

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття
наукового ступеня кандидата технічних наук

Кіровоград-2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електротехнічних систем та енергетичного менеджменту Кіровоградського національного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор
Плешков Петро Григорович,
Кіровоградський національний технічний університет,
завідувач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Щокін Вадим Петрович,
Криворізький національний університет, завідувач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту;

доктор технічних наук, професор
Луценко Ігор Анатолійович,
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, професор кафедри електронних апаратів.

Захист відбудеться «07» жовтня 2016 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 23.073.02 у Кіровоградському національному технічному університеті за адресою: 25030, м. Кіровоград, пр. Університетський, 8.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Кіровоградського національного технічного університету за адресою: 25030, м. Кіровоград, пр. Університетський, 8.

Автореферат розісланий « 6 » жовтня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О. К. Дідик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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, 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 ремонті електрообладнання тягових установок витрачають десятки мільйонів гривень на рік.

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 за допомогою методів сучасної теорії управління, математичного моделювання, статистичної динаміки, теорії матриць, 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 ustalених 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 синхронного двигуна з постійними магнітами 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.

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: І Всеукраїнська науково-технічна конференції 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи та її зв'язок з науково-дослідними роботами. Сформульовано мету і основні задачі дослідження. Визначено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз відомих методів та технічних засобів автоматичного керування рухом тягової установки. В результаті проведеного аналізу встановлено, що при побудові САК швидкістю руху тягових установок використовується ті ж самі принципи, що і у випадку двигунів постійного струму. Проте, такий підхід не враховує ряд конструктивних особливостей, притаманних СДПМ, тому для підвищення рівня енергоефективності тягових установок необхідне удосконалення їх САК. Проведений аналіз методів синтезу САК рухом тягових установок який показав, що для вирішення задачі синтезу таких САК найдоцільніше застосовувати метод, заснований на мінімізації інтегрального квадратичного критерію.

В результаті проведеного аналізу методів визначення оптимальних керувань встановлено, що для вирішення задачі синтезу САК швидкістю руху тягової установки найдоцільніше застосувати метод, заснований на використанні властивостей функції перемикання. Перевагою даного методу над іншими є його відносна обчислювальна простота, насамперед за рахунок відсутності необхідності вирішення матричного алгебраїчного рівняння типу Ріккаті.

Таким чином, задача удосконалення систем автоматичного керування тяговими установками з метою підвищення їх енергоефективності є актуальною.

У **другому розділі** представлена загальна методика вирішення задач керування САК тяговими установками. Формалізовано задачу синтезу САК швидкістю руху тягових установок на основі СДПМ.

В сучасній теорії оптимального керування під час вирішення задачі синтезу оптимальних керувань широке розповсюдження отримали інтегральні квадратичні функціонали якості I_0 САК:

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

де $\mathbf{X}$ – вектор станів системи; $\mathbf{Q}$ – додатна визначена симетрична матриця вагових коефіцієнтів; $\mathbf{U}$ – вектор сигналів керування; $\mathbf{R}$ – додатна визначена симетрична матриця вагових коефіцієнтів.

Особливістю квадратичних критеріїв якості вигляду (1) є теоретична можливість необмеженого збільшення коефіцієнтів підсилення САК без втрати стійкості (при $\mathbf{R}=0$). В такому випадку критерій якості (1) має вигляд:

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

САК, в якій за критерій оптимальності прийнято критерій (2), є оптимальною за точністю керування; окрім того, така САК забезпечує досить швидкий і плавний характер перехідних процесів.

Оптимальне керування, що мінімізує інтегральний критерій якості (2), із урахуванням обмежень на сигнал керування $|\mathbf{U}_i(t)| \leq 1$, має вигляд:

$$\mathbf{U} = -\text{sign}[\psi(\mathbf{X})], \quad (3)$$

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

В роботі сформульована постановка задачі оптимального керування тяговою установкою із використанням критерію (2), яка виглядає наступним чином: на множині допустимих керувань $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^m$ необхідно знайти закон зворотного зв'язку $\mathbf{U} = -\text{sign}[\psi(\mathbf{X})]$, що утворює спільно з об'єктом керування стійку замкнену систему, яка забезпечує мінімум функціоналу якості (2) при переводі об'єкту керування із довільного початкового положення в кінцеве нульове.

Для отримання основного функціонального рівняння для функції перемикавання подамо вираз для швидкості проникнення, тобто проекції вектору відносної швидкості зображувальної точки на нормаль до перерізу поверхонь перемикавання $\psi(\mathbf{X}) = 0$, з урахуванням диференціальних рівнянь, що описують об'єкт керування:

$$\dot{\psi} = \mathbf{G}\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{G}\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{B}\mathbf{U}, \quad (4)$$

де $\mathbf{G} = \left\{ \frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{X}} \right\}$ – матриця, рядки якої є градієнтом функцій $\psi_i(\mathbf{X})$.

Рівняння (4) є основним функціональним рівнянням, що враховує властивості об'єкту керування та його каналів і може бути використане для визначення функції перемикавання і, як наслідок, сигнал оптимального керування. Це рівняння дає

можливість провести декомпозицію задачі, тобто скласти функціональне рівняння для функцій перемикавання кожного керуючого впливу.

Із рівняння (4) для i -ї поверхні перемикавання можна записати:

$$\dot{\psi}_i(\mathbf{X}) = \mathbf{G}_i \mathbf{A} + \mathbf{G}_i \mathbf{B} \mathbf{U}_i' + \mathbf{G}_i \mathbf{B} \mathbf{U}_i'' u_i, \quad (5)$$

де $\mathbf{G}_i = [\text{grad}(\psi_i)]^T$, $\mathbf{U}_i' = [u_1, u_2, \dots, u_i = 0, \dots, u_m]^T$, $\mathbf{U}_i'' = [0, 0, \dots, u_i = 1, \dots, 0]^T$.

Записавши рівняння (5) відносно i -го керування, отримаємо:

$$\dot{\psi}_i(\mathbf{X}) = \mathbf{G}_i \dot{\mathbf{X}} = f_i(\mathbf{X}, \mathbf{U}_i') + \phi_i(\mathbf{X}) u_i, \quad (6)$$

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

тоді закон керування набуде вигляду:

$$u_i = -\text{sign}[\psi_i(\mathbf{X})]. \quad (7)$$

Згідно отриманого функціонального рівняння (6), у разі рівності значень похідної i -ї функції перемикавання та швидкості проникнення i -ї поверхні перемикавання $\psi_i(\mathbf{X}) = 0$, i -ту функцію перемикавання визначають із лінійного диференційного рівняння першого порядку відносно функції перемикавання зі змінними коефіцієнтами.

Проаналізувавши властивості функцій перемикавання, можна зробити наступний висновок: для того, щоб керування було оптимальним за критерієм (2) при обмеженнях $|\mathbf{U}_i(t)| \leq 1$, необхідно і достатньо визначити матрицю коефіцієнтів $\mathbf{G}$, або структуру складових $f(\mathbf{X}, \mathbf{U}_i')$ і $\phi(\mathbf{X})$ основного функціонального рівняння (6).

Очевидно, що досліджувати рівняння (6) і отримати закон i -го оптимального керування (7) значно простіше, ніж вирішувати крайову задачу порядку $2n$ або вирішувати диференціальне рівняння Беллмана в частинних похідних.

В якості математичної моделі СДПМ було використано систему диференціальних рівнянь Парка-Горева, записаних для СДПМ з пусковими обмотками:

$$\begin{cases} u_d = i_d r_s + x_d p i_d + x_{dD} p i_D - \omega_R x_q i_q - \omega_R x_{qQ} i_Q; \\ 0 = i_D r_D + x_D p i_D + x_{dD} p i_d; \\ \begin{cases} u_q = i_q r_s + x_q p i_q + x_{qQ} p i_Q + \omega_R x_d i_d + \omega_R x_{dD} i_D + \omega_R x_{dM} I_{M0}; \\ 0 = i_Q r_Q + x_Q p i_Q + x_{qQ} p i_q; \end{cases} \\ J p \omega_R = i_q (x_d i_d + x_{dD} i_D + x_{dM} I_{M0}) - i_d (x_q i_q + x_{qQ} i_Q) - M_3. \end{cases} \quad (8)$$

де, u_d, u_q – складові напруги обмоток статора по осям d, q , В; i_d, i_q – складові струму в обмотці статора по осям d, q , А; r_s – активний опір статорної обмотки СДПМ, Ом; x_d, x_q – складові індуктивного опору статорної обмотки СДПМ по осям d, q , Ом; $p = d/dt$ – оператор диференціювання; x_{dD}, x_{qD} – складові індуктивного взаємного опору приведенного до статорної обмотки СДПМ по осям d, q , Ом; i_D, i_Q – складові струму еквівалентної пускової обмотки по осям d, q , А; ω_R – кутова (електрична) швидкість статора, рад⁻¹; r_D, r_Q – складові активного опору еквівалентної пускової обмотки СДПМ по осям d, q , Ом; I_{m0} – струм еквівалентної обмотки збудження, А; J – момент інерції рухомих частин, кг·м²; M_3 – момент зовнішніх сил, Н·м.

Виокремивши з системи рівнянь (8) складові, що характеризують перехресні зв'язки та зовнішні збурення, й перейшовши до рівнянь у відхиленнях, отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} u_d = i_d r_s + x_d p i_d + x_{dD} p i_D + f_1; \\ 0 = i_D r_D + x_D p i_D + x_{dD} p i_d; \\ u_q = i_q r_s + x_q p i_q + x_{qQ} p i_Q + \omega_R x_{dM} I_{m0} + f_3; \\ 0 = i_Q r_Q + x_Q p i_Q + x_{qQ} p i_q; \\ J p \omega_R = i_q x_{dM} I_{m0} + f_5. \end{cases} \quad (9)$$

де $f_1 = -\omega_R x_q i_q - \omega_R x_{qQ} i_Q = -\omega_R (x_q i_q + x_{qQ} i_Q)$; $f_3 = \omega_R x_d i_d + \omega_R x_{dD} i_D = \omega_R (x_d i_d + x_{dD} i_D)$, $f_5 = i_q (x_d i_d + x_{dD} i_D) - i_d (x_q i_q + x_{qQ} i_Q) - M_3$.

Використавши позначення параметрів незбуреного руху як $u_d^*, u_q^*, i_d^*, i_D^*, i_q^*, i_Q^*, \omega_R^*$ та ввівши на основі цих позначень нові змінні: $\eta_1 = I_d = i_d - i_d^*$; $\eta_2 = I_D = i_D - i_D^*$; $\eta_3 = I_q = i_q - i_q^*$; $\eta_4 = I_Q = i_Q - i_Q^*$; $\eta_5 = \Omega_R = \omega_R - \omega_R^*$, отримаємо систему диференціальних рівнянь незбуреного руху у відхиленнях:

$$\begin{cases} U_1 = \eta_1 (r_s + p x_d) + \eta_2 p x_{dD}; \\ 0 = \eta_1 p x_{dD} + \eta_2 (r_D + p x_D); \\ U_3 = \eta_3 (r_s + p x_q) + \eta_4 p x_{qQ} + \eta_5 x_{dM} I_{m0}; \\ 0 = \eta_3 p x_{qQ} + \eta_4 (r_Q + p x_Q); \\ 0 = \eta_3 x_{dM} I_{m0} - \eta_5 p J. \end{cases} \quad (10)$$

У запропонованій системі (10) прийнято позначення відхилень $U_1 = u_d - u_d^*$ та $U_3 = u_q - u_q^*$, які є додатковим сигналом керування U^* , що забезпечує бажаний рух з координатами $i_d = i_d^*, i_D = i_D^*, i_q = i_q^*, i_Q = i_Q^*, \omega = \omega^*$ незалежно від того, чим викликане дане відхилення.

Видно, що перші два рівняння системи (10) лінійно незалежні від решти. Зважаючи на це, в процесі аналізування режимів роботи СДПМ можна розглядати два незалежні канали по осях d і q , що описуються системами відповідних лінійних рівнянь.

Для тягових установок доцільніше застосовувати САК, побудовані за принципом підпорядкованого керування. За такого підходу САК розбивають на кілька контурів, кожен з яких містить свій регулятор. Кількість таких регуляторів дорівнює числу керованих змінних силової частини електропривода тягової установки.

Для синтезу функції перемикання регулятора струму i_d залишимо в системі (10) ті рівняння, до складу яких входить змінна стану i_d :

$$\begin{cases} p\eta_1 = \eta_1 \frac{-r_s x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} + \eta_2 \frac{r_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} + U_1 \frac{x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} = a_{11}\eta_1 + a_{12}\eta_2 + b_1 U_1; \\ p\eta_2 = \eta_1 \frac{r_s x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} + \eta_2 \frac{-r_D x_d}{x_D x_d - x_{dD}^2} = a_{21}\eta_1 + a_{22}\eta_2. \end{cases} \quad (11)$$

Виразимо η_1 із системи (11):

$$p \left(\eta_1 - \frac{1}{p} a_{11} \eta_1 - \frac{1}{p} \frac{a_{12} a_{21}}{(p - a_{22})} \eta_1 \right) = b_1 U_1. \quad (12)$$

Аналізування рівнянь (6) та (12) показало, що (12) є основним функціональним рівнянням відносно функції перемикання для змінної стану η_1 , при чому $f_i(\mathbf{X}, \mathbf{U}_i') = 0$, $\phi_i(\mathbf{X}) = b_1$.

Функція перемикання для регулятора струму i_d згідно (12) набуде вигляду:

$$\psi = \eta_1 - \frac{1}{p} a_{11} \eta_1 - \frac{1}{p} \frac{a_{12} a_{21}}{(p - a_{22})} \eta_1. \quad (13)$$

Для реальних змінних без врахування інтегральних складових в (13) та вважаючи $i_d^* = 0$, отримаємо сигнал оптимального керування струму i_d :

$$u_{id} = u_{ym} \operatorname{sign}(i_d^* - i_d) = 0,5 \operatorname{sign}(i_d). \quad (14)$$

Аналогічним чином отримано сигнали оптимального керування для інших змінних. Сигнал оптимального керування струму i_D в пусковій обмотці двигуна:

$$u_{iD} = u_{yidm} \operatorname{sign}(i_D^* - i_D) = 200 \operatorname{sign}(i_D). \quad (15)$$

Сигнал оптимального керування струму i_Q в пусковій обмотці двигуна:

$$u_{i_Q} = u_{ydm} \operatorname{sign}(i_Q^* - i_Q) = 220 \operatorname{sign}(i_Q^* - i_Q). \quad (16)$$

Сигнал оптимального керування струму статора i_q :

$$u_{i_q} = u_{yom} \operatorname{sign}(i_q^* - i_q) = 0,5 \operatorname{sign}(i_q^* - i_q). \quad (17)$$

Сигнал оптимального керування швидкості ω_R :

$$u_{\omega} = u_{ym} \operatorname{sign}\left(\omega_R^* - \omega - p \frac{x_Q x_q - x_{qQ}^2}{r_s r_Q} \omega\right) = 15 \operatorname{sign}(\omega_R^* - \omega + 1,03 p \omega). \quad (18)$$

На основі аналогічного підходу отримано сигнали оптимального керування для випадку СДПМ без пускових обмоток.

Сигнали оптимального керування дозволяють провести комп'ютерне моделювання динамічних та статичних режимів роботи тягової установки.

У **третьому розділі** дисертаційної роботи на основі отриманих в другому розділі сигналів оптимальних релейних керувань тяговою установкою розроблено структурні схеми САК з метою їх подальшої практичної реалізації. Для визначення ефекту від застосування розроблених структурних схем САК проведено імітаційне комп'ютерне моделювання.

На рис. 1 наведена структура функціональної схеми САК швидкістю руху тягової установки з СДПМ з пусковими обмотками.

Структура функціональної схеми САК рухом тягової установки з СДПМ з пусковими обмотками складається з таких основних блоків:

- «Red iD» – модель регулятора струму i_D , що відповідає сигналу керування (14);
- «SDPM» – модель СДПМ без пускових обмоток;
- «Red id» – модель регулятора струму i_d , що відповідає сигналу керування (14);
- «Red iQ» – модель регулятора струму i_Q , що відповідає сигналу керування (16);
- «Red iq» – модель регулятора струму i_q , що відповідає сигналу керування (17);
- «Red w» – модель регулятора швидкості обертання ротора СДПМ ω_R , що відповідає сигналу керування (18);
- «w_zad» – блок задання швидкості обертання ротора СДПМ;
- «M_zad» – блок задання механічного моменту навантаження;
- «Mech» – модель динаміки руху електровоза.

Результати комп'ютерного моделювання роботи САК рухом тягової установки на основі СДПМ з пусковими обмотками наведені у вигляді графіків на рис. 2 – 5.

Як видно з рис. 2-3 тривалість перехідного процесу зміни швидкості у випадку запропонованої в роботі моделі виявилась на 13,4 % меншою, ніж для базової моделі. До того ж, як видно з рис. 3 розроблена система, на відміну від базової, володіє астатизмом відносно моменту навантаження.

За результатами моделювання проведено їх статистичне оброблення для базової та розробленої моделей, що полягало у визначенні математичного очікування та середньоквадратичного відхилення.

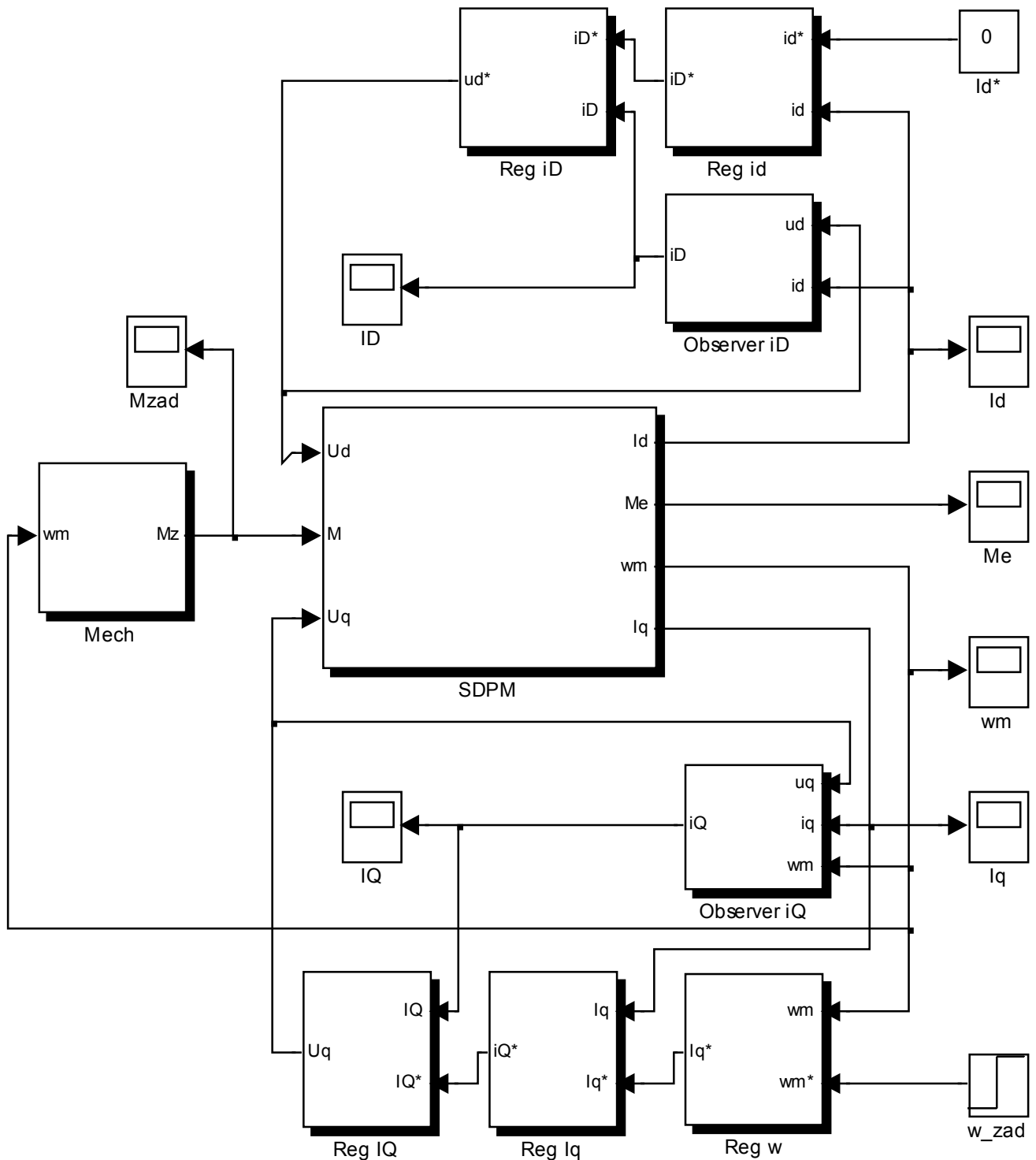


Рис. 1. Структура функціональної схеми САК швидкістю руху тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками

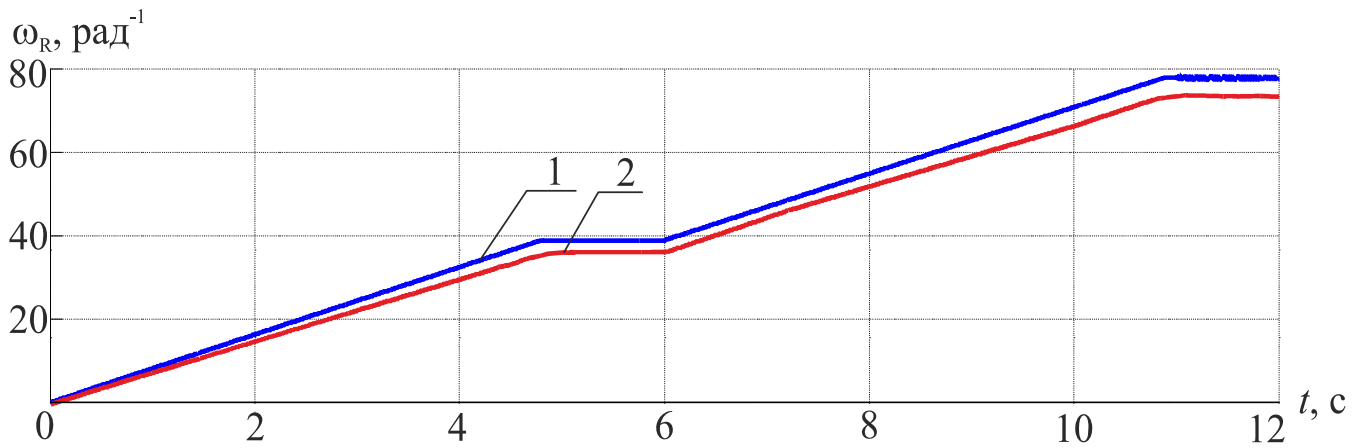


Рис. 2. Графіки зміни швидкості обертання ротора тягової установки для 1- розробленої та 2- базової моделі САК

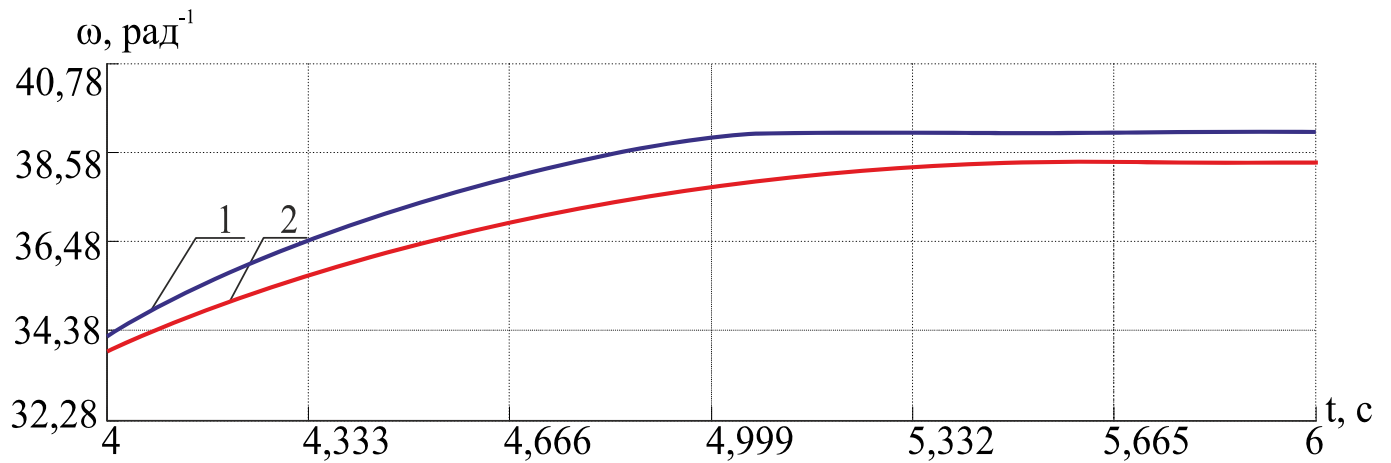


Рис. 3. Графіки зміни швидкості обертання ротора тягової установки для 1- розробленої та 2- базової моделі САК (збільшений)

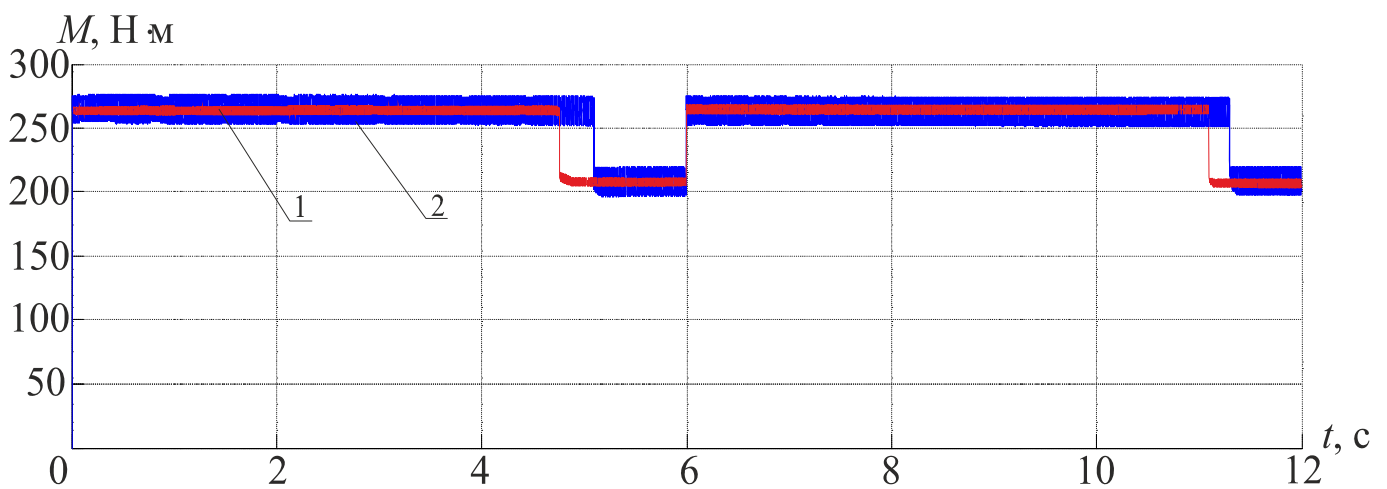


Рис. 4. Графіки зміни моменту для розробленої моделі САК
1- розроблена модель САК; 2 – базова модель САК

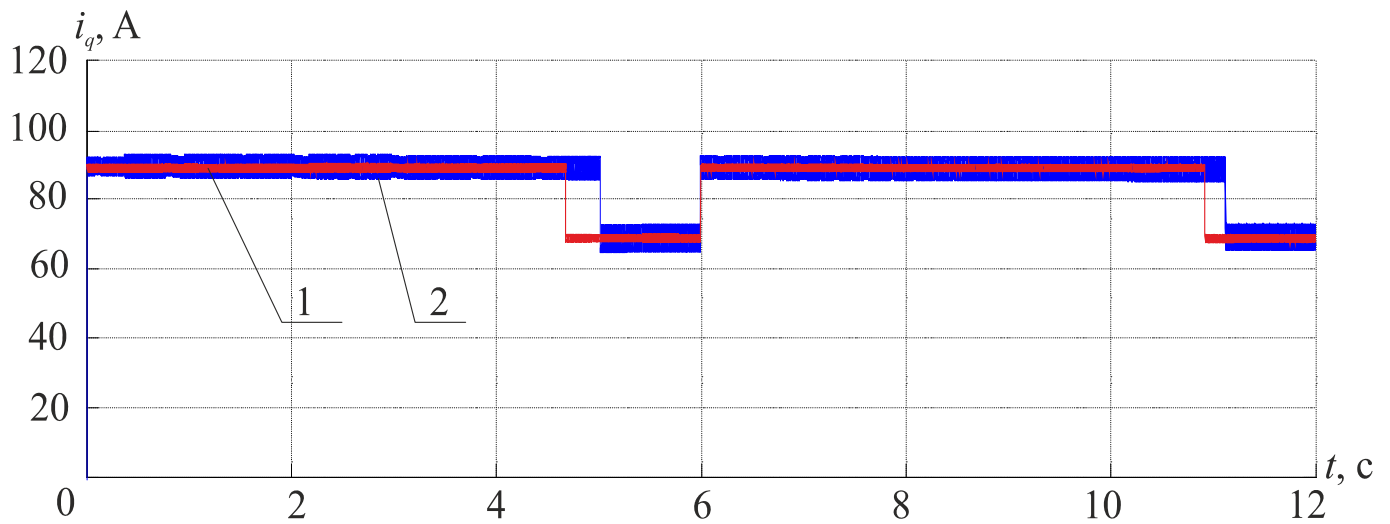


Рис. 5. Графіки зміни струму i_q для 1- розробленої та 2- базової моделі САК

Результати статистичного оброблення за варіантами моделювання, наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати статистичного оброблення за варіантами моделювання

№ з/п	Параметри	Математичне очікування, M	Середньоквадратичне відхилення, σ
Базова модель САК			
1.	i_d , А	0,015	0,012
2.	i_q , А	76,72	5,93
3.	ω , рад/с	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/с	38,77	0,066
8.	M , Н·м	257,99	9,01

Статистичне оброблення результатів моделювання САК швидкістю руху тягової установки (табл. 1) показало, що статична похибка швидкості обертання ротору (ω) відносно заданого сигналу – 39 рад⁻¹ в базовій моделі САК становить 3,6 %, а в розробленій - 0,6 %. Крім того, пульсації струмів i_d , i_q та моменту M у разі використання базової моделі САК більше, ніж в розробленій моделі САК рухом тягової установки на 33,34 %, 49,9 % та 12,92 % відповідно.

В четвертому розділі роботи для перевірки працездатності, а також для експериментального підтвердження отриманих в роботі теоретичних результатів та

результатів математичного моделювання роботи САК швидкістю руху тягової установки з СДПМ було вирішено наступні завдання:

1. Розроблено принципову схему та макет мікропроцесорної САК швидкістю руху тягової установки, в основу роботи якої покладені структурні схеми САК та сигнали оптимального релейного керування.

2. Розроблено лабораторний стенд для експериментального дослідження роботи запропонованої САК для тягової установки з СДПМ без пускових обмоток.

3. Проведено експериментальні дослідження роботи САК швидкістю руху тягової установки.

На рис. 6 наведено графіки швидкості обертання ротору СДПМ, отримані на експериментальній моделі та під час моделювання.

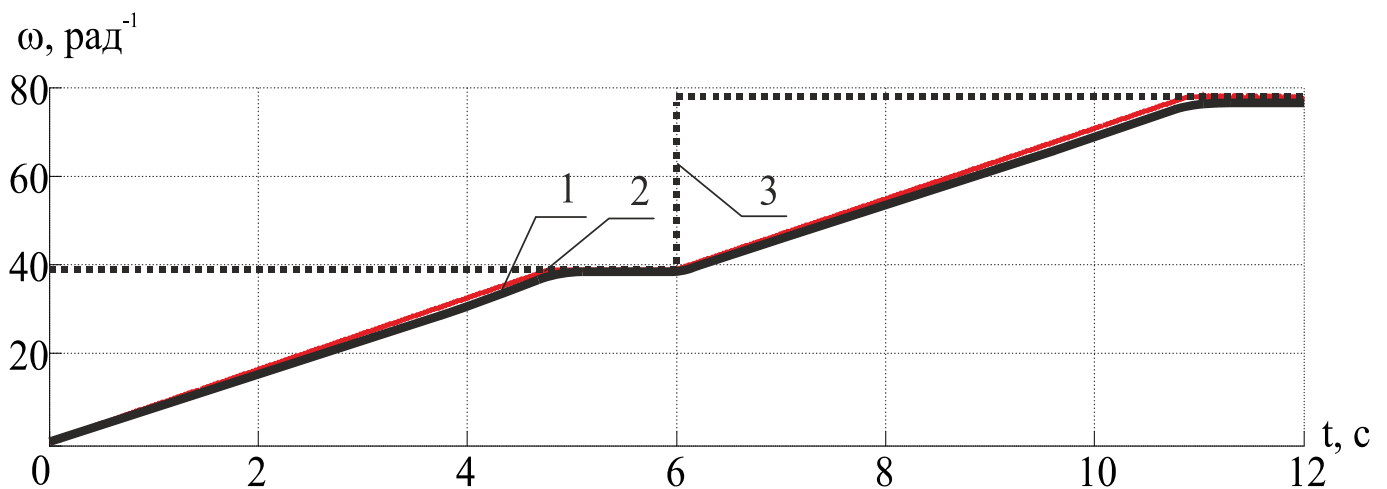


Рис. 6. Графіки швидкості обертання ротору СДПМ отримані під час моделювання (2) на експериментальній моделі (1) та заданого сигналу (3)

Результати статистичного оброблення, отримані під час комп'ютерного моделювання та на експериментальній моделі, зведемо до табл. 2.

Таблиця 2. Результати статистичного оброблення за варіантами моделювання

№ 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 табл. 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

Статистичне оброблення результатів моделювання САК швидкістю руху тягової установки (табл. 2) 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 результатами експерименту та комп'ютерного моделювання складає 4,25%, 2,5% та 3,1 % відповідно. Результати математичного аналізу результатів експерименту в цілому співпадають із результатами математичного моделювання, наведені в третьому розділі дисертації, що підтверджує працездатність розроблених САК рухом тягових установок.

Техніко-економічний аналіз підтвердив ефективність запропонованих у роботі САК в порівнянні з існуючими. Очікуваний розрахунковий економічний ефект для запропонованої в роботі САК швидкістю руху тягової установки складає 7568 грн. на рік, а термін окупності складає – 0,91 року.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі отриманих теоретичних і практичних результатів розв'язана актуальна наукова задача автоматизації керування тяговими установками СДПМ з метою підвищення їх енергоефективності функціонування за рахунок розроблення 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 перемикавання 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 перемикавання 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 перемикавання 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Плешков П.Г. Підвищення точності векторного керування синхронним двигуном з постійними магнітами/ П.Г. Плешков, І.В. Савеленко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка Технічні науки. Випуск 153 «Проблеми енергозбереження та енергозбереження в АПК України». - Харків: ХНТУСГ, 2014. – С. 104-106

2. Плешков П.Г. Математичні моделі синхронних двигунів на постійних магнітах для синтезу систем автоматичного керування високоефективними електроприводами / П.Г. Плешков, І.В. Савеленко, А.В. Некрасов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Випуск 2(91). – С. 26 – 35. (Журнал входить до міжнародних наукометричних баз *eLIBRARY, Index Copernicus, Ulrich's Web Global Serials Directory, Polish Scholarly Bibliography, Infobase Index, Inspec, Open Academic Journals Index, Google Scholar, CiteFactor, Scientific Indexing Services*).

3. 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 КНТУ. – Кіровоград: КНТУ, 2015. – Вип. 28. – С. 309 – 317.

4. 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. (Журнал індексується в наукометричних базах *Index Copernicus, Российский Индекс Научного Цитирования РИНЦ, WorldCat, Google Scholar* і включений у довідник періодичних видань бази даних *Ulrich's Periodicals Directory*).

5. І.В. Савеленко Математичне моделювання перехідних процесів в тяговій установці з синхронним двигуном на постійних магнітах за наявності пускових обмоток / І.В. Савеленко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету: Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – вип. 29. – Кіровоград: КНТУ, 2016. – С. 304 – 309.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. Савеленко І.В. К вопросу о реальности тепловых процессов тяговых электрических двигателях шахтных контактных электровозов/ І.В. Савеленко, П.Г. Плешков // Збірник праць «Молодь: наука та інновації» Матеріали І-ї Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених.- Д.: Держаний ВНЗ «НГУ», 2013. С. 400-401.

7. Савеленко І.В. Безконтактна система керування синхронним двигуном з постійними магнітами// Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами» 27 листопада 2014 року [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2014 р. С. 86-87.

8. Савеленко І.В. Підвищення точності векторного керування синхронним двигуном з постійними магнітами / І.В. Савеленко, П.Г. Плешков // Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне,

програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно - технічними та технологічними комплексами», 25 листопада 2015 р. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2015 р. – С. 77 – 79.

9. Плешков П.Г. Розробка та дослідження системи автоматичного керування електроприводом з СДПМ / П.Г. Плешков, І.В. Савеленко // Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві: міжн. наук.- практ. конф., Кіровоград, 21-22 жовтня 2015 р.: зб. тез доп. – Кіровоград: КНТУ, 2015. – С. 79 – 81.

10. Савеленко І.В. Релейно-векторна система керування синхронними двигунами мобільних установок. Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві”. – Кіровоград: КНТУ, 2015. – С. 89.

АНОТАЦІЯ

Савеленко І. В. Автоматизація процесу керування тягових установок з синхронними двигунами на постійних магнітах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування. – Кіровоградський національний технічний університет, Кіровоград, 2016.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової задачі з розробки теорії аналізу та синтезу релейних законів керування для тягових установок, що дозволило підвищити енергетичну ефективність роботи тягових електровозів.

Проведений аналіз методів вирішення задачі синтезу САК тягової установки на основі СДПМ встановив, що найдоцільнішим підходом до синтезу оптимальних релейних керувань для електроприводів на основі СДПМ є підхід, заснований на використанні властивостей функцій перемикання оптимальних керувань.

Формалізовано задачі керування оптимальними релейними регуляторами на основі використання властивостей функцій перемикання оптимальних керувань, що дозволило підвищити енергетичну ефективність роботи тягових установок на основі СДПМ та покращити їх статичні і динамічні характеристики.

Створено комп'ютерні моделі систем автоматичного керування тяговим електровозом, за допомогою яких проведено оцінку ефективності роботи запропонованих систем автоматичного регулювання шляхом комп'ютерного моделювання. Проведено експериментальні дослідження роботи розробленої системи автоматичного керування. Результати комп'ютерного моделювання, експериментальні дослідження та техніко-економічна оцінка підтвердили

ефективність та доцільність використання запропонованих у роботі релейних регуляторів для САК тягових установок.

Ключові слова: система автоматичного керування, релейний регулятор, функція перемикавання, тяговий електропривод.

АННОТАЦИЯ

Савеленко И. В. Автоматизация процесса управления тяговых установок с синхронными двигателями на постоянных магнитах. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 - Автоматизация процессов управления. - Кировоградский национальный технический университет, Кировоград, 2016.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи по разработке теории анализа и синтеза релейных законов управления для тяговых установок, что позволило повысить энергетическую эффективность работы тяговых электровозов.

Самым распространенным типом двигателей, которые используются в тяговых установках нашей страны, являются двигатели постоянного тока. Использование тяговых электроприводов переменного тока сдерживалось такими их недостатками, как необходимость использования в качестве источника питания частотного преобразователя напряжения, относительно большая стоимость и сложность систем автоматического управления (САУ).

Одним из путей улучшения энергетических показателей тяговых установок является совершенствование их САУ. Ведь применение более совершенных САУ тяговых установок, направленных на улучшение динамических характеристик электропривода, приводит к снижению уровня потребления электрической энергии. Данный эффект достигается путем снижения уровня максимальных токов в обмотках статора за счет сокращения продолжительности переходных процессов при пуске электропривода.

Проведенный анализ методов решения задачи синтеза САУ электроприводом на основе СДПМ установил, что наиболее целесообразным подходом к синтезу оптимальных релейных управлений для электроприводов на основе СДПМ является подход, основанный на использовании свойств функций переключения оптимальных управлений.

Формализованы задачи управления оптимальными релейными регуляторами на основе использования свойств функций переключения оптимальные управления, что позволило повысить энергетическую эффективность работы тяговых установок на основе СДПМ и улучшить их статические и динамические характеристики. Получены функции переключения для СДПМ, позволили реализовать оптимальное управление регуляторами токов и скорости и соответственно повысить

быстродействие работы САУ тяговой установки.

Созданы компьютерные модели систем автоматического управления тяговым электровозом, с помощью которых проведена оценка эффективности работы предложенных систем автоматического регулирования путем компьютерного моделирования. Проведены экспериментальные исследования работы разработанной системы автоматического управления. Результаты компьютерного моделирования, экспериментальные исследования и технико-экономическая оценка подтвердили эффективность и целесообразность использования предложенных в работе релейных регуляторов для САУ тяговых установок.

Ключевые слова: система автоматического управления, релейный регулятор, функция переключения, тяговый электропривод.

THE SUMMARY

Savelenko I.V. Automation of traction control systems with synchronous motors based on permanent magnets. - Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.13.07 - Automation of control. - Kirovohrad National Technical University, Kirovohrad, 2016.

The thesis is devoted to solving actual scientific task of developing the theory analysis and synthesis relay laws traction control systems, thus improving the energy efficiency of electric traction.

The analysis methods for solving the problem of synthesis of ACS-based electric SMPM found that the most appropriate approach to the synthesis of optimal controls for electric relay based PMSM approach is based on a switching properties of optimal control functions.

Formalized problem optimal control relay regulators on the basis of the properties of functions optimal switching control, thus improving the energy efficiency of traction traction units based PMSM and improve their static and dynamic characteristics.

The computer model of automatic control by electric locomotive traction through which assessed the effectiveness of the proposed system of automatic control by computer simulation. Were done experimental study of the developed system of automatic control. The results of computer modeling, experimental investigation and feasibility study confirmed the effectiveness and feasibility of the proposed relay in the controls for ACS traction systems.

Keywords: automatic control system, relay controller, function switch, traction electric drive.

Підписано до друку 05.09.2016. Формат 60х84 1/16. Папір офсетний.
Надруковано на різнографі. Умов. друк. арк. 0,9.
Зам. № 191. Тираж 100 прим.

© РВЛ КНТУ, м. Кіровоград, пр. Університетський, 8.
Тел. (0522) 390-541, 559-245, 390-551.