

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

БОРОВИК Роман Олексійович



УДК 621.926.5

**СИСТЕМА КОМПЕНСАЦІЇ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ СИНХРОННИХ
ДВИГУНІВ ПРИВОДА МЕТАЛУРГІЙНИХ МАШИН**

Спеціальність 05.09.03 – “Електротехнічні комплекси та системи”

**Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук**

Дніпро - 2026

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі електропривода в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент **Бородай Валерій Анатолійович**, доцент кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Чорний Олексій Петрович**, професор кафедри систем автоматичного управління та електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України;

кандидат технічних наук, доцент **Назарова Олена Сергіївна**, доцент кафедри електропривода та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Захист відбудеться «14» квітня 2026 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при НТУ «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19, корпус 1, ауд. 148.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці НТУ «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.

Автореферат розіслано “___” березня 2026 року

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
Д 08.080.07,
д.т.н., професор



А.В. Бубліков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ведення бойових дій на території України спричинило значне руйнування промислового комплексу та інфраструктури комунального господарства. Відновлення об'єктів у короткостроковій перспективі зумовить необхідність забезпечення їх значною кількістю будівельних матеріалів. Очевидно, що виконання ремонтних робіт потребуватиме забезпечення матеріалами, як-то конструкційний прокат та труби.

Труби мають низку суттєвих переваг: відносно невелику вагу, забезпечення високої жорсткості конструкцій та простота монтажу. Крім того, вони незамінні для транспортування токсичних, горючих і агресивних рідин та газів й за умов значних коливань температури та високого тиску. Слід також зазначити, що недолік металевих труб – висока корозійність – в умовах сьогодення нівелюється застосуванням полімерного покриття.

Для будівництва та безперервного транспортування рідинних та газоподібних речовин переважно застосовують безшовні труби. Технологія їх виготовлення передбачає прокат на спеціалізованих автомат-станах. Якість готової продукції регламентується низкою факторів: різностінність, відповідність стандартам повздовжнього та поперечного профілю, точність зовнішнього діаметру, швидкісні режими, динамічні навантаження, які зумовлені різними причинами, зокрема пов'язаними з головним приводом.

Останнім часом досить гостро постало питання енергоефективності та енергозбереження. З огляду на це, замість двигунів постійного струму та асинхронних двигунів у промислове виробництво, де потужності приводів перевищують 1 МВт, активно впроваджуються синхронні двигуни з ККД 94%...98%. Крім того, їхня можливість регулювання коефіцієнта потужності дозволяє одночасно компенсувати реактивну потужність та успішно виконувати технологічне завдання.

Аналіз реконструкції автомат-станів такого типу засвідчив проблему, пов'язану з експлуатацією приводів, що мають абсолютно жорстку механічну характеристику. Ця характеристика унеможливує застосування кінетичних накопичувачів енергії, що призводить до суттєвого зростання ударних динамічних навантажень у режимах втягування заготовок у валки. Наслідком такого стану є руйнування ізоляції обмоток якоря та ротора машини, що призводить до необхідності капітальних ремонтів і спричиняє тривалі простой високопродуктивного обладнання.

Таким чином, **наукова задача** дисертаційної роботи полягає у встановленні передумов нівелювання екстремального струму якоря у режимах ударних механічних збурень при комплексному врахуванні навантаження та пружності з'єднувальної муфти завдяки вибору параметрів регулятора і оптимального рівня напруги системи збудження синхронного двигуна прокатних станів, які відрізняються способом керування приводом, жорсткістю механічної характеристики та відсутністю маховика, що дозволить уникнути руйнування магнітної системи електричної машини.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження за темою дисертації виконано в межах науково-дослідної роботи «Розробка рекомендацій щодо експлуатації синхронного двигуна головного приводу автомат-стану прокатки труб ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ»» (згідно з договором №1120/030383 від 04.12.2012 р.) за участі здобувача як відповідального виконавця роботи.

Основна мета дослідження полягає в обґрунтуванні режимів безаварійної роботи синхронного двигуна привода автомат-стану цільнотягнутих труб в умовах різко змінного навантаження шляхом мінімізації динамічних зусиль в обмотках двигуна, що забезпечує підвищення механічної стійкості та захист конструкції електромеханічних систем.

Для досягнення мети поставлено та вирішено такі задачі:

– встановити фактичні причини аварійності автомат-стану трубо-прокатного агрегату і обґрунтувати перспективний напрям удосконалення системи збудження синхронного двигуна;

– розробити спосіб та математичну модель для визначення оптимальних параметрів форсування і пружності електромеханічної системи автомат-стану трубопрокатного агрегату, а також дослідити на її основі закономірності впливу отриманих показників оптимізації на ступінь демпфування динамічних зусиль в обмотках синхронного двигуна;

– розробити адаптовану модель синхронного двигуна для визначення параметрів регулятора та способу керування системи збудження з використанням рівня форсування, отриманого під час розв'язання оптимізаційної задачі;

– узагальнити результати досліджень і надати рекомендації щодо вибору параметрів форсування й системи автоматичного керування збудженням.

Об'єктом дослідження у роботі є електромагнітні і електромеханічні процеси у режимах різко змінного навантаження синхронного двигуна з використанням оптимальних налаштувань електричних і механічних складових, уточнення способу керування і параметрів регулятора системи збудження, спроможних демпфувати ударні навантаження.

Предметом дослідження є властивості системи збудження та спосіб її керування, що впливають на параметри компенсації різко змінних навантажень синхронного двигуна металургійних механізмів в перехідних та сталих режимах.

Методи дослідження. Під час виконання дисертаційної роботи і розв'язання поставлених задач використовувались: математичні методи розв'язання оптимізаційних задач – для визначення кількісних параметрів жорсткості пружної муфти, рівня форсування збудження і часу завчасного збільшення напруги збудження; методи теорії автоматичного керування – для синтезу структурних моделей синхронного двигуна і визначення параметрів регулятора та часових інтервалів завчасного збільшення напруги живлення збудження синхронного двигуна; методи регресійного аналізу – для отримання моделей залежності параметрів оптимального налагодження від рівня навантаження; метод Рунге-Кутта – розв'язання системи диференціальних рівнянь – для оцінки динамічних властивостей синхронного двигуна; методи апроксимації та кубічно-кускової інтерполяції – для визначення залежності

параметрів форсування і системи регулювання як функції поточного навантаження і характеристик конкретного двигуна. Перевірку основних положень і результатів теоретичних досліджень здійснено шляхом комп'ютерного моделювання та досліджень на виробничому автомат-стані ТПА-350.

Основні наукові положення та результати, їх новизна.

Наукові положення:

1. Мінімум електродинамічних зусиль в обмотках синхронного двигуна забезпечується оптимальною амплітудою форсування збудження до початку накиду навантаження з тривалістю досягнення сталого значення не менше трьох постійних часу обмотки.

2. Мінімальна тривалість перехідного процесу струму якоря у сталому режимі прокатки забезпечується особливими налаштуваннями ПІ-регулятора збудження, параметри якого визначаються за модульним оптимумом з коефіцієнтом підсилення інтегральної ланки 21%...25% від його розрахункового значення.

Наукові результати досліджень та їх новизна

У роботі вирішено актуальну наукову задачу встановлення закономірностей впливу рівня форсування напруги та параметрів регулятора системи збудження на рівень електромагнітних зусиль в обмотках синхронних двигунів систем прокатки цільнотягнутих труб у режимах різко змінних навантажень. Це полягає в тому, що:

1. *Вперше* отримано аналітичні залежності поліноміального виду, які, на відміну від відомих, враховують поточний рівень навантаження та тип серійного синхронного двигуна, і дають змогу визначати раціональні параметри автоматичної системи регулювання збудження.

2. *Вперше* визначено екстремум коефіцієнта підсилення інтегральної ланки ПІ-регулятора в інтервалі 21%...25% від значення, розрахованого за модульним оптимумом, за умови номінального різко змінного навантаження та відсутності коливальності системи.

3. *Вдосконалено* підхід до оцінки рівня перепаду струму якоря синхронного двигуна при ударному прикладанні навантаження, що поєднує критерії керування збудженням у режимі максимального збурення та коливальності сталого режиму. Критерії використовуються для визначення кратності номінальної напруги завчасного форсуванням збудження в режимі неробочого ходу та регулювання пружності з'єднувальної муфти, рівні яких залежать від навантаження і визначаються розв'язанням оптимізаційної задачі за критерієм мінімуму середньоквадратичного відхилення струму якоря від його середнього значення в робочому режимі.

4. *Вдосконалено* математичну динамічну модель синхронного двигуна привода металургійних машин, яка поєднує методи алгебраїчного та структурного моделювання, оптимізаційного підходу та визначення перехідної функції регулятора системи збудження, що дало змогу дослідити вплив параметрів електромеханічної системи на показники перехідного процесу в обмотках серійної електричної машини.

5. Отримав подальший розвиток математичний метод розрахунку перехідних електромеханічних процесів в частині визначення параметрів регулятора збудження з врахуванням різко змінних навантажень в системах привода металургійних машин, заснований на застосуванні систем рівнянь Парка-Горєва. Це дозволило здійснити комплексне моделювання процесів зміни струмів в обмотках потужних синхронних двигунів привода автомат-станів з врахуванням рівнів електромеханічних збурень, що підвищує конструктивну стійкість двигуна до наслідків дії ударних навантажень.

Обґрунтованість та достовірність. Наукові положення та результати досліджень підтверджуються використанням апробованих моделей синхронних двигунів, коректним застосуванням класичних методів теоретичної електротехніки і теорії електричних машин, обґрунтованим вибором вхідних положень і прийнятих припущень під час математичного моделювання, застосуванням теоретично визначеної структури синхронного двигуна для отримання динамічних перехідних процесів, а також ефективністю розробленого методу оптимізації параметрів пружності муфти та форсування напруги живлення обмотки збудження двигуна. Якість тренду визначення параметрів системи керування оцінена коефіцієнтами детермінації, де їх значення становить не менше 0,9.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

Практичне значення одержаних результатів полягає у суттєвій мінімізації перепаду струму якоря в режимі ударного прикладання навантаження, що, як наслідок, знижує динамічні зусилля, які руйнують магнітну систему синхронного двигуна привода металургійних машин.

Крім того, практичне значення результатів визначається створенням програмного забезпечення для моделювання, прогнозування та оцінки рівня динамічних зусиль в обмотках двигуна, яке дає змогу визначати раціональні параметри системи збудження в режимах демпфування максимального збурення та коливальності сталого навантаження.

1. Розроблено метод визначення раціональних значень кратності напруги форсування збудження за критерієм мінімуму середньоквадратичного відхилення поточного струму якоря від його середнього за врахування механічного навантаження для узагальненого ряду унікальних синхронних двигунів, для яких отримано лінії тренду з наданням рекомендацій щодо вибору параметрів.

2. Вдосконалено метод визначення коефіцієнтів підсилення задавача інтенсивності, пропорційної та корегованої інтегральної ланок ПІ-регулятора системи збудження зазначеного ряду двигунів та найважчих умов експлуатації.

3. Запропоновано спосіб керування, що забезпечується форсуванням напруги збудження до початку накиду навантаження з тривалістю досягнення сталого значення не менше трьох постійних часу та його вимкнення після завершення першого періоду коливань, при цьому залишкова коливальність обмежується за рахунок увімкнення ПІ-регулятора повздовжньої складової струму якоря з корегованою інтегральною ланкою.

4. Результати дисертаційної роботи прийнято до впровадження для реалізації алгоритмів у цифрових системах керування тиристорними збудниками синхронних двигунів у проектній практиці НВП ТОВ «СИЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА» (м. Дніпро), а також на підприємстві ТОВ «Інтерпайп Ніко Тьюб» (м. Нікополь), де матеріали дисертаційної роботи планується використовувати під час модернізації великих синхронних приводів прокатних станів цільнотягнутих труб.

Очікуваний розрахунковий економічний ефект від впровадження нового алгоритму становить близько 6 977 022 грн за терміну окупності 39 місяців.

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно сформульовано мету й задачі дослідження, наукові положення, визначено їхню новизну, висновки та рекомендації. Усі теоретичні й експериментальні дослідження, а також оброблення та аналіз отриманих результатів виконано за безпосередньої участі автора як відповідального виконавця відповідних розділів науково-дослідних тем. Особисто здобувачем: визначено функцію мети та інтервали зміни факторів впливу, а також досліджено їхній вплив на кількісні значення параметрів класичної системи за умови мінімуму пікового рівня струму якоря при накиді різко змінного навантаження; здійснено аналітичне визначення параметрів моделі синхронного двигуна, адаптованої для регулювання напруги контуру збудження; досліджено рівень коливальності електромеханічної системи за стандартного і нового модернізованого метода керування збудженням.

Апробація результатів дисертації. Основні положення, наукові та практичні результати доповідалися і були схвалені на міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми науки, освіти і технологій в XXI столітті: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Полтава: ЦФЕНД, 2025) та XIII Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Молодь: наука та інновації» (Дніпро. НТУ «ДП». 11–14 листопада 2025 року.).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в 10 наукових роботах, із яких 5 – у фахових виданнях, 1 – у виданні, що індексується Web of science, 2 – матеріалах конференцій, 1 – патент України і 1 – патент на корисну модель.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 83 найменувань на 10 сторінках та 8 додатків на 49 сторінках; містить 26 рисунків і 11 таблиць. Загальний обсяг роботи 162 сторінки, з них 112 – основний текст.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та основні наукові й практичні задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження. Викладено наукові положення, що виносяться на захист, сформульовано наукові результати та визначено практичну цінність роботи. Показано рівень апробації результатів роботи, кількість публікацій за темою та особистий внесок автора.

У першому розділі обґрунтовано перспективну потребу України в продукції металургійного виробництва, зокрема конструкційного та трубного

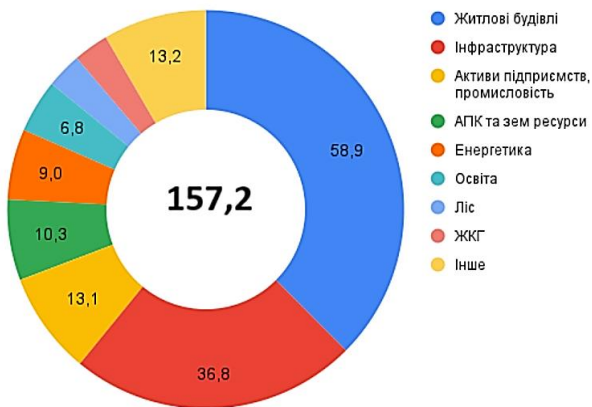


Рисунок 1 – Прямі збитки за секторами, \$ млрд

прокату, для відбудови промислових і цивільних споруд, пошкоджених унаслідок військових дій, а також ремонту та заміни міських інженерних комунікацій, пов'язаних з амортизаційним зносом та зростанням кількості під'єднаних абонентів.

Показано переваги металевих труб порівняно з полімерними щодо спроможності перших витримувати значний зовнішній або внутрішній тиск та високу температуру транспортованих рідин.

Розглянуто типи прокатних агрегатів, із зазначенням особливостей їх конструктивного виконання та технології їх роботи. Трубопрокатні агрегати повздожньої прокатки з короткою оправкою, що застосовують на другому етапі виготовлення безшовних труб, характеризуються незмінною швидкістю обертання головного приводу. З цією метою в електромеханічних системах такого типу застосовують синхронні двигуни, яким притаманні високі енергетичні показники та абсолютно жорстка механічна характеристика, що може спричинити виникнення значних динамічних зусиль в обмотках двигуна під час дії ударних навантажень.

Здійснено первинне вивчення об'єкту дослідження, де отримані дані (рис. 2) свідчать про циклічне ударне навантаження, що зумовлює виникнення короткочасних перехідних процесів в обмотках синхронного двигуна. Водночас відомо, що тривале збільшення струму в обмотках електричних машин небезпечно своєю тепловою та механічною дією.

Слід також звернути увагу на коливальний характер струму під час прокату, тобто зусилля періодично зростає та зменшується. Це, при нещільному кріпленні бандажів лобових і клинів пазових частин, може спричинити рух провідників і, як наслідок, стирання ізоляції.

Актуальність проведення наукових робіт також обґрунтована за допомогою оцінки економічних втрат на проведення ремонтних робіт різного типу. З цією метою проаналізовано вартісні показники ліквідації аварій, які наведені у спеціальній довідці компанії Інтерпайп Ніко Тюб.

Несистемний характер капітальних ремонтів, поряд із щомісячними планово-попереджувальними ремонтами, свідчить про недостатню якість обслуговування обладнання, що, своєю чергою, призводить до зниження надійності привода загалом, яка додатково послаблюється впливом ударного характеру навантаження.

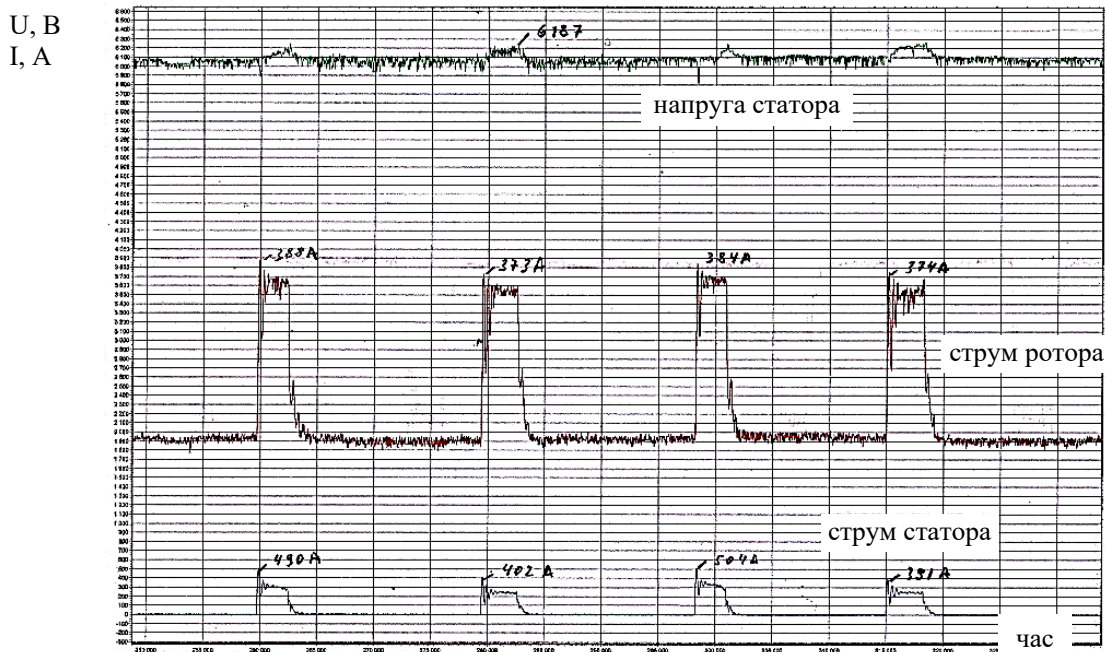


Рисунок 2 – Напруга мережі, струм якоря та збудження під час прокату в автомат-стані ТПА-350

Відповідно до даних сайту Мінфіну станом на червень 2025 р. інфляція становить 383%, порівняно з груднем 2014 р. (100%) (див. табл. 1). Отже, використовуючи дані щодо щомісячного рівня інфляції, можна привести вартість усіх ремонтів до поточного періоду.

Загальна приведена вартість за вказаний період у загальному зростає в 2,5 рази і склала 16 645 840 грн.

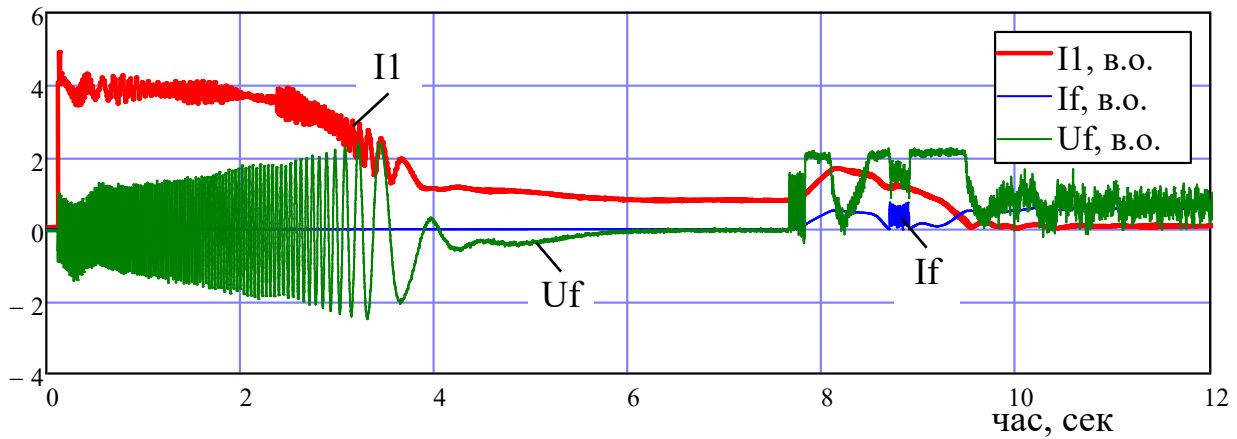
Таблиця 1 – Приведення цін до поточного періоду

Період	% Індексу інфляції	-%	Коефіцієнт приведення ціни до 06.2025	Тип ремонту	
				ротор	статор
12.2014	100	383	3,83		
07.2018	174,2	308,8	3,088	КР	СР
04.2020	212,2	270,8	2,708	КР	КР
07.2021	233,7	249,3	2,493	СР	СР
10.2024	317,5	165,5	1,655	ЛР	
02.2025	323,5	159,5	1,595	СР	
06.2025	383	100	1		

КР – капітальний ремонт, СР – середній ремонт, ЛР – легкий ремонт (в умовах заводу)

У другому розділі наведено результат експериментального моніторингу режимних параметрів електромеханічної системи приводу реверсивного автомат-стану, що оснащений синхронним двигуном, який працює в тривалому режимі з періодичним ударним навантаженням.

Аналіз енергетичних параметрів роботи головного приводу автомат-стану здійснювався за даними, наданими підприємством, та за результатами дослідження шляхом безпосередньої реєстрації фактичних даних з використанням системи контролю параметрів електроприводу (СКПЕП) в режимах запуску та прокатки труби (див. рис. 3).



I_1 – діючий струм якоря; I_f , U_f – напруга і струм збудження.

Рисунок 3 – Пуск та один прохід заготовки повз прокатну кліть

Оцінка результатів роботи засвідчила, що пуск є цілком задовільним для синхронних двигунів такого класу й потужності; під час втягування заготовки у валки кліті струм статора становить 1,72 номінального значення, а під час прокатки практично дорівнює номінальному. Система збудження забезпечує динамічну стійкість форсуванням напруги, проте велике значення постійної часу обмотки вносить суттєве запізнення в цей процес (див. рис. 4).

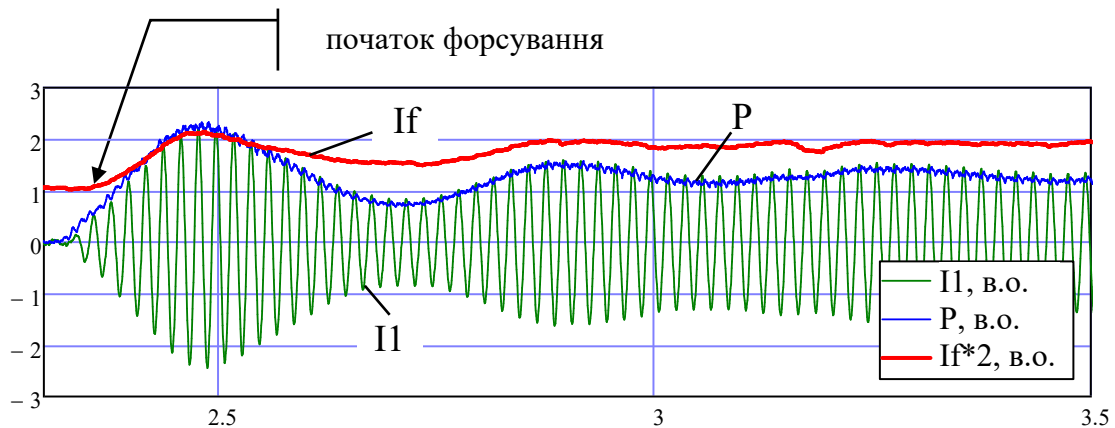


Рисунок 4 – Форсування струму збудження за ударного навантаження

Режим роботи двигуна з ударним прикладанням навантаження головного приводу реверсивного автомат-стану зумовлює особливі вимоги до системи керування електроприводом, зокрема щодо стабільності швидкості під час навантаження та забезпечення динамічного запасу стійкості.

Водночас високоінтенсивний режим роботи спричиняє значні електродинамічні навантаження на обмотки двигуна, що може призводити до його передчасного виходу з ладу внаслідок руйнування ізоляції та подальшого пробою витків обмоток. Тому розробка способу керування збудженням синхронного двигуна, який працює в режимі ударних навантажень та забезпечує виконання технологічних вимог прокатки, водночас зменшуючи вплив цих навантажень на обмотки двигуна, є актуальною науковою задачею.

У третьому розділі здійснено критичний аналіз відомих способів керування збудником синхронних двигунів та механічні засоби компенсації ударних навантажень. Встановлено, що жорсткість механічної характеристики

СД не дозволяє використовувати маховик як демпфер коливань, однак ця можливість виникає при введенні в кінематичну схему пружної муфти. Водночас значне зниження пружності може спричинити додаткову неприпустиму коливальність, що призведе до непрацездатності системи.

Аналіз роботи системи головного електропривода автомат-стана показав, що різке прикладання навантаження до валу СД із ослабленим полем викликає стрімке зростання струму індуктора, що, своєю чергою, призводить до значних електродинамічних зусиль в обмотках і супроводжується рухом лобових частин обмоток. Одним із способів зменшення динамічних зусиль є завчасне збільшення струму індуктора, що зменшує різницю струмів до та після прикладання навантаження.

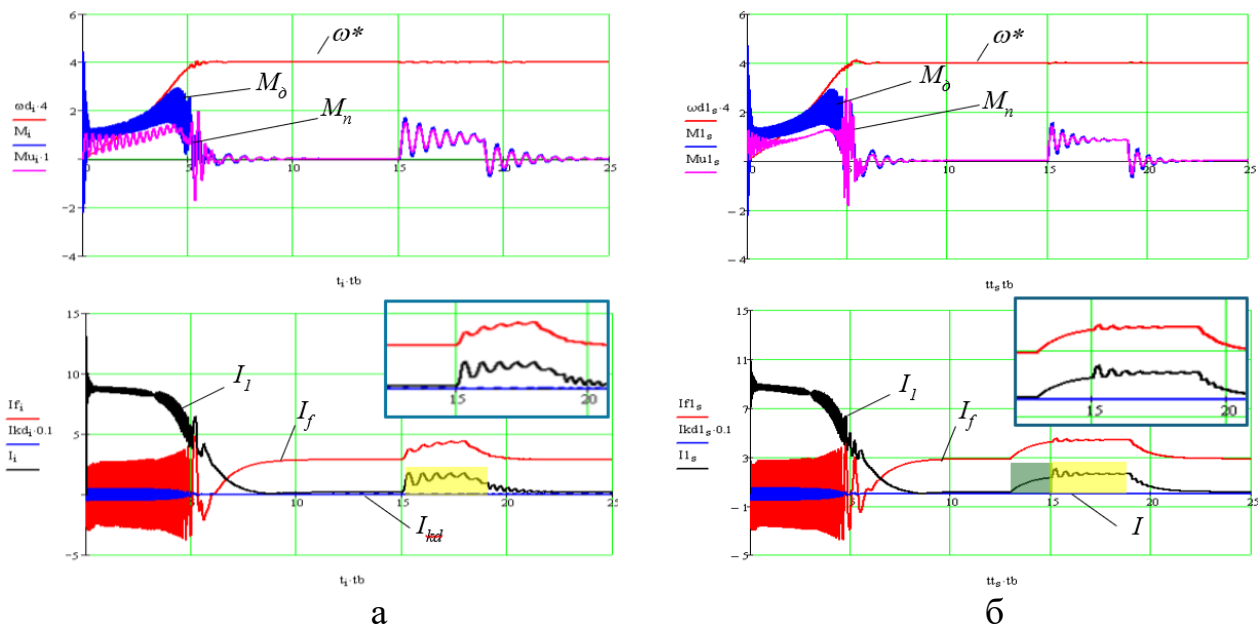
На основі цих факторів сформульовано задачу пошуку оптимальних значень жорсткості муфти та кратності завчасного форсування в функції мети – мінімум середньоквадратичного відхилення від сталого значення струму статора під час накиду номінального навантаження.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(I_i - I_{ст})^2}{n-1}}$$

де $I_i, I_{ст}$ – миттєве і стале значення струму якоря, n – число дискрет.

Експериментально встановлено межі регулювання факторів оптимізації: кратність форсування збудження – 1...1,75 номінального значення, обмежена технічною можливістю збудника; межі кратності жорсткості муфти – 1...4, що лімітується максимумом коливальності системи; а можливий інтервал часу завчасного ввімкнення форсування – 0...3 секунди до початку навантаження, що визначається п'ятьма постійними часу обмотки збудження.

Аналіз результатів досліджень (див. рис. 5) параметрів електромеханічної системи наочно продемонстрував їхню залежність від рівня навантаження.



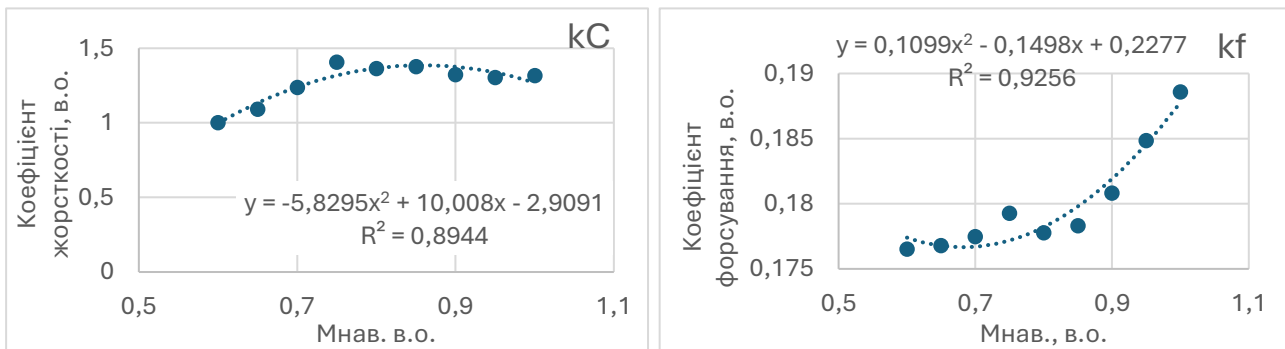
I_l, I_f, I_{kd} – струми індуктора, збудження і демпферної обмотки, в.о.; M_o, M_n – електромагнітний і пружний момент, в.о.; ω – кутова швидкість обертання двигуна; в.о.

Рисунок 5 – Ілюстрація до розв'язання оптимізаційної задачі з використанням стандартних (а) та оптимізованих (б) параметрів

Очевидно, що різний типорозмір труби прокатки зумовить необхідність переналаштування системи загалом. У зв'язку з цим у роботі ухвалено рішення щодо необхідності оцінки впливу фактора завантаженості на кінцеві рівні налагодження форсування і кратності необхідної пружності демпферної муфти.

Обрані кількісні показники кратностей факторів впливу оптимізаційної задачі можуть бути забезпечені: установленням бажаного рівня форсування напруги збудження, що не потребує значних зусиль, оскільки його зміна передбачена конструкцією збудника; установленням необхідного значення пружності пружного елемента – як варіант практичної реалізації може застосовуватися гідравлічна муфта, пружність якої залежить від рівня заповнення картера мастилом, але її налаштування може потребувати певного часу.

Попередніми дослідженнями встановлено, що бажаний інтервал зміни навантаження слід обрати у межах 0,6...1 від номінального значення. Використовуючи розроблену модель та план однофакторного експерименту виконано комплекс розрахунків, на основі яких побудовано лінії тренду для низки рівнів навантажень (див. рис. 6.).



а

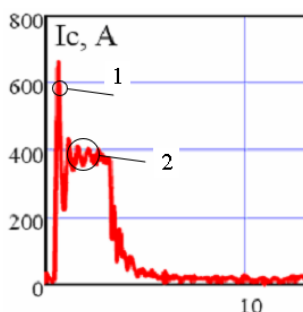
б

Рисунок 6 – Лінії регресії оцінки впливу навантаження на параметри оптимізації

У четвертому розділі передбачено розв'язання задачі щодо усунення потреби в періодичному переналаштуванні електромеханічної системи завдяки синтезу спеціального регулятора. З цією метою в роботі здійснено огляд літературних джерел щодо оцінки спроможності автоматичних систем керування синхронного привода компенсувати екстремальні навантаження (див. рисунок 7, поз. 1) під час втягування заготовок у валки.

Встановлено, що відомі та класичні способи демпфування є недостатньо ефективними для екстремального гасіння коливань.

Для здійснення додаткових досліджень у розділі розроблено адаптовану моделі синхронного двигуна із можливістю стабілізації повздовжнього струму якоря засобами системи збудження. Її побудовано на рівняннях балансу напруг синхронної машини із повним набором обмоток роторної частини, потікозчеплень та механічної частини:



1 – максимальне збурення, 2 – залишкова коливальність

Рисунок 7 –
Перехідний процес
струму якоря

Для доповненої моделі перехідними функціями перетворювача та зворотного зв'язку синтезовано ПІ-регулятор

$$W_p = \frac{\frac{k_{12}}{r_a} p + 1}{\frac{2a \cdot k_p \cdot k_{13} \cdot k_{id}}{r_a} T_{\mu} p}$$

Попередніми дослідженнями встановлено, що визначені за класичною методикою коефіцієнти підсилення регулятора збудження, робота яких стабілізує струм i_d , створюють умови для часткової коливальності системи. Також виявлено,

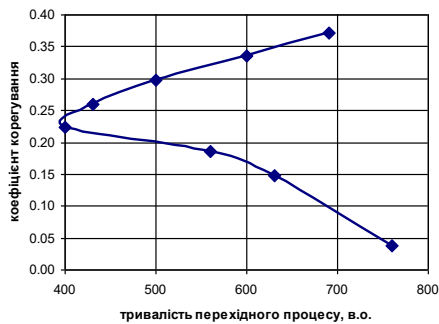
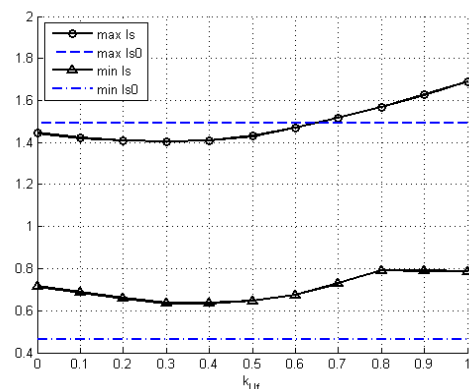


Рисунок 9 – Коефіцієнт корегування інтегральної частини регулятора

Підхід до визначення часових інтервалів регулювання збудження слід розділити на два етапи: на час завчасного форсування, необхідний для гарантованого досягнення визначеного рівня струму якоря перед моментом прокатки, та час, що дорівнює одному напівперіоду його максимального коливання з моменту втягнення заготовки у валки. Встановлено, що гарантована тривалість форсування буде достатньою для будь-яких випадків навантаження при її дотриманні на рівні п'яти постійних часу обмотки збудження.

Беручи до уваги аналіз літератури, який показав ефективність компенсації коливань струму якоря малої амплітуди та практичну неспроможність відомих способів поглинати екстремальне зростання струму, слід зробити висновок щодо необхідності застосування іншого підходу для вирішення такого питання. Як варіант ефективною протидією максимальному струму якоря (ділянка 1) (див. рис. 7), пропонується завчасне підвищення напруги збудження, що дозволить зменшити різницю між поточним сталим та миттєвим збільшеним

що пропорційна частина регулятора практично не впливає на зменшення коливальності, тоді як інтегральна частина, при зменшенні коефіцієнта підсилення до 0,22 від розрахункового значення, дає задовільний результат компенсації коливальності струму якоря (рис. 9). Крім того, під час визначення необхідного рівня форсування збудження було встановлено, що при досягненні деякого зменшеного значення динамічного струму якоря його піковий максимум починає зростати (рис. 10), через що подальше прагнення до мінімізації параметру форсування втрачає сенс.



max Is0, min Is0 – струм якоря стандартного збудження, в.о.;
max Is, min Is – струм якоря нового збудження, в.о.;
 k_{uf} – кратність завдання на форсування струму

Рисунок 10 – Визначення максимально можливого рівня форсування збудження

значенням струму якоря під час накиду навантаження. Залишкова коливальність (ділянка 2) (див. рис. 7) може бути успішно усунена завдяки застосуванню закону регулювання збудженням при стабілізації повздовжнього струму якоря.

Система електропривода та алгоритм керування збудженням випробувані на моделі, результат роботи якої наведено на рисунку 11.

Аналіз отриманих залежностей дозволяє стверджувати, що у момент прикладення навантаження зміна струму якоря зменшилась приблизно втричі, сплеск його максимуму зріс майже на 3 %, а тривалість перехідного процесу скоротилася на 34 %. При знятті навантаження характер зміни струму практично однаковий для обох варіантів.

У п'ятому розділі здійснено узагальнення отриманих результатів з їх поширенням на механізми пластичної обробки металів та обладнання дробарно-подрібнювального циклу. В основу досліджень покладено той факт, що для зазначених механізмів зазвичай застосовують унікальні двигуни, де виробництво навіть двох машин розглядається як серійне. Це дозволяє стверджувати, що їх обраний ряд є достатньо великим (табл. 2).

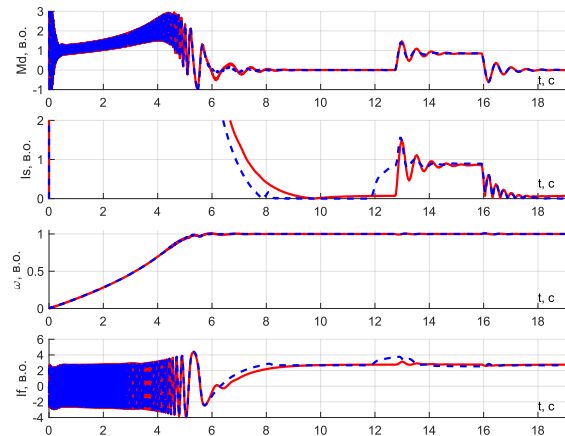
Таблиця 2 – Головні паспортні параметри досліджуваних двигунів

Параметр	СДМЗ-2-22-34-60 УХЛ4	СДС-19-46-40 УХЛ4	СДС-19-56-40 УХЛ4	СДМЗ-2-21-64-40 УХЛ4	СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4
Рн, кВт	1600	2000	2500	3150	4000
nн, об/хв	100	150	150	150	75
Jд, кг·м ²	23250	12750	15000	19325	250000
Jн, кг·м ²	6128.93	2620.93	2620.93	5161.21	51612.07
Mн, в.о.	0,832	0,863	0,856	0,859	0,853

$M_H = \frac{\Omega}{M_D}$ – відносний номінальний момент навантаження,

де Ω - базова кутова швидкість, M_D – базовий номінальний момент двигуна.

Інший аспект досліджень, на який слід звернути увагу, полягає в тому, що протягом початкових експериментів було встановлено несуттєвий вплив пружних елементів електромеханічних систем. Особливо це актуально під час модернізації наявного обладнання, де регулювання параметра пружності муфти ускладнене або зовсім неможливе. Тому на цьому етапі досліджень було вирішено скоротити перелік факторів оптимізаційної задачі до одного параметра – рівня форсування контуру збудження, одночасно використовуючи критерій мінімізації середньоквадратичного відхилення поточного значення струму якоря.



— класична і — нова система збудження.

M_d – електромагнітний момент двигуна, в.о.;

I_s – струм якоря, в.о.;

ω – швидкість обертання валу двигуна, в.о.;

I_f – струм обмотки збудження, в.о.

Рисунок 11 – Результати порівняльного моделювання

Також враховано вплив рівня навантаження на величину завдання на збудження. У програмі випробувань навантаження варіювалося у межах 0,6...1 номінального значення, що є достатнім для охоплення всіх можливих варіантів навантаження. Щодо форсування, то у цьому випадку межі визначені в діапазоні 0,8...1,75 номінального.

Почергово змінюючи вхідні дані параметрів двигунів та рівня навантаження в алгоритмі розрахунку, отримано фактичні результати середньоквадратичного відхилення та коефіцієнтів форсування збудження, за якими побудовано лінії тренду, рівняння поліномів яких має вигляд:

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c,$$

де y – функція пошуку; a , b , c – коефіцієнти; x – рівень навантаження в долях номінального, в.о.

Параметри коефіцієнтів, для отримання значення функції пошуку (K_f – кратність форсування збудження, σ – незміщене стандартне відхилення) та коефіцієнт детермінації полінома R^2 зведені в таблицю 3.

Таблиця 3 – Параметри поліномів за типами двигунів і функції навантаження

Двигун, тип	Функція пошуку	Коефіцієнти поліному			R ²
		a	b	c	
СДМЗ-2-22-34-60 УХЛ4	K_f	0.2658	0.0097	0.7283	0.9998
	σ	0.0503	-0.0148	0.0147	0.9997
СДС-19-46-40 УХЛ4	K_f	0.413	-0.3961	1.0179	0.9997
	σ	0.0319	-0.0378	0.0559	0.9968
СДС-19-56-40 УХЛ4	K_f	0.413	-0.3961	1.0179	0.9997
	σ	0.0109	-0.008	0.0519	0.9919
СДМЗ-2-21-64-40 УХЛ4	K_f	0.709	-0.7927	1.1279	0.9998
	σ	0.0525	-0.068	0.0736	0.9981
СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4	K_f	0.0473	0.4418	0.5193	1
	σ	0.0048	0.1543	-0.0266	1

Наступний етап передбачає визначення сімейства характеристик, які містять в собі рівні коефіцієнтів підсилення для задавача інтенсивності та ПІ-регулятора з корегованою ланкою інтегрування. Саме ці параметри істотно впливають на дію залишкової коливальності струму якоря, що безпосередньо впливає на величину динамічного зусилля в обмотках двигуна.

Відомий вплив навантаження на параметри комбінованої системи керування, визначений на першому етапі, потребує тонкого налагодження. Щодо параметрів регулятора та задавача інтенсивності, то вони налаштовані на максимальне навантаження, що гарантовано забезпечує працездатність системи збудження в найважчих умовах.

Параметри автоматичної системи збудження визначено також за допомогою алгоритму розв'язання оптимізаційної задачі, реалізовано у середовищі MathCAD

При цьому розрахункові рівняння мають вигляд:
підсилення задавача інтенсивності

$$k_{iz} = \frac{r_f}{x_f - x_{ad} \frac{x_{ad}}{x_{kd}}}$$

підсилення пропорційної ланки ПІ-регулятора

$$k_p = \frac{T_d r_a}{2 \cdot k_{\Pi} \left[x_{ad} \cdot \left[\frac{1}{x_f - x_{ad}} \frac{x_{ad}}{x_{kd}} \frac{x_{ad}}{x_{kd}} \frac{1}{x_f - x_{ad}} \frac{x_{ad}}{x_{kd}} \right] \right]} \cdot k_{id} \cdot T_{\mu}$$

підсилення інтегральної ланки ПІ-регулятора

$$k_i = \frac{r_a}{2 \cdot k_{\Pi} \left[x_{ad} \cdot \left[\frac{1}{x_f - x_{ad}} \frac{x_{ad}}{x_{kd}} \frac{x_{ad}}{x_{kd}} \frac{1}{x_f - x_{ad}} \frac{x_{ad}}{x_{kd}} \right] \right]} \cdot k_{id} \cdot T_{\mu}$$

Виходячи з визначених параметрів і моделі, побудованої відповідно до структури, наведеної на рисунку 8, виконано перевірку працездатності синхронного привода, а фактичні коефіцієнти підсилення зведені у таблицю (див. таблицю 4).

Таблиця 4 – Відповідність типу двигуна, коду і коефіцієнтів підсилення

Тип двигуна	Код двигуна	М, кНм	Коефіцієнти підсилення		
			k _{iz} , задавача інтенсивності	k _i , інтегральна частина	k _p , пропорційна частина
СДМЗ-2-22-34-60 УХЛ4	1	152,80	0,0086	0,0499	1,8598
СДС-19-46-40 УХЛ4	2	127,39	0,0076	0,0498	2,4228
СДС-19-56-40 УХЛ4	3	159,24	0,0072	0,0498	2,7166
СДМЗ-2-21-64-40 УХЛ4	4	200,64	0,0067	0,0545	2,616
СДМЗ-2-24-59-80 УХЛ4	5	509,55	0,0035	0,0592	3,1507

Результати проведеного циклу досліджень засвідчують принципову можливість мінімізації динамічних зусиль в обмотках якоря для розглянутих електродвигунів. Це забезпечує додатковий захист конструкцій синхронних приводів від аварій, спричинених руйнуванням обмоток якоря. Отримані результати можуть бути основою для рекомендацій у проектній та експлуатаційній практиці.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено наукову задачу, яка полягає у встановленні закономірностей впливу рівня форсування та параметрів регулятора системи збудження на величину електромагнітних зусиль в обмотках синхронного двигуна протягом часу прикладання ударного навантаження та в сталому режимі. Це забезпечує збільшення тривалості міжремонтних інтервалів і підвищення економічності роботи привода металургійних машин.

Сутність розв'язання наукової задачі полягає в розробленні методу визначення необхідної тривалості завчасного увімкнення та рівня напруги форсування збудження, а також у синтезі допоміжного регулятора стабілізації поздовжнього струму якоря, отриманого за модульним оптимумом з корегуванням його інтегральної складової. На цій основі розроблено комбінований спосіб керування напругою обмотки збудження, який складається з двох етапів: на першому – завчасне форсування до розрахункового рівня

напруги збудження тривалістю не менше п'яти постійних часу обмотки, що мінімізує перепад струму якоря в процесі накиду навантаження, і тим самим забезпечує обмеження результату дії екстремального зусилля; на другому – роботу регулятора, що забезпечує демпфування залишкової коливальності у режимі сталого навантаження та додатково знижує динамічний вплив на обмотки двигуна, сприяючи подовженню строку безаварійної роботи.

Виконані дослідження дозволили зробити такі висновки:

1. Актуальність теми дисертаційної роботи обґрунтована двома важливими складовими. Стратегічною складовою – металургійна промисловість є критично важливою для економіки України, оскільки формує сировинну базу для важливих галузей, як-от машинобудування, будівництво, транспорт та ЖКГ. Крім того, вона є важливим соціально-економічним чинником, створюючи робочі місця для понад 200 тисяч працівників. Тактичною складовою – експлуатація високопродуктивного обладнання, зокрема автомат-стана ТПА-350, супроводжується значними експлуатаційними ризиками. Згідно з даними заводів-виробників, регулярні аварійні простой цього обладнання спричиняють суттєві фінансові витрати на ремонт та відновлення.

2. Етап промислово-експериментальних досліджень виявив, що за позиціями оцінки перехідних процесів режимів пуску, синхронізації, накиду ударного навантаження, роботи системи збудження і динамічної стійкості, а також за кількісною оцінкою електромагнітних зусиль, які руйнують обмотки двигуна, аномальних режимів роботи не виявлено.

Водночас встановлено, що алгоритм роботи головного привода автомат-стану передбачає три основні режими – неробочий хід (рух заготовки по напрямку або від прокатної кліти); втягнення заготовки у валки (ударне прикладання навантаження із спрацюванням форсування збудження) і сталий режим прокату з дією залишкової коливальності системи. З огляду на це, основний висновок промислово-експериментальних досліджень полягає в тому, що суттєві руйнівні зусилля в обмотках двигуна виникають внаслідок значного перепаду струму якоря, який зумовлений послабленим полем збудження.

3. Встановлено факт можливості впливу на рівень динамічних зусиль в обмотках двигуна засобами системи збудження дозволив сформулювати спосіб її керування: форсування збудження до початку прикладання ударного навантаження повинно бути забезпечено терміном зростання струму індуктора, не меншим за 3...5 постійних часу обмотки збудження, і рівнем завдання на нього. Цей рівень визначається розв'язанням оптимізаційної задачі, де функція мети – мінімум середньоквадратичного відхилення поточного значення струму якоря від його середнього, а фактори впливу – відповідно кратність величини пружності з'єднувальної муфти та рівень форсування напруги системи збудження.

4. Складність керування системою збудження в умовах оптимального налагодження зумовила необхідність синтезу спеціального регулятора стабілізації подовжнього струму якоря. Аналіз наявних способів керування контуром збудження виявив недостатню ефективність сучасних автоматичних систем нівелювати екстремальні збурення. Тому під час побудови регульованої

системи збудження ухвалено рішення використовувати комбіновану систему, у якій пікове збурення мінімізується за допомогою завчасного форсування, значення якого визначено на основі розв'язання оптимізаційної задачі, а залишкову коливальність знижено за рахунок регулятора системи збудження. Водночас синтезований регулятор за модульним оптимумом продемонстрував коливальність системи. Прийнятний результат було отримано за коефіцієнта підсилення інтегральної складової, що становить 21%...25% від розрахункового значення.

5. Кінцевий результат дисертаційної роботи представлений аналітичними залежностями (поліноміальними моделями, наведеними в таблицях 3 та 4), що дозволяють за відомими вхідними поточними навантаженнями та кодом серійного двигуна визначати необхідні параметри кратності форсування, підсилення задавача інтенсивності та пропорційної й інтегральної ланок ПІ-регулятора. Математичну формалізацію отриманих залежностей можливо застосовувати, як для одноразового налагодження гнучкої цифрової системи керування, так і для автоматичної адаптації, що забезпечує її реалізацію на будь-якій мікропроцесорній платформі.

Основні наукові положення та результати опубліковані в наступних роботах:

Наукові статті:

1. Програмно керований збудник синхронних двигунів / В. І. Кириченко та ін. *Наука та інновації*. 2006. Т. 2, № 3. С. 28–37.

2. Бородай В. А., Боровик Р. О., Котлярова Е. В. Демпфування ударних навантажень гірничо-металургійних механізмів засобами синхронного привода. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2015. № 95. С. 47–50.

3. Borodai V., Borovyk R., Nesterova O. Efficient Transient Modes of Synchronous Drive for Mining and Smelting Mechanisms. *Mechanics, Materials Science & Engineering*. 2017. Vol. 8, no. 8. P. 133–142.

4. Бородай В. А., Боровик Р. О., Нестерова О. Ю. Компенсація різкозмінного струму якоря потужних синхронних приводів засобами автоматичної системи збудження із нестандартним алгоритмом керування. *Електротехніка та електроенергетика*. 2018. № 1. С. 72–80.

5. Бородай В. А., Боровик Р. О., Шепетько Д. О. Раціональна схема збудження із непрямим розщепленням і конденсаторами потужних синхронних приводів з гарантованим запуском. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2019. № 101. С. 25–29.

6. Бородай В. А., Боровик Р. О., Нестерова О. Ю. Узагальнені параметри системи збудження синхронного привода з ударним навантаженням. *Електротехніка та електроенергетика*. 2025. № 3. С. 25–37. URL: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-3-3>.

Патенти:

7. Спосіб регулювання збудження синхронних машин: пат. 135216 Україна: МПК H02K 19/36 (2006.01). № 201813087; заявл. 29.12.2018; опубл. 25.06.2019, Бюл. № 12.

8. Спосіб регулювання збудження синхронних машин: пат. 123955 Україна. Опубл. 30.06.2021, Бюл. № 26.

Звіт з НДР:

9. Розробка рекомендацій з експлуатації синхронного двигуна головного привода автомат-стану прокатки труб ООО “ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ”: Звіт з НДР (заключ.) / Державний ВНЗ «НГУ»; керівник роботи О. С. Бешта. Дніпро, 2013. 34 с. № держ. реєстрації 1120/030383.

У роботах, написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в такому: [9] – відповідальний виконавець НДР, участь у проведенні досліджень на промисловому об’єкті задля встановлення фактичних причин аварійності автомат-стана ТПА-350, розроблення рекомендацій, укладання звіту; [1] – участь у вивченні та забезпеченні програмної підтримки під час розроблення програмно керованого збудника синхронних двигунів; [2] – участь в розробленні способу форсування та визначення параметрів і схеми системи збудження; [3] – аналіз впливу параметрів комбінованої автоматичної системи на форми перехідних характеристик синхронного двигуна, що працює у режимі періодичних ударних навантажень; [4] – аналіз способів компенсації пікових навантажень, синтез регулятора та алгоритму керування автоматичної системи збудження із комбінованим алгоритмом керування потужних синхронних приводів які працюють з ударним навантаженням; [5] – участь у розробленні алгоритмів та оцінка методів оптимізації на предмет встановлення найбільш раціонального; [6] – побудова моделей, отримання кількісних результатів та їхній аналіз; [7, 8] – участь у розробленні ідеї, формулюванні основних принципів, схемних рішень способу та оформленні патенту України на винахід.

АНОТАЦІЯ

Боровик Р.О. Система компенсації ударних навантажень синхронних двигунів привода металургійних машин. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2025.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової задачі, яка полягає у встановленні закономірностей впливу рівня форсування і параметрів регулятора системи збудження на величину динамічних зусиль в обмотках синхронного двигуна під час дії ударного навантаження та сталого режиму, що дозволить запобігти руйнуванню магнітної системи синхронного двигуна привода металургійних машин.

Здійснено аналіз аварійності автомат-стана ТПА-350 в умовах промислового об’єкту компанії ТОВ “ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ” і на його основі сформульовано спосіб керування синхронного двигуна привода прокатних валків.

Запропоновано спосіб і програмну реалізацію визначення оптимальних параметрів кратності напруги форсування обмотки збудження і коефіцієнта жорсткості пружної муфти, за умови врахування рівня навантаження.

Встановлено, що відомі та класичні методи автоматичного керування збудженням неспроможні забезпечити нівелювання дії максимального збурення.

У роботі пропонується скористатися можливістю регулятора збудження як засобу компенсації залишкової коливальності сталого режиму. Для цього розроблена модель двигуна із контуром стабілізації подовжнього струму якоря, де тип регулятора визначається за модульним оптимумом і уточненням коефіцієнта підсилення інтегральної ланки задля уникнення надлишкової коливальності.

Результати досліджень узагальнено для ряду механізмів і електричних двигунів, що дозволяє надати рекомендації при проектуванні та модернізації наявного обладнання.

Ключові слова: автомат-стан, синхронний двигун, обмотка збудження, система керування, регулятор, тиристорний збудник, формування збудження.

ABSTRACT

Borovyk R.O. System for Compensation of Impact Loads in Synchronous Motors Driving Metallurgical Machines. – Qualification scientific work as a manuscript. Dissertation submitted for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.09.03 – Electrotechnical Complexes and Systems – National Technical University “Dnipro Polytechnic,” Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2025.

The dissertation addresses the solution of a pressing scientific problem, namely the establishment of regularities in the influence of the excitation system's forcing level and regulator parameters on the magnitude of dynamic stresses in the windings of a synchronous motor under impact loading and steady-state operation. This makes it possible to prevent the destruction of the magnetic system of synchronous motors used in metallurgical machine drives.

An analysis of the failure rate of the TPA-350 automatic mill stand under industrial conditions at the enterprise LLC “INTERPIPE NIKO TUBE” was conducted, and on this basis, a method of controlling the synchronous motor driving the rolling mill rolls was formulated. A method and software implementation were proposed for determining the optimal parameters of the excitation winding voltage forcing ratio and the stiffness of the elastic coupling, taking into account the load level.

It was established that known and classical methods of automatic excitation control are incapable of ensuring suppression of the maximum disturbance. The study proposes utilizing the excitation regulator as a means of compensating residual oscillations in steady-state operation. To this end, a motor model was developed with stabilization of the longitudinal armature current, where the regulator type is determined according to the modulus optimum criterion, with refinement of the gain coefficient of the integral link to avoid excessive oscillations.

The research results were generalized for a range of mechanisms and electric motors, which allows for the formulation of recommendations for the design and modernization of existing equipment.

Keywords: reversing mill, synchronous motor, excitation winding, control system, regulator, thyristor exciter, excitation formation.

БОРОВИК Роман Олексійович

**СИСТЕМА КОМПЕНСАЦІЇ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ СИНХРОННИХ
ДВИГУНІВ ПРИВОДА МЕТАЛУРГІЙНИХ МАШИН**

(Автореферат)

Підписано до друку 10.03.2026 Формат 60x90/16
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-
вид. арк. 0,9 Тираж 60 пр. Зам. №

ТОВ "Квітка", вул. В. Мономаха, 25а,
т. 0684720365