

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Савеленко Іван Володимирович

УДК 629.4.05

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМИ
УСТАНОВКАМИ З СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ НА
ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ**

Спеціальність: 05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник

Плешков Петро Григорович,

кандидат технічних наук, професор

Кіровоград – 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ЗАДАЧА АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИХ УСТАНОВОК	12
1.1 Аналіз питання сучасного стану тягових установок	12
1.2 Аналітичний огляд методів та способів автоматичного керування тяговими установками	18
1.3 Аналіз методів вирішення задачі синтезу оптимальних систем автоматичного керування тяговими установками	22
1.4 Математичний опис тягової установки з синхронним двигуном на постійних магнітах	28
1.4.1. Математична модель механічної частини електровозу	29
1.4.2. Математична модель синхронного двигуна з постійними магнітами... 33	
1.5 Постановка та етапи розв'язання задачі автоматизації керування тягових установок.....	38
1.6 Загальна методика досліджень	39
Висновки до розділу	43
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИХ УСТАНОВОК.....	44
2.1 Постановка задачі синтезу системи автоматичного керування тягових установок.....	44
2.2 Методика вирішення задачі синтезу системи автоматичного керування тяговою установкою	46
2.3 Математичні моделі динаміки тягової установки	49
2.3.1. Математична модель динаміки руху тягової установки на основі СДПМ з пусковими обмотками	49

2.3.2 Математична модель динаміки руху тягової установки на основі СДПМ без пускових обмоток	60
2.4. Синтез оптимальних сигналів керування для тягової установки з синхронним двигуном на постійних магнітах без пускових обмоток.....	63
2.4.1. Синтез оптимальних сигналів керування для струму i_q та швидкості ω_R для тягових установок з СДПМ без пускових обмоток	64
2.4.2. Синтез оптимальних сигналів керування для струму i_d для тягових установок з СДПМ без пускових обмоток	68
2.5. Синтез оптимальних сигналів керування для тягової установки з синхронним двигуном на постійних магнітах з пусковими обмотками	69
2.5.1. Синтез оптимальних сигналів керування для струмів i_d та i_D для тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками.....	69
2.5.2. Синтез оптимальних сигналів керування для струмів i_q , i_Q та швидкості ω_R для тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками	71
Висновки до розділу	75
РОЗДІЛ 3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВОЮ УСТАНОВКОЮ.....	76
3.1. Структурна реалізація сигналів оптимального керування тяговою установкою.....	76
3.1.1 Структурна реалізація сигналів оптимального керування тяговою установкою з СДПМ без пускових обмоток	77
3.1.2 Структурна реалізація сигналів оптимального керування тяговою установкою на базі СДПМ з пусковими обмотками	78
3.1.3 Спостерігач Люенбергера для змінної стану i_D	79
3.1.4 Спостерігач Люенбергера для змінної стану i_Q	83

3.2 Комп'ютерні моделі системи автоматичного керування рухом тягової установки	87
3.2.1 Комп'ютерні моделі САК рухомтягової установки з СДПМ без пускових обмоток.....	87
3.2.2 Комп'ютерні моделі САК рухом тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками.....	92
3.3 Комп'ютерне моделювання роботи системи автоматичного керування рухом тягової установки.....	98
3.3.1 Технологія комп'ютерного моделювання та опис базової моделі.....	98
3.3.2 Результати комп'ютерного моделювання роботи САК рухом тягової установки з СДПМ без пускових обмоток	99
3.3.3 Результати комп'ютерного моделювання роботи САК рухом тягової установки на основі СДПМ з пусковими обмотками.....	99
Висновки до розділу	104
РОЗДІЛ 4 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВОЮ УСТАНОВКОЮ	105
4.1 Практична реалізація системи автоматичного керування тяговою установкою.....	105
4.2 Експериментальні дослідження системи автоматичного керування тяговою установкою	111
4.3 Аналіз результатів експериментальних досліджень системи автоматичного керування тяговою установкою	113
Висновки до розділу	118
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	119
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	121
ДОДАТКИ.....	132

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

САК – система автоматичного керування

СДПМ – синхронний двигун на постійних магнітах

ДПС – двигун постійного струму

АД – асинхронний двигун

ККД – коефіцієнт корисної дії

ЕРС – електрична рушійна сила

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ПЧ – перетворювач частоти

ДПР – датчик положення ротора

АКОР – аналітичне конструювання оптимальних регуляторів

ω_R – кутова (електрична) швидкість статора

F_{m0} – магніторушійна сила постійного магніту СДПМ

F_D, F_Q – складові магніторушійної сили постійного магніту СДПМ

u_d, u_q – складові напруги обмоток статора по осям d, q ;

i_d, i_q – складові струму обмоток статора по осям d, q

r_s – активний опір статорної обмотки СДПМ

ψ_d, ψ_q – потокозчеплення обмоток статора по осям d, q

i_D, i_Q – струми еквівалентної пускової обмотки по осям d, q

r_D, r_Q – опір еквівалентної пускової обмотки по осям d, q

ВСТУП

Актуальність теми. Підвищення енергоефективності є одним з пріоритетних завдань промисловості України. Рудовидобувна галузь є однією з найбільш енергоємних. В технологічному процесі видобування сировини на транспортування припадає до 30 % загальних витрат [1], що обумовлює необхідність їх скорочення за рахунок підвищення енергетичних показників тягових установок під час руху.

На сьогодні в Україні перебувають в експлуатації понад два десятки родовищ залізних руд. Основним тяговим транспортом на рудних шахтах є контактні або контактено-акумуляторні електровози, кількість яких становить близько чотирьох тисяч.

Надійність роботи електрообладнання тягових установок залежить від умов роботи та режимів експлуатації. Статистично доведено, що міжремонтний термін експлуатації двигунів не перевищує 3-10 місяців залежно від типу електродвигуна. На ремонти електрообладнання тягових установок витрачають десятки мільйонів гривень на рік [1-2].

Найпоширенішим типом двигунів, що використовують в тягових установках нашої країни, є двигуни постійного струму. Використання тягових електроприводів змінного струму стримувалось необхідністю використання джерел живлення з частотним перетворювачем напруги, відносно великою вартістю та складністю систем автоматичного керування (САК).

Одним із шляхів покращення енергетичних показників тягових установок є удосконалення їх САК. Адже застосування досконаліших САК тягових установок, спрямованих на покращення динамічних характеристик електроприводу, призводить до зниження рівня споживання електричної енергії. Заощадження електроенергії досягають шляхом зниження рівня

максимальних струмів в обмотках статора за рахунок скорочення тривалості перехідних процесів під час пуску електроприводу.

Проблеми автоматизації режимів роботи електроприводів змінного струму, зокрема й електроприводів на основі синхронних двигунів з постійними магнітами (СДПМ), досліджуються в роботах М.М. Ботвинніка, І.Я. Браславського, А.А. Булгакова, А.М. Вейнгера, В.Б. Клепікова, І.А. Луценка, Г.Г. Півняка, С. М. Пересади, К.А. Пупкова, Д.Й. Родькіна, Ю.А. Сабініна, А.В. Садового, О.М. О.В. Слежановського, Ю.Г. Шакаряна, Р.Т. Шрейнера, О.П. Чорного, Я.З. Ципкіна та ін.

В роботах вищезазначених авторів запропоновані підходи до створення САК електроприводами на основі СДПМ малої потужності, що базуються на класичній теорії автоматичного керування. Застосування таких підходів для створення САК тягових електроприводів на основі СДПМ середньої та великої потужності не дозволяє забезпечити бажану швидкодію та точність їх функціонування через неврахування їх технічних особливостей.

Зважаючи на сучасний стан розвитку мікропроцесорної техніки досконалішим є підхід до створення САК тяговими електроприводами на основі СДПМ, що заснований на ідеях Понтрягіна, які склали основу сучасної теорії оптимального керування.

Отже, задача удосконалення САК тягових установок на основі СДПМ з метою підвищення їх енергетичної ефективності є вельми актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, представлені у роботі, виконувались відповідно державної програми «Енергозбереження в Україні». Дисертаційна робота виконувалась згідно тематичних планів Кіровоградського національного технічного університету на 2007-2015 рр. в межах науково-дослідної роботи № ДР 01032006105 «Розробка енергозберігаючих режимів та енергетичного контролю для промисловості».

Мета дослідження — підвищення енергоефективності шахтних

електровозів за рахунок розроблення алгоритмів керування та створення оптимальних систем автоматичного керування тяговими установками.

Об'єкт дослідження – процес керування рухом тягових установок.

Предмет дослідження – системи автоматичного керування тяговими установками.

Задачі дослідження:

- дослідити особливості використання двигунів постійного та змінного струмів в шахтних електровозах, виявити недоліки та нівелювати їх для підвищення енергоефективності тягових установок;
- проаналізувати методи та способи керування об'єктом дослідження, виконати постановку задачі автоматизації керування рухом тягових установок та розробити етапи їх розв'язку;
- отримати функції перемикання для СДПМ для реалізації оптимального керування релейними регуляторами струмів і швидкості;
- реалізувати оптимальну САК швидкістю руху тягової установки з СДПМ для підвищення енергоефективності тягової установки за рахунок зменшення витрат електроенергії в перехідних процесах;
- провести імітаційне моделювання оптимальних САК швидкістю руху тягових установок з використанням релейних регуляторів та проаналізувати роботу установок в усталених та перехідних режимах;
- реалізувати фізичну модель оптимальних САК швидкістю руху тягових установок та впровадити її в шахтних електровозах.

Методи досліджень. У дисертаційній роботі вирішення поставлених задач відбувалося шляхом використання методів сучасної теорії керування, математичного моделювання, статистичної динаміки, теорії матричного числення, методів аналітичного конструювання оптимальних регуляторів, методів теорії автоматичного регулювання, чисельних методів розв'язку задач.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше обґрунтовано доцільність впровадження СДПМ для шахтних електровозів, що дозволить нівелювати конструктивні недоліки двигунів постійного струму, пов'язані з наявністю щітко-колекторного механізму і низькі показники коефіцієнтів потужності та корисної дії асинхронного двигуна; зменшити масу та габарити електроприводу, підвищити його енергоефективність та довговічність.

2. Вперше отримано функції перемикання для СДПМ, що дозволяють реалізувати оптимальне керування релейними регуляторами струмів і швидкості та відповідно підвищити швидкодію роботи САК тягової установки.

3. Вперше реалізовано САК швидкістю руху тягової установки з СДПМ на основі використання властивостей функції перемикання для релейного регулювання струмів та швидкості. Це дозволяє зменшити витрати електроенергії за рахунок скорочення тривалості перехідного процесу.

4. Набуло подальшого розвитку імітаційне моделювання оптимальних САК швидкістю руху тягових установок з використанням релейних регуляторів, що дозволяє аналізувати роботу установок в усталених та перехідних режимах.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає у підвищенні енергоефективності функціонування тягових установок.

На основі наукових положень створено:

- методику розрахунку оптимальних за точністю релейних сигналів керування для тягових установок;

- комп'ютерні моделі САК швидкістю руху тягової установки для найбільш поширених варіантів конструктивного виконання СДПМ.

Отримані наукові результати впроваджено на Інгульській шахті ДП «Східного гірничо-збагачувального комбінату», що підтверджено відповідним актом впровадження від «30» травня 2015 р. Розроблені

комп'ютерні моделі САК електроприводами на основі СДПМ використовуються на кафедрі “Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” КНТУ для підготовки фахівців за спеціальністю 7.05070103 “Електротехнічні системи електроспоживання”, акт впровадження в учбовий процес від «08» вересня 2015 р.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем одноосібно. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві, такий: [1] запропоновано алгоритм визначення швидкості обертання ротора СДПМ та проведено дослідження перехідних режимів СДПМ за розглянутим алгоритмом; [2] – розроблені математичні моделі СДПМ, а також отримані передаточні функції для контурів струму та швидкості; [6] – проведено аналіз методів визначення теплових втрат в тягових двигунах шахтних електровозів та досліджено вплив технологічних операцій на перебіг теплових процесів в тягових електроприводах; [8] – проведено теоретичні дослідження САК зі спостерігачем Люенбергера, розроблено комп'ютерні імітаційні моделі для аналізу роботи САК електроприводом на основі СДПМ з пусковими обмотками; [9] – проведено розробку САК електроприводом з СДПМ та виконано аналіз роботи САК електроприводом на основі СДПМ в динамічних та статичних режимах.

Усі дослідження, результати яких викладені в дисертації, були проведені у Кіровоградському національному технічному університеті.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні, методичні положення та результати досліджень були представлені і схвалені на міжнародних та всеукраїнських наукових, науково-практичних та науково-технічних конференціях: I Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих вчених «Молодь: наука та інновації» (Дніпропетровськ, 2013 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні методи, інформаційне та технічне забезпечення систем управління

організаційно-технологічними комплексами» (м. Київ, 2014-2015 р.); Міжнародна науково-практична та науково-методична конференція «Енергозбереження в електроприводі АПК» (м. Харків, 2014); Міжнародний симпозіум «Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика» SIEMA'2015 (м. Харків, 2015); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві» (м. Кіровоград, 2015 р.), щорічних наукових конференціях викладачів та співробітників Кіровоградського національного технічного університету (м. Кіровоград, 2008 – 2015 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 10 наукових праць. Наукові результати дисертації опубліковано в 5 статтях у наукових фахових виданнях, з них 2 індексуються у міжнародних наукометричних базах «Ulrich's Periodicals Directory», «Index Copernicus», «CiteFactor» та «Polish Scholarly Bibliography», 5 тезах у збірниках праць науково-технічних конференцій.

Структура роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації складає 160 сторінок, з яких 27 сторінок містять 4 додатки. Основна частина викладена на 131 сторінці друкованого тексту, містить 44 рисунки та 7 таблиць. Список використаних джерел містить 113 джерел та викладений на 10 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ЗАДАЧА АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИХ УСТАНОВОК

В технологічному процесі рудних шахт на транспортування припадає до 30 % від загальних витрат. Це обумовлює пошук шляхів підвищення енергетичних показників тягових установок.

При побудові САК тяговими установками використовується ті ж самі принципи, що і у випадку двигунів постійного струму. Проте такий підхід не враховує ряд конструктивних особливостей, притаманних СДПМ.

Побудовані таким чином САК тягових установок не в повній мірі використовують можливості СДПМ до енергоефективності, тому, одним із шляхів підвищення енергоефективності тягових установок є удосконалення їх САК.

Для підвищення енергетичних характеристик тягових установок на основі СДПМ необхідно обґрунтувати вдосконалення методів автоматизації керування цими приводами та розробити відповідний математичний апарат.

1.1 Аналіз питання сучасного стану тягових установок

У вітчизняній промисловості в тягових установок використовуються в основному двигуни постійного струму (ДПС) або асинхронні двигуни (АД). Широке застосування ДПС обумовлене їх широкими регульовальними можливостями. Проте, ДПС мають ряд недоліків:

- складність виготовлення та обслуговування;
- недостатні динамічні характеристики через обмеження максимального моменту за умовами комутації ДПС;
- високі масо-габаритні показники.

АД є більш економічними, надійними, ніж ДПС та мають вищі експлуатаційні характеристики. Також АД відрізняються від ДПС кращими

динамічними характеристиками, що пов'язане з меншим моментом інерції і відсутністю обмежень на максимальний момент при колекторній комутації. Проте, АД також притаманні деякі недоліки:

- обмежений діапазон регулювання швидкості;
- необхідність використання складних законів частотного керування, що ускладнює структуру САК.
- низький коефіцієнт корисної дії при малих завантаженнях.

На сьогодні в якості найбільш перспективних і доцільних для використання визнані СДПМ [1-4,6]. Це обумовлено рядом їх переваг в порівнянні з вище перерахованими типами електродвигунів, а саме простотою конструкції, кращими масо-габаритними показниками, високими експлуатаційними характеристиками.

СДПМ за регульовальними характеристиками не поступаються ДПС, а за деякими показниками навіть перевершують їх. Слід зазначити, що СДПМ, подібно до ДПС, мають більш низькі масо-габаритні показники, високу надійність та регульовальні можливості у порівнянні з АД. При цьому, за рахунок відсутності колекторних вузлів, спрощується їх конструкція та підвищується надійність роботи в порівнянні з ДПС. Крім високої динаміки, широкого діапазону регулювання, кращої надійності й підвищеного ККД двигуна, СДПМ характеризуються високою ефективністю в режимі гальмування.

Зазначені переваги СДПМ визначають області їх застосування, які представлені на рис. 1.1, а саме в електроприводах електромобілів, металообробних верстатів, тягових установках [5-12]. Це, в свою чергу висуває основні вимоги, що пред'являються до цієї категорії електричних машин: мінімум вартості при максимальній надійності [7,13].



Рис. 1.1. Класифікація областей застосування електроприводів на основі СДПМ

В таблиці 1.1 наведено приклади застосування тягового електроприводу на основі СДПМ розвинених країнах.

Таблиця 1.1. Приклади застосування тягових установок на основі СДПМ в розвинених країнах

№ п/п	Країна де застосовується СДПМ	Вид рухомий складу	Фірма-виробник
1	Італія	високошвидкісні поїзди AGV	Alston
2	Швейцарія	двоповерхові електропоїзди	Bombardier
3	Франція	трамваї, електропоїзди	Alston
4	Чехія	низкопольні трамвайні вагони	Skoda
5	Японія	високошвидкісні електропоїзди	Kawasaki
6	Німеччина	Електропоїзди, шахтні електровози	Siemens
7	Швеція	Електропоїзди Gronataget	Bombardier
8	Туреччина	Низкопольні трамваї Citadis X04	Alston

В даний час в багатьох країнах ведуться роботи з удосконалення СДПМ з метою поліпшення їх пускових і робочих характеристик, зниження вартості та підвищення технологічності конструкцій.

Специфіка тягових установок вимагає створення автоматичних систем керування із заданими показниками якості [6, 8, 11, 12, 14-16]. Основними показниками, що характеризують якість процесу керування при виконанні інженерних розрахунків, є час затухання перехідного процесу, ступінь перерегулювання, ступінь коливальності перехідного процесу, а також ступінь стійкості системи [23,36,42,43].

При розробленні систем керування особливий інтерес представляють інтегральні оцінки якості перехідного процесу [23,42,48,54]. Вони дозволяють дати загальну оцінку швидкості затухання та розмаху відхилення величин, що регулюються. Недоліком інтегральної оцінки є те, що область її застосування обмежується лише системами, в яких спостерігаються монотонні процеси. Тому для систем, в яких спостерігаються процеси знакозмінного характеру, більш доцільно застосовувати квадратичну інтегральну оцінку.

Граничні значення показників якості САК обумовлені обмеженою потужністю джерела живлення, мінімізацією втрат, максимумом ККД і якістю протікання динамічних процесів. Реалізувати ці вимоги можливо шляхом застосування частотно-регульованих електроприводів із широким діапазоном регулювання швидкості [17-22].

Робота виконавчого двигуна, призначеного для використання в частотно-регульованому електроприводі тягової установки, характеризується рядом специфічних особливостей [17-25], що, насамперед, залежать від діапазону зміни швидкості руху.

Динамічні процеси роботи тягових установок (особливо процес пуску) є найбільш важкими та енергоємними режимами. В якості критерію енергетичної ефективності шахтної тягової установки, як правило,

використовують показник питомої витрати електричної енергії при транспортуванні руди на експлуатаційному горизонті [26].

Питома витрата електричної енергії на один рейс визначається за формулою, кВт·год/т·км:

$$a = \frac{(W_{\text{т}} + W_{\text{вп}})}{Q_{\text{в}}}, \quad (1.1)$$

де $W_{\text{т}}$ – витрата електроенергії на переміщення рухомого складу на експлуатаційному горизонті, кВт·год;

$W_{\text{вп}}$ – витрата електроенергії на власні потреби кВт·год; $W_{\text{вп}} \approx 0,02W_{\text{т}}$;

$Q_{\text{в}}$ – продуктивність одного рейсу рухомого складу на експлуатаційному горизонті, т·км.

Витрата електроенергії на переміщення рухомого складу на експлуатаційному горизонті визначається за формулою, кВт·год:

$$W_{\text{т}} = \frac{U_{\text{к}} \sum_{i=1}^n (I_{\text{е}} \Delta t)_i}{1000 \cdot 60}, \quad (1.2)$$

де $U_{\text{к}}$ – розрахункова напруга в контактній мережі, В;

$I_{\text{е}}$ – середнє за інтервал часу Δt значення струму тягового двигуна на розрахунковій ділянці експлуатаційного горизонту;

Δt – інтервал часу за який в двигуні протікає струм $I_{\text{е}}$, с.

Продуктивність одного рейсу рухомого складу на експлуатаційному горизонті:

$$Q_{\text{в}} = n_{\text{в}} m_{\text{з}} S_{\text{з}} + n_{\text{в}} m_{\text{п}} S_{\text{п}} + m_{\text{е}} (S_{\text{з}} + S_{\text{п}}), \quad (1.3)$$

де $n_{\text{в}}$ – кількість вагонеток у рухомому складі електровозу, шт.;

$m_{\text{з}}, m_{\text{п}}$ – маса відповідно завантаженої та незавантаженої вагонетки, т;

$S_{\text{з}}, S_{\text{п}}$ – довжина ділянки, яку рухомий склад проходить відповідно в завантаженому та порожньому стані, м;

$m_{\text{е}}$ – маса тягового електровозу, т.

Проте, показник (1.1) питомої витрати електроенергії не в повній мірі враховує такі технологічні особливості процесу експлуатації тягової установки, як підвищений знос ізоляції за рахунок її перегріву від пускових струмів, посилення зносу підшипникових вузлів та ін.

В роботах [27,28] запропоновано критерій ефективності, який дає змогу врахувати вищеописані технологічні особливості роботи тягової установки та дозволяє визначити максимальний економічний ефект при виконанні технологічної операції.

Згідно теорії, приведеної в роботі [28], критерій ефективності керування рухом тягової установки E , можна визначити за формулою:

$$E = \frac{(PE - RE_{\text{е}} + RE_{\text{зп}} + RE_{\text{зо}} + RE_{\text{зк}})^2 T_1^2}{(RE_{\text{е}} + RE_{\text{зп}} + RE_{\text{зо}} + RE_{\text{зк}}) PE \cdot T_{\text{оп}}^2}, \quad (1.4)$$

де PE – вартісний показник, характеризує кількість отриманої сировини, грн.;

$RE_{\text{е}}$ – вартість електричної енергії, витраченої при транспортуванні руди, грн;

$RE_{\text{зп}}, RE_{\text{зо}}, RE_{\text{зк}}$ – вартісні показники, що виражають зміну стану технологічного обладнання у підшипникових вузлах, обмотках двигуна та колісних парах відповідно, грн;

T_1 – одиничний інтервал часу, в рамках якого можна оцінити потенціальний ефект досліджуваної операції технологічного процесу, год.;

$T_{\text{оп}}$ – тривалість виконання технологічної операції, год.

Як було зазначено вище, одним із шляхів покращення експлуатаційних характеристик тягових установок є удосконалення їх САК. Такі САК обов'язково повинні враховувати особливості режимів роботи тягових установок. Тому необхідно провести огляд існуючих методів та способів автоматичного керування тяговими установками на основі СДПМ з метою виявлення їх недоліків.

1.2 Аналітичний огляд методів та способів автоматичного керування тяговими установками

При побудові САК тяговими установками на основі СДПМ використовується ті ж самі принципи, що і у випадку ДПС. Проте такий підхід не враховує ряд конструктивних особливостей, притаманних СДПМ. Побудовані таким чином САК рухом тягових установок не в повній мірі використовують можливості СДПМ до енергоефективності. Припущення, прийняті при побудові математичних моделей тягових електроприводів, обумовлюють наявність дестабілізуючих збурень, що призводять до похибок САК. Параметри електромеханічної системи обумовлюють величину та характер похибок САК, та їх вплив на динамічні та статичні характеристики тягових установок.

В залежності від впливу на сигнал керування САК тяговими установками поділяються на розімкнені та замкнені. В розімкнених системах відсутній зворотній зв'язок, внаслідок чого при виникненні відхилень вихідної змінної від заданого значення, що виникає внаслідок впливу збурень, сигнал керування на вході залишається незмінним [30-34,59].

В одноконтурних системах збільшення коефіцієнта підсилення понад критичне значення призводить до порушення їх стійкості. Теорія синтезу структур, стійких при необмеженому збільшенні коефіцієнта підсилення, викладена в роботі [30]. Відповідно до цієї теорії ефект стійкості при необмежено великому коефіцієнті підсилення досягається в багатоконтурних

системах, що задовольняють певним структурним умовам якості.

Багатоконтурні системи поділяються на системи з незалежним та підлеглим регулюванням. Недоліками незалежного регулювання є ускладнення системи за рахунок введення перемикаючого пристрою, а також складність обробки сигналів при визначенні проміжних координат.

Аналіз структури багатоконтурних систем показав, що найбільшого поширення набули системи підлеглого регулювання, які характеризуються:

- простотою розрахунку та налаштування;
- зручністю обмеження максимальних значень проміжних координат системи.

Для САК рухом тягових установок на основі лінійних регуляторів, що набули найбільшого розповсюдження, характерний ряд недоліків [36]:

- значний статизм контуру регулювання струму (у випадку пропорційних та пропорційно-диференційних регуляторів);
- суттєві коливання швидкості обертання в перехідних режимах.

Ці обставини ускладнюють використання класичних багатоконтурних систем керування для тягових установок, що вимагають регулювання швидкості з підвищеними вимогами до її точності та стабільності. Усунути недоліки таких систем можливо шляхом побудови системи керування, еквівалентної лінійній САК з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення.

Як відомо [29, 30, 36], збільшення коефіцієнту підсилення системи приводить до зниження усталеної похибки. Також відомо, що й динамічні властивості систем суттєво залежать від величини коефіцієнта підсилення. У зв'язку із цим бажано змінювати коефіцієнт підсилення в широких межах, у тому числі необмежено збільшувати його без порушення стійкості системи.

Такий підхід в області лінійних законів керування дозволяє значно знизити чутливість системи до зовнішніх збурень і забезпечує досить високі можливості компенсації параметричних збурень [31]. Реалізація нескінченно великих коефіцієнтів підсилення за рахунок використання ковзних режимів нелінійних елементів [30, 33, 35] дозволяє за певних умов забезпечити

нульову чутливість систем керування до параметричних і координатних збурень.

В роботі [30] показано, що САК з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення володіють рядом особливих властивостей. Насамперед, це властивість інваріантності відносно до зовнішніх збурень.

Для системи на рис. 1.2, передаточна функція (1.5) по збуренню при $k_{\Pi} \rightarrow \infty$ дорівнює нулю якщо замкнена система є стійкою:

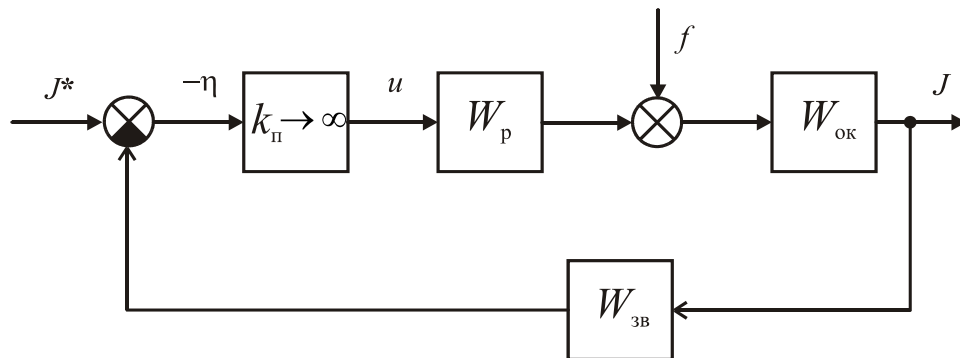


Рис. 1.2. Структурна схема САК

$$W_3(p) = \frac{J(p)}{f(p)} = \frac{W_{ок}(p)}{1 + W_{ок}(p)W_{зв}(p)W_p(p)k_{\Pi}}; \quad \lim_{k_{\Pi} \rightarrow \infty} W_3(p) \rightarrow 0. \quad (1.5)$$

В той же час передаточна функція по керуючому впливу відмінна від нуля майже не залежить від параметрів $W_p(p)$, $W_{ок}(p)$ при $k_{\Pi} \rightarrow \infty$ якщо замкнена система є стійкою:

$$W_k(p) = \frac{J(p)}{J^*(p)} = \frac{W_p(p)W_{ок}(p)k_{\Pi}}{1 + W_{зв}(p)W_p(p)W_{ок}(p)k_{\Pi}}; \quad \lim_{k_{\Pi} \rightarrow \infty} W_k(p) \rightarrow \frac{1}{W_{зв}(p)}.. \quad (1.6)$$

У лінійній системі автоматичного керування неможливо забезпечити нескінченно великий коефіцієнт підсилення через протиріччя між стійкістю й точністю. Однак створення систем керування з теоретично нескінченно великим коефіцієнтом підсилення є можливим, якщо скористатися

результатами робіт [29,34,47]. У цих роботах доведена еквівалентність релейної системи (рис. 1.3), що працює в ковзному режимі, лінійній системі з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення.

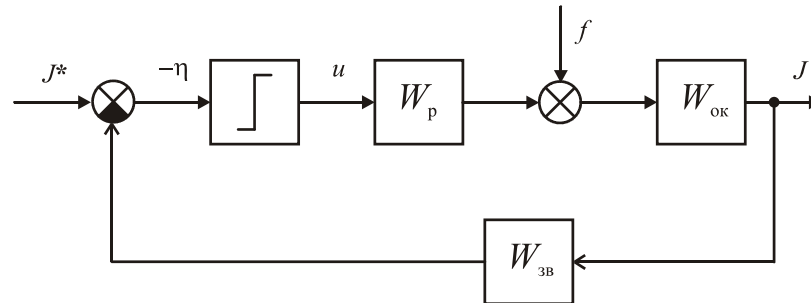


Рис. 1.3. САК релейного типу

Крім того, такі системи характеризуються рядом особливостей, а саме: зниження порядку диференціального рівняння системи, можливість побудови слідкуючих та високоточних систем [35,36,44].

Уведення в систему декількох реле [30, 31, 36] і створення для кожного з них ковзного режиму шляхом охопту зворотними зв'язками разом з кожною ланкою лінійної частини дозволяє усунути вплив більшості параметрів на динамічні властивості й одержати теоретично будь-який бажаний перехідний процес. Такі системи керування мають властивості робастних, тому що вони зберігають свої характеристики незалежно від зміни параметрів об'єкту керування (параметричних збурень) і зовнішніх збурень.

Релейні системи керування можуть забезпечити нульову статичну помилку, що є їхньою беззаперечною перевагою. Завдяки нескладності реалізації ковзних режимів, синтез релейних систем керування є найбільш простим методом досягнення інваріантності до зовнішніх збурень і низької параметричної чутливості.

Таким чином, синтез оптимальних релейних регуляторів, що працюють у ковзному режимі, є одним з перспективних шляхів створення високоякісних систем керування тяговими установками на основі СДПМ.

Для здійснення синтезу релейних САК необхідно провести аналіз методів вирішення задачі синтезу оптимальних релейних САК тяговими установками на основі СДПМ.

1.3 Аналіз методів вирішення задачі синтезу оптимальних систем автоматичного керування тяговими установками

Задача визначення оптимального керування відноситься до задач варіаційного обчислення. При цьому потрібно враховувати, що класичне варіаційне обчислення, через наявність обмежень при завданні оптимального керування, не завжди дозволяє визначити оптимальне керування й оптимальну траєкторію руху системи [29]. Синтез оптимального керування, який заснований на принципі максимуму Понтрягіна, є методом варіаційного обчислення з досить широкими можливостями. Розглянемо порядок розв'язку задачі синтезу оптимального керування.

Нехай об'єкт керування описується рівнянням виду:

$$\dot{x}_i = F_i(\mathbf{X}, \mathbf{U}), \quad (1.7)$$

де $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_i]$ – вектор станів системи;

$\mathbf{U} = [u_1(t), \dots, u_k(t)]$ – вектор сигналів керування, обмежений наступною нерівністю:

$$|u_k(t)| \leq u_{k \max} \quad (k = \overline{1, m}), \quad (1.8)$$

де $u_{k \max}$ – максимальне значення керуючого впливу.

З множини допустимих керувань, що переводять об'єкт (1.7) з початкового стану $x(t_0)$ в заданий $x(t_1)$ необхідно знайти таке керування

для якого функціонал, що наведений нижче, прийме найменше значення:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} f(\mathbf{X}, \mathbf{U}) dt \rightarrow \min, \quad (1.9)$$

Аналіз літературних джерел [31,39,43,77,78,92,95] показав, що основним недоліком застосування методу синтезу оптимальних керувань, заснованого на принципі максимуму Понтрягіна, є його обчислювальна складність.

Динамічне програмування, у порівнянні із принципом максимуму, є основним математичним методом [29,37], за допомогою якого визначається оптимальне керування. На відміну від принципу максимуму, що орієнтований на визначення оптимального керування у вигляді оптимальної програми, динамічне програмування орієнтоване на визначення оптимального керування у формі синтезуючої функції.

Використання динамічного програмування обґрунтоване для дискретних процесів, і його застосування для безперервних процесів не завжди можливо. Це пов'язане з тим, що при виводі функціонального рівняння Беллмана доводиться робити ряд припущень, безпосередня перевірка яких за рівняннями руху й функціоналом неможлива. При виконанні умови безперервної диференційованості функції керування можна здійснювати синтез оптимального по швидкодії керування використовуючи метод динамічного програмування Беллмана.

Згідно цього методу, запропонованого Р. Беллманом, оптимальне керування $\mathbf{U}(\mathbf{X})$, що доставляє мінімум функціоналу на траєкторіях руху об'єкту керування при наявності введених обмежень, повинно задовольняти розв'язку основного функціонального рівняння Беллмана в частинних похідних:

$$\min_{\mathbf{U}} \left[\sum_{i=1}^n \frac{\partial V(\mathbf{X})}{\partial x_i} F_i(\mathbf{X}, \mathbf{U}) + F_0(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \right] = 0, \quad (1.10)$$

де $V(\mathbf{X})$ – функція Беллмана;

$F_0(\mathbf{X}, \mathbf{U})$ – інтегрант критерію;

$F_i(\mathbf{X}, \mathbf{U})$ – функції правих частин об'єкту керування, математична модель якого представлена у вигляді:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = F_i(\mathbf{X}, \mathbf{U}); \\ F_i(\mathbf{X}, \mathbf{U}) = a_i x_i + \sum_{j=1}^m b_{ij} u_j; \\ i = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (1.11)$$

Умови вирішення вказаної задачі визначаються теоремою оптимальної стабілізації [38,39].

Якщо припустити, що матриця вагових коефіцієнтів для критерію (1.9) є діагональною, то із рівнянь (1.10) – (1.11) можна визначити вид оптимального керування для внутрішніх точок області:

$$u_j = -r_j^2 \sum_{k=1}^n b_{kj} \frac{\partial V(\mathbf{X})}{\partial x_k}. \quad (1.12)$$

Так як для випуклих квадратичних функціоналів екстремум лежить або у внутрішній області, або на її межі, вираз для оптимального керування можна записати у вигляді:

$$u_j = -\text{sat} \left(r_j^2 \sum_{k=1}^n b_{kj} \frac{\partial V(\mathbf{X})}{\partial x_k} \right). \quad (1.13)$$

При необмеженому збільшенні коефіцієнту підсилення рівняння (1.13) набуває вигляду закону оптимального за точністю релейного керування.

Рівняння (1.12) – (1.13) є основними рівняннями методу Льютова-Калмана для вирішення задачі АКОР.

Основним недоліком застосування методу синтезу оптимальних керувань, заснованого на теорії динамічного програмування Беллмана є складність знаходження функції Ляпунова, яка визначається в результаті вирішення матричного алгебраїчного рівняння типу Ріккаті.

Труднощі, що виникають при розв'язанні рівняння (1.13) частково вирішуються шляхом застосування методу аналітичного конструювання оптимальних регуляторів за критерієм узагальненої роботи [40-42]. Даний метод найбільш пристосований для вирішення задачі визначення оптимальних керувань для лінійних систем. Проте застосування методу аналітичного конструювання оптимальних регуляторів за критерієм узагальненої роботи пов'язане з деякими труднощами. Критерій якості (1.9) – це квадратичний функціонал із попередньо обраною структурою і заданими наперед ваговими коефіцієнтами. Такий критерій, на відміну від критерію швидкодії або мінімуму витрат енергії є опосередкованим [38,44]. Це призводить до ускладнень при практичному його застосуванні, насамперед при вирішенні задачі вибору вагових коефіцієнтів, яка до теперішнього часу в повній мірі не вирішена.

Вирішення задачі однозначного вибору вагових коефіцієнтів функціоналу (1.9) для часткового випадку запропоновано в роботах [36, 50]. В цих роботах вибір вагових коефіцієнтів пропонується здійснювати виходячи із наступного формулювання задачі оптимального керування: для об'єкту керування (1.7) із усього класу допустимих функцій, що підпорядковані обмеженням $|U_i(t)| \leq 1$, необхідно знайти оптимальне керування, що забезпечує максимальну швидкість спадання будь-яких початкових відхилень основної керованої координати від траєкторії

незбуреного руху, і в подальшому мінімальне відхилення від цієї траєкторії за рахунок мінімізації функціоналу (1.9). Із такої постановки задачі слідує однозначний вибір коефіцієнтів підінтегральної функції функціоналу (1.9). Пропонується при визначенні алгоритму оптимального керування регулятора конкретної (основної для даного регулятора) фазової координати приймати ваговий коефіцієнт при квадраті цієї координати рівним одиниці, а інші вагові коефіцієнти приймати рівними нулю [50]. Такий вибір параметрів функціоналу (1.9) забезпечує протікання перехідних процесів із максимальною швидкістю, а також значно спрощує процедуру синтезу алгоритмів оптимального керування.

Зважаючи на те, що даний метод синтезу оптимальних керувань базується на теорії динамічного програмування Беллмана, йому притаманні ті ж самі недоліки.

Більш досконалим є підхід до синтезу оптимальних регуляторів, заснований на використанні властивостей функцій перемикання оптимальних керувань, що описаний в роботах [44, 51-55].

Для отримання основного функціонального рівняння відносно функції перемикання для релейного закону керування за критерієм (1.9) визначається проекція вектору відносної швидкості відображаючої точки на нормаль до перетину поверхонь перемикання $\Psi = 0$ з урахуванням рівняння об'єкту (1.11):

$$\dot{\Psi} = \mathbf{G} \cdot \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{GA} + \mathbf{GBU}. \quad (1.14)$$

де $\Psi = [\psi_1(\mathbf{X}), \psi_2(\mathbf{X}), \dots, \psi_m(\mathbf{X})]^T$ – вектор функцій перемикання закону керування; $\mathbf{A}$ – матриця станів; $\mathbf{B}$ – матриця керування; $\mathbf{G}$ – матриця розміром $m \times n$, рядки якої є градієнтами функцій $\psi_i(\mathbf{X})$.

Строки матриці $\mathbf{G}$ розмірністю $m \times n$ є градієнтами функцій перемикання $\psi_i(\mathbf{X})$.

Відзначимо, що відповідно до [30, 44] для об'єкту керування (1.11) можна записати m функціональних рівнянь (1.14) відносно функцій перемикавання, що дозволяє здійснити декомпозицію багатомірної задачі на m однотипних задач.

Таким чином, з основного функціонального рівняння (1.14) для функції перемикавань слідує:

$$\dot{\psi}(\mathbf{X}) = \mathbf{G} \cdot \dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}, \mathbf{U}) + \varphi(\mathbf{X}) \cdot u. \quad (1.15)$$

Яку і у випадку використання методів синтезу оптимальних керуючих впливів, заснованих на принципі максимуму Понтрягіна або динамічного програмування Беллмана, закон оптимального керування при використанні властивостей функцій перемикавання можна представити:

$$\mathbf{U} = -\text{sign}[\Psi(\mathbf{X})]. \quad (1.16)$$

Рівняння (1.15) і (1.16) визначають множину допустимих законів керування, що забезпечать рух об'єкту з довільного початкового стану в простір наближений до точки $\psi(\mathbf{X}) = 0$.

Для вибору законів керування, що задовольняють необхідним критеріям якості, необхідно розглянути деякі властивості функцій перемикавання оптимального керування (1.16).

Для того, щоб керування (1.15) для об'єкту (1.11) було оптимальним за критерієм (1.9) при обмеженні (1.8) необхідно, щоб функція перемикавання $\psi(\mathbf{X})$ задовольняла лінійному диференційному рівнянню першого порядку з змінними коефіцієнтами $f(\mathbf{X}, \mathbf{U})$ та $\varphi(\mathbf{X})$, які залежать від координат вектору стану об'єкту. Слід зазначити, що оптимальне керування об'єкту (1.11) за критерієм (1.9) визначається тільки функцією перемикавання (1.16).

З формули (1.16) слідує, що для оптимального за інтегральним квадратичним критерієм за точністю (1.9) керування об'єктом (1.11) при обмеженні (1.8) необхідним є використання релейного закону керування. За такого підходу вирішення задачі синтезу оптимальних релейних регуляторів зводиться до визначення вигляду функції перемикання шляхом алгебраїчних перетворень рівнянь динаміки руху об'єкта керування. Перевагою даного методу над вищеописаними є його відносна обчислювальна простота, насамперед за рахунок відсутності необхідності вирішення матричного алгебраїчного рівняння типу Ріккати.

Для проведення синтезу САК тягової установки на основі СДПМ необхідно мати його математичний опис.

1.4 Математичний опис тягової установки з синхронним двигуном на постійних магнітах

Шахтний електровозний транспорт є універсальною транспортною системою [1, 4,5,26], призначеною для перевезення видобутих копалин, пустої породи, допоміжних матеріалів та людей. В рудних шахтах транспортування руди здійснюється за допомогою контактних електровозів з зчіпною масою 7-14 т.

Найпоширенішим підземним типом шахтних електровозів в Інгульській шахті Державного підприємства «Східний гірничозбагачувальний комбінат» є шахтні електровози типу 7КА (див. рис. 1.4).

Робота електровозу характеризується двома режимами: режимом тяги та холостого ходу. В режимі холостого ходу (режимі вибігу) тяговий привод електровозу не працює, а електровоз рухається за інерцією, тому даний режим в роботі не розглядається.



Рис. 1.4. Зовнішній вид контактної електроваго 7КА

Режим тяги залежить від загального завантаження та швидкості руху тягової установки. Тому для моделювання процесу руху тягової установки необхідно розглянути механічну та електричну складові моделі тягової установки.

1.4.1. Математична модель механічної частини електроваго. Рівняння руху електроваго встановлюють у диференціальній формі зв'язок між швидкістю руху v , часом t і пройденою електровагою відстанню, і дають можливість визначити характер руху електроваго $v(t)$.

На рис. 1.5 зображена загальна кінематична схема шахтного електроваго.

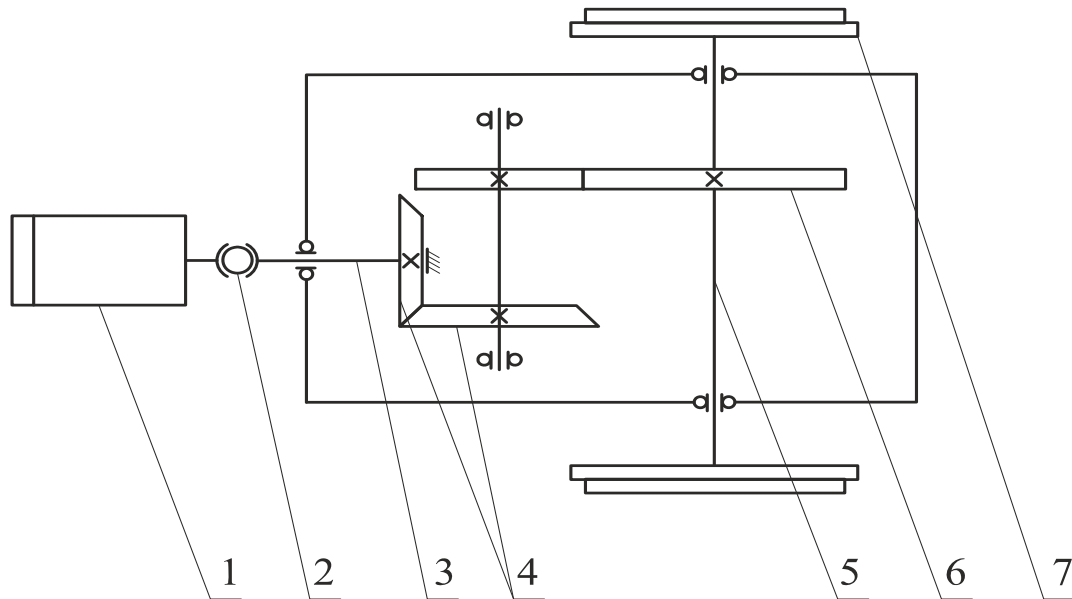


Рисунок 1.5. Кінематична схема тягового електровозу

На рис. 1.5: 1 – тяговий електричний двигун; 2 – гнучка муфта; 3 – вал провідної конічної шестірни; 4 – пара конічних шестірень; 5 – вісь колісної пари; 6 – пара циліндричних шестірень; 7 – колеса електровозу.

Для спрощення математичного описання динаміки руху електровозу приймаються наступні допущення:

- кочення коліс по рейках відбувається як по абсолютно твердому тілу без деформації матеріалу й проковзування;
- тип зубчастої передачі — прямозубий;
- шестерня й зубчасте колесо жорстко посаджені відповідно на валу тягового двигуна й на вісі колісної пари;
- не враховується інерційність якоря двигуна, зубчастої передачі й колісної пари електровозу;
- не враховується перерозподіл навантажень між рушійними осями, а також динамічні навантаження від коливань обрєсорених мас;
- не враховується розсіювання енергії дисипативними силами.

Згідно [66] відомо, що зміна кінетичної енергії тіла відповідає роботі виконаної прикладеними до тіла силами, звідки динаміка руху електровозу, з урахуванням прийнятих припущень, буде описуватись рівнянням:

$$m_{\phi} \cdot (1 + \gamma_e) \cdot \frac{dv}{dt} = F_d - W_k. \quad (1.17)$$

де m_{ϕ} – фактична маса електровозу і вагонеток, т;

v – швидкість руху електровозу, км/год;

F_d – дотична сила тяги електровозу, Н;

W_k – сила опору електровозу, Н;

$(1 + \gamma_e)$ – численне значення коефіцієнту інерції.

Рішення рівняння руху електровозу (1.17) дозволяє встановити залежність між швидкістю, масою та силою тяги електровозу.

Для спрощення розрахунків визначимо вагу рухомого складу шахтного електровозу через його фактичну масу електровозу і вагонеток:

$$m_{\phi} = \frac{1000 \cdot G}{g}; \quad (1.18)$$

звідки:

$$G = \frac{m_{\phi} \cdot g}{1000} \approx \frac{m_{\phi}}{102},$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Для повного опису динаміки руху електровозу необхідно визначити моменти інерції частин, що обертаються. Чисельне значення коефіцієнта інерції $(1 + \gamma_e)$ можна визначити скориставшись рівнянням еквівалентної маси електровозу.

На рис.1.6. зображена схема моментів інерцій, що діють на механічну систему електровозу.

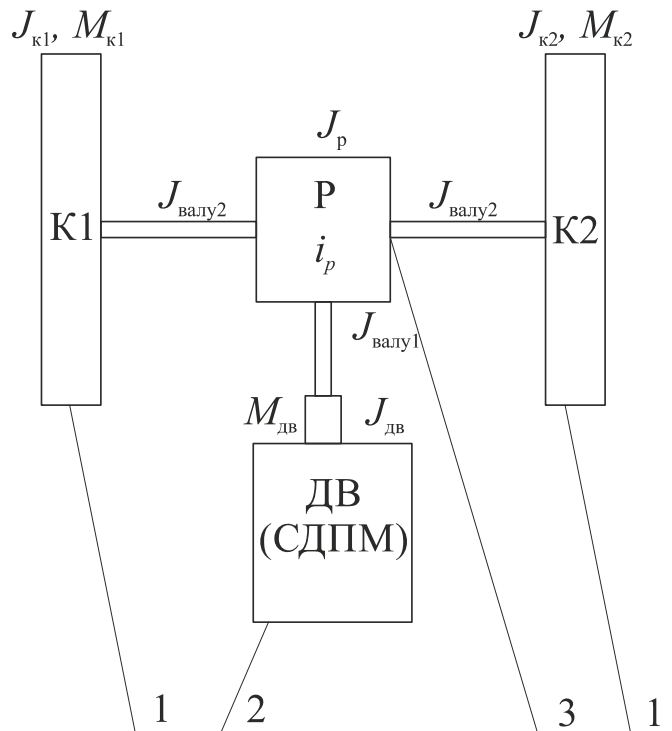


Рис.1.6. Схема моментів інерцій, що діють на механічну систему електровозу:

1 – приводні колісні пари; 2 – якорь двигуна; 3 – вали редуктора.

Еквівалентна маса електровозу визначається за виразом:

$$m_e = \sum \frac{J_k}{R_k^2} + \sum \frac{J_p}{R_p^2} + \sum i_p^2 \frac{J_{дв}}{R_{дв}^2}; \quad (1.19)$$

де $R_k, R_p, R_{дв}$ – радіуси відповідно колеса, редуктора, якоря двигуна;

$J_k, J_p, J_{дв}$ – моменти інерції відповідно колеса, редуктора, якоря двигуна.

Момент інерції довільної частини механізму, що обертається, визначається за виразом:

$$J = m_r \rho^2; \quad (1.20)$$

де m_r – маса частини, що обертається;

ρ – радіус інерції частин, що обертається.

Враховуючи рівняння (1.16) та залежність між еквівалентною та фізичною масою електровозу $m_e = \gamma_e m_\phi$ еквівалентна маса електровозу:

$$\gamma_e m_\phi = \sum m_k \frac{\rho_k^2}{R_k^2} + \sum m_p \frac{\rho_p^2}{R_p^2} + \sum m_{дв} i_p^2 \frac{\rho_{дв}^2}{R_{дв}^2}, \quad (1.21)$$

де m_k , m_p , $m_{дв}$ – фізичні маси частин електровозу, що обертаються, відповідно колеса, редуктора, якоря двигуна.

Частини електровозу, що обертаються мають циліндричну форму, внаслідок чого відношення радіусів інерцій ρ до фізичних радіусів R механізмів, що обертаються, досить стабільні, тому коефіцієнт інерції $(1 + \gamma_e)$ на практиці визначають на підставі експериментальних даних згідно [66].

1.4.2. Математична модель синхронного двигуна з постійними магнітами. Узагальнена функціональна схема електроприводу шахтного електровозу на основі СДПМ зображена на рис. 1.7.

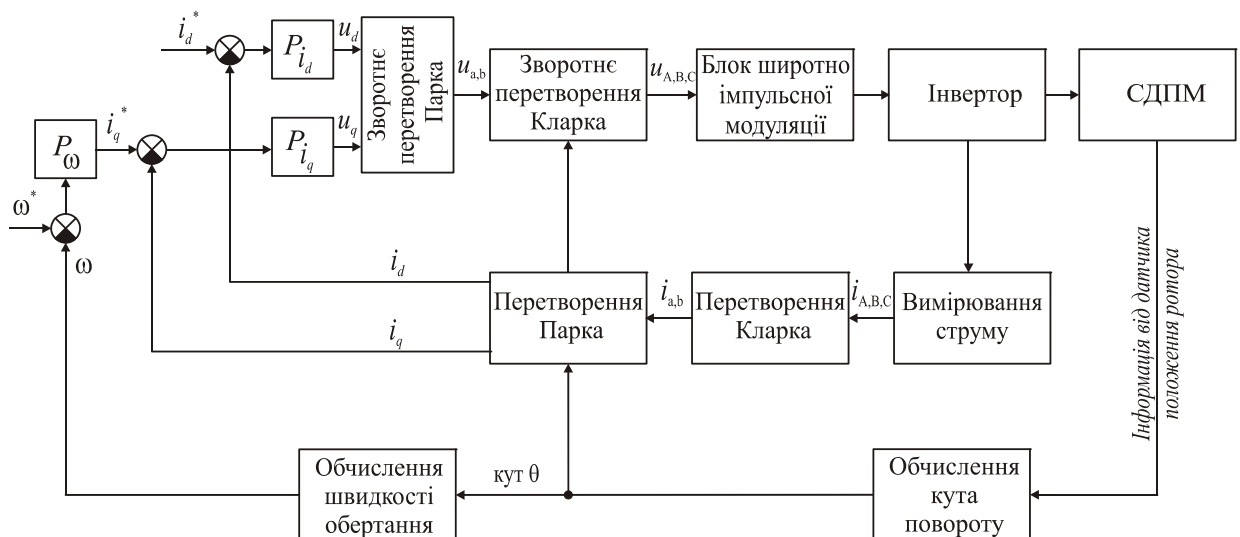


Рис. 1.7. Функціональна схема тягової установки на основі СДПМ

Зважаючи на те, що постійні часу СДПМ на порядок вище ніж у інших елементів (датчиків струму, швидкості, кута повороту, перетворювачів Парка і Кларка а також інвертора), для аналізу роботи електроприводу на основі СДПМ насамперед необхідно розглянути математичний опис двигуна.

Для СДПМ характерні ті ж самі режими роботи, що і для синхронних двигунів з електромагнітним збудженням [56]. Синхронний режим характерний за умов нормальної експлуатації (номінальний режим СПДМ), а асинхронний режим роботи – під час перехідних процесів (при пуску СДПМ, при втягуванні його в синхронізм та ін.).

Врахування всіх факторів, що впливають на електромеханічні процеси СДПМ, є досить складним завданням. Тому для спрощення аналітичних досліджень розглядається ідеалізована модель СДПМ, для якої характерні наступні допущення [56]:

1. Обмотка статора симетрична. СДПМ ввімкнений в мережу нескінченно великої потужності. Напруга в мережі синусоїдальна і симетрична.
2. Насичення сталі, гістерезис і вихрові струми відсутні. Параметри СДПМ в межах режимів, що розглядаються, залишаються незмінними.
3. Враховуються лише основні гармоніки просторового розподілу магніторушійної сили і індукції в повітряному зазорі СДПМ.
4. Ротор СДПМ неявнополосний, симетричний відносно поздовжньої d і поперечної q осей. Пускова обмотка ротора має довільну кількість короткозамкнених контурів, розташованих по осям d і q .
5. Постійний магніт стабілізований. Точка відходу прямої повернення на діаграмі магніту в режимах роботи СДПМ, що розглядаються, не змінює свого положення.

На рис. 1.8 представлена схема трьохфазного двохполосного СДПМ із урахуванням наведених вище допущень.

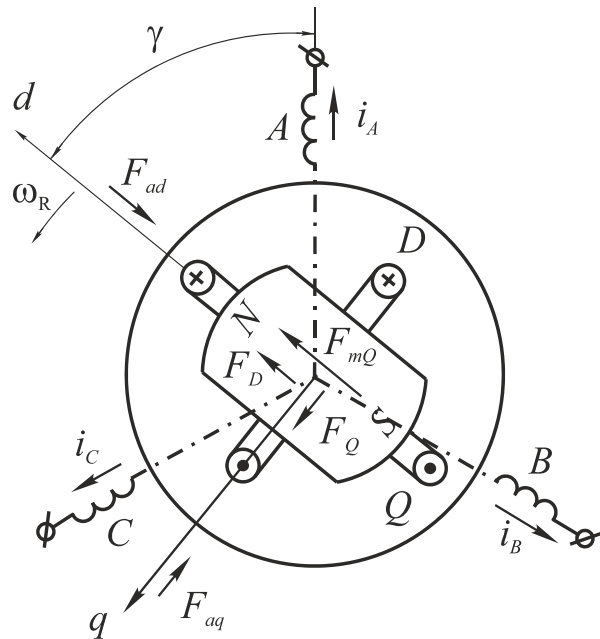


Рис. 1.8. Схема трьохфазного двохполюсного ідеалізованого СДПМ

На рисунку 1.8 прийняті наступні позначення величин:

i_A , i_B , i_C – струми в обмотках фаз статора А, В та С, А;

ω_R – кутова (електрична) швидкість статора, рад⁻¹;

F_{m0} – магніторушійна сила постійного магніту СДПМ, А;

F_D , F_Q – складові магніторушійної сили постійного магніту СДПМ по осям d , q , А.

F_{ad} , F_{aq} – проекції магніторушійної сили фази А СДПМ на осі d , q , А.

γ – кут між осями магнітної системи ротору та магнітного поля СДПМ

Рівняння Парка-Горєва [57-59], записані в довільній системі координат ω_k , містять всю необхідну для вирішення задачі керування інформацію, і з допомогою елементарних перетворень можуть бути приведені до будь-якої системи координат. Тому для аналізу режимів роботи СДПМ використаємо рівняння динаміки, записані в рухомій системі координат, пов'язаній з ротором СДПМ (d - q координати) [57-63]. Рівняння рівноваги напруг для обмотки статора в d - q координатах мають вигляд:

$$\begin{cases} u_d = p\psi_d + i_d r_s - \omega_R \psi_q; \\ u_q = p\psi_q + i_q r_s + \omega_R \psi_d, \end{cases} \quad (1.22)$$

де u_d, u_q – складові напруги обмоток статора по осям d, q , В;

i_d, i_q – складові струму обмоток статора по осям d, q , А;

r_s – активний опір статорної обмотки СДПМ, Ом;

ψ_d, ψ_q – складові потокозчеплення обмоток статора по осям d, q , В·с;

$p = d / dt$ – оператор диференціювання.

В зв'язку з прийнятими вище допущеннями математичної моделі СДПМ, постійні магніти можуть бути замінені на еквівалентну обмотку збудження без електричних втрат, що ввімкнена на джерело струму [64, 65].

Рівняння рівноваги напруг для еквівалентних пускових обмоток мають вигляд:

$$\begin{cases} 0 = p\psi_D + i_D r_D; \\ 0 = p\psi_Q + i_Q r_Q, \end{cases} \quad (1.23)$$

де ψ_D, ψ_Q – складові потокозчеплення еквівалентної пускової обмотки по осям d, q , В·с;

i_D, i_Q – складові струму еквівалентної пускової обмотки по осям d, q , А;

r_D, r_Q – складові активного опору еквівалентної пускової обмотки по осям d, q , Ом.

Для заміни електромагнітних зв'язків між обмотками статора і ротора на електричні необхідно виконати приведення параметрів ротора до параметрів статора. Для цього доцільно скористатись методикою, наведеною в [56-58], яка полягає у знаходженні коефіцієнтів приведення параметрів до обмотки статора.

Дослідження режимів роботи СДПМ значно спрощується, якщо перейти від системи абсолютних одиниць до системи відносних одиниць. Згідно методик, наведених в [57,58,60,62], отримаємо систему диференціальних рівнянь СДПМ у відносних одиницях:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = p\psi_d + i_d r_s - \omega_R \psi_q; \\ u_q = p\psi_q + i_q r_s + \omega_R \psi_d; \\ \psi_d = x_d i_d + x_{dD} i_D + x_{dM} I_{M0}; \\ \psi_q = x_q i_q + x_{qQ} i_Q; \\ 0 = p\psi_D + i_D r_D; \\ 0 = p\psi_Q + i_Q r_Q; \\ \psi_D = x_D i_D + x_{dD} i_d + x_{DM} I_{M0}; \\ \psi_Q = x_Q i_Q + x_{qQ} i_q; \\ H p \omega_R = \psi_d i_q - \psi_q i_d - M_3; \\ I_{M0} = \text{const.} \end{array} \right. \quad (1.24)$$

де $x_d = L_d / L_6$; $x_q = L_q / L_6$; $x_{dM} = M'_{dM} / L_6$; $x_{dD} = M'_{dD} / L_6$; $x_{qQ} = M'_{qQ} / L_6$;
 $x_{DM} = M'_{DM} / L_6$; $x_D = L'_D / L_6$; $x_Q = L'_Q / L_6$; $r_s = r_s / z_6$; $r_D = r'_D / z_6$; $r_Q = r'_Q / z_6$;
 $\omega_R = \omega_R / \omega_1$; $H = J \omega_1^2 / (p M_6)$.

Для спрощення запису в системі рівнянь (1.24) і далі в роботі нижній індекс «*» і верхній індекс «'» опускаються.

Параметри СДПМ марки Орion-18-2-01П з пусковими обмотками, що досліджувався в роботі наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Параметри СДПМ марки Орion-18-2-01П для тягових електровозів серії 7КА

Пара-метр	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	r_s , Ом	x_d , Ом	x_q , Ом	r_D , Ом	x_D , Ом	x_Q , Ом	x_{dD} , Ом	x_{qQ} , Ом	Φ_0 , Вб	J_B , кг·м ²	P
Знач.	34	250	0,96	0,0053	0,0023	0,24	206,1	103,2	0,0113	0,0052	0,183	0,013	4

Система диференціальних рівнянь (1.24) описує рух СДПМ з пусковими обмотками. Проте, як зазначалось вище, промисловістю випускаються двигуни, пуск яких здійснюється не в асинхронному режимі, і, як наслідок, в таких двигунах пускові обмотки відсутні. У цьому випадку система рівнянь (1.24) дещо спрощується:

$$\begin{cases} u_d = p\psi_d + i_d r_s - \omega_R \psi_q; \\ u_q = p\psi_q + i_q r_s + \omega_R \psi_d; \\ \psi_d = x_d i_d + x_{dm} I_{m0}; \\ \psi_q = x_q i_q; \\ H p \omega_R = \psi_d i_q - \psi_q i_d - M_3; \\ I_{m0} = \text{const.} \end{cases} \quad (1.25)$$

Для повноти дослідження САК швидкості руху тягових установок на базі СДПМ необхідно вирішити задачі синтезу САК для двох випадків конструктивного виконання СДПМ: із урахуванням та без урахування пускових обмоток.

Параметри СДПМ марки Орion-18-2-01 без пускових обмоток, що досліджувався в роботі, наведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3. Параметри СДПМ марки Орion-18-2-01 для тягових електровозів серії 7КА

Параметр	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	r_s , Ом	x_d , Ом	x_q , Ом	Φ_0 , Вб	J_B , кг·м ²	p
Значення	34	250	0,96	0,0053	0,0023	0,183	0,013	4

1.5 Постановка та етапи розв'язання задачі автоматизації керування тягових установок

Для вирішення задачі автоматизації керування тягових установок необхідні додаткові дослідження по наступним питанням:

1. Обґрунтувати метод розв'язку задачі синтезу оптимального релейного керування тягових установок для найбільш поширених варіантів конструктивного виконання СДПМ.
2. Розробити структурні схеми САК тягових установок для різних варіантів конструктивного виконання електродвигунів.
3. Створити комп'ютерні імітаційні моделі САК тягових установок для кожного з варіантів конструктивного виконання СДПМ.
4. Провести аналіз ефекту від застосування розв'язків задач керування тягових установок для кожного з варіантів конструктивного виконання СДПМ.
5. Здійснити технічну реалізацію результатів теоретичних досліджень САК тягових установок з метою підтвердження її працездатності.
6. Провести техніко-економічну оцінку ефективності використання САК тягових установок.

Задачу синтезу оптимального релейного керування тягових установок на основі СДПМ доцільно розв'язувати в декілька етапів, які наведені на рис. 1.9 у вигляді діаграми.

1.6 Загальна методика досліджень

В попередньому підрозділі роботи було проведено вибір напрямку досліджень та етапів розв'язання задачі автоматизації керування електроприводом на основі СДПМ. Загальна методика досліджень відображає засоби та методи, за допомогою яких будуть вирішуватись поставлені задачі дослідження на кожному з етапів.

Для вирішення поставлених задач дослідження було виділено 6 етапів. Кожен з виділених етапів має свої методи досліджень. Розглянемо кожний етап розв'язання задачі керування тягових установок на основі СДПМ.

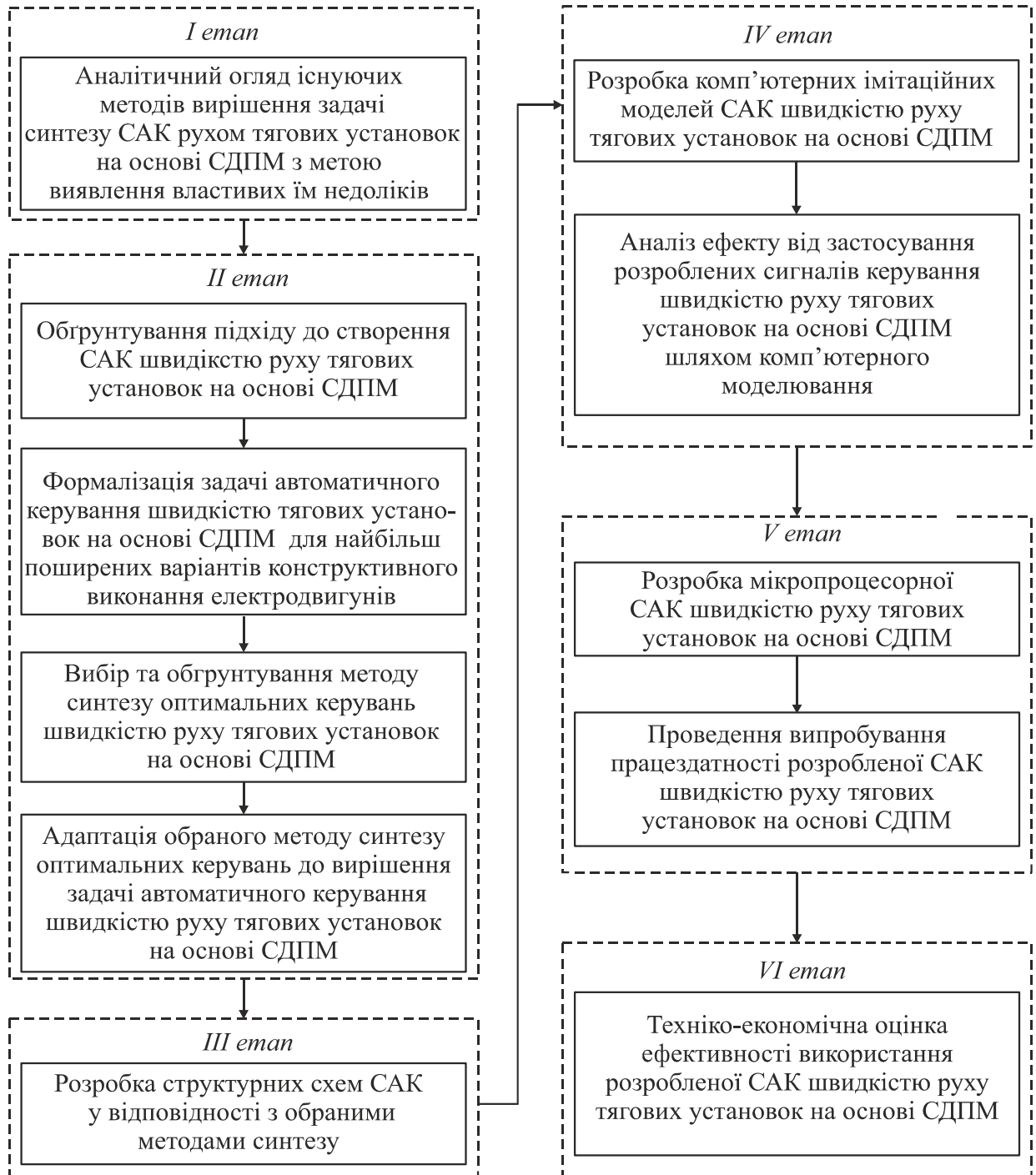


Рис. 1.9. Етапи розв'язання задачі автоматизації керування рухом тягових установок

Перший етап. На першому етапі проведено аналітичний огляд існуючих методів вирішення задачі синтезу САК тягових установок на основі СДПМ з метою виявлення властивих їм недоліків.

На даному етапі здебільш використані теоретичні методи досліджень, а саме методи систематизації та наукового узагальнення. Вони дали змогу провести аналіз відомих методів та засобів автоматичного керування електроприводами на основі СДПМ та сформувані підходи до вирішення задачі синтезу САК тягових установок.

Другий етап. На другому етапі, після виявлення недоліків існуючих методів та засобів автоматизації керування тягових установок, слід обґрунтувати підхід до створення САК тягових установок на основі СДПМ.

Для цього зазвичай застосовують методи теоретичних досліджень. На цьому етапі слід визначити об'єкт керування, його вхідні та вихідні параметри. Для створення математичної моделі об'єкта керування застосовуються різні методи (метод рівнянь змінних стану, метод передаточних функцій, метод аналітичних виразів).

Після створення математичної моделі об'єкту керування необхідно формалізувати задачу синтезу оптимальних релейних САК у відповідності з обраним методом синтезу.

Третій етап. На даному етапі на основі отриманих законів керування згідно обґрунтованого методу розв'язку, слід провести розробку структурних схем САК у відповідності з методами синтезу структурних схем САК. Дані структурні схеми в подальшому будуть використані для створення імітаційних моделей та мікропроцесорних САК.

Четвертий етап. На даному етапі на основі розроблених структурних схем САК необхідно створити комп'ютерні імітаційні моделі розроблених САК тягових установок на основі СДПМ, та провести з їх допомогою комп'ютерне моделювання, яке дозволить провести аналіз ефекту від їх застосування. Для проведення моделювання застосовуються методи комп'ютерного, імітаційного, теоретичного моделювання.

П'ятий етап. На п'ятому етапі необхідно провести розробку мікропроцесорної САК тягових установок на основі СДПМ, розробити функціональну та принципову схеми САК. При проведенні розробки цих схем використовують засоби обчислювальної техніки, мікросхемотехніки, промислової електроніки та ін.

Для перевірки працездатності розробленої САК необхідно провести експериментальне дослідження її роботи. Для цього необхідно розробити апаратну та програмну реалізацію, що реалізовує розроблені закони керування. Апаратну та програмну реалізації здійснюють за допомогою таких засобів промислової автоматизації, як програмовані логічні контролери, промислові комп'ютери, однокристальні мікроконтролери та ін.

Шостий етап. Техніко-економічна оцінка енергетичної ефективності розробленої САК тягової установки на основі СДПМ дозволить визначити потребу в електричній енергії, що витрачається в динамічних режимах тяговою установкою і провести порівняльний аналіз споживання електричної енергії в перехідних процесах.

Висновки до розділу

1. Проведений аналіз особливостей використання двигунів постійного та змінного струмів виявив їх конструктивні недоліки, а також низьку енергоефективність двигунів, що використовуються в шахтних електровозах. Тому, для підвищення енергоефективності тягових установок запропоновано використання СДПМ, що нівелюють ці недоліки.

2. Огляд відомих методів автоматичного керування тягових установок з СДПМ показав, що одним із перспективних шляхів створення високоякісних систем керування тяговими установками є застосування оптимальних релейних регуляторів, що працюють в ковзному режимі.

3. В результаті проведеного аналізу методів вирішення задачі синтезу САК тягових установок на основі СДПМ встановлено, що найдоцільнішим підходом до синтезу оптимальних релейних регуляторів є підхід, заснований на використанні властивостей функцій перемикання оптимальних керувань.

4. Проведено вибір напрямку досліджень. Задачу синтезу оптимального релейного керування тягових установок на основі СДПМ пропонується розв'язувати в декілька етапів, кожен з яких має свої засоби та методи досліджень, які загалом представляють загальну методику досліджень.

5. Визначено основні етапи реалізації задачі автоматизації керування рухом тягових установок, показано взаємозв'язок між ними та послідовність виконання.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИХ УСТАНОВОК

Для вирішення задачі синтезу оптимальних релейних регуляторів тягових установок на основі СДПМ необхідно:

1. Виконати постановку задачі синтезу САК тягових установок на основі СДПМ.
2. Створити математичні моделі тягової установки на основі СДПМ для кожного з варіантів конструктивного виконання електродвигуна, що розглядались в роботі.
3. Отримати аналітичні вирази сигналів оптимальних релейних керуючих впливів тягових установок згідно обраного методу синтезу, заснованого на використанні властивостей функцій перемикання, для кожного з варіантів конструктивного виконання електродвигуна, що розглядались в роботі.

Вирішенню цих питань і присвячений другий розділ дисертаційної роботи.

2.1 Постановка задачі синтезу системи автоматичного керування тягових установок

В основі синтезу САК лежить поняття про математичну модель керованого процесу, або об'єкту керування [68,69]. Така модель повинна відображати властивості реального об'єкту в межах точності, необхідної для здійснення процесу керування.

Аналіз математичних моделей електроприводу тягових установок дає змогу стверджувати, що з урахуванням припущень, наведених в п. 1.4.2 роботи, їх можна представити у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь [67]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t); \\ \mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}\mathbf{U}(t), \end{cases} \quad (2.1)$$

де $\mathbf{X}$ – вектор станів системи;

$\mathbf{U}$ – вектор сигналів керування;

$\mathbf{A}$ – матриця станів;

$\mathbf{B}$ – матриця керування.

$\mathbf{C}$ – матриця вихідних сигналів.

$\mathbf{D}$ – матриця прямого зв'язку.

Матриця прямого зв'язку $\mathbf{D}$ є нульовою, що вказує на відсутність в системі явного прямого зв'язку.

Вектор керування в загальному випадку належить замкнутій множині:

$$\mathbf{U}^m = \left\{ u_p : u_p(t) \in [-U_{p\max}, U_{p\max}], p = 1, 2, \dots, m \right\}, \quad (2.2)$$

Будемо вважати, що керуючий вплив нормований, і тому $U_{p\max} = 1$.

В сучасній теорії оптимального керування при вирішенні задачі синтезу оптимальних керувань широке розповсюдження отримали інтегральні квадратичні функціонали якості САК [86, 95-97]:

$$I_0 = \frac{1}{2} \int_0^{t=\infty} (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U}) dt \rightarrow \min, \quad (2.3)$$

де $\mathbf{Q}$ – визначена симетрична матриця вагових коефіцієнтів розмірності $n \times n$;

$\mathbf{R}$ – визначена симетрична матриця вагових коефіцієнтів розмірності $m \times m$.

Особливістю квадратичних критеріїв якості вигляду (2.3) є можливість необмеженого збільшення коефіцієнтів підсилення САК (при $\mathbf{R}=0$) без втрати стійкості. В такому випадку критерій якості набуває вигляду:

$$I_0 = \frac{1}{2} \int_0^{t=\infty} (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X}) dt \rightarrow \min. \quad (2.4)$$

Оптимальна за точністю керування САК [99] відповідатиме критерію (2.4), при цьому забезпечуючи досить швидкий і плавний характер перехідних процесів [100-102].

Постановка задачі оптимального керування тяговою установкою, що описується системою рівнянь (2.1) із використанням критерію (2.4) виглядає наступним чином: на множині допустимих керувань $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^m$ необхідно знайти закон зворотного зв'язку $\mathbf{U}(t) = F[\mathbf{X}(t)]$, що утворює спільно з об'єктом (2.1) стійку замкнену систему, яка забезпечує мінімум функціоналу якості (2.4) при переводі об'єкту керування із довільного початкового положення в кінцеве нульове.

2.2 Методика вирішення задачі синтезу системи автоматичного керування тяговою установкою

Як зазначалося вище, оптимальне керування, що мінімізує інтегральний критерій якості (2.4) із урахуванням обмежень $|\mathbf{U}_i(t)| \leq 1$ можна привести до вигляду:

$$\mathbf{U} = -\text{sign}[\psi(\mathbf{X})], \quad (2.5)$$

де $\Psi(\mathbf{X}) = [\psi_1(\mathbf{X}), \psi_2(\mathbf{X}), \dots, \psi_m(\mathbf{X}),]^T$ – транспонований вектор функцій перемикання.

Для визначення вигляду функції перемикання необхідно розглянути основне функціональне рівняння відносно функції перемикання. Для отримання основного функціонального рівняння відносно функції перемикання в керуванні (2.5), оптимального за критерієм (2.4) при $T \rightarrow \infty$ запишемо вираз для проекції вектору відносної швидкості зображувальної точки на нормаль до перерізу поверхонь перемикання $\Psi(\mathbf{X}) = 0$ [46] з урахуванням диференціальних рівнянь об'єкту керування (2.1):

$$\dot{\Psi} = \mathbf{G}\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{G}\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{B}\mathbf{U}, \quad (2.6)$$

де $\mathbf{G}$ – матриця розміром $m \times n$, рядки якої є градієнтом функцій $\psi_i(\mathbf{X})$:

$$\mathbf{G} = \left\{ \frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{X}} \right\}. \quad (2.7)$$

Рівняння (2.6) є основним функціональним рівнянням, що враховує властивості об'єкту керування (2.1) і його канали керування, і може бути використане для визначення функції перемикання і, як наслідок, оптимального керування. Це рівняння дає можливість провести декомпозицію задачі, тобто скласти функціональне рівняння для функцій перемикання кожного керуючого впливу.

Із рівняння (2.6) для i -ї поверхні перемикання можна записати:

$$\dot{\psi}_i(\mathbf{X}) = \mathbf{G}_i\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{G}_i\mathbf{B}\mathbf{U}'_i + \mathbf{G}_i\mathbf{B}\mathbf{U}''_i u_i, \quad (2.7)$$

де

$$\mathbf{G}_i = [\text{grad}(\psi_i)]^T, \quad (2.8)$$

$$\mathbf{U}_i' = [u_1, u_2, \dots, u_i = 0, \dots, u_m]^T, \quad (2.9)$$

$$\mathbf{U}_i'' = [0, 0, \dots, u_i = 1, \dots, 0]^T. \quad (2.10)$$

Запишемо рівняння (2.7) по відношенню до i -го керування у вигляді:

$$\dot{\psi}_i(\mathbf{X}) = \mathbf{G}_i \dot{\mathbf{X}} = f_i(\mathbf{X}, \mathbf{U}_i') + \phi_i(\mathbf{X})u_i, \quad (2.11)$$

де

$$f_i(\mathbf{X}, \mathbf{U}_i') = \mathbf{G}_i(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{U}_i'), \quad (2.12)$$

$$\phi_i(\mathbf{X}) = \mathbf{G}_i \mathbf{B} \mathbf{U}_i'', \quad (2.13)$$

$$u_i = -\text{sign}[\psi_i(\mathbf{X})]. \quad (2.14)$$

Згідно отриманого функціонального рівняння (2.11), якщо похідна i -ї функції перемикання дорівнює швидкості проникненні i -ї поверхні перемикання $\psi_i(\mathbf{X}) = 0$, то сама i -та функція перемикання може бути знайдена із лінійного диференційного рівняння першого порядку відносно функції перемикання зі змінними коефіцієнтами. Для об'єкту керування (2.1) можна записати m функціональних рівнянь (2.11) відносно функцій перемикання.

Згідно з властивостями функціонального рівняння та функцій перемикання в роботі [44] приводиться наступний висновок: для того, щоб керування для об'єкту керування (2.1) було оптимальним за критерієм (2.4)

при $T \rightarrow \infty$ і обмеженнях $|\mathbf{U}_i(t)| \leq 1$ необхідно і достатньо визначити матрицю коефіцієнтів $\mathbf{G}$ (2.8), або, що те ж саме, необхідно і достатньо визначити структуру складових $f(\mathbf{X}, \mathbf{U}_i')$ і $\varphi(\mathbf{X})$ основного функціонального рівняння (2.11).

Очевидно, що досліджувати рівняння (2.11) і отримати закон i -го оптимального керування (2.14) значно простіше, ніж вирішувати крайову задачу порядку $2n$, або вирішувати диференціальне рівняння Беллмана в частинних похідних.

Для того, щоб перейти до вирішення задачі синтезу оптимального керування, необхідно скласти математичну модель електроприводу на основі СДПМ.

2.3 Математичні моделі динаміки руху тягової установки

Для того, щоб скористатись описаною вище методикою синтезу оптимальних керувань тяговими установками на основі СДПМ необхідно привести диференціальні рівняння динаміки руху СДПМ для кожного з варіантів їх конструктивного виконання, що розглядались в роботі, до стандартного вигляду в формі Коші.

2.3.1. Математична модель динаміки руху тягової установки на основі СДПМ з пусковими обмотками. Для того, щоб привести систему диференціальних рівнянь (1.24) до стандартного вигляду необхідно виконати деякі перетворення.

Виконаємо алгебраїчні перетворення системи (1.24), підставивши значення потокозчеплення статорної та пускової обмоток СДПМ в інші рівняння системи, враховуючи при цьому, що $p x_{dM} I_{M0} = 0$:

$$\begin{cases} u_d = i_d r_s + x_d p i_d + x_{dD} p i_D - \omega_R x_q i_q - \omega_R x_{qQ} i_Q; \\ 0 = i_D r_D + x_D p i_D + x_{dD} p i_d; \\ u_q = i_q r_s + x_q p i_q + x_{qQ} p i_Q + \omega_R x_d i_d + \omega_R x_{dD} i_D + \omega_R x_{dM} I_{M0}; \\ 0 = i_Q r_Q + x_Q p i_Q + x_{qQ} p i_q; \\ J p \omega_R = i_q (x_d i_d + x_{dD} i_D + x_{dM} I_{M0}) - i_d (x_q i_q + x_{qQ} i_Q) - M_3. \end{cases} \quad (2.15)$$

Виділивши з системи рівнянь (2.15) складові, що характеризують перехресні зв'язки та зовнішні збурення, та перейшовши до рівнянь у відхиленні, отримуємо систему рівнянь (2.16):

$$\begin{cases} u_d = i_d r_s + x_d p i_d + x_{dD} p i_D + f_1; \\ 0 = i_D r_D + x_D p i_D + x_{dD} p i_d; \\ u_q = i_q r_s + x_q p i_q + x_{qQ} p i_Q + \omega_R x_{dM} I_{M0} + f_3; \\ 0 = i_Q r_Q + x_Q p i_Q + x_{qQ} p i_q; \\ J p \omega_R = i_q x_{dM} I_{M0} + f_5. \end{cases} \quad (2.16)$$

де f_1, f_3 та f_5 – збурення, які визначаються згідно виразів:

$$\begin{cases} f_1 = -\omega_R x_q i_q - \omega_R x_{qQ} i_Q = -\omega_R (x_q i_q + x_{qQ} i_Q); \\ f_3 = \omega_R (x_d i_d + x_{dD} i_D); \\ f_5 = i_q (x_d i_d + x_{dD} i_D) - i_d (x_q i_q + x_{qQ} i_Q) - M_3. \end{cases} \quad (2.17)$$

Позначимо траєкторію заданого руху індексом «*» та введемо позначення параметрів незбуреного руху як $u_d^*, u_q^*, i_d^*, i_D^*, i_q^*, i_Q^*, \omega_R^*$. Враховуючі дані позначення введемо нові змінні: $\eta_1 = I_d = i_d - i_d^*$; $\eta_2 = I_D = i_D - i_D^*$; $\eta_3 = I_q = i_q - i_q^*$; $\eta_4 = I_Q = i_Q - i_Q^*$; $\eta_5 = \Omega_R = \omega_R - \omega_R^*$.

Система диференціальних рівнянь незбуреного руху прийме вигляд:

$$\begin{cases} U_1 = \eta_1(r_s + px_d) + \eta_2 px_{dD}; \\ 0 = \eta_1 px_{dD} + \eta_2(r_D + px_D); \\ U_3 = \eta_3(r_s + px_q) + \eta_4 px_{qQ} + \eta_5 x_{dM} I_{M0}; \\ 0 = \eta_3 px_{qQ} + \eta_4(r_Q + px_Q); \\ 0 = \eta_5 x_{dM} I_{M0} - \eta_5 pJ. \end{cases} \quad (2.18)$$

У запропонованій системі рівнянь прийняті позначення $U_1 = u_d - u_d^*$ та $U_3 = u_q - u_q^*$ являють собою додаткове, U^* керування, що забезпечує рух $i_d = i_d^*$, $i_D = i_D^*$, $i_q = i_q^*$, $i_Q = i_Q^*$, $\omega = \omega^*$ незалежно від того, чим викликане дане відхилення.

За такого підходу вектор керування $\mathbf{U}$ повинен формуватися у функції вектору відхилення $\boldsymbol{\eta}$. Тобто регулятор не відрізняє відхилення, викликані зміною положення об'єкта керування від відхилень, викликаних збуреннями в електричних ланцюгах і механічними навантаженнями.

Представимо вектор відхилення $\boldsymbol{\eta}$ істинного руху від заданої траєкторії згідно системи рівнянь (2.18):

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_1 \\ \eta_1 \\ \eta_1 \end{bmatrix}$$

Представимо систему рівнянь незбуреного руху (2.18) СДПМ в матричному вигляді:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} r_s + px_d & px_{dD} & 0 & 0 & 0 \\ px_{dD} & r_D + px_D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s + px_q & px_{qQ} & 0 \\ 0 & 0 & px_{qQ} & r_Q + px_Q & 0 \\ 0 & 0 & x_{dM} I_{M0} & 0 & pJ \end{bmatrix}$$

Звідки вектор керування **U**:

$$\mathbf{U} = \boldsymbol{\eta} \cdot \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_1 \\ \eta_1 \\ \eta_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_s + px_d & px_{dD} & 0 & 0 & 0 \\ px_{dD} & r_D + px_D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s + px_q & px_{qQ} & 0 \\ 0 & 0 & px_{qQ} & r_Q + px_Q & 0 \\ 0 & 0 & x_{dM} I_{M0} & 0 & pJ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ 0 \\ U_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Для визначення взаємозв'язку між векторами відхилення **η** визначимо передаточну функцію **W** матриці **P**:

$$\mathbf{W} = \mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & w_{14} & w_{15} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & w_{24} & w_{25} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} & w_{34} & w_{35} \\ w_{41} & w_{42} & w_{43} & w_{44} & w_{45} \\ w_{51} & w_{52} & w_{53} & w_{54} & w_{55} \end{bmatrix}$$

де w_{ij} — елементи матриці **W**, що приймають значення:

$$w_{11} = \frac{r_D + px_D}{r_D r_s + p^2 x_{dD}^2 + pr_s x_D + p^2 x_D x_d};$$

$$w_{12} = w_{21} = \frac{px_{dD}}{r_D r_s - p^2 x_{dD}^2 + pr_D x_d + px_s x_D + p^2 x_D x_d};$$

$$w_{22} = \frac{r_s + px_d}{r_D r_s + p^2 x_{dD}^2 + pr_D x_d + px_s x_D + p^2 x_D x_d};$$

$$w_{13}, w_{14}, w_{15}, w_{23}, w_{24}, w_{25} = 0;$$

$$w_{31}, w_{32} = 0$$

$$w_{33} = \frac{Jx_Q p^2 + Jr_Q p}{r_Q I_{M0}^2 x_{dM}^2 + Jp^3 x_{qQ}^2 + Jp^2 r_Q x_q + Jp^2 r_s x_Q + Jp^3 x_Q x_q + Jpr_s r_Q + pI_{M0}^2 x_Q x_{dM}^2}$$

$$w_{34} = \frac{Jp^2 x_{qQ}}{r_Q I_{M0}^2 x_{dM}^2 + Jp^3 x_{qQ}^2 + Jp^2 r_Q x_q + Jp^2 r_s x_Q + Jp^3 x_Q x_q + Jpr_s r_Q + pI_{M0}^2 x_Q x_{dM}^2}$$

$$w_{35} = \frac{r_Q I_{M0} x_{dM} + pI_{M0} x_Q x_{dM}}{r_Q I_{M0}^2 x_{dM}^2 + Jp^3 x_{qQ}^2 + Jp^2 r_Q x_q + Jp^2 r_s x_Q + Jp^3 x_Q x_q + Jpr_s r_Q + pI_{M0}^2 x_Q x_{dM}^2}$$

$$w_{41}, w_{42} = 0; w_{43} = w_{34}.$$

$$w_{44} = \frac{Jp^2 x_q + Jpr_s + I_{M0}^2 x_{dM}^2}{r_Q I_{M0}^2 x_{dM}^2 + Jp^3 x_{qQ}^2 + Jp^2 r_Q x_q + Jp^2 r_s x_Q + Jp^3 x_Q x_q + Jpr_s r_Q + pI_{M0}^2 x_Q x_{dM}^2}$$

$$w_{45} = \frac{pI_{M0} x_{qQ} x_{dM}}{r_Q I_{M0}^2 x_{dM}^2 + Jp^3 x_{qQ}^2 + Jp^2 r_Q x_q + Jp^2 r_s x_Q + Jp^3 x_Q x_q + Jpr_s r_Q + pI_{M0}^2 x_Q x_{dM}^2}$$

$$w_{51}, w_{52} = 0; w_{53} = w_{35}; w_{54} = w_{45}.$$

$$w_{55} = \frac{r_Q r_s - p^2 x_{qQ}^2 + pr_Q x_q + pr_s x_Q + p^2 x_Q x_q}{r_Q I_{M0}^2 x_{dM}^2 + Jp^3 x_{qQ}^2 + Jp^2 r_Q x_q + Jp^2 r_s x_Q + Jp^3 x_Q x_q + Jpr_s r_Q + pI_{M0}^2 x_Q x_{dM}^2}$$

Проаналізувавши матрицю **W** можна побачити, що перші два рівняння системи (2.18) лінійно незалежні від трьох останніх. Зважаючи на це, в процесі аналізу режимів роботи СДПМ можна розглядати два незалежні канали по осях *d* і *q*, що описуються системами відповідних лінійних рівнянь.

Розглянемо математичну модель динаміки руху тягової установки для контуру d . Для цього запишемо перші два рівняння системи (2.17), що описують динаміку руху СДПМ по осі d :

$$\begin{cases} U_1 = \eta_1(r_s + px_d) + \eta_2 px_{dD}; \\ 0 = \eta_1 px_{dD} + \eta_2(r_D + px_D). \end{cases} \quad (2.19)$$

Приведемо систему рівнянь (2.19) до стандартного матричного вигляду рівняння стану:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_d = \mathbf{A}_d \boldsymbol{\eta}_d + \mathbf{B}_d \mathbf{U}_d; \quad (2.20)$$

де $\boldsymbol{\eta}_d$ – вектор стану для осі d :

$$\boldsymbol{\eta}_d = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix}, \quad (2.21)$$

$\mathbf{U}_d$ – вектор керування для осі d :

$$\mathbf{U}_d = U_1, \quad (2.22)$$

$\mathbf{A}_d$ – матриця стану для осі d :

$$\mathbf{A}_d = \begin{bmatrix} a_{d11} & a_{d12} \\ a_{d21} & a_{d22} \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

$\mathbf{B}_d$ – матриця керування для осі d :

$$\mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} b_{d11} \\ b_{d21} \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Для приведення системи рівнянь (2.19) до стандартного вигляду (2.20) необхідно виконати деякі алгебраїчні перетворення.

Розкривши дужки в рівняннях (2.19) та залишивши в лівій частині рівнянь $\eta_1 p$, $\eta_2 p$ отримаємо:

$$\begin{cases} \eta_1 p = -\eta_1 \frac{r_s}{x_d} - \eta_2 p \frac{x_{dD}}{x_d} + U_1 \frac{1}{x_d}; \\ \eta_2 p = -\eta_1 p \frac{x_{dD}}{x_D} - \eta_2 \frac{r_D}{x_D}. \end{cases} \quad (2.25)$$

Підставивши перше рівняння системи (2.25) в друге і навпаки отримаємо:

$$\begin{cases} \eta_1 p = -\eta_1 \frac{r_s}{x_d} - \left(-\eta_1 p \frac{x_{dD}}{x_D} - \eta_2 \frac{r_D}{x_D} \right) \frac{x_{dD}}{x_d} + U_1 \frac{1}{x_d}; \\ \eta_2 p = \left(-\eta_1 \frac{r_s}{x_d} - \eta_2 p \frac{x_{dD}}{x_d} + U_1 \frac{1}{x_d} \right) \frac{x_{dD}}{x_D} - \eta_2 \frac{r_D}{x_D}. \end{cases} \quad (2.26)$$

В результаті перегрупування та винесення за дужки множників $\eta_1 p$, $\eta_2 p$ в першому та другому рівнянні системи (2.26) отримаємо:

$$\begin{cases} \eta_1 p (x_D x_d - x_{dD}^2) = -\eta_1 r_s x_D + \eta_2 r_D x_{dD} + U_1 x_D; \\ \eta_2 p (x_D x_d - x_{dD}^2) = \eta_1 r_s x_{dD} - \eta_2 r_D x_d - U_1 x_{dD}. \end{cases} \quad (2.27)$$

Залишивши в лівій частині рівнянь системи (2.27) вирази $\eta_1 p$, $\eta_2 p$ остаточно отримаємо:

$$\begin{cases} \eta_1 p = \eta_1 \frac{-r_s x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} + \eta_2 \frac{r_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} + U_1 \frac{x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2}; \\ \eta_2 p = \eta_1 \frac{r_s x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} + \eta_2 \frac{-r_D x_d}{x_D x_d - x_{dD}^2} + U_1 \frac{-x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2}. \end{cases} \quad (2.28)$$

Таким чином, матриця стану $\mathbf{A}_d$ системи, що описує динаміку процесів СДПМ для осі d для двигуна марки Оріон-18-2-01П, що використовується в тягових електровозах серії 7КА, має вигляд:

$$\mathbf{A}_d = \begin{bmatrix} \frac{-r_s x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} & \frac{r_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} \\ \frac{r_s x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} & \frac{-r_D x_d}{x_D x_d - x_{dD}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -181,153 & 2,483 \cdot 10^{-3} \\ 9,932 \cdot 10^{-3} & -1,165 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Матриця керування $\mathbf{B}_d$ системи, що описує динаміку процесів СДПМ по осі d для двигуна марки Оріон-18-2-01П має вигляд:

$$\mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} \frac{x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} \\ \frac{-x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 188,701 \\ -0,010 \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

Проведена перевірка за критерієм керованості (2.2) знайдених рівнянь стану системи показала, що $\text{rank}[\mathbf{B}_d, \mathbf{B}_d \mathbf{A}_d] = 2$, тобто система є повністю керованою. Проміжні математичні викладки, зважаючи на їх громіздкість, наведені в додатку А.

Розглянемо математичну модель динаміки руху тягової установки для контуру q . Для цього запишемо останні три рівняння системи (2.18), що описують динаміку її руху по осі q :

$$\begin{cases} U_3 = \eta_3(r_s + px_q) + \eta_4 px_{qQ} + \eta_5 x_{dM} I_{M0}; \\ 0 = \eta_3 px_{qQ} + \eta_4(r_Q + px_Q); \\ 0 = \eta_3 x_{dM} I_{M0} - \eta_5 pJ. \end{cases} \quad (2.31)$$

Приведемо систему рівнянь (2.31) до стандартного матричного вигляду рівняння стану:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_q = \mathbf{A}_q \boldsymbol{\eta}_q + \mathbf{B}_q \mathbf{U}_q, \quad (2.32)$$

де $\boldsymbol{\eta}_q$ – вектор стану для осі q :

$$\boldsymbol{\eta}_q = \begin{bmatrix} \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \end{bmatrix}, \quad (2.33)$$

$\mathbf{U}_q$ – вектор керування для осі q :

$$\mathbf{U}_q = U_3, \quad (2.34)$$

$\mathbf{A}_q$ – матриця стану для осі d :

$$\mathbf{A}_q = \begin{bmatrix} a_{q11} & a_{q12} & a_{q13} \\ a_{q21} & a_{q22} & a_{q23} \\ a_{q31} & a_{q32} & a_{q33} \end{bmatrix}, \quad (2.35)$$

$\mathbf{B}_q$ – матриця керування для осі q :

$$\mathbf{B}_q = \begin{bmatrix} b_{q11} \\ b_{q21} \\ b_{q31} \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

Для приведення системи рівнянь (2.31) до стандартного вигляду (2.32) необхідно виконати деякі алгебраїчні перетворення.

Розкривши дужки в рівняннях (2.31) та залишивши в лівій частині рівнянь $\eta_3 p$, $\eta_4 p$, $\eta_5 p$ отримаємо:

$$\begin{cases} \eta_3 p = -\eta_3 \frac{r_s}{x_q} - \eta_4 p \frac{x_{qQ}}{x_q} - \eta_5 \frac{x_{dM} I_{M0}}{x_q} + U_3 \frac{1}{x_q}; \\ \eta_4 p = -\eta_3 p \frac{x_{qQ}}{x_Q} - \eta_4 \frac{r_Q}{x_Q}; \\ \eta_5 p = \eta_3 \frac{x_{dM} I_{M0}}{J}. \end{cases} \quad (2.37)$$

Підставивши перше рівняння системи (2.37) в друге і навпаки отримаємо:

$$\begin{cases} \eta_3 p = -\eta_3 \frac{r_s}{x_q} + \left(\eta_3 p \frac{x_{qQ}}{x_Q} + \eta_4 \frac{r_Q}{x_Q} \right) \frac{x_{qQ}}{x_q} - \eta_5 \frac{x_{dM} I_{M0}}{x_q} + U_3 \frac{1}{x_q}; \\ \eta_4 p = \left(\eta_3 \frac{r_s}{x_q} + \eta_4 p \frac{x_{qQ}}{x_q} + \eta_5 \frac{x_{dM} I_{M0}}{x_q} - U_3 \frac{1}{x_q} \right) \frac{x_{qQ}}{x_Q} - \eta_4 \frac{r_Q}{x_Q}; \\ \eta_5 p = \eta_3 \frac{x_{dM} I_{M0}}{J}. \end{cases} \quad (2.38)$$

В результаті перегрупування та винесення за дужки множників рівнянь $\eta_3 p$, $\eta_4 p$, $\eta_5 p$ в першому та другому рівнянні системи (2.38) отримаємо:

$$\begin{cases} \eta_3 p(x_Q x_q - x_{qQ}^2) = -\eta_3 r_s x_Q + \eta_4 r_Q x_{qQ} - \eta_5 x_{dM} I_{M0} x_Q + U_3 x_Q; \\ \eta_4 p(x_Q x_q - x_{qQ}^2) = \eta_3 r_s x_{qQ} - \eta_4 r_Q x_Q + \eta_5 x_{dM} I_{M0} x_{qQ} - U_3 x_{qQ}; \\ \eta_5 p = \eta_3 \frac{x_{dM} I_{M0}}{J}. \end{cases} \quad (2.39)$$

Залишивши в лівій частині рівнянь системи (2.39) вирази $\eta_3 p$, $\eta_4 p$, $\eta_5 p$ остаточно отримаємо:

$$\begin{cases} \eta_3 p = \eta_3 \frac{-r_s x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_4 \frac{r_Q x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_5 \frac{-x_{dM} I_{M0} x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + U_3 \frac{x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2}; \\ \eta_4 p = \eta_3 \frac{r_s x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_4 \frac{-r_Q x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_5 \frac{x_{dM} I_{M0} x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + U_3 \frac{-x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2}; \\ \eta_5 p = \eta_3 \frac{x_{dM} I_{M0}}{J}. \end{cases} \quad (2.40)$$

Таким чином, матриця стану $\mathbf{A}_q$ системи, що описує динаміку процесів тягової установки по вісі q для двигуна марки Оріон-18-2-01П має вигляд:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_q &= \begin{bmatrix} \frac{-r_s x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} & \frac{r_Q x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} & \frac{-x_{dM} I_{M0} x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \\ \frac{r_s x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} & \frac{-r_Q x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} & \frac{x_{dM} I_{M0} x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \\ \frac{x_{dM} I_{M0}}{J} & 0 & 0 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -417,439 & 5,258 \cdot 10^{-3} & -79,574 \\ 0,021 & -104,36 & 4,01 \cdot 10^{-3} \\ 14,077 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Матриця керування $\mathbf{B}_q$ системи, що описує динаміку процесів тягової установки по вісі q для двигуна марки Оріон-18-2-01П має вигляд:

$$\mathbf{B}_q = \begin{bmatrix} \frac{x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \\ \frac{-x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 434,832 \\ -0,022 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

Проведена перевірка за критерієм керованості (2.2) знайдених рівнянь стану системи показала, що $\text{rank}[\mathbf{B}_q, \mathbf{B}_q \mathbf{A}_q, \mathbf{B}_q \mathbf{A}_q^2] = 3$, тобто система є повністю керованою. Проміжні математичні викладки, зважаючи на їх громіздкість, наведені в додатку А.

2.3.2. Математична модель динаміки руху тягової установки на основі СДПМ без пускових обмоток. Математичний опис динаміки руху тягової установки з СДПМ без пускових обмоток дещо спрощується, в порівнянні з варіантом, описаним вище.

Підставивши 3 і 4 рівняння системи (2.14) в рівняння 1, 2, 5 і враховуючи, що $p x_{dM} I_{M0} = 0$ отримаємо:

$$\begin{cases} u_d = x_d p i_d + i_d r_s - \omega_R x_q i_q; \\ u_q = x_q p i_q + i_q r_s + \omega_R x_{dM} I_{M0} + \omega_R x_d i_d; \\ H p \omega_R = x_{dM} I_{M0} i_q + x_d i_d i_q - x_q i_q i_d - M_3. \end{cases} \quad (2.43)$$

Виділивши з системи рівнянь (2.43) складові, що характеризують перехресні зв'язки та зовнішні збурення, та перейшовши до рівнянь у відхиленні отримуємо систему рівнянь (2.44):

$$\begin{cases} f_1 = -\omega_R x_q i_q; \\ f_3 = \omega_R x_d i_d; \\ f_5 = x_d i_d i_q - x_q i_q i_d - M_3. \end{cases} \quad (2.44)$$

Із урахуванням (2.44) система (2.43) набуде вигляду:

$$\begin{cases} u_d = x_d p i_d + i_d r_s + f_1; \\ u_q = x_q p i_q + i_q r_s + \omega_R x_{dm} I_{m0} + f_2; \\ H p \omega_R = x_{dm} I_{m0} i_q + f_3. \end{cases} \quad (2.45)$$

Враховуючи введені вище позначення введемо нові змінні:

$$\eta_1 = I_d = i_d - i_d^*; \quad \eta_2 = I_q = i_q - i_q^*; \quad \eta_3 = \Omega_R = \omega_R - \omega_R^*, \quad U_1 = u_d - u_d^*, \quad U_2 = u_q - u_q^*.$$

Система диференціальних рівнянь у відхиленнях прийме вигляд:

$$\begin{cases} U_1 = \eta_1(r_s + p x_d); \\ U_2 = \eta_2(r_s + p x_q) + \eta_3 x_{dm} I_{m0}; \\ 0 = \eta_2 x_{dm} I_{m0} - \eta_3 p J. \end{cases} \quad (2.46)$$

Проаналізувавши вигляд системи рівнянь (2.46) можна побачити, що перше рівняння лінійно незалежне від двох останніх. Зважаючи на це, в процесі аналізу режимів роботи тягової установки з СДПМ без урахування пускових обмоток, як і в попередньому випадку, можна розглядати два незалежні канали по осях d і q .

Розглянемо математичну модель динаміки руху тягової установки для контуру d . Для цього запишемо перше рівняння системи (2.46), що описують динаміку руху СДПМ по осі d :

$$U_1 = \eta_1(r_s + p x_d) \quad (2.47)$$

Після виконання очевидних алгебраїчних перетворень рівняння (2.47) та підстановки в нього параметрів двигуна марки Оріон-18-2-01, воно набуває вигляду:

$$p\eta_1 = -\frac{r_s}{x_d}\eta_1 + \frac{1}{x_d}U_1 = A_d\eta_1 + B_dU_1 = -181,132\eta_1 + 188,679U_1 \quad (2.48)$$

Очевидно, що система, описана рівнянням (2.48) задовольняє критерію керованості (2.2) тобто є повністю керованою.

Розглянемо математичну модель динаміки руху тягової установки для контуру q . Для цього запишемо останні два рівняння системи (2.46), що описують динаміку руху СДПМ по осі q :

$$\begin{cases} U_2 = \eta_2(r_s + px_q) + \eta_3x_{dM}I_{M0}; \\ 0 = \eta_2x_{dM}I_{M0} - \eta_3pJ. \end{cases} \quad (2.49)$$

Після алгебраїчних перетворень систему рівнянь (2.49) можна записати в стандартному вигляді:

$$\begin{cases} p\eta_2 = -\frac{r_s}{x_q}\eta_2 - \frac{x_{dM}I_{M0}}{x_q}\eta_3 + \frac{1}{x_q}U_2; \\ p\eta_3 = \frac{x_{dM}I_{M0}}{J}\eta_2. \end{cases} \quad (2.50)$$

Таким чином, матриця стану $\mathbf{A}_q$ системи, що описує динаміку процесів тягової установки для по вісі q для двигуна марки Оріон-18-2-01, має вигляд:

$$\mathbf{A}_q = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{x_q} & -\frac{x_{dM} I_{M0}}{x_q} \\ \frac{x_{dM} I_{M0}}{J} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -417,391 & -19,565 \\ 14,077 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.51)$$

Матриця керування $\mathbf{B}_q$ системи, що описує динаміку процесів тягової установки по вісі q для двигуна марки Оріон-18-2-01 має вигляд:

$$\mathbf{B}_q = \begin{bmatrix} \frac{1}{x_q} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 434,783 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.52)$$

Проведена перевірка за критерієм керованості (2.2) знайдених рівнянь стану системи показала, що $\text{rank}[\mathbf{B}_q, \mathbf{B}_q \mathbf{A}_q] = 2$, тобто система є повністю керованою. Проміжні математичні викладки, зважаючи на їх громіздкість, наведені в додатку А.

2.4 Синтез оптимальних сигналів керування для тягової установки з синхронним двигуном на постійних магнітах без пускових обмоток

В найпростішому випадку, коли керування здійснюється лише однією змінною стану, САК містить один регулятор. Проте, при необхідності керування або обмеження додаткових змінних (наприклад, обмеження значення струму статора СДПМ), САК розбивають на декілька контурів, кожен з яких містить свій регулятор. Кількість таких регуляторів дорівнює кількості керованих змінних силової частини електропривода тягової установки. В таких САК головною змінною є та, яка забезпечує основну мету керування, а інші змінні вважаються допоміжними і підпорядковані головній

змінній. Побудовані за таким принципом САК називаються системами підпорядкованого керування [101-104].

При синтезі регулятора зовнішнього контуру внутрішній по відношенню до нього є частиною об'єкту керування із відповідною передаточною функцією. Наприклад, САК електроприводу на базі СДПМ містить два незалежних контури: контур регулювання струму по поздовжній вісі, а також контур регулювання швидкості, якому підпорядкований контур регулювання струму по поперечній вісі.

Описаний в п. 2.2 метод синтезу оптимальних сигналів керування шляхом перетворень основного функціонального рівняння передбачає реалізацію розробленої САК у вигляді багатоконтурної системи. Розглянемо процес синтезу оптимальних сигналів керування для математичних моделей тягових установок з СДПМ без урахування та з урахуванням пускових обмоток.

2.4.1. Синтез оптимальних сигналів керування для струму i_q та швидкості ω_R для тягових установок з СДПМ без пускових обмоток. Виконаємо синтез регуляторів струму i_q та швидкості ω_R згідно з методикою перетворення основного функціонального рівняння, описаної в п. 2.2 роботи. Згідно з цією методикою, для синтезу оптимального керування необхідно і достатньо визначити параметри основного функціонального рівняння $p\Psi = \Phi u$. Для цього перепишемо рівняння (2.53), ввівши для зручності нові позначення:

$$\begin{cases} p\eta_2 = -\frac{r_s}{x_q}\eta_2 - \frac{x_{dm}I_{M0}}{x_q}\eta_3 + \frac{1}{x_q}U_2 = a_{22}\eta_2 + a_{23}\eta_3 + bU_2; \\ p\eta_3 = \frac{x_{dm}I_{M0}}{J}\eta_2 = a_{32}\eta_2. \end{cases} \quad (2.53)$$

Знайшовши координату η_2 із другого рівняння системи (2.53) і підставивши в перше отримаємо:

$$p\eta_2 - p\frac{a_{22}}{a_{32}}\eta_3 - a_{23}\eta_3 = bU_2. \quad (2.54)$$

Винісши позначення похідної p за дужки отримаємо рівняння:

$$p\left(\eta_2 - \frac{a_{22}}{a_{32}}\eta_3 - \frac{1}{p}a_{23}\eta_3\right) = bU_2. \quad (2.55)$$

Таким чином, функція перемикання буде мати вигляд:

$$\psi = \eta_2 - \frac{a_{22}}{a_{32}}\eta_3 - \frac{1}{p}a_{23}\eta_3. \quad (2.56)$$

Так як $m = 1/x_q > 0$, то оптимальне керування буде мати наступний вигляд:

$$u = -\text{sign}\left(\eta_2 - \frac{a_{22}}{a_{32}}\eta_3 - \frac{1}{p}a_{23}\eta_3\right). \quad (2.57)$$

Рівняння (2.57) є основним рівнянням закону керування для системи (2.53), яке гарантує стійкі аперіодичні перехідні процеси для довільних відхилень координат об'єкту керування.

Як було сказано вище, для систем підпорядкованого керування кожна з координат повинна регулюватись окремо.

Проведемо синтез оптимального сигналу керування для струму i_q . Виразивши з другого рівняння системи (2.53) величину η_2 і підставивши у

вираз (2.57) отримаємо алгоритм оптимального керування регулятора струму в функції основної змінної:

$$u_i = -\text{sign}\left(\eta_2 - \frac{1}{p}a_{22}\eta_2 - \frac{1}{p^2}a_{23}a_{22}\eta_2\right). \quad (2.58)$$

При стабілізації струму на заданому рівні релейний регулятор з алгоритмом (2.58) працює в ковзному режимі, забезпечуючи при цьому нескінченно велике значення коефіцієнту підсилення прямого каналу контуру регулювання. Це дозволяє повністю компенсувати вплив проти е.р.с. двигуна на точність стабілізації струму і виключити із алгоритму (2.58) інтегральні складові [36].

Таким чином алгоритм оптимального регулювання струму по вісі q для двигуна марки Орion-18-2-01 має такий кінцевий вигляд:

$$u_{iq} = u_{ym} \text{sign}(\eta_2) = 220 \text{sign}(i_q^* - i_q). \quad (2.59)$$

В процесі регулювання в режимі стабілізації струму зображальна точка рухається по гіперплощині ковзання релейного регулятора струму і по мірі розгону двигуна досягає гіперплощини ковзання релейного регулятора швидкості. Подальший рух відбувається в новій гіперплощині, якщо статичний струм двигуна (пропорційний моменту на валу) не перевищує заданого рівня обмеження струму. Ковзний режим регулятора струму при цьому зупиняється і на вхід силової частини електроприводу повинний надходити керуючий вплив регулятора швидкості. Якщо ж в процесі руху зображальної точки по гіперплощині ковзання регулятора швидкості статичний струм двигуна досягає рівня обмеження струму, то зображальна точка починає рухатись по лінії перетину двох гіперплощин [36]. Проте, такий рух виявляється нестійким, оскільки незначне збільшення

навантаження на валу двигуна буде повертати зображальну точку на гіперплощину ковзання регулятора струму, а зниження навантаження при стабільному струмі зумовить перехід на гіперплощину ковзання регулятора швидкості. Таким чином, в релейній системі підпорядкованого керування тяговою установкою з СДПМ, що забезпечує обмеження фазових координат на гранично допустимому рівні, виключена можливість одночасної роботи регулятора струму і регулятора швидкості в ковзному режимі. В зв'язку з цим, при роботі релейного регулятора швидкості в ковзному режимі контур регулювання струму розімкнений і не здійснює впливів на динаміку роботи тягової установки, оскільки регулятор струму повторює перемикання регулятора швидкості, виконуючи тим самим роль проміжного реле (реле швидкості і реле струму працюють як одне реле). Це дозволяє при синтезі релейних регуляторів швидкості вважати, що керуючі впливи прикладаються безпосередньо до об'єкту керування (силової частини електроприводу).

Для синтезу релейного регулятора швидкості виразимо всі змінні основного рівняння алгоритму керування (2.57) через змінну η_3 . В результаті чого отримаємо:

$$u_{\omega} = -\text{sign} \left(-\frac{a_{22}}{a_{32}} \eta_3 + p \frac{1}{a_{32}} \eta_3 - \frac{1}{p} a_{23} \eta_3 \right). \quad (2.60)$$

Користуючись описаними вище міркуваннями, можна виключити із рівняння (2.57) інтегральну складову. Виразивши рівняння (2.57) через реальні змінні і враховуючи, що $1/b_{32} = J/x_{dm} I_{M0} > 0$, а також підставивши параметри двигуна марки Оріон-18-2-01 отримаємо рівняння регулятора швидкості у вигляді:

$$u_{\omega} = u_{y\omega m} \text{sign} \left(\omega^* - \omega - p \frac{x_q}{r_s} \omega \right) = 15 \text{sign} \left(\omega^* - \omega - 2.396 \cdot 10^{-3} p \omega \right). \quad (2.61)$$

2.4.2. Синтез оптимального сигналу керування для струму i_d для тягових установок з СДПМ без пускових обмоток. Виконаємо синтез оптимального сигналу керування для струму i_d користуючись тими ж самими міркуваннями, що і для синтезу регуляторів i_q , ω_R . Для цього перепишемо рівняння (2.46), залишивши в правій частині лише складову з керуванням і винісши знак похідної p за дужки:

$$p \left(\eta_1 + \frac{1}{p} \cdot \frac{r_s}{x_d} \eta_1 \right) = \frac{1}{x_d} U_1. \quad (2.62)$$

Таким чином, функція перемикання буде мати вигляд:

$$\psi = \eta_1 + \frac{1}{p} \cdot \frac{r_s}{x_d} \eta_1. \quad (2.63)$$

Так як $1/x_d > 0$, то оптимальне керування буде мати наступний вигляд:

$$u = -\text{sign} \left(\eta_1 + \frac{1}{p} \cdot \frac{r_s}{x_d} \eta_1 \right). \quad (2.64)$$

Перейшовши до реальних змінних і виключивши з рівняння (2.64) інтегральну складову, а також враховуючи, що $i_d^* = 0$ отримаємо алгоритм оптимального релейного регулювання струму i_d для двигуна марки Оріон-18-2-01:

$$u_{id} = u_{ym} \text{sign}(i_d^* - i_d) = -220 \text{sign}(i_d). \quad (2.65)$$

2.5 Синтез оптимальних сигналів керування для тягової установки з синхронним двигуном на постійних магнітах з пусковими обмотками

Із аналізу системи рівнянь (2.15) можна зробити висновок, що при виконанні синтезу САК тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками необхідно додатково враховувати вплив струмів в цих обмотках на роботу електропривода. Адже понаднормове зростання струмів i_D та i_Q може спричинити аварійні режими роботи електроприводу. Тому, згідно з принципом підпорядкованого регулювання, структурна схема САК такої установки буде містити два додаткових контури регулювання струмів i_D та i_Q . Виконаємо синтез функцій перемикання систем автоматичного керування для СДПМ з пусковими обмотками із урахуванням цього зауваження.

2.5.1. Синтез оптимальних сигналів керування для струмів i_d та i_D для тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками. Згідно з методикою синтезу САК, викладеною в [36], при визначенні оптимальні сигнали керування для конкретної фазової координати, ваговий коефіцієнт при квадраті цієї координати в інтегранті квадратичного функціоналу якості слід прийняти рівним одиниці, а інші вагові коефіцієнти – рівними нулю.

Проведемо синтез оптимального сигналу керування для струму i_D враховуючи вищезазначені міркування. Для цього перепишемо систему (2.28), ввівши для зручності нові позначення:

$$\begin{cases} p\eta_1 = \eta_1 \frac{-r_s x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} + \eta_2 \frac{r_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} = a_{11}\eta_1 + a_{12}\eta_2; \\ p\eta_2 = \eta_1 \frac{r_s x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} + \eta_2 \frac{-r_D x_d}{x_D x_d - x_{dD}^2} + U_1 \frac{-x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} = a_{21}\eta_1 + a_{22}\eta_2 + b_2 U_1. \end{cases} \quad (2.66)$$

Знайшовши координату η_1 із першого рівняння системи (2.66) і підставивши в друге отримаємо:

$$p\eta_2 - \frac{a_{12}a_{21}}{p - a_{11}}\eta_2 - a_{22}\eta_2 = b_2U_1. \quad (2.67)$$

Винісши позначення похідної p за дужки отримаємо рівняння:

$$p\left(\eta_2 - \frac{1}{p} \frac{a_{12}a_{21}}{(p - a_{11})}\eta_2 - \frac{1}{p} a_{22}\eta_2\right) = b_2U_1. \quad (2.68)$$

Таким чином, функція перемикавання для регулятора струму i_d буде мати вигляд:

$$\psi = \eta_2 - \frac{1}{p} \frac{a_{12}a_{21}}{(p - a_{11})}\eta_2 - \frac{1}{p} a_{22}\eta_2. \quad (2.69)$$

Перейшовши до реальних змінних і виключивши із рівняння (2.69) інтегральні складові, а також враховуючи, що $i_D^* = 0$ отримаємо сигнал оптимального керування струму i_D для двигуна марки Опіон-18-2-01:

$$u_{iD} = u_{yidm} \operatorname{sign}(i_D^* - i_D) = -u_{yidm} \operatorname{sign}(i_D). \quad (2.70)$$

Проведемо синтез оптимального сигналу керування для струму i_d . Для цього перепишемо систему (2.28), ввівши для зручності нові позначення:

$$\begin{cases} p\eta_1 = \eta_1 \frac{-r_s x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} + \eta_2 \frac{r_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} + U_1 \frac{x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} = a_{11}\eta_1 + a_{12}\eta_2 + b_1U_1; \\ p\eta_2 = \eta_1 \frac{r_s x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} + \eta_2 \frac{-r_D x_d}{x_D x_d - x_{dD}^2} = a_{21}\eta_1 + a_{22}\eta_2 \end{cases} \quad (2.71)$$

Знайшовши координату η_2 із другого рівняння системи (2.71) і підставивши в перше отримаємо:

$$p\eta_1 - a_{11}\eta_1 - \frac{a_{12}a_{21}}{p - a_{22}}\eta_1 = b_1U_1. \quad (2.72)$$

Винісши позначення похідної p за дужки отримаємо рівняння:

$$p\left(\eta_1 - \frac{1}{p}a_{11}\eta_1 - \frac{1}{p}\frac{a_{12}a_{21}}{(p - a_{22})}\eta_1\right) = b_1U_1. \quad (2.73)$$

Таким чином, функція перемикання для регулятора струму i_d буде мати вигляд:

$$\psi = \eta_1 - \frac{1}{p}a_{11}\eta_1 - \frac{1}{p}\frac{a_{12}a_{21}}{(p - a_{22})}\eta_1. \quad (2.74)$$

Перейшовши до реальних змінних і виключивши із рівняння (2.74) інтегральні складові, а також враховуючи, що $i_d^* = 0$ отримаємо сигнал оптимального керування струму i_d для двигуна марки Оріон-18-2-01:

$$u_{id} = u_{ym} \operatorname{sign}(i_d^* - i_d) = -0,5 \operatorname{sign}(i_d). \quad (2.75)$$

2.5.2. Синтез оптимальних сигналів керування для струмів i_q , i_Q та швидкості ω_R для тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками. Проведемо синтез оптимального сигналу керування для струму i_Q . Для цього перепишемо систему (2.40), ввівши для зручності нові позначення:

$$\left\{ \begin{aligned} p\eta_3 &= \eta_3 \frac{-r_s x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_4 \frac{r_Q x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_5 \frac{-x_{dM} I_{M0} x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} = \\ &= a_{31}\eta_3 + a_{32}\eta_4 + a_{33}\eta_5; \\ p\eta_4 &= \eta_3 \frac{r_s x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_4 \frac{-r_Q x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_5 \frac{x_{dM} I_{M0} x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + U_3 \frac{-x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} = \\ &= a_{41}\eta_3 + a_{42}\eta_4 + a_{43}\eta_5 + b_4 U_3; \\ p\eta_5 &= \eta_3 \frac{x_{dM} I_{M0}}{J} = a_{51}\eta_3. \end{aligned} \right. \quad (2.76)$$

Виразивши із першого та третього рівнянь системи (2.76) змінні η_5 та η_3 через η_4 , підставивши результати цих алгебраїчних перетворень в друге рівняння та винісши позначення похідної p за дужки отримаємо рівняння:

$$p \left(\eta_4 - \frac{1}{p(p - a_{31} - a_{33}a_{51}/p)} \eta_4 - \frac{1}{p} a_{42} \eta_4 - \frac{1}{p^2} \frac{a_{43}a_{51}a_{32}}{(p - a_{31} - a_{33}b_{51}/p)} \eta_4 \right) = b_4 U_3. \quad (2.77)$$

Таким чином, функція перемикання для регулятора струму i_Q буде мати вигляд:

$$\psi = \eta_4 - \frac{1}{p(p - a_{31} - a_{33}a_{51}/p)} \eta_4 - \frac{1}{p} a_{42} \eta_4 - \frac{1}{p^2} \frac{a_{43}a_{51}a_{32}}{(p - a_{31} - a_{33}a_{51}/p)} \eta_4. \quad (2.78)$$

Перейшовши до реальних змінних і виключивши із рівняння (2.78) інтегральні складові отримаємо сигнал оптимального керування струму i_Q для двигуна марки Опіон-18-2-01:

$$u_{iQ} = u_{yidm} \operatorname{sign}(i_Q^* - i_Q) = 220 \operatorname{sign}(i_Q^* - i_Q). \quad (2.79)$$

Проведемо синтез оптимального сигналу керування для струму i_q . Для цього перепишемо систему (2.40), ввівши для зручності нові позначення:

$$\begin{cases} p\eta_3 = \eta_3 \frac{-r_s x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_4 \frac{r_Q x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_5 \frac{-x_{dM} I_{M0} x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + U_3 \frac{x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} = \\ = a_{31}\eta_3 + a_{32}\eta_4 + a_{33}\eta_5 + b_3 U_3; \\ p\eta_4 = \eta_3 \frac{r_s x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_4 \frac{-r_Q x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_5 \frac{x_{dM} I_{M0} x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} = \\ = a_{41}\eta_3 + a_{42}\eta_4 + a_{43}\eta_5; \\ p\eta_5 = \eta_3 \frac{x_{dM} I_{M0}}{J} = a_{51}\eta_3. \end{cases} \quad (2.80)$$

Виразивши із другого та третього рівнянь системи (2.76) змінні η_5 та η_4 через η_3 , підставивши результати цих алгебраїчних перетворень в друге рівняння та винісши позначення похідної p за дужки отримаємо рівняння:

$$p \left[\eta_3 - \frac{1}{p} (a_{31}\eta_3 + a_{33}b_{51})\eta_3 - \frac{1}{p(p-a_{42})} \frac{a_{32}a_{41}}{p} \eta_3 - \frac{a_{43}a_{51}}{p^2(p-a_{42})} \eta_3 \right] = b_3 U_3. \quad (2.81)$$

Таким чином, функція перемикання для регулятора струму i_q буде мати вигляд:

$$\psi = \eta_3 - \frac{1}{p} (a_{31}\eta_3 + a_{33}a_{51})\eta_3 - \frac{1}{p(p-a_{42})} \frac{a_{32}a_{41}}{p} \eta_3 - \frac{a_{43}a_{51}}{p^2(p-a_{42})} \eta_3. \quad (2.82)$$

Перейшовши до реальних змінних і виключивши із рівняння (2.82) інтегральні складові отримаємо сигнал оптимального керування струму i_q для двигуна марки Оріон-18-2-01:

$$u_{iq} = u_{y\omega m} \operatorname{sign}(i_q^* - i_q) = 0,5 \operatorname{sign}(i_q^* - i_q). \quad (2.83)$$

Проведемо синтез оптимальних сигналів керування для швидкості ω_R . Для цього скористаємось системою рівнянь (2.80). Виконавши аналогічні описаним вище алгебраїчні перетворення, отримаємо сигнал оптимального сигналу керування для швидкості ω_R у вигляді:

$$\psi = -\frac{a_{31}}{a_{51}}\eta_5 + p\frac{1}{a_{51}}\eta_5 - \frac{1}{p}\frac{a_{32}(pa_{41} + a_{44}a_{51})}{a_{51}(p - a_{42})}\eta_5 - \frac{1}{p}a_{33}\eta_5. \quad (2.84)$$

Перейшовши до реальних змінних, виключивши із рівняння (2.84) інтегральні складові а також винісши за знак сигнатури деякі змінні та підставивши параметри двигуна марки Оріон 18-2-01 отримаємо сигнал оптимального керування швидкості ω_R :

$$u_{\omega} = u_{ym} \operatorname{sign}\left(\omega_R^* - \omega - p\frac{x_Q x_q - x_{qQ}^2}{r_s r_Q}\omega\right) = 15 \operatorname{sign}(\omega_R^* - \omega + 1,03 p\omega). \quad (2.85)$$

Згідно другого етапу розв'язання задачі автоматизації керування рухом тягових установок визначені математична модель динаміки руху тягових установок на основі СДПМ. Аналіз систем, що описані математичними моделями динаміки руху тягових установок показали, що дані системи є повністю керованими та спостережними. Це дало змогу провести синтез оптимальних сигналів керування рухом тягових установок і отримати алгоритми оптимального керування для кожного з варіантів конструктивного виконання СДПМ.

Висновки до розділу

1. Для синтезу оптимальних за точністю сигналів керування тягової установки з СДПМ найдоцільніше застосувати метод аналітичного конструювання оптимальних регуляторів на основі використання властивостей функцій перемикання оптимальних керувань.
2. Знайдені математичні моделі динаміки руху тягової установки з СДПМ для найбільш поширених варіантів конструктивного виконання електродвигунів дозволяють синтезувати сигнали оптимального керування тяговою установкою.
3. Отримані аналітичні вирази для функцій перемикань дали змогу визначити оптимальні сигнали керування, які можуть бути використані при побудові структурних схем САК рухом тягових установок.

РОЗДІЛ 3

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВОЮ УСТАНОВКОЮ

Отримані в попередньому розділі сигнали оптимального релейного керування тяговою установкою дають змогу провести розробку структурних схем САК з метою їх подальшої практичної реалізації.

Для визначення ефекту від застосування запропонованих в роботі САК тягових установок з СДПМ необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести синтез структурних схем САК тягових установок на основі знайдених в другому розділі сигналів керування.

2. Розробити комп'ютерні імітаційні моделі САК тягових установок для кожного з варіантів конструктивного виконання СДПМ, що розглядались в роботі.

3. Провести аналіз ефекту від застосування запропонованих в роботі САК на розроблених комп'ютерних моделях.. В якості критеріїв для визначення ефекту від застосування розроблених САК найдоцільніше прийняти такі параметри, як тривалість перехідного процесу та величина статичної похибки регулювання.

Вирішенню даних задач і присвячений третій розділ дисертаційної роботи.

3.1 Структурна реалізація сигналів оптимального керування тяговою установкою

Структурні схеми САК, що реалізують знайдені в підрозділах 2.4 та 2.5 оптимальні сигнали керування для двох варіантів конструктивного виконання СДПМ, що розглядались в роботі, будуть дещо відрізнятись, в залежності від кількості керованих змінних а також від можливості їх безпосереднього вимірювання з допомогою датчиків. Розглянемо структурні

сигналів САК, що реалізують знайдені оптимальні керування для кожного з цих двох варіантів.

3.1.1. Структурна реалізація сигналів оптимального керування тяговою установкою з СДПМ без пускових обмоток. Структурна схема системи оптимального керування тяговою установкою з СДПМ без пускових обмоток, що реалізує сигнали оптимального керування (2.59), (2.61) та (2.65), зображена на рис. 3.1.

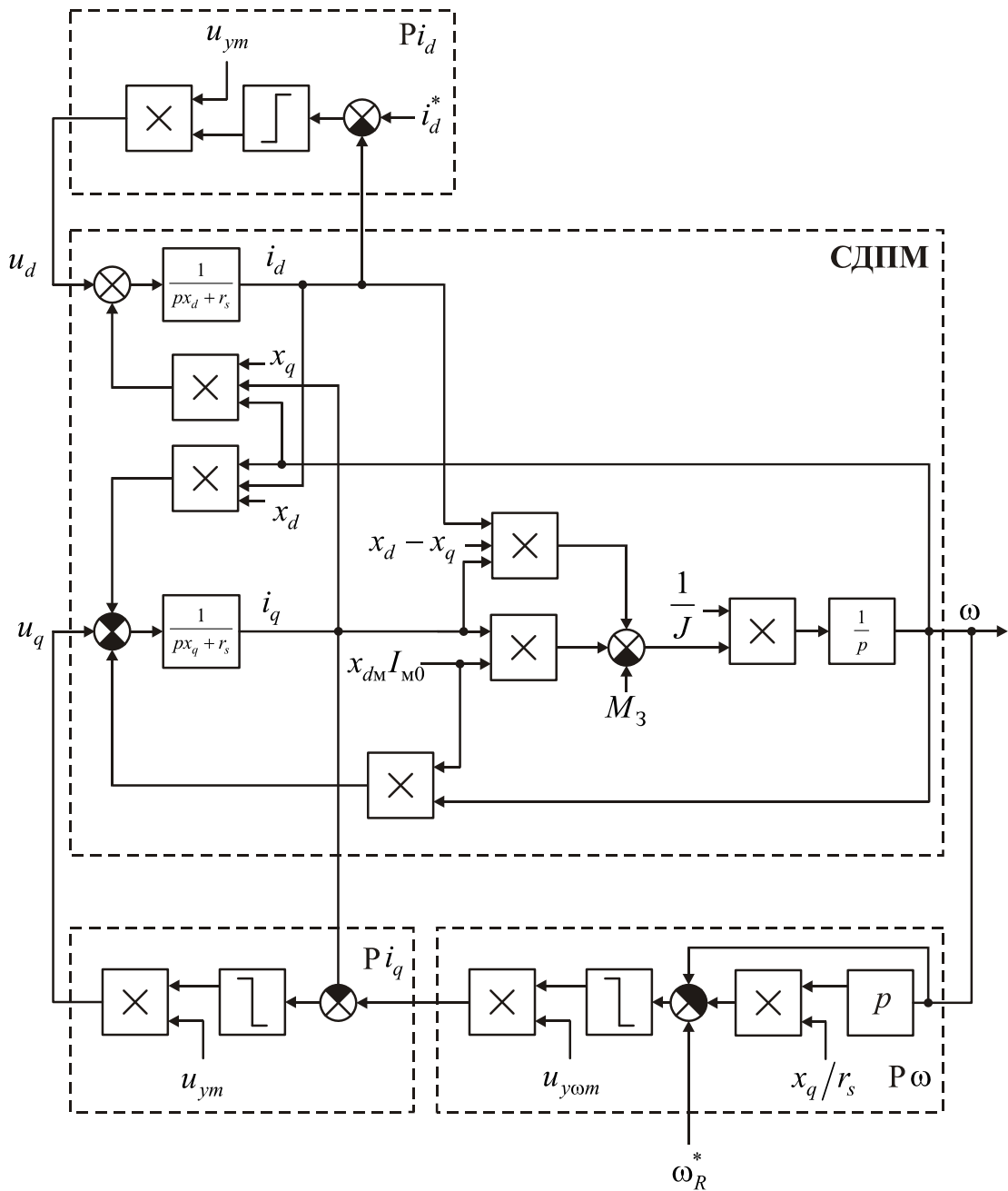


Рис. 3.1. Структурна схема САК тягової установки з СДПМ без пускових обмоток

На рис. 3.1: СДПМ – структурна схема СДПМ без пускових обмоток, що відповідає системі рівнянь (1.56);

Pi_d – структурна схема регулятора струму i_d , що відповідає сигналу керування (2.65);

Pi_q – структурна схема регулятора струму i_q , що відповідає сигналу керування (2.59);

$P\omega$ – структурна схема регулятора швидкості обертання ротора СДПМ, що відповідає сигналу керування (2.61).

Слід зазначити, що сигнали оптимального керування (2.59), (2.65) реалізуються з допомогою жорстких зворотних зв'язків в функції основних змінних, а сигнал (2.61) – в функції основної змінної та її першої похідної. Усі змінні сигналів керування (2.59), (2.61) та (2.65) піддаються безпосередньому вимірюванню, тому структурна реалізація цих сигналів не викликає принципових труднощів.

3.1.2. Структурна реалізація сигналів оптимального керування тяговою установкою на базі СДПМ з пусковими обмотками. Сигнали оптимального керування (2.75), (2.83), як і у попередньому випадку, реалізуються з допомогою жорстких зворотних зв'язків в функції основних змінних, а сигнал (2.85) – в функції основної змінної та її першої похідної. Усі змінні сигналів керування (2.75), (2.83) та (2.85) піддаються безпосередньому вимірюванню, тому структурна реалізація цих сигналів не викликає принципових труднощів.

Змінні i_D та i_Q , які входять до складу сигналів керування (2.70) та (2.79) відповідно не можуть бути виміряні безпосередньо через значну технічну складність встановлення датчиків струму на пускових обмотках СДПМ. Тому, для їх оцінки доцільно скористатись спостерігачами стану. Зважаючи, що всі інші змінні стану в рівняннях (2.28) та (2.40) піддаються безпосередньому вимірюванню, то найдоцільніше скористатись

спостерігачами стану зниженого порядку (спостерігач Люенбергера). Проведемо синтез спостерігачів Люенбергера для змінних стану i_D та i_Q .

3.1.3. Спостерігач Люенбергера для змінної стану i_D . Для системи рівнянь (2.28) змінна стану $\eta_1 = i_d - i_d^*$ є вимірюваною, а значення змінної стану $\eta_2 = i_D - i_D^*$ оцінюється з допомогою спостерігача. Перевіримо можливість оцінки змінної η_2 скориставшись критерієм спостережності:

$$\text{rank} \left[\mathbf{C}^T, \mathbf{A}^T \mathbf{C}^T, \mathbf{A}^T (\mathbf{C}^T)^2, \dots, \mathbf{A}^T (\mathbf{C}^T)^{n-1} \right] = n. \quad (3.1)$$

Для системи рівнянь (2.28), враховуючи вищесказане, матриця виходів буде мати вигляд:

$$\mathbf{C}_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

Таким чином, умову спостережності системи (2.28) можна записати у вигляді:

$$\text{rank} \left[\mathbf{C}_d^T, \mathbf{A}_d^T \mathbf{C}_d^T \right] = \text{rank} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{r_s x_D}{x_d x_D - x_{dD}^2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_D x_{dD}}{x_d x_D - x_{dD}^2} & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Ранг матриці формули (3.3) визначається порядком мінору. Оскільки в матриці присутні ненульові елементи, то її ранг не менше одиниці і не більше 2, так як він не може перевищувати кількості рядків і стовбців.

Визначимо ранг матриці шляхом обчислення її мінору другого порядку:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = 0; M_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{r_s x_D}{x_d x_D - x_{dD}^2} \\ 0 & -\frac{r_D x_{dD}}{x_d x_D - x_{dD}^2} \end{bmatrix} = 0;$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{r_s x_D}{x_d x_D - x_{dD}^2} \\ 0 & -\frac{r_D x_{dD}}{x_d x_D - x_{dD}^2} \end{bmatrix} = 1 \cdot + -\frac{r_s x_D}{x_d x_D - x_{dD}^2} \cdot 0 = -\frac{r_D x_{dD}}{x_d x_D - x_{dD}^2} \neq 0.$$

З вищенаведених співвідношень слідкує, що ранг матриці (3.3) дорівнює 2, тобто система завжди спостережна:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{r_s x_D}{x_d x_D - x_{dD}^2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_D x_{dD}}{x_d x_D - x_{dD}^2} & 0 \end{bmatrix} = 2$$

Таким чином, системи (2.28) для двигуна марки Опіон 18-2-01П задовольняє умовам спостережності:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -181,153 & 0 \\ 0 & 0 & 2,483 \cdot 10^{-3} & 0 \end{bmatrix} = 2$$

Узагальнене рівняння спостерігача Люенбергера має наступний вигляд [104, 105]:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}}(t) = & (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{12})\mathbf{z}(t) + (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{12})\mathbf{L}\mathbf{y}(t) + \\ & + (\mathbf{A}_{21} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{11})\mathbf{y}(t) + (\mathbf{B}_2 - \mathbf{L}\mathbf{B}_1)\mathbf{u}(t), \end{aligned} \quad (3.4)$$

Рівнянню (3.4) відповідає структурна схема, зображена на рис. 3.2.

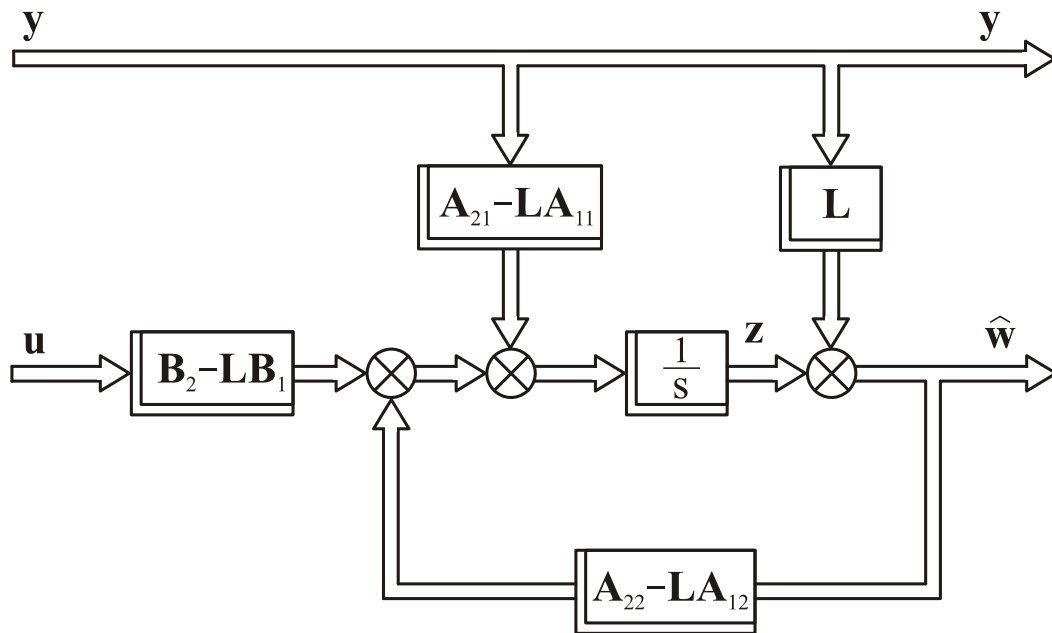


Рис. 3.2. Узагальнена структурна схема спостерігача Люенбергера

В рівнянні (3.4) вибором матриці $\mathbf{L}$ кореням спостерігача Люенбергера можна надати будь-які бажані значення. В роботі [104] пропонується матрицю $\mathbf{L}$ обирати таким чином, щоб на структурній схемі спостерігача (рис. 3.2) передаточна функція $\mathbf{B}_2 - \mathbf{L}\mathbf{B}_1$ перетворювалась в нуль. В такому випадку спостерігач Люенбергера буде інваріантний по відношенню до прикладених до об'єкту керування зовнішніх впливів.

Запишемо складові рівняння (3.4) системи (2.28) для моделі для двигуна марки Опіон 18-2-01П:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{A}_{D11} = -\frac{r_s x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} = -181,153; \quad \mathbf{A}_{D12} = \frac{r_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} = 2,483 \cdot 10^{-3}; \\ \mathbf{A}_{D21} = \frac{r_s x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} = 9,932 \cdot 10^{-3}; \quad \mathbf{A}_{D22} = -\frac{r_D x_d}{x_D x_d - x_{dD}^2} = -1,165 \cdot 10^{-3}; \\ \mathbf{B}_{D1} = \frac{x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} = 188,701; \quad \mathbf{B}_{D2} = -\frac{x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} = -0,01; \\ \mathbf{L} = \mathbf{B}_{D2} \cdot \mathbf{B}_{D1}^{-1} = -\frac{x_{dD}}{x_D} = -5,483 \cdot 10^{-5}. \end{array} \right. , \quad (3.5)$$

Для спрощення вигляду рівняння (3.4) спостерігача Люенбергера для змінної η_2 проведемо деякі алгебраїчні перетворення, підставивши в нього параметри двигуна Оріон-18-2-01П:

$$\mathbf{B}_{D2} - \mathbf{L}_D \mathbf{B}_{D1} = -\frac{x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} - \frac{l x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} = -\frac{x_{dD} + l x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} = 0, \quad (3.6)$$

$$\mathbf{A}_{D21} - \mathbf{L}_D \mathbf{A}_{D11} = \frac{r_s x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} + \frac{l r_s x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} = \frac{r_s x_{dD} + l r_s x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} = -4,07 \cdot 10^{-7}, \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{D22} - \mathbf{L}_D \mathbf{A}_{D12} &= -\frac{r_D x_d}{x_D x_d - x_{dD}^2} - \frac{l r_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} = \\ &= -\frac{r_D x_d + l r_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} = -1,164 \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Таким чином, рівняння спостерігача Люенбергера для оцінки змінної стану η_2 має вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}}(t) &= -\frac{r_D x_d + l r_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} \mathbf{z}(t) - \frac{r_D x_d + l r_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} l \mathbf{y}(t) + \\ &+ \frac{r_s x_{dD} + l r_s x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} \mathbf{y}(t) - \frac{x_{dD} + l x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} \mathbf{u}(t) = \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$= -1,164 \cdot 10^{-3} \mathbf{z}(t) + 6,382 \cdot 10^{-8} \eta_1 - 4,07 \cdot 10^{-7} \eta_1.$$

Структурна схема, що відповідає рівнянню (3.9) зображена на рис. 3.3.

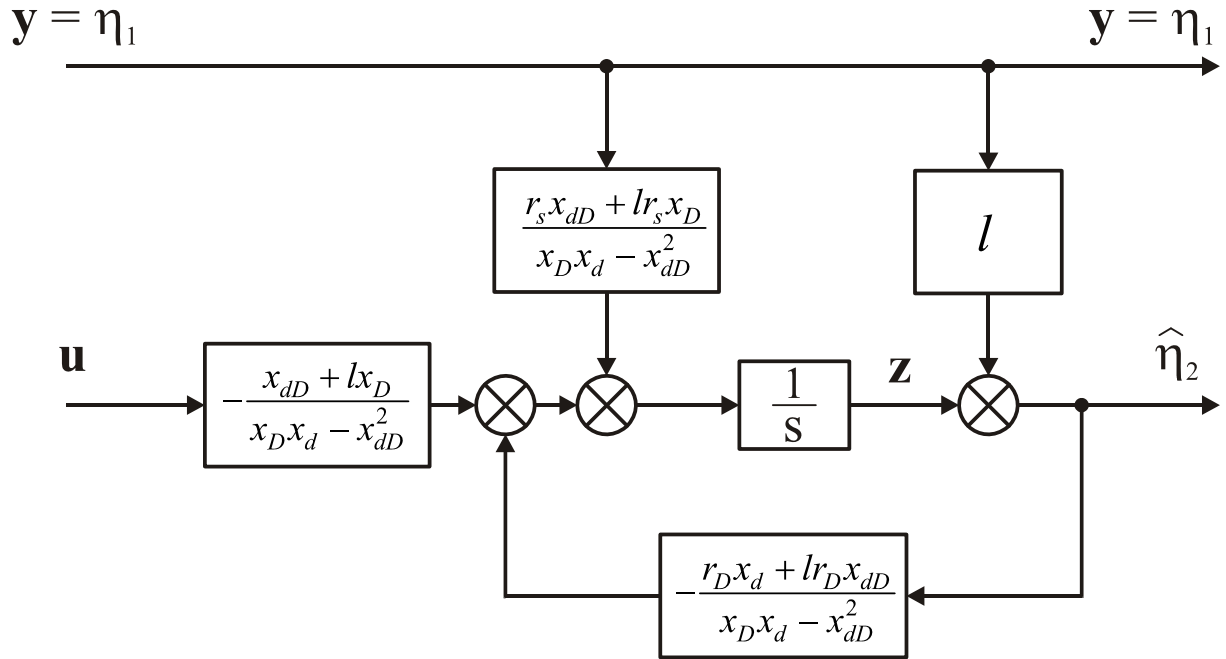


Рис. 3.3. Структурна схема спостерігача Люенбергера для оцінки змінної стану $\eta_2 = i_D - i_D^*$.

3.1.4. Спостерігач Люенбергера для змінної стану i_Q . Для системи рівнянь (2.40) змінні стану $\eta_3 = i_q - i_q^*$ і $\eta_5 = \omega_R - \omega_R^*$ є вимірюваними, а значення змінної стану $\eta_4 = i_Q - i_Q^*$ оцінюється з допомогою спостерігача. Для зручності проведення синтезу спостерігача Люенбергера проведемо заміну змінних в рівнянні (2.40) $x_1 = \eta_3$, $x_2 = \eta_5$, $x_3 = \eta_4$ привівши його до вигляду:

$$\begin{cases} px_1 = x_1 \frac{-r_s x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + x_2 \frac{-x_{dM} I_{M0} x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + x_3 \frac{r_Q x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + U_3 \frac{x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2}; \\ px_2 = x_1 \frac{x_{dM} I_{M0}}{J}; \\ px_3 = x_1 \frac{r_s x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + x_2 \frac{x_{dM} I_{M0} x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + x_3 \frac{-r_Q x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + U_3 \frac{-x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2}. \end{cases} \quad (3.10)$$

Для системи рівнянь (3.10), враховуючи вищесказане, матриця виходів системи буде мати вигляд:

$$\mathbf{C}_q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

Перевірка системи рівнянь (3.10) за критерієм спостережності (3.1) показала, що $\text{rank}[\mathbf{C}_q^T, \mathbf{A}_q^T \mathbf{C}_q^T, \mathbf{A}_q^T (\mathbf{C}_q^T)^2] = 3$, тобто оцінка змінної стану $x_3 = \eta_4$ з допомогою спостерігача Льюенбергера є можливою. Проміжні алгебраїчні викладки оцінки системи (3.10) за критерієм спостережності (3.1) зважаючи на їх громіздкість наведені в додатку А.

Запишемо складові рівняння спостерігача (3.4) системи (3.10) для двигуна марки Оріон 18-2-01П:

$$\mathbf{A}_{Q11} = \begin{bmatrix} \frac{-r_s x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} & \frac{-x_{dM} I_{M0} x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \\ \frac{x_{dM} I_{M0}}{J} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -417,439 & -79,574 \\ 14,077 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_{Q12} = \begin{bmatrix} \frac{r_Q x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5,258 \cdot 10^{-3} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_{Q21} = \begin{bmatrix} \frac{r_s x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} & \frac{x_{dM} I_{M0} x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,021 & 4,01 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_{Q22} = -\frac{r_Q x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} = -104,36;$$

$$\mathbf{B}_{Q1} = \begin{bmatrix} \frac{x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 434,832 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_{Q2} = -\frac{x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} = -0,022;$$

$$\mathbf{L}_Q = [l_1 \quad l_2] = \begin{bmatrix} -5,06 \cdot 10^{-5} & 1,01 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}.$$

Для спрощення вигляду рівняння (3.4) спостерігача Люенбергера для змінної η_4 проведемо деякі алгебраїчні перетворення, підставивши в нього параметри двигуна Оріон-18-2-01П:

$$\mathbf{B}_{Q2} - \mathbf{L}_Q \mathbf{B}_{Q1} = -\frac{x_{qQ} + l_1 x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} = 0, \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{Q21} - \mathbf{L}_Q \mathbf{A}_{Q11} &= \begin{bmatrix} \frac{r_s x_{qQ} + l_1 r_s x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} - \frac{l_2 x_{dM} I_{M0}}{J} & \frac{x_{dM} I_{M0} (x_{qQ} + l_1 x_Q)}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -0,014 & 1,69 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{A}_{Q22} - \mathbf{L}_Q \mathbf{A}_{Q12} = -\frac{r_Q x_Q + l_1 r_Q x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} = -104,36. \quad (3.14)$$

Таким чином, рівняння спостерігача Люенбергера для оцінки змінної стану η_2 має вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}}(t) = & -\frac{r_Q x_Q + l_1 r_Q x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \mathbf{z}(t) - \frac{r_Q x_Q + l_1 r_Q x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} [l_1 \quad l_2] \mathbf{y}(t) + \\ & + \left[\frac{r_s x_{qQ} + l_1 r_s x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} - \frac{l_2 x_{dM} I_{M0}}{J} \quad \frac{x_{dM} I_{M0} (x_{qQ} + l_1 x_Q)}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \right] \mathbf{y}(t) - \frac{x_{qQ} + l_1 x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \mathbf{u}(t) = \quad (3.15) \\ = & 104,36 \mathbf{z}(t) + \begin{bmatrix} 5,281 \cdot 10^{-3} & -0,105 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_3 \\ \eta_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,014 & -1,69 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_3 \\ \eta_5 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Структурна схема спостерігача змінної стану $x_3 = \eta_4$, що відповідає рівнянню (3.15), зображена на рис. 3.4.

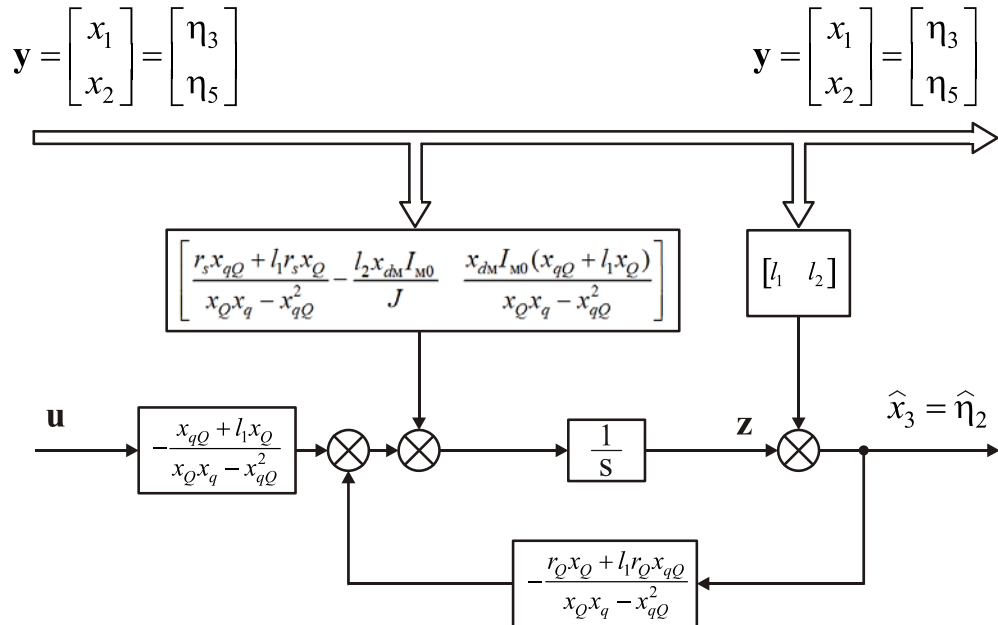


Рис. 3.4. Структурна схема спостерігача Люенбергера для оцінки змінної

стану $x_3 = \eta_4 = i_Q - i_Q^*$

Структурна схема САК рухом тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками, що реалізує сигнали оптимального керування (2.70), (2.75), (2.79), (2.83) та (2.85), зображена на рис. 3.5.

На рис. 3.5:

СДПМ – структурна схема СДПМ з пусковими обмотками, що відповідає системі рівнянь (1.60);

Pi_d – структурна схема регулятора струму i_d , що відповідає закону керування (2.76);

Pi_D – структурна схема регулятора струму i_D , що відповідає закону керування (2.71);

Pi_q – структурна схема регулятора струму i_q , що відповідає закону керування (2.84);

Pi_Q – структурна схема регулятора струму i_Q , що відповідає закону керування (2.80);

$P\omega$ – структурна схема регулятора швидкості обертання ротора СДПМ, що відповідає закону керування (2.86).

Ci_D – структурна схема спостерігача Люенбергера для змінної стану i_D ;

Ci_Q – структурна схема спостерігача Люенбергера для змінної стану i_Q .

3.2 Комп'ютерні моделі системи автоматичного керування рухом тягової установки

3.2.1 Комп'ютерні моделі САК рухом тягової установки з СДПМ без пускових обмоток. На рис. 3.6 наведена загальна комп'ютерна модель САК рухом тягової установки з СДПМ без пускових обмоток.

Загальна модель САК рухом тягової установки з СДПМ без пускових обмоток складається з таких основних блоків:

- «SDPM» – модель СДПМ без пускових обмоток;
- «Red i_d » – модель регулятора струму i_d , що відповідає сигналу керування (2.67);

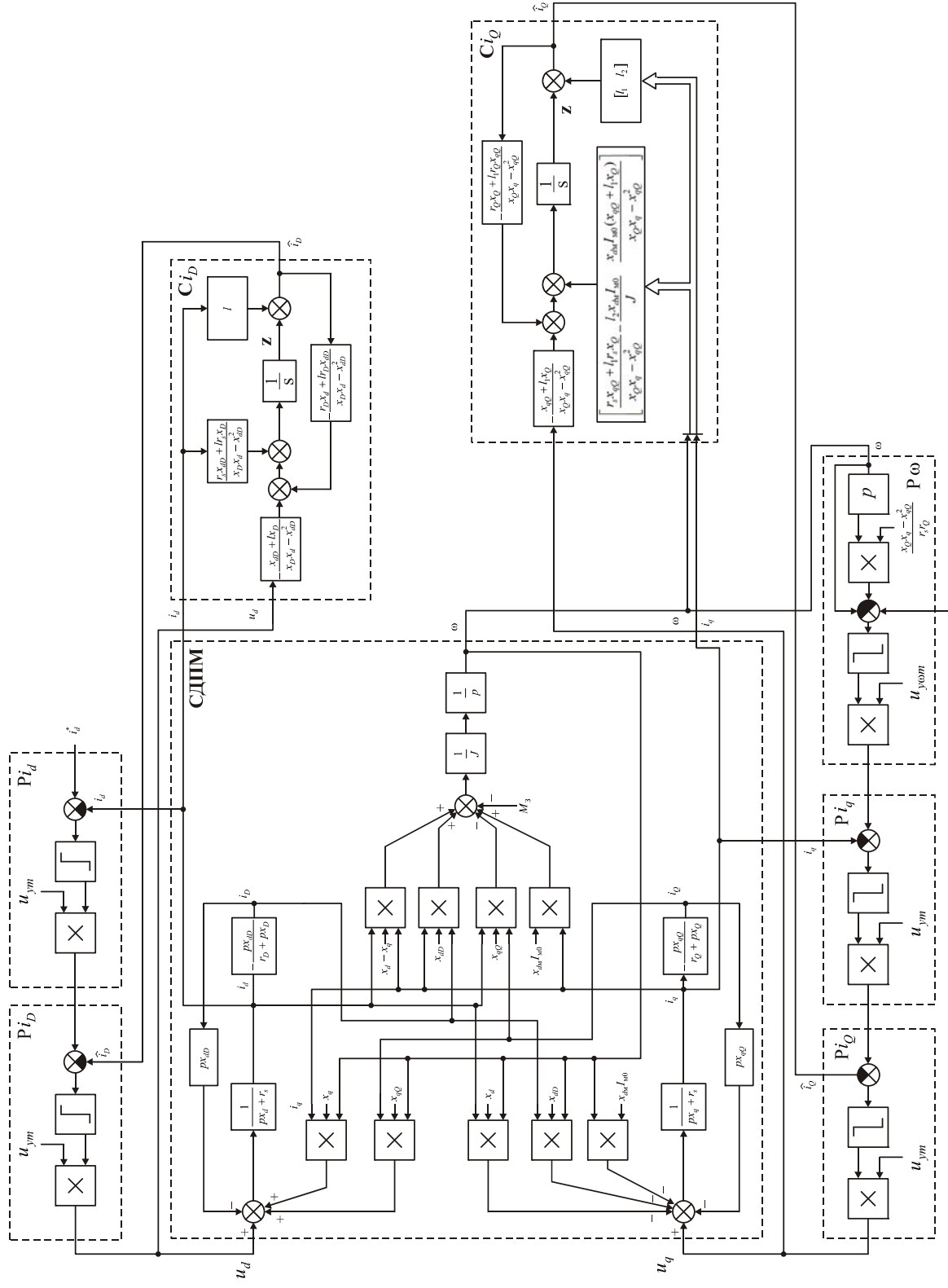


Рис. 3.5. Структурна схема САК рухом тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками

- «Reg id» – модель регулятора струму i_q , що відповідає сигналу керування (2.61);
- «Reg w» – модель регулятора швидкості обертання ротора СДПМ, що відповідає сигналу керування (2.63);
- «w_zad» – блок задання швидкості обертання ротора СДПМ;
- «M_zad» – блок задання механічного моменту навантаження.
- «Mech» - модель динаміки руху електровоза.

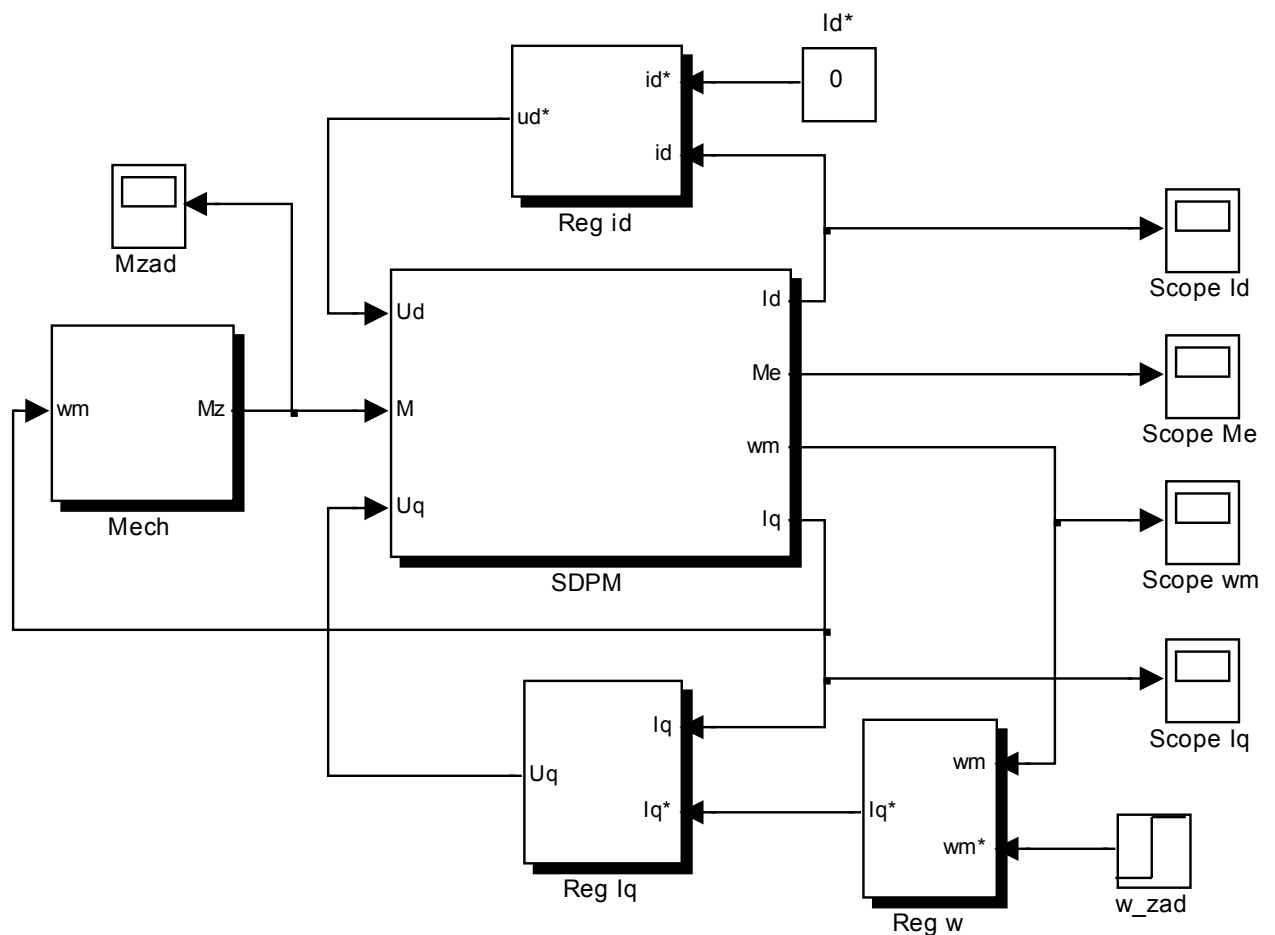


Рис. 3.6. Загальна комп'ютерна модель САК рухом тягової установки з СДПМ без пускових обмоток

На рис. 3.7 наведена комп'ютерна модель СДПМ без пускових обмоток.

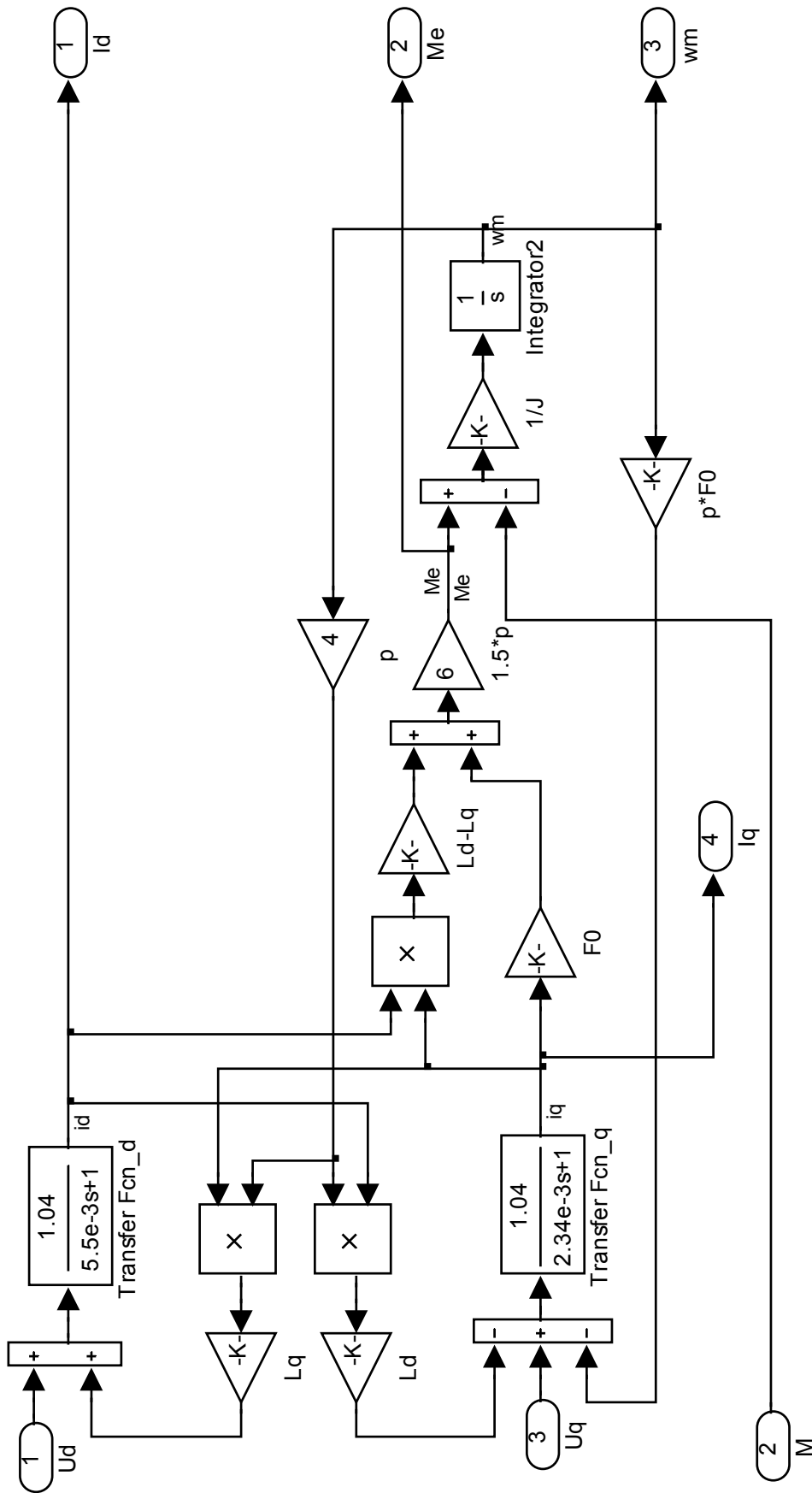


Рис. 3.7. Комп'ютерна модель СДІМ без пускових обмоток

На рис. 3.8 наведена комп'ютерна модель регулятора струму i_d

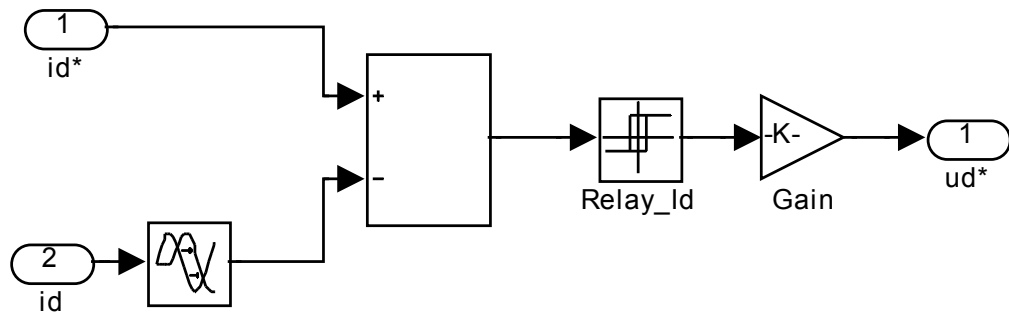


Рис. 3.8. Комп'ютерна модель регулятора струму i_d

На рис. 3.9 наведена комп'ютерна модель регулятора струму i_q .

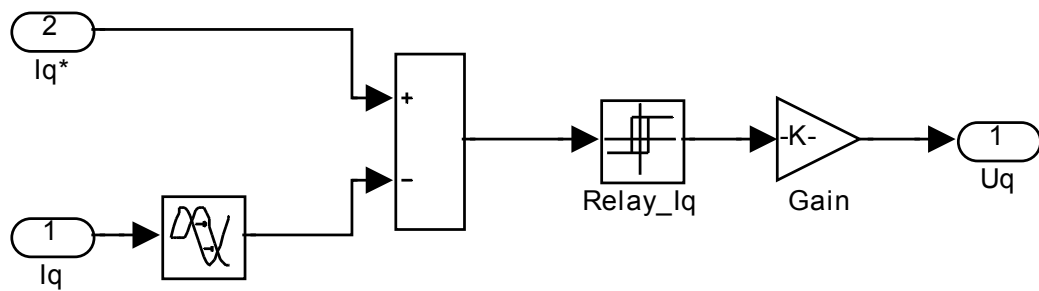


Рис. 3.9. Комп'ютерна модель регулятора струму i_q

На рис. 3.10 наведена комп'ютерна модель регулятора швидкості ω_R .

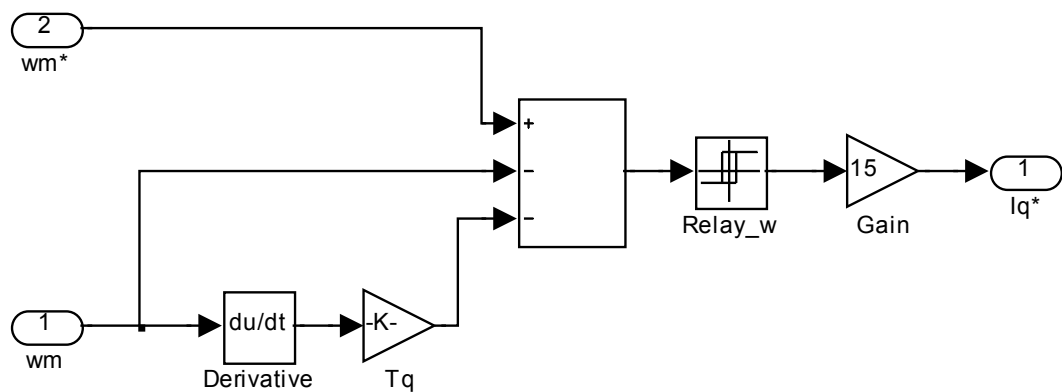


Рис. 3.10. Комп'ютерна модель регулятора швидкості ω_R

На рис. 3.11 наведена комп'ютерна модель динаміки руху електровоза.

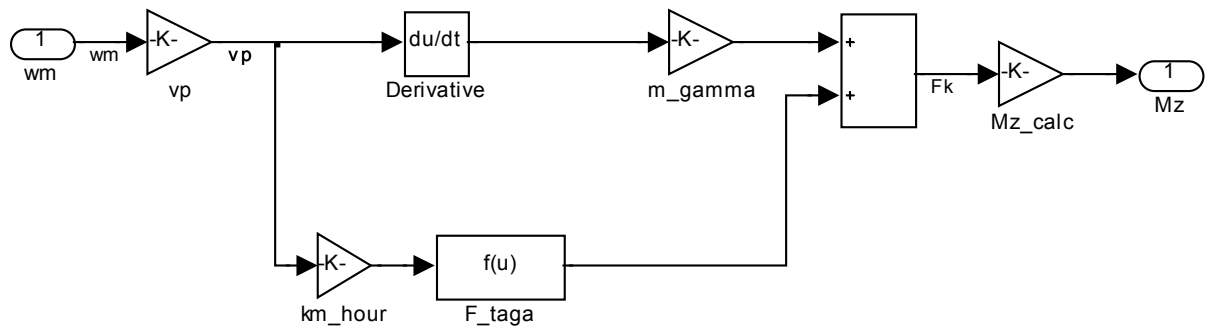


Рис. 3.11. Комп'ютерна модель динаміки руху електровоза

3.2.2 Комп'ютерні моделі САК рухом тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками. На рис. 3.12 наведена загальна комп'ютерна модель САК рухом тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками.

Загальна модель САК рухом тягової установки на базі СДПМ без пускових обмоток складається з таких основних блоків:

- «SDPM» – модель СДПМ з пусковими обмотками;
- «Red id» – модель регулятора струму i_d , що відповідає сигналу керування (2.75);

На рис. 3.13 наведена комп'ютерна модель регулятора струму i_d .

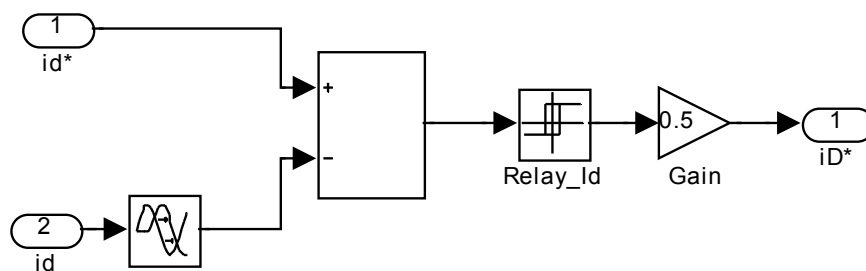


Рис. 3.13. Комп'ютерна модель регулятора струму i_d .

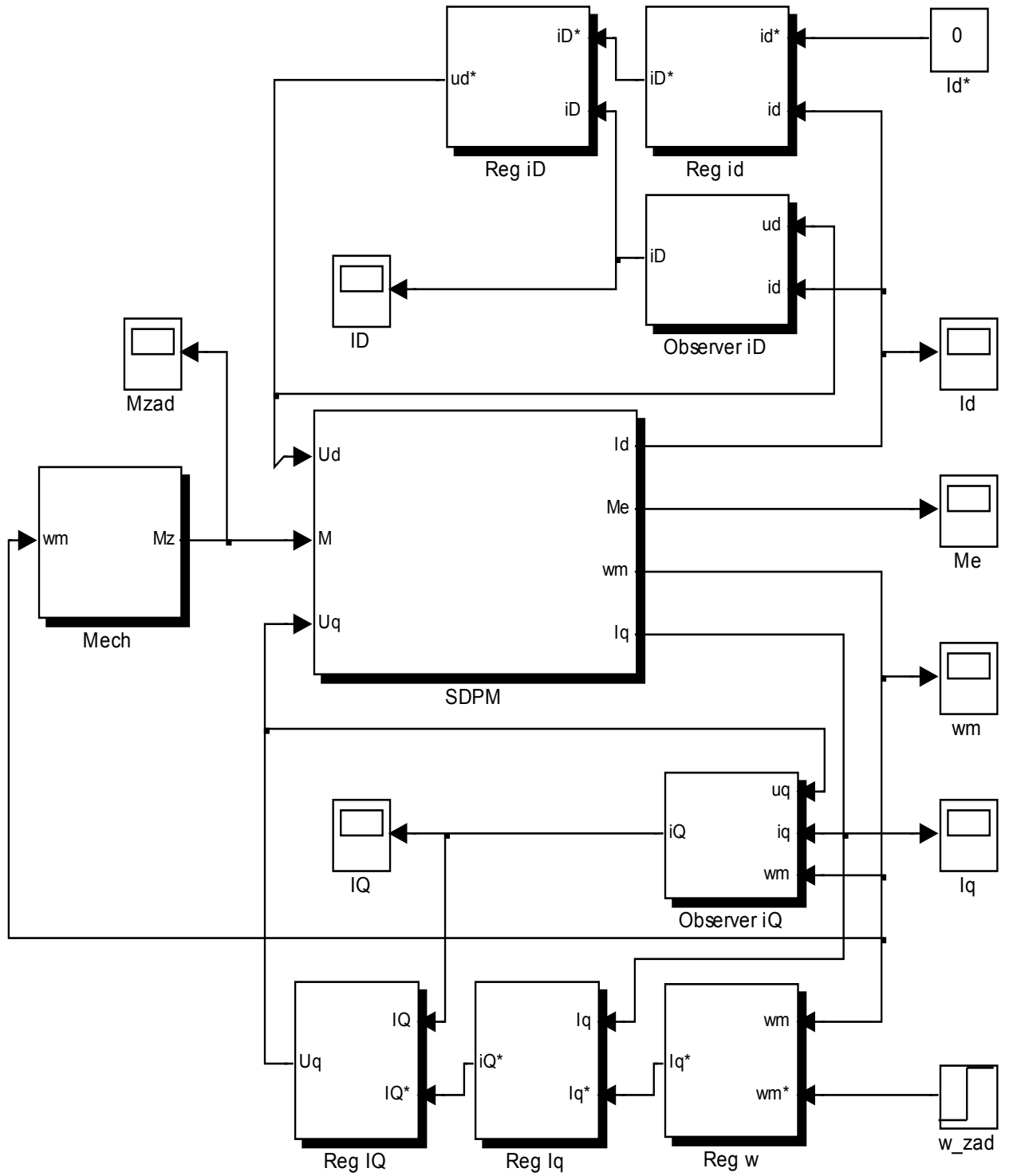


Рис. 3.12. Загальна комп'ютерна модель САК тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками.

На рис. 3.14 наведена комп'ютерна модель СДПМ з пусковими обмотками.

На рис. 3.15 наведена комп'ютерна модель регулятора струму i_D .

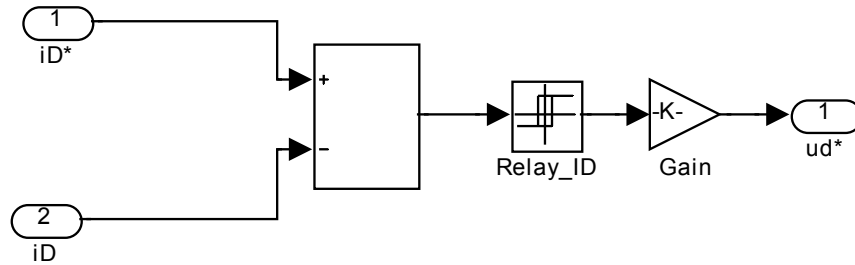


Рис. 3.15. Комп'ютерна модель регулятора струму i_D

На рис. 3.16 наведена комп'ютерна модель регулятора струму i_q .

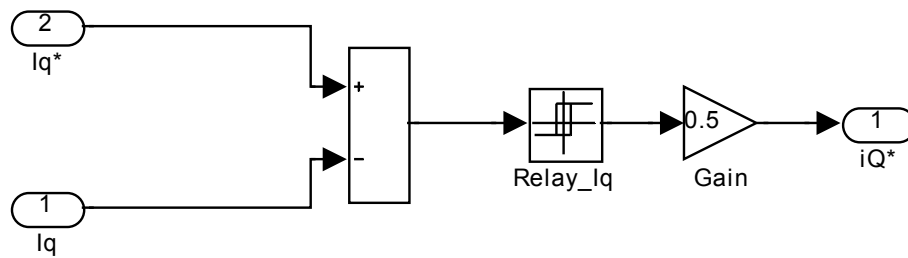


Рис. 3.16. Комп'ютерна модель регулятора струму i_q

На рис. 3.17 наведена комп'ютерна модель регулятора струму i_Q .

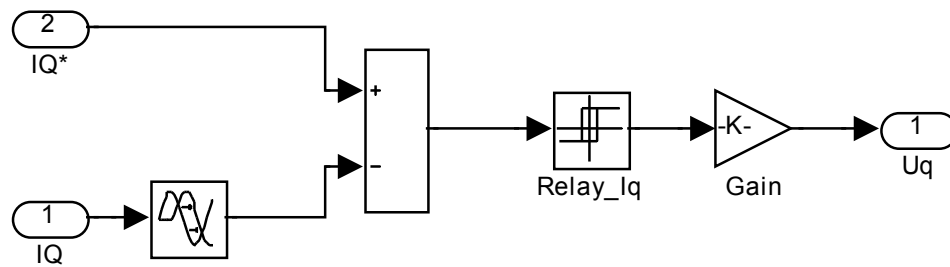


Рис. 3.17. Комп'ютерна модель регулятора струму i_Q

На рис. 3.18 наведена комп'ютерна модель регулятора швидкості ω_R .

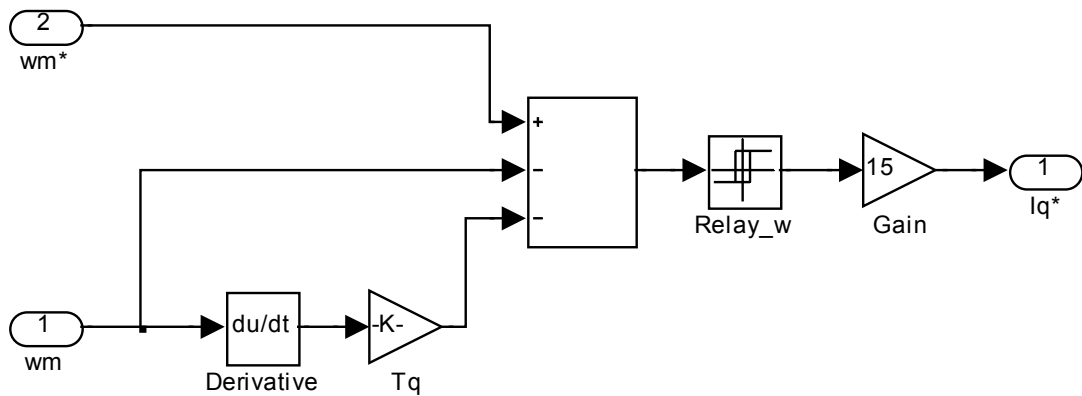


Рис. 3.18. Комп'ютерна модель регулятора швидкості ω_R

На рис. 3.19 наведена комп'ютерна модель спостерігача Люенбергера для змінної стану i_D .

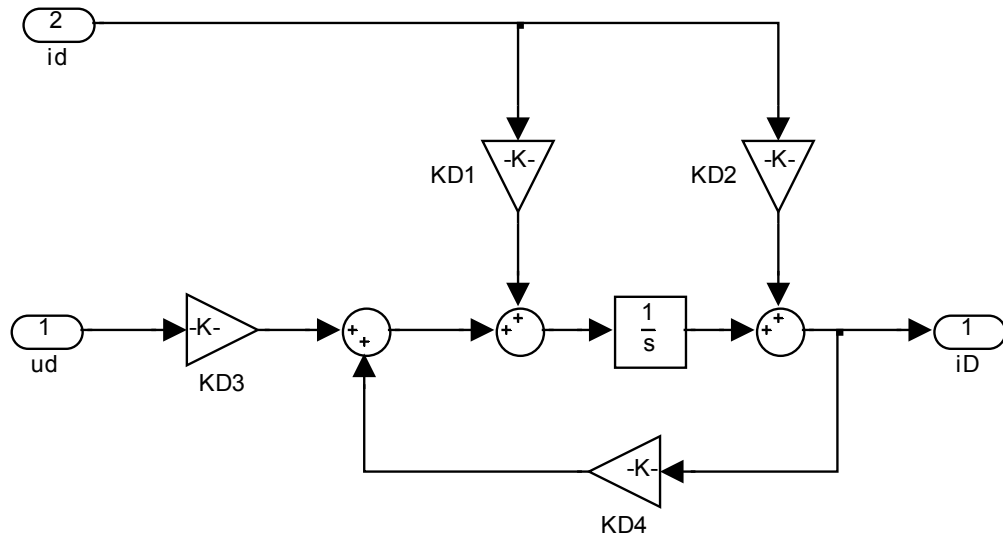


Рис. 3.19. Комп'ютерна модель спостерігача Люенбергера для змінної i_D .

На рис. 3.20 наведена комп'ютерна модель спостерігача Люенбергера для змінної стану i_Q .

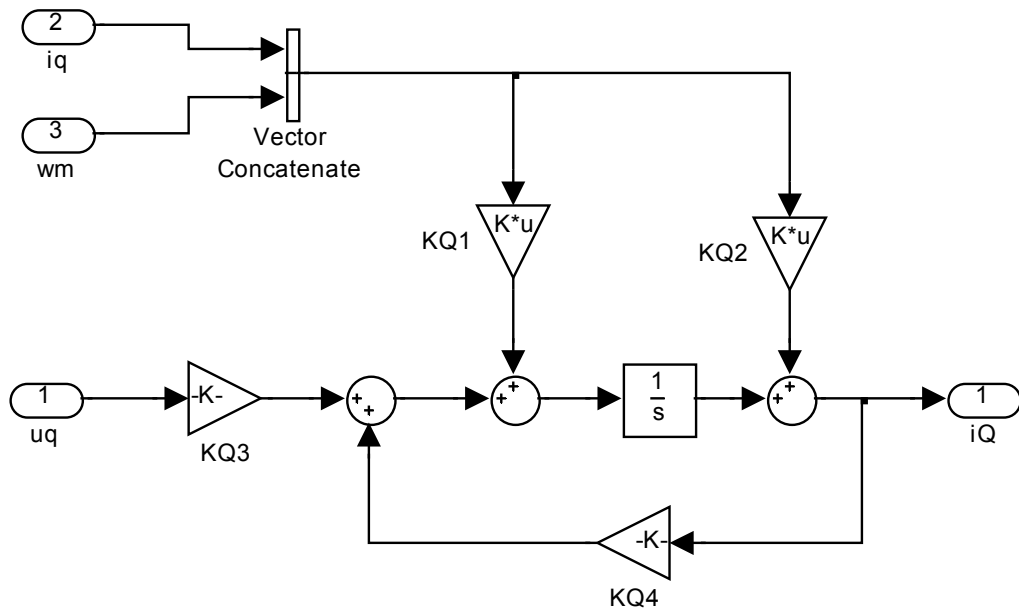


Рис. 3.20. Комп'ютерна модель спостерігача Люенбергера для змінної i_Q .

3.3 Комп'ютерне моделювання роботи системи автоматичного керування рухом тягових установок

3.3.1. Технологія комп'ютерного моделювання та опис базової моделі. Для визначення ефекту від застосування сигналів керування (2.59), (2.61), (2.65), (2.70), (2.75), (2.79), (2.83), (2.85) скористаємось розробленими в даному розділі роботи комп'ютерними моделями САК швидкістю руху тягових установок.

В якості базової моделі для порівняння була обрана САК рухом тягової установки з лінійними регуляторами струму та швидкості, комп'ютерна модель якої зображена на рис. 3.21 [105].

Комп'ютерне моделювання роботи САК проводилось для двох випадків:

- для базової моделі САК тягової установки з лінійними регуляторами струму та швидкості;
- для розробленої в роботі моделі САК тягової установки з релейними регуляторами струму та швидкості.

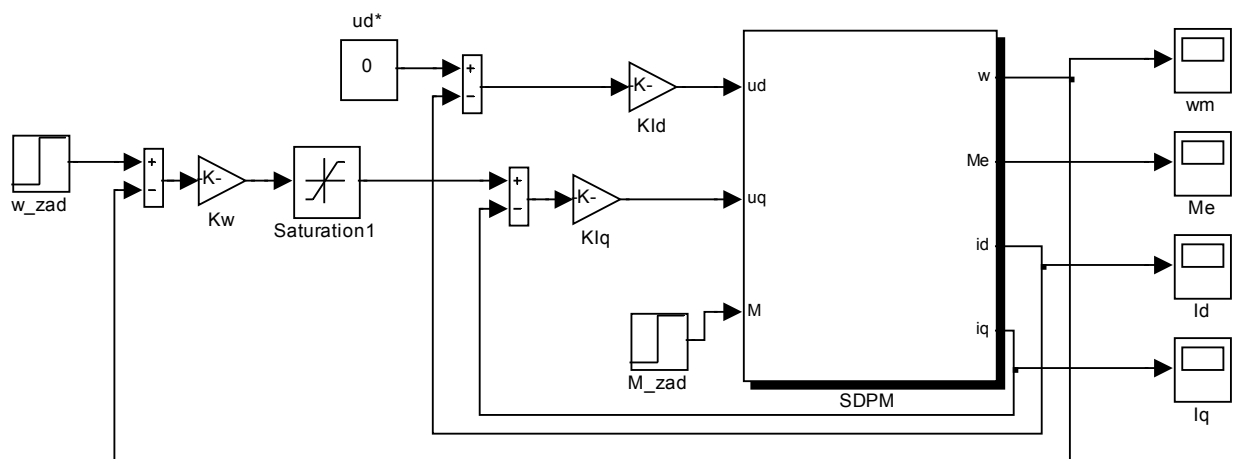


Рис. 3.21. Комп'ютерна модель базової САК з лінійними регуляторами струму та швидкості

Розроблені комп'ютерні моделі дозволяють розраховувати та запам'ятовувати значення параметрів тягової установки, що дало змогу провести їх подальшу обробку та представити їх у вигляді графіків.

3.3.2. Результати комп'ютерного моделювання роботи САК рухом тягової установки СДПМ без пускових обмоток. Результати комп'ютерного моделювання роботи САК тягової установки з СДПМ без пускових обмоток наведені у вигляді графіків на рис. 3.22 – 3.26.

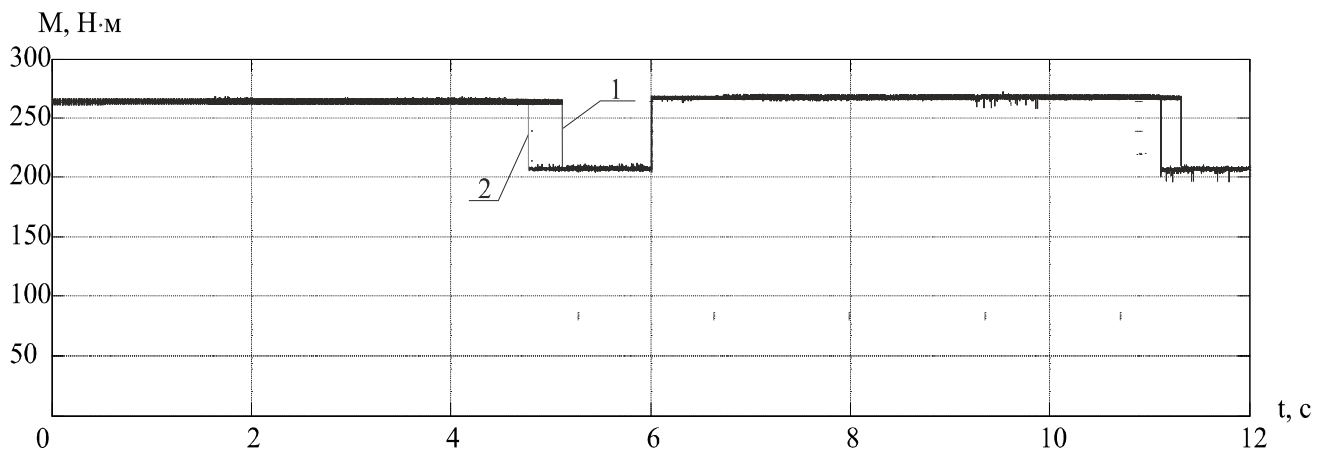


Рис. 3.22. Графіки зміни моменту тягової установки

1 – базова модель САК; 2 – розроблена модель САК

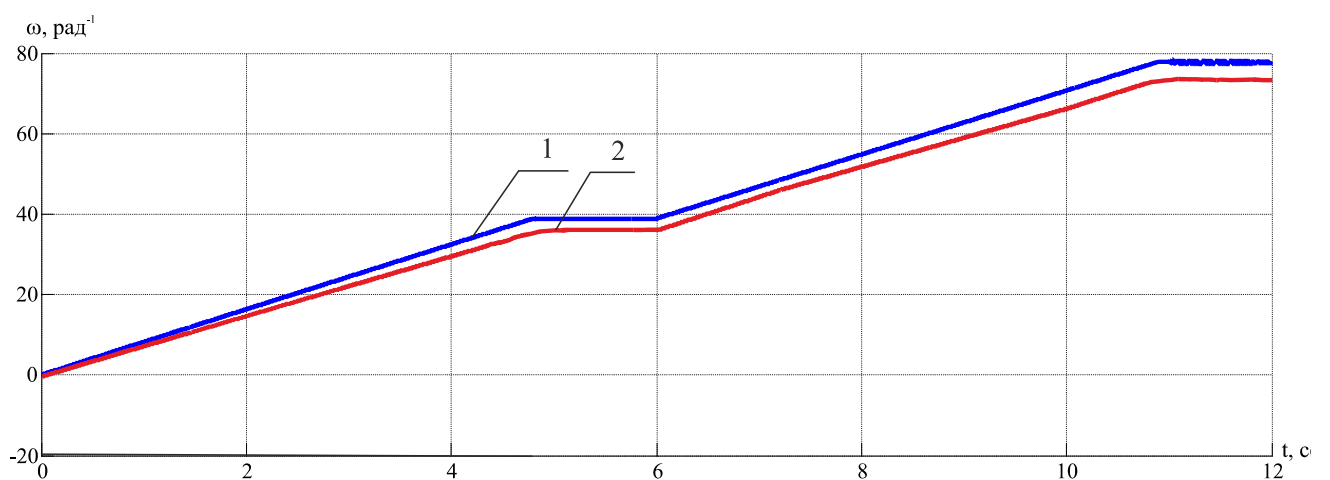


Рис. 3.23. Графіки зміни швидкості обертання ротора СДПМ

1- розроблена модель САК; 2 – базова модель САК

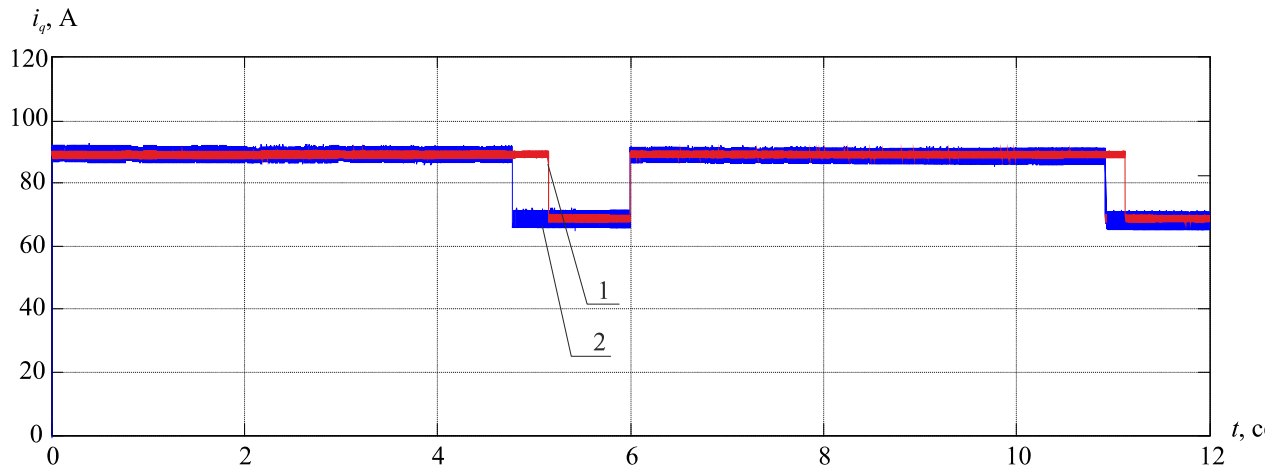


Рис. 3.24. Графіки зміни струму i_q для розробленої моделі САК

1 – базова модель САК; 2 – розроблена модель САК

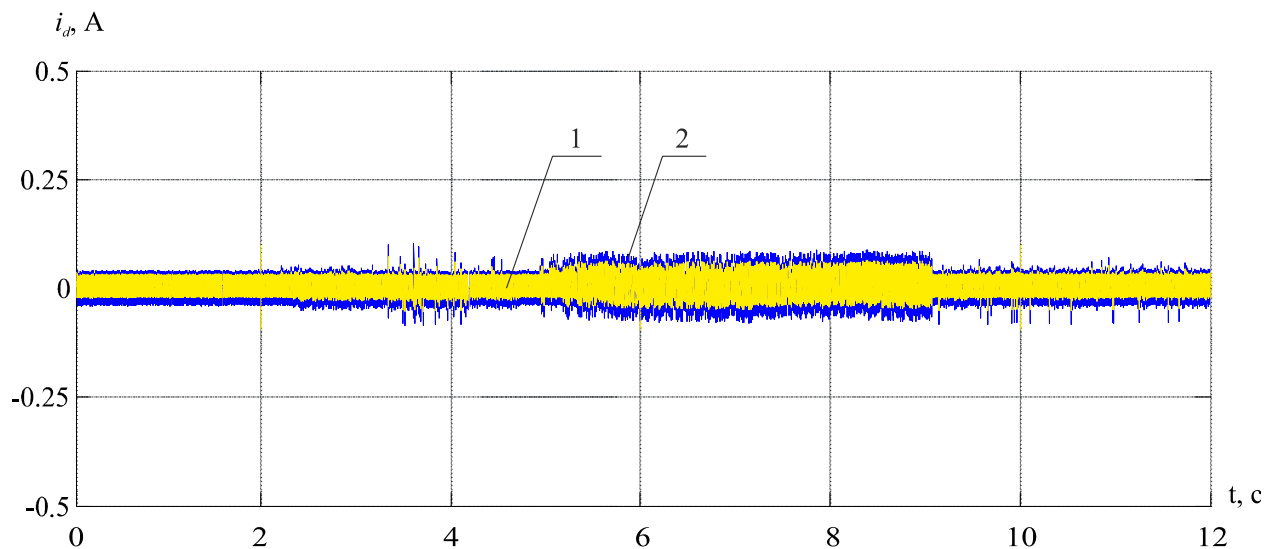


Рис. 3.25. Графіки зміни струму i_d для 1- розробленої та 2- базової моделей САК

Як видно з рис. 3.23, тривалість перехідного процесу зміни швидкості у випадку запропонованої в роботі моделі виявилась на 14 % (0,4 с) меншою, ніж для базової моделі. До того ж, як видно з рис. 3.23, розроблена система, на відміну від базової, володіє астатизмом відносно моменту навантаження.

3.3.3. Результати комп'ютерного моделювання роботи САК рухом тягової установки на основі СДПМ з пусковими обмотками. Результати комп'ютерного моделювання роботи САК електроприводом на основі СДПМ без пускових обмоток наведені у вигляді графіків на рис. 3.26 – 3.29.

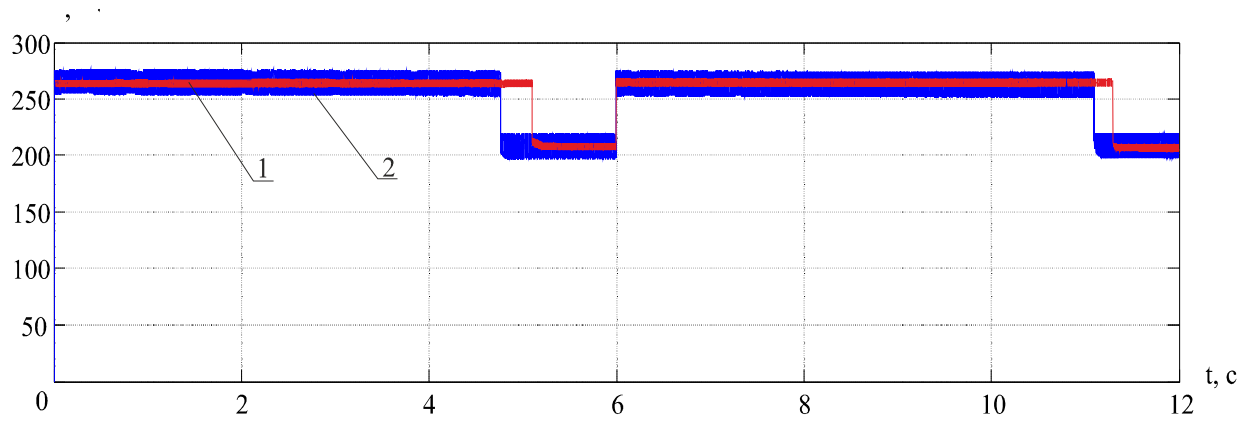


Рис. 3.26. Графіки зміни моменту для розробленої моделі САК

1- розроблена модель САК; 2 – базова модель САК

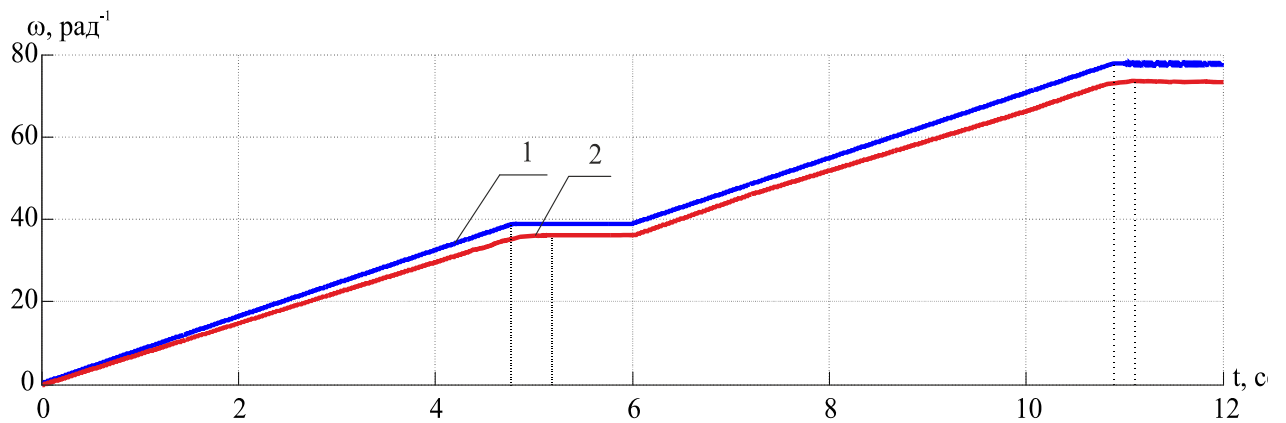


Рис. 3.27. Графіки зміни швидкості обертання ротора тягової установки

для 1- розробленої та 2- базової моделі САК

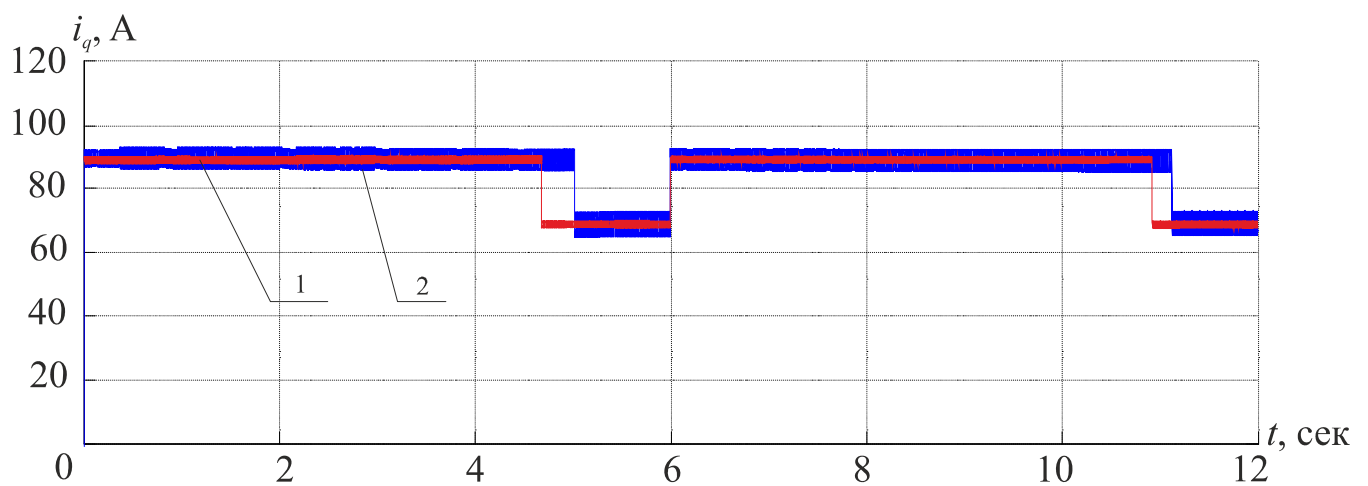


Рис. 3.28. Графіки зміни струму i_q для 1- розробленої та 2- базової моделі

САК

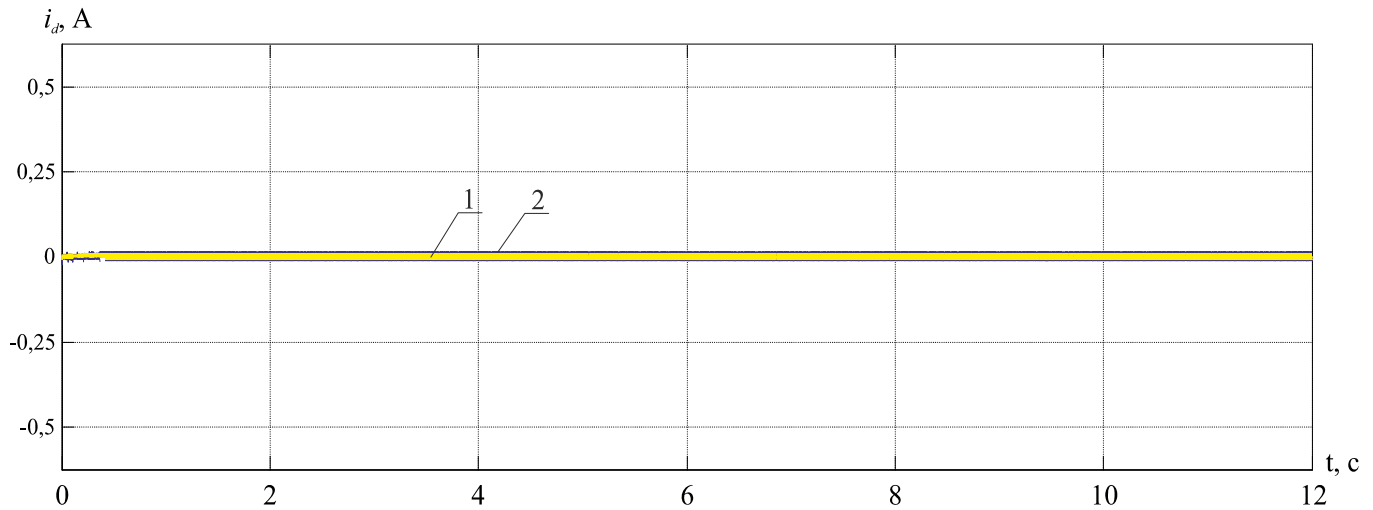


Рис. 3.29. Графіки зміни струму i_d для розробленої (1) та базової (2) моделей САК

Як видно з рис. 3.27, тривалість перехідного процесу зміни швидкості у випадку запропонованої в роботі моделі виявилась на 13,4 % (0,42 с) меншою, ніж для базової моделі. До того ж, як видно з рис. 3.27 розроблена система, на відміну від базової, володіє астатизмом відносно моменту навантаження.

За результатами моделювання проведено статистичну обробку результатів моделювання для базової та розробленої моделі, результати якої наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Результати статистичної обробки по варіантах моделювання, що розглядалися

№ з/п	Параметри	Математичне очікування, M	Середньоквадратичне відхилення, σ
1	2	3	4
Базова модель САК			
1.	i_d А	0,015	0,012

продовження таблиці 3.1.

1	2	3	4
2.	i_q , А	76,72	5,93
3.	ω , рад ⁻¹	37,61	0,071
4.	M , Н·м	250,26	10,71
Розроблена модель САК			
5.	i_d , А	0,012	0,008
6.	i_q , А	78,29	2,97
7.	ω , рад ⁻¹	38,77	0,066
8.	M , Н·м	257,99	9,01

Статистична обробка результатів моделювання САК тяговою установкою (табл. 3.1) показала, що статична похибка швидкості обертання ротору (ω) відносно заданого сигналу – 39 рад⁻¹, в базовій моделі САК складає 3,6 %, а в розробленій – 0,6 %. Крім того, пульсації струмів i_d , i_q та моменту M в при використанні базової моделі САК більше ніж в розробленій моделі САК тягової установки на 33,34 %, 49,9 % та 12,92 % відповідно. Це свідчить про значну перевагу запропонованої в роботі САК швидкістю руху тягової установки.

Проведена техніко-економічна оцінка ефективності використання САК тягової установки, результати якої наведені в додатку Б також засвідчила про більшу ефективність запропонованої в роботі САК швидкістю руху тягової установки в порівнянні з існуючими.

Висновки до розділу

1. Розроблені на основі знайдених оптимальних релейних законів керування структурні схеми САК дозволяють створити комп'ютерні імітаційні моделі, які дають змогу проводити аналіз режимів роботи запропонованих САК тягових установок з СДПМ без пускових обмоток та СДПМ з пусковими обмотками.

2. Застосування спостерігача Люенбергера дозволило провести оцінку значень змінних стану i_D та i_Q для моделі САК тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками, що не піддаються безпосередньому вимірюванню з допомогою датчиків.

3. Аналіз ефекту від застосування запропонованих в роботі оптимальних релейних сигналів керування тяговою установкою на розроблених комп'ютерних моделях показав, що при застосуванні запропонованих САК тривалість перехідного процесу у випадку СДПМ без пускових обмоток виявилась на 14 % меншою в порівнянні з базовою САК, а у випадку СДПМ із пусковими обмотками – на 13,4 % меншою. До того ж розроблені САК тягових установок володіють астатизмом відносно моменту навантаження.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВОЮ УСТАНОВКОЮ

Для перевірки працездатності, а також для експериментального підтвердження отриманих в роботі теоретичних результатів та результатів математичного моделювання роботи САК тяговою установкою з СДПМ необхідно вирішити наступні завдання:

1. Розробити принципову схему та макет мікропроцесорної САК тягової установки, в основу роботи якої покладені розроблені структурні схеми САК та сигнали оптимального релейного керування.
2. Розробити лабораторний стенд для експериментального дослідження роботи запропонованої САК для тягової установки з СДПМ без пускових обмоток.
3. Провести експериментальні дослідження для визначення параметрів тягової установки в динамічних та статичних режимах з метою визначення економічної ефективності роботи розробленої САК.

Вирішенню цих питань присвячений четвертий розділ дисертації.

4.1 Практична реалізація системи автоматичного керування тяговою установкою

За результатами проведених досліджень було визначено структуру САК електроприводом на основі СДПМ та визначено сигнали оптимального релейного керування, що підлягають практичній реалізації. Практичну реалізацію САК швидкістю руху тягової установки на основі СДПМ було проведено для двигуна без пускових обмоток, як такого, що знайшов

найбільше розповсюдження в електроприводах тягових установок (контактних електровозів).

Функціональна схема САК швидкістю руху тягової установки зображена на рис. 4.1.

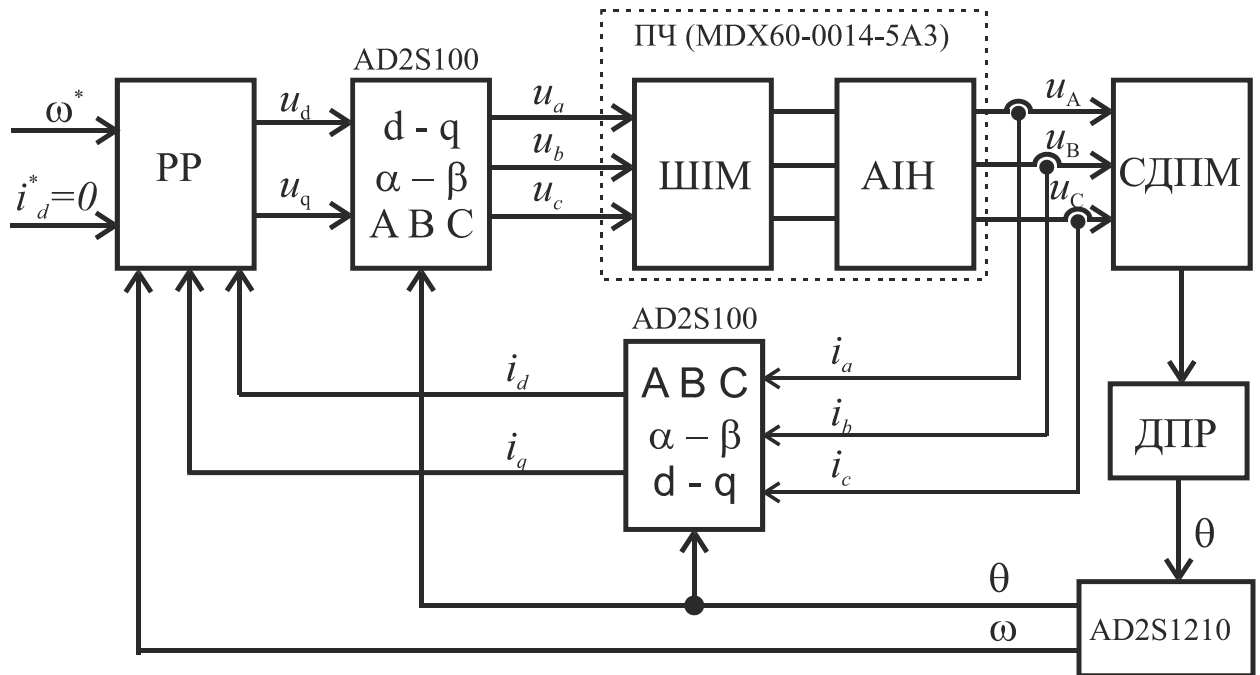


Рис. 4.1. Функціональна схема САК швидкістю руху тягової установки

На рис. 4.1: PP – блок керування;

ШИМ – блок широтно-імпульсної модуляції;

АІН – автономний інвертор напруги;

ДПР – датчик положення ротора;

ПЧ – перетворювач частоти.

Серед усього різноманіття апаратних засобів промислової автоматизації (промислові комп'ютери, програмовані логічні контролери, однокристальні МК) для апаратної реалізації САК електроприводом на основі СДПМ без пускових обмоток було обрано спеціалізований мікроконтролер Motorola HC908MR32, який призначений для використання в САК електроприводів.

Даний мікроконтролер базується на ядрі з малим споживанням енергії (CPU 12), яке має розширений набір інструкцій HC 9 на 16/32-бітовому рівні. Стек переривань і програмна модель ідентична HC 9. Він включає 64 нові інструкцій, 20-бітовий арифметико-логічний пристрій, чергу інструкцій і розширену індексну адресацію. Через нові інструкції CPU і сторінкову адресацію пам'яті розробники мають доступ до більш ніж 4 Мб програмної пам'яті і 1 МБ пам'яті даних. Архітектура HC 9 оптимізована для мов високого рівня (HNL) та швидкісних математичних операцій. Властивості HNL можуть підвищити продуктивність програми за рахунок зростання ефективності машинного коду, забезпечуючи зниження на 20-30% розміру програми в порівнянні з CPU HC8. Здатність HC 12 до швидкого виконання математичних операцій, в порівнянні з найшвидшими 16-бітовими мікроконтролерами, дає переваги при реалізації систем реального часу з інтенсивним керуванням. Інтегровані інструкції можуть спростити програмування, зменшити розмір машинного коду й, у певних випадках, забезпечують більш швидку роботу програми. Мікроконтролер складається з CPU 9 і Lite Integration Module (LIM) і набору вбудованих периферійних модулів, включаючи численні таймери, аналогово-цифрові перетворювачі, послідовні комунікаційні модулі, пам'ять (Flash EEPROM, EEPROM, RAM) і дискретні входи/виходи. LIM містить у собі мультиплексорну шину, монітор реального часу й вбудований засіб налагодження Background Debug Mode. Монітор реального часу має сторожовий таймер, монітор тактового генератора й таймер періодичного переривання. Background Debug Mode забезпечує читання й запис у регістри системи й пам'ять у реальному часі без використання інструкцій мікроконтролера.

Мікроконтролери сімейства 68HC9 мають модульну структуру, яка реалізується з набору окремих функціональних модулів, взаємодіючих за допомогою стандартизованої міжмодульної шини.

Набір функціональних модулів містить у собі:

- 8-канальний таймерний модуль;
- модуль формування ШІМ-сигналів з 2 або 4 вихідними каналами;
- модуль послідовного обміну, що включає один або два асинхронні інтерфейси (SCI) і синхронний інтерфейс (SPI);
- модуль інтерфейсу CAN-шини;
- модуль послідовного обміну по протоколу J1850;
- багатоканальний АЦП.

Система команд CPU 9 є розширеним набором команд сімейства 68HC11 і містить у собі команди пересилання даних, команди арифметичних і логічних операцій, порівняння й зрушень, бітові команди, команди керування програмою й керування процесором, а також групу додаткових команд для обробки табличних даних.

Для керування двигуном було обрано силовий перетворювач частоти (ПЧ) марки SMV ESV 373N04TXB фірми Lenze (Німеччина) із проміжною ланкою постійного струму й векторним законом керування. зовнішній вигляд якого зображено на рис. 4.2.

У таких пристроях змінна напруга U із частотою f надходить на вхід випрямляча. Випрямлена напруга згладжується фільтром і надходить на вхід автономного інвертора, що має вихідну напругу U_2 із частотою f_2 . У цих ПЧ частота вихідної напруги не залежить від частоти живильної мережі й може бути як більше, так і менше цієї частоти. Основним вузлом у ПЧ даного типу є автономний або незалежний інвертор, який перетворює випрямлену напругу в трифазну напругу регульованої частоти. Для реалізації векторного керування без генераторного гальмування необхідний інвертор напруги (АІН).

Перевагою ПЧ із ланкою постійного струму є можливість регулювання частоти в напрямку збільшення, так і зменшення частоти живильної мережі змінного струму. Верхня межа зміни частоти обмежується максимально

допустимою швидкістю двигуна й максимально допустимою частотою комутації вентилів.



Рис. 4.2. Перетворювач частоти SMV ESV373N04TXB

Нижня межа частоти обмежується дискретністю обертання векторів напруги й струму інвертора, що можуть призводити до нерівномірності обертання ротора. Однак ПЧ із широтно-імпульсним інвертором напруги, що мають близький до синусоїдальної форми струму і напруги, здатні забезпечити великий діапазон зниження швидкості.

Цей трьохфазний інвертор має діапазон регулювання напруги 0 – 380 В, діапазон регулювання частоти 0 – 150 Гц. Потужність двигуна, що підключається 37 кВт, номінальний струм 58 А, наявність входу для сигналів з датчика положення ротора. Крім цього в ньому є достатня кількість захисних функцій як самого ПЧ так і двигуна. Технічні характеристики перетворювача частоти ESV373N04TXB наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Технічні характеристики перетворювача частоти
ESV373N04TXB

Група параметрів	Назва параметру	Значення
Вихід	Число фаз	3
	Напруга, В	не більш $U_{\text{ВХ}}$
	Повна вихідна потужність, кВа	37.5
	Номінальний вихідний струм, А	75
	Обмеження струму, %	155% $I_{\text{НОМ}}$
	Частота ШІМ, кГц	4/8/12/16
	Діапазон частоти обертання / дозвіл, об/хв	-6000.. +6000 об/хв / 0,2
Вхід	Число фаз	3
	Напруга живильної мережі, В	380-10%...500+10%
	Частота мережі, Гц	50...60±5%
	Номінальний струм мережі, А	85

У САК, що проектується, ланкою зворотного зв'язку є датчик положення ротора (ДПР). У ряді випадків для керування комутатором двигуна необхідно застосовувати ДПР, що видає безперервні сигнали, що змінюються за гармонійним законом, з відповідним фазовим зрушенням. Це зрушення залежить від числа фаз двигуна.

Безперервний сигнал ДПР, що змінюється за гармонійним законом, що необхідний для формування струмів у фазах двигуна, це забезпечує більшу рівномірність електромагнітного моменту.

Для здійснення прямого та зворотного перетворень Кларка і Парка було застосовано спеціалізовану інтегральну мікросхему AD2S100 фірми Analog Device. Превагами даної мікросхеми є її висока швидкодія та точність обчислень, а також порівняно низька вартість.

В якості дешифратора сигналу від ДПП було використано мікросхему AD2S1210 фірми Analog Device. Особливістю даної мікросхеми є можливість отримання на її виходах не лише значення кута повороту ротора Θ , а і значення кутової швидкості ω .

4.2 Експериментальні дослідження системи автоматичного керування тяговою установкою

Метою здійснення експериментальних досліджень роботи розробленої САК є визначення електричних параметрів тягової установки в динамічних та статичних режимах з метою перевірки енергетичної ефективності розробленої САК швидкістю руху тягової установки з СДПМ в лабораторних умовах, а також доведення працездатності розробленої САК.

Для експериментального дослідження роботи запропонованої САК було розроблено лабораторний стенд, зовнішній вигляд якого зображено на рис. 4.3.

Експериментальний стенд призначений для дослідження роботи частотно-керованого вентильного електродвигуна на основі СДПМ. Стенд дозволяє проводити дослідження статичних та динамічних характеристик електроприводу на основі СДПМ без пускових обмоток.

До складу лабораторного стенду входять наступні елементи:

- вентильний двигун з постійними магнітами;
- блок керування;
- перетворювач частоти;
- гальмівний резистор;
- вимірювальні прилади (цифровий аналізатор мережі);
- комутаційна апаратура (автоматичний вимикач, магнітний пускач).
- програмне забезпечення до цифрового аналізатора DMK-32.



Рис. 4.3 Зовнішній вигляд лабораторного стану для експериментального дослідження САК рухом тягової установки

На рис. 4.3: 1 – перетворювач частоти; 2 – цифровий аналізатор ДМК-32; 3 – блок керування.

Для виміру електричних параметрів був використаний аналізатор параметрів мережі ДМК-32, зовнішній вигляд якого зображено на рис. 4.4.

Аналізатор параметрів мережі ДМК-32 призначений для виміру контролю збереження й передачі на комп'ютер (RS-232/485) параметрів одно-, двох- трифазних мереж з нейтраллю й без неї. Прилад вимірює напругу, струм, потужності (активну, реактивну і повну), коефіцієнт потужності, частоту, гармоніки струму й напруги.



Рис. 4.4. Зовнішній вигляд аналізатора параметрів мережі DMK-32

Для дослідження електричних сигналів у часовій області шляхом візуального спостереження графіка сигналу на екрані, а також для виміру амплітудних і часових параметрів сигналу за формою графіка використовується спеціалізоване програмне забезпечення DMKSoft.

4.3 Аналіз результатів експериментальних досліджень системи автоматичного керування тяговою установкою

Результати експериментальних досліджень розробленої САК приведені на рисунках 4.5 – 4.6.

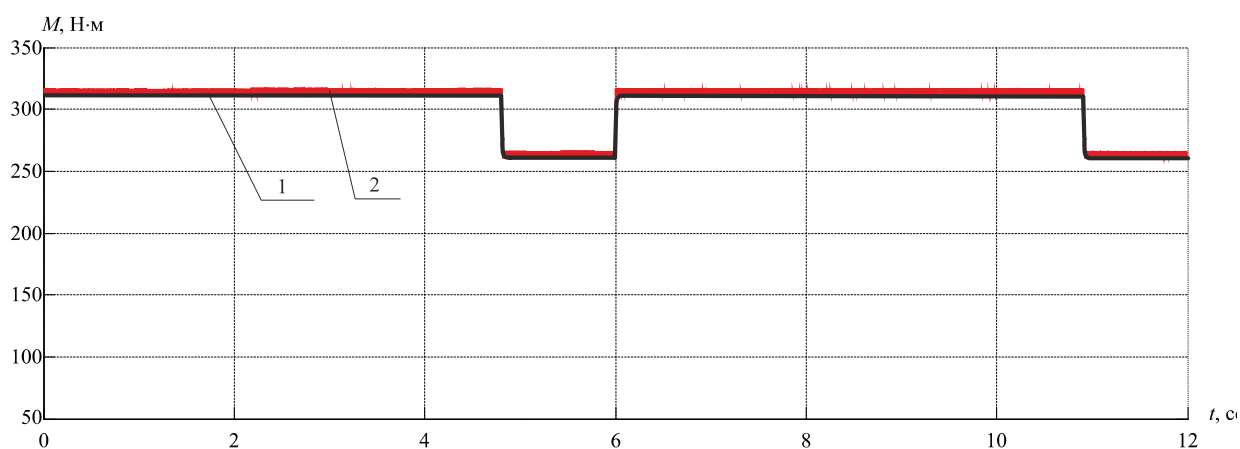


Рис. 4.5. Експериментальні графіки зміни моменту на валу СДПМ тягової установки

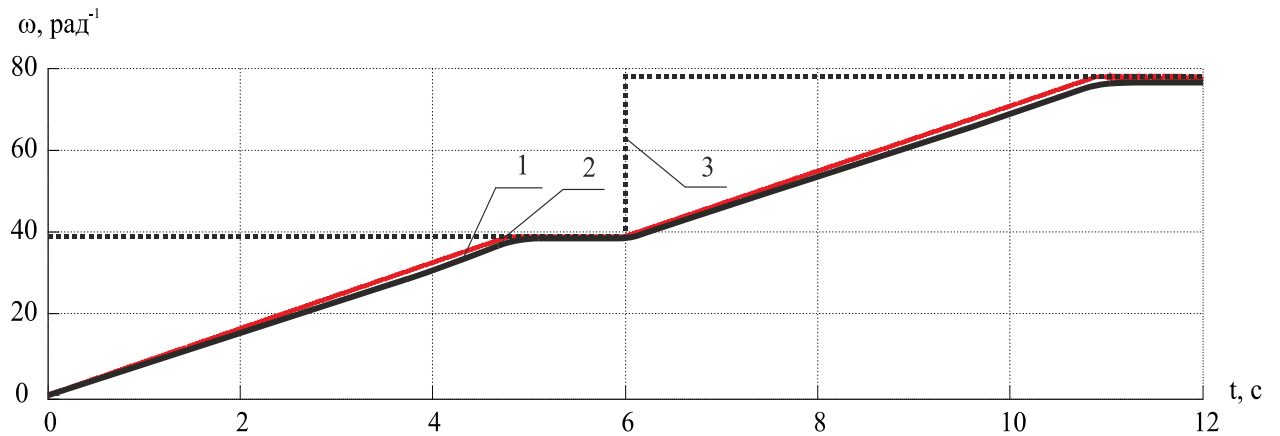


Рис. 4.6. Експериментальні графіки швидкості обертання ротору СДПМ отримані при моделюванні (2), на експериментальній моделі (1) та заданого сигналу (3).

На рис. 4.7. представлені отримані експериментальні графіки струмів, які протікають по обмотках статора СДПМ тягової установки.

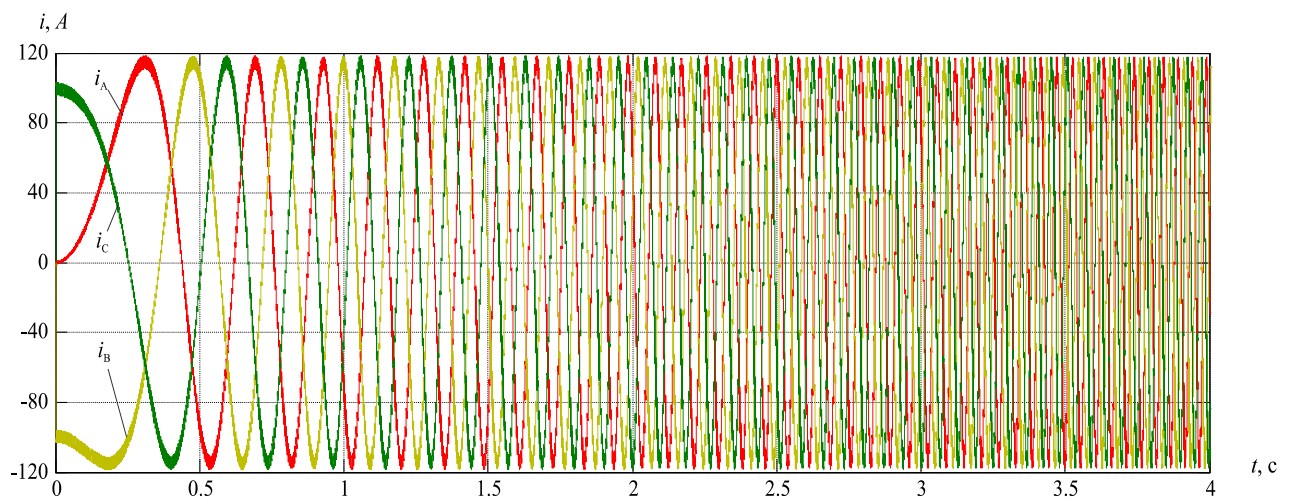


Рис. 4.7. Експериментальні графіки струмів, що протікають в статорі СДПМ тягової установки

Для порівняння результатів отриманих на експериментальній та комп'ютерній моделі було виконано перетворення Кларка і Парка струмів трифазної системи в ортогональну систему координат $d-q$. В трифазній системі живлення при симетричному навантаженні струми в фазах однакові,

тому проведемо перетворення Кларка і Парка на прикладі фази А. На рис. 4.8. приведений графік зміни струму у фазі А.

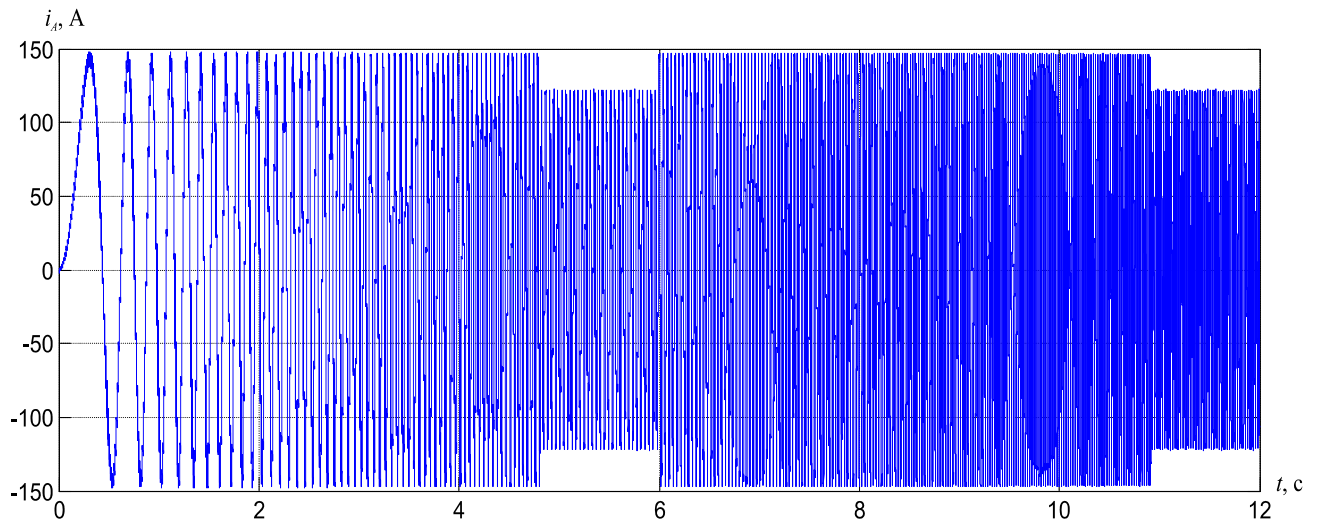


Рис. 4.8. Експериментальний графік струму i_A , що протікає в статорі СДПМ тягової установки

На рисунках 4.9-4.10 приведені графіки струмів i_d та i_q отримані в результаті комп'ютерного моделювання та на експериментальній моделі.

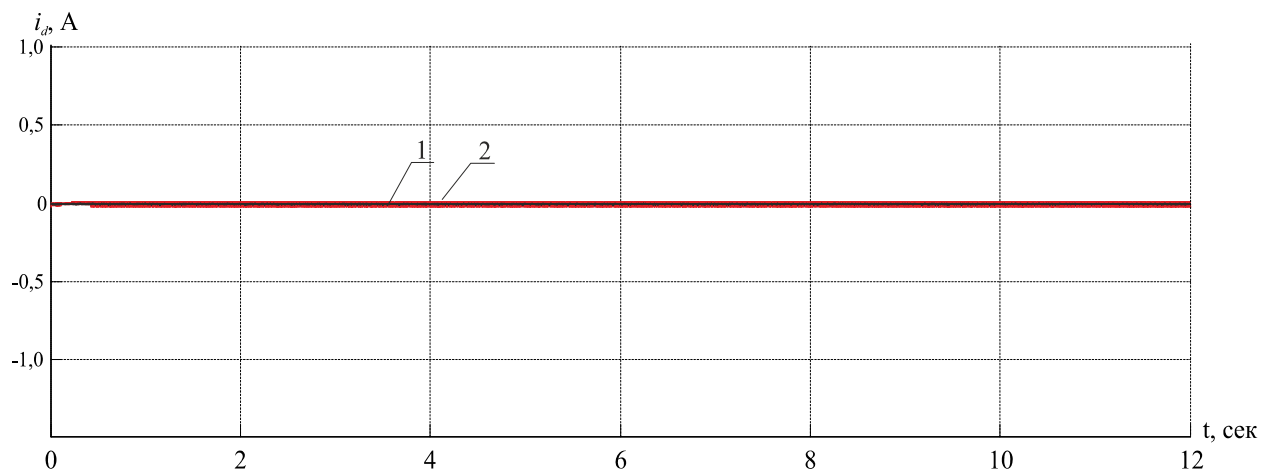


Рис. 4.9. Експериментальні графіки струму i_d отримані при моделюванні (2), на експериментальній моделі (1).

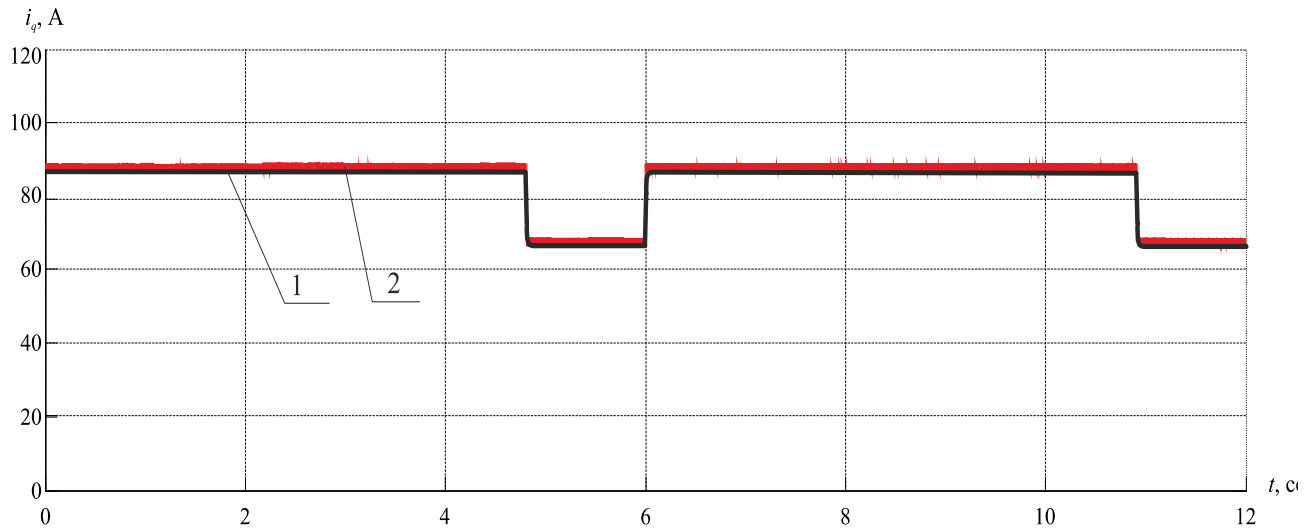


Рис. 4.10. Експериментальні графіки струму i_q отримані при моделюванні (2), на експериментальній моделі (1).

Для оцінки отриманих результатів моделювання проведено статистичну обробку результатів моделювання для експериментальної та розробленої моделі. Статистична обробка результатів моделювання полягала у визначенні, математичного очікування, середньоквадратичного відхилення (СКВ). Результати статистичної обробки експериментальних досліджень наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Результати статистичної обробки експериментальних досліджень

№ з/п	Параметри	Математичне очікування, M	Середньоквадратичне відхилення, σ
1	2	3	4
Експериментальна модель САК			
1.	i_d , А	0,011	0,0077
2.	i_q , А	77,16	2,68
3.	ω , рад ⁻¹	38,61	0,061
4.	M , Н·м	250	8,71

продовження таблиці 4.2.

1	2	3	4
Комп'ютерна модель САК			
5.	i_d , А	0,012	0,008
6.	i_q , А	78,29	2,97
7.	ω , рад ⁻¹	38,77	0,066
8.	M , Н·м	257,99	9,01

Статистична обробка результатів моделювання САК тяговою установкою (табл. 3.1) показала, що статична похибка швидкості обертання ротору (ω) відносно заданого сигналу – 39 рад⁻¹, в експериментальній моделі САК складає 1 %, а в розробленій - 0,6 %, різниця в отриманих результатах складає менше 0,5%. Аналіз струмів i_d , i_q і моменту M показав, що різниця між и результатами експерименту та комп'ютерного моделювання складає 4,25%, 2,5% та 3,1 % відповідно. Результати аналізу експериментальних досліджень в цілому співпадають із результатами комп'ютерного моделювання, що підтверджує працездатність розроблених САК швидкістю руху тягових установок.

Висновки до розділу

1. Розроблені в роботі структурні схеми САК тягової установки на основі СДПМ дозволили створити принципову схему та макет мікропроцесорної САК електроприводом на основі СДПМ без пускових обмоток, що, в свою чергу дало змогу провести експериментальні дослідження та підтвердити працездатність запропонованих в роботі САК.

2. На основі запропонованих структурних схем САК швидкістю руху тягових установок на основі СДПМ без пускових обмоток та макету мікропроцесорної САК було створено експериментальний стенд, що дало змогу провести експериментальні дослідження з метою перевірки працездатності САК та експериментальне підтвердження проведених у роботі теоретичних досліджень.

3. В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що розбіжність між даними, отриманими шляхом комп'ютерного моделювання та експериментальними даними лежить у межах 2,5 %...4,25 %. Це свідчить про правильність проведених в роботі теоретичних досліджень та працездатність запропонованих САК швидкістю руху тягових установок з СДПМ.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі одержаних теоретичних і практичних результатів розв'язана актуальна наукова задача автоматизації керування тяговими установками СДПМ з метою підвищення їх енергоефективності функціонування за рахунок розробки нових алгоритмів керування та створення оптимальних САК.

Виконані у дисертаційній роботі дослідження дозволяють сформулювати такі висновки:

1. Аналіз особливостей використання двигунів постійного та змінного струмів виявив їх конструктивні недоліки та низьку енергоефективність двигунів, що використовуються в шахтних електровозах. Тому, для підвищення енергоефективності тягових установок запропоновано використання СДПМ, що нівелюють ці недоліки.

2. Огляд відомих методів автоматичного керування швидкістю руху тягових установок з СДПМ показав, що одним із перспективних шляхів створення високоякісних систем керування тяговими установками є застосування оптимальних релейних регуляторів, що працюють в ковзному режимі.

3. В результаті проведеного аналізу методів вирішення задачі синтезу САК швидкістю руху тяговими установками встановлено, що найдоцільнішим підходом до синтезу оптимальних релейних сигналів керування для тягових установок з СДПМ є підхід, заснований на використанні властивостей функцій перемикання оптимальних керуючих діянь. За такого підходу вирішення задачі аналітичного конструювання оптимальних регуляторів значно спрощується через відсутність необхідності розрахунку коефіцієнтів функції Ляпунова.

4. Знайдені математичні моделі динаміки руху тягової установки для найпоширеніших варіантів конструктивного виконання СДПМ дозволяють синтезувати оптимальні за точністю сигнали керування тягових установок.

5. Отримано функції перемикання для СДПМ, що дозволило реалізувати оптимальне керування релейними регуляторами струмів і швидкості та підвищити швидкодію роботи САК рухом тягової установки.

6. Реалізація САК швидкістю руху тягової установки з СДПМ на основі використання властивостей функції перемикання для релейного регулювання струмів та швидкості дозволила зменшити витрати електроенергії на 14,7 % за рахунок скорочення тривалості перехідного процесу для СДПМ на 13,4 %.

7. Впровадження фізичної моделі САК тяговими установками дозволить підвищити енергоефективність за рахунок зменшення втрат електроенергії та збільшення тривалості ремонтного циклу. Очікуваний розрахунковий економічний ефект становить 7568 грн. на рік, а термін окупності - 0,91 року.

8. Результати дисертаційного дослідження впроваджено на Інгульській шахті ДП «Східний гірничо-збагачувальний комбінат» та використано для автоматизації процесу керування швидкістю руху шахтного електровозу. Основні теоретико-методичні і практичні результати використовуються в навчальному процесі КНТУ, зокрема під час викладання курсів: «Автоматизований електропривод» та «Типовий електропривод».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Синчук О.Н. Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование: учебник/ О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, В.Л. Дебелий, Л.Л. Дебелий; под ред. доктора технических наук, профессора О.Н. Синчука. – Кривой Рог- Донецк: ЧП Щербатых А.В., 2015 – 428 с.
2. Удовенко О.О. Енергозберігаюча система тягового електроприводу рудникового акумуляторного електровозу: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 “Електротехнічні комплекси та системи”/ О.О. Удовенко. – Харків, 2004. – 19 с.
3. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2008. 298 с.
4. Терехов В. М. Системы управления электроприводов/ В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова.– М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 301 с.
5. Соколовский Г. Г.. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием/ Г.Г. Соколовский.– М.: АСАДЕМА, 2006.265 с.
6. Новые системы электропривода на синхронных электродвигателях [Электронный ресурс] : ООО «Орион–мотор» . — Режим доступа. : <http://www.orionmotor.narod.ru/rasvitie.htm>.
7. Аракелян А.К. Вентильные электрические машины в системах регулируемых электроприводов: Учеб. пособие для вузов: В 2 т. Т.1 / А.К. Аракелян, А.А .Афанасьев. — М.: Высш. шк., 2006. — 546 с.: ил.
8. Pragasan P., Krishnan R. Modelling of Permanent Magnet Motor Drives/ P. Pragasan, R. Krishnan// IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 35, No. 4, November 1988.
9. Krøvel Ø. Design of Large Permanent Magnetized Synchronous Electric Machines/ Øystein Krøvel //Ph.D thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, pp 6-10, 14-15 Feb 2011

10. Голубев А.Н. Многофазный синхронный электропривод /А.Н. Голубев, А.А. Лапин// Электричество. - 2005, № 2, с. 43-49.
11. Kane D. M. and M. R. Warburton, "Integration of permanent magnet technology / D. M. Kane and M. R. Warburton//IEEE Power Engineering Society Summer Meeting: IEEE, 2002.
12. Dorr G. Trends and Developments of Electrical Machines in the 21st Century/ G. Dorr// in ICEM Bruges, Belgium: ICEM, 2002.
13. Дубенский А.А. Бесконтактные двигатели постоянного тока/ А. А. Дубенский. – Москва: Энергия, 1967.
14. Шидловский А.К. Тиристорные преобразователи постоянного напряжения для низковольтного транспорта/ А.К. Шидловский, В.Б. Павлов. – Киев: Наукова думка, 1982.
15. Крайцберг М.И. Электропривод при автономном источнике энергии/ Крайцберг М.И. – М. : Энергия, 1966. – 224 с
16. Злакоманов В.В. Взаимодействие динамических систем с источником энергии/ В.В. Злакоманов, Б.С. Яковлев. –М.: Энергия, 1980. – 176 с
17. Шрейнер Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами/ Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитренко. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.
18. Загорский А.Е. Электродвигатели переменной частоты/ А.Е. Загорский. – М.: Энергия, 1975.–152 с.
19. Гусев Б.Я. Асинхронные двигатели для тиристорного частотно–регулируемого привода/ Б.Я. Гусев, Б.В. Белов, С.В. Астраханцев // Электротехническая промышленность. Электрические машины, 1975, №1(47). С. 3–6.
20. McLean G.W. Performance and design of induction motors with square–wave excitation/ G.W. McLean, G.F. Nix, S.R. Alwash// IEE Proc, 1969, vol. 116, №8. — P.1405–1411.

21. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты/ Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000.
22. Регулируемые электродвигатели переменного тока: по материалам Всесоюз. науч.–техн. совещания/ [редкол.: Суворов Н.И. и др.]; Всесоюз. н.–и. проект.–конструкт. и технол. ин–т электромашиностроения. — Владимир: ВНИПТИЭМ, 1988. — 132 с.
23. Попович М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін. – К.: Либідь, 2005. – 680
24. Загорский А. Е. Управление переходными процессами в электрических машинах переменного тока/ А.Е. Загорский, Ю.Г. Шакарян. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 176 с
25. Tavner, P. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines [Text] / P. Tavner, L. Ran, J. Penman, H. Sedding. – Institution of Engineering and Technology (IET), 2008. – 304 p.
26. Бабичков А.М. Тяга поездов и тяговые расчеты/А.М. Бабичков, П.А. Гурский, А.П. Новиков. – М., «Транспорт», 1971. – 280 с.
27. Lutsenko, I. Optimal control of systems engineering. Development of a general structure of the technological conversion subsystem(part 2) [Text] / I. Lutsenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol. 1, Issue 2 (73). – P. 43–50.
28. Lutsenko, I. Identification of target system operations. Development of global efficiency criterion of target operations [Text] /I. Lutsenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol. 2, Issue 2 (74). – P. 35–40.
29. Егупов Н.Д. Методы класической и современной теории автоматического управления. Учебник в 3-х томах. Т.3: Методы современной теории автоматического управления/Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 748 с.

30. Мееров М.В. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности/М.В. Мееров. – М.:Наука, 1967. – 424 с.
31. Емельянов С.В. Бинарные системы автоматического управления /С.В. Емельянов. – М.:МНИИПУ, 1984. – 320 с.
32. Аносов Д.В. Об устойчивости положений равновесия релейных систем/ Д.В. Аносов// Автоматика и телемеханика, 1959, № 2. – С. 135 –149
33. Емельянов С.В. Теория систем с переменной структурой/ С.В. Емельянов – М.: Наука, 1970. – 336 с.
34. Цыпкин Я.З. Релейные автоматические системы/Я.З. Цыпкин. – М.:Наука, 1974. –576 с.
35. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления/В.И.Уткин. – М.:Наука, 1981. – 367 с.
36. Садовой А.В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами/ А.В. Садовой, Б.В. Сухинин, Ю.В. Сохина – Киев: ИСИМО, 1996. – 298 с.
37. Беллман Р. Динамическое программирование/ Р.Беллман. – М.: Иностр. лит., 1960. – 232 с.
38. Колесников А.А. Синергетическая теория управления/ А.А. Колесников. – М.: Энергоатомиздат, 1994.– 344 с.
39. Фурасов В.Д. Устойчивость движения, оценки и стабилизация/ В.Д. Фурасов. – М.: Наука, 1977. – 248 с.
40. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование/ А.А. Красовский. – М.: Наука, 1973. – 558 с.
41. Красовский А.А. Статистическая теория переходных процессов в системах управления/ А.А. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 240 с.
42. Красовский А.А. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными объектами/ А.А. Красовский, В.И. Буков, В.С. Шендрик. – М.: Наука, 1977. – 272 с.

43. Барбашин Е.А. Введение в теорию устойчивости/ Е.А. Барбашин. – М.: Наука, 1967. – 223 с.
44. Сурков В.В. Синтез и исследование квазиоптимальных релейных систем управления электроприводами: дис. д-ра техн. наук: 05.13.01/ Сурков Виктор Васильевич. ТГУ. – Тула, 2002. – 430 с.
45. Садовой А.В. Синтез и исследование оптимальных по точности систем управления электроприводами с низкой чувствительностью к широкому спектру дестабилизирующих факторов: – Дис. д-ра техн. наук. 05.09.03/ Садовой Александр Валентинович. – Днепродзержинск, 1992. – 501 с.
46. Красовский А.А. Аналитическое конструирование контуров управления летательными аппаратами/ А.А. Красовский. – М.: Машиностроение, 1969. – 240 с.
47. Уонхэм Д., Джонсон С. Оптимальное релейное управление при квадратичном показателе качества. Теоретические методы расчетов. – Труды американского общества инженеров механиков/[Д. Уонхэм, С. Джонсон. Серия Д. Пер. с англ]. – М.: Мир, 1964. № 1. – С. 145 – 156.
48. Красовский А.А. Интегральные оценки моментов и синтез нелинейных регуляторов./ А.А. Красовский // Автоматика и телемеханика, 1967, № 12. – С. 26–37.
49. Барбашин Е.А. Функции Ляпунова/ Е.А. Барбашин. – М.: Наука, 1970. – 240 с.
50. Зеленов А.Б. Применение метода аналитического конструирования регуляторов для синтеза оптимальной системы управления электроприводом/А.Б. Зеленов, В.И. Жиликов, А.В. Садовой.// Электричество, 1977, № 8. – С. 49–54.
51. Сурков В.В. Применение метода А.А. Красовского для синтеза агрегированных регуляторов./ В.В. Сурков // Материалы Международной конференции и Российской научной школы "Системные проблемы качества,

математического моделирования и информационных технологий. Москва–Сочи 2000 г. Часть 4. С. 12–13.

52. Сурков В.В. Синтез агрегированных оптимальных по точности быстродействующих регуляторов./В.В. Сурков// Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий: Материалы Российского научного симпозиума "Современные проблемы информатики и кибернетики". – Москва – Сочи, 2001 г.

53. Сурков В.В. Синтез агрегированных регуляторов методом А.А. Красовского по критерию обобщенной работы/ В.В. Сурков// Электрика. 2001, № 4. С. 25–32.

54. Сурков В.В. Синтез агрегированных регуляторов с квадратичным критерием качества от макропеременной объекта. / В.В. Сурков // Труды Всероссийской научно–практической конференции. Тула 25–26 мая 2000 г. С. 87–90.

55. Сурков В.В. Электромеханическое устройство сложения углов поворота/ В.В. Сурков, О.В. Колпаков// Динамика и функционирование электромеханических систем. Тула, 1987. С.74–78.

56. Осин И.Л. Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами/ И.Л. Осин, В.П. Колесников, Ф.М. Юферов. Энергия .М, 1976. – 231 с.

57. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины/А.А. Горев. – М.Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 552 с.

58. Казовский Е.Я. Переходные процессы в машинах переменного тока/Е.Я. Казовский. М., Изд–во АН СССР, 1962. – 624 с.

59. Башарин А.В. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов/ А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. - Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.

60. Данилевич Я. Б. Параметры электрических машин переменного тока/ Я. Б. Данилевич, В. В. Домбровский, Е. Я. Казовский М., «Наука», 1965. – 340 с.
61. Кононенко Е. В. Синхронные реактивные машины/Е. В. Кононенко. М., «Энергия», 1970. – 278 с.
62. Певзнер О. Б. Схема замещения и точная круговая диаграмма синхронной реактивной машины/ О. Б. Певзнер // Электричество, 1960, № 2. С. 47—48.
63. Постников И. М. Синхронные реактивные двигатели/ И. М. Постников, В. В. Ралле. Киев, «Техніка», 1970. – 148 с.
64. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями. Под ред. М. Г. Чиликина. М., «Энергия», 1971, 624 с.
65. Юферов Ф. М. Исследование синхронизирующих свойств СДПМ методом математического моделирования/ Ф. М. Юферов, И. Л. Осин, А. И. Сеницын //.— В кн.: Доклады научно–технической конференции по итогам НИР за 1968–1969 гг. Подсекция электрических машин. М., Изд. МЭИ, 1969. – С. 121–129.
66. Деев В.В. Тяга поездов/В.В. Деев, Г.А Ильин, Г.С. Афонин// Под ред. В.В. Деева. – М. Транспорт, 1987, 264 с.
67. Колесников А.А. Последовательная оптимизация нелинейных агрегированных систем управления / А.А. Колесников. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 160 с.
68. Бойчук Л.М. Синтез координирующих систем автоматического управления/ Л.М. Бойчук. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 160 с.
69. Бойчук Л.М. Структурный синтез нелинейных систем управления/ Л.М. Бойчук. М.: Энергия, 1971. - 113 с.
70. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Линейные модели/ П.Д. Крутько. - М.: Наука, 1987. - 304 с.
71. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели/ П.Д. Крутько. - М.: Наука, 1988. - 328 с.

72. Емельянов С. В., Коровин С.К. Новые типы обратных связей: управление при неопределенности С. В. Емельянов, С.К. Коровин. - М.: Наука, 1997. - 352 с.
73. Емельянов С.В. Бинарные системы автоматического управления/ С.В. Емельянов. - М.: МНИИПУ. 1984. - 320 с.
74. Алексеев В.М. Оптимальное управление/ В.М. Алексеев, В.С. Тихомиров, С.В. Фомин. - М.: Наука, 1979. - 430 с.
75. Андреев Ю.И. Управление конечномерными линейными объектами/ Андреев Ю.И. - М.: Наука, 1976. - 424 с.
76. Атанс М. Оптимальное управление/ М. Атанс, П. Фалб. - М.: Машиностроение, 1968.-764 с.
77. Габасов Р. Качественная теория оптимальных процессов/ Р. Габасов, Ф.М. Кирилова. М.: Наука, 1971. - 507 с.
78. Гурман В.И. Принцип расширения в задачах управления/ В.И. Гурман. - М.: Наука, 1985. - 288 с.
79. Дмитриевский А.А. Прикладные задачи теории оптимального управления движением беспилотных летательных аппаратов/ А.А. Дмитриевский, Л.Н. Лысенко. - М.: Машиностроение, 1978. - 387 с.
80. Зубов В.И. Лекции по теории управления/ В.И. Зубов. - М.: Наука, 1975. - 496 с.
81. Зубов В.И. Теория оптимального управления/ В.И. Зубов. - Ленинград: Судостроение, 1966. - 352 с.
82. Иванов В.А. Теория оптимальных систем автоматического управления/ В.А. Иванов, Н.В. Фалдин. - М.: Наука, 1981. - 336 с.
83. Куликовский Р.Э. Оптимальные и адаптивные процессы в системах автоматического управления/ Р.Э. Куликовский. - М.: Наука, 1967. - 380 с.
84. Сейдж Э.П. Оптимальное управление системами/ Э.П. Сейдж, Ч.С. Уайт. - М.: Радио и связь, 1982. - 392 с

85. Абдулаев Н.Д., Петров Ю.П. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов/ Н.Д. Абдулаев, Ю.П. Петров - Л.: Энергоатомиздат, 1985. - 240 с.
86. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы/ А.Г. Александров. - М.: Высшая школа, 1989. - 264 с.
87. Александров А.Г. Синтез регуляторов многомерных систем/ А.Г. Александров. - М.: Машиностроение, 1986. - 272 с.
88. Волков Е.Ф. Синтез многосвязных систем автоматического управления/ Е.Ф. Волков, Н.Н. Ершов, Е.Т. Раженков. - Л: ЛЭТИ, 1982. - 65 с.
89. Калман Р. Очерки по математической теории систем/ Р. Калман, М. Арбиб, П. Фалб. - М.: Мир, 1971. - 400 с.
90. Колесников А.А. Основы теории синергетического управления/ А.А. Колесников. - М.: Фирма "Испо-Сервис", 2000. - 264 с.
91. Летов А.М. Математическая теория процессов управления/ А.М. Летов. - М.: Наука, 1981.-256 с.
92. Петров Ю.П. Вариационные методы теории оптимального управления/ Ю.П. Петров. - Л.: Энергия, 1977. - 280 с.
93. Петров Ю.П. Синтез оптимальных систем при не полностью известных возмущающих силах/ Ю.П. Петров. - Л.: ЛГУ, 1987. - 290 с.
94. Янушевский Р.Т. Теория линейных оптимальных многосвязных систем управления/ Р.Т. Янушевский. - М.: Наука, 1973. - 464 с.
95. Квакернак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. - М.: Мир, 1977. - 650 с.
96. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления/ [А.А. Красовский и др.]. - М.: Наука, 1987.
97. Куропаткин П.В. Оптимальные и самонастраивающиеся системы/ П.В. Куропаткин. - Л.: Госэнергоиздат. - 1975. - 303 с.
98. Коган А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом/А.Я. Коган.- М.: Транспорт, 1997. – 326 с.

99. Ремшин Б.И., Ямпольский Д.С. Проектирование и наладка систем подчиненного регулирования электроприводом. - М.: Энергия, 1975. - 184 с.
100. Kessler C. Das summetrische Optimum/ C. Kessler//. - Regelungstechnik, 1958, № 11, p. 366-400
101. Воробьев В.Е. Прогнозирование срока службы электрических машин: [Письменные лекции]/ В.Е. Воробьев, В.Я. Кучер. - СПб.: СЗТУ, 2004. - 56 с.
102. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства/ Н.Т. Кузовков.-М. Машиностроение: 1976.- 184 с.
103. Ахметжанов А.А. Следящие системы и регуляторы: [Учебное пособие для вузов]/ А.А. Ахметжанов, А.В. Кочемасов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 288 с.
104. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование механотронных систем на ПК/ С.Г. Герман-Галкин.- СПб.: Корона-Век, 2008. – 386 с.
105. Савеленко І.В. Синтез системи автоматичного керування електроприводом на базі синхронного двигуна з постійними магнітами / І.В. Савеленко // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. праць. – Кіровоград, 2015. – №28. – С. 309–316.
106. Савеленко І.В., Плешков П.Г. Підвищення точності векторного керування синхронним двигуном з постійними магнітами / І.В. Савеленко, П.Г. Плешков // Проблеми енергозбереження та енергозбереження в АПК України: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка Технічні науки. Випуск №153. – Харків. ХНТУСГ, 2014
107. Савеленко І.В. Безконтактна система керування синхронним двигуном з постійним магнітами / матеріали міжнар. наук.-практ. конф. 27 листопада 2014 року м. Київ, НУХТ (Україна) /«Сучасні методи, інформаційне та технічне забезпечення систем управління організаційно-

технологічними комплексами» [Електронний ресурс] – Режим доступу. – <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii.htm> — Назва з екрана.

108. Плєшков П. Г. Математичні моделі синхронних двигунів на постійних магнітах для синтезу систем автоматичного керування високоефективними електроприводами/ П. Г. Плєшков, І. В. Савеленко, А. В. Некрасов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 3/2015 (92). – С.

109. Савеленко І.В. Розробка та дослідження роботи системи автоматичного керування тяговим електроприводом / І.В. Савеленко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 42 (1151). – С. 76 – 79.

110. Шейпак А.А. Гидравлика и гидропневмопривод .Учебник. Ч1: Основы механики жидкости и газа; 6-изд., стереотип/ А.А. Шейпак. –.: МГИУ, 2007. – 264 с.

111. Закладний О.М. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник/ О.М. Закладний, А.В. Праховник, О.І. Соловей// К. Кондор, 2005. – 408 с.

112. Тытук В.К. Влияние износа электромеханического оборудования на показатели процесса запуска [Text] / В.К. Тытук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Выпуск № 2 (78). 2015. – С. 23–30.

113. Ящура А. И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования. Справочник/ А. И. Ящура // М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 360 с.

ДОДАТКИ

Перевірка за критерієм керованості математичної модель динаміки руху електропривода на основі СДПМ з пусковими обмотками по осі d і q

1. Вихідні дані про об'єкт керування (матриці A_d , B_d):

$$a_{d11} := \frac{-r_s \cdot x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} \quad a_{d12} := \frac{r_D \cdot x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} \quad b_{d1} := \frac{x_D}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d}$$

$$a_{d21} := \frac{r_s \cdot x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} \quad a_{d22} := \frac{-r_D \cdot x_d}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} \quad b_{d2} := \frac{-x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d}$$

$$A_d := \begin{pmatrix} a_{d11} & a_{d12} \\ a_{d21} & a_{d22} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{r_s \cdot x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} & -\frac{r_D \cdot x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} \\ -\frac{r_s \cdot x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} & \frac{r_D \cdot x_d}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} \end{pmatrix}$$

$$B_d := \begin{pmatrix} b_{d1} \\ b_{d2} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -\frac{x_D}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} \\ \frac{x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} \end{pmatrix} \quad C_d := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

2. Перевірка системи рівнянь за критерієм керованості:

Матриця керованості W_d :

$$AB_d := A_d \cdot B_d \rightarrow \begin{bmatrix} -\frac{r_s \cdot x_{dD}^2}{(x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d)^2} - \frac{r_D \cdot x_{dD}^2}{(x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d)^2} \\ \frac{r_D \cdot x_d \cdot x_{dD}}{(x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d)^2} + \frac{r_s \cdot x_D \cdot x_{dD}}{(x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d)^2} \end{bmatrix}$$

$$W_d^{\langle 1 \rangle} := \mathbf{B}_d^{\langle 1 \rangle}$$

$$W_d^{\langle 2 \rangle} := \mathbf{A} \mathbf{B}_d^{\langle 1 \rangle}$$

$$W_d \rightarrow \begin{bmatrix} -\frac{x_D}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} & -\frac{r_s \cdot x_D^2}{(x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d)^2} & -\frac{r_D \cdot x_{dD}^2}{(x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d)^2} \\ \frac{x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} & \frac{r_D \cdot x_d \cdot x_{dD}}{(x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d)^2} + \frac{r_s \cdot x_D \cdot x_{dD}}{(x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d)^2} \end{bmatrix}$$

$$\text{rank}(A_d) \rightarrow 2$$

$$\text{rank}(W_d) \rightarrow 2$$

Так як ранги матриць $\mathbf{A}_d = \mathbf{W}_d$, то система рівнянь керована.

3. Перевірка системи рівнянь за критерієм спостережності:

Матриця спостережності $\mathbf{Q}_d$:

$$Q_d^{\langle 1 \rangle} := (C_d^T)^{\langle 1 \rangle} \quad Q_d^{\langle 2 \rangle} := (C_d^T)^{\langle 2 \rangle}$$

$$Q_d^{\langle 3 \rangle} := (\mathbf{A}_d^T \cdot C_d^T)^{\langle 1 \rangle} \quad Q_d^{\langle 4 \rangle} := (\mathbf{A}_d^T \cdot C_d^T)^{\langle 2 \rangle}$$

$$Q_d \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{r_s \cdot x_D}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_D \cdot x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} & 0 \end{pmatrix} \quad \text{rank}(Q_d) \rightarrow 2$$

4. Спостерігач Люенберга для змінної стану i_D :

$$A_{11} := a_{d11} \rightarrow \frac{r_s \cdot x_D}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d}$$

$$A_{12} := a_{d12} \rightarrow -\frac{r_D \cdot x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d}$$

$$A_{21} := a_{d21} \rightarrow -\frac{r_s \cdot x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d}$$

$$A_{22} := a_{d22} \rightarrow \frac{r_D \cdot x_d}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d}$$

$$B_1 := b_{d1} \rightarrow -\frac{x_D}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d}$$

$$B_2 := b_{d2} \rightarrow \frac{x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d}$$

$$\underline{\underline{L}} := 1$$

$$B_2 - L \cdot B_1 \rightarrow \frac{x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} + \frac{l \cdot x_D}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d}$$

$$\frac{x_{dD} + l \cdot x_D}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d}$$

$$A_{21} - L \cdot A_{11} \rightarrow -\frac{r_s \cdot x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} - \frac{l \cdot r_s \cdot x_D}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d}$$

$$\frac{-r_s \cdot x_{dD} - l \cdot r_s \cdot x_D}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d}$$

$$A_{22} - L \cdot A_{12} \rightarrow \frac{r_D \cdot x_d}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d} + \frac{l \cdot r_D \cdot x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d}$$

$$\frac{r_D \cdot x_d + l \cdot r_D \cdot x_{dD}}{x_{dD}^2 - x_D \cdot x_d}$$

Перевірка за критерієм керованості математичної модель динаміки руху електропривода на основі СДПМ з пусковими обмотками по осі i_Q

1. Вихідні дані при об'єкт керування (матриці A_q, B_q):

$$\begin{aligned}
 a_{q11} &:= \frac{-\mathbf{r}_s \cdot x_Q}{x_q \cdot x_Q - x_{qQ}^2} & a_{q12} &:= \frac{\mathbf{r}_Q \cdot x_{qQ}}{x_q \cdot x_Q - x_{qQ}^2} \\
 a_{q21} &:= \frac{\mathbf{r}_s \cdot x_{qQ}}{x_q \cdot x_Q - x_{qQ}^2} & a_{q22} &:= \frac{-\mathbf{r}_Q \cdot x_Q}{x_q \cdot x_Q - x_{qQ}^2} \\
 a_{q13} &:= \frac{-\mathbf{E}_0 \cdot x_Q}{x_q \cdot x_Q - x_{qQ}^2} & b_{q1} &:= \frac{x_Q}{x_q \cdot x_Q - x_{qQ}^2} \\
 a_{q23} &:= \frac{\mathbf{E}_0 \cdot x_{qQ}}{x_q \cdot x_Q - x_{qQ}^2} & b_{q2} &:= \frac{-x_{qQ}}{x_q \cdot x_Q - x_{qQ}^2} \\
 a_{q31} &:= \frac{\mathbf{E}_0}{J} & a_{q32} &:= 0 & a_{q33} &:= 0 & b_{q3} &:= 0
 \end{aligned}$$

$$A_q := \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{q11} & a_{q12} & a_{q13} \\ a_{q21} & a_{q22} & a_{q23} \\ a_{q31} & a_{q32} & a_{q33} \end{pmatrix} \quad B_q := \begin{pmatrix} \mathbf{b}_{q1} \\ b_{q2} \\ b_{q3} \end{pmatrix} \quad \mathbf{C} := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

2. Перевірка системи рівнянь за критерієм керованості:

Матриця керованості W_q :

$$AB_q := \mathbf{A}_q \cdot B_q$$

$$AAB_q := \mathbf{A}_q \cdot A_q \cdot B_q$$

$$W_q^{(1)} := \mathbf{B}_q^{(1)} \quad W_q^{(2)} := \mathbf{AB}_q^{(1)} \quad W_q^{(3)} := \mathbf{AAB}_q^{(1)}$$

$$W_q \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{x_Q}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} & -\frac{r_s \cdot x_Q^2}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} & -\frac{r_Q \cdot x_{qQ}^2}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} & \frac{x_{qQ} \left[\frac{r_Q^2 \cdot x_Q \cdot x_{qQ}}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} + \frac{r_Q \cdot r_s \cdot x_Q \cdot x_{qQ}}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} \right]}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} & -\frac{x_Q \left[\frac{r_s^2 \cdot x_Q^2}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} + \frac{E_0^2 \cdot x_Q}{J \cdot (x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)} + \frac{r_Q \cdot r_s \cdot x_{qQ}^2}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} \right]}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} \\ \frac{x_{qQ}}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} & \frac{r_Q \cdot x_Q \cdot x_{qQ}}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} + \frac{r_s \cdot x_Q \cdot x_{qQ}}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} & \frac{x_{qQ} \left[\frac{r_Q^2 \cdot x_Q^2}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} + \frac{r_Q \cdot r_s \cdot x_{qQ}^2}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} \right]}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} & + \frac{x_Q \left[\frac{r_s^2 \cdot x_Q \cdot x_{qQ}}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} + \frac{E_0^2 \cdot x_{qQ}}{J \cdot (x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)} + \frac{r_Q \cdot r_s \cdot x_Q \cdot x_{qQ}}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} \right]}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} \\ 0 & -\frac{E_0 \cdot x_Q}{J \cdot (x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)} & & -\frac{E_0 \cdot r_s \cdot x_Q^2}{J \cdot (x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} & -\frac{E_0 \cdot r_Q \cdot x_{qQ}^2}{J \cdot (x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} \end{bmatrix}$$

$$\text{rank}(A_q) \rightarrow 3$$

$$\text{rank}(W_q) \rightarrow 3$$

Так як ранги матриць $\text{rank}(\mathbf{A}_q) = \text{rank}(\mathbf{W}_q)$, то система рівнянь є керованою.

3. Перевірка системи рівнянь за критерієм спостережності:

Проведемо підстановку змінних $\mathbf{Q}_q$:

$$\begin{aligned} a_{11} &:= \mathbf{a}_{q11} & a_{12} &:= \mathbf{a}_{q13} & a_{13} &:= \mathbf{a}_{q12} & b_1 &:= \mathbf{b}_{q1} \\ a_{21} &:= \mathbf{a}_{q31} & a_{22} &:= 0 & a_{23} &:= 0 & b_2 &:= 0 \\ a_{31} &:= \mathbf{a}_{q21} & a_{32} &:= \mathbf{a}_{q23} & a_{33} &:= \mathbf{a}_{q22} & b_3 &:= \mathbf{b}_{q2} \end{aligned}$$

$$\mathbf{A} := \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{11} & \mathbf{a}_{12} & \mathbf{a}_{13} \\ \mathbf{a}_{21} & \mathbf{a}_{22} & \mathbf{a}_{23} \\ \mathbf{a}_{31} & \mathbf{a}_{32} & \mathbf{a}_{33} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{r_s \cdot x_Q}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} & \frac{E_0 \cdot x_Q}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} & -\frac{r_Q \cdot x_{qQ}}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} \\ \frac{E_0}{J} & 0 & 0 \\ -\frac{r_s \cdot x_{qQ}}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} & -\frac{E_0 \cdot x_{qQ}}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} & \frac{r_Q \cdot x_Q}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B} := \begin{pmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \\ \mathbf{b}_3 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{x_Q}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} \\ 0 \\ \frac{x_{qQ}}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} \end{pmatrix} \quad \mathbf{C} := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Матриця спостережності $\mathbf{Q}_q$:

$$\begin{aligned} Q^{\langle 1 \rangle} &:= (\mathbf{C}^T)^{\langle 1 \rangle} & Q^{\langle 2 \rangle} &:= (\mathbf{C}^T)^{\langle 2 \rangle} & Q^{\langle 3 \rangle} &:= (\mathbf{C}^T)^{\langle 3 \rangle} \\ Q^{\langle 4 \rangle} &:= (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{C}^T)^{\langle 1 \rangle} & Q^{\langle 5 \rangle} &:= (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{C}^T)^{\langle 2 \rangle} & Q^{\langle 6 \rangle} &:= (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{C}^T)^{\langle 3 \rangle} \\ Q^{\langle 7 \rangle} &:= (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{C}^T)^{\langle 1 \rangle} & Q^{\langle 8 \rangle} &:= (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{C}^T)^{\langle 2 \rangle} & Q^{\langle 9 \rangle} &:= (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{C}^T)^{\langle 3 \rangle} \end{aligned}$$

$$Q \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{r_s \cdot x_Q}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} & \frac{E_0}{J} & 0 & \frac{r_s^2 \cdot x_Q^2}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} + \frac{E_0^2 \cdot x_Q}{J \cdot (x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)} + \frac{r_Q \cdot r_s \cdot x_{qQ}^2}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} & \frac{E_0 \cdot r_s \cdot x_Q}{J \cdot (x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{E_0 \cdot x_Q}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} & 0 & 0 & \frac{E_0 \cdot r_s \cdot x_Q^2}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} + \frac{E_0 \cdot r_Q \cdot x_{qQ}^2}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} & \frac{E_0^2 \cdot x_Q}{J \cdot (x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{r_Q \cdot x_{qQ}}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} & 0 & 0 & -\frac{r_Q^2 \cdot x_Q \cdot x_{qQ}}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} - \frac{r_Q \cdot r_s \cdot x_Q \cdot x_{qQ}}{(x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)^2} & -\frac{E_0 \cdot r_Q \cdot x_{qQ}}{J \cdot (x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q)} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{rank}(Q) \rightarrow 3$$

4. Спостерігач Люенбергера для змінної стану i_Q :

$$B_1 := \begin{pmatrix} \textcolor{red}{b}_1 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -\frac{x_Q}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \textcolor{red}{B}_2 := b_3 \rightarrow \frac{x_{qQ}}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q}$$

$$L := \begin{pmatrix} \textcolor{red}{l}_1 & l_2 \end{pmatrix}$$

$$B_2 - L \cdot B_1 \rightarrow \frac{x_{qQ}}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} + \frac{l_1 \cdot x_Q}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q}$$

$$A_{21} - L \cdot A_{11} \rightarrow \left(-\frac{r_s \cdot x_{qQ}}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} - \frac{E_0 \cdot l_2}{J} - \frac{l_1 \cdot r_s \cdot x_Q}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} - \frac{E_0 \cdot x_{qQ}}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} - \frac{E_0 \cdot l_1 \cdot x_Q}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} \right)$$

$$A_{22} - L \cdot A_{12} \rightarrow \frac{r_Q \cdot x_Q}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q} + \frac{l_1 \cdot r_Q \cdot x_{qQ}}{x_{qQ}^2 - x_Q \cdot x_q}$$

ДОДАТОК Б

Техніко-економічна оцінка ефективності використання САК тягової установки

Для оцінки ефективності застосування розробленої САК тягової установки в порівнянні з базовою САК необхідно провести розрахунок економічних показників для обох варіантів. В якості базової системи обемо систему автоматичного керування тягової установки, описану в розділі 3 роботи.

Економічний ефект від застосування запропонованої в роботі САК тягової установки визначається за формулою:

$$E = Z_6 - Z_p, \quad (\text{Б.1})$$

де Z_6 – приведені витрати на базовий варіант, тис. грн./рік;

Z_p – приведені витрати на проектний варіант, тис. грн./рік.

Приведені витрати визначаються за формулою:

$$Z_i = E_n K_i + B_{\text{екс.}i} + B_{\text{прост.}i} + B_{\Delta W i}, \quad (\text{Б.2})$$

де E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, 1/рік; для запропонованої методики приймається $E_n = 0,15$;

K_i – капіталовкладення в i -й варіант; так як відбувається модернізація існуючої САК, то для базового варіанту $K_6 = 0$, тис. грн.;

$B_{\text{екс.}i}$ – витрати на амортизацію і обслуговування обладнання для i -го варіанту, тис. грн./рік;

$B_{\text{прост.}i}$ – збиток, що пов'язаний з недовипуском продукції, тис. грн/рік.

$B_{\Delta W}$ – вартість втрат електричної енергії, тис. грн./рік;

Розрахунок капіталовкладень

Згідно з обраною методикою розрахунку економічної ефективності впровадження САК тягової установки величина капіталовкладень для кожного з варіанту САК розраховується за формулою:

$$K_i = K_{\text{обл.}i} + B_{\text{д.}i} + B_{\text{м.}i} + B_{\text{пн.}i} \quad (\text{Б.3})$$

де $K_{\text{обл.}i}$ – вартість САК тяговою установкою, для i -го варіанту, тис. грн.;

$B_{\text{д.}i}$ – витрати на доставку обладнання, тис. грн.; складає приблизно 10 % від вартості обладнання;

$B_{\text{м.}i}$ – витрати на виконання монтажних робіт із врахуванням вартості монтажних матеріалів, тис. грн. Складає приблизно 35% від вартості обладнання;

$B_{\text{пн.}i}$ – витрати на пусконаладжувальні роботи, тис. грн. Приймається в розмірі 15% від вартості обладнання.

Так як виконується модернізація існуючої САК тяговою установкою, то величина капіталовкладень для базової САК дорівнює нулю. Тому необхідно розрахувати лише значення капіталовкладень для запропонованої в роботі САК тягової установки. Результати розрахунку капіталовкладень для варіанту розробленої САК тягової установки наведено в табл. Б.1.

Таблиця Б.1. Результати розрахунку капіталовкладень для варіанту розробленої САК тягової установки

№ з/п	Назва показника	Величина витрат, тис. грн
1.	Вартість САК на основі ПЛК-220.К-L	43,21
2.	Витрати на доставку обладнання	4,32
3.	Витрати на виконання монтажних робіт	15,12
4.	Витрати на пусконаладжувальні роботи	6,48
	Всього	69,13

Визначення витрат на амортизацію і обслуговування обладнання

Визначення експлуатаційних витрат будемо проводити за умови роботи обладнання на протязі року для двох варіантів: базового, та розробленого. До розрахунку включаються лише ті статті витрат, які відрізняються. Кошторис річних експлуатаційних витрат розраховується за наступними статтями:

- основна та додаткова заробітна плата експлуатаційних робітників;
- вартість експлуатаційних матеріалів;
- поточні ремонти;
- аварійні ремонти;
- амортизаційні відрахування;
- інші витрати.

В новому варіанті, за рахунок впровадження релейного регулятора трудомісткість експлуатаційних робіт зменшується на 30%.

Основна та додаткова заробітна плата експлуатаційних робітників з відрахуваннями на соціальні потреби:

$$B_{\text{екс}} = Q_{\text{то}} l_{\text{с}} K_{\text{д}} K_{\text{г}} \left(1 + \frac{H_{\text{соц}}}{100} \right) \quad (\text{Б.4})$$

де $Q_{\text{то}}$ – річна трудомісткість експлуатаційних робіт.

$l_{\text{с}}$ – середня часова тарифна ставка експлуатаційних робітників, грн./год;

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт додаткової заробітної плати, який враховує премії та усі види грошових доплат. Може бути прийнятий на рівні 1,25-1,35.

$K_{\text{г}}$ – коефіцієнт, який враховує складність ремонту при підземних роботах, приймається рівним 1,1...1,6.

$H_{\text{соц}}$ – нормативні відрахування на соціальні потреби;

Результати розрахунку річної трудомісткості експлуатаційних робіт для базового та розробленого варіантів наведені в табл. Б.2. Згідно даних,

наведених в таблиці Б.2, загальна трудомісткість експлуатаційних робіт для нового варіанту складає 72,8 люд-год. на рік.

Основна та додаткова заробітна плата експлуатаційних робітників з відрахуваннями на соціальні потреби, грн.:

$$B_{\text{екс.б}} = 177 \cdot 14,68 \cdot 1,35 \cdot 1,6 \cdot \left(1 + \frac{38,52}{100}\right) = 7773 \text{ грн};$$

$$B_{\text{екс.р}} = 106,2 \cdot 14,68 \cdot 1,25 \cdot 1,6 \cdot \left(1 + \frac{38,52}{100}\right) = 4318.$$

Вартість експлуатаційних матеріалів, для кожного з варіантів, може бути орієнтовно прийнята в розмірі 15% від $B_{\text{екс.}}$.

$$B_{\text{е.м. б}} = 0,15 \cdot 7773 = 1166 \text{ грн};$$

$$B_{\text{е.м. р.}} = 0,15 \cdot 4318 = 648 \text{ грн.}$$

Витрати на поточний ремонт обладнання включають в себе: основну та додаткову заробітну плату ремонтних робітників з відрахуваннями в соціальні фонди:

$$B_{\text{пр}} = 0,8 Q_{\text{р}} l_{\text{ср}} K_{\text{д}} \left(1 + \frac{H_{\text{соц}}}{100}\right) \quad (\text{Б.5})$$

Таблиця Б.2. Розрахунок трудомісткості ремонтних робіт

Назва елементів схеми	Кіль- кість,	Тривалість, міс			Структура ремонтного циклу			Трудомісткість, нормо-год.								
								Нормативна			За рем. цикл				Річна	
		$T_{p.ц.,}$ міс	$T_{p.н.,}$ міс	$T_{o.н.,}$ міс	n_{κ}	n_m	n_o	Q_{κ}^H	Q_m^H	Q_o^H	Q_{κ}	Q_m	Q_o	Q^{Σ}	Q_p	Q_{To}
Базовий варіант																
СДПМ	1	72	12	0	1	5	1	69	34	6	69	170	6	245		
Електровоз	1	72	12	1	1	5	66	29	22	16	29	110	1056	1195		
Всього													1062	1440	240	177
Розроблений варіант																
СДПМ	1	120	24	0	1	4	1	69	34	6	69	136	6	211		
Електровоз	1	72	12	1	1	5	66	29	22	16	29	110	1056	1195		
Всього													1062	1406	140,6	106,2

де $0,8$ – коефіцієнт, який враховує долю поточних ремонтів в загальній сумі ремонтних робіт;

Q_p – річна трудомісткість ремонтних робіт. Визначається згідно нормативів системи планово-запобіжного ремонту (табл. Б.1);

l_{cp} – середня часова тарифна ставка ремонтних робітників, грн./год.

Витрати на поточний ремонт обладнання для кожного з варіантів, грн:

$$B_{пр.б} = 0,8 \cdot 240 \cdot 17,28 \cdot 1,35 \cdot \left(1 + \frac{38,52}{100}\right) = 6203 \text{ грн};$$

$$B_{пр.р} = 0,8 \cdot 140,6 \cdot 17,28 \cdot 1,35 \cdot \left(1 + \frac{38,52}{100}\right) = 3634 \text{ грн.}$$

Вартість ремонтних матеріалів та запасних частин для кожного з варіантів може бути прийняті в розмірі 75% від $B_{пр}$:

$$B_{р.м.б} = 0,75 \cdot 6203 = 4652 \text{ грн};$$

(Б.6)

$$B_{р.м.р} = 0,75 \cdot 3634 = 2725 \text{ грн.}$$

Кошторис річних експлуатаційних витрат по варіантам зведемо у таблицю Б.2.

Таблиця Б.2. Кошторис річних експлуатаційних витрат

Стаття витрат	Витрати, грн	
	Базовий	Новий
Основна та додаткова заробітна плата експлуатаційних робітників	7773	4318
Вартість експлуатаційних матеріалів	1166	648
Поточні ремонти	6203	3634
Вартість ремонтних матеріалів	4652	2725
Всього	19794	11325

Розрахунок показників енергетичної ефективності

Підвищення рівня енергоефективності насамперед досягається за рахунок зниження рівня максимальних струмів за рахунок скорочення тривалості перехідних процесів.

Економічна ефективність при зменшенні тривалості перехідних процесів під час руху тягової установки визначається за формулою:

$$E_{\Delta W} = B_{\Delta W\delta} - B_{\Delta Wp} \quad \text{Б.7}$$

де $B_{\Delta W\delta}, B_{\Delta Wp}$ - вартість річних витрат електроенергії, відповідно базового та розрахункового варіантів.

Вартість річних витрат електроенергії для варіантів порівняння визначається за формулою:

$$B_{\Delta Wi} = \Delta W_i T \quad \text{В.8}$$

де ΔW_i - спожита електрична енергія за обраним варіантом, кВт·год;

T – кількість робочих днів за рік, ($T=365$ днів).

Спожита електрична енергія за варіантом порівняння знаходиться за формулою:

$$\Delta W_i = N_p r_s m \sum_{j=1}^n I_j^2 t_j \quad \text{В.9}$$

де N_p - кількість пусків тягових установок протягом року;

m - кількість фаз електричного двигуна;

r_s - активний опір статорної обмотки СДПМ, Ом;

I_j - електричний струм статора, А;

t_j - час дискретизації, сек.

Число пусків тягової установки за рік:

$$N_p = N_{\text{пуск}} z_{\text{зм}} \quad \text{В.10}$$

де $N_{\text{зм}}$ - кількість пусків тягових установок протягом зміни;

$z_{\text{зм}}$ - число рейсів тягової установки для вивозу рудної маси за зміну;

Число рейсів за зміну для вивозу рудної маси:

$$z_{\text{зм}} = K_n \frac{Q_{\text{зм}}}{n_b m_{\text{гр}}} \quad \text{В.11}$$

де K_n - коефіцієнт, що враховує нерівномірність надходження грузів, згідно [1] ($K_n = 1,25 \dots 1,5$)

$Q_{\text{зм}}$ - сумарна змінна продуктивність шахти, т;

n_b - кількість вагонеток у тяговому составі, для тягового електровозу типу 7КА оптимальна кількість складає 6 вагонеток з об'ємною масою $2,5 \text{ т/м}^3$ [1];

$m_{\text{гр}}$ - маса вантажу (руди), т.

Річний економічний ефект від застосування САК тягової установки релейним регулятором визначається за формулою:

$$E_p = (B_{\text{ебаз}} - B_{\text{енов}}) - E_n \cdot K \quad (\text{Б.12})$$

де $B_{\text{ебаз}}$, $B_{\text{енов}}$ - величина експлуатаційних витрат відповідно за базовим и новим варіантом ;

E_n - нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних капіталовкладень. $E_n = 0,12$

Період окупності додаткових капітальних вкладень за рахунок зниження експлуатаційних витрат визначається за формулою:

$$T_{ок} = \frac{K}{B_{баз} - B_{енов}}$$

Результати розрахунку річного економічного ефекту від застосування САК тягової установки релейним регулятором приведені в таблиці Б.3

Таблиця Б.3 Техніко-економічні показники впровадження САК тяговою установкою

№ з/п	Показники	Одиниці виміру	Базовий варіант	Розроблений варіант
1.	Капіталовкладення:	тис. грн.	0,00	6,91
2.	Витрати на обслуговування та амортизацію	тис. грн./рік	19,79	11,33
4.	Вартість втрат електроенергії	тис. грн./рік	1,02	0,88
5.	Приведені затрати	тис. грн./рік	20,81	13,24
6.	Економічний ефект	тис. грн./рік	7,568	
7.	Термін окупності	роки	0,913	

Висновки

Як показали розрахунки, САК з релейними регуляторами (РР) для електроприводів з СДПМ є економічно обґрунтованим. Величина річного економічного ефекту від впровадження САК з РР в розрахунку на один тяговий електровоз складає 2744 грн., а період окупності додаткових капіталовкладень становить 1,56 року.

Розрахунок ефективності керування рухом тягової установки

Визначення ефективності керування рухом тягової установки будемо проводити за для діапазону середніх робочих швидкостей $v = 3 \dots 7$ км/год шахтного електровозу. Керування швидкості при виконанні технологічної операції змінювалася з кроком 0,25 км/год. В результаті, для кожного значення швидкості була отримана тривалість виконання транспортування руди. На рис. Б.1 представлений графік тривалості технологічної операції від керування швидкості.

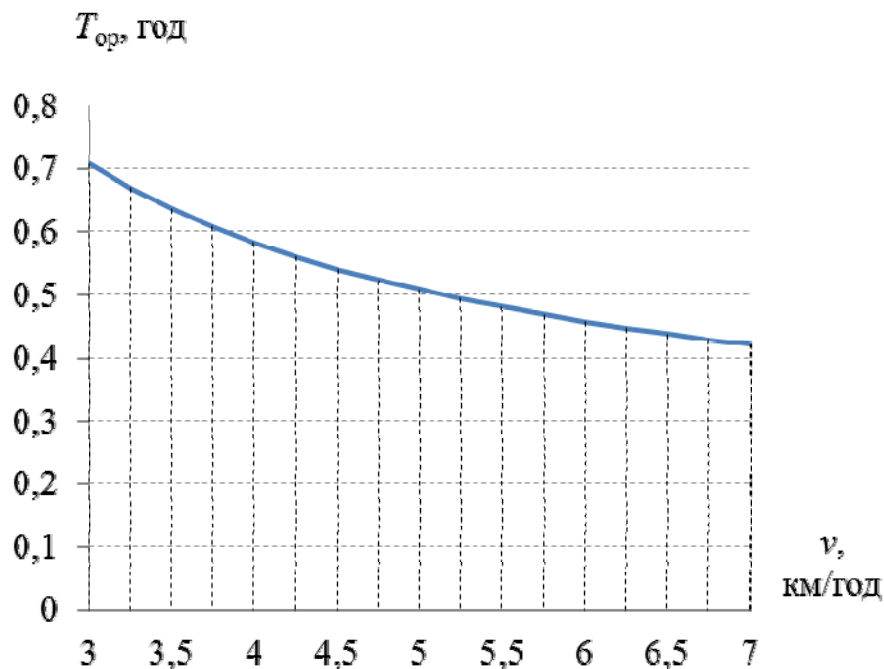


Рис. Б.1. Графік тривалості технологічної операції від керування швидкості.

За техніко-економічною документацією на технологічне устаткування, визначимо параметри, що характеризують умови виконання технологічної операції. Параметри технологічного устаткування при транспортуванні руди зведені до таблиці Б.4.

Таблиця Б.4. Параметри технологічного устаткування при транспортуванні руди

№ п/п	Параметр операції	Значен- ня	Умовні позначення
1	Маса руди, кг	37500	m_p
2	Кількість витраченої енергії, кВт год	34,7	W_T
3	Встановлена швидкість руху, км/год	7	v
4	Тривалість виконання операції, год	0,42	T_{op}
5	Ресурс ізоляції двигуна при роботі в номінальному режимі, год	7200	$T_{дв}$
6	Ресурс підшипникового вузла при роботі в номінальному режимі, год	10000	$T_{пв}$
7	Ресурс колісних пар електровозу, год	8640	$T_{кп}$
8	Вартість двигуна, грн	80527	rs_d
	Вартість підшипникового вузла, грн	7500	$rs_{п}$
	Вартість колісної пари, грн	12000	rs_k

Для виконання оцінки ефективності керування параметрами технологічної операції визначимо вартісні показники операції транспортування згідно рівняння (1.4).

Вартість спожитої електричної енергії при транспортуванні руди, грн:

$$RE_e = W_T C_0, \quad (\text{Б.13})$$

де C_0 – тариф на електричну енергію, грн/кВт·год.

Визначаємо ресурс ізоляції двигуна при різних режимах роботи [27], год:

$$T_{\text{д}} = T_{\text{дв}} k_t, \quad (\text{Б.14})$$

де k_t – коефіцієнт запасу електричної міцності ізоляції двигуна.

Коефіцієнт запасу електричної міцності ізоляції двигуна [101]:

$$k_t = k_0 2^{\sqrt{\frac{T_{\text{оп}}}{T_{\text{д}}}}},$$

де k_0 – фактичний коефіцієнт запасу електричної міцності; $k_0 = 7 \dots 9$ [101];

t – тривалість технологічної операції, год.

Величина витрати ресурсу ізоляції двигуна [27]:

$$R_{\text{д}} = \frac{T_{\text{оп}}}{T_{\text{д}}}. \quad (\text{Б.15})$$

Вартісний показник величини зносу ресурсу ізоляції двигуна $RE_{\text{д}}$, протягом технологічної операції, грн:

$$RE_{\text{д}} = R_{\text{д}} r s_{\text{д}}. \quad (\text{Б.16})$$

Вартість руди, що транспортується, грн:

$$PE = m_{\text{р}} C_{\text{р}}, \quad (\text{Б.17})$$

де $C_{\text{р}}$ – вартість 1 кг руди; за даними спотового ринку $C_{\text{р}} = 1900 \dots 2600$ грн/кг.

Визначаємо ресурс ізоляції підшипникового вузлу при різних режимах роботи [27], год:

$$T_{\Pi} = T_{\Pi\text{в}} k_{\Pi}^a, \quad (\text{Б.18})$$

де k_{Π} – коефіцієнт, що враховує фактичний час виконання операції до його значення при номінальних параметрах технологічного обладнання; a – показник зміни середнього строку служби підшипника.

Коефіцієнт запасу строку служби підшипника [101]:

$$a = 0,41 \text{Re}^{0,56} \lambda^{0,78},$$

де Re – число Рейнольдса; для даного випадку, прийнято, $\text{Re} = 200$ [101];

λ – параметр мастила; $\lambda = 0,03$ [101].

Величина витрати ресурсу зносу підшипника [27]:

$$R_{\Pi} = \frac{T_{\text{оп}}}{T_{\Pi}}. \quad (\text{Б.19})$$

Вартісний показник величини зносу ресурсу підшипника RE_{Π} , протягом технологічної операції, грн:

$$RE_{\Pi} = R_{\Pi} r s_{\Pi}. \quad (\text{Б.20})$$

Визначаємо ресурс колісних пар електровозу при зміні його режиму роботи [27], год:

$$T_{\text{к}} = T_{\text{кп}} k_{\Pi}^{-a}, \quad (\text{Б.21})$$

де $k_{и}$ – коефіцієнт, що враховує фактичний час виконання операції до його значення при номінальних параметрах технологічного обладнання; a – показник зміни середнього строку служби підшипника (для тягових установок $a = 0,389$).

Величина витрати ресурсу зносу колісних пар [27]:

$$R_k = \frac{T_{op}}{T_k}. \quad (Б.22)$$

Вартісний показник величини зносу ресурсу підшипника RE_k , протягом технологічної операції, грн:

$$RE_k = R_k r s_k. \quad (Б.23)$$

Результати розрахунку вартісної оцінки при керуванні швидкістю руху тягової установки приведені в таблиці Б.5.

Таблиця Б.5. Вартісна оцінки при керуванні швидкістю руху тягової установки

W_e , кВт·год	v , км/год	T_{op} , год	RE_d , грн	RE_p , грн	RE_k , грн	RE_e , грн	RE_{Σ} , грн	PE , грн
1	2	3	4	5	6	7	8	9
32,62	3	0,7080	5,238	0,317	0,587	68,499	77,771	85,5
32,71	3,25	0,6695	5,337	0,317	0,606	68,694	77,693	85,5
32,80	3,5	0,6366	5,443	0,317	0,627	68,890	77,625	85,5
32,90	3,75	0,6080	5,557	0,317	0,650	69,086	77,567	85,5
32,99	4	0,5830	5,681	0,317	0,675	69,281	77,521	85,5
33,08	4,25	0,5609	5,816	0,318	0,703	69,477	77,488	85,5

продовження таблиці Б.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
33,18	4,5	0,5413	5,963	0,318	0,733	69,673	77,470	85,5
33,27	4,75	0,5238	6,124	0,319	0,767	69,868	77,470	85,5
33,36	5	0,5080	6,301	0,320	0,804	70,064	77,490	85,5
33,46	5,25	0,4937	6,497	0,321	0,846	70,260	77,533	85,5
33,55	5,5	0,4807	6,715	0,323	0,893	70,455	77,604	85,5
33,64	5,75	0,4689	6,958	0,325	0,946	70,651	77,706	85,5
33,74	6	0,4580	7,232	0,327	1,007	70,847	77,847	85,5
33,83	6,25	0,4480	7,542	0,330	1,077	71,042	78,034	85,5
33,92	6,5	0,4388	7,896	0,334	1,158	71,238	78,278	85,5
34,02	6,75	0,4302	8,305	0,338	1,253	71,434	78,591	85,5
34,11	7	0,4223	8,782	0,343	1,367	71,629	78,991	85,5

За розрахунковими даними визначимо критерій ефективності керування швидкістю руху шахтного електровозу. Розрахунок критерію ефективності (1.4) для технологічного процесу транспортування зведено до таблиці Б.6.

Таблиця Б.6. Розрахунок критерію ефективності (1.4) для технологічного процесу

N	W_e , кВт·год	v , км/год	T_{op} , год	RE , грн	PE , грн	E
1	2	3	4	5	6	7
1	32,62	3	0,7080	77,771	85,5	0,01792
2	32,71	3,25	0,6695	77,693	85,5	0,02047
3	32,80	3,5	0,6366	77,625	85,5	0,02306
4	32,90	3,75	0,6080	77,567	85,5	0,02567
5	32,99	4	0,5830	77,521	85,5	0,02826

1	2	3	4	5	6	7
6	33,08	4,25	0,5609	77,488	85,5	0,03079
7	33,18	4,5	0,5413	77,470	85,5	0,03322
8	33,27	4,75	0,5238	77,470	85,5	0,03548
9	33,36	5	0,5080	77,490	85,5	0,03753
10	33,46	5,25	0,4937	77,533	85,5	0,03928
11	33,55	5,5	0,4807	77,604	85,5	0,04066
12	33,64	5,75	0,4689	77,706	85,5	0,04159
13	33,74	6	0,4580	77,847	85,5	0,04195
14	33,83	6,25	0,4480	78,034	85,5	0,04162
15	33,92	6,5	0,4388	78,278	85,5	0,04048
16	34,02	6,75	0,4302	78,591	85,5	0,03838
17	34,11	7	0,4223	78,991	85,5	0,03518

На рис. Б.2. приведений графік ефективності при керуванні швидкістю руху тягової установки.

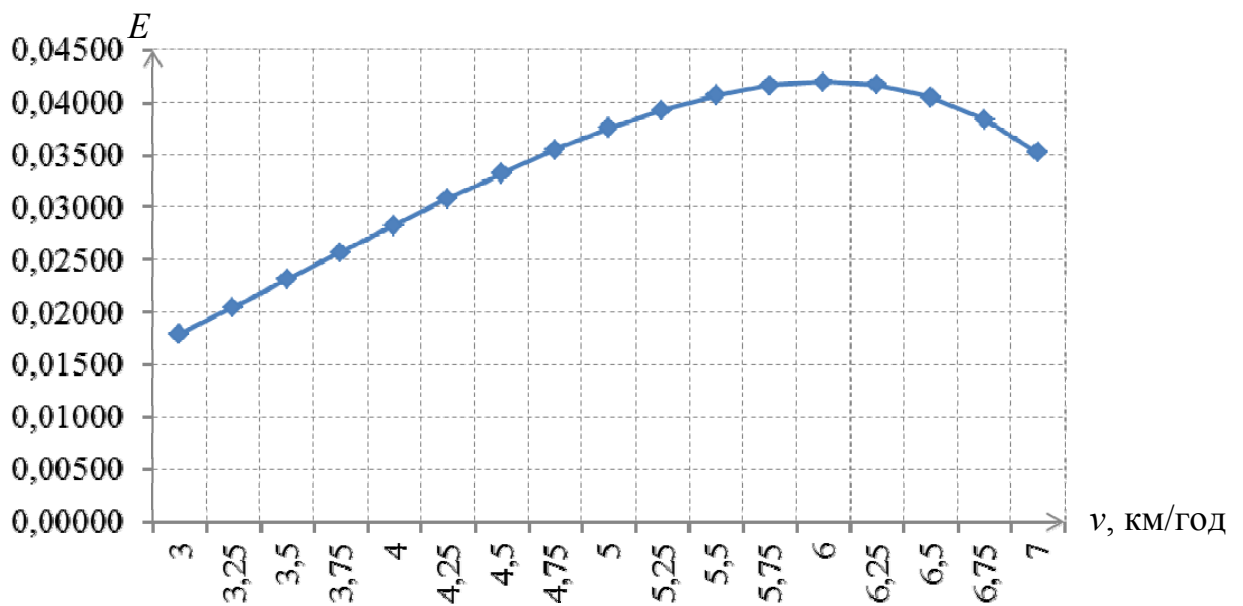


Рис. Б.2. Графік ефективності при керуванні швидкістю руху тягової установки

Висновки. Аналіз форми графіку на рис Б.2 показує, що при швидкості руху тягового електровозу $v = 6$ км/год критерій ефективності керування є оптимальним. Аналіз даних таблиць Б.5-Б.6 показав, що екстримум критерію ефективності використання технологічних ресурсів не співпадає з мінімумами експлуатаційних втрат і витрати електроенергії. Такий розподіл вказує, що критерії енергетичної та економічної ефективності роботи тягових установок не завжди є ефективними у порівнянні з критерієм ефективності порівняння ресурсів.

ДОДАТОК В

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор
Інгульської шахти «СхідГЗК»

Р.М.Агліулін



2015 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з наукової роботи
Кіровоградського національного
технічного університету

О.М.Левченко



АКТ

**про результати виробничих випробувань
системи автоматичного керування синхронним двигуном шахтного
електровозу**

Ми, що підписалися, заст. головного енергетика Курлов І.А, завідувач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту Кіровоградського національного технічного університету, к. т. н., проф. Плешков П. Г., асистент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту Кіровоградського національного технічного університету Савеленко І.В. склали цей акт про те, що з 01.03.2015 р. по 10.05.2015 р. на базі Інгульської шахти державного підприємства "Східний гірничо-збагачувальний комбінат" (Кіровоградський район, Кіровоградська обл.) були проведені виробничі випробування експериментального зразка системи автоматичного керування електроприводом шахтного електровозу.

Система автоматичного керування використовувалась для регулювання швидкості руху електровозу шляхом здійснення керуючих впливів на синхронний двигун з постійними магнітами, якими оснащено електровоз.

Для проведення виробничих випробувань на кафедрі електротехнічних систем та енергетичного менеджменту було виготовлено дослідний зразок автоматичного регулятора. Реалізація алгоритму роботи програмного забезпечення системи автоматичного управління виконана із використанням засобу розробки програмного забезпечення для однокристальних мікроконтролерів CodeVisionAVR. Для апаратної реалізації розробленої системи автоматичного управління було використано мікроконтролер типу Motorola 68HC912B32. У якості давачів струму було обрано трансформатори струму ТСП-0,66 75/5 у кількості 5 штук. Три трансформатори необхідні для підключення цифрового аналізатора мережі DMK-32 до живильної мережі, інші – для вимірювання струмових сигналів за допомогою осцилографа. Через інтерфейс RS-232 аналізатор мережі DMK-32 було з'єднано з персональним комп'ютером, за допомогою якого відбувалась архівація даних.

За результатами виробничих випробувань було встановлено:

1. Апаратно-програмна реалізація системи автоматичного керування на базі мікроконтролера Motorola 68HC912B32, підтвердила працездатність і ефективність застосування одержаних алгоритмів керування синхронним двигуном шахтного електровозу, що дозволило підвищити якість регулювання швидкістю електроприводу та енергетичних характеристик синхронного двигуна.

2. Експериментальні дослідження дозволили визначити дали змогу визначити кількісні показники динаміки електроприводу. Так, при застосуванні розроблених релейних законів керування електроприводом виявилось, що при тривалість перехідного процесу при запуску електровозу зменшується на 30 % в порівнянні з базовою САК. Виявлено нечутливість розробленої САК до зміни моменту навантаження двигуна електровоза, що спостерігаються в процесі його роботи.

3. Підтверджено доцільність впровадження розробленої системи автоматичного керування внаслідок високих енергетичних характеристик та простоти САК. Програмування і налаштування здійснюється на стадії інсталяції обладнання.

Заст. головного енергетика
Інгульської шахти «Схід ГЗК»



І. А. Курлов

Завідувач кафедри електротехнічних
систем та енергетичного менеджменту
КНТУ, кандидат технічних наук, професор



П. Г. Плешков

Асистент кафедри електротехнічних
систем та енергетичного менеджменту КНТУ



І. В. Савеленко

ДОДАТОК Г

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Заст. головного енергетика
 Інгульської шахти «Схід ГЗК»
 Карлов І.А.
 «_____» _____ 2015 р.
 Ід. код
 14314239



АКТ
впровадження результатів наукових досліджень

Даним актом підтверджується, що наукові та практичні результати, отримані в кандидатській дисертації асистента кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту Кіровоградського національного технічного університету Савеленка І.В. передані до Інгульської шахти державного підприємства "Східний гірничо-збагачувальний комбінат" і використовуються при автоматизації процесу регулювання синхронним двигуном на постійних магнітах шахтного електровозу.

Представлені результати наукових досліджень, а саме принципи роботи регуляторів струму та швидкості обертання двигуна в системі автоматичного керування рухом електровозу.

Практична цінність досліджень підтверджена реалізацією алгоритмів керування пристроями регулювання синхронного двигуна на постійних магнітах у програмному забезпеченні для мікроконтролеру типу Motorola 68HC912B32, що дало змогу покращити статичні та динамічні характеристики електроприводу на основі синхронного двигуна з постійними магнітами, а саме підвищити точність регулювання швидкості руху електровозу та зменшити тривалість перехідних процесів.

Очікуваний розрахунковий економічний ефект для запропонованої системи автоматичного управління пристроєм регулювання швидкості обертання синхронного двигуна з постійними магнітами на Інгульській шахті державного підприємства "Східний гірничо-збагачувальний комбінат" (Кіровоградський район, Кіровоградська обл.) складає 7,56 тис. грн. в рік на 1 електровоз. Термін окупності – 0,91 роки виявився меншим за нормативний (8 років), що свідчить про доцільність застосування запропонованої в роботі системи автоматичного управління.

В.о. начальника ділянки №6
 внутрішньо-шахтового транспорту



Гаділов Р.Р.