

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора

Чорного Олексія Петровича

на дисертаційну роботу

Боровика Романа Олексійовича

на тему: **«СИСТЕМА КОМПЕНСАЦІЇ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ
СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИВОДА МЕТАЛУРГІЙНИХ МАШИН»**,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Актуальність роботи. Дисертаційна робота Боровика Р.О. присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі, пов'язаної з підвищенням надійності та безаварійності роботи синхронних двигунів привода металургійних машин в умовах ударних навантажень. У роботі досліджено закономірності впливу рівня форсування напруги збудження та параметрів регулятора системи збудження на динамічні зусилля в обмотках синхронного двигуна в перехідних та сталих режимах, що, за задумом автора, має забезпечити зменшення руйнівного впливу ударних режимів на магнітну систему електричної машини.

Актуальність теми дисертаційної роботи не викликає сумнівів. Автор обґрунтовує її, з одного боку, потребами металургійного виробництва та трубопрокатної галузі, а з іншого – необхідністю підвищення надійності потужних синхронних приводів, що працюють у режимах різко змінного та ударного навантаження. В таких умовах абсолютно жорстка механічна характеристика привода унеможливорює застосування кінетичних накопичувачів енергії, внаслідок чого зростають ударні динамічні навантаження, а їх наслідком стає руйнування ізоляції обмоток якоря та ротора, капітальні ремонти і тривалі простої високопродуктивного обладнання. Саме тому пошук способів зменшення динамічних зусиль у синхронних двигунах автомат-станів є важливим і актуальним науковим завданням.

Структура та зміст дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 162 сторінки, з яких 112 сторінок займає основний текст; робота містить 26 рисунків, 11 таблиць і 83 найменування джерел.

У вступі обґрунтовано актуальність теми через потребу підвищення надійності синхронних приводів трубопрокатних автомат-станів, що працюють в умовах ударних навантажень і зазнають аварій через руйнування ізоляції обмоток. Сформульовано мету, задачі, об'єкт, предмет і методи дослідження,

наведено наукову новизну, практичне значення, дані про впровадження результатів та очікуваний економічний ефект.

У першому розділі проаналізовано актуальність виробництва трубної продукції для відновлення інфраструктури, розглянуто класифікацію прокатної продукції, особливості безшовних труб і трубопрокатних станів. Описано чинники, що визначають якість труб, та виконано первинне вивчення об'єкта дослідження – автомат-стана ТПА-350. Показано, що головною проблемою є аварійність синхронного привода через ударні навантаження.

У другому розділі виконано промислово-експериментальне дослідження роботи синхронного привода автомат-стана ТПА-350. Проаналізовано режими пуску, енергетичні параметри двигуна, роботу системи збудження та вплив ударного навантаження на стійкість. За результатами вимірювань встановлено, що найбільш небезпечними є короточасні струмові сплески під час захвату заготовки валками, які спричиняють значні електродинамічні зусилля в обмотках.

У третьому розділі проведено аналіз відомих способів компенсації ударних навантажень та обґрунтовано вибір параметрів оптимізації електромеханічної системи. Досліджено вплив жорсткості пружної муфти і рівня завчасного форсування збудження на демпфування ударного процесу. Сформульовано оптимізаційну задачу, в якій цільовою функцією обрано мінімум середньоквадратичного відхилення струму статора від сталого значення під час накиду навантаження.

У четвертому розділі синтезовано комбінований спосіб автоматичного демпфування ударних навантажень засобами системи збудження синхронного двигуна. Виконано синтез моделі двигуна, визначено параметри регулятора та обґрунтовано алгоритм керування збудженням із завчасним форсуванням. Показано, що попереднє підвищення збудження дає змогу зменшити перепад струмів, обмежити сплеск струму якоря та скоротити тривалість перехідного процесу.

У п'ятому розділі узагальнено результати досліджень для ряду синхронних двигунів потужністю 1600–4000 кВт і розроблено рекомендації щодо вибору параметрів керування. На основі математичного моделювання визначено залежності рівня форсування збудження від навантаження, а також отримано таблиці коефіцієнтів для задавача інтенсивності й ПІ-регулятора. Це дозволило перейти від окремого випадку до узагальнених інженерних рекомендацій для практичного застосування.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову задачу підвищення надійності синхронних

двигунів приводів металургійних машин, що працюють в умовах різко змінних ударних навантажень, шляхом встановлення закономірностей впливу параметрів форсування збудження, налаштувань регулятора та характеристик електромеханічної системи на рівень електродинамічних зусиль в обмотках двигуна. Це полягає у наступному:

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 форсування 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 урахуванням рівнів електромеханічних збурень, що підвищує конструктивну стійкість двигуна до наслідків дії ударних навантажень.

Практична цінність матеріалів роботи полягає в тому, що запропоновані моделі, алгоритми та рекомендації орієнтовані на реальні умови

експлуатації синхронних приводів автомат-станів і забезпечують суттєве зменшення перепаду струму якоря в режимі ударного прикладання навантаження, а отже — зниження електродинамічних зусиль, які руйнують магнітну систему та ізоляцію обмоток двигуна.

1. Практичний результат роботи полягає у створенні методичної та програмної основи для моделювання, прогнозування й кількісного оцінювання динамічних зусиль в обмотках синхронних двигунів, що дозволяє обґрунтовано визначати раціональні параметри системи збудження для режимів компенсації максимального збурення та демпфування залишкової коливальності.

2. Розроблено метод визначення раціональної кратності напруги форсування збудження з урахуванням механічного навантаження, а також удосконалено спосіб вибору коефіцієнтів задавача інтенсивності, пропорційної та корегованої інтегральної ланок ПІ-регулятора для ряду синхронних двигунів, що безпосередньо підвищує інженерну придатність результатів до впровадження.

3. Запропонований спосіб керування збудженням, який передбачає завчасне форсування напруги до моменту накиду навантаження з подальшим відключенням після першого періоду коливань і обмеженням залишкової коливальності через ПІ-регулятор повздовжньої складової струму якоря. Такий алгоритм може бути реалізований у цифрових системах керування тиристорними збудниками синхронних двигунів.

4. Практична значущість результатів підтверджується їх прийняттям до впровадження у проєктній практиці НВП ТОВ «СИЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА» та ТОВ «Інтерпайп Ніко Тюб», а також розрахунковим економічним ефектом від впровадження нового алгоритму, який у дисертації оцінено на рівні близько 6,98 млн грн при терміні окупності 39 місяців.

Оцінка обґрунтованості наукових положень, їх достовірності та новизни. У роботі достатньо чітко сформульовано мету дослідження, об'єкт, предмет і комплекс задач. Метою визначено обґрунтування режимів безаварійної роботи синхронного двигуна привода автомат-стана в умовах різко змінного навантаження шляхом мінімізації динамічних зусиль в обмотках двигуна. Автором поставлено задачі щодо встановлення фактичних причин аварійності, розробки математичної моделі для визначення оптимальних параметрів форсування і пружності електромеханічної системи, побудови адаптованої моделі двигуна, визначення параметрів регулятора та узагальнення результатів з наданням рекомендацій щодо вибору параметрів системи керування збудженням.

Достовірність отриманих результатів забезпечується використанням математичного апарату теорії електричних машин, теорії автоматичного керування, методів оптимізації, регресійного аналізу, чисельного інтегрування за методом Рунге–Кутти, а також апроксимації та інтерполяції. Перевірка теоретичних положень виконана комп'ютерним моделюванням.

Повнота викладу в опублікованих працях. Дисертаційна робота є завершеною працею. Основний зміст дисертації опубліковано у 10 наукових роботах, з яких 5 опубліковано у фахових виданнях, 1 – у виданні, що індексується у Web of Science, 2 – у матеріалах конференцій, 1 патент України і 1 патент на корисну модель. Публікації автора охоплюють період 2015-2025 рр., що свідчить про достатню апробацію результатів дослідження.

Автореферат ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації і достатньо повно відображає основні її наукові результати, що отримані здобувачем.

Важливість одержаних в дисертаційній роботі результатів для науки і промисловості полягає у розвитку підходів до моделювання, оптимізації та синтезу систем збудження синхронних двигунів, що працюють в умовах ударних навантажень, і встановленні нових закономірностей впливу форсування збудження та параметрів регулятора на динамічні зусилля в обмотках, створенні практичних алгоритмів і рекомендацій, які дають змогу зменшити аварійність приводів металургійних машин, підвищити надійність роботи обладнання, збільшити міжремонтний ресурс і знизити експлуатаційні витрати.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. У дисертаційній роботі перший розділ викладено надто розширено. Значний його обсяг присвячений загальним питанням металургійного виробництва, що дещо віддаляє виклад від предмета дослідження – системи компенсації ударних навантажень синхронних двигунів привода металургійних машин.
2. У тексті дисертації простежується певна неузгодженість щодо ролі пружності з'єднувальної муфти. У вступі та третьому розділі вона визначається як один із ключових факторів оптимізації, тоді як у п'ятому розділі зазначено, що попередні дослідження показали несуттєвий вплив пружності електромеханічної системи, і подальший аналіз виконується вже лише за рівнем форсування збудження.
3. У роботі не повністю узгоджено часовий критерій завчасного форсування збудження. У положеннях, що виносяться на захист, і в практичному значенні вказано тривалість досягнення сталого значення не менше трьох сталих часу

обмотки, тоді як в анотації та при описі алгоритму керування у четвертому розділі йдеться про п'ять постійних часу обмотки збудження.

4. У роботі, для зменшення різниці між поточним сталим та миттєвим збільшенням струму якоря під час накиду навантаження виконується форсування збудження, але не вказано яким чином визначається час завчасного форсування.

5. В роботі недостатньо обґрунтований прийнятий вид регресійних моделей, наприклад чому саме другий ступінь поліному? Коефіцієнт детермінації не забезпечує абсолютну перевірку на адекватність, отримані рівняння бажано було перевірити на структуру залишків, а також виконати розрахунок значимості коефіцієнтів за критерієм Стьюдента.

6. Обрана функція мети оптимізації – мінімум середньоквадратичного відхилення струму якоря – є логічною з математичної точки зору, однак у роботі бажано було показати кількісний зв'язок між зменшенням цього критерію та реальним зниженням переміщень лобових частин обмоток або інтенсивності руйнування ізоляції.

7. Висновок щодо доцільності зменшення коефіцієнта підсилення інтегральної складової ПІ-регулятора до 21%...25% від значення, розрахованого за модульним оптимумом, виглядає практично важливим, однак у роботі бракує ширшого аналізу робастності цього результату для варіацій параметрів навантаження, двигуна та можливих похибок моделі. Крім того, у подальших розрахунках автор фактично приймає це значення рівним 22 %, що потребувало б додаткового обґрунтування.

8. Практична реалізація системи завчасного форсування потребує детальнішого часово-точнісного обґрунтування. У роботі зазначено, що після завершення дії удару тривалістю 0,5 с завдання скидається до нуля, а також наведено датчик металу із затримкою увімкнення/вимкнення не більше 0,5 с. Бажано було б чіткіше показати, наскільки швидкодія апаратної частини є достатньою для забезпечення потрібного режиму випереджального форсування.

9. У роботі є інші неузгодженості, наприклад, у позначенні типу датчика металу. У таблиці технічних характеристик наведено датчик OSH AF47A5-43P-LZ, тоді як у переліку обладнання системи завчасного форсування зазначено OSH AF86A5-43P-LZ.

10. Економічний ефект від впровадження результатів дисертації наведено як очікуваний розрахунковий. Тобто, економічну частину необхідно розглядати як прогнозну оцінку ефективності, а не як уже підтверджений результат промислової експлуатації.

Висновок. Аналізуючи виконані в дисертаційній роботі дослідження та отримані в ній висновки і результати з урахуванням повноти публікацій, можна відзначити, що наведені вище зауваження не мають принципового характеру і не знижують цінності роботи.

Дисертаційна робота «Система компенсації ударних навантажень синхронних двигунів привода металургійних машин» є завершеною науковою працею, яка за актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, повнотою вирішення наукових та практичних задач, новизною і ступенем обґрунтованості отриманих результатів та практичних висновків, а також за змістом поданого в ній матеріалу, відповідає паспорту спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи та вимогам МОН України, які встановлені у п.п. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо кандидатських дисертацій, а її автор Боровик Роман Олексійович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук.

Професор кафедри систем автоматичного управління
та електропривода,
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського,
професор, доктор технічних наук

О.П. Чорний

Підпис О.П. Чорного засвідчую
Перший проректор КрНУ

В.В. Никифоров



Відгук отриманий
Вх. секр. Д 08.08.2026
Дудніков Н.В.
30.03.2026 р.