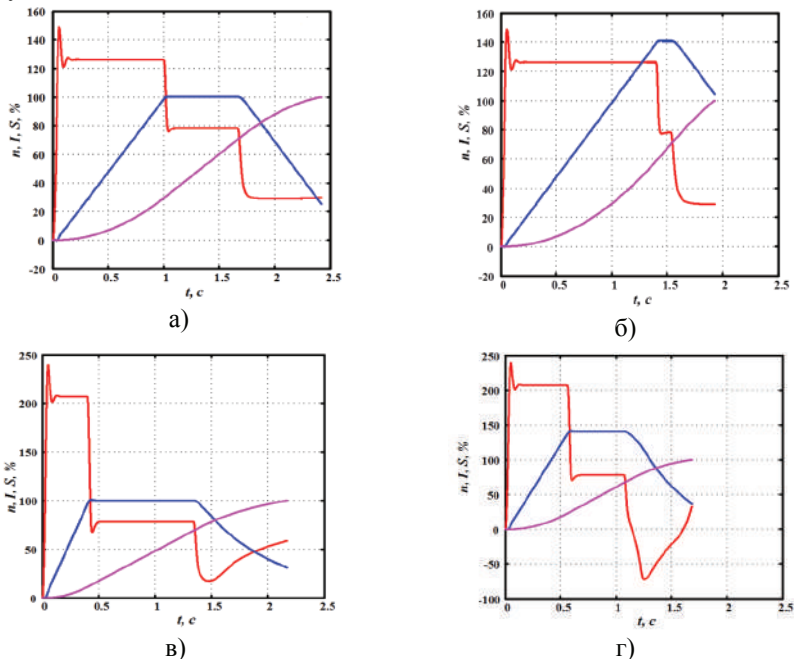


Рисунок 2.43 – Координати ЕП СП в штатному режимі, при «м'якому» ЗІ й заданні швидкості: а – 100%, б – 140% від номінальної; при «жорсткому» ЗІ й заданні швидкості: в – 100%, г – 140% від номінальної

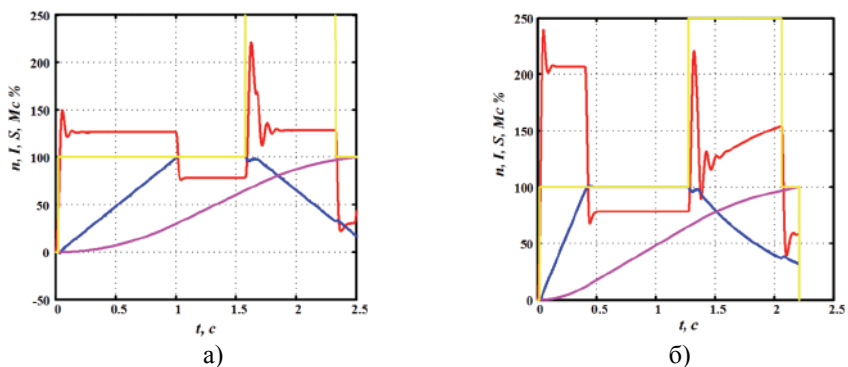


Рисунок 2.44 – Координати ЕП СП в режимі заклинювання: а – при «жорсткому» ЗІ й заданні швидкості 100% від номінальної; б – при «м'якому» ЗІ й заданні швидкості 100% від номінальної

Моделювання потрапляння снігу між рейкою і гостряком (рис. 2.44 а, б) також, як і системах з МР і СПР, не приводить до суттєвих змін під час переведення, бо просадка швидкості складає не більше 5%, а збільшення часу переведення – не більше 1%.

Кидок струму при пуску і вибиванні снігу на 17 % більше, ніж у системі з МР, і на 4 % більше, ніж у СПР. Видно, що всі системи, що були досліджені, поведуть себе однаково, вибивають сніг або лід, що потрапили між гостряком і рейкою.

Аналіз системи зі спостереженням в нестационарному режимі роботи (рис. 2.45 а – г) показує, що в системі виникають фрикційні автоколювання з коефіцієнтом динамічності до 22, що менше ніж значення для системи СПР і з МР. Амплітудні значення струму і швидкості менше, ніж у системі з МР, і значно менше, ніж у СПР. Системи керування, що розглядаються, забезпечують надійне переведення гостряків стрілки із заданими динамічними характеристиками системи, як у штатному режимі, так і при потраплянні снігу між гостряком і рейкою. Але під час роботи на падаючому відрізку характеристики тертя відбувається суттєва зміна динамічних властивостей системи в сторону погіршення.

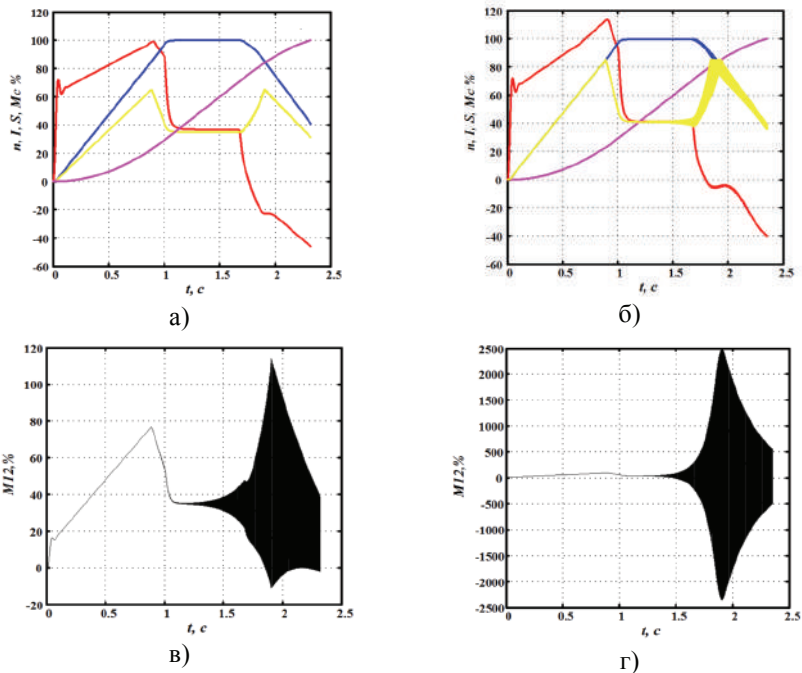


Рисунок 2.45 – Координати ЕП СП в нестационарному режимі (автоколювання) при різних кутах нахилу падаючого відрізка характеристики навантаження для системи зі СПС

Для оцінки якості процесу переведення доцільним є порівняння показників якості розглянутих систем керування. Нижче наведені результати порівняння моделювання для граничних параметрів – «м'якого» ЗІ з номінальним задаванням швидкості і «жорсткого» ЗІ з максимальним задаванням швидкості.

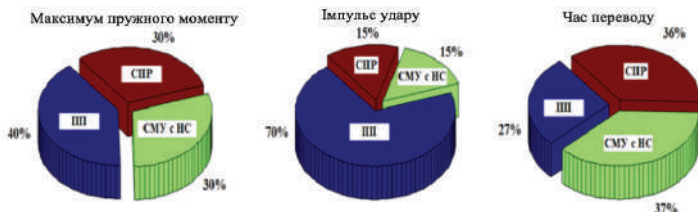


Рисунок 2.46 – Порівняння отриманих результатів моделювання за критеріями оптимізації для прямого пуску, систем МР зі СпС і СПР при «м'якому» ЗІ і при задаванні швидкості 100%

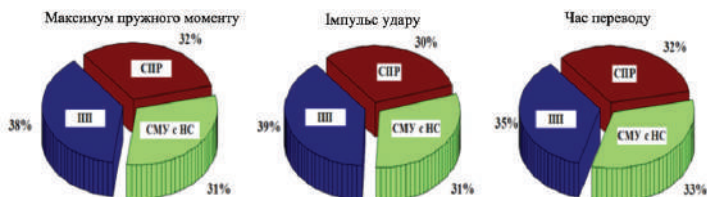


Рисунок 2.47 – Порівняння отриманих результатів моделювання за критеріями оптимізації для прямого пуску, систем МР зі СпС і СПР при «жорсткому» ЗІ і при задаванні швидкості 140%

Аналіз рис. 2.46, 2.47 показує, що застосування регульованого ЕП СП з ДПС, згідно з визначеними вище критеріями якості, може поліпшити якість процесу переведення стрілки. Так, при «м'якому» ЗІ, тобто більш плавних старті та зупинці, очевидне зниження величини імпульсу удару і пружної сили (55% і 10% відповідно); при цьому час переведення збільшується на 9-10%. Підвищення швидкості задавання і зменшення часу переведення дає наступний результат: при «жорсткому» ЗІ і задаванні швидкості 140% погіршуються показники імпульсу удару і максимуму пружної сили, хоча вони кращі, ніж при прямому пуску: перевага в 6-7%. Час переведення в цьому випадку скорочується на 2-5%.

Таким чином, основні показники складових узагальненого векторного критерію оцінки ефективності роботи покращились: знизилась величина імпульсу удару гостряка M_i на 55%, знизилась величина пружної сили F_{12} в тязі на 10%, час переведу t_s зріс на 9% для завдання швидкості $\omega_{ном}$ та зменшився на 32% для завдання швидкості $1,4\omega_{ном}$. Електричні втрати залишились приблизно на базовому рівні.

РОЗДІЛ 3

ЕЛЕКТРОПРИВОД СТІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ З АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ

Модернізація приводів, що широко використовуються на базі АД типу СП6, потребує досліджень і впровадження систем керування, котрі забезпечать регульованість і контрольованість процесу переведення гостряків.

Розв'язання цієї задачі можливе шляхом створення комплексу керування на базі системи підпорядкованого регулювання зі скалярним, векторним і модальним керуванням як найбільш поширених для цього типу двигуна.

3.1. Математична та імітаційна моделі

Нині широко експлуатується п'ятидротова схема керування ЕП СП, що служить підставою для розробки моделі СП з асинхронним двигуном, котра необхідна для аналізу динамічних процесів у наявних системах.

Через можливість живлення ПЧ як постійним струмом, так і змінним, система, що розробляється, може бути інтегрована як у дводровову, так і в п'ятидротову провідну схему керування стрілкою.

Моделювання стрілки з асинхронним двигуном виконується аналогічно побудові моделі СП з ДПС, зміниться лише блок двигуна.

Асинхронний двигун являє собою нелінійний багатовимірний об'єкт із достатньо складною структурою. Схема заміщення двигуна зображена на рис. 3.1.

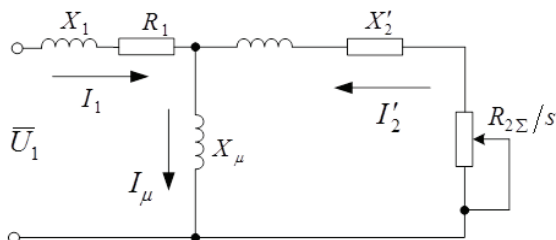


Рисунок 3.1 – Схема заміщення фази асинхронного двигуна

Найбільш поширеними нині для електроприводів стрілочних переводів є асинхронні машини з короткозамкненим ротором типів МСТ-0,25, МСТ-0,3 і МСТ0,6, де цифри означають потужність у кіловатах.

Існують різні математичні моделі АД [9] у залежності від прийнятої системи координат. Вибір системи координат і конфігурації моделі визначається структурною системою керування й сигналами зворотних зв'язків. Математичний опис узагальненої асинхронної машини базується на законах Кірхгофа, Ома і drugому законі Ньютона.

У рівняннях, що описують двигун за цими законами, фігурують миттєві напруги, струми, потокозчеплення, індуктивності ротора і статора, а також

активні опори обмоток. Для переходу від математичного опису гармонічних сигналів у багатофазових координатах до опису в ортогональних двофазних координатах використовується поняття узагальненого вектора [9, 24].

$$\vec{i} = \frac{2}{3}(i_A + \vec{a}i_B + \vec{a}^2i_C) \quad (3.1)$$

де $\vec{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, $\vec{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$ – вектори, що враховують просторове зміщення обмоток; $i_A = I_m \cos \omega t$; $i_B = I_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$; $i_C = I_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})$ – трифазна симетрична система струмів статора.

Підставивши в рівняння (3.1) значення миттєвих струмів, отримаємо математичний опис просторового вектора струму статора:

$$\vec{i}_S = \frac{2}{3} I_m (\cos \omega t + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + e^{j\frac{4\pi}{3}} \cdot \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})) = I_m e^{j\omega t} \quad (3.2)$$

Таким чином, для системи координат, що обертається з довільною швидкістю ω_k , буде отримана наступна система рівнянь:

$$\begin{cases} \vec{u}_S = R_S \vec{i}_S + \frac{d\vec{\Psi}_S}{dt} + j\omega_k \vec{\Psi}_S \\ \vec{u}_R = R_R \vec{i}_R + \frac{d\vec{\Psi}_R}{dt} + j(\omega_k - \omega_r) \vec{\Psi}_R \\ \vec{\Psi}_S = L_S \vec{i}_S + L_m \vec{i}_R \\ \vec{\Psi}_R = L_m \vec{i}_S + L_R \vec{i}_R \\ M = \frac{3}{2} pk_R \cdot \text{Mod}(\vec{\psi}_R \times \vec{i}_S) \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_n \end{cases} \quad (3.3)$$

де $\omega = p\omega_m$; p – число пар полюсів у машині; J – момент інерції ротора.

Для АД із короткозамкненим ротором вектори $\vec{\Psi}_S$, $\vec{\Psi}_R$ відрізняються один від одного наявністю розсіяння обмоток статора і ротора. У зв'язку з цим для них справедливе наступне:

$$\begin{aligned} \vec{\Psi}_S &= (L_m + L_{sl}) \cdot \vec{i}_S + L_m \vec{i}_R, \\ \vec{\Psi}_R &= (L_m + L_{rl}) \cdot \vec{i}_R + L_m \vec{i}_S \end{aligned} \quad (3.4)$$

де L_m – головна індуктивність розсіяння; L_{sl} , L_{rl} – індуктивності розсіяння обмоток.

Значення індуктивностей обмоток статора L_S й ротора L_R будуть:

$$\begin{aligned} L_S &= (L_m + L_{sl}), \\ L_R &= (L_m + L_{rl}). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Для системи координат α , β пряме перетворення, яке необхідне для перерахунку реальних трифазних змінних у двофазні змінні моделі й навпаки, має наступний вигляд:

$$i_A = i_\alpha, i_B = -\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta, i_C = -\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta \quad (3.6)$$

і зворотнє:

$$i_\alpha = i_A, i_\beta = \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}} \quad (3.7)$$

Для дослідження на математичних моделях дво- і тримасової ЕМС стрілочного переведу використаємо структурні схеми, наведені на рис. 2.8 з урахуванням того, що замість ДПТ використовується АД.

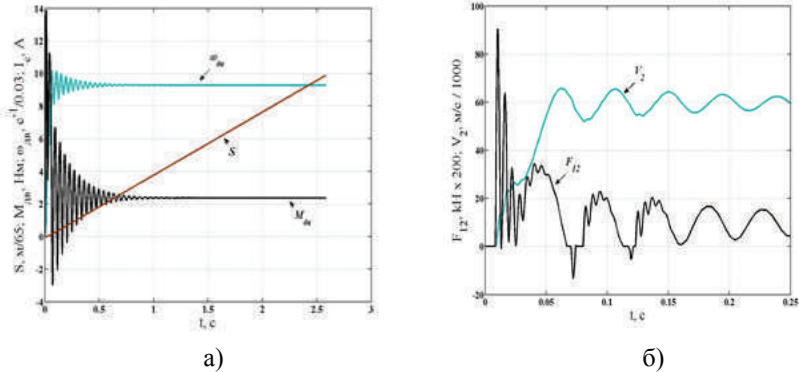


Рисунок 3.2 – Осцилограми перехідних процесів при прямому пуску АД для двомасової системи: а – кутова швидкість і момент двигуна змінного струму; б – пружна сила й лінійна швидкість другої маси

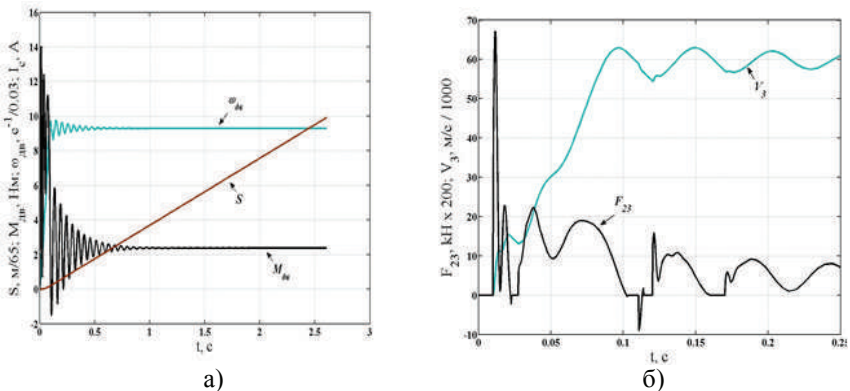


Рисунок 3.3 – Осцилограми перехідних процесів для тримасової системи: а – кутова швидкість і момент двигуна змінного струму; б – пружна сила й лінійна швидкість третьої маси

Із отриманих графіків видно, що перехідний процес якісно не змінюється, з чого можна зробити висновок про те, що механічну частину

стрілочного переводу з АД можна подавати як двомасовою, так тримасовою математичною моделлю.

Для дослідження динамічних властивостей привода з можливістю регулювання різних координат АД необхідно створити математичну модель системи перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ–АД).

У подальшому дослідження роботи СП наявної конфігурації здійснюється на математичній моделі стрілки за структурними схемами, що наведені раніше, де замість блоку ЕД використовується блок ПЧ–АД. Математичний опис асинхронної машини наведений вище, і для створення повної моделі необхідно отримати математичний опис перетворювача частоти.

Найбільше поширення в промисловості отримали частотні перетворювачі зі скалярним і векторним керуванням [25, 26]. Для залізниць актуальні обидва варіанти.

3.2. Скалярна й векторна системи керування

Скалярне керування забезпечує досягнення потрібних статичних характеристик і звичайно використовується в ЕП зі стабільним навантаженням [24]. При цьому система керування повинна забезпечити повільне зростання сигналу задавання для наближення динамічних властивостей електропривода до статичних.

У рівняннях АД, які зв'язують координати в режимах, що встановилися, у двох перших рівняннях системи 3.3 приймають $\omega_k = \omega_s = 2\pi f$ і $d/dt = 0$. Тоді:

$$\begin{cases} \vec{u}_S = R_S \vec{i}_S + j\omega_k \vec{\Psi}_S \\ \vec{u}_R = R_R \vec{i}_R + j(\omega_k - \omega_r) \vec{\Psi}_R \end{cases} \quad (3.8)$$

Підставивши відповідні значення із третього й четвертого рівнянь системи (3.3) у залежності (3.4), отримаємо

$$\begin{cases} \frac{\vec{u}_S}{\omega_s} = \vec{i}_S \frac{R_S}{\omega_s} + j\vec{\Psi}_S = \vec{i}_S \frac{R_S}{\omega_s} + jL_{S\sigma} \vec{i}_S + j\vec{\Psi}_m \\ 0 = \vec{i}_R \frac{R_R}{\beta} + j\vec{\Psi}_R = \vec{i}_R \frac{R_R}{\beta} + jL_{R\sigma} \vec{i}_R + j\vec{\Psi}_m \end{cases} \quad (3.9)$$

Схема заміщення АД, що відповідає системі рівнянь (3.9), зображена на рис. 3.4.

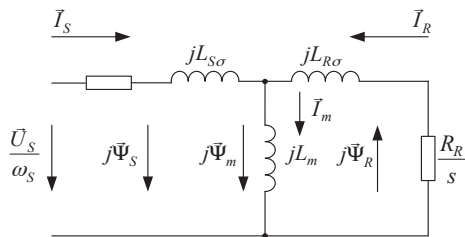


Рисунок 3.4 – Схема заміщення АД

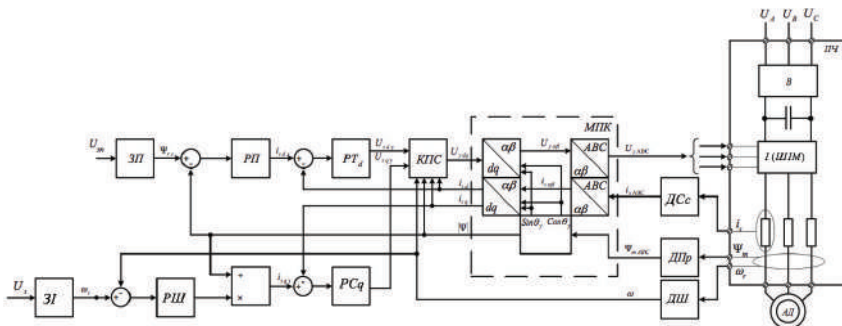


Рисунок 3.6 – Функціональна схема системи векторного керування АД

Ця система має два канали регулювання: модулем вектора потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_R$ й кутовою швидкістю ротора ω , кожний із каналів має по два контури регулювання. Задавання сигналів здійснюється в системі координат d, q , орієнтованій за потокозчепленням ротора. Регулятори внутрішніх контурів регулювання струму статора виконані пропорційно-інтегральними. За рахунок використання датчиків Холла виконується вимірювання й обчислення складових головного потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_R$ в системі координат А, В, С за формулами:

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_{R\alpha} = k_R^{-1} \cdot \Psi_{m\alpha} - L_{R\sigma} \cdot i_{s\alpha} \\ \bar{\Psi}_{R\beta} = k_R^{-1} \cdot \Psi_{m\beta} - L_{R\sigma} \cdot i_{s\beta} \end{cases} \quad (3.11)$$

За допомогою датчика інтенсивності формується сигнал задавання швидкості двигуна, а задавання потокозчеплення може бути організоване незалежно у функції задавання швидкості шляхом застосування нелінійного датчика ослаблення поля ЗП (для систем двозонного регулювання швидкості).

Необхідні динамічні характеристики системи керування досягаються під час використання блоку компенсації, котрий розділяє канали регулювання шляхом нейтралізації впливів внутрішніх зворотних зв'язків (ВЗЗ) АД [11, 24]. Компенсація здійснюється шляхом заведення аналогічних сигналів із протилежним знаком на вхід інвертора напруги.

Передатні функції регуляторів швидкості і струму обрані відповідно до рекомендацій [24].

$$W_{PTd}(p) = W_{PTq}(p) = \frac{K_{PC}(T_{SR}p + 1)}{T_{SR}p} \quad (3.12)$$

$$W_{PI}(p) = \frac{K_{PI}(T_Rp + 1)}{T_Rp} \quad (3.13)$$

$$W_{PII}(p) = \frac{J \cdot K_C \cdot (8T_\mu p + 1)}{48 \cdot \Psi_{r0} \cdot T_\mu^2 \cdot Z_p \cdot K_{oc} \cdot K_r \cdot p} \quad (3.14)$$

де $K_{PC} = \frac{T_{SR}}{K_{nc} \cdot K_{oc} / R_{SR}}$ – коефіцієнт посилення регулятора струму;

$K_{PII} = \frac{T_R}{T_{II} \cdot L_{\mu} \cdot K_{on} \cdot K_C}$ – коефіцієнт посилення регулятора потокозчеплення;

$T_{SR} = \frac{\sigma \cdot L_S}{R_{SR}}$ – еквівалентна електромагнітна постійна часу статора АД; $T_R = \frac{L_R}{R_R}$ –

електромагнітна постійна часу ротора АД; K_{oc} , K_{on} , K_{ou} – коефіцієнти посилення датчиків струму, потокозчеплення і швидкості відповідно;

$T_T = 2T_{\mu}$, $T_{II} = 2T_T = 4T_{\mu}$ – постійні часу регуляторів струму й потокозчеплення відповідно; T_{μ} – постійна часу перетворювача; J – момент інерції об'єкта регулювання; Ψ_{r0} – потокозчеплення ротора; Z_p – кількість пар полюсів двигуна; K_{nc} – коефіцієнт посилення перетворювача.

Математична модель пристрою для ідентифікації потокозчеплення отримана в нерухомій системі координат з урахуванням рівняння (3.11) і $\omega_k = 0$ [24, 27, 28]:

$$\begin{cases} \Psi_{R\alpha} = k_R^{-1} \int (U_{S\alpha} - R_S i_{S\alpha}) dt - (k_R^{-1} L_{S\sigma} + L_{R\sigma}) \cdot i_{S\alpha} \\ \Psi_{R\beta} = k_R^{-1} \int (U_{S\beta} - R_S i_{S\beta}) dt - (k_R^{-1} L_{S\sigma} + L_{R\sigma}) \cdot i_{S\beta} \end{cases} \quad (3.15)$$

Для підтвердження результатів моделювання в лабораторії автоматики Українського державного університету залізничного транспорту були проведені експерименти з використання мікропроцесорного привода з частотним керуванням. Для проведення експериментів було застосовано стрілочний перевод із приводом типу СП-6, двигуном змінного струму МСТ 0,6. Як джерела живлення використовувалися частотні перетворювачі фірми Siemens – Simovert 6SE7087-6KP60 і Micromaster 440. Порівняльні осцилограми результатів моделювання й експерименту наведені на рис. 3.7.

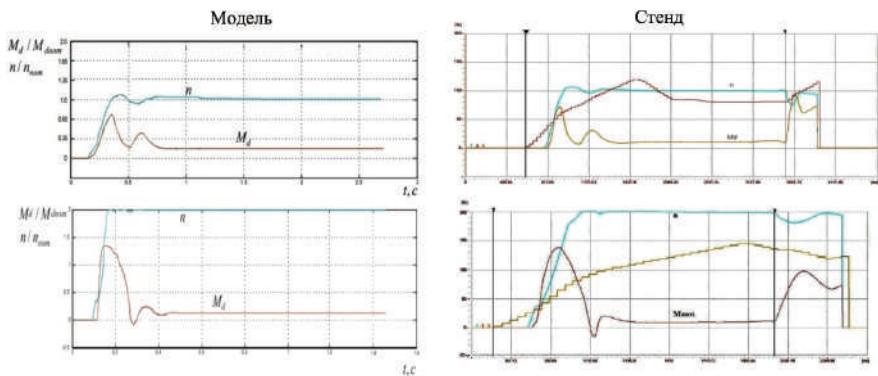


Рисунок 3.7 – Осцилограми швидкості й моменту двигуна на математичній моделі та стенді при частоті 60 Гц та 115 Гц

Отримані результати дають підстави зробити висновок, що адекватність моделі реальному об'єкту підтверджена експериментально (середньоквадратичне відхилення складо 5%) [4, 20, 25].

3.3. Процеси переводу гостряків зі скалярною та векторною системами керування в стаціонарному та нестаціонарному режимах

Оскільки під час створення стрілочних переводів СПЗ і СП6 рівень розвитку засобів автоматики й обчислювальної техніки не дозволяв реалізувати задачі оптимального керування рухом стрілки (наприклад, за принципом максимуму Л.С. Понтрягіна), то задачі керування процесами в електромеханічній системі розв'язувалися лише механічними способами - застосуванням фрикційної муфти й наявністю технологічного зазору в 46° .

Згідно з поставленими задачами і прийнятим способом модернізації шляхом впровадження частотно-регульованого асинхронного привода, а також наявністю відповідної сучасної мікропроцесорної техніки є можливість забезпечити якісно нове керування стрілочним переводом – шляхом зміни електричних параметрів системи домогтися покращення її механічних характеристик.

Як і в розділі 2, використовуються ті ж компоненти оцінки якості процесу переведення. Також залишається актуальною задача визначення часу початку гальмування АД, яку пропонується розв'язати за допомогою досліджень на розробленій математичній моделі. Дослідження складається з двох основних частин: у першій частині використана скалярна система керування ПЧ, у другій – векторна. Послідовність проведення експериментів у них однакова.

Зручним видом для аналізу й представлення отриманих масивів даних є тривимірна графічна залежність у вигляді поверхні. Такі поверхні являють собою розподіл по осях x та y параметрів сигналів задавання перетворювача частоти і їх вплив на величину обраного критерію оптимізації (вісь z).

Графічна інтерпретація експерименту показана на рис. 3.4. Змінна t_1 , що характеризує темп розгону, далі в роботі позначена як t . Змінна t_2 , що характеризує темп гальмування, позначена як l і має фізичний смисл відстані, пройдені гостряками з моменту початку гальмування. Величина напруги задавання ПЧ буде позначена як U_z . На цьому рисунку випадки а) $U_z = const, t, l = var$; б) $t, l = const, U_z = var$; в) $l = const, t, U_z = var$; г) $t = const, U_z, l = var$; є основними досліджуваними режимами роботи перетворювача частоти.

У сучасній перетворювальній техніці [26, 29] крім лінійного характеру ділянок розгону й гальмування, можна реалізувати ще кілька видів тахограм. Вони показані на рис. 3.8.

Також розглянуті S-образні тахограми. На рис. 3.9 наведені їх форми (а – трапецеїдальна; б – експоненціальна; в – параболічна; г – S – образна) Такі види сигналів задавання передбачається використовувати для досягнення найкращих показників за критеріями оптимізації. Параболічна тахограма передбачається як основна при досягненні безударних режимів. Для

забезпечення найбільшої швидкодії планується застосувати експоненціальну тахограму.

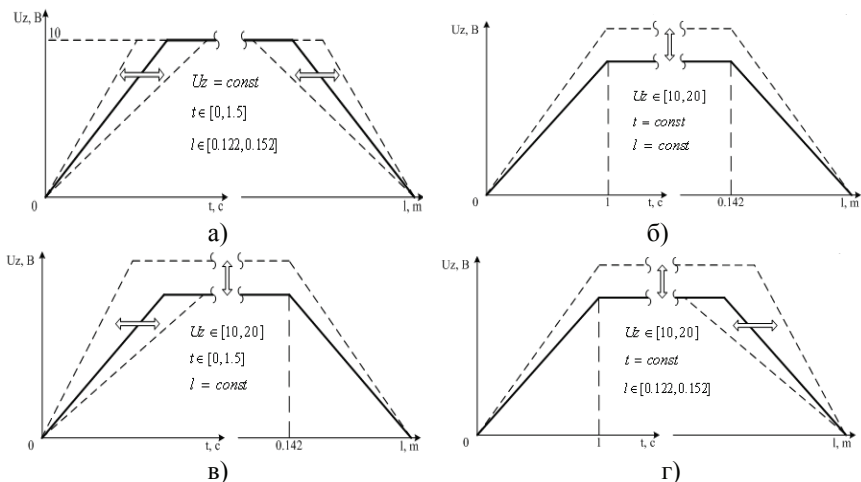


Рисунок 3.8 – Види тахограм задавання швидкості

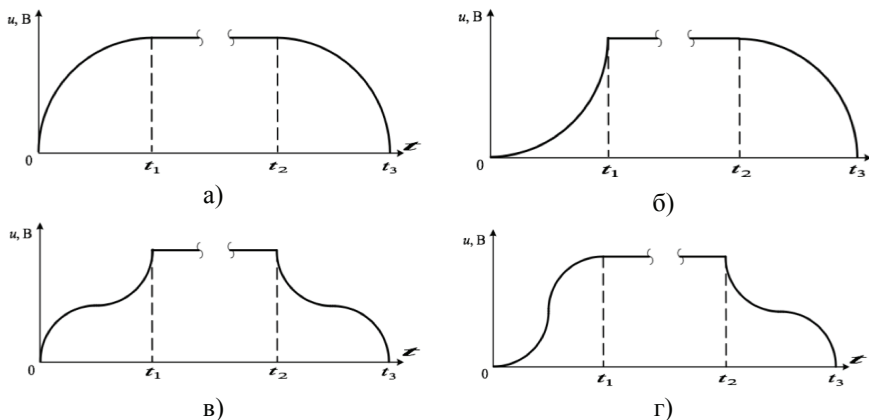
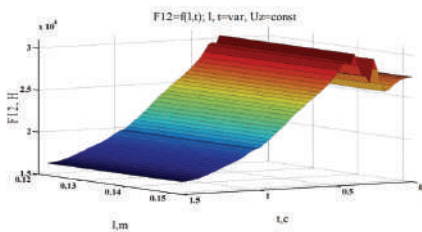
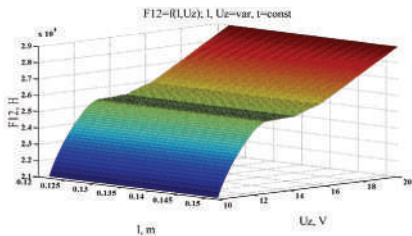


Рисунок 3.9 – Види тахограм (задатчика інтенсивності (RFG)) для скалярної та векторної систем управління

На рис. 3.10 та рис. 3.11 приведено поверхні розподілення пружної сили F_{12} та імпульсу удару M_i при варіюванні параметрів тахограм для системи скалярного керування.



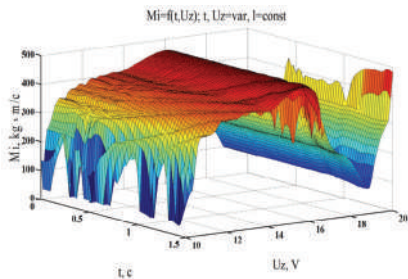
а)



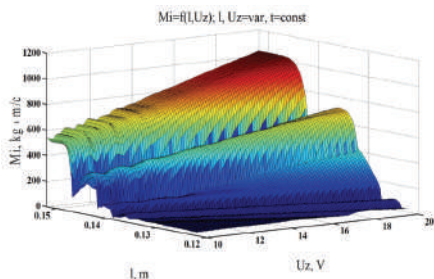
б)

Рисунок 3.10 – Поверхні розподілення пружної сили F_{12} при варіюванні параметрів тахограм для системи скалярного керування:

а – $F_{12}=f(l, t)$; $l, t=var, U_z=const$; б – $F_{12}=f(l, U_z)$; $l, U_z=var, t=const$



а)

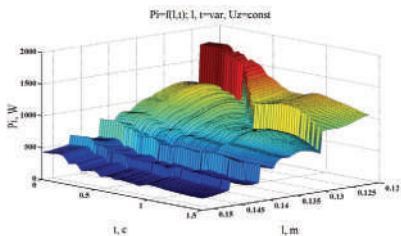


б)

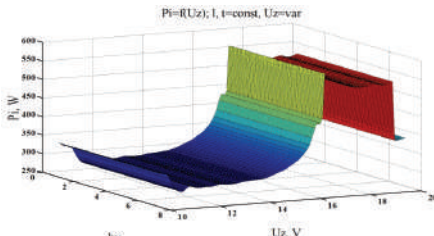
Рисунок 3.11 – Поверхні розподілення моменту удару M_i при варіюванні параметрів тахограм для системи скалярного керування:

а – $M_i=f(U_z, t)$; $U_z, t=var, l=const$; б – $M_i=f(l, U_z)$; $l, U_z=var, t=const$

Рис. 3.12 дозволяє встановити залежності впливу параметрів тахограми на величину електричних втрат у двигуні. На цей критерій впливають значення всіх змінних величин.



а)



б)

Рисунок 3.12 – Поверхні розподілення величини електричних втрат P_i при варіюванні параметрів тахограм для системи скалярного керування:

а – $P_i=f(l, t)$; $l, t=var, U_z=const$; б – $P_i=f(l, U_z)$; $U_z=var, l, t=const$

Поверхні, зображені на рис. 3.13, дозволяють судити про вплив параметрів тахограми на час переведення. Як видно з рисунка, зміна часу має

ступінчастий характер у відношенні до моменту початку гальмування й залежить від нього більше, ніж від часу розгону.

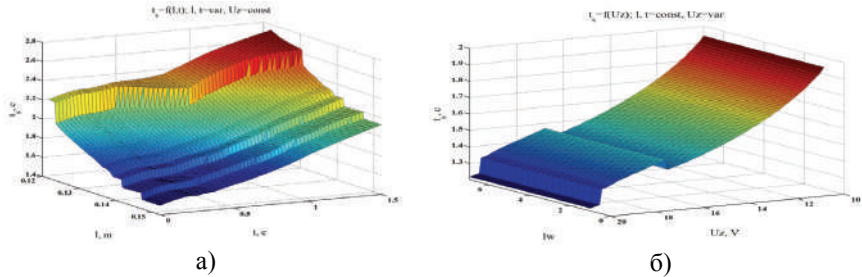


Рисунок 3.13 – Поверхні розподілення часу переведення t_s при варіюванні параметрів тахограм для системи скалярного керування:

а – $t_s = f(l, t)$; $l, t = \text{var}$, $U_z = \text{const}$; б – $t_s = f(U_z)$; $U_z = \text{var}$, $l, t = \text{const}$

У таблиці 3.1 подані параметри загальної оптимізації при фіксованому часі переведення, що дорівнює значенню при прямому пуску. Відповідно наладку механізму рекомендується починати з цих значень.

Таблиця 3.1 – Параметри сигналу задавання перетворювача для скалярної системи керування при загальній оптимізації

	Параметр тахограми			Компонент критерію оптимізації			
	t , с	l , м	U_z , В	F_{12} , Н	M_b , кгм/с	P_b , Вт	t_s , с
Оптимізовані значення	0,9	0,138	13,5	25300	183	350	1,5
При прямому пуску	0	0,154	-	27500	515	397	1,5
Ефект, %				8	64,47	11,8	0

На рис. 3.14 – 3.17 подано поверхні, за допомогою яких можна оцінити роботу перетворювача з векторною системою керування.

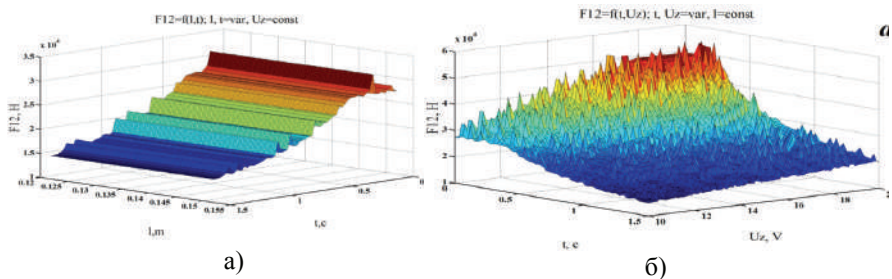
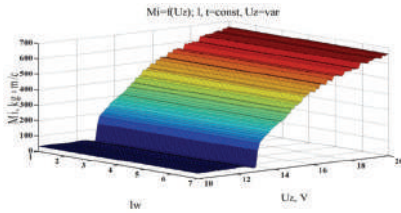
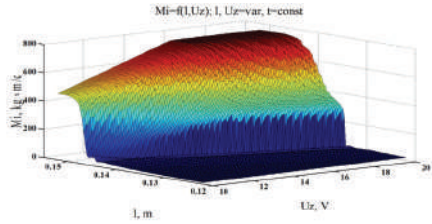


Рисунок 3.14 – Поверхні розподілення пружної сили F_{12} при варіюванні параметрів тахограм для системи векторного керування:

а – $F_{12} = f(l, t)$; $l, t = \text{var}$, $U_z = \text{const}$; б – $F_{12} = f(U_z, t)$; $U_z, t = \text{var}$, $l = \text{const}$

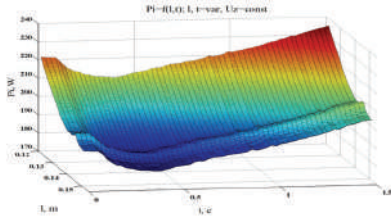


а)

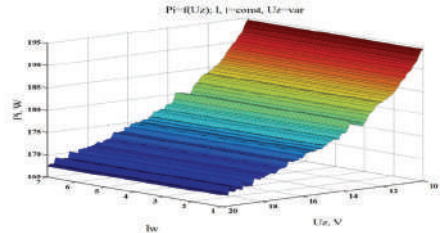


б)

Рисунок 3.15 – Поверхні розподілення імпульсу M_i при варіюванні параметрів тахограм для системи векторного керування: а – $M_i = f(U_z)$; $U_z = var, l, t = const$; б – $M_i = f(l, U_z)$; $l, U_z = var, t = const$



а)



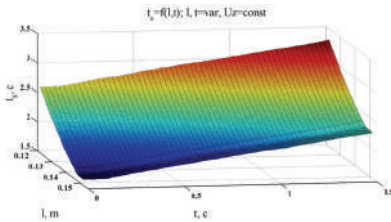
б)

Рисунок 3.16 – Поверхні розподілення електричних втрат P_i при варіюванні параметрів тахограм для системи векторного керування:

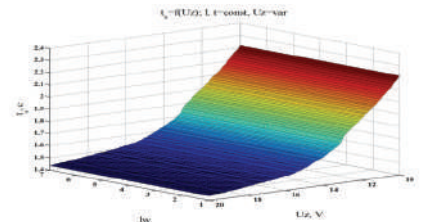
а – $P_i = f(l, t)$; $l, t = var, U_z = const$; б – $P_i = f(U_z)$; $U_z = var, l, t = const$

Рис. 3.14 дозволяє оцінити вплив обраних змінних при векторному керуванні на величину пружної сили, що прогнозовано плавно змінюється при зростанні сигналу завдання та зменшенні часу розгону.

Зміна величини імпульсу при векторному керуванні показана на рис. 3.15. Момент імпульсу має лінійний характер спадання величини критерію на завданнях 10...14 В, і малих значеннях відстані гальмування (140-150 мм), що вказує на доцільність вибору параметрів тахограми саме з цих діапазонів значень.



а)



б)

Рисунок 3.17 – Поверхні розподілення часу переведення t_s при варіюванні параметрів тахограм для системи векторного керування:

а – $t_s = f(l, t)$; $l, t = var, U_z = const$; б – $t_s = f(U_z)$; $U_z = var, l, t = const$

Характеристика зміни електричних втрат при векторному керуванні показана на рис. 3.16. Видно, що критерій має явний мінімум в діапазонах напруги завдання близько 17 В, часу розгону близько 0,5 с, відстані гальмування – 145 мм.

Найбільший вплив на час переведення при векторному керуванні, як видно з рис. 3.17, здійснює напруга задавання.

Таблиця 3.2 для векторного керування є аналогом таблиці 3.1 для системи скалярного керування.

Таблиця 3.2 – Параметри сигналу задавання перетворювача для векторної системи керування при загальній оптимізації

	Параметр тахограми			Значення критерію оптимізації			
	t , с	l , м	U_z , В	F_{12} , Н	M_i , кгм/с	P_i , Вт	ts , с
Оптимізовані значення	0,75	0,137	14	24800	73	175	1,5
При прямому пуску	0	0,154	-	27500	515	397	1,5
Ефект, %				9,81	85,8	55,91	0

Із наведених таблиць видно менш розподілене значення параметрів тахограм, при яких відбувається досягнення критерію оптимізації, що свідчить про більш плавний характер зміни залежності критеріїв від впливів системи керування. Також це вказує на переваги використання перетворювачів частот саме з векторним керуванням.

Графічне зображення ефекту від застосування вказаних параметрів у різних системах керування показано на рис. 3.18, де: ПП – прямий пуск, С – скалярне керування, В – векторне керування.



Рисунок 3.18 – Порівняльний аналіз результатів з оптимізації параметрів тахограм

Далі на рис. 3.19 і 3.20 наведені часові залежності критеріїв, побудовані за таблицями 3.1 – 3.2. Тут прийняті позначки: 1 – прямий пуск, 2 – скалярне керування, 3 – векторне керування.

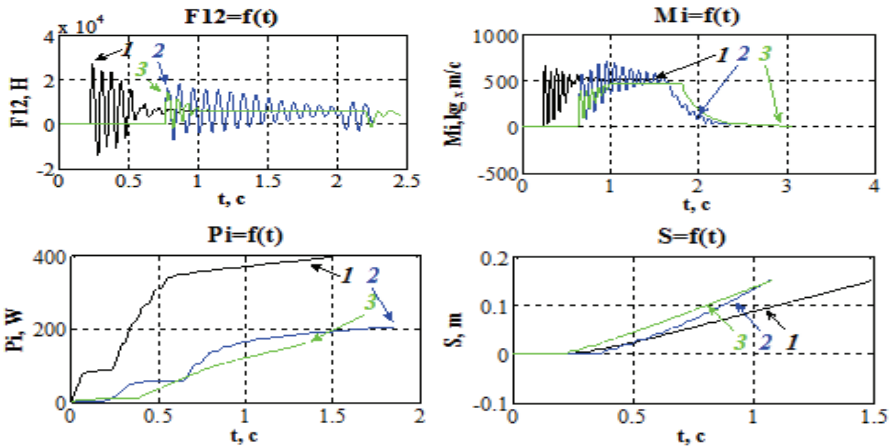


Рисунок 3.19 – Порівняльні характеристики критеріїв оптимізації за таблицею рекомендованих параметрів табл. 3.1

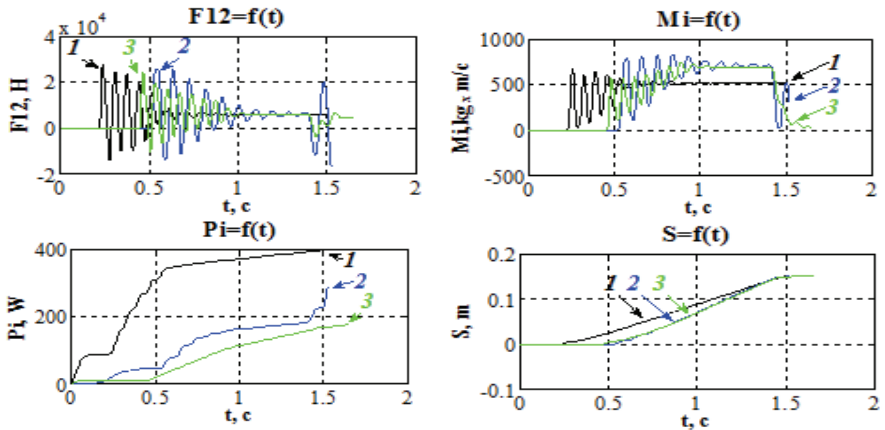


Рисунок 3.20 – Порівняльні характеристики критеріїв оптимізації за таблицею загальних рекомендованих параметрів табл. 3.2.

З отриманих графіків видно, що частотний перетворювач із системою векторного керування має низку переваг перед скалярною, які виражені в стабільності підтримки швидкості, а також у зниженому енергоспоживанні. У цьому випадку за обмеженої потужності джерела живлення (аккумуляторна батарея, сонячна батарея або резервні джерела живлення при надзвичайних ситуаціях) підвищується загальна надійність роботи стрілочного переводу. Також векторна система керування дозволяє знизити до мінімуму момент імпульсу. Очевидні переваги використання перетворювача з векторним керуванням для підвищення електромагнітного моменту двигуна. Для

стрілочних переводів, які працюють у зимовий час, це життєво важливий показник.

Як відомо з джерел [8, 10, 16], автоколивальні режими можуть виникати в ЕП як із двигунами постійного струму, так і з двигунами змінного струму. Тому були проведені дослідження нестационарних режимів роботи ЕП СП з асинхронним двигуном і різними системами керування з алгоритмом, запропонованим у 2 розділі.

За основу була взята структурна схема тримасової моделі ЕП стрілочного переводу з урахуванням ОВТ на базі асинхронного двигуна з перетворювачем частоти.

Дослідження на математичній моделі показали, що при деяких параметрах характеристики навантаження в кінематичній лінії стрілочного переводу можуть виникати фрикційні коливання швидкості і пружної сили в тягах. На рис. 3.21 подані різні типи протікання автоколивальних процесів пружної сили в тязі F_{12} .

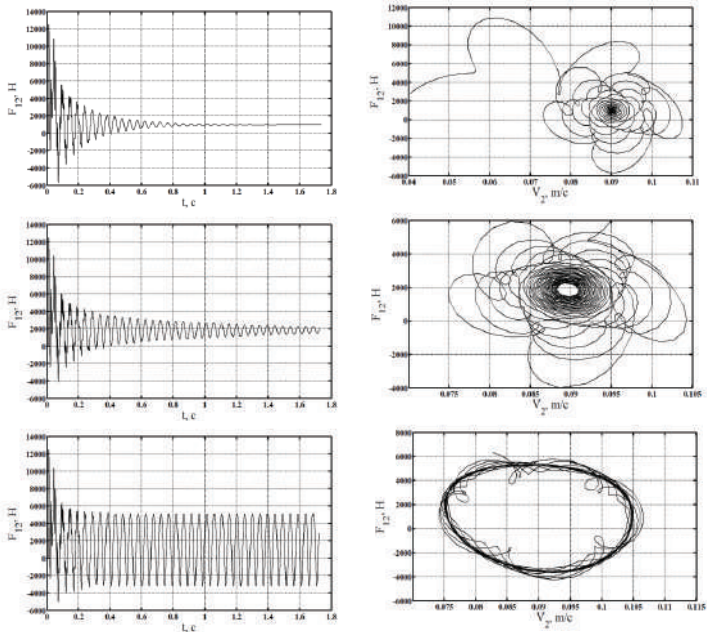


Рисунок 3.21 – Загальні й автоколивальні процеси в кінематичній лінії СП з двигуном змінного струму

Рис. 3.21, показує процес розвитку автоколивальних процесів із жорстким самозбудженням в СП з двигуном змінного струму типу МСТ-0.6. При цьому максимальні значення амплітуди пружної сили F_{12} встановлюються практично з першого періоду коливань, які в перехідному процесі обумовлені ударом при вибиранні технологічного зазору. Частота коливань дорівнює 43 Гц.

Застосування раніше прийнятих критеріїв (2.14) і (2.15) дозволило отримати поверхні розподілу коливальних пружної сили в тязі при зміні параметрів характеристики навантаження. У процесі досліджень розглядалися три випадки: а) перевідна поверхня обох рейок має нештатний стан; б) перевідна поверхня першої рейки в нештатному стані, другої - добре змащена; в) перевідна поверхня першої рейки добре змащена, другої - в нештатному стані. Такі випадки рівноймовірно можуть виникати під час роботи більшості стрілочних переводів.

З отриманих результатів видно, що існує певна зона параметрів характеристики навантаження, при яких можливий розвиток автоколивальних процесів у кінематичній лінії стрілочного переводу як із м'яким, так і з жорстким самозбудженням. Великий вплив робить абсциса початкової точки ділянки з негативним (світлий відтінок) в'язким тертям. Так при знаходженні цієї точки порядку 0,9 ... 1.0 можливий розвиток коливальних процесів при кутах нахилу від 5 до 500. У механічній системі з асинхронним двигуном, на відміну від ДПС, схильність до розвитку фрикційних коливальних процесів менша, що видно з рис. 3.22 – 3.24. Найбільш небезпечні (з точки зору амплітуди пружної сили) кути нахилу - 30 ... 400. Важливе значення має розташування незмащеної перекладної поверхні. За відсутності мастила на першій рейці зона можливих коливальних процесів ширша, що видно з рис. 3.22. Також зміщується кут нахилу з 10-200 до 40-500. Частота коливальних процесів лежить у межах 30 ... 80 Гц і залежить від типу стрілочного переводу (довжини і маси гостряків).

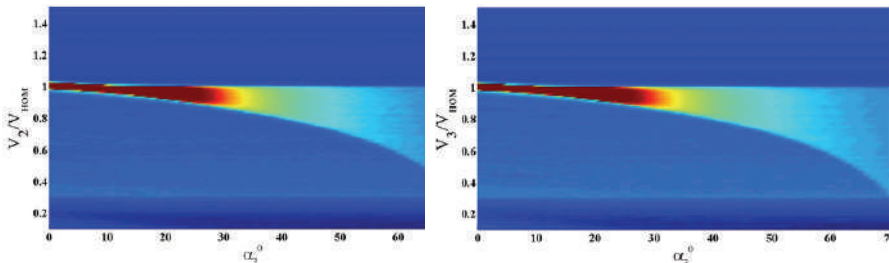


Рисунок 3.22 – Критерії коливальності пружної сили при $F_{c1} = f(V_2)$, $F_{c2} = const$ для двигуна змінного струму

Найбільш небезпечним варіантом розвитку коливальних процесів для стрілочного переводу є жорстке самозбудження (рис.3.21), оскільки дія знакозмінної сили на елементи кріплення тяг найбільш тривала. Це не тільки призводить до погіршення динамічних характеристик СП, а й порушує періодичність огляду й ремонту механічної частини переводу, встановленого технічними інструкціями [30, 31].

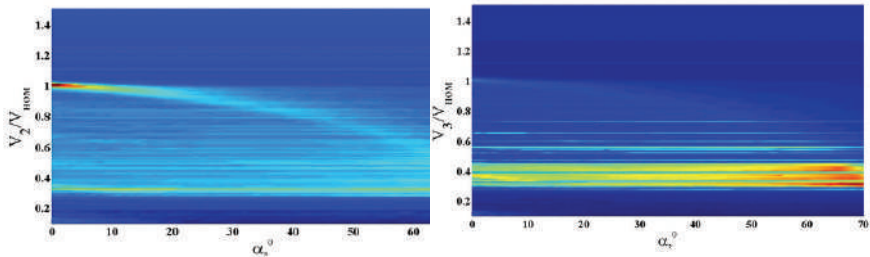


Рисунок 3.23 – Критерії коливальності пружної сили при $F_{c1} = const$, $F_{c12} = f(V_3)$ для двигуна змінного струму

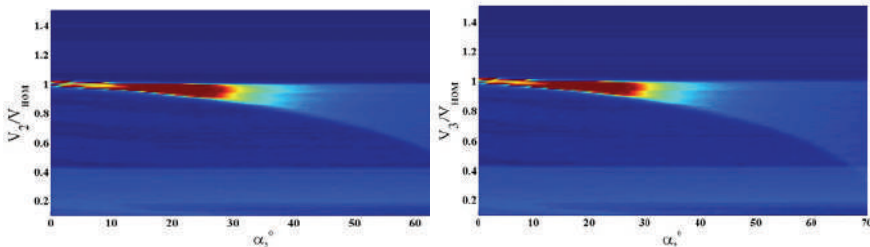


Рисунок 3.24 – Критерії коливальності пружної сили при $F_{c1} = f(V_2)$, $F_{c2} = f(V_3)$ для двигуна змінного струму

3.4. Система модального регулювання електроприводу

Далі розглянемо вплив різних систем керування на якість роботи ЕП. При цьому структурна схема САР ЕП стрілочного переводу на підставі системи підпорядкованого регулювання (СПР), які промислово випускаються, всіма основними виробниками ПЧ - Siemens, Schneider, ABB, Danfoss та ін.

Альтернативою традиційному теоретичному апарату [19, 22] служить САР ЕП стрілочного переводу на основі модального регулятора (МР). Доцільною є можливість розглянути такі режими роботи стрілочного переводу, які були б типовими або характерними для роботи реального обладнання [19, 22, 23]. Також, як і в розділі 2, це погодні умови (наявність спресованого снігу); станційні вимоги щодо швидкості переведення (головні й бокові колії). У ході експериментів на моделі слід досліджувати всю можливу глибину регулювання за швидкістю в широкому діапазоні зміни моменту опору механізму.

Математична модель САР регульованого ЕП стрілочного переводу з АТ на основі СПР положення показана на рис. 3.25, а на рис. 3.26 і рис. 3.27 – осцилограми, отримані за допомогою цієї моделі.

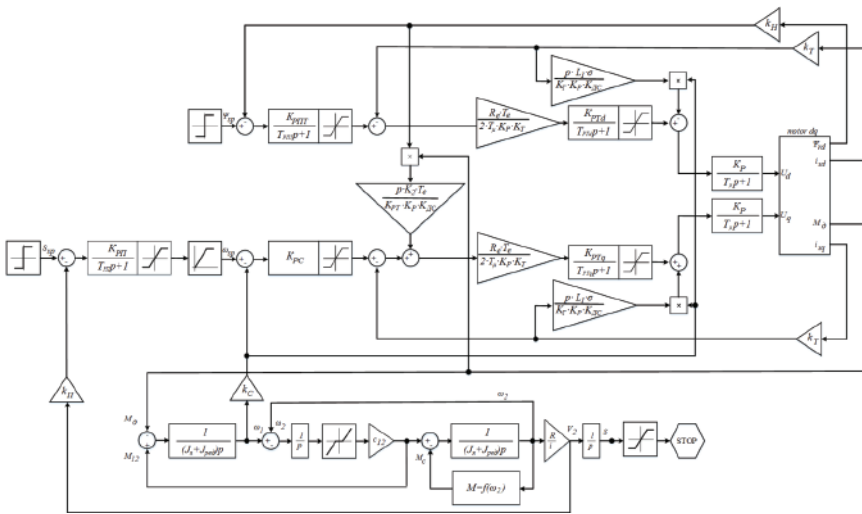


Рисунок 3.25 – Структурна схема математичної моделі САР регульованого ЕП стрілочного переводу з АД на підставі СПР положення

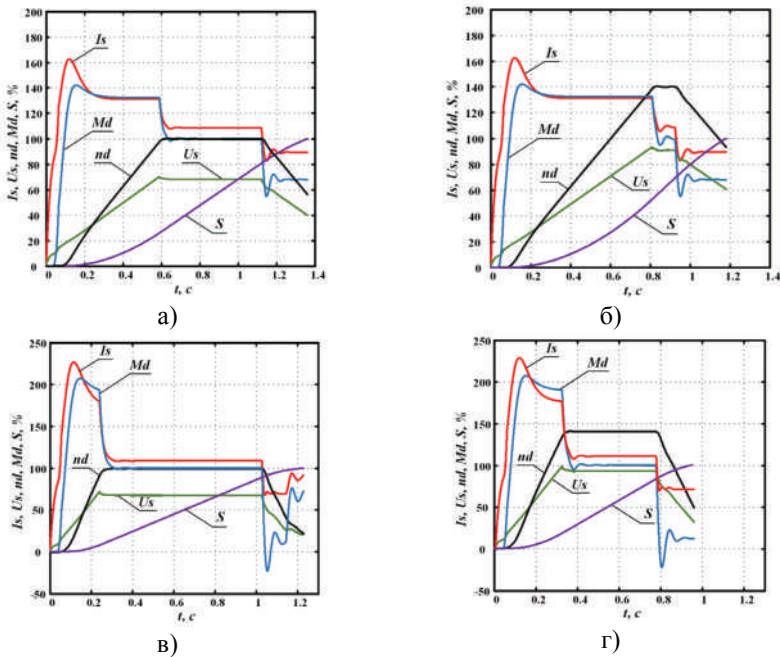


Рисунок 3.26 – Координати ЕП (СПР положення гостряків) СП в штатному режимі, при «м'якому» ЗІ і заданні швидкості: а – 100%, б – 140% від номінальної; при «жорсткому» ЗІ і заданні швидкості: в – 100%, г – 140% від номінальної

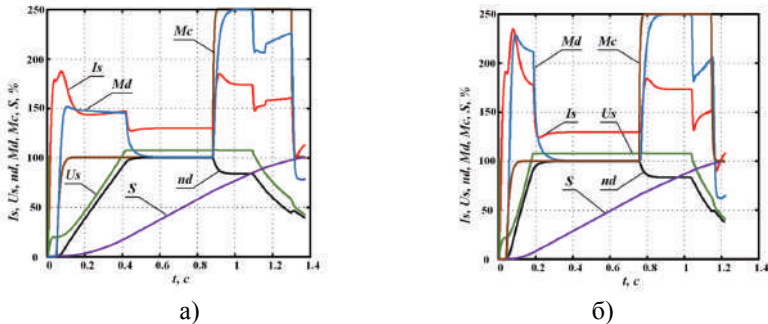


Рисунок 3.27 – Координати ЕП (СПР положення гостряків) СП в режимі заклинювання (потрапляння снігу, каменя): а – при «м'якому» ЗІ, задаванні швидкості 100% від номінальної; б – при «жорсткому» ЗІ, задаванні швидкості 100% від номінальної

Синтез контурів струму і швидкості векторної СК розглянуто в [11, 32, 33], в роботі доданий контур положення з урахуванням наявності пружного зв'язку у вигляді сполучної стрілочної тяги. Специфікою регулювання положення для цього об'єкта (як для СК постійного струму) є те, що повністю зупинити рейку, що рухається, не потрібно, оскільки для надійного спрацювання вузла замикання гостряка його необхідно з достатньою силою притиснути до рамної рейки. На переміщеннях з малою швидкістю для цього потрібне значне зусилля, що призведе до значного зростання струму статора. Для недопущення такого режиму роботи САР переведення стрілки закінчується не з нульовою швидкістю, а з дещо зменшеною. Величина швидкості при замиканні гостряків, при якій не відбувається сильного удару об рамну рейку, лежить у межах 20 - 60%.

Аналіз рис. 3.26 показує, що за допомогою САР ЕП стрілочного переводу на підставі СПР положення в штатному режимі можна досягти часу переведення гостряків у діапазоні 1,38 - 0,95 с. При цьому початковий кидок струму статора відповідно змінюється від 160% до 235% від номінального значення. Вигнута форма струму на початку переведення обумовлена процесами намагнічування електродвигуна, які займають близько 100 мс.

Розглянемо детальніше вплив задатчика інтенсивності на кратність пускового струму і час переведення. На рис. 3.26 а, б («м'який» ЗІ, - 0,5 с) видно, що підвищення задавання не впливає на пусковий струм, тому краще працювати з великими задаваннями по швидкості на «м'якому» ЗІ, але, беручи до уваги величину удару в кінці переведення, пропонується забезпечувати 120% від номінальної швидкості. Виграш у часі від підвищення задавання становить до 0,1 с. Пусковий струм у цьому варіанті 160%.

На рис. 3.26 в, г («жорсткий» ЗІ, - 0,25 с) також, як і при «м'якому» ЗІ, підвищення завдання не впливає на пусковий струм, але з огляду на менший час, що витрачається на розгін і гальмування, швидкість у кінці вдається

кутової швидкості системи координат (X, Y) , що обертається, відносно пов'язаної зі статором нерухомої системи координат (a, b) , а також значення електромагнітного моменту двигуна M_d . Значення кутової швидкості використовується в блоках перетворень координат прямого каналу і каналу зворотного зв'язку для розрахунку необхідних значень $\sin \theta$ і $\cos \theta$. Коефіцієнти k_{1U} і k_{2U} – коефіцієнти посилення, що забезпечують необхідні потокозчеплення і швидкість ротора АД за наявності зворотних зв'язків, БКПС – блок компенсації перехресних зв'язків.

Осцилограми рис. 3.29 і 3.30 показують загальну схожість із СПР. Основна різниця стосується намагнічування при пуску, що видно за характерними піками струму. Намагнічування при МР відбувається швидше, ніж при СПР, (20 мс і 100 мс відповідно), проте пік струму на старті вище у системи з МР. Аналіз рис. 3.29 показує, що за допомогою САР ЕП стрілочного переведу на підставі МР у штатному режимі можна забезпечити час переведення гостряків у діапазоні 1,29 - 0,87 с. При цьому початковий кидок струму відповідно змінюється зі 184% до 237% від номінального струму статора.

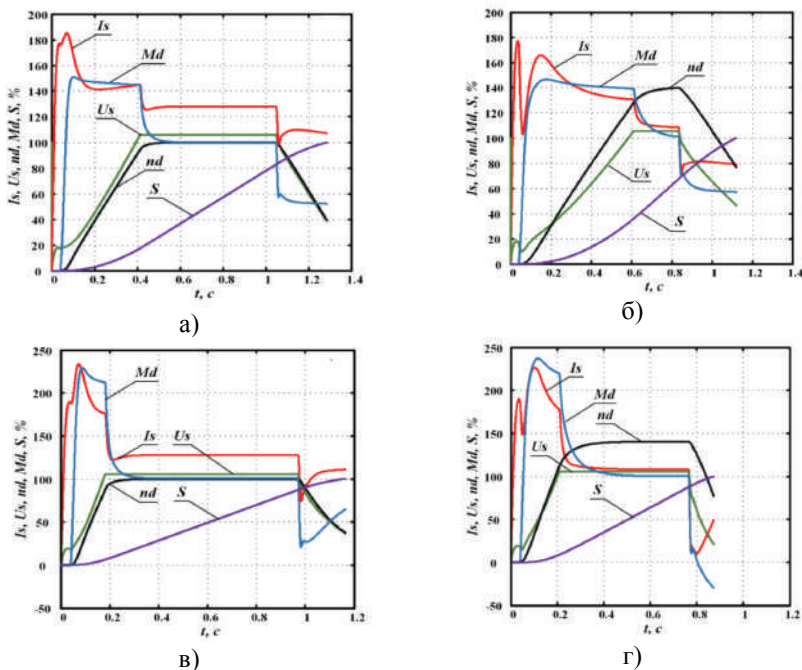


Рисунок 3.29 – Координати ЕП (МР) СП у штатному режимі, при «м'якому» ЗІ й заданні швидкості: а – 100%, б – 140% від номінальної; при «жорсткому» ЗІ й заданні швидкості: в – 100%, г – 140% від номінальної

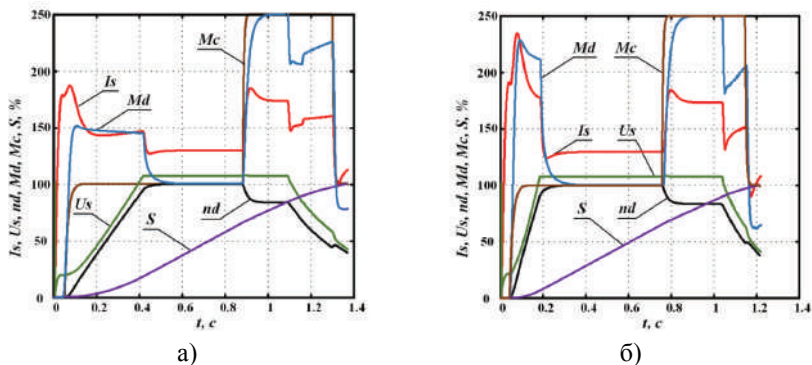


Рисунок 3.30 – Координати ЕП (МР) СП у нестационарному режимі («потрапляння каменя»): а – при «м'якому» ЗІ, заданні швидкості 100% від номінальної; б – при «жорсткому» ЗІ, заданні швидкості 100% від номінальної

Вигнута форма струму на початку переведення обумовлена процесами намагнічування електродвигуна, які займають близько 20 мс. Вплив задатчика інтенсивності на кратність пускового струму і час переведення аналогічно розглянутому раніше процесу в СПР. При застосуванні жорсткого ЗІ на завданнях вище 100% спостерігається перехід двигуна в генераторний режим при гальмуванні, що передбачає рекуперацію, або скидання енергії гальмування на резистор. Оскільки ПЧ з можливістю рекуперації значно дорожче і складніше за конструкцією, краще використовувати такий закон керування ПЧ, щоб не виходити в генераторний режим під час гальмування. Оскільки різниця між м'яким ЗІ із завданням швидкості 140% і жорстким ЗІ із завданням 100% невелика, то доцільно розглядати один із цих режимів як основний.

Таким чином, шляхом таких налаштувань САР положення гостряків стрілочного переводу, як час ЗІ і обмеження задання швидкості, можна домогтися скорочення часу переведення на 48% (від 1.29 с до 0.87 с), обмеживши струм статора при цьому на рівні $2.37 I_n$, що є допустимим рівнем перевантаження для використовуваних у стрілочних переводах електродвигунів.

На рис. 3.30, аналогічно рис. 3.27, показано, що різке зростання навантаження при потраплянні на деякий час стороннього предмета між гостряком і рамною рейкою не призводить до суттєвих наслідків - загальний час знижується незначно (не більше 0,1 с), процес переведення завершується контролювано, зупинки в непереведеному стані не відбувається. При цьому час ЗІ не впливає на завершення переведення при потраплянні стороннього предмета, оскільки як при «м'якому», так і при «жорсткому» ЗІ осцилограми основних координат привода аналогічні.

3.5. Синтез аналітичних залежностей оптимального керування методом регресійного аналізу

У результаті проведення на математичній моделі ряду двофакторних експериментів були отримані масиви статистичних даних. При цьому факторами (аргументами) досвіду виступали фізичні величини часу розгону, моменту початку гальмування і напруги задавання перетворювача частоти – t, l, uz . За результатами проведення в дослідів ці змінні відповідно приймали значення $t_1, t_2, \dots, t_n, l_1, l_2, \dots, l_n, uz_1, uz_2, \dots, uz_n$. Вибрані раніше критерії оптимізації – пружна сила в тязі F_{12} , момент імпульсу стрілки M_i , час переведення ts і величина електричних втрат у двигуні P_i – це отриманий результат. Їх показники при значеннях, наприклад, uz , рівних uz_1, uz_2, \dots, uz_n і t , рівних t_1, t_2, \dots, t_n будуть відповідно $f_{12_1}, f_{12_2}, \dots, f_{12_n}$. З точки зору теорії ймовірностей вони є реалізаціями випадкової величини F_{12} , що залежить від детермінованих аргументів uz і t :

$$F_{12} = f_{12}(uz, t) \quad (3.16)$$

Але величина F_{12} у формулі (3.16) буде випадковою лише в тому випадку, коли в аналітичній залежності $f_{12}(uz, t)$, крім детермінованих аргументів uz і t , будуть наявними ще й деякі випадкові величини. Позначивши їх B_1, B_2, \dots, B_m , отримаємо:

$$F_{12} = f_{12}(uz, t, B_1, B_2, \dots, B_m) \quad (3.17)$$

Вираз (3.17) можна розглядати як теоретичну залежність F_{12} від uz і t .

Основним завданням дослідження є визначення статистичних характеристик величин B_1, B_2, \dots, B_m , що забезпечують появу значень f_{12_i} при заданих uz_i і t_i .

Для розв'язання цієї задачі доцільно використовувати метод найменших квадратів, згідно з яким вибіркові математичні очікування параметрів теоретичної кривої b_1, b_2, \dots, b_m повинні бути такими, щоб сума квадратів відхилень експериментальних значень f_{12_i} від теоретичних $f_{12}(uz_i, t_i, b_1, b_2, \dots, b_m)$ була мінімальною:

$$L(b_1, b_2, \dots, b_m) = \sum_{i=1}^n (f_{12_i} - f_{12}(uz_i, t_i, b_1, b_2, \dots, b_m))^2 \rightarrow \min \quad (3.18)$$

У загальному випадку розв'язання цього завдання досягається шляхом прирівнювання до нуля приватних похідних по всіх змінних і рішенням системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial L(b_1, b_2, \dots, b_m)}{\partial b_k} \\ k = \overline{1, m} \end{cases} \quad (3.19)$$

Отримані рішення перевіряються на виконання достатніх умов екстремуму.

За вид функції (3.18) прийнятий степеневий багаточлен типу $y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4y^2 + \dots + b_mx^n + b_{m+1}y^n$, де $1 \leq m \leq 7$. Дослідження передбачає отримання виразів 1...7 степені, що описують поведінку об'єкта для проведення порівняльного аналізу якості апроксимації.

Таким чином, як поодинокий випадок отримуємо:

$$F_{12} = \sum_{j=1}^m b_j \psi_j(uz, t), \quad 1 \leq m \leq 7 \quad (3.20)$$

де функції $\psi_j(uz, t)$ – базисні функції $1, x, y, x^2, y^2, \dots, x^m, y^m$.

Із теорії лінійних просторів [34] відомо, що в n -вимірному просторі не може бути більше, ніж n базисних елементів. У цьому випадку, якщо кількість базисних функцій дорівнює n , то отримуємо задачу розкладання вектора

$$f_{12} = \{f_{12_1}, f_{12_2}, \dots, f_{12_n}\} \quad (3.21)$$

по базису в n -вимірному лінійному просторі. З точки зору МНК, це відповідає проходженню теоретичної кривої через усі експериментальні точки. У разі, якщо $m < n$, лінійні комбінації $\psi_j(uz, t)$ утворюють підпростір розмірності m в n -вимірному просторі. Тоді вираз (3.20) – це найкраще наближення n -мірного вектора (3.21) в підпросторі розмірності m . При цьому під «найкращим» розуміється таке наближення (3.18), при якому мінімізується сума квадратів різниць координат вектора експериментальних точок (3.21) і вектора теоретичних значень (3.20).

Спростити обчислення параметрів апроксимації дозволяє побудова ортонормованого базису вибраних лінійно-незалежних базисних функцій. Найбільш відома процедура отримання ОНБ – метод Соніна-Шмідта, згідно з яким для наявного базису $(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m)$ перша функція просто нормується:

$$\varphi_1 = \frac{\psi_1}{\|\psi_1\|}, \quad (3.22)$$

а з кожної наступної функції віднімаються складові, колінеарні всім попереднім функціям

$$\psi_k^* = \psi_k - (\psi_k, \varphi_1)\varphi_1 - (\psi_k, \varphi_2)\varphi_2 - \dots - (\psi_k, \varphi_{k-1})\varphi_{k-1}. \quad (3.23)$$

Отримана функція ψ_k^* ортогональна всім $(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{k-1})$. Її норма

$$\varphi_k = \frac{\psi_k^*}{\|\psi_k^*\|} \quad (3.24)$$

Отримані таким чином функції $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_j$ утворюють ОНБ.

Для випадку застосування ОНБ коефіцієнти апроксимації залежності (3.19) знаходяться за наступною формулою:

$$\begin{cases} b_k = (f_{12}, \varphi_k) \\ k = \overline{1, m} \end{cases} \quad (3.25)$$

а найменше значення функції (3.18) буде

$$L_{\min} = \|f_{12}\|^2 - \sum_{j=1}^m b_j^2, \quad (3.26)$$

і воно не залежить від базисних функцій. Це значить, що якщо додати ще одну базисну функцію φ_{j+1} , яка ортонормована до всіх останніх, то попередні коефіцієнти перераховувати не треба, достатньо за (3.25) обчислити новий коефіцієнт b_{m+1} .

Отже, перша ітерація дослідження передбачає лінійну модель (поліном 1 ступеня) двофакторного експерименту:

$$f12 = b_0 + b_1 uz + b_2 t \quad (3.27)$$

У цьому випадку базисні функції 1, uz , t , і вони не ортонормовані. Побудуємо з них ОНБ. Перша функція 1 нормується:

$$\|1\|^2 = \sum_{i=1}^n 1^2 = n. \quad (3.28)$$

Позначивши нормовану базисну функцію як $\varphi_0(uz, t)$, отримаємо

$$\varphi_0(uz, t) = \frac{1}{\sqrt{n}}. \quad (3.29)$$

Ортогоналізуємо uz і $\varphi_0(uz, t)$:

$$\psi_{uz}^*(uz, t) = uz - \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i=1}^n \left(\frac{uz_i}{\sqrt{n}} \right) = uz - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n uz_i \quad (3.30)$$

позначивши середнє арифметичне uz_i як

$$m_{uz}^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n uz_i \quad (3.31)$$

отримаємо другу функцію ОНБ:

$$\begin{aligned} \psi_{uz}^*(uz, t) &= uz - m_{uz}^*; \quad \|\psi_{uz}^*\| = \sum_{i=1}^n (uz_i - m_{uz}^*)^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow \varphi_{uz}(uz, t) &= \frac{uz - m_{uz}^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (uz_i - m_{uz}^*)^2}} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Провівши аналогічні дії, отримаємо третю функцію:

$$\varphi_t(uz, t) = \frac{t - m_t^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i - m_t^*)^2}} \quad (3.33)$$

Залишається ортогоналізувати між собою $\varphi_{uz}(uz, t)$ і $\varphi_t(uz, t)$. Для цього достатньо експериментальні точки вибрати у вузлах прямокутної таблиці $m \times l$, тобто провести повний факторний експеримент. У дослідженні для цього випадку $l = 61$, $m = 101$. Ці значення мають фізичний смисл якості кроку розрахунку пружної сили під час зміни параметрів напруги задавання й часу розгону електропривода.

Позначимо експериментальні значення $f12_{ij}$ і запишемо їх у вигляді матриці:

$$f12_{ij} = \begin{cases} f12_{11} & f12_{12} & \dots & f12_{1m} \\ f12_{21} & f12_{22} & \dots & f12_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f12_{l1} & f12_{l2} & \dots & f12_{lm} \end{cases} \quad (3.34)$$

Замість (3.27) будемо лінійну модель у вигляді

$$f12 = b_0 \varphi_0(uz, t) + b_{uz} \varphi_{uz}(uz, t) + b_t \varphi_t(uz, t) \quad (3.35)$$

За (3.25) її коефіцієнти

$$b_0 = (f12, \varphi_0) = \frac{1}{\sqrt{lm}} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m f12_{ij} \quad (3.36)$$

$$b_{uz} = (f12, \varphi_{uz}) = \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m f12_{ij} (uz_i - m_{uz}^*)}{\sqrt{m \sum_{i=1}^l (uz_i - m_{uz}^*)^2}} \quad (3.37)$$

$$b_t = (f12, \varphi_t) = \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m f12_{ij} (t_i - m_t^*)}{\sqrt{l \sum_{i=1}^l (t_i - m_t^*)^2}} \quad (3.38)$$

Наступні ітерації в дослідженні припускають підвищення ступеня апроксимуючого полінома, і, відповідно, застосування додаткових базисних функцій. Аналогічно береться ОНБ по кожній змінній окремо, і добуток функцій різних аргументів буде утворювати ОНБ на сітці ПФЕ. Після побудови ОНБ задавання МНК вирішується стандартними методами. Коефіцієнти моделі визначаються за (3.25).

Розв'язання завдання з отримання аналітичного виразу для досліджуваних критеріїв оптимізації є важливим етапом розробки системи керування частотним перетворювачем у системах регульованого електроприводу стрілочного переводу, бо дозволяє визначити оптимальні режими роботи стрілки за обраними критеріями. Числова і графічна побудова моделей для двофакторного експерименту виконана за допомогою ПО MATLAB. Далі наведені аналітичні залежності, а на рис. 3.31 – 3.34 графічні побудови залежностей. Показана апроксимація даних для розподілу критеріїв оптимізації при векторній системі керування з трапецеїдальною тахограмою швидкості (рис. 3.10 – 3.13).

Слід зауважити, що отримані за (3.35) залежності можна значно спростити. Для цього пропонується, що якщо довірчий інтервал будь-якого коефіцієнта b_k на заданому рівні значимості включає 0, то на цьому рівні значимості додатком $b_k \varphi_k(x)$ можна знехтувати. Відповідно до вищевикладеного методу для кожного ступеня спочатку розраховувався максимальний набір базисних функцій; потім відкидалися ті, коефіцієнт при яких відповідав умові:

$$\left| \frac{b_{k \max}}{b_k} \right| > 10000 \quad (3.39)$$

а після цього для відсортованих базисних функцій повторно визначалися коефіцієнти апроксимації.

Спрощені аналітичні вирази апроксимованих даних набувають наступного вигляду (для степені 7):

$$\begin{aligned} F12_7(Uz, t) = & 372.3 \cdot t^2 + 12056.4 \cdot Uz^2 \cdot t + 208.8 \cdot Uz \cdot t^2 - 1830.6 \cdot Uz^2 \cdot t^2 - \\ & - 12.3 \cdot t^3 + 112.3 \cdot Uz^3 \cdot t^3 - 2401.1 \cdot Uz^4 \cdot t^2 + 55.2 \cdot Uz^4 \cdot t^3 - \\ & - 2.3 \cdot Uz^4 \cdot t^4 + 4794.6 \cdot Uz^5 \cdot t^2 - 238.4 \cdot Uz^5 \cdot t^3 + 3.58 \cdot Uz^5 \cdot t^4 - \\ & - 22351 \cdot Uz^6 \cdot t + 130.5 \cdot Uz^6 \cdot t^2 + 18.2 \cdot Uz^6 \cdot t^3 - 51075.18 \cdot Uz^7 \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$Mi_7(Uz, l) = -35.7 \cdot Uz \cdot l^2 - 8.9 \cdot Uz \cdot l^3 + 126.1 \cdot Uz^2 \cdot l^3 - 3.0 \cdot Uz^2 \cdot l^4 + \quad (3.41)$$

$$+ 0.027 \cdot Uz^2 \cdot l^6 - 0.36 \cdot Uz^3 \cdot l^6 + 1.62 \cdot Uz^4 \cdot l^6 - 2.37 \cdot Uz^5 \cdot l^6$$

$$Pi_7(Uz, t) = 3.42 \cdot t^2 + 207.4 \cdot Uz^2 \cdot t + 2.3 \cdot Uz \cdot t^2 - 36.3 \cdot Uz^2 \cdot t^2 - 0.02 \cdot t^3 + \quad (3.42)$$

$$+ 0.23 \cdot Uz^2 \cdot t^3 + 2.4 \cdot Uz^3 \cdot t^3 - 4.03 \cdot Uz^4 \cdot t^2 - 2.7 \cdot Uz^4 \cdot t^3 + 35.4 \cdot Uz^5 \cdot t^2 +$$

$$+ 0.15 \cdot Uz^5 \cdot t^3 - 272.5 \cdot Uz^6 \cdot t + 778.2 \cdot Uz^7$$

$$ts_7(Uz, t) = 0.018 \cdot t^2 + 0.86 \cdot Uz^2 \cdot t - 0.0015 \cdot Uz \cdot t^2 - 0.1 \cdot Uz^2 \cdot t^2 - 0.0008 \cdot t^3 + \quad (3.43)$$

Результати у вигляді поверхонь наведені на рис. 3.31 – 3.34. На рисунках умовно позначені: а – вихідний масив експериментальних точок; б – апроксимація поліномом 7 ступеня.

Вирази (3.40) – (3.43) описують критерій оптимізації з точки зору впливів системи керування. Оскільки коефіцієнти поліномів є математичними очікуваннями критерію оптимізації як випадкової величини з довірчим інтервалом 95%, можна говорити про інваріантності отриманої формули. З чого випливає, що у разі розбіжності деяких вихідних параметрів моделі з реальним об'єктом у межах 5% загальний вигляд залежності залишиться таким самим. За допомогою отриманих залежностей процес синтезу рекомендацій у вигляді таблиць типу можна автоматизувати шляхом застосування алгоритму задавання уставок мінімізації. Цей алгоритм передбачає в якості вихідних даних залежності критеріїв у вигляді (3.31) – (3.34) і певні значення (у відсотках) уставки мінімізації cr .

Сенс цього значення в тому, що в процесі обробки формули алгоритм вибирає ті значення керувальних впливів, при яких критерій оптимізації менше, ніж його задане значення за допомогою cr (для $F_{12}(Uz, t)$):

$$F_{12}(Uz, t)_{cr} = (\max(F_{12}(Uz, t) - \min(F_{12}(Uz, t))) \cdot \frac{cr}{100\%} + \min(F_{12}(Uz, t))) \quad (3.44)$$

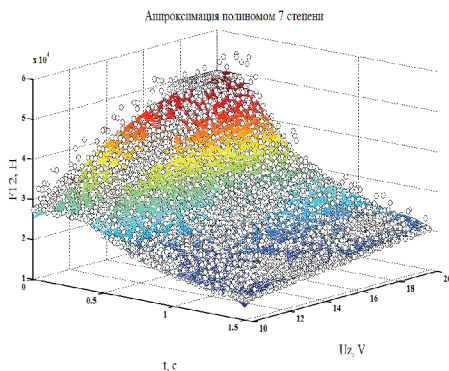


Рисунок 3.31 – Результати апроксимації степеневим поліномом масиву даних за критерієм F_{12}

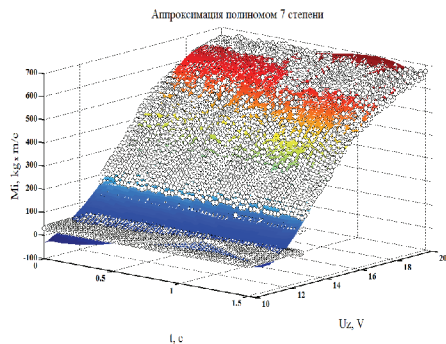


Рисунок 3.32 – Результати апроксимації степеневим поліномом масиву даних за критерієм M_i

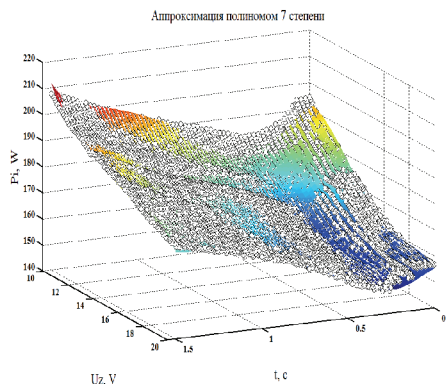


Рисунок 3.33 – Результати апроксимації степеневим поліномом масиву даних за критерієм P_i

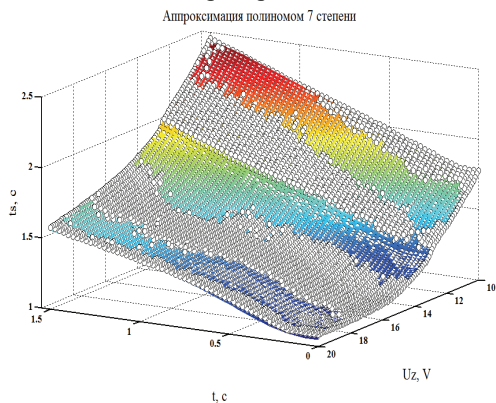


Рисунок 3.34 – Результати апроксимації степеневим поліномом масиву даних за критерієм ts

Алгоритм передбачає графічну візуалізацію у вигляді карт параметрів. На таких картах кольором виділені області допустимих значень керувальних впливів. На рис. 3.35 – 3.40 праворуч показана геометрична інтерпретація уставки мінімізації cr .

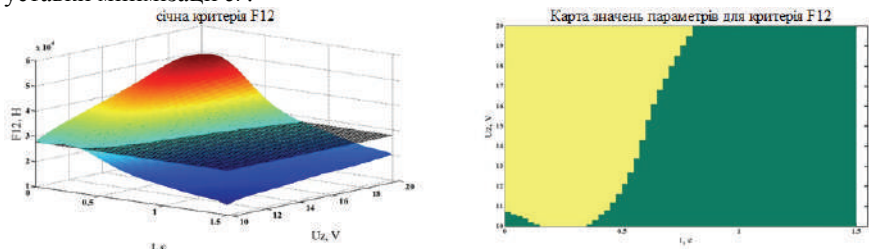


Рисунок 3.35 – Графічний сенс уставки мінімізації й карти параметрів для критерія F_{12}

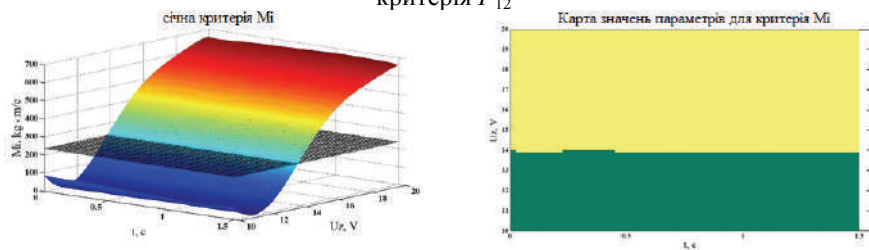


Рисунок 3.36 – Графічний сенс уставки мінімізації й карти параметрів для критерія M_i

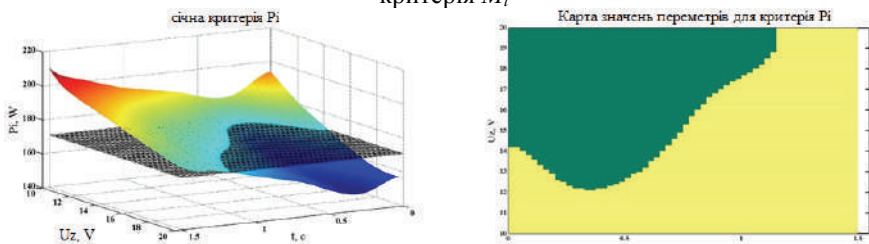


Рисунок 3.37 – Графічний сенс уставки мінімізації й карти параметрів для критерія P_i

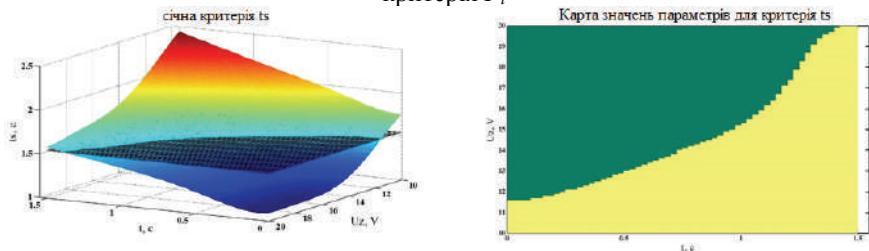


Рисунок 3.38 – Графічний сенс уставки мінімізації й карти параметрів для критерія ts

Це січна площина на поверхні відповідного критерію. Варіюючи значення cr , можна зміщувати січну по осі Z . На картах значень параметрів темним відтінком позначені ті інтервали, при яких значення критерію, обчислене за залежностями (3.40) – (3.43), знаходиться під площиною cr , тобто менше значення, отриманого за (3.44). Особливо цікавить оптимізація не за якимось одним критерієм, а загальна за всіма чотирма одночасно. Знайти такі значення дозволяє накладення карт за заданими критеріями. У результаті виходить карта загальних значень, на якій видно, при яких значеннях вхідних величин можна досягти заданих за допомогою cr уставок усіх критеріїв одночасно. Така карта є геометричною ілюстрацією загальних оптимізованих параметрів (рис 3.39).

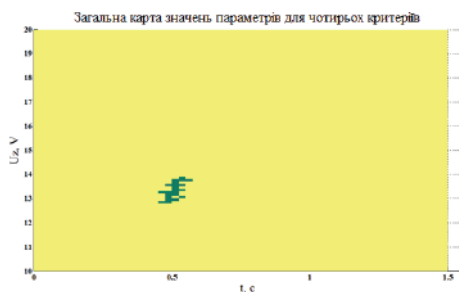


Рисунок 3.39 – Приклад вибору параметрів за картою із заданими значеннями критеріїв оптимізації

Таким чином, розв'язана задача з отримання аналітичної залежності експериментальних даних. Розроблені алгоритми дозволяють отримати залежності критеріїв у вигляді поліномів 1 – 7 ступенів, а також графічні пояснення до них. На рис. 3.40 наведені порівняльні осцилограми перехідних процесів для прямого пуску, оптимізації за обраним критерієм і для загальних оптимізованих параметрів електропривода.

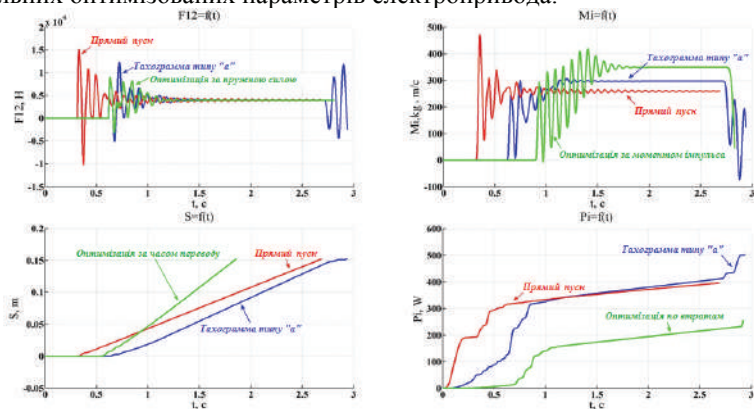


Рисунок 3.40 – Порівняння процесів прямого пуску з отриманими результатами

3.6. Експериментальні дослідження

Експериментальні дослідження проводилися з перетворювачами частоти «Simovert» і «Micromaster» фірми Siemens (рис. 3.41, де а, б – ПЧ «Simovert», в – ПЧ «Micromaster») на стрілочному приводі типу СП-6 в лабораторії електропривода УкрДУЗТ. Метою експериментів було збільшення швидкості переводу та отримання осцилограм основних координат процесу. Результати наведені на рис. 3.42.

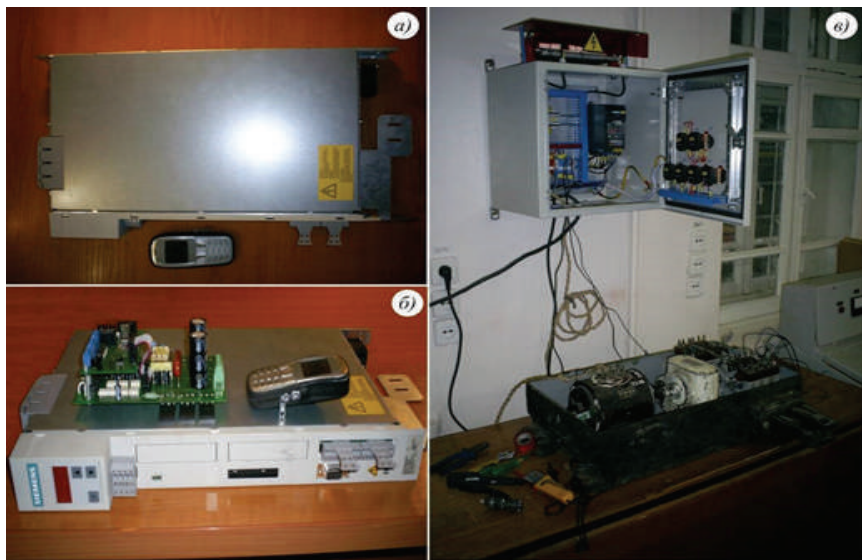


Рисунок 3.41 – Пристрої для досліджень

Слід зауважити, що для уникнення помилок перетворювача штучно були задані параметри мережі 60 Гц (Північноамериканський стандарт живлення) замість 50 Гц, що дозволило при 195% задавання отримати 118 Гц. Зменшення часу переведення забезпечене до 0,9 с при задаванні 195% з 2,3 с при 100% задавання частоти.

Безпосередньо перед початком експериментальних робіт у приміщенні для ремонту електроприводів служби СЦБ станції Основа були проведені підготовчі роботи з метою перевірки коректності функціонування релейних модулів і плати перетворювача, що дозволило звести до мінімуму час простою стрілки № 530 з експлуатаційного графіка.

У результаті проведення експерименту (рис. 3.43) були отримані осцилограми координат струмів і напруг живильної лінії, струмів статора і напруги керування ПЧ з оптопар.

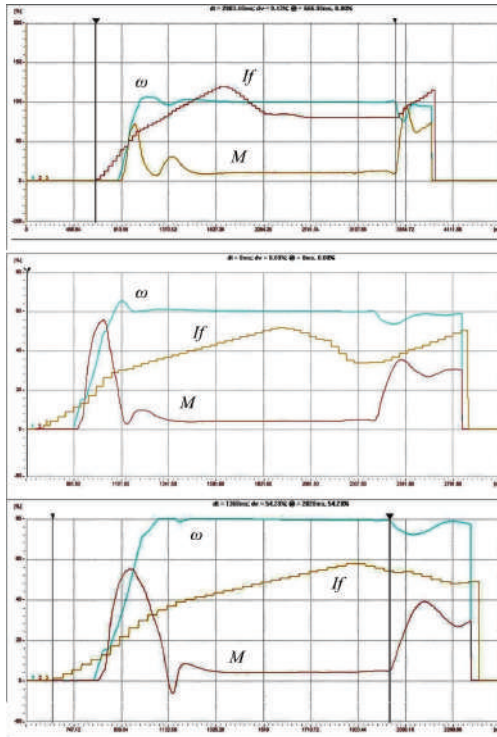


Рисунок 3.42 – Результати лабораторних експериментів

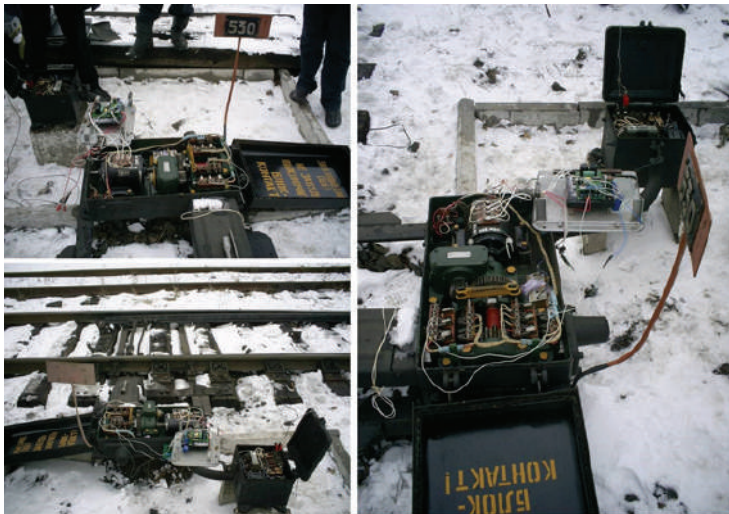


Рисунок 3.43 – Хід експериментів на СП №530 станції Основа Південної залізниці

Так само було проведено низку експериментів на діючому обладнанні. Для цього з дозволу служби «Ш» Південної залізниці використовувався привід стрілки №530 ст. Основа. У результаті експерименту отримані осцилограми струмів статора для прискороного переведення і реверсу. З осцилограм (рис. 3.44, 3.45) видно, що досягнуте зменшення часу переведення до 1,7 с з 3-5 с. штатних для цього типу переведення з двигуном постійного струму МСП- 0.25.

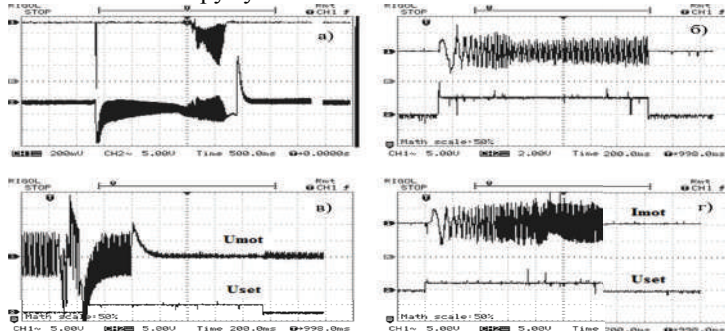


Рисунок 3.44 – Осцилограми, отримані в ході експериментів: а – напруга і струм у живильній лінії, б – напруга керування і струм статора при частоті 50 Гц; в, г – те ж, при частоті 100 Гц

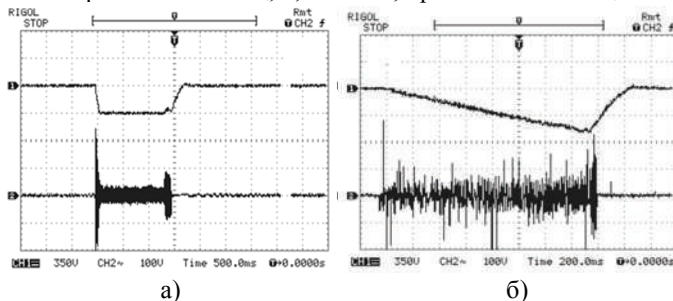


Рисунок 3.45 – Осцилограми, отримані в ході експериментів: а – напруга керування і струм статора при частоті 50 Гц, прямий пуск; б – те саме, при частоті 100 Гц, пуск від 3I

Результати промислового експерименту підтвердили доцільність застосування частотно-регульованого асинхронного електропривода стрілочного переводу. Час переведення стрілки при частоті напруги живлення двигуна 100 Гц, близько 1,7 с. У порівнянні з типовою п'ятидотровою схемою керування час переводу знизився на 50-60%.

Таким чином, компоненти узагальненого векторного критерію ефективності роботи ЕП СП з АД для розглянутої конструкції має наступні значення: час переводу $t_s = 1,64$ с, величина пружної сили в робочій тязі $F_{12} = 10,64$ кН, величина імпульсу удару гострия $M_i = 58,74$ кг·м/с, а також загальні втрати системи СП $\Sigma P = 0,161$ кВт.

РОЗДІЛ 4

ЕЛЕКТРОПРИВОД СТРІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ НА БАЗІ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ДВИГУНА

Усунення вказаних у попередньому розділі проблем електропривода стрілочного переводу на базі АД полягає у використанні з цією метою вентильно-індукторного двигуна, що має більш високий, ніж в АД, пусковий момент.

Традиційна схема електропривода на базі ВІД була апробована Петрушиним А.Д. [35]. Однак істотних переваг над системами на базі ДПС і АД вона не показала.

Тому була поставлена задача виявлення резервів підвищення робочих властивостей традиційної схеми електропривода на базі ВІД за рахунок застосування системи керування, що дозволяє підвищити якісні показники електромагнітного моменту.

Водночас виникла потреба розгляду такої кінематичної схеми, котра б дозволила усунути її багатомасовість із пружними елементами і зазорами, а також наявність знижувального редуктора.

Для цього було необхідно передусім запропонувати двигун, який підходить за своїми масо-габаритними й електрофізичними параметрами до нової кінематичної схеми, й адаптувати всю систему до установки в порожній шпалі.

4.1. Математична та імітаційна моделі

Моделювання вентильно-індукторного двигуна є специфічною задачею, оскільки процеси, що протікають у машині, є суцільно нелінійними і взаємозв'язаними як електричними, так і магнітними координатами, що впливає на механічні процеси. У відомих роботах [36-38] пропонуються наступні підходи до моделювання, однак вони мають істотні недоліки, які пропонується усунути, застосувавши оригінальний підхід до моделювання ВІД.

За об'єкт моделювання був вибраний двигун типу ЕМСУ-0,25-160В, розроблений д.т.н., проф. Петрушиним А.Д. Цей двигун був вибраний не випадково, а тому, що він проходив випробування як приводний на штатних приводах типу СП6 і показав свою працездатність [35].

Для моделювання необхідно вибрати узагальнені механічні й електричні координати цієї системи. Виберемо наступні узагальнені координати: узагальнена координата q_k , узагальнена швидкість \dot{q}_k , узагальнений імпульс сили p_k , узагальнена сила f_k . У цьому випадку для електромеханічної системи характерні наступні змінні узагальнені електричні координати: q, i, u, ψ . Схема трифазного ВІД показана на рис. 4.1, що повністю відповідає досліджуваному ЕМСУ-0,25. На схемі позначено e_A, e_B, e_C – напруга джерел живлення; r_A, r_B, r_C – активні опори відповідних фаз статора; i_A, i_B, i_C – струми у відповідних фазах статора; U_A, U_B, U_C – напруга на відповідних фазах без урахування падіння напруги на їхніх активних

опорах; Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C – потокозчеплення відповідних фаз Основні енергетичні координати ВІД подані в табл. 4.1.

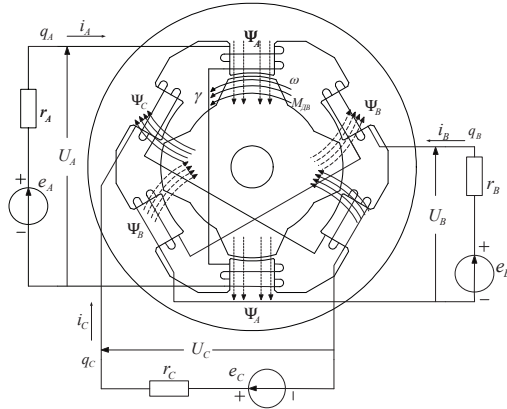


Рисунок 4.1 – Схема трифазного ВІД

Таблиця 4.1 – Основні енергетичні координати ВІД

Узагальнена координата	Механічна	Електрична		
	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
q_k	γ	q_A	q_B	q_C
q'_k	ω	i_A	i_B	i_C
p_k	$J\omega$	ψ_A	ψ_B	ψ_C
f_k	0	0	0	0
Q_k	M_C	e_A	e_B	e_C

Далі за методикою, викладеною в [13], були отримані наступні рівняння для динамічної системи ВІД:

рівняння механічного балансу

$$\left[\begin{aligned} & \frac{\partial \left(\int_0^{i_A} \Psi_A(i_A, i_B, i_C, \gamma) di_A \right)}{\partial \gamma} + \frac{\partial \left(\int_0^{i_B} \Psi_B(i_A, i_B, i_C, \gamma) di_B \right)}{\partial \gamma} + \\ & \frac{\partial \left(\int_0^{i_C} \Psi_C(i_A, i_B, i_C, \gamma) di_C \right)}{\partial \gamma} \end{aligned} \right] - J \frac{d\omega}{dt} - \alpha\omega + M_C = 0, \quad (4.1)$$

рівняння електричного балансу фази А

$$e_A - \frac{d\Psi_A(i_A, i_B, i_C, \gamma)}{dt} - \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \left(\int_0^{i_B} \Psi_B(i_A, i_B, i_C, \gamma) di_B + \int_0^{i_C} \Psi_C(i_A, i_B, i_C, \gamma) di_C \right)}{\partial i_A} \right] - r_A i_A = 0, \quad (4.2)$$

Аналогічно отримано рівняння електричного балансу фаз В і С.

Електромагнітний момент машини – це вираз у дужках рівняння (4.1), котре є класичним рівнянням, що описує механічну систему будь-якого електродвигуна. Рівняння (4.1) – (4.2) є математичною моделлю ВІД. Далі необхідно встановити залежності між потокозчепленнями фаз Ψ_A , Ψ_B , Ψ_C , з одного боку, й узагальненими координатами, а також їх похідними - з іншого. Значення потокозчеплень доцільно розрахувати в двовірному представленні з використанням методу кінцевих елементів для плоскопаралельної задачі. У цьому випадку можна визначити значення потокозчеплень фаз Ψ_A , Ψ_B , Ψ_C ВІД та значення електромагнітного моменту.

Розрахунок магнітного поля здійснювався методом кінцевих елементів, який полягає в мінімізації нелінійного енергетичного функціонала [39]. На рис. 4.2 показана область розрахунку, яка розбита на кінцеві трикутні елементи. При цьому геометрія розрахункової області може змінюватися у залежності від положення ротора.

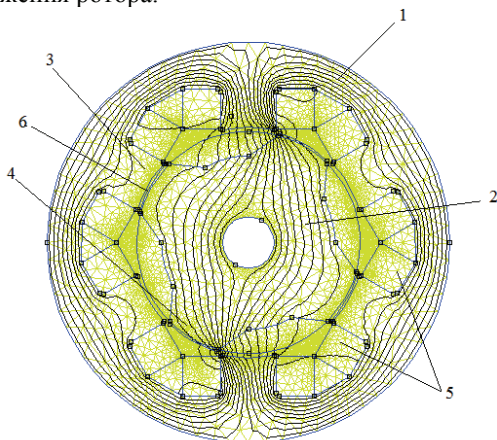


Рисунок 4.2 – Розрахункова область і зображення магнітного поля при нульових початкових умовах: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – зубець статора; 4 – зубець ротора; 5 – обмотка статора; 6 – повітряний зазор

Найбільш доцільно для розв’язання поставленої задачі використався програмний комплекс FEMM [39].

На рис. 4.3 показана розрахункова схема ВІД у середовищі FEMM в зубцевій зоні при узгодженому і розузгодженому положеннях, а також значення магнітної індукції для різних областей машини.

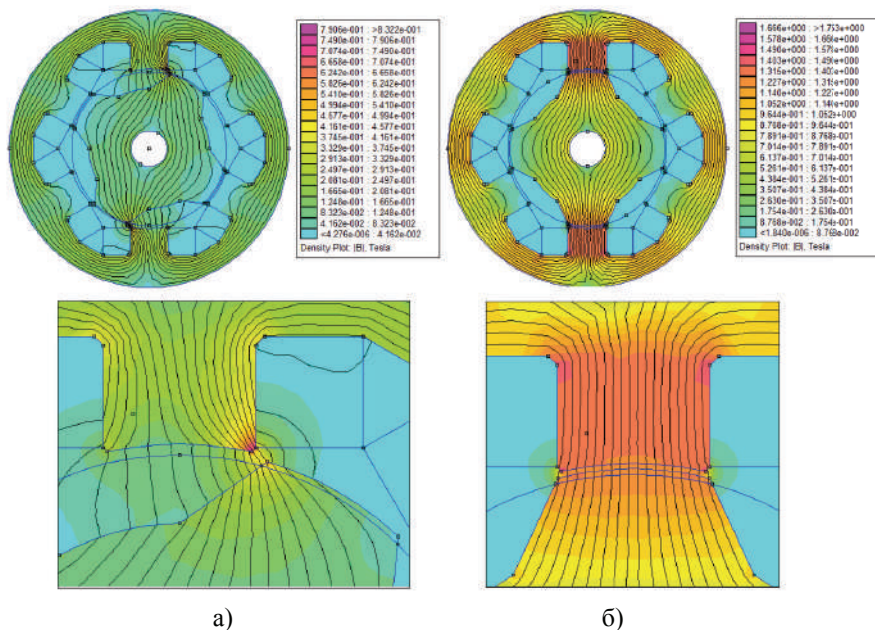


Рисунок 4.3 – Розподіл магнітного поля в зубцях ВІД: а – розузгоджене положення; б – узгоджене положення

Особливістю запропонованої моделі є те, що розрахунок магнітного кола в середовищі FEMM здійснений з урахуванням взаємного впливу поточкозчеплень трьох фаз. Граничними областями розрахунку є положення зубців статора і ротора – від розузгодженого положення до наступного за чергою розузгодженого положення.

Для отримання неперервних залежностей поточкозчеплень результати цифрового моделювання були апроксимовані неперервними функціями методом на підставі поліномів Чебишева. Апроксимація виконувалася за відомим алгоритмом [13].

Здійснивши ряд перетворень, рівняння електричного балансу фази А приймає вигляд. Аналогічно отримано рівняння електричного балансу фаз В і С.

$$\begin{aligned}
 \frac{di_A}{dt} = & \frac{Aa(i_A, i_B, i_C, \gamma)}{D(i_A, i_B, i_C, \gamma)} e_A + \frac{Ba(i_A, i_B, i_C, \gamma)}{D(i_A, i_B, i_C, \gamma)} e_B + \\
 & + \frac{Ca(i_A, i_B, i_C, \gamma)}{D(i_A, i_B, i_C, \gamma)} e_C + \frac{Ka(i_A, i_B, i_C, \gamma)}{D(i_A, i_B, i_C, \gamma)} \omega + \frac{Laa(i_A, i_B, i_C, \gamma)}{D(i_A, i_B, i_C, \gamma)} i_A R_A + \\
 & + \frac{Lab(i_A, i_B, i_C, \gamma)}{D(i_A, i_B, i_C, \gamma)} i_B R_B + \frac{Lac(i_A, i_B, i_C, \gamma)}{D(i_A, i_B, i_C, \gamma)} i_C R_C;
 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Для спрощення моделі були створені m-файли – функції F_A , F_B , F_C відповідних фаз у залежності від вхідних параметрів (E_A , R_A , E_B , R_B , E_C , R_C , ω ,

γ, i_A, i_B, i_C). У результаті система диференціальних рівнянь ВІД приймає наступний вигляд

$$\begin{cases} \frac{di_A}{dt} = F_A(E_A, R_A, E_B, R_B, E_C, R_C, \omega, \gamma, i_A, i_B, i_C), \\ \frac{di_B}{dt} = F_B(E_A, R_A, E_B, R_B, E_C, R_C, \omega, \gamma, i_A, i_B, i_C), \\ \frac{di_C}{dt} = F_C(E_A, R_A, E_B, R_B, E_C, R_C, \omega, \gamma, i_A, i_B, i_C), \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{(M_{дв}(i_A, i_B, i_C, \gamma) - \alpha\omega - M_C)}{J}, \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega. \end{cases} \quad (4.4)$$

Функції F_A, F_B, F_C далі використовуються для створення імітаційної моделі трифазного ВІД у MATLAB Simulink [9, 40]. На підставі системи рівнянь (4.4) отримаємо функціональну схему математичної моделі трифазного ВІД (рис. 4.4).

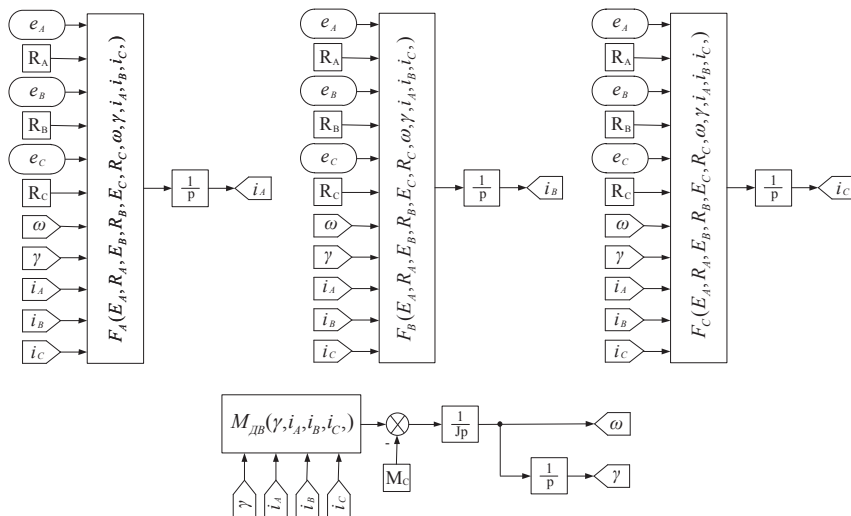


Рисунок 4.4 – Функціональна схема математичної моделі ВІД

Така схема дає можливість отримати імітаційну модель у MATLAB Simulink (рис.4.5) [9, 40].

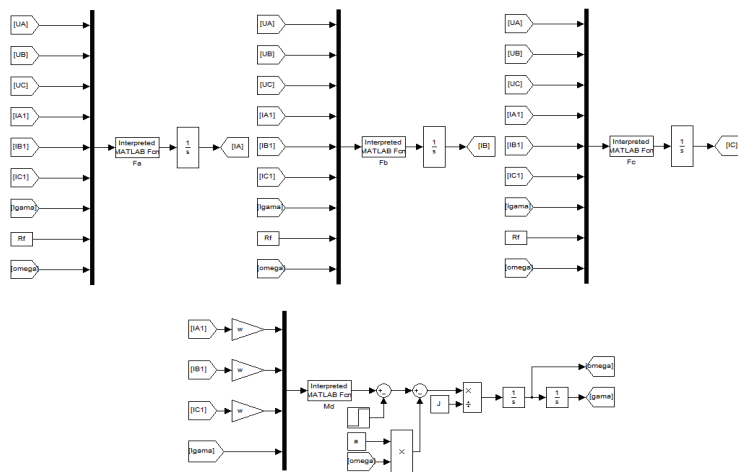


Рисунок 4.5 – Імітаційна модель трифазного ВІД

Наступний крок – створення системи керування ВІД, задача якої полягає у забезпеченні необхідних статичних характеристик електродвигуна шляхом підтримки на заданому рівні струму уставки (I_y).

При моделюванні системи керування використовувався блок `matlab function`, у якому здійснюється її програмна реалізація. На отриманій моделі імітувався процес пуску машини з режимом струмообмеження й одиночною симетричною комутацією фаз. Моделювання здійснювалося для $M_{оп} = 1 \text{ Нм}$. Результати моделювання наведені на рис. 4.6, де показана напруга та фазні струми на трьох обмотках двигуна, а також електромагнітний момент та швидкість обертання двигуна.

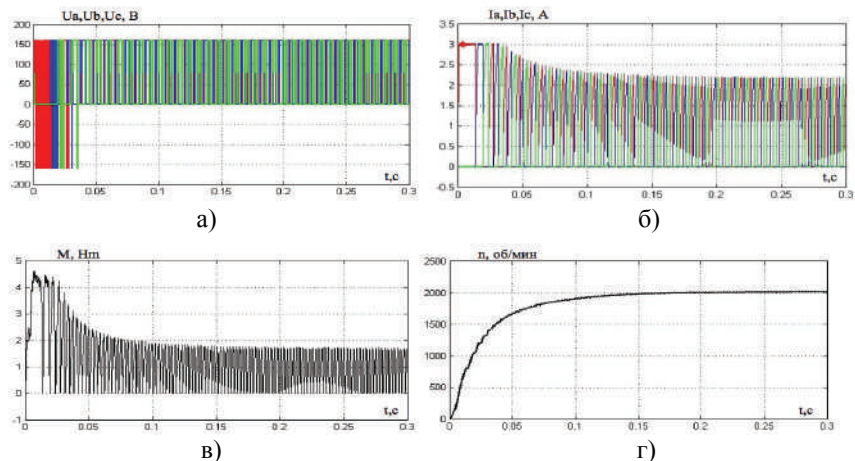


Рисунок 4.6 – Осцилограма фазних напруг та фазних струмів двигуна: а, б; електромагнітного моменту та швидкості двигуна: в, г

4.2. Дослідження режимів роботи стрілочного переводу

Отримана математична модель – це дуже складна структура, що включає до себе багатовимірні поверхні. Для підвищення швидкодії такого об'єкта необхідно його максимально спростити, не втративши якості розрахунку. З цією метою був проведений аналіз впливу функцій, отриманих у результаті апроксимації на об'єкт управління. При цьому багатовимірну поверхню покажемо у вигляді кількох тримірних. Приклад тримірних поверхонь, які відображають залежність функції розподілу коефіцієнтів кутової швидкості обертання від кута повороту γ і струмів фаз, наведений на рис. 4.7.

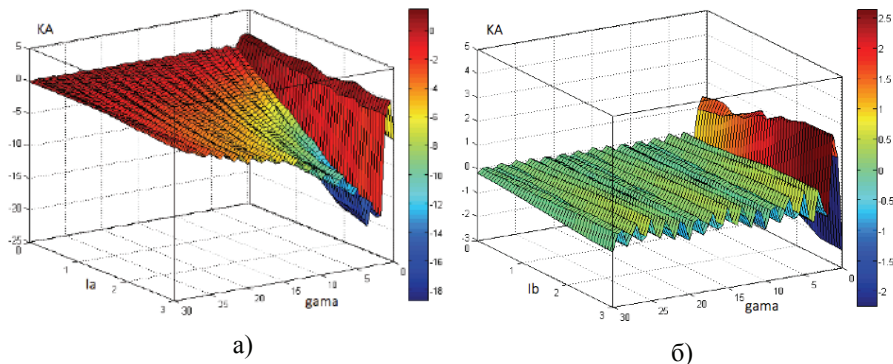


Рисунок 4.7 – Поверхні, які відображають функції розподілу коефіцієнтів кутової швидкості обертання: а – при $i_A - \text{var}, i_B = i_C = 0$; б – при $i_B - \text{var}, i_A = i_C = 0$

Аналіз показав, що рядом функцій можна знехтувати и тим самим значно спростити математичну модель ВІД. Помилка отриманих результатів розрахунків не перевищує 5-7%, але значно скорочує час розрахунків, не враховуючи її нелінійність. Отримана структурна схема об'єкта управління, показана на рис. 4.8, дозволяє перейти до розв'язання задачі синтезу регулятора швидкості.

Одним із суттєвих недоліків роботи ВІД є значна величина пульсації електромагнітного моменту на валу ВІД. Вирішити цю проблему можна оптимізувавши режим живлення обмоток статора. Для цього розв'язувалася задача умовної оптимізації, яка полягає в мінімізації цільової функції $f(\vec{x})$, де $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ – вектор параметрів, що вимірюються при обмеженнях у вигляді рівностей $h_i(\vec{x}) = 0, i = \overline{1, m}$ і нерівностей $g_j(\vec{x}) \leq 0, j = \overline{1, p}$, які визначають допустиму область

$$D = \{ \vec{x} \mid h_i(\vec{x}) = 0, i = \overline{1, m}; g_j(\vec{x}) \leq 0, j = \overline{1, p} \} \quad (4.5)$$

Задача умовної оптимізації визначається наступним чином:

$$\min_{\vec{x} \in D} f(\vec{x}) \quad (4.6)$$

При цьому обмеження мають вигляд $\bar{a} \leq \bar{x} \leq \bar{b}$, де \bar{a} і \bar{b} – вектори нижніх та верхніх меж параметрів, що варіюються відповідно. Такі обмеження у просторі параметрів, що варіюються, визначають гіперпаралелепіпед $D = \{ \bar{x} \mid \bar{a} \leq \bar{x} \leq \bar{b} \}$.

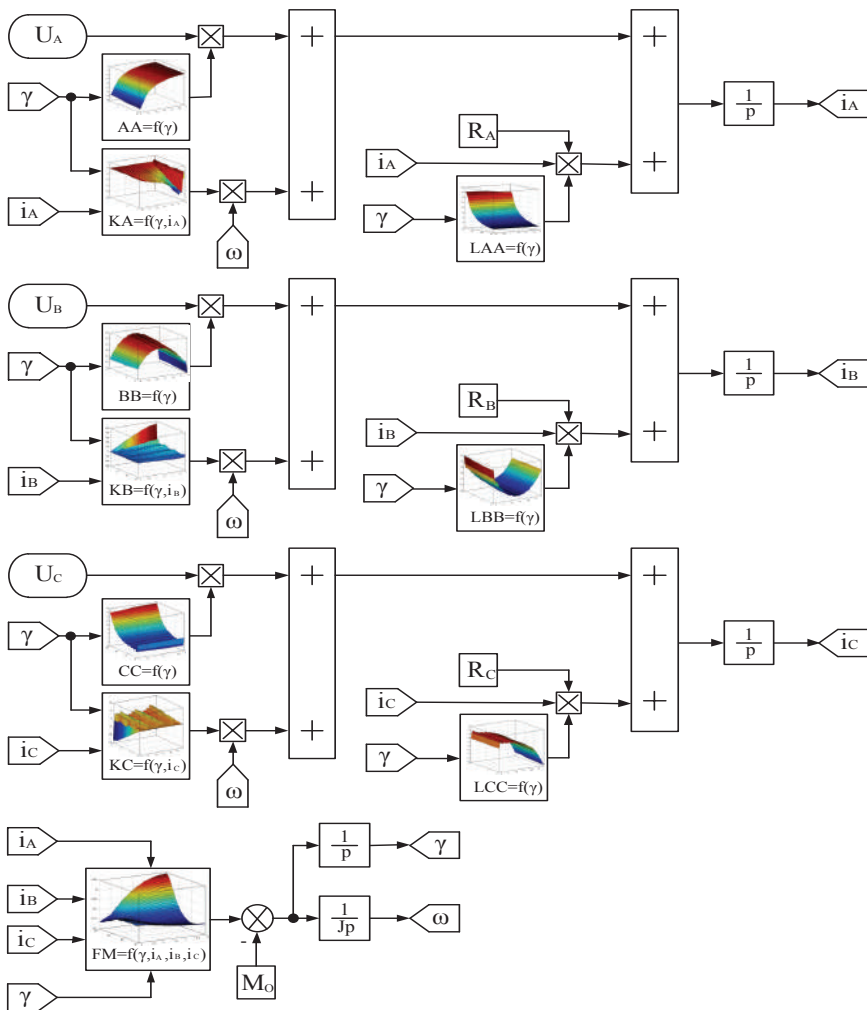


Рисунок 4.8 – Спрощена структурна схема ВІД

Як цільова функція приймалися електричні втрати у фазах машини, що призводить до зменшення фазного струму та втрат у міді, а також зниження втрат сталі. Відповідно це призводить до підвищення ККД двигуна та привода в цілому.

Задача мінімізації електричних втрат була сформульована як задача багатокритеріальної оптимізації [41]. Для розв'язання задачі вибору оптимальних фазних струмів необхідно сформулювати ієрархічну послідовність критеріїв.

Найвищий пріоритет присвоюється критерію, який об'єднує в себе параметричні обмеження, який характеризує ступінь порушення гіперпаралелепіеда D допустимої області змінення вектора параметрів, що варіюються:

$$U_1(\bar{x}) = \sum_{i=1}^3 (\max\{0; a_i - x_i\} + \max\{0; x_i - b_i\}) \quad (4.7)$$

де a_i, b_i – граничні значення струмів уставок у фазах двигуна.

Оскільки завданням оптимізаційного розрахунку було визначення фазних струмів з метою отримання заданої величини моменту, то були прийняті наступні обмеження

$$0,95M_0 \leq M(\bar{x}) \leq 1,05M_0 \quad (4.8)$$

далі критерій записувався у вигляді штрафної функції для порушення цих обмежень:

$$U_2(\bar{x}) = \max\{0; 0,95M_0 - M(\bar{x})\} + \max\{0; M(\bar{x}) - 1,05M_0\}. \quad (4.9)$$

Звідки прийнято, що обмеження виконано, якщо момент двигуна не менший за заданий та не перевищує його більш ніж на 5%.

Останнім критерієм приймалася цільова функція – електричних втрат:

$$U_3(\bar{x}) = P(\bar{x}). \quad (4.10)$$

Ці критерії $U_1(\bar{x}), U_2(\bar{x}), U_3(\bar{x})$ з урахуванням їх пріоритету необхідно мінімізувати. Для цього формується векторна функція $F = (U_1(\bar{x}), U_2(\bar{x}), U_3(\bar{x}))$.

Розв'язання подібного роду задач можливе методом багатогранника, що деформується. Але з низки відомих методів оптимізації для розв'язання цієї задачі доцільно використовувати метод генетичних алгоритмів [42, 43], який інтенсивно застосовується останнім часом в електромеханіці [44, 45].

Його позитивною особливістю є те, що він обробляє не один параметр, а цілий набір параметрів та працює не з одним рішенням, а з популяцією можливих рішень, генеруючи наступні покоління популяції за допомогою генетичних операторів кросовера, мутації, інверсії.

Для виключення недоліку, який притаманний ГА – малій швидкості збіжності до оптимального рішення, в [46] запропонований комбінований ГА, що на завершальній стадії пошуку використовує локальні методи оптимізації, зокрема, модифікований метод Нелдера-Міда [47]. У цьому випадку підвищується ефективність пошуку оптимального рішення.

Розв'язання задачі глобальної оптимізації системи керування індукторною машиною проводилось у діапазоні $0 \dots M_H$ для електромагнітного моменту з кроком 0,1 Нм від розузгодженого до узгодженого положення зубців ротора. Діапазон варіювання параметрів струмів фаз А, В і С складав $\{-3 \dots 3\}$. Результати розв'язання задачі

оптимізації для M_H подані графічно (рис 4.9), звідки видно, що для підтримки постійності моменту на певному рівні необхідно, щоб форма фазного струму мала відповідний вигляд.

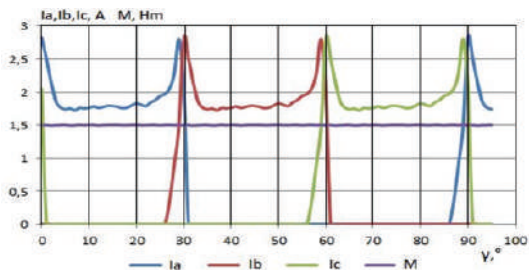


Рисунок 4.9 – Результати оптимізації форми струму на виході системи керування ВІД для $M_{ДВ} = M_H$

Використовуючи отримані оптимальні форми струму за встановленими вище критеріями, проведене цифрове моделювання з використанням математичної моделі ВІД [48-52]. Осцилограми моменту і фазних струмів у встановленому режимі роботи машини наведені на рис. 4.10.

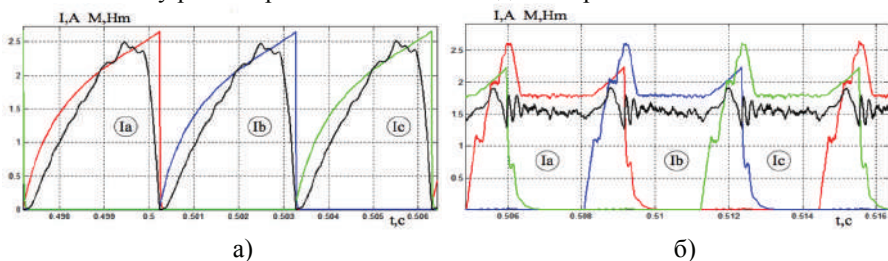


Рисунок 4.10 – Осцилограми моменту і фазних струмів у встановленому режимі для $M_{ДВ} = M_H$: а – при традиційному живленні фаз; б – при оптимізації системи керування

Отримані характеристики показують, що забезпечення певної форми фазних струмів дозволяє значно знизити пульсації електромагнітного моменту.

Для визначення ефективності отриманих результатів порівняємо величину відхилення амплітуди моменту ВІД від середнього значення при різних способах його живлення. На рис. 4.11 показаний принцип підрахунку такого відхилення для $M_{ДВ} = M_{ном}$. Результати дослідження показують, що коливальність моменту при M_H знизилася майже на 72% і склала менше 10% від величини $M_{ном}$ на ділянці виміру в діапазоні $t_H - t_K$.

Для дослідження процесів, що відбуваються в стрілочному переводі з ВІД, а також аналізу роботи необхідно створити його математичну модель.

Далі механічна частина електропривода стрілочного переводу подавалася у вигляді тримасової системи. З урахуванням внутрішнього в'язкого тертя [8, 10, 14, 19] розрахункова схема стрілочного переводу

набуває вигляду, показаного на рис. 4.12. У цьому випадку пружні моменти M_{12} і M_{23} та моменти внутрішнього в'язкого тертя M_{BT1} і M_{BT2} характеризуються нелінійною залежністю.

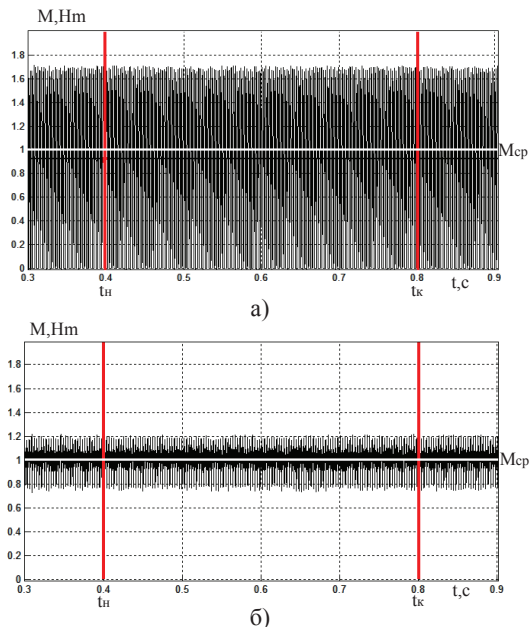


Рисунок 4.11 – Графічне подання розрахунку коливальності моменту: а – при традиційному живленні фаз; б – при оптимізованому

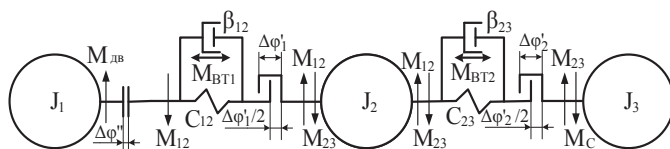


Рисунок 4.12 – Розрахункова схема стрілочного переводу, як тримасової механічної системи з урахуванням внутрішнього в'язкого тертя

Тут перша маса J_1 – момент інерції двигуна сумісно з приведеним до нього моментом інерції редуктора, друга маса J_2 – приведений момент інерції першого гостряка, третя маса J_3 – приведений момент інерції другого гостряка. Зазор $\Delta\varphi$ є технологічним зазором та має певну постійну величину. Присутність зазорів $\Delta\varphi'_1$ і $\Delta\varphi'_2$ зумовлює нелінійність моделі механічної частини ЕМС СП.

Сумарні пружно-в'язкі моменти визначаються за наступними формулами

$$M_{yBT} = \begin{cases} 0, & \text{если } \text{sign}\Delta\varphi \neq \text{sign}\Delta\omega \text{ и } |M_{BT1}| > |M_{12}| \\ M_{BT} + M_{12}, & \text{если } \text{sign}\Delta\varphi = \text{sign}\Delta\omega \text{ или } |M_{BT}| \leq |M_{12}| \end{cases} \quad (4.11)$$

$$M_{yB2} = \begin{cases} 0, & \text{если } \text{sign}\Delta\varphi \neq \text{sign}\Delta\omega \text{ и } |M_{BT2}| > |M_{23}| \\ M_{BT2} + M_{23}, & \text{если } \text{sign}\Delta\varphi = \text{sign}\Delta\omega \text{ или } |M_{BT2}| \leq |M_{23}| \end{cases} \quad (4.12)$$

де $M_{12(23)} = c_{12(23)} F_1(\Delta\varphi_{1(2)})$ – пружні моменти; $M_{BT1(2)} = \Delta\omega_{1(2)} F_2(\Delta\varphi_{1(2)})$ – моменти в'язкого тертя; F_1 і F_2 – нелінійні функції, які розраховуються за формулами (2.9) та (2.10).

Система рівнянь, яка описує рух механічної частини:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{M_{дБ} - M_{yB1}}{J_1} \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{M_{yB1} - M_{yB2} - M_{c1}}{J_2} \\ \frac{d\omega_3}{dt} = \frac{M_{yB2} - M_{c2}}{J_3} \\ \frac{d\varphi_1}{dt} = \omega_1 \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = \omega_2 \\ \frac{d\varphi_3}{dt} = \omega_3 \\ M_{yB1} = \begin{cases} 0, & \text{если } \text{sign}\Delta\varphi \neq \text{sign}\Delta\omega \text{ и } |M_{BT1}| > |M_{12}| \\ M_{BT} + M_{12}, & \text{если } \text{sign}\Delta\varphi = \text{sign}\Delta\omega \text{ или } |M_{BT1}| \leq |M_{12}| \end{cases} \\ M_{yB2} = \begin{cases} 0, & \text{если } \text{sign}\Delta\varphi \neq \text{sign}\Delta\omega \text{ и } |M_{BT2}| > |M_{23}| \\ M_{BT2} + M_{23}, & \text{если } \text{sign}\Delta\varphi = \text{sign}\Delta\omega \text{ или } |M_{BT2}| \leq |M_{23}| \end{cases} \end{array} \right. \quad (4.13)$$

На підставі отриманої системи рівнянь складена структурна схема механічної частини стрілочного переводу (рис. 4.13).

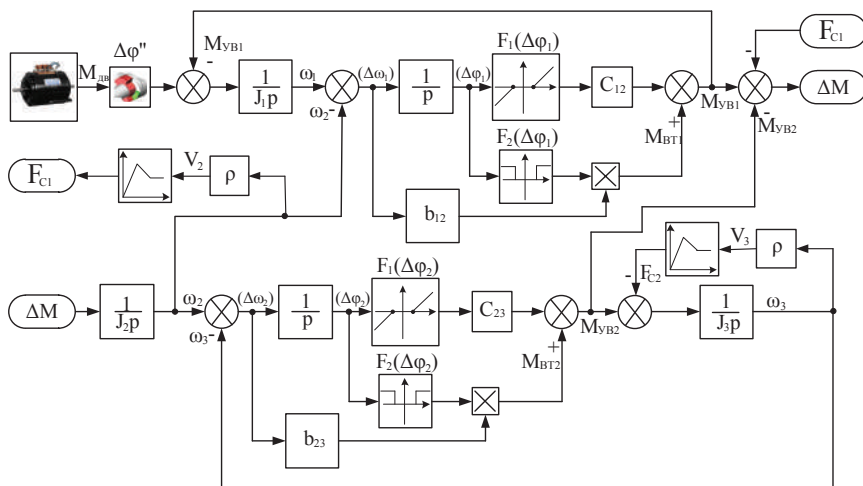


Рисунок 4.13 – Структурна схема механічної частини стрілочного переводу

Як приводний у моделі використаний індукторний двигун марки ЕМСУ-0,25-160В.

Дослідження показали, що при певних сполученнях значень характеристики навантаження в кінематичній лінії СП з ВІД можуть виникати фрикційні коливання. У залежності від жорсткості характеристики навантаження процес може протікати з установленою амплітудою різної величини. Далі були проведені експериментальні дослідження з визначення залежності величини пружної сили в тягах від кута нахилу характеристики тертя й швидкості проковзування. Результати у вигляді поверхонь наведені на рис. 4.14.

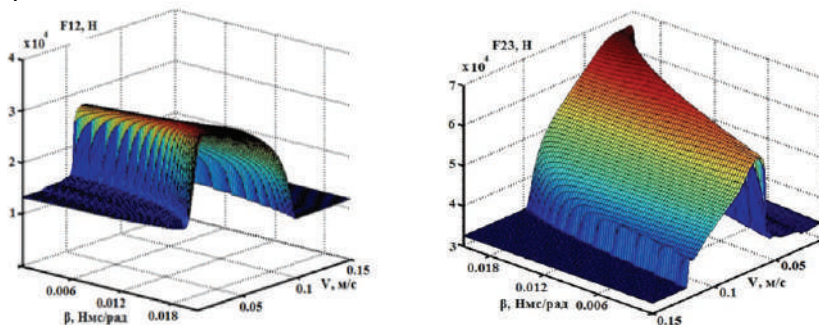


Рисунок 4.14 – Поверхні, які відображають максимум пружних сил першого і другого гостряків для ВІД

Осцилограми швидкостей, пружних сил при використанні ВІД наведено на рис. 4.15, 4.16, де а – весь процес переходу, б – дефрагментація певних ділянок.

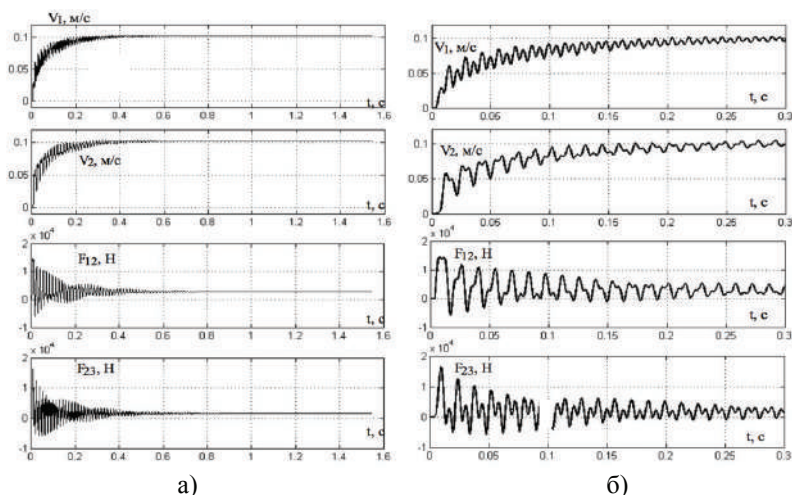


Рисунок 4.15 – Згасаючий коливальний процес у кінематичній лінії стрілочного переходу з ВІД

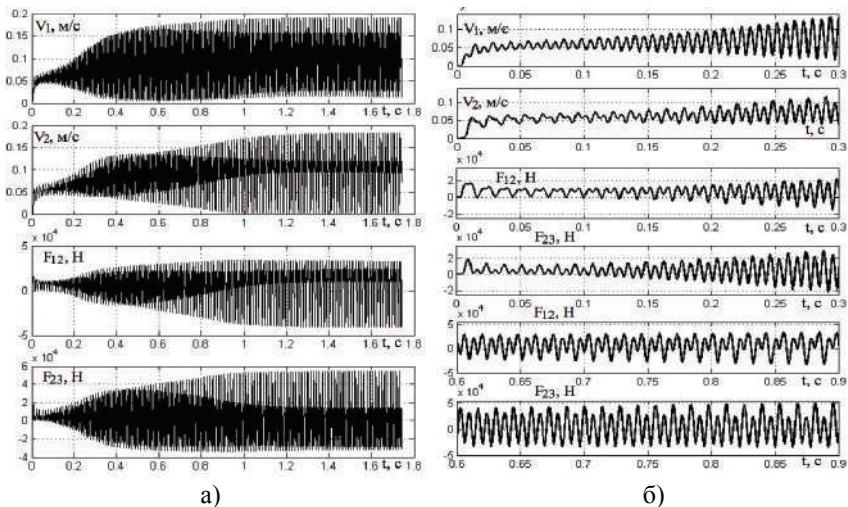


Рисунок 4.16 – Коливальний процес, що розходиться, в кінематичній лінії стрілочного переводу з ВІД

З отриманих результатів видно, що існують певні області характеристики навантаження з таким сполученням параметрів, при яких у кінематичній лінії СП можливий як розвиток автоколивальних процесів, так і їх відсутність. У діапазоні жорсткостей характеристики тертя (0,01...0,02) Нмс/рад і швидкостей переведення (0,05...0,1) м/с спостерігаються піки максимумів пружних сил як для першого, так і для другого гостряків.

4.3. Електропривод стрілочного переводу шпального типу

Наявність технологічного зазору і робочих зазорів не тільки в з'єднаннях тяг, але і в редукторі негативно позначається на якості процесу переведення [14], отже, зведення їх до мінімуму покращує динаміку роботи електропривода в цілому. Ще одним проблемним вузлом у СП є редуктор, бо значна частина енергії витрачається в ньому. Його усунення з кінематичної лінії також є однією з основних задач. Безредукторна система лінійного переміщення гостряків із ротаційною машиною неможлива, оскільки необхідно обертальний рух перетворити в поступальний, однак застосування редуктора нового типу повинно дозволити розв'язати цю задачу одночасно з проблемою розміщення конструкції привода в порожній шпалі. Це не тільки зменшить габарит СП, але і спростить задачу його установки або заміни. Але найголовніше – дозволить перейти до принципово нової конструкції привода в цілому, так званого «шпального» виконання. Усі ці рекомендації повинні бути враховані при розробці нового електропривода СП з ВІД.

Для отримання одноступінчатого перетворення кутової швидкості механічну частину електропривода СП запропоновано виконувати на основі пари «гвинт-гайка». Така передача дозволяє створити більші зусилля, а також

забезпечує точні переміщення. Запропонований ВІП СП показаний на рис. 4.17, а розміщення обладнання в ньому подано на рис. 4.18, де 1 – корпус, 2 – кришка, 3 – вентиляльно-індукторний електродвигун, 4 – електромеханічний перетворювач енергії, 5 – блок керування, 6 – блок допоміжного обладнання, 7 – вал двигуна, 8 – муфта, 9 – підшипник, 10 – гвинт, 11 – гайка, 12 – вертикальні тяги, 13 – шарнірні з'єднання, 14 – поздовжня тяга, 15 – рамна рейка, 16 – гостряки, 17 – опори з кріпленнями, 18 – кабель.

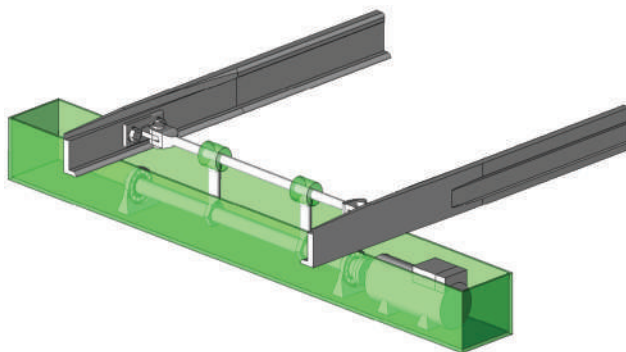


Рисунок 4.17 – Загальний вид СП шпального типу на базі ВІД

Сучасний ВІД (3) складається з трьох основних частин: електромеханічного перетворювача енергії (ЕМП) (4), електронного комутатора (ЕК), який входить до складу блока керування (БК) (5) і датчика положення ротора (ДПР), який розміщений у блоці допоміжного обладнання (6). Електронний комутатор підключає двигун до джерела живлення через кабель (18). При цьому ЕМП здійснює перетворення електричної енергії в механічну, через вал машини (7). Редуктор такого привода являє собою пару «гвинт-гайка» (10), (11) відповідно. Гвинт закріплений на опорних підшипниках (9) і з'єднаний з валом двигуна, муфтою (8). Гайки через вертикальні тяги (12), шарніри (13) і поздовжню тягу (14) передають зусилля гострякам (16), які здійснюють переміщення між рамною рейкою (15). БК виконує не лише керування ЕК, але також здійснює захист двигуна від перенавантаження і здійснює контроль за переміщенням гостряків. Блок допоміжного обладнання, крім датчика положення ротора, містить датчики струму та температури.

Для зниження пульсацій моменту на валу ВІД пропонується використовувати машину з великою кількістю зубців, наприклад, 8/6 замість раніше розглянутої ЕМСУ-0,25-160В з геометрією 6/4. Використовуючи приведені раніше принципи побудови математичної моделі машин такого типу, отримаємо систему рівнянь для чотирифазного ВІД (4.14), а також його структурну схему (рис. 4.19).

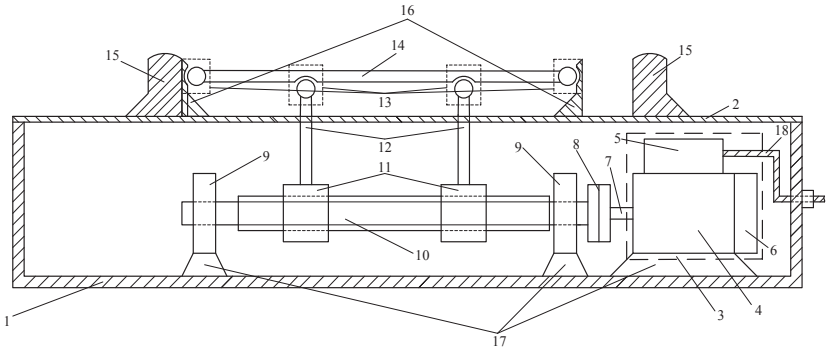


Рисунок 4.18 – Розміщення обладнання у СП шпального типу

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{di_A}{dt} &= AA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_A + AB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_B + AC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_C + \\
 &+ AD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_D + KA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)\omega + LAA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_A R_A + \\
 &+ LAB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_B R_B + LAC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_C R_C + LAD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_D R_D, \\
 \frac{di_B}{dt} &= BA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_A + BB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_B + BC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_C + \\
 &+ BD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_D + KB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)\omega + LBA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_A R_A + \\
 &+ LBB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_B R_B + LBC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_C R_C + LBD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_D R_D, \\
 \frac{di_C}{dt} &= CA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_A + CB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_B + CC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_C + \\
 &+ CD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_D + KC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)\omega + LCA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_A R_A + \\
 &+ LCB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_B R_B + LCC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_C R_C + LCD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_D R_D, \\
 \frac{di_D}{dt} &= DA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_A + DB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_B + DC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_C + \\
 &+ DD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)u_D + KD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)\omega + LDA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_A R_A + \\
 &+ LDB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_B R_B + LDC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_C R_C + LDD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma)i_D R_D, \\
 M_{ДВ} &= FM(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma), \\
 J \frac{d\omega}{dt} &= M_{ДВ} - M_C.
 \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

Параметри машини і редуктора розраховувались таким чином, щоб забезпечити необхідну величину зусилля на тязі без додаткових перетворювань.

Запропоновану кінематичну схему (рис. 4.18) можна представити як абсолютно жорстку систему, оскільки зусилля до поздовжньої тяги від гайок передається через дві вертикальні тяги, а зазори в з'єднаннях при використанні муфти «підшипникового» типу відсутні. А значить, багатомасову модель ЕП можливо замінити одномасовою (рис. 4.20).

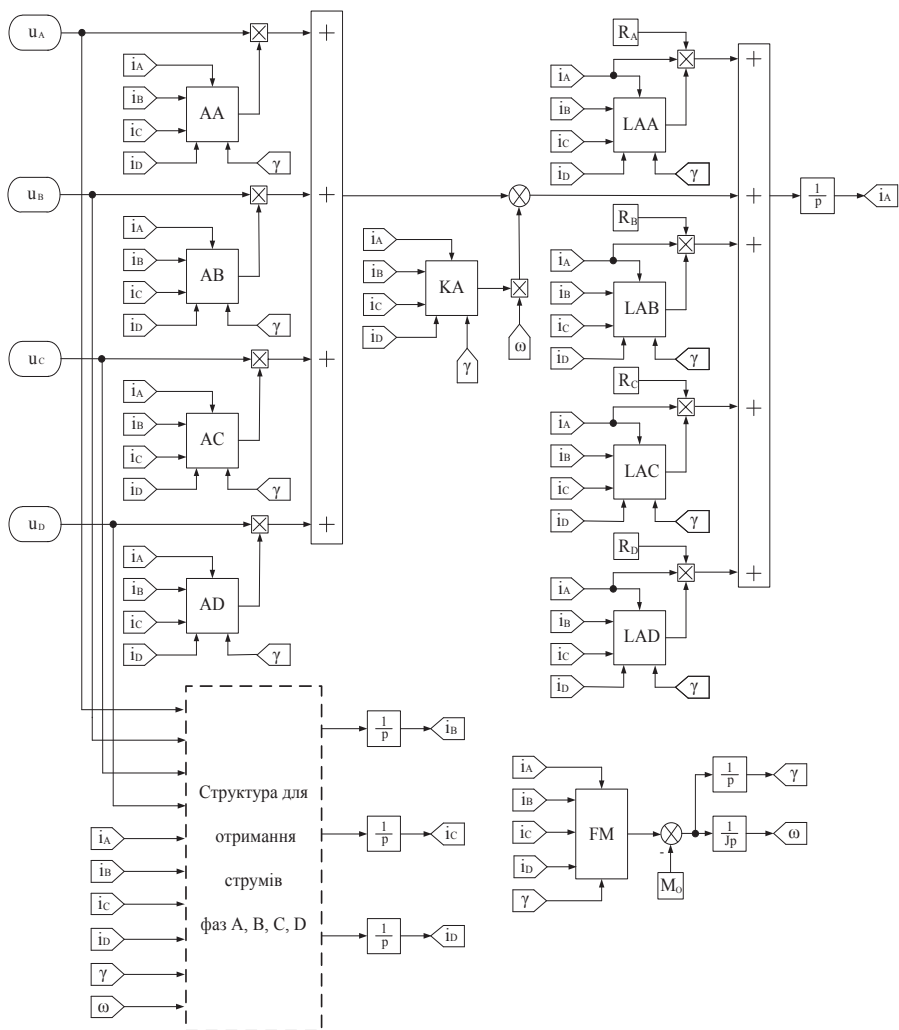


Рисунок 4.19 – Структурна схема чотирифазного ВІД

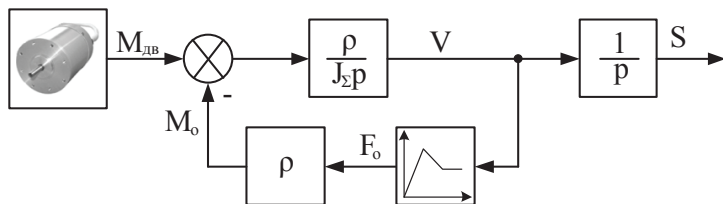


Рисунок 4.20 – Структурна схема механічної частини ЕП СП шпального типу

Для керування ВП необхідний ЕК, який буде здійснювати підключення фаз двигуна до джерела живлення в залежності від сигналу датчика положення ротора. У цьому випадку застосовується схема з шістьма транзисторами і шістьма зворотними діодами, яка наведена на рис. 4.21.

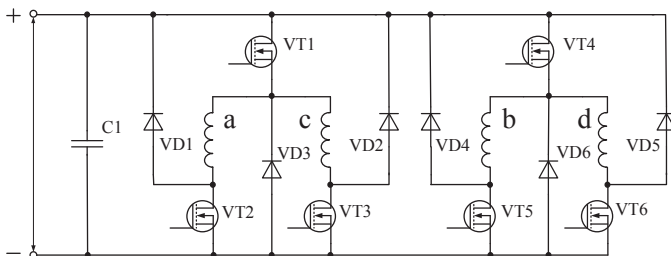


Рисунок 4.21 – Схема ЕК чотирифазного ВІД із шістьма транзисторами

Такий силовий перетворювач реалізує різні алгоритми комутації фаз [53]. Найбільш розповсюдженими є одиночна і парна симетрична комутація. При одиночній симетричній комутації в активний період до джерела живлення підключена лише одна фаза. У випадку парної комутації в окремих проміжках часу підключені дві фази. У випадку регулювання швидкості підведеною до фази напругою, струм змінюється у відповідності до тривалості роботи ключів комутатора. Цей режим регулювання зазвичай також здійснюється за допомогою ШІМ фіксованої частоти. У нашому випадку робоча частота ШІМ обрана 50 кГц. Обмеження максимального значення струму фази двигуна прийняте на рівні 20 А, що відповідає режиму струмообмеження при трикратному перевантаженні за моментом. Джерело живильної напруги в моделі представлено ідеальним джерелом ЕРС.

При моделюванні роботи перетворювача використані технічні дані польового транзистора IRFP4137 і діода 25F40M [2]. Опір каналу стік-витік польового транзистора в закритому стані приймається безкінечно великим, а у відкритому – відповідає паспортному значенню. Відповідно діод у відкритому стані має падіння напруги на рівні 0,8-1,2 В, а в закритому його опір приймається рівним нескінченності.

Для керування електроприводом стрілочного переводу з ВІД за основу була взята система підпорядкованого регулювання з регульованим контуром швидкості і контуром струму, який працює в режимі струмообмеження. Отже, далі вирішувалась задача синтезу регулятора швидкості. За основу бралися стандартні типи: П, ІІ і ІІД-регулятори швидкості.

Передатна функція, а також сигнал на виході ІІД-регулятора

$$W_p(p) = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p \quad (4.15)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.16)$$

де K_p – коефіцієнт передачі пропорціональної складової; K_i – коефіцієнт передачі інтегральної складової; K_d – коефіцієнт передачі диференціальної складової.

Цифрову реалізацію цього регулятора можна отримати, якщо використовувати дискретну апроксимацію. Застосувавши z -перетворення, отримаємо передатну функцію ПІД-регулятора:

$$W_p(z) = K_p + K_i \frac{T_0 z}{z-1} + K_d \frac{z-1}{T_0 z} \quad (4.17)$$

З передатної функції можна отримати керування, що описує алгоритм роботи дискретного ПІД-регулятора

$$u[n] = K_p e[n] + K_i (u[n-1] + T_0 e[n]) + \frac{K_d}{T_0} (e[n] - e[n-1]) =$$

$$K_p e[n] + K_i T_0 e[n] + \frac{K_d}{T_0} (e[n] - e[n-1]) + K_i u[n-1] \quad (4.18)$$

Використовуючи вираз (4.18), отримали структурну схему ПІД-регулятора, яка показана на рис. 4.22.

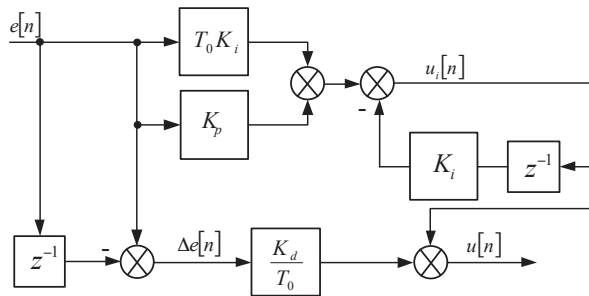


Рисунок 4.22 – Структурна схема дискретного ПІД-регулятора

Так як П- і ПІ-регулятори далеко не в усіх випадках забезпечують необхідну якість перехідних процесів, у електроприводах широко використовуються ПІД-регулятори, що відповідають технологічним вимогам роботи механізму.

Оскільки ВІД є об'єктом, якому властиві істотні нелінійності основних координат, то для налаштування регуляторів не прийнятні стандартні підходи, що застосовуються для лінійних об'єктів керування. Тому знаходження і налаштування коефіцієнтів регуляторів проводилися з використанням раніше отриманої математичної моделі об'єкта керування.

Найбільш доступною для реалізації є методика, яка отримала назву методу Зиглера-Нікольса. Ця методика проста і забезпечує хороші результати, тому вона широко використовується на практиці. Цей метод відноситься до емпіричних і заснований на використанні даних, отриманих експериментально на реальному об'єкті. Як джерело інформації про об'єкт керування використовується реакція системи на ступінчастий вплив.

Об'єкти керування, що мають аперіодичну криву розгону, як на рис. 4.23, апроксимуються послідовним з'єднанням аперіодичної ланки і такої, що запізнюється.

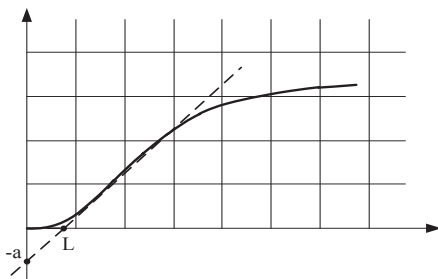


Рисунок 4.23 – Приклад кривої розгону об'єкта керування

Для розрахунку регуляторів методом Зиглера-Нікольса використовуються два параметри: a і L . Формули для розрахунку коефіцієнтів наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Розрахунок параметрів ПД-регулятора методом Зиглера-Нікольса

K_p	K_i	K_d
$\frac{1,2}{a}$	$\frac{0,9L}{K_p}$	$\frac{0,5L}{K_p}$

Після розрахунку параметрів регулятора, як правило, потрібне його ручне підлаштування для покращення якості регулювання. Після підлаштування коефіцієнти ПД-регулятора швидкості приймають вигляд, вказаний на рис. 4.24.

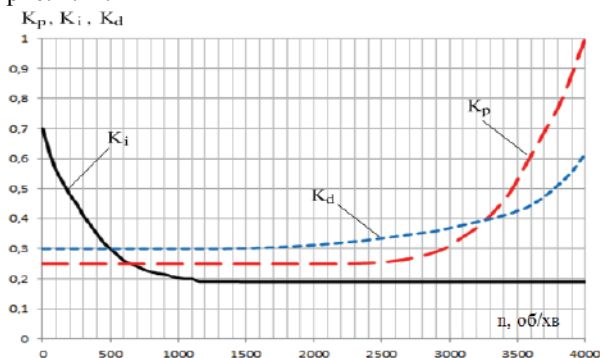


Рисунок 4.24 – Графічне подання значень коефіцієнтів ПД- регулятора

З урахуванням вище сказаного, структура ПД-регулятора представлена на рис. 4.25.

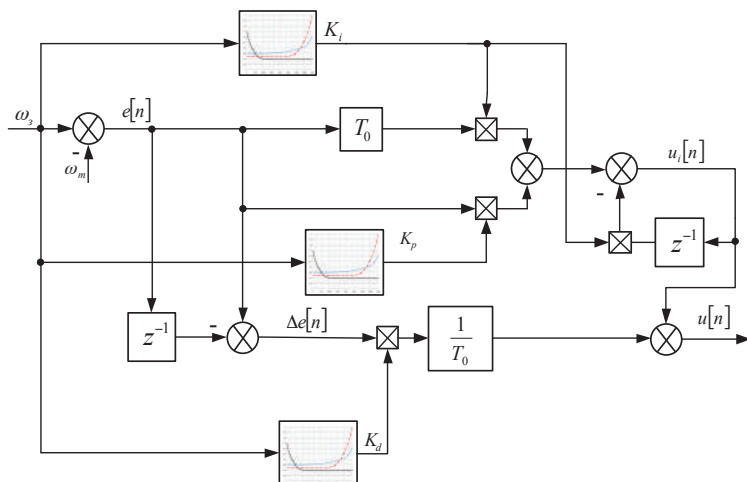


Рисунок 4.25 – Структура ПІД-регулятора швидкості

Функціональна схема системи керування ВІП представлена на рис. 4.26. Вона є класичною двоконтурною СПР. Для аналізу роботи отриманих налаштувань регулятора швидкості була створена математична модель електропривода із СК ВІД. Результати розрахунків на математичній моделі режимів роботи двигуна з ПІД-регулятором швидкості наведені на рис. 4.27. У момент часу 0,6 с до машини прикладався додатковий момент опору, чому відповідає просадка по швидкості. Як показують отримані осцилограми, найбільш якісний перехідний процес відповідає ПІД-регулятору, що буде використаний у подальшому для синтезу нечіткого регулятора швидкості.

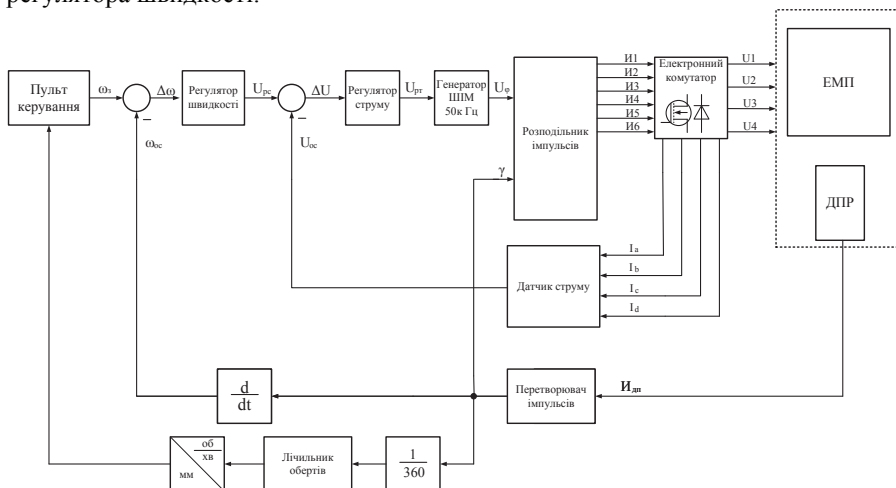


Рисунок 4.26 – Функціональна схема системи керування ВІП

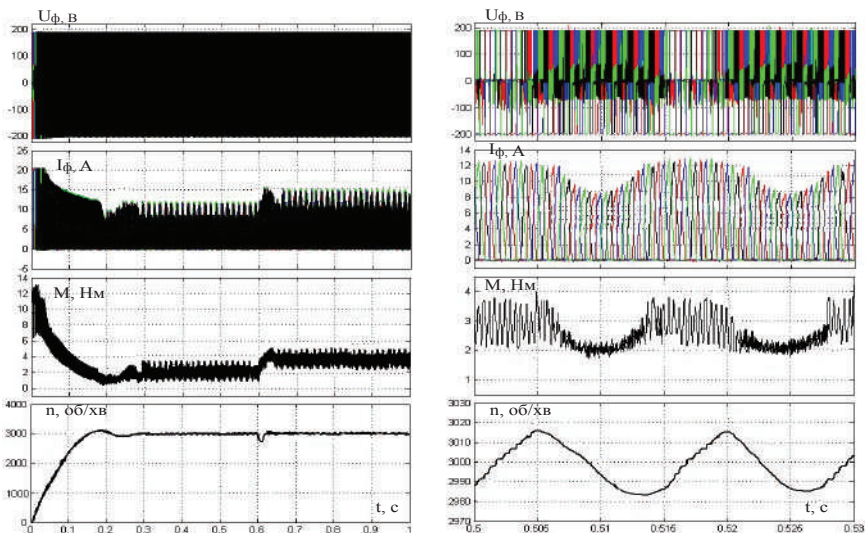


Рисунок 4.27 – Осцилограми роботи привода з ПД-регулятором швидкості

Описаний вище регулятор має недостатньо високі показники якості при керуванні складною нелінійною системою. Його характеристики можна покращити за допомогою методів нечіткої логіки [40, 54, 55].

Під нечітким керуванням (Fuzzy Control) розуміється область застосування загальної методології теорії нечітких множин і нечіткої логіки для вирішення практичних задач керування. Такий тип керування виник як технологія, призначена для розв'язання прикладних задач, які в загальному випадку можуть бути реалізовані за допомогою запрограмованих контролерів.

В основі фазі-логіки лежить теорія нечітких множин, де функція належності елемента множині не бінарна, а може приймати будь-яке значення в діапазоні 0-1. Така логіка дає можливості будувати системи, які здібні обробляти нечітку інформацію, дозволяючи при цьому виконувати над такими величинами весь спектр логічних операцій: об'єднання, перетин, заперечення й ін. [55] (рис. 4.28).

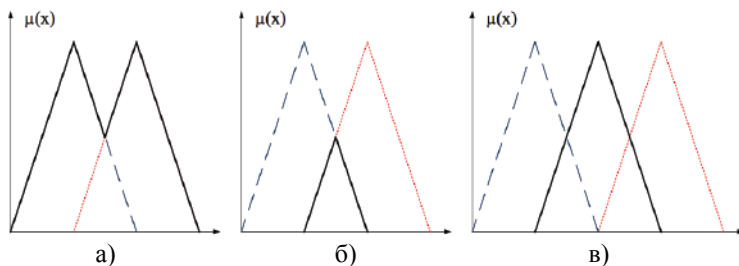


Рисунок 4.28 – Основні операції з нечіткими множинами: а – об'єднання; б – перетин; в – заперечення

Для побудови фазі-регулятора була використана вище отримана структура дискретного ПІД-регулятора [55]. Структура нечіткого або фазі-ПІД (ФПІД)-регулятора подана на рис. 4.29.

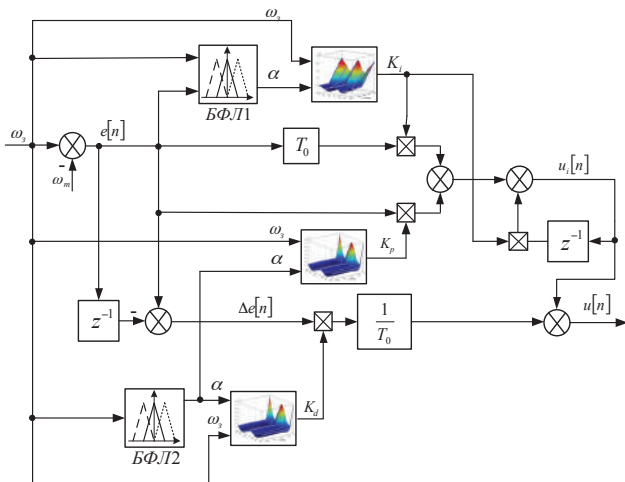


Рисунок 4.29 – Структурна схема ФПІД-регулятора

У блоках фазі-логіки (БФЛ1 і БФЛ2) здійснюється три етапи обробки інформації [55]: фазифікація, інференція, дефазифікація.

Для використання методів нечіткої логіки насамперед необхідно перетворити звичайні чіткі змінні в нечіткі. Цей процес називається фазифікацією. Діапазон зміни змінних $e(t)$ і $de(t)/dt$ розкладається на підмножини, в межах кожної з яких будується функція належності змінних $e(t)$ і $de(t)/dt$ кожному з множин. На рис. 4.30 показані функції належності, які пропонується задати у формі трикутника і складаються з семи лінгвістичних термів (BB , BC , BM , H , DM , DC , DB) (відповідно – негативне велике, негативне середнє, негативне мале, нуль, додатне мале, додатне середнє, додатне велике).

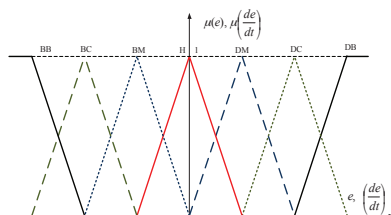


Рисунок 4.30 – Розподіл функції належності помилки і швидкості її зміни

Функція належності для кожної з множин, що входять у нечітку змінну, мають вигляд

$$\mu_{m1}(u_1, u_2) = \max\left(\mu_1(e), \mu_1\left(\frac{de}{dt}\right)\right),$$

$$\mu_{m_2}(u_1, u_2) = \max\left(\mu_2(e), \mu_2\left(\frac{e}{dt}\right)\right), \quad (4.19)$$

$$\mu_{m_N}(u_1, u_2) = \max\left(\mu_N(e), \mu_N\left(\frac{e}{dt}\right)\right).$$

У процесі моделювання регулятора здійснювалось варіювання величин абсциси функції належності шляхом зміни кута вершини трикутника.

Задача інтерференції, яка, в свою чергу, складається з агрегації, імплікації та акумуляції, – це формування вихідного фазі-множника на основі логічних правил.

Задача дефазифікації – це перетворення акумульованого фазі-множника в чітку однозначну величину на виході фазі-блока. Існують декілька методів дефазифікації, один з яких – метод середнього центру, який показаний нижче.

$$\alpha = \frac{\int u\mu(u)du}{\int \mu(u)du} \quad (4.20)$$

де α – вихідна координата; $\mu(u)$ – ступінь належності активованого терма; u – активований терм.

Були отримані коефіцієнти нечіткого ПІД-регулятора, які являють собою тримірні функції, наведені на рис.4.31 – 4.33.

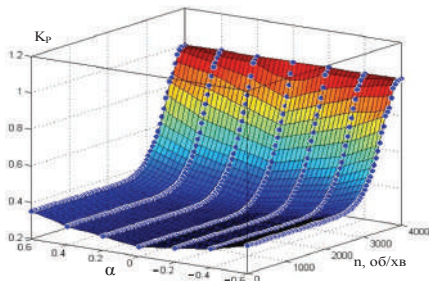


Рисунок 4.31 – Графічне подання розподілу коефіцієнта пропорційної ланки ФПІД-регулятора

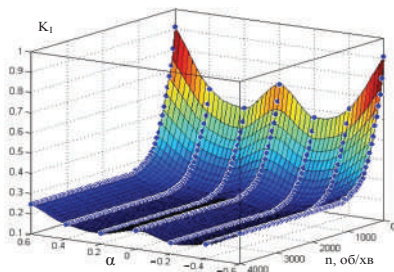


Рисунок 4.32 – Графічне подання розподілу коефіцієнта інтегральної ланки ФПІД-регулятора

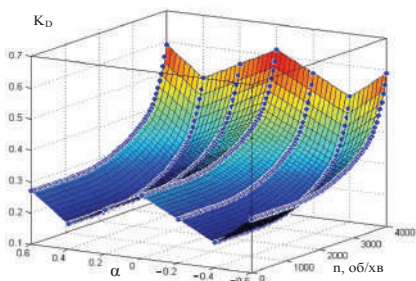


Рисунок 4.33 – Графічне подання розподілу коефіцієнта диференціальної ланки ФПД-регулятора

Для аналізу роботи електропривода із синтезованим нечітким регулятором швидкості була створена математична модель. Результати розрахунків на моделі (характеристики фазного струму, напруги, електромагнітного моменту і швидкості) наведені на рис. 4.34. Як видно з осцилограм, вихід двигуна на задану швидкість відбувається без перерегулювання. У момент часу 0,6 с докладався додатковий момент опору, при цьому просадка швидкості відсутня. Основні показники якості для отриманих регуляторів зведені в таблиці 4.3.

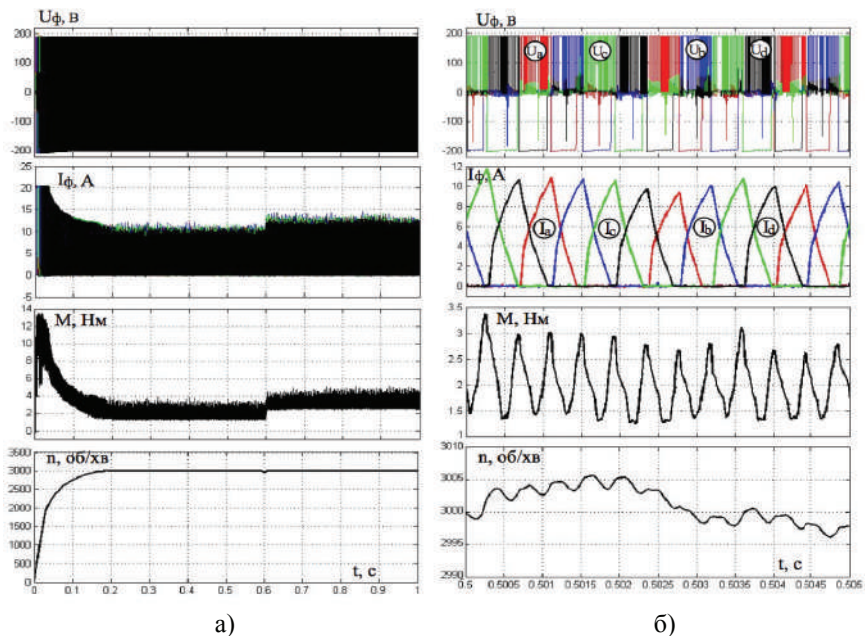


Рисунок 4.34 – Осцилограми роботи двигуна з ФПД-регулятором швидкості: а – перехідний процес; б – деталізовані характеристики

Таблиця 4.3 – Основні показники якості процесів регулювання

Показник якості	ПД-регулятор	ФПД-регулятор
Максимум перерегулювання, σ_{\max} , %	4,2	0
Час регулювання, t_p , с	0,27	0,17
Число коливань, N_p	1	0

Результати моделювання вказують, що нечіткий ПД-регулятор показує високу якість процесу регулювання і може бути використаний для керування ВД в електроприводі стрілочного переводу.

Для дослідження динамічних процесів, що протікають у кінематичній лінії стрілочного переводу шпального типу з розробленою системою керування, була створена його узагальнена модель (рис. 4.35). Ця модель дозволила отримати діаграми розподілу тягового зусилля на гостряках, швидкості переведення і фазного струму двигуна, які вказані на рис. 4.36.

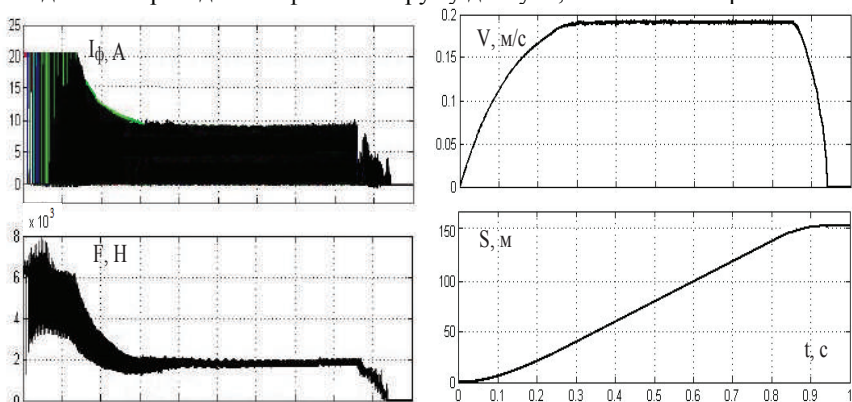


Рисунок 4.36 – Осцилограми роботи стрілочного переводу

В якості навантаження була використана раніше розглянута характеристика тертя. Проаналізувавши в попередньому розділі отримані поверхні розподілу максимуму пружних сил гостряків, змодельювали роботу СП з характеристикою тертя, яка найбільш негативно впливає на процес переводу. Коливальний процес у кінематичній лінії стрілочного переводу нового типу при вкрай негативних показниках характеристики тертя вказаний на рис. 4.37. Отримані результати показують, що навіть при незадовільному стані перевідних поверхонь у кінематичній лінії присутні коливання тягового зусилля, але їх амплітуда у порівнянні зі СП старого типу знизилась в 5,5-6 раз. Такі коливання у більшій мірі залежать від характеру поведінки електромагнітного моменту. При цьому нечіткий ПД регулятор у процесі роботи СП відпрацьовує задану швидкість, коливання якої (як і в попередніх дослідах) не перевищує 1%.

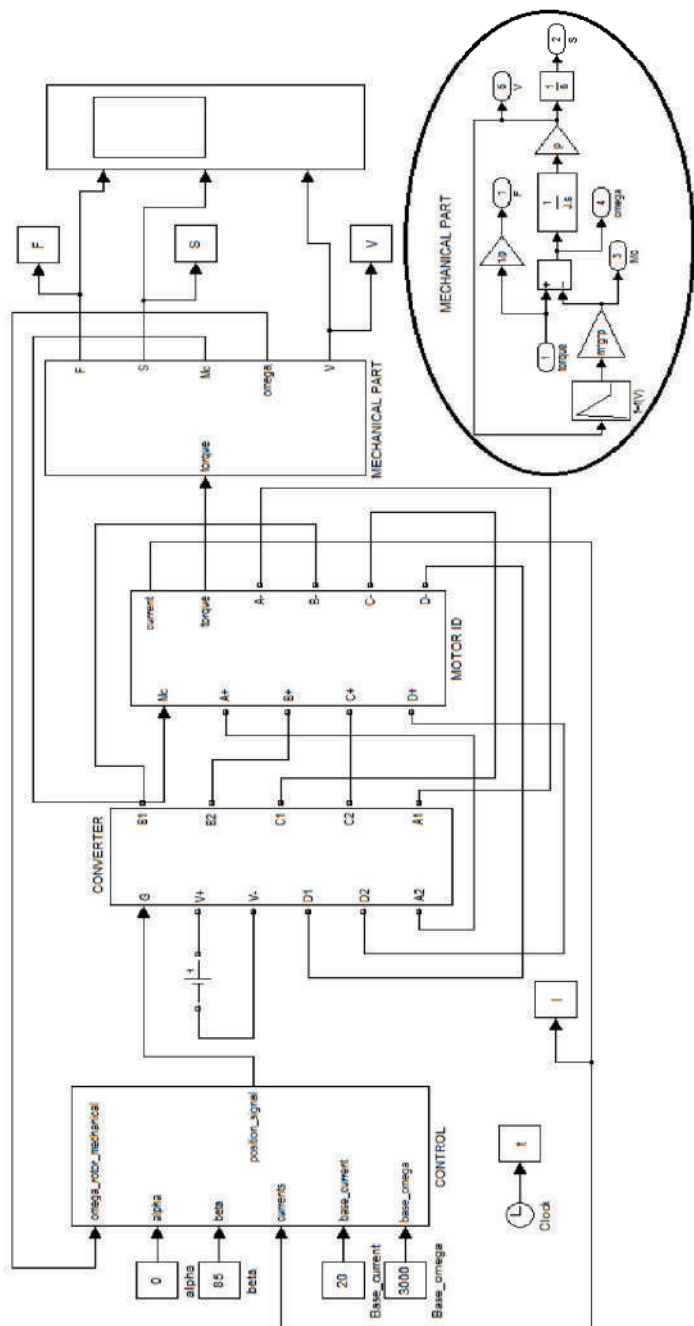


Рисунок 4.35 – Математична модель ВП СП шпального типу

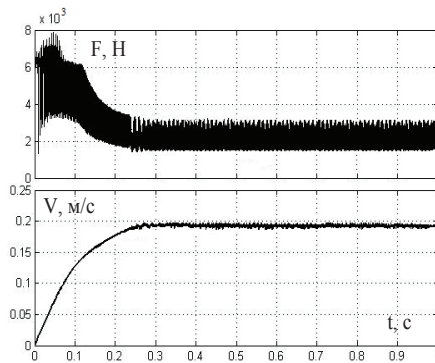


Рисунок 4.37 – Коливальний процес у кінематичній лінії СП нового типу

4.4. Експериментальні дослідження

За об'єкт дослідження був обраний чотирифазний ВІД, розроблений під керівництвом д.т.н., проф. Римші В.В. [32, 36, 53].

Узятий за основу двигун включає в себе ЕМП енергії, датчик положення ротора і датчик температури. Система керування для даного ВІП наведена на рис. 4.38. Вона розроблялась на базі всіх раніше отриманих результатів розрахунків і дослідів на математичній моделі. У якості керуючого органа використовувався мікроконтролер dsPIC30F3011 фірми Microchip [56], призначений для вирішення подібних задач і цифрової обробки сигналів. Більш детальний опис СК наведено в [57, 58].

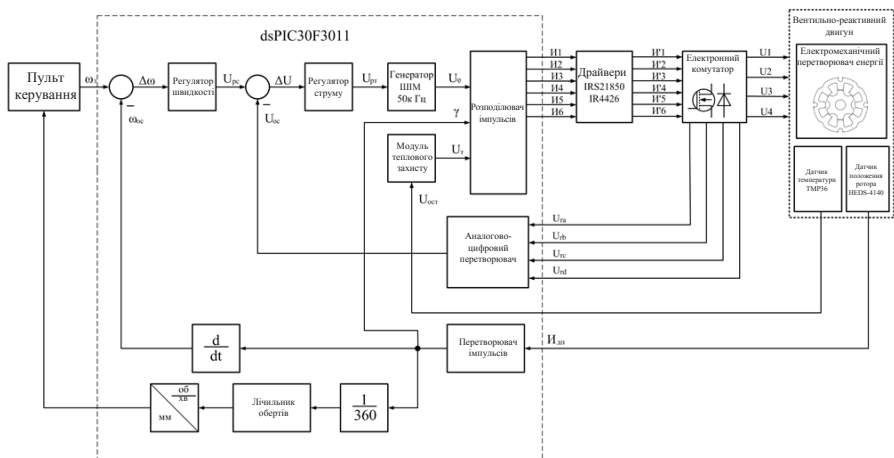


Рисунок 4.38 – Функціональна схема системи керування ВІП

Результати лабораторних випробувань ВІД наведені в табл. 4.5. Отримана природня механічна характеристика ВІД, яка показана на рис. 4.39.

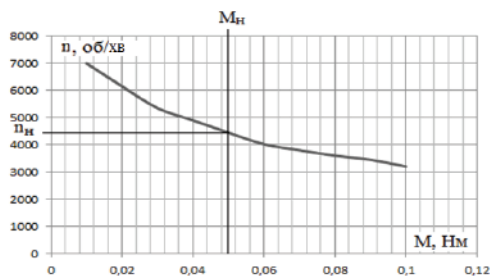


Рисунок 4.39 – Механічна характеристика ВІД

На рис. 4.40 подана характеристика перехідного процесу за швидкістю з цифровим ПІД-регулятором. Після виходу двигуна на швидкість задання в 2000 об/хв в момент часу 1с ступінчасто прикладається навантаження, чому відповідає просадка швидкості.

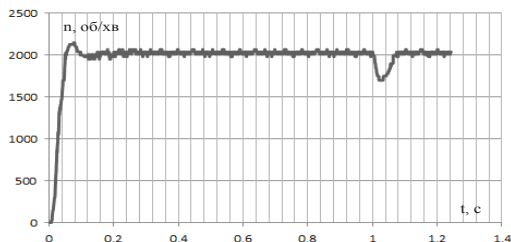


Рисунок 4.40 – Перехідний процес швидкості ВІД із ПІД-регулятором

Порівняльний аналіз адекватності математичних моделей ВІД наведено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Порівняльний аналіз адекватності мат. моделей ВІД

Тип моделі	Параметр					
	Іф max		Іф ср		n	
	Знач.А	Відкл.%	Знач.А	Відкл.%	Знач.об/хв	Відкл.%
Експеримент	3,2	-	1,07	-	10000	-
З урахуванням взаємного впливу фаз	3,1	3,13	1,16	7,4	10330	3,3
У середовищі MATLAB	2,6	18,75	0,82	23,4	9120	9,8
На основі узагальненого ЕМПІ	6,25	95	2,93	174	8150	18,5

З результатів, наведених у таблиці 4.4, випливає, що при моделюванні ВІД з урахуванням взаємного впливу фаз помилка за основними координатами знаходиться в межах 3-7% (для двох інших моделей помилка складає 10 - 174%). Це підтверджує адекватність використовуваної математичної моделі і правильність підходу до моделювання машини.

Результати лабораторних випробувань ВІД наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати випробувань макетного зразка

M , Нм	0,01	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,1
n , об/хв	7000	6050	4950	4500	4000	3610	3080
I , А	1,13	1,69	2,22	2,38	2,61	3,21	3,58

Для проведення дослідження роботи ВІП СП шпального типу був створений макет у масштабі 1:2. Зовнішній вигляд макетного зразка електроприводу СП в шпальному виконанні показаний на рис. 4.41. СП вмонтований у порожню металеву шпалу. Редуктор являє собою раніше розглянутий тип гвинт-гайка. Гайка з'єднана з тягою через кругний механізм, а двигун за допомогою муфти – з гвинтом, встановленим на двох опорних підшипниках. Гостряки виготовлені з рамної рейки марки Р33 [59].

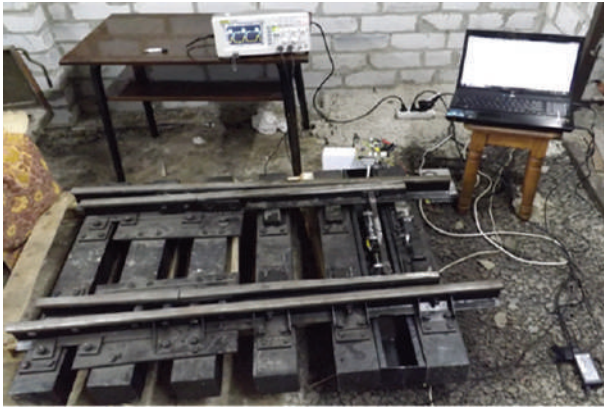
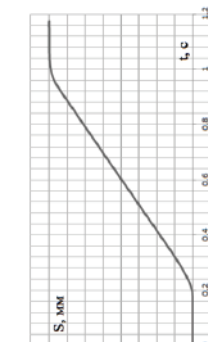
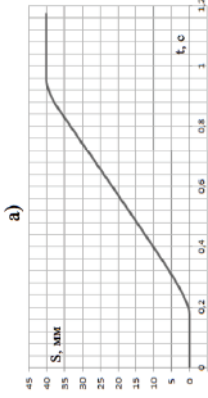
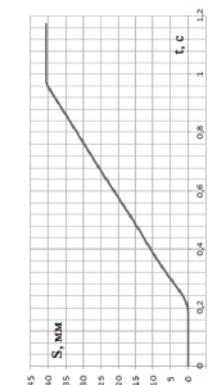
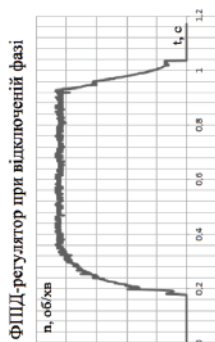
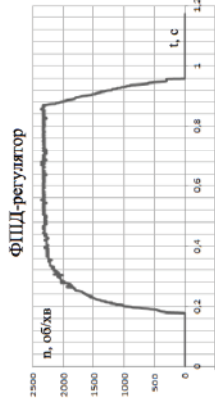
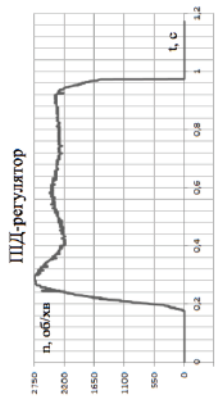


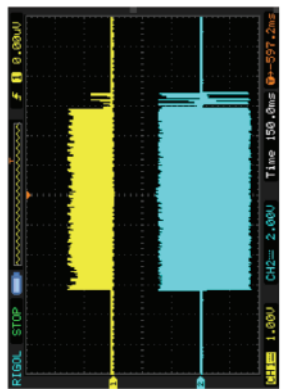
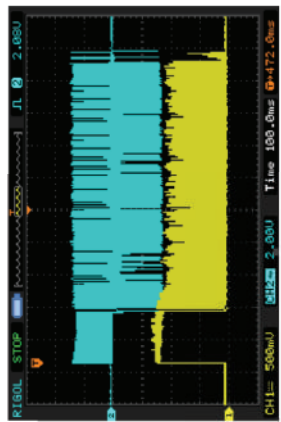
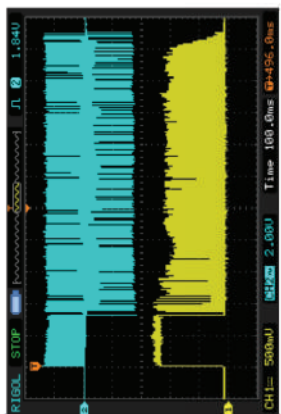
Рисунок 4.41 – Макетний зразок шпального СП із системою керування

Досліди працездатності розробленого СП проводились із запропонованою СК. Метою експериментів було підтвердження отриманих теоретичних результатів.

Під час проведення експерименту на макеті була можливість застосування одного з двох типів регуляторів швидкості: ППД і ФППД-регулятора. Результати експерименту наведені на рис. 4.42, де видно різницю в якості процесу переведення між цими типами регуляторів. Отримані в результаті експериментів основні показники якості для регуляторів швидкості були зведені в таблицю 4.6. Досягнуто зменшення часу переведення до 0,8 с без форсування. Перехідний процес за швидкістю з ФППД-регулятором вказує на повну відсутність перерегулювання. Також був досліджений аварійний режим роботи привода в процесі переведення, коли в перетворювачі штучно задавалось відключення однієї з фаз. Осцилограми, наведені на рис. 4.42, показують працездатність переведення навіть у такому аварійному для інших типів приводів режимі. Рис. 4.43 подає осцилограми для ФППД-регулятора при нормальній роботі двигуна на стендових дослідках і на математичній моделі.



а)



б)

Рисунок 4.42 – Осцилограми процесу переведення: а – швидкість; б – переміщення; в – напруга і струм фази

Таблиця 4.6 – Основні показники якості процесів регулювання

Показник якості	ПІД-регулятор	ФПІД-регулятор
Максимум перерегулювання, σ_{\max} , %	16,6	0
Час регулювання, t_p , с	0,36	0,15
Число коливань, N_p	2	0

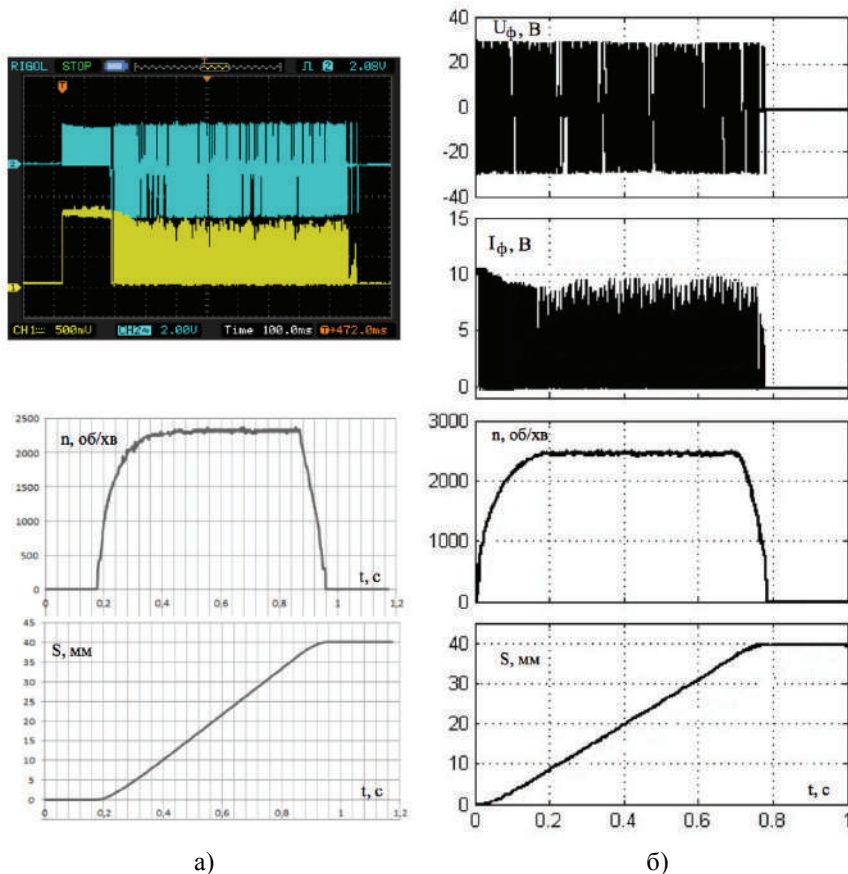


Рисунок 4.43 – Осцилограми процесу переведення з ФПІД-регулятором:
а – для реального об'єкта; б – для математичної моделі

Таким чином, компоненти узагальненого векторного критерію ефективності роботи ЕП СП з ВІД для запропонованої конструкції має наступні значення: час переходу $t_s = 0,98$ с, величина пружної сили в робочій тязі $F_{12} = 0$ кН, величина імпульсу удару гострия $M_i = 21,09$ кг·м/с, а також загальні втрати системи СП $\Sigma P = 0,133$ кВт.

РОЗДІЛ 5

ЕЛЕКТРОПРИВОД СТРІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ НА БАЗІ ЛІНІЙНИХ ДВИГУНІВ

Проведені раніше дослідження показали тенденцію до спрощення механічної частини СП шляхом використання більш високомоментних електродвигунів. Є доцільною тенденція продовжити до повного усунення пристроїв механічного перетворення обертального руху в поступальний. Тут мова йде про використання як привідного електромеханічного перетворювача енергії лінійного двигуна (ЛД), який безпосередньо перетворює електричну енергію в поступальне переміщення робочого органа.

5.1. Вибір типу і конструкції ЛД

Основним завданням при розробці конструкції було виключення обертальних елементів СП і тим самим значного спрощення його кінематичної лінії. На рис. 5.1 показані поперечний і поздовжній перерізи запропонованої машини, вміщеної в шпалу, а запропонована конструкція електропривода представлена на рис. 5.2. Така конструкція у вигляді лінійного двигуна електромагнітного типу з пружинним акумулятором енергії відрізняється своєю простотою та надійністю.

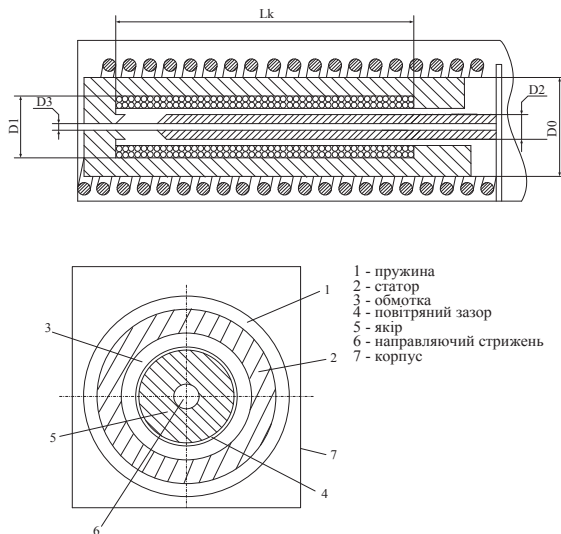


Рисунок 5.1 – Конструкція ЛД у шпалі

У цьому випадку лінійний електродвигун (6) складається з: статора (14), виконаного із шихтованої електротехнічної сталі, котушки (12) і якоря (13). Залежно від сигналу датчика, положення гостряків (11) силовий перетворювач, розташований у блоці керування (7) і виконаний на базі польових або IGB транзисторів, підключає котушку статора (12) до джерела

живлення. При цьому електродвигун здійснює перетворення електричної енергії в механічну, приводячи в рух якір (13). А якір, рухаючись по напрямній (16), передає зусилля через поперечну (3) і поздовжню (5) тяги до гостряків (10). Електропривод стрілочного перевodu складається з двох електромагнітів для реверсивної роботи. Застосування пружини (15) обумовлене недостатнім значенням електромагнітної сили на початку перевodu, а також забезпеченням необхідного зусилля у випадку примерзання гостряка до рамної рейки. Блок керування (7) оснащений різними типами регуляторів швидкості. Безконтактні датчики (11) встановлені із зовнішнього боку рамної рейки (9) й забезпечують контроль за щільним приляганням до нього гостряка. Також до складу конструкції входять: корпус (1); кришка (2); шарнірні з'єднання (4); кабель (8).

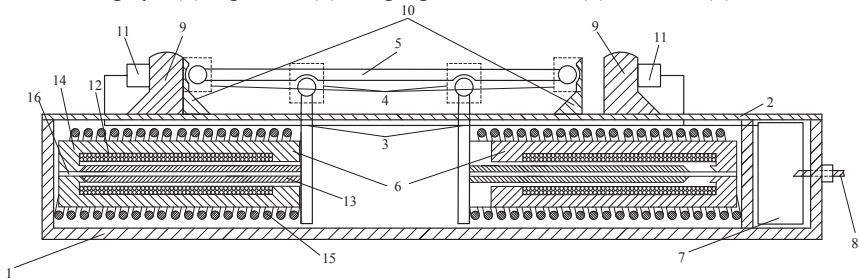


Рисунок 5.2 – Розміщення обладнання в СП шпального типу з ЛДЕМТ

Для проведення порівняльного аналізу роботи ЛД в СП пропонується використовувати ще один тип ЕМП – індукторний (рис. 5.3).

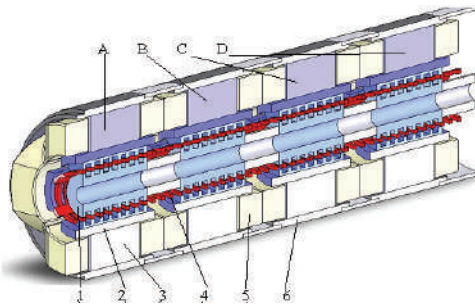


Рисунок 5.3 – Конструкція двигуна індукторного типу

До складу конструкції двигуна індукторного типу входять 1 – внутрішній статор; 2 – полюсні наконечники зовнішнього статора; 3 – полюси; 4 – якір; 5 – котушки фаз; 6 – корпус.

Такий ЛД потребує використання більш складної, ніж у електромагніта, системи керування і, як наслідок, важкого схемотехнічного рішення, але забезпечує реверсну роботу без використання додаткових пружин. Запропонована конструкція електропривода з лінійним двигуном індукторного типу представлена на рис. 5.4.

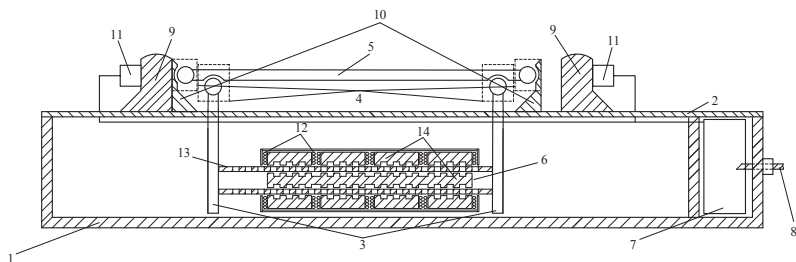


Рисунок 5.4 – Розміщення обладнання в СП шпального типу з ЛД

До складу конструкції входять: 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – поперечні тяги; 4 – шарнірні з'єднання; 5 – поздовжня тяга; 6 – лінійний електродвигун; 7 – блок керування; 8 – кабель; 9 – рамна рейка; 10 – гостряки; 11 – датчики положення гостряків; 12 – котушка електродвигуна; 13 – ярів електродвигуна; 14 – статор електродвигуна.

Чотирифазний електромеханічний перетворювач (6) складається з двох статорів (14) (внутрішнього і зовнішнього), що дозволяє отримати максимальний повітряний зазор у міжзубцевій зоні при мінімальних габаритах машини, зосереджуючи магнітний потік у зубцевій зоні. Почергове ввімкнення фаз (12) електродвигуна (А, В, С, D) забезпечує рівномірне розподілення електромагнітної сили під час руху яроя (13). При нарощуванні кількості котушок (фаз), можливо, за потреби, суттєво знизити коливання сили, що діє на ярів під час його руху. Ще одна перевага такої конструкції індукторного двигуна – це теоретично необмежена довжина яроя, що в нашому випадку, в порівнянні з електромагнітом, дозволяє легко реалізувати різні переміщення гостряків без зміни інших габаритних розмірів двигуна.

Єдиним недоліком такої машини є складність реалізації конструкції, що володіє великою кількістю складних деталей і потребує високої точності при їх виконанні та збірці. Навіть непросте схемне рішення системи керування на сучасному рівні елементної бази і програмних засобів є недоліком цього двигуна.

Посилення сили переводу стрілки залежить від ваги її частин, що переміщують, типу рейок, місця кріплення перевідних тяг і коефіцієнта тертя гостряків об подушки. Усі вказані величини, за винятком останніх, відомі. Величина коефіцієнта тертя залежить від стану стрілки, якості мастила стрілочних подушок, чистоти обробки їхніх поверхонь, а також підшов гостряків й інших факторів.

Керуючись принципом Даламбера, були отримані залежності сил і балансу енергії, на основі яких розроблений розрахунок величини необхідної електромагнітної сили ЛД, енергії електромагніта в магнітному проміжку (без урахування насичення), поперечного розрізу, максимальної магніторушійної сили, а також поздовжнього перерізу котушки.

Посилення пружини залежить від ступеня її стиснення (переміщення якоря) і коефіцієнта жорсткості. При прийнятій апроксимації сила опору описується наступною системою рівнянь

$$F_{оп} = \begin{cases} -b_1; & 0 \leq x \leq x_1 \\ -k_1x - b_2; & x_1 < x \leq x_2 \\ -b_3; & x_2 < x \leq x_3 \\ k_2x - b_4; & x_3 < x \leq x_4 \end{cases} \quad (5.1)$$

З використанням раніше отриманих виразів в пакеті MATLAB написана програма для розрахунку електромагнітної сили, а також коефіцієнта жорсткості пружини. Як навантаження використовувалась марка переводу 1/22 з максимальною вагою гостряків. На основі такої програми була отримана характеристика розподілення сил електропривода від зазору S між гостряком і рамною рейкою (рис. 5.5).

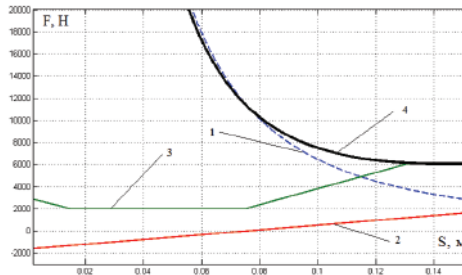


Рисунок 5.5 – Характеристика розподілу сил лінійного привода СП:

- 1 – електромагнітна сила ЛД; 2 – сила пружини; 3 – сила опору;
4 – сила, докладена до гостряків, з боку ЛД.

Такий підхід до розробки математичної моделі, основою якої є спрощене визначення електромеханічної сили, дозволяє перейти до реалізації конструкції переводу.

5.2. Багатокритеріальна оптимізація геометричних параметрів ЛД

Запропонована конструкція СП (рис. 5.2) через велику кількість параметрів (діаметри статора і якоря, площу перетину котушки або розміри пружини), значення яких можуть змінюватися в достатньо широких межах, потребує застосування оптимізації, що дозволяє, з одного боку, мінімізувати витрати при виготовленні самого привода, а з іншого – забезпечити необхідне тягове зусилля під час переводу гостряка. Важливою перевагою такого підходу є те, що всі аргументи цільової функції розраховуються під конкретний стрілочний перевід. Оптимізація здійснювалася для найбільш розповсюдженого на залізницях України стрілочного переводу з рейкою типу Р65 марки 1/11. Методика процесу оптимізації достатньо повно викладена в [45, 46, 60, 61].

Формальна постановка задачі умовної оптимізації [60, 61] в загальному вигляді полягає в мінімізації цільової функції $f(\vec{x})$ та описана в попередньому розділі.

Під час вибору шпальної конструкції стрілочного переводу цільова функція, з одного боку, повинна зв'язувати математичними залежностями геометричні розміри електропривода, а, з іншого боку, сили, що взаємодіють у процесі переводу стрілки. Використовуючи математичний опис цих сил [58-65], цільова функція повинна мати достатньо простий вигляд і малий комп'ютерний час обчислення (наприклад, при використанні середовища MATLAB). З урахуванням вищесказаного в якості цільової функції доцільно прийняти середньоквадратичне відхилення сумарної тягової сили ймовірного пропонованого електропривода [63] відносно сили опору, оскільки мінімізація цієї величини в загальному випадку сприяє зменшенню металоемності при створенні привода, а також для отримання більш високого ККД як двигуна, так і привода в цілому.

Для знаходження оптимального рішення були використані всі перераховані вище методи з використанням різних стартових точок (максимальне, мінімальне і середнє значення).

Як показують результати, отримання оптимального рішення дуже сильно залежить від стартової точки. Раніше було зазначено, досягнення будь-якої величини тягового зусилля двигуна можливе при різноманітних поєднаннях геометричних розмірів. Є випадки, коли рішення взагалі не знайдено. Це говорить про безліч локальних мінімумів, тобто про те, що цільова функція – багатоекстремальна. Тому оператори оптимізаційної процедури повинні утримувати поряд із детермінованими і стохастичні компоненти, здатні оживити пошуковий процес при замиранні його в локальних мінімумах рельєфу цільової функції. Траєкторії пошукового процесу оптимальної точки для трьох варійованих параметрів (D_k , H_{sp} , K_{pr}) з використанням найбільш ефективних методів і різноманітних стартових точок представлені на рис. 5.6 – 5.7, де навкруги позначені стартові точки, а ромби показують оптимальне рішення.

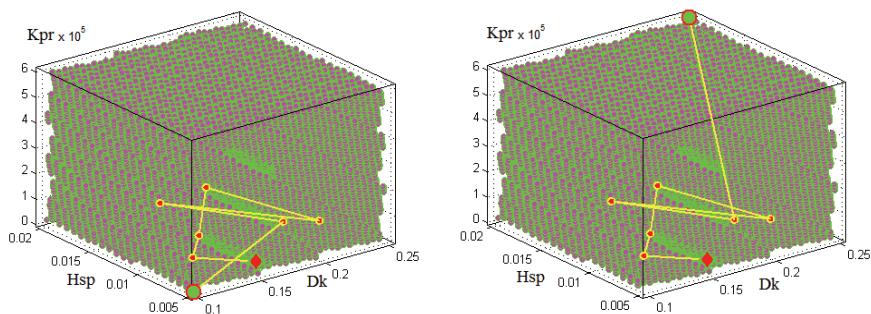


Рисунок 5.6 – Траєкторії пошукового процесу оптимальної точки методом Вейля

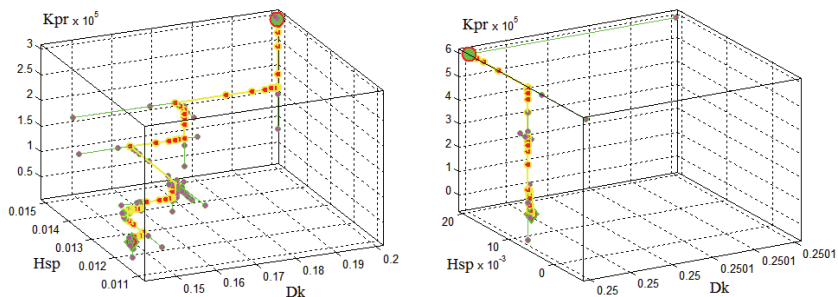


Рисунок 5.7 – Трасекторії пошукового процесу оптимальної точки методом циклічного мінімуму

Отримані значення середньоквадратичного відхилення сил при оптимізаційних параметрах лінійного електропривода зведені в таблиці 5.1, а характеристики розподілення сил представлені на рис. 5.8.

Таблиця 5.1 – Значення середньоквадратичного відхилення сил лінійного електропривода

Метод оптимізації	Середньоквадратичне відхилення, σ
Метод Хука-Дживса	20868
Метод Нелдера-Міда	20863
Метод Флетчера-Рівса	20842
Метод Ньютона-Рафсона	20806
Метод Гаусса-Зейделя	2497,2
Метод Пауелла	2450,9
Метод Вейля	680,9
Метод циклічного мінімуму	959

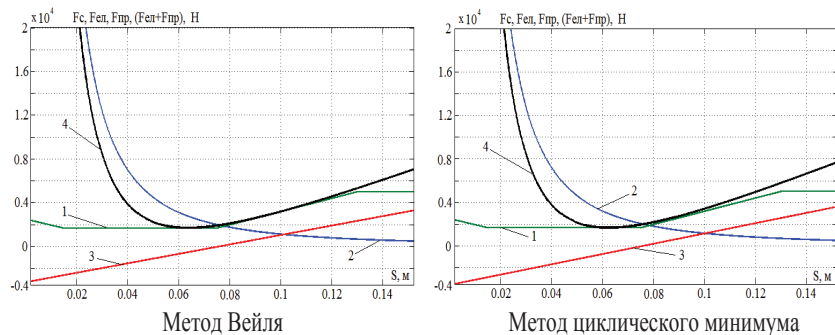


Рисунок 5.8 – Характеристика розподілення сил лінійного привода:
 1 – електромагнітна сила ЛД; 2 – сила пружини; 3 – сила опору;
 4 – сила, докладена до гостряків з боку лінійного привода

З отриманих результатів видно, що найкращі результати рішення поставленої задачі оптимізації показав метод циклічного мінімуму і метод Вейля.

Таким чином, виконана оптимізація геометричних розмірів електропривода методом циклічного мінімуму й методом Вейля дозволила отримати необхідний вид тягової характеристики, зменшити витрати на матеріали, що уможливило отримання більш високого ККД як двигуна, так і привода в цілому.

Зусилля переводу стрілки, як відомо, залежить від ваги частин стрілки, що переміщуються, типу рейок, місця кріплення перевідних тяг і коефіцієнта тертя гостряків об подушки.

З метою визначення впливу характеристики тертя і марки переводу на параметри лінійного електропривода методом циклічного мінімуму проведено оптимізаційне дослідження, в ході якого змінювалась жорсткість характеристики навантаження і марка переводу. У результаті такого дослідження отримані характеристики зміни оптимізованих параметрів в залежності від стану і марки стрілочного переводу у вигляді тривимірних поверхонь, які представлені на рис. 5.9.

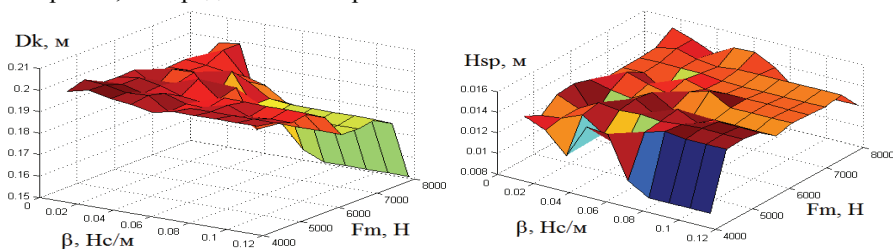


Рисунок 5.9 – Поверхні, що відображають зміни оптимізованих параметрів

Графіки показують, що результат оптимізаційного пошуку геометричних розмірів двигуна, зокрема розмірів котушки, залежить від марки стрілочного переводу. Діаметр котушки варіюється від 150 мм до 210 мм, а її довжина – від 300 мм до 600 мм, а товщина спинки статора – в межах 11-16 мм. Коефіцієнт пружини достатньо сильно зміниться як у відношенні жорсткості характеристики тертя, так і у відношенні марки стрілки, і може приймати значення від $5 \cdot 10^4$ Н/м до $12 \cdot 10^4$ Н/м.

За аналогічною методикою була проведена багатокритеріальна оптимізація геометричних розмірів індукторної машини (рис. 5.3) [60]. Вхідними даними для різних методів оптимізації були прийняті наступні величини, що варіюються: D_d – діаметр двигуна (межі від 190 мм до 210 мм); L_f – довжина кожної з котушок (межі від 100 мм до 300 мм); D_r – діаметр якоря (межі від 50 мм до 100 мм); H_r – товщина стінок якоря (межі від 3 мм до 10 мм); H_z – висота зубця статора (межі від 2 мм до 15 мм). Кількість зубців N_z у кожній секції статора також була різною, але залежало від

довжини котушки L_f й товщини стінок якоря H_r . Ширина зубця статора W_z , а також ширина міжзубцевої області W_b при розрахунках приймалися рівними товщині стінок якоря.

Як і раніше, оцінка результатів різних методів здійснювалася за значенням середньоквадратичного відхилення сил при оптимізаційних параметрах лінійного електропривода (табл. 5.2). На відміну від електромагніта, найкращі результати оптимізації показав метод циклічного мінімуму.

Таблиця 5.2 – Значення середньоквадратичного відхилення сил лінійного електропривода індукторного типу

Метод оптимізації	Середньоквадратичне відхилення, σ
Метод Нелдера-Міда	18144
Метод Пауелла	1544,9
Метод Вейля	1108,2
Метод циклічного мінімуму	1052,3

Як видно з рис. 5.10, результат оптимізаційного пошуку геометричних розмірів двигуна, як і раніше, сильно залежить від марки стрілочного переводу і характеристики тертя.

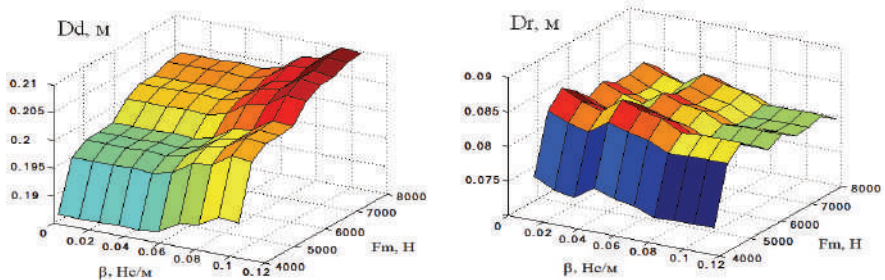


Рисунок 5.10 – Поверхні, що відображають зміни оптимізованих параметрів

Таким чином, єдиного рішення задачі оптимізації геометричних розмірів лінійного електродвигуна для наявних стрілочних переводів немає, а тому подальші дослідження і розробки будуть проводитися для стрілки з маркою рейки Р65.

5.3. Математичне моделювання робочих процесів у ЛД

Для вирішення поставленої задачі в першу чергу необхідно вибрати узагальнені механічні й електричні координати цієї системи (рис. 5.11). Виберемо наступні узагальнені координати: узагальнена координата q_k , узагальнена швидкість \dot{q}_k , узагальнений імпульс сили p_k , узагальнена сила f_k . Особливістю моделі, що розглядається, є введення контуру вихрових струмів i_B замкнутого на активний опір розтіканню струмів r_B у сердечнику.

У нашому випадку для електромеханічної системи характерні наступні змінні узагальнення електричні координати q, i, e, ψ .

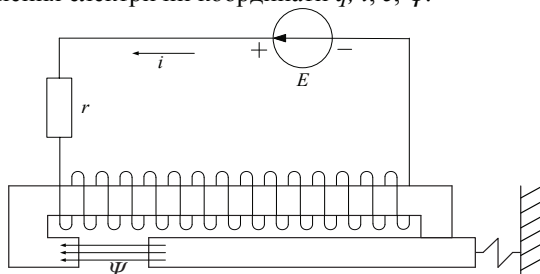


Рисунок 5.11 – Схеми замощення ЛДЕМТ

Поетапне створення математичної моделі розглянуто в [64,65].

Підсумкова система рівнянь електромеханічної системи має наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \frac{d\Psi(i, x)}{dt} + ri; \\ \left[\frac{\partial \left(\int_0^i \Psi(i, x) di \right)}{\partial x} \right] - cx + F_{оп} + 2F_{пр} = m \frac{dv}{dt}; \\ \frac{dx}{dt} = v. \end{array} \right. \quad (5.2)$$

Оскільки потокозчеплення – це складна функція, яка залежить від двох змінних (i, x), то похідні потокозчеплень можна представити в такому вигляді:

$$E = \frac{\partial \Psi(i, x)}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\partial \Psi(i, x)}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + ri. \quad (5.3)$$

Уявімо це рівняння в нормальній формі Коші. Система диференціальних рівнянь буде мати наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi}{\partial i}} \cdot \left[E - ri - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot v \right]; \\ \frac{dv}{dt} = \frac{F_{ел} + 2F_{пр} - F_{оп}}{m}; \\ \frac{dx}{dt} = v. \end{array} \right. \quad (5.4)$$

Система рівнянь являє собою математичну модель ЛДЕМТ. Для ідентифікації параметрів необхідно встановити залежність між потокозчепленням $\psi(i, x)$, з одного боку, узагальненими координатами і їх похідними, з іншого боку, для чого пропонується провести комплекс цифрових експериментів і визначити ці залежності. Для визначення значення

потокозчеплень пропонується проводити розрахунок магнітного поля ЛДЕМТ в двомірній постановці з використанням метода скінченних елементів для плоскопаралельної задачі.

Для стаціонарного магнітного поля метод скінченних елементів у двомірній розрахунковій моделі прямокутної системи координат полягає в мінімізації нелінійного енергетичного функціонала [66]:

$$F = \int_{S_p} \left(\int_0^{B_x} \frac{1}{\mu} B_x dB_x + \int_0^{B_y} \frac{1}{\mu} B_y dB_y \right) dS_p - \int_S \vec{A} \cdot \vec{\delta} dS_p \quad (5.5)$$

де S_p – область розрахунку магнітного поля; B_x, B_y – складові вектора магнітної індукції; \vec{A} – векторний магнітний потенціал, що визначається співвідношенням:

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (5.6)$$

За результатами аналізу магнітного поля можна визначити значення потокозчеплення $\psi(i, x)$ ЛДЕМТ і значення електромагнітної сили.

Для вирішення поставленої задачі використовувався програмний комплекс FEMM, що включає до себе:

- передпроцесор, що дозволяє задавати граничні умови, властивості матеріалів розрахункових областей і програму триангуляції;
- програму розрахунку магнітного поля, яка складає і вирішує систему нелінійних рівнянь методом Ньютона-Рафсона;
- постпроцесор, що дозволяє відображати розрахункову картину магнітного поля, здійснювати розрахунок поверхневих інтегралів різного виду, розраховувати інтеграли за заданим контуром, визначити магнітний потік, що проходить через заданий контур, визначити значення напруг, індукцій магнітного поля в заданих точках, магнітні проникності в заданих точках.

На рис. 5.12 показана область розрахунку, яка розбита на кінцеві трикутні елементи, а також картина замикання магнітних ліній при максимальному зазорі і номінальному струмі в обмотці.

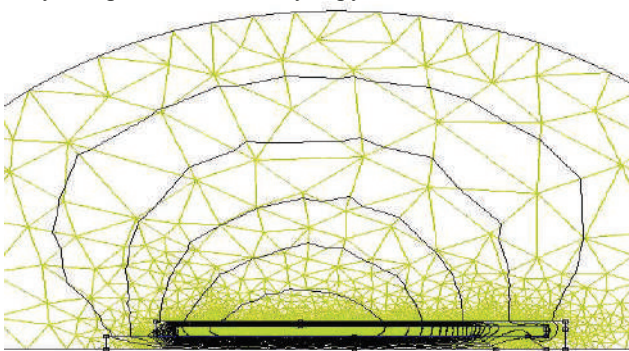


Рисунок 5.12 – Розрахункова область і зображення магнітного поля при максимальному зазорі

Розподіл магнітного поля в розрахунковій схемі ЛДЕМТ при максимальному і нульовому зазорі, а також значення магнітоіндукції для різних областей машини (справа від моделей) представлено на рис. 5.13.

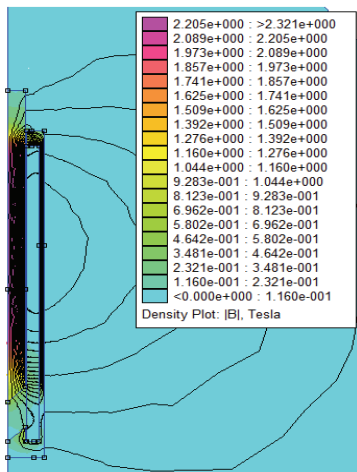


Рисунок 5.13 – Розподілення магнітного поля в ЛДЕМТ для зазору 154 мм

Розрахунок здійснюється за допомогою підпрограми, написаної в текстовому файлі мовою Lua. Граничними областями такого розрахунку було положення якоря – від 154 до 0 мм. Розподіл електромагнітної сили й потокозчеплення у вигляді поверхонь представлени на рис. 5.14.

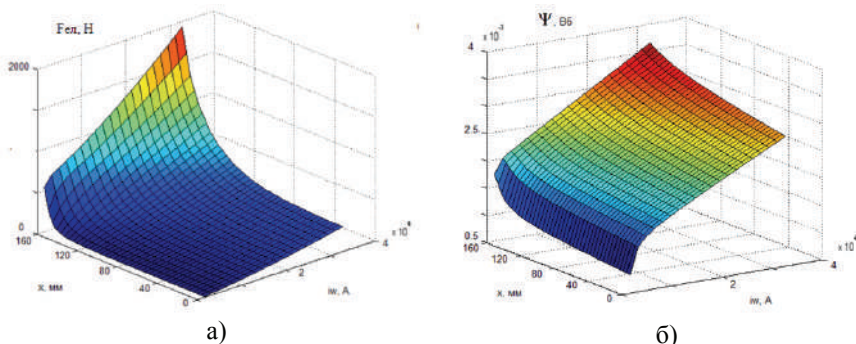


Рисунок 5.14 – Результати цифрового моделювання:
а – електромагнітна сила; б – потокозчеплення

Для отримання безперервних залежностей потокозчеплення і електромагнітної сили результати цифрового моделювання пропонується апроксимувати степеневими функціями. Для визначення коефіцієнтів регресії пропонується використовувати метод на основі поліномів Чебишева. Криві зміни сили для розрахованих програмою значень і для значень за поліномом показані на рис. 5.15.

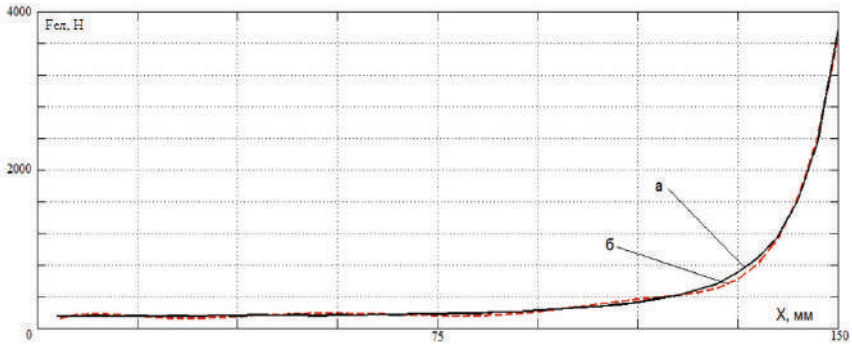


Рисунок 5.15 – Криві зміни електромагнітної сили:
а – для значень за FEMM; б – для значень за поліномом

На підставі диференціальних рівнянь (5.4) і отриманих у результаті апроксимації неперервних залежностей потокозчеплення та електромагнітної сили побудована структурна схема електропривода з ЛДЕМТ, яка представлена на рис. 5.16.

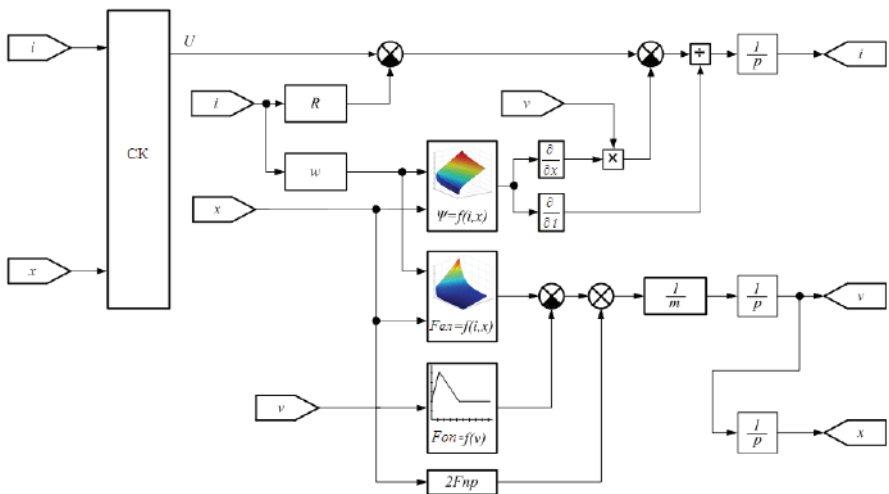


Рисунок 5.16 – Структурна схема електропривода з ЛДЕМТ

Наведений регресійний аналіз із використанням полінома Чебишева на множині рівновіддалених точок дозволяє визначити неперервну залежність електромагнітної сили. Максимальне відхилення складає 2% при використанні поліномів 6 ступеня.

На підставі структурної схеми (рис. 5.16) виконана модель у середовищі MATLAB, яка наведена на рис. 5.17.

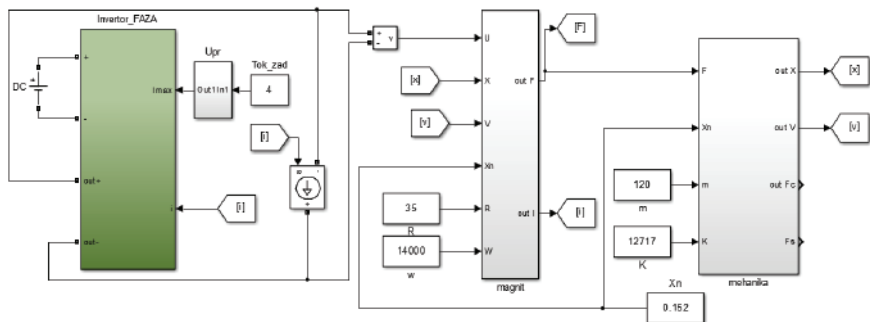


Рисунок 5.17 – Імітаційна модель СП з ЛДЕМП в середовищі MATLAB

Результатами досліджень математичної моделі електропривода є отримані динамічні характеристики: тягової сили електропривода (рис. 5.18), швидкості (рис. 5.19) й переміщення (рис. 5.20) гостряків.

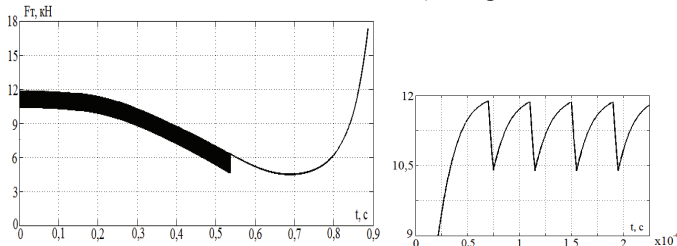


Рисунок 5.18 – Характеристика сумарної сили електропривода

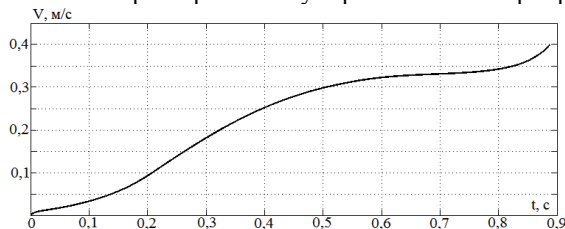


Рисунок 5.19 – Характеристика швидкості руху гостряка

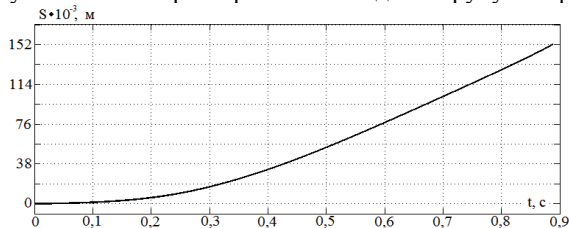


Рисунок 5.20 – Характеристика переміщення гостряка

Для отримання диференціальних рівнянь чотирифазного ЛД складемо його розрахункову схему. При цьому приймаємо наступні допущення: усі фази машини ідентичні; відсутній облік взаємного впливу фаз; не враховані втрати в сталі.

Розрахункова схема в поздовжньому розрізі ЛД показана на рис. 5.21.

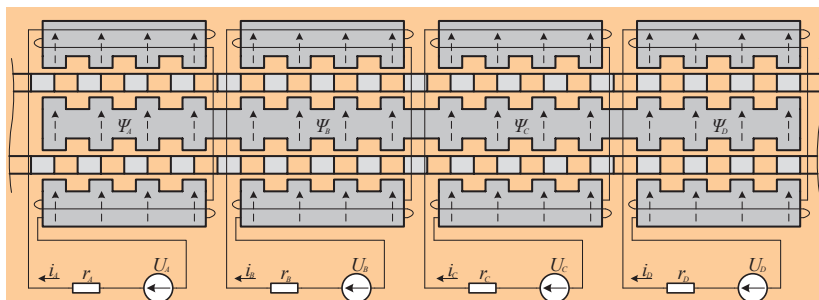


Рисунок 5.21 – Розрахункова схема чотирифазного ЛД

На схемі (рис. 5.21): U_A, U_B, U_C, U_D – напруги джерел живлення; r_A, r_B, r_C, r_D – активні опори відповідних фаз статора; i_A, i_B, i_C, i_D – струми у відповідних фазах статора; $\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_D$ – потокозчеплення відповідних фаз.

Методика отримання математичного опису ЛД аналогічна ЛД на основі електромагніта базується на використанні рівняння Лагранжа.

Отже система диференціальних рівнянь ЛД у нормальній формі Коші має наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_A}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_A(i_A, x)}{\partial i_A}} \left(U_A - r_A i_A - \frac{\partial \Psi_A(i_A, x)}{\partial x} v \right) \\ \frac{di_B}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_B(i_B, x)}{\partial i_B}} \left(U_B - r_B i_B - \frac{\partial \Psi_B(i_B, x)}{\partial x} v \right) \\ \frac{di_C}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_C(i_C, x)}{\partial i_C}} \left(U_C - r_C i_C - \frac{\partial \Psi_C(i_C, x)}{\partial x} v \right) \\ \frac{di_D}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_D(i_D, x)}{\partial i_D}} \left(U_D - r_D i_D - \frac{\partial \Psi_D(i_D, x)}{\partial x} v \right) \\ \frac{dv}{dt} = \frac{F_{EM} - F_{оп} - c v}{m} \\ \frac{dx}{dt} = v \end{array} \right. \quad (5.7)$$

Для ідентифікації параметрів математичної моделі ЛД необхідно встановити залежності між потокозчепленнями фаз $\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_D$, з одного боку, й узагальненими координатами, а також їх похідними - з іншого. Для визначення значення потокозчеплень здійснювався розрахунок магнітного

поля ЛІД у двовірній постановці з використанням методу кінцевих елементів для осіально-симетричної задачі.

На рис. 5.22 представлена кінцево-елементна сітка. В області повітряного зазору для забезпечення точності визначення електромагнітної сили число трикутників не менше 4. В останніх областях установлена адаптивна сіткова модель.

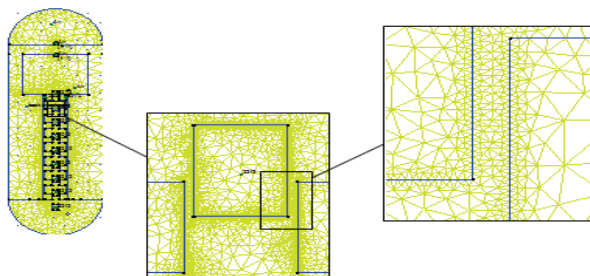


Рисунок 5.22 – Зубцева зона розрахункової схеми

За результатами аналізу магнітного поля визначені значення поточкозчеплень фаз ψ_A , ψ_B , ψ_C , ψ_D ЛІД і значення електромагнітної сили. Для отримання неперервних залежностей поточкозчеплень і електромагнітної сили результати цифрового моделювання апроксимовані неперервними функціями методом поліномів Чебишева.

Розподіл похідних поточкозчеплення за струмом і переміщенням, а також електромагнітної сили від розузгодженого до узгодженого положень представлений на рисунках 5.23, 5.24 і 5.25 відповідно.

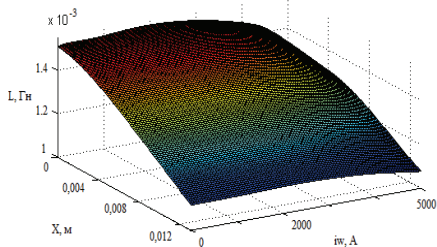


Рисунок 5.23 – Розподіл індуктивності котушки

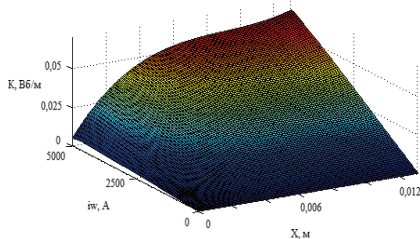


Рисунок 5.24 – Розподіл частинної похідної поточкозчеплення за лінійним переміщенням

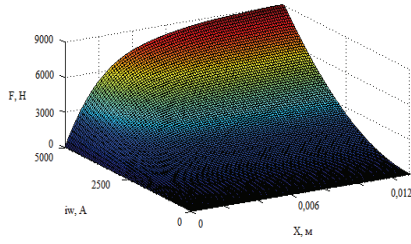


Рисунок 5.25 – Розподіл електромагнітної сили

Використавши систему рівнянь (5.7), отримаємо структурну схему ЛІД:

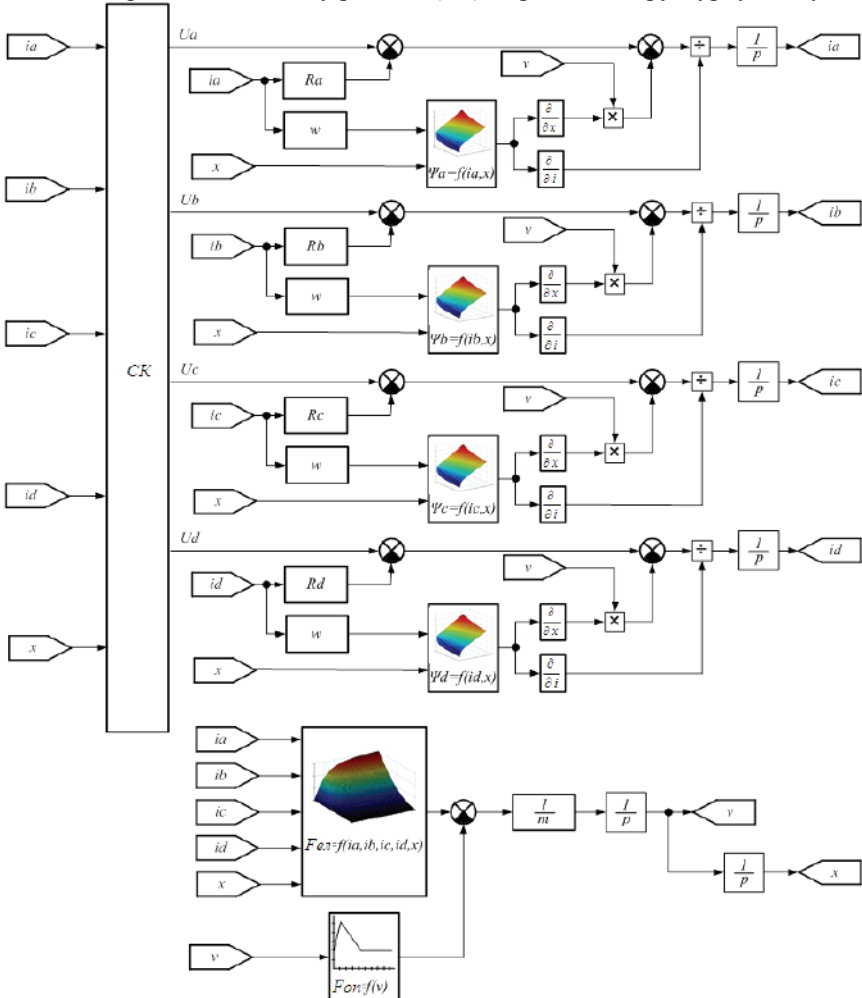


Рисунок 5.26 – Структурна схема ЛІД

На підставі структурної схеми отримана математична модель ЛПД, результатом дослідження котрої є динамічні характеристики, що описують зміну струму двигуна, електромагнітної сили ЛПД (рис. 5.27), швидкості (рис. 5.28) й переміщення (рис. 5.29) гостряків.

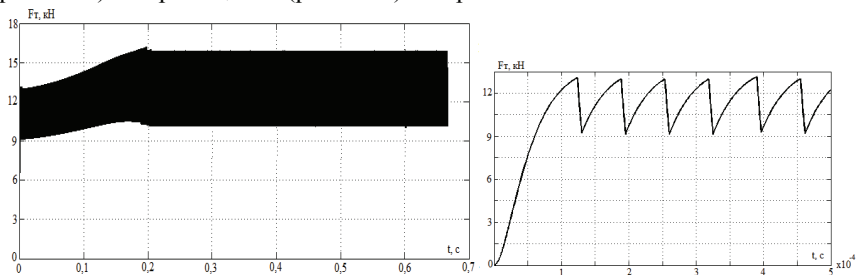


Рисунок 5.27 – Осцилограми електромагнітної сили ЛПД

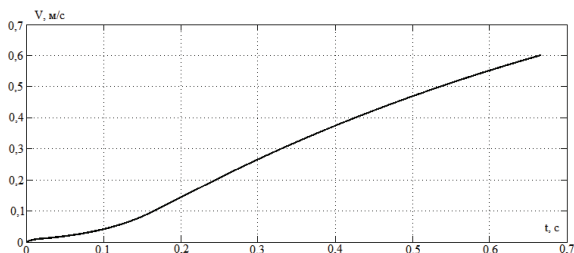


Рисунок 5.28 – Характеристика швидкості руху гостряка

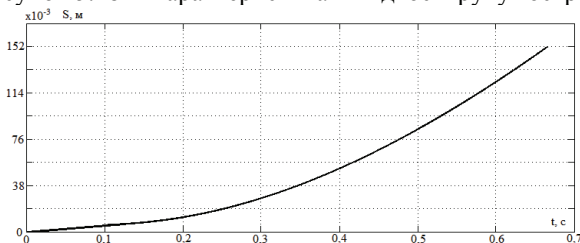


Рисунок 5.29 – Характеристика переміщення гостряка

5.4. Синтез систем керування для електроприводів з ЛД

Хоча наявні методи синтезу систем автоматичного керування електроприводами, як, наприклад, модальне керування, дозволяють створювати системи з достатньо високими показниками регулювання, їх практична реалізація пов'язана з рядом технічних труднощів. До них відноситься необхідність вимірювання складновимірювальних координат (пружний момент тощо), неможливість в окремих випадках реалізувати на практиці синтезовані параметри через обмеження, наявні в реальних електроприводах з тих чи інших причин та ін. Досить слушна ідея замінити лінійні регулятори, які застосовуються, нелінійними, котрі при меншому

числі сигналів вимірвальних координат забезпечували б необхідну вихідну керувальну дію для об'єкта регулювання. Таку можливість забезпечує нелінійний регулятор на основі прямонаправленої багатопарової штучної нейронної мережі, який реалізується у вигляді нейроконтролера, що функціонує за принципом біологічних нейронних сіток.

Відомі публікації про ШНС [67-69] і їх застосування нині стають більш популярними, але в багатьох випадках через специфіку і складність сприйняття перевагу надають більш простим способам реалізації, часто зневажаючи широкими можливостями, котрі надають нейронні мережі.

Приклади створення систем нейромережевого керування електроприводом СП, опубліковані раніше, наприклад, у роботі [70], в котрій ставилася задача покращення якості процесу переводу асинхронного частотно-регульованого привода за допомогою такої СК. За допомогою нейроконтролера вдалося досягти точності позиціонування СП в межах $\pm 0,1$ мм. Час перехідного процесу не перевищував 4 с, що відповідає його інструкції з експлуатації. Також вдалося значно зменшити значення динамічних навантажень у механізмі. Проведені дослідження визначили перспективу застосування більш складної нейромережевої СК в СП.

Як показали дослідження, проведені раніше на математичних моделях ЕП СП, час переводу стрілки скоротився в порівнянні з діючими приводами, що є одною з переваг застосування ЛД.

Через те, що при зменшенні зазору значно зростає сила й, відповідно, прискорення, то виникає ефект удару гостряка об рамну рейку. З метою усунення цього ефекту в СП з ЛДЕМТ пропонується використовувати регульований позиційний ЕП з ІНС, котра забезпечує задану форму кривої швидкості руху гостряків.

Використовуючи отримані геометричні й електричні параметри ЛД можна «навчити» ШНМ керувати об'єктом. Це можливе завдяки наступним властивостям: здатність до навчання, узагальнення й універсальна апроксимація.

Достатньо складний регулятор на базі ШНМ для рішення прикладних задач може бути реалізований за допомогою контролерів, що програмуються.

Застосування нейрорегулятора для ЛІД ускладнене через труднощі математичної моделі машини, що вимагає значних часових ресурсів обчислювальної техніки в процесі навчання. За попередньою оцінкою час навчання ШНМ для ЛІД – 10 місяців за умови відсутності помилок у процесі обчислень.

Тому для керування індукторною машиною розглядалися пропорційні, пропорційно інтегровальні й пропорційно-інтегрально диференціальні регулятори швидкості. Для керування нелінійним об'єктом, таким як досліджуваний ЛІД, коефіцієнти ПІД регулятора є винятково нелінійними функціями, і їх удалося визначити виключно дослідним шляхом. При цьому такі регулятори мають достатньо високі показники якості при керуванні нелінійними і складними системами.

Як показано в роботах [1, 55], для керування електромеханічним об'єктом достатньо використовувати ШНМ структури NN3-10-1, показаної на рис. 5.30. Вхідними сигналами для ШНМ виступають: U_3 – сигнал задавання на переміщення ЛД; x_i – поточне положення якоря ЛД; x_{i-1} – попереднє положення якоря ЛД.

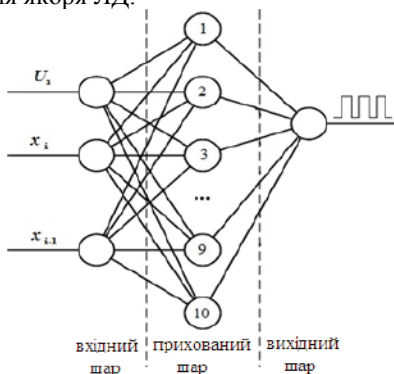


Рисунок 5.30 – Функціональне зображення тришарового перцептрона структури NN 3-10-1

Структурна схема СК з нейроконтролером запропонованої структури показана на рис. 5.31, де вихідний сигнал – керувальний вплив на вході ШПП. У загальному вигляді СУ з ШНМ можна представити наступним чином:

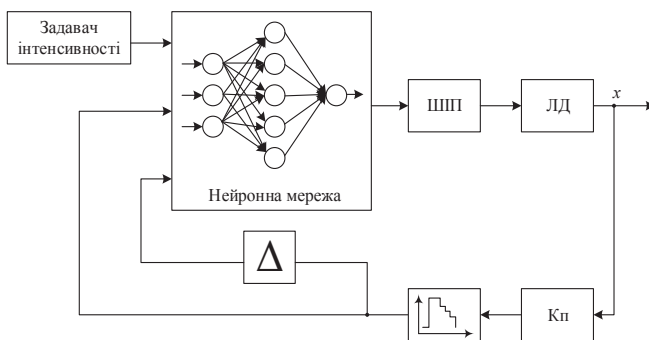


Рисунок 5.31 – Структурна схема СК із вхідними сигналами, що надходять на нейроконтролер

Як показано в роботах [71, 72], найкращі результати можна отримати, застосовуючи сигмоїдальну активаційну функцію. Але через простоту практичної (програмної) реалізації як активаційна обрана кусково-лінійна функція з обмеженням. Крок ланки дискретизації – $\Delta = 0,01$ с.

Задача синтезу нейронної мережі полягає у визначенні вагових коефіцієнтів і сигналів зсуву нейронів скритого й вихідних шарів, котрі б забезпечували потрібне керування. Для рішення цієї задачі використання

описаного вище алгоритму зворотного розповсюдження помилки неможливе, бо він має ряд відомих недоліків: «пастка» локального мінімуму, перенавчання ШНМ, можливість диференціювання обраної активаційної функції в області робочих сигналів і необхідність навчання нейроконтролера за його вихідним сигналом, а не по вихідній координаті ЕП. Між тим, простір параметрів, які синтезуються, має таку велику розмірність через значне число W_{ij} і W_{0j} , які визначаються, що очевидна доцільність глобальної оптимізації.

Для глобальної оптимізації параметрів нейроконтролера потрібно використовувати метод генетичного алгоритму [73, 74]. Розглядаючи нейронну мережу як єдиний набір параметрів, генетичний алгоритм здатний здійснювати її оптимальне налаштування при розмірності пошукового простору, достатнього для рішення більшості практичних задач. При цьому спектр додатків, які розглядаються, набагато перевищує можливості алгоритму зворотного поширення помилки. Крім притаманної йому глобальності, генетичний алгоритм як тренувальна процедура має перевагу в порівнянні з алгоритмом зворотного поширення помилки, а саме: він здатен тренувати нейроконтролер зразу по вихідних характеристиках об'єкта, а не вихідних сигналах нейронної мережі.

Для синтезу нейроконтролера використано наступне програмне забезпечення:

- «RAD Studio 10.1 Berlin» для створення динамічної бібліотеки (що підключається до програми «Mendel 4»), котра містить опис нейронної мережі, об'єкта керування і критерію навчання мовою Pascal;

- «Mendel 4» для розрахунку вагових коефіцієнтів і сигналів зсувів методом диплоїдної схеми генетичного алгоритму;

- «MendelToMatlab» для конвертування результатів «Mendel 4» у формат MATLAB;

- «MATLAB 11» для моделювання роботи інтелектуальної СК на базі нейроконтролера.

Оцінка якості роботи ЕП з ШНМ здійснена за сьома вхідними сигналами ($N = 7$): переміщення якоря – 0, 30, 60, 90, 120, 154, 180 мм.

В якості критерія навчання використана наступна функція:

$$E = \sum_{j=1}^N \int_0^{T_m} |d_j - y_j| dt \quad (5.8)$$

де d_j , y_j – j -е значення вектора бажаних і фактичних значень виходів відповідно; T_m – час перехідного процесу.

Із врахуванням дисипативних властивостей системи застосування критерію виду (5.8) виявилось достатнім для отримання потрібного результату.

СК з нейроконтролером можна представити як функціональну схему, яка показана на рис. 5.32.

Оцінюючи сигнал задавання, поточне (x_i) й попереднє (x_{i-1}) положення якоря, нейроконтролер формує керувальний вплив на вході ШПП, необхідний

для роботи об'єкта керування. Функція захисту за струмом реалізована за допомогою релейного елемента, що обмежує його максимальне значення.

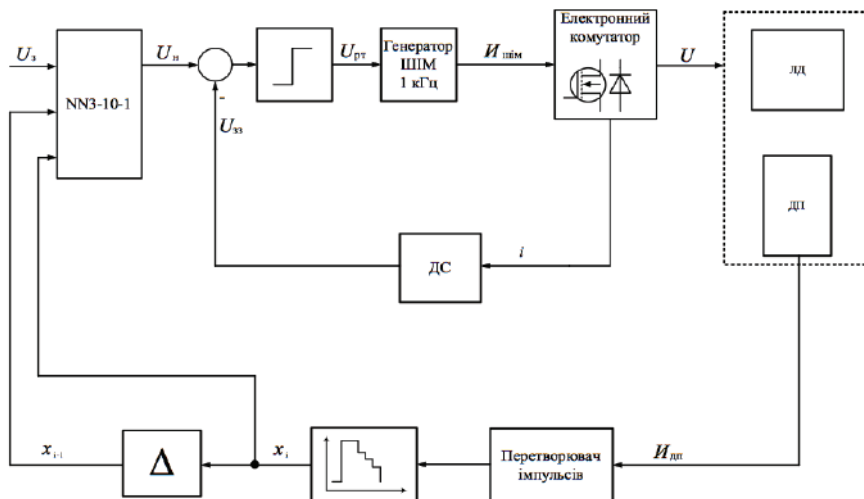


Рисунок 5.32 – Функціональна схема СУ ЛДЕМП з нейроконтролером

Для дослідження роботи приводу на базі ЛДЕМП з використанням синтезованої системи нейронного керування для стрілочного переводу шпального типу створена його узагальнена імітаційна модель, котра дозволила отримати діаграми розподілу електромагнітної сили, тягового зусилля на гостряках, їх переміщення і швидкості переводу (рис. 5.33 – 5.36). Як навантаження використана раніше розглянута характеристика тертя [13, 14].

Отримані осцилограми підтверджують, що створений регульований привод на базі ЛДЕМП забезпечує потрібний час переводу до 0,7 с.

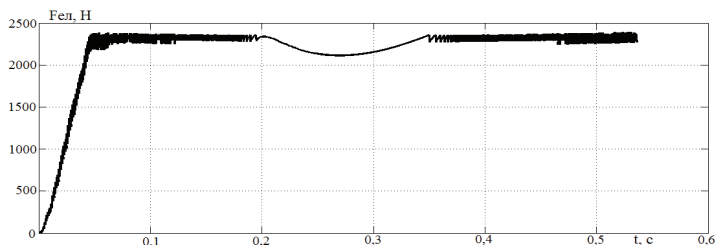


Рисунок 5.33 – Діаграма електромагнітної сили ЛД при роботі СП

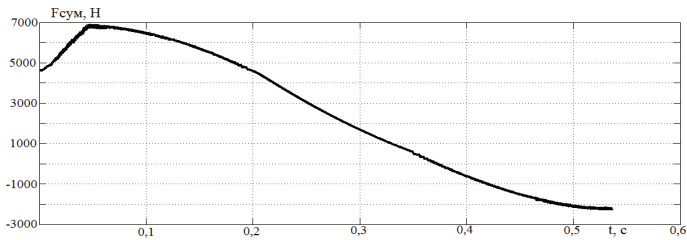


Рисунок 5.34 – Діаграма тягового зусилля на гостряках СП

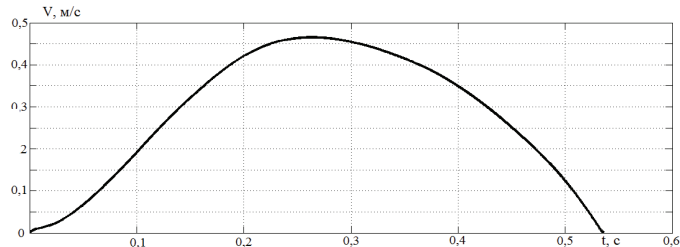


Рисунок 5.35 – Діаграма швидкості руху гостряків СП

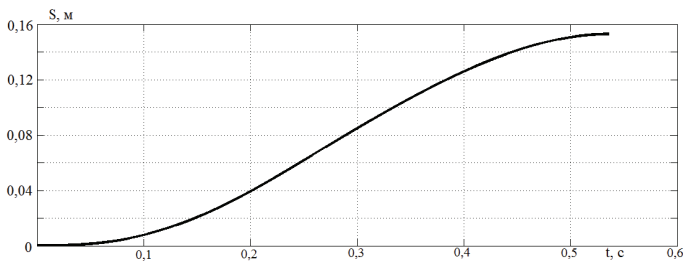


Рисунок 5.36 – Діаграма переміщення гостряків СП

За методи знаходження коефіцієнтів ПІД регулятора обрані методи Чина-Хронса-Ресвика (CHR0%, CHR20%). На відміну, наприклад, від метода Зиглера-Нікольса він дозволяє отримати більший запас стійкості за наявності перерегулювання не більше 20 %.

Під час розрахунку регуляторів, як без перерегулювання (CHR0%), так і з 20 % перерегулюванням (CHR20%), використовуються всього два параметри: a і L із методики, наведеної в попередньому розділі. Формули для розрахунку коефіцієнтів наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Розрахунок параметрів ПІД регулятора

	K_p	K_i	K_d
CHR0%	$0,6/a$	L/K_p	$0,5L/K_p$
CHR20%	$0,95/a$	$1,4L/K_p$	$0,47L/K_p$

Після підлаштування коефіцієнти ПІД регуляторів швидкості набувають вигляду, показано на рис. 5.37.

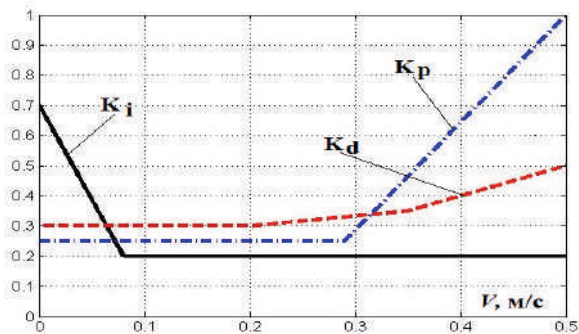


Рисунок 5.37 – Коефіцієнти ПІД регулятора

З урахуванням сказаного вище структура ПІД-регулятора представлена на рис. 5.38.

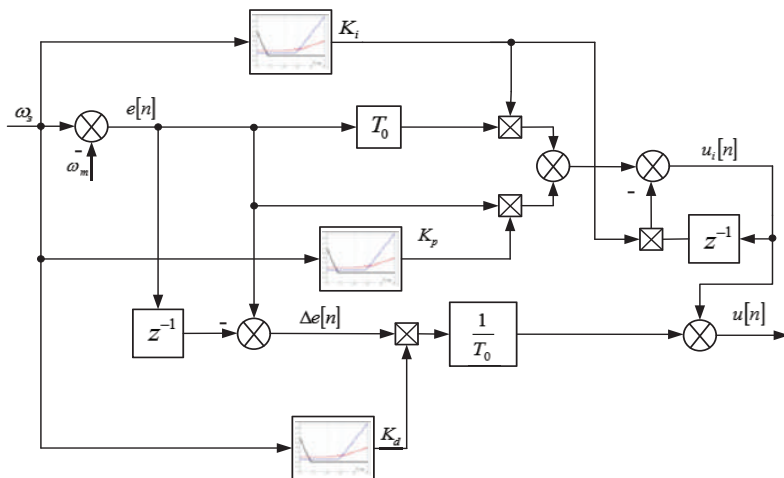


Рисунок 5.38 – Структура ПІД-регулятора швидкості

Запропонована функціональна схема системи керування ЛІД представлена на рис. 5.39. Така схема являє собою двоконтурну систему підпорядкованого регулювання, де контур струму підпорядкований контуру швидкості.

Для дослідження роботи привода нового типу з використанням синтезованої системи підпорядкованого регулювання для стрілочного переведу шпального типу необхідно створити його узагальнену модель. З використанням усіх раніше розглянутих підсистем ЕП (СК з ПІД регулятором, ЛІД, механічної частини), математична модель ЕП СП шпального типу з ЛІД представлена на рис. 5.40.

Отримані осцилограми підтверджують, що створений регульований електропривод на базі ЛД повністю забезпечує потрібну якість процесу переводу як у плані безударного доводу гостряка до рамної рейки, так і часу переводу до 0,7 с при номінальній швидкості роботи двигуна.

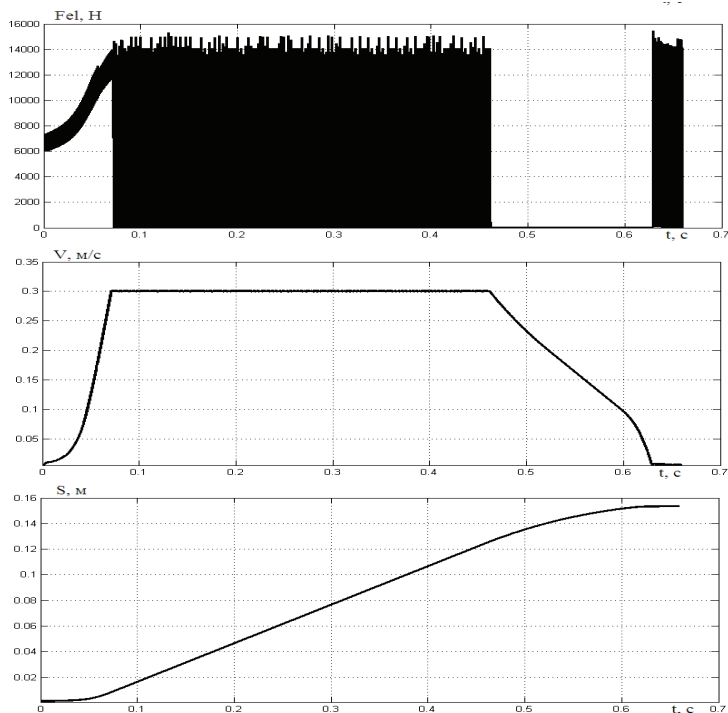


Рисунок 5.42 – Осцилограми роботи стрілочного переводу при $V_z=0,3$ м/с

5.5. Експериментальні дослідження

На сьогоднішній день не існує можливості експериментальних досліджень з ЛД через відсутність машин із потрібними геометричними параметрами. Тому на підставі наведених раніше розрахунків в якості об'єкта керування створений дослідний зразок ЛД електромагнітного типу (ЛДЕМТ) у масштабі приблизно 1:2. Його геометричні розміри отримані в результаті застосування методів оптимізації, детально викладених у [41].

Загальний вигляд створеної машини представлений на рис. 5.43.

На початковому етапі для підтвердження адекватності математичної моделі прийняте рішення реалізувати спрощений варіант СК, яка дозволяє шляхом зміни параметрів ШІМ керувати напругою живлення ЛДЕМТ, контролювати струм в котушці, а також виводити на ЖК-дисплей оперативну інформацію, яка істотно спрощує процес налаштування й моніторингу всієї системи.

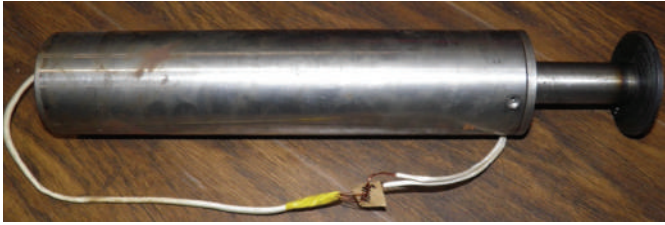


Рисунок 5.43 – Загальний вигляд ЛДЕМТ

Зовнішній вигляд макетного зразка для дослідження роботи привода на базі ЛДЕМТ показаний на рис. 5.44.

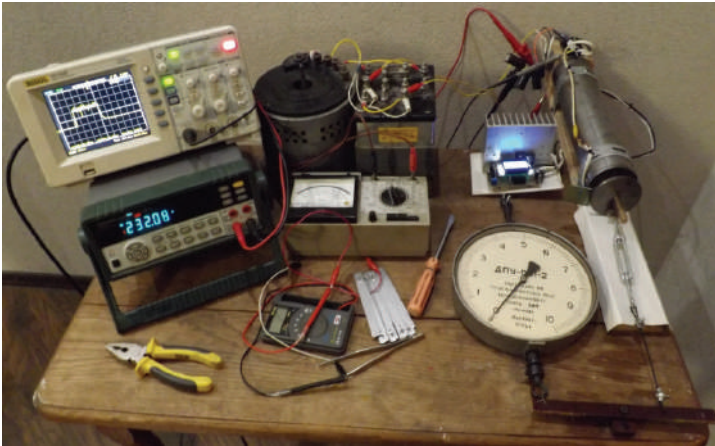
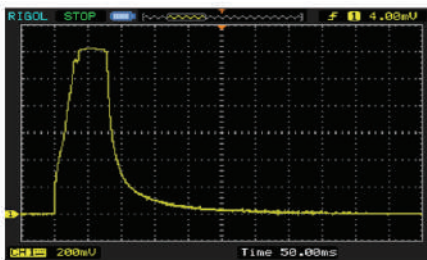
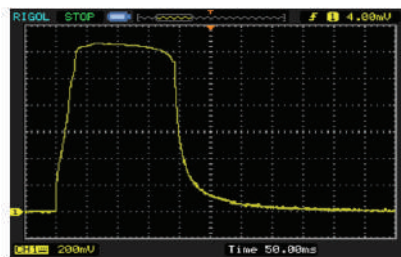


Рисунок 5.44 – Загальний вигляд робочого місця для дослідження привода на базі ЛДЕМТ

Характеристики фазного струму при різних навантаженнях зняті на цифровому осцилографі Rigol DS5022M і представлені на рис. 5.45.



а)



б)

Рисунок 5.45 – Осцилограми струму в обмотці ЛДЕМТ: а – $0,5F_H$; б – F_H

На рис. 5.46 подано низку тягових характеристик, які зняті при частково відкритих ключах (3-6) і в режимі номінальної напруги (1, 2).

Подані характеристики були отримані на математичній моделі (1, 3, 5) й експериментально (2, 4, 6). Порівняльний аналіз адекватності математичної моделі показує, що максимальна похибка не перевищує 9%.

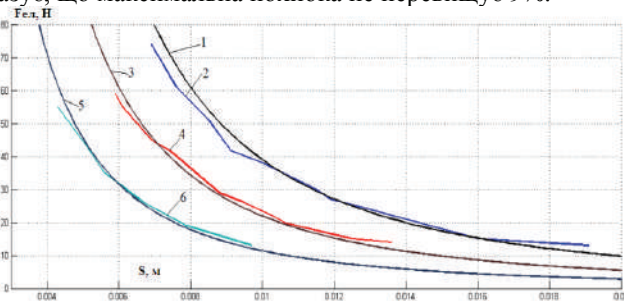


Рисунок 5.46 – Порівняльний аналіз тягових характеристик ЛДЕМТ при різних напругах (тривалостях імпульсів): 1, 2 – 100%; 3, 4 – 70%; 5, 6 – 50%

На рис. 5.47 показаний ЛДЕМТ із підключеним регульованим навантаженням.



Рисунок 5.47 – ЛДЕМТ з навантаженням

Нижче наведені графіки переміщень і швидкостей, отриманих у результаті математичного моделювання (рис. 5.48, 5.50) і за результатами експериментальних досліджень (рис. 5.49, 5.51).

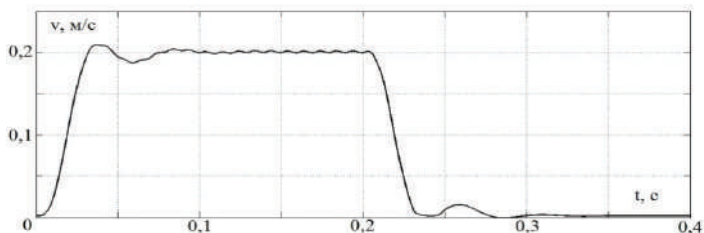


Рисунок 5.48 – Осцилограма швидкості руху якоря (математична модель)

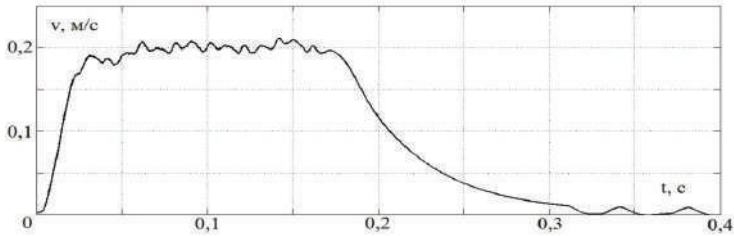


Рисунок 5.49 – Осцилограма швидкості руху якоря (експеримент)

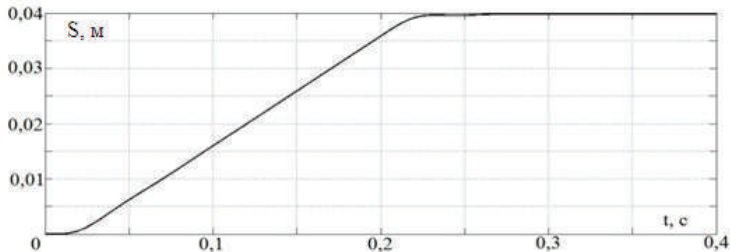


Рисунок 5.50 – Осцилограма переміщення якоря (математична модель)

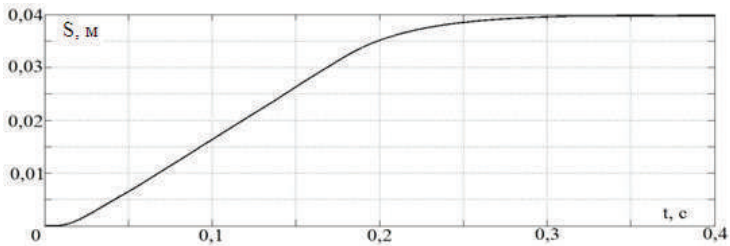


Рисунок 5.51 – Осцилограма переміщення якоря (експеримент)

Результати показують, що математична і практична реалізація нейроконтролера дозволяє підтримувати номінальну (задану в процесі навчання ІНС) швидкість руху якоря (0,2 м/с), здійснити безударне доведення стрілки й забезпечити час переходу стрілки, рівний 0,4 с.

Компоненти узагальненого векторного критерію ефективності роботи ЕП СП з ЛДЕМТ має наступні значення: час переходу $t_s = 0,58$ с, величина пружної сили в робочій тязі $F_{12} = 0$ кН, величина імпульсу удару гостряка $M_i = 0,57$ кг·м/с, а також загальні втрати системи СП $\Sigma P = 0,08$ кВт, а ЕП СП з ЛДД такі значення: час переходу $t_s = 0,69$ с, величина пружної сили в робочій тязі $F_{12} = 0$ кН, величина імпульсу удару гостряка $M_i = 4,57$ кг·м/с, а також загальні втрати системи $\Sigma P = 0,695$ кВт.

Таким чином, створені теоретичні передумови розрахунків, в яких з єдиних позицій для перспективних та існуючих електроприводів знаходяться оптимальні значення регуляторів систем керування і можуть бути визначені показники їх ефективності.

ВИСНОВОК

Таким чином, створені теоретичні передумови розрахунків, в яких з єдиних позицій для перспективних та існуючих електроприводів знаходяться оптимальні значення регуляторів систем керування і можуть бути визначені показники їх ефективності.

Остаточно ефективність досліджених конструкцій ЕП СП, що визначається модулем узагальненого векторного критерію ефективності, наведено у таблиці.

Таблиця – Порівняльний аналіз ЕП СП

Критерій оптимізації	ДПС	АД	ВІД
	зі штатної системою	зі штатної системою	зі штатної системою
Пружна сила F_{12} , кН	17,84	10,64	14,29
Імпульс удару M_i , м ² ·кг/с	62,80	58,74	53,86
Втрати P_i , кВт·ч	0,17	0,161	0,193
Час переводу t_s , с	1,96	1,64	1,54
<i>Модуль узагальненого векторного критерію</i>	0,65	0,59	0,55
Критерій оптимізації	ВІП	ЛДЕМТ	ЛД
	шпального типу	шпального типу	шпального типу
Пружна сила F_{12} , кН	0	0	0
Імпульс удару M_i , м ² ·кг/с	21,09	0,57	4,57
Втрати P_i , кВт·ч	0,133	0,08	0,0964
Час переводу t_s , с	0,98	0,58	0,69
<i>Модуль узагальненого векторного критерію</i>	0,21	0,082	0,04

Системне порівняння ефективності переводів на базі двигунів різних типів показало наступне. Електроприводи з ДПТ та АД, що знаходяться в експлуатації мають найгірші показники з точки зору обраного критерію якості навіть при використанні МП СК. Електропривод СП шпального типу з ВІД доцільно застосовувати для колії з підвищеною швидкістю руху. Електроприводи СП з ЛД найбільш придатні для застосування на швидкісному та високошвидкісному транспорті, а також для гіркової централізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мойсеєнко В.І., Електронний навчальний посібник. / С.Л. Пархоменко, М.М. Чепцов, В.І. Мойсеєнко, Т.А. Коцюба // Вид-во «Навчальна книга», Харків. – 402 с.
2. Офіційний сайт компанії «International Rectifier» [електронний ресурс]. / Режим доступу: www.irf.com.
3. Офіційний сайт компанії «Бомбардьє» [електронний ресурс]. / Режим доступу: www.bombardier.com/files/en/supporting_docs/EPD_EBI_Switch.pdf.
4. Моделювання електромеханічних систем / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін, Г.Ю. Сісюк, О.В Садовой. – Кременчук, 2001. – 376 с.
5. Моисеенко В.И. Автоматика и компьютерные системы на станциях. / В.И. Моисеенко, В.И. Поддубняк – Киев: Транспорт Украины, 1999. – 142 с.
6. Вестник Латвийских железных дорог [електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ita.times.lv/Automatika/Otzimi1.html>.
7. Клепиков В.Б. Синтез двухмассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением при регулировании по полному и неполному вектору состояния / В. Б. Клепиков, И. С. Полянская // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2001. Вип.10. – С. 36-41.
8. Клепиков В.Б. Экспериментальные исследования электромеханической системы с отрицательным вязким трением. / В.Б. Клепиков, Ф. Палис, А.В. Клепиков // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 1999. Вип. 61. – С.26-32.
9. Боровська Т.М. Моделювання та оптимізація систем автоматичного управління: [навчальний посібник для студ. вищ. навч. закл.] / Т.М. Боровська, А.С. Васюра, В.А. Северілов: М-во освіти і науки України. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 132 с.
10. Акимов Л.В. Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния / Л.В. Акимов, В.И.Колотило, В.С. Марков – Харьков: ХГПУ, 2000. – 93 с.
11. Акимов Л.В. Улучшение динамики астатической системы векторного управления двухмассового асинхронного электропривода с постоянной нагрузкой / Акимов Л.В., Литвиненко Д.Г., Вакуленко А.А. // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ: Техніка. – 2011. – № 03 (79). – С.92-97.
12. Зеленев А.Б. Оптимальное релейное управление электроприводом с характеристикой нагрузки, имеющей участок отрицательного вязкого трения. / Зеленев А.Б. // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ». – 2000. – Вип.113. – С. 82-84.

13. Маслий А.С. Микропроцессорный вентиляно-индукторный электропривод стрелочного перевода моношпального : дис. к.т.н.: 05.09.03. Харьков: НТУ «ХПИ», 2014. – 192 с.

14. Смирнов В.В. Синтез системы управления регулируемого электропривода стрелочного перевода как многомассовой электромеханической системы: дис. к.т.н.: 05.09.03. Харьков, 2012. – 219 с.

15. Асмолова Л.В. Исследование срывных фрикционных автоколебаний в системе подчиненного регулирования при традиционных и нетрадиционных настройках регуляторов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. праць. – Кременчук, 2005.– Вип. 3(32). – С.84-88.

16. Клепиков В.Б. К моделированию фрикционных автоколебаний 1-го рода в электромеханических системах. / В.Б. Клепиков, Л.В. Асмолова, П.Л. Моисеенко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. - 2003. – Вип.2(19), Т.1. – С.180-184

17. Клепиков В.Б. О влиянии наблюдающих устройств на устойчивость замкнутой двухмассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением. / В.Б. Клепиков, В.О. Котляров, А.В. Осичев // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПИ». – 1998. – С.59-62.

18. Акимов Л.В. Методики синтеза астатической системы подчиненного регулирования скорости неустойчивого двухмассового объекта / Л.В. Акимов, В.С. Марков //Интегрированные технологии и энергосбережение. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2000. – №1. – С.41-52.

19. Акимов Л.В. Синтез системы модального управления упругими электромеханическими объектами с нагрузкой типа пара трения. / Акимов Л.В., Клепиков А.В., Клепиков В.Б. // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПИ». – 1998. Вип. 52. – С.59-62.

20. Боровська Т.М. Теорія автоматичного управління. Частина 1. Аналіз САУ: [навчальний посібник для студ. вищ. навч. закл.] / Т.М. Боровська, В.А. Северілов, А.С. Васюра: М-во освіти і науки України. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 97 с.

21. Боровська Т. М. Основи теорії управління та дослідження операцій: [навчальний посібник для студ. вищ. навч. закл.] / Т. М. Боровська, І.С. Колесник, В.А. Северілов: М-во освіти і науки України. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 242 с.

22. Автоматизированные электромеханические системы с модальными регуляторами и наблюдателями состояния // Сб. научных статей под ред. В.Б. Клепикова, Л.В. Акимова. – Харьков: ХГПУ. –1997. – 89 с.

23. Буряковский С.Г. Использование модального регулятора в системе управления электродвигателем стрелочного перевода / С.Г. Буряковский // Збірник наукових праць УкрДУЗТ- Харків. – 2015. –№153. – С. 54-60.

24. Методичні вказівки до лабораторних і практичних робіт з курсу «Моделювання електромеханічних систем». Розділ 2 «Моделювання систем електроприводу змінного струму». / укл.: О.І. Толочко, Г.С. Чекавський, О.В.Пісковатська. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – 88с.
25. Зеленов А.Б. Теорія електропривода: Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.
26. Sinamics Function Manual: каталог-справочник / Austria: Siemens A.G. – 2011. – P. 527-542.
27. Leonhard W. Regelung elektrischer Antriebe / W. Leonhard // Durchgesehene und ergänzte Übersetzung des Autors "Control of Electrical Drives" – Springer Verlag. - 1997. – Chap.15. – S. 292.
28. Schönfeld R. Automatisierte Elektroantriebe / R. Schönfeld, E. Habiger. – Berlin: Verl. Technik, 1990. – 524 p.
29. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. / Перельмутер В.М. – Харьков: Основа, 2004. – 210 с.
30. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України. / упоряд. та гол. ред. Е.І. Даніленко - Київ: Транспорт України, 2006. – 336 с.
31. Правила технічної експлуатації залізниць України: ПТЕ 2010. Офіц. вид. – Київ: Мінтранс України, 2010. – 148 с.
32. Рымша В.В., Моделирование и синтез реактивных и индукторных электромеханических преобразователей: дис. д-ра техн. наук: 05.09.01 / Одесский национальный политехнический ун-т. – Одесса: 2004. – 336 с.
33. Титяев Д.К. Сравнительный анализ векторной и традиционной широко-импульсной модуляции / Д.К. Титяев, Д.Н. Мирошник // матер. конф. Автоматизация технологичних процесів. Пошук молодих. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – С. 301-306.
34. Иглин С.П. Теория вероятности и математическая статистика на базе MATLAB. / Иглин С.П. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 612с.
35. Петрушин А.Д. Вентильно-индукторный электропривод железнодорожного стрелочного перевода / А.Д. Петрушин, Р.М. Девликамов, А.Р. Шайхiev и др. // Вестник НТУ «ХПИ» «Проблемы автоматизированного электропривода». – Харьков: НТУ «ХПИ» 2010. – вып. 28. – С. 279-280.
36. Рымша В.В., Усовершенствованная цепно-полевая модель вентильно-реактивного двигателя / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, М.В. Гулий, П.А. Кравченко // Електротехніка і електромеханіка.– 2010.– №5. – С. 24-26.
37. Рябов Е.С., Имитационная модель тягового вентильно-индукторного электропривода / Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, Л.В. Оверьянова, В.Л. Емельянов // Електротехніка і електромеханіка.– 2009.– №5. – С. 67-72.
38. Ткачук В.І., Електромеханотроніка: Підручник / В.І. Ткачук – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2006. – 440 с.
39. David Meeker. Finite Element Method Magnetics / User's Manual, Version 3.4 // 2004 – 79 p.

40. Банев Е.Ф. Энергоресурсосберегающий электропривод эскалатора метрополитена с фазы регулятором: дис. к.т.н.: 05.09. – Харьков, 2013. – 140 с.
41. Buriakovskiy S. Determining parameters of electric drive of a sleeper-type turnout based on electromagnet and linear inductor electric motor / S. Buriakovskiy, An. Masliy, Ar. Masliy // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies and computer systems Engineering technological systems. – 2016. – № 4/1 (82). – P. 32-41.
42. Вороновский Г. К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев и др. – Харьков: Основа, 1997. – 112 с.
43. Back T. Evolutionary algorithms in theory and practice / T. Back. – New York: Oxford University Press, 1996. – 328 p.
44. Balaji M. Design of High Torque Density and Low Torque Ripple Switched Reluctance Machine using Genetic Algorithm / V. Kamaraj // European Journal of Scientific Research, Vol.47 No.2 (2010), pp.187-196.
45. Satit Owatchaiphong. Multi-Objective Based Optimization for Switched Reluctance Machines Using Fuzzy and Genetic Algorithms / Satit Owatchaiphong, Nisai H. Fuengwarodsakul // PEDS, 2009, P. 1530 – 1533.
46. Джафари Хенджани Сейед Моджтаба. Многокритериальный синтез интеллектуальных систем управления энергоблоков АЭС генетическими алгоритмами: дис. канд. техн. наук: 05.13.07. – Харьков, 2010. – 224 с.
47. Coore, I. D.; Price, C. J. (2002). Positive Bases in Numerical Optimization. Computational Optimization & Applications 21 (2). – 2002. – pp. 169-176.
48. Буряковский С.Г. Разработка алгоритмов управления электроприводом стрелочного перевода / С.П. Иглин, В.В. Смирнов, С.Г. Буряковский В.И.Моисеенко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків: УкрДАЗТ.– 2012. – № 6 (97). – С. 3-8.
49. Буряковський С.Г. Інтеграція програмного забезпечення розгалужених телекомунікаційних та інформаційно-керуючих систем / В.І. Моисеєнко, С.Г. Буряковський // Збірник наукових праць. – Донецьк: ДонІЗТ. – 2012. – №29. – С.5-11.
50. Буряковский С.Г. Математическая модель реактивного индукторного трехобмоточного электромеханического преобразователя / Б.Г. Любарский, С.Г. Буряковский, А.С. Маслий, Н.А. Гордеева // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 20. – С. 95-104.
51. Буряковский С.Г. Применение нетрадиционных регуляторов скорости для улучшения динамических характеристик стрелочного железнодорожного перевода / Л.В. Акимов, С.Г. Буряковский, В.В. Смирнов // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №3. – С. 70-74.
52. Буряковский С.Г. Идентификация параметров математической модели вентильно-индукторного трехфазного двигателя непрерывными функциями на основе полиномов Чебышева на множестве равноудаленных

точек / С.Г. Буряковский, А.С. Маслий, Б.Г. Любарский // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук: КрНУ. – 2012. – № 3 (19) – С. 605-606.

53. Гулый М.В. Вентильно-реактивный электродвигатель для аппаратов искусственной вентиляции лёгких: дис. к.т.н.: 05.09.01 / М.В. Гулый, – Одесса, 2010. – 169 с.

54. Palis F. Fuzzy and Neural Control / F. Palis // *Otto-von-Guericke-Universitaet Magdeburg. Institut fuer Elektrische Energiesysteme*. – 2004. – P. 123-132.

55. Приймак Б.І. Нечітке керування електротехнічними об'єктами / Б.І. Приймак, М.М. Бондаренко, О.М. Халімовський // *Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. - Харків: НТУ «ХПИ». – 2007. – №10. – С. 308-311.

56. Офіційний сайт компанії «Microchip Technology Inc» [електронний ресурс]. Режим доступу: / www.microchip.com.

57. Буряковский С.Г. Разработка и исследование системы управления вентильно-индукторным электродвигателем / С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий, Б.Г. Любарский // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті* – Харків:УкрДАЗТ. – 2013. № 5 (102). – С. 68-74.

58. Буряковский С.Г. Вентильно-индукторный электропривод стрелочного перевода моношпального типа / С.Г. Буряковский, В.В. Захарченко, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2014. – № 15 (91). – С 148-150.

59. Holzinger R. *International Railway Journal* / R. Holzinger, R. Robbe // *Simmons-Boardman Publishing Corporation*. – 2002. – № 3. – P. 38-39.

60. Северин В. П. Методы многомерной безусловной минимизации : учеб. пособие по курсу «Методы оптимизации» / В. П. Северин. – Х. : НТУ «ХПИ», 2013. – 160 с.

61. Северин В. П. Методы одномерного поиска. / В.П. Северин, Е.Н. Никулина – Харьков: НТУ ХПИ, 2013. – 124 с.

62. Буряковский С.Г. Расчет тяговой характеристики линейного двигателя для стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий, Б.Г. Любарский // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті* – Харків:УкрДАЗТ. – 2015. – № 1(110). – С. 83-87.

63. Буряковский С.Г. Расчет и оптимизация геометрических размеров линейного привода стрелочного перевода моношпального типа / С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий // *Проблеми енергоресурсосбереження в електротехнічних системах*. Кременчук: КрНУ. – 2015. – №.1 (3). – С.65-67.

64. Буряковский С.Г. Исследование работы электропривода стрелочного перевода на базе линейного двигателя / С.Г. Буряковский, Б.Г. Любарский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий. // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – 2015. – № 12 (1121). – С. 209-213

65. Буряковский С.Г. Математическая модель работы электропривода стрелочного перевода на базе линейного двигателя / С.Г.

Буряковский, Б.Г. Любарский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків: УкрДАЗТ. – 2015. – № 3(112). – С. 59-65.

66. Буряковский С.Г. Применение системы подчиненного регулирования положения остряков на базе эксплуатируемого стрелочного перевода постоянного тока / С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, А.А. Рафальский, В.В. Смирнов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків: УкрДАЗТ. – 2016. – № 2(117). – С. 47-51.

67. Клепиков В.Б. Синтез нейросетевой системы управления одномассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением при ограничении координат электропривода. / Клепиков В.Б., Махотило К. В., Обруч И. В. // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: Основа. – 1997. – Вип.59. – С. 19-21.

68. Обруч И. В. Синтез нейросетевой системы управления одномассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением при ограничении координат электропривода / В.Б. Клепиков, К.В. Махотило, И.В. Обруч // Тр. конф. с междунар. участием «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», (Алушта, 15 – 20 сентября 1997). – Харьков: «Основа», – 1997. – С. 19-21.

69. Holland J. H. Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence. / J. H. Holland – London: Bradford book edition, 1994. – 211 p.

70. Omidvar O., Elliott D.L. eds. Neural Systems for Control // Academic Press, New York, 1997. – 358 p.

71. Обруч И. В. Нейросетевая система управления электропривода электровоза АРП14 с учетом упругости кинематических связей / И. В. Обруч, Ю. Н. Кутовой // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2015. – вып. 12 (1121). – С. 248-250.

72. Обруч И. В. Нейронное управление электромеханической системой с отрицательным вязким трением / В. Б. Клепиков, К. В. Махотило, И. В. Обруч, А. В. Осичев // Тр. конф. с междунар. участием [«Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика»], (Алушта, 16 – 21 сентября 1996). – Харьков: «Основа», – 1996. – С. 283-286.

73. Mitchell M. Mitchell, An Introduction to Genetic Algorithms, The MIT Press, Cambridge, MA, 1996.

74. A. Abraham, “Adaptation of Fuzzy Inference System Using Neural Learning,” Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.

БУРЯКОВСЬКИЙ Сергій Геннадійович
СМІРНОВ Василь Васильович
МАСЛІЙ Артем Сергійович
МАСЛІЙ Андрій Сергійович
ТИЩЕНКО Анна Анатоліївна

ЕЛЕКТРОПРИВОДИ
СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ

Монографія

В авторській редакції

Підп. до друку 21.08.2023 Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 10,46. Обл. вид. арк.10,29
Наклад 200 прим. Зам. № 2023-270-1. Ціна договірна.

Надруковано в ДП «ІНФОТЕХ»
вул. Дегтярівська, буд. 15 Б, м. Київ, 04050
Тел.: +38 (044) 363 43 34
E-mail: info@infotech.gov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6961 від 30.10.2019