

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

*Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису*

БОРОВИК РОМАН ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 621.926.5

ДИСЕРТАЦІЯ
СИСТЕМА КОМПЕНСАЦІЇ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ
СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИВОДА МЕТАЛУРГІЙНИХ МАШИН

Спеціальність:

05.09.03 – *Електротехнічні комплекси та системи*

05 ТЕХНІЧНІ НАУКИ

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Р.О. Боровик

Науковий керівник –

Кандидат технічних наук,

доцент Бородай Валерій Анатолійович

Ідентичність усіх екземплярів дисертації

ПІДТВЕРДЖУЮ:

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

/ _____ /

Дніпро – 2025

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 уникнути руйнації магнітної системи синхронного двигуна привода металургійних машин.

У **першому розділі** розглянуто перспективи використання продукції металургійного виробництва, зокрема конструкційного й трубного прокату, для відбудови, ремонту, реконструкції й відновлення та зведення нових будівель і споруд, інженерних комунікацій тощо, пошкоджених унаслідок військової агресії, а також ремонту та заміни міських комунікацій, пов'язаних із амортизаційним зношуванням і зростанням кількості під'єднаних абонентів.

Наведено класифікацію трубної продукції прокатного виробництва, її характеристики, призначення та області використання.

Широке застосування полімерних труб для створення комунікацій пояснюється їхньою меншою вартістю, корозостійкістю, гнучкістю та відносною легкістю монтажу. Проте, порівнюючи з металевими трубами, значно менша здатність витримувати механічні й термічні навантаження не дозволяє конкурувати з останніми при використанні трубопроводів у складних умовах високого зовнішнього чи внутрішнього тиску та високих температур переміщуваних рідин.

Розглянуто типи прокатних агрегатів, із зазначенням особливостей їх конструктивного виконання та технології роботи. Трубопрокатні агрегати з реверсивною кліттю, зокрема агрегати повздожньої прокатки з короткою оправкою, які використовують на другому етапі виготовлення безшовних труб для отримання чорнової труби із прошитої чи розкатої гільзи, характеризуються незмінною швидкістю обертання головного приводу. З цією метою останнім часом часто застосовують синхронні двигуни, яким притаманні високі енергетичні показники та незмінність швидкості за умов високої динамічної стійкості під час ударного прикладання навантаження. Це зумовило широке використання синхронних двигунів як приводів потужних механізмів металургійній та гірничопереробній галузях.

Перелічено основні якісні показники гарячекатаних безшовних труб, вимоги до яких постійно зростають у зв'язку з підвищенням стандартів та зростанням запитів споживачів. Якість кінцевого продукту залежить від багатьох факторів: якості сировини, температурних режимів; дотримання технології під час відливання заготовки; точності налаштування інструментів; а також дотримання технологічних показників на всіх етапах формування труби.

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 здійснювалась 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. Оцінка результатів роботи показала, 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.

Повторно-короткочасний режим роботи з ударним прикладанням навантаження головного приводу реверсивного автомат-стана 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 пробоя 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, в свою чергу, призводить до значних електродинамічних зусиль в обмотках і супроводжується рухом лобових частин обмоток. Одним зі 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.

У **четвертому розділі** розглянуто відомі закони керування збудженням механізмів з ударним навантаженням, їхні можливості та обмеження щодо здатності компенсувати динамічні зусилля в котушках обмоток під час перехідних процесів. Виконано синтез регулятора збудження, що забезпечує зменшення залишкової коливальності, тим самим скорочуючи тривалість перехідного процесу. Для обмеження дії найбільш руйнівного сплеску струму двигуна, що виникає при захваті гільзи валками, необхідно завчасно форсувати збудження, що підвищує струм статора і зменшує перепад струмів. Час завчасного форсування складає п'ять постійних часу обмотки збудження, а рівень форсування визначається з урахуванням умов: забезпечення мінімуму перепаду струмів і обмеження екстремуму не вище, ніж при керуванні класичною системою збудження.

У **п'ятому розділі**, з метою узагальнення отриманих алгоритмів керування синхронним двигуном для низки класів механізмів, виконано дослідження шляхом цифрового експерименту для ряду двигунів в діапазоні потужностей (1600...4000) кВт. Попередні дослідження показали несуттєвий вплив пружності електромеханічної системи, тому, на цьому етапі, в якості фактора оптимізаційної задачі прийнято рівень форсування контуру збудження, а функцією відгуку – середньоквадратичне відхилення поточного значення струму якоря. Оскільки величина навантаження також визначає рівень сталого значення струму якоря, тому цикл дослідів виконано для діапазону навантажень (0,6...1) Мн. На основі отриманих даних визначено залежності у вигляді лінії тренду для встановлення рівня форсування контуру збудження залежно від навантаження для окремого двигуна.

Для зручності аналізу та використання отримані залежності подано у вигляді функції від двох змінних.

Також визначено таблицю даних для коефіцієнтів підсилення задавача інтенсивності та коефіцієнтів регулятора за пропорційною та інтегральною ланками для досліджуваних електричних двигунів.

Ключові слова: АВТОМАТ-СТАН, СИНХРОННИЙ ДВИГУН, ОБМОТКА ЗБУДЖЕННЯ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, РЕГУЛЯТОР, ТИРИСТОРНИЙ ЗБУДНИК, ФОРМУВАННЯ ЗБУДЖЕННЯ

ABSTRACT

Borovyk R.O. System for Compensating Impact Loads in Synchronous Drives of Metallurgical Machinery. – Qualification scientific work as manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in 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 an urgent scientific problem, namely the establishment of regularities in the influence of excitation system forcing levels and regulator parameters on the magnitude of dynamic forces in the windings of a synchronous motor under impact loading and steady-state operation. Solving this problem enables the prevention of destruction of the magnetic system of synchronous motors driving metallurgical machinery.

The **first chapter** examines the prospects for the use of metallurgical products, particularly structural and tubular rolled stock, in reconstruction, repair, restoration, and construction of new buildings, structures, and engineering communications damaged as a result of military aggression, as well as in the repair and replacement of urban communications associated with depreciation wear and the increasing number of connected consumers. A classification of tubular rolled products is provided, along with their characteristics, intended applications, and areas of use.

The widespread application of polymer pipes in communications is explained by their lower cost, corrosion resistance, flexibility, and relative ease of installation. However, compared to metallic pipes, their significantly lower capacity to withstand mechanical and thermal loads prevents them from competing in pipelines operating under severe conditions of high external or internal pressure and elevated temperatures of transported fluids.

Types of rolling mills are considered, with attention to their structural features and operating technologies. Tube-rolling mills with reversing stands, particularly longitudinal rolling mills with short mandrels used in the second stage of seamless tube production to obtain rough tubes from pierced or rolled billets, are characterized by

constant rotational speed of the main drive. For this purpose, synchronous motors have recently been widely employed, distinguished by high energy performance and speed constancy under conditions of high dynamic stability during impact loading. This has led to their extensive use as drives for powerful mechanisms in metallurgical and mining industries.

The principal quality indicators of hot-rolled seamless tubes are listed, with requirements continuously increasing due to rising standards and consumer demands. The quality of the final product depends on numerous factors: raw material quality, temperature regimes, adherence to casting technology, precision of tool adjustment, and compliance with technological parameters at all stages of tube formation.

The **second chapter** considers the tube-rolling mill with a reversing automatic stand TPA-350 of TPC2 Interpipe Niko Tube (Nikopol), equipped with a synchronous drive motor operating in repeated short-time duty. Analysis of the energy parameters of the main drive was carried out using enterprise-provided data and direct registration of actual parameters via the electric drive parameter monitoring system (EDPMS) during start-up and tube rolling. Evaluation showed that start-up is fully satisfactory for synchronous motors of this class and power; during billet entry into the rolls, stator current reaches 1.72 of the nominal value, while during rolling it practically equals the nominal. The excitation system ensures dynamic stability through voltage forcing, though the large time constant of the winding introduces significant delay into the process.

The repeated short-time duty with impact loading of the main drive imposes special requirements on the control system, particularly regarding speed stability under load and provision of dynamic stability margin. At the same time, the highly intensive operating mode causes considerable electrodynamic stresses in the motor windings, potentially leading to premature failure due to insulation breakdown and subsequent shorting of winding turns. Therefore, the development of an excitation control method for synchronous motors operating under impact loads, which ensures compliance with rolling technological requirements while reducing the influence of these loads on the windings, constitutes a relevant scientific problem.

The **third chapter** reviews known methods of excitation control for synchronous motors and mechanical means of compensating impact loads. It is established that the rigidity of the synchronous motor's mechanical characteristic prevents the use of a flywheel as a vibration damper; however, this possibility arises when a flexible coupling is introduced into the kinematic scheme. Excessive reduction of stiffness, however, may cause unacceptable oscillations, rendering the system inoperative.

Analysis of the main drive system showed that abrupt application of load to the synchronous motor shaft under weakened field conditions causes a sharp increase in inductor current, which in turn leads to significant electrodynamic forces in the windings accompanied by movement of end-winding sections. One method of reducing dynamic forces is the preliminary increase of inductor current, which decreases the difference between currents before and after load application.

Based on these factors, the optimization problem was formulated to determine optimal values of coupling stiffness and multiplicity of preliminary forcing, with the objective function being minimization of the mean-square deviation from the steady-state stator current during application of nominal load.

The **fourth chapter** considers known excitation control laws for mechanisms under impact loads, their capabilities, and limitations in compensating dynamic forces in winding coils during transients. A synthesized excitation regulator is presented, ensuring reduction of residual oscillations and thereby shortening transient duration. To limit the most destructive current surge occurring when the billet is gripped by the rolls, excitation must be preliminarily forced, which increases stator current and reduces current difference. The preliminary forcing time equals five excitation winding time constants, while the forcing level is determined under conditions of minimizing current difference and limiting the extremum not to exceed that of classical excitation control.

The **fifth chapter** generalizes the developed excitation control algorithms for synchronous motors across classes of mechanisms through digital experiments on motors in the power range of 1600...4000 kW. Previous studies showed negligible

influence of electromechanical system elasticity; therefore, at this stage, the optimization factor was taken as the excitation forcing level, with the response function being the mean-square deviation of instantaneous armature current. Since load magnitude also determines the steady-state armature current, experiments were conducted within the load range of 0.6...1 Mn. Based on the obtained data, trend-line dependencies were established to determine excitation forcing level as a function of load for individual motors.

A data table has been established to specify the gain coefficients of the intensity controller and the regulator parameters corresponding to the proportional and integral components for the electric motors under investigation.

KEYWORDS: REVERSING MILL, SYNCHRONOUS MOTOR, EXCITATION WINDING, CONTROL SYSTEM, REGULATOR, THYRISTOR EXCITER, EXCITATION FORMATION

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ,

в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті у фахових виданнях:

1. Бородай В. А., Боровик Р. О., Котлярова Е. В. Демпфування ударних навантажень гірничо-металургійних механізмів засобами синхронного привода. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. 2015. № 95. С. 47–50.
2. 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.
3. 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.
4. Бородай В. А., Боровик Р. О., Шепетько Д. О. Раціональна схема збудження із непрямым розщепленням і конденсаторами потужних синхронних приводів з гарантованим запуском. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. 2019. № 101. С. 25–29.
5. Програмно керований збудник синхронних двигунів / В. І. Кириченко та ін. *Наука та інновації*. 2006. Т. 2, № 3. С. 28–37.
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:

1. Спосіб регулювання збудження синхронних машин: пат. 135216 Україна: МПК Н02К 19/36 (2006.01). № 201813087; заявл. 29.12.2018; опубл. 25.06.2019, Бюл. № 12.
2. Спосіб регулювання збудження синхронних машин : пат. 123955 Україна. Опубл. 30.06.2021, Бюл. № 26.

Тези доповідей:

1. Бородай В. А., Боровик Р. О. Спосіб регулювання жорсткості механічної характеристики синхронного привода механізмів з різко-змінним навантаженням. *Актуальні проблеми науки, освіти і технологій в XXI столітті* : зб. тез доп. міжнар. науково-практ. конф., 19 черв. 2025 р. Полтава. С. 136–139. URL: <https://www.economics.in.ua/2025/06/19.html>.
2. Боровик Р. О., Гришина С. С. Обґрунтування потреб України в продукції прокатного виробництва / Матеріали XIII Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Молодь: наука та інновації». Дніпро. НТУ «ДП». 11–14 листопада 2025 року. Том 2. С. 26–28.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ПЛАСТИЧНОЇ ОБРОБКИ	
МЕТАЛІВ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	24
1.1 Обґрунтування стратегічної актуальності теми.....	24
1.2 Аналіз відмінностей систем прокатних станів.....	26
1.2.1 Технологічні відмінності виробництва безшовних труб	27
1.2.2 Агрегати стана повздовжньої прокатки з короткою оправкою.....	29
1.2.3 Чинники якості труб та їх забезпечення	30
1.3 Первинне вивчення об’єкта досліджень	31
Висновки до розділу	37
РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНИХ ПРИЧИН АВАРІЙНОСТІ	
СИНХРОННОГО ПРИВОДА АВТОМАТ-СТАНА ТПА-350.....	39
2.1 Загальні відомості	39
2.2 Обов’язкові фактори тестування працездатності	40
2.3 Технічна характеристика об’єкта досліджень.....	40
2.4 Дослідження роботи вхідної електромеханічної системи	42
2.4.1 Оцінка режиму пуску.....	42
2.4.2 Енергетичні параметри приводного електродвигуна.....	44
2.4.3 Оцінка роботи системи збудження.....	47
2.4.4 Оцінка впливу ударного навантаження на стійкість.....	49
Висновки до розділу	51
РОЗДІЛ 3 КОМПЕНСАЦІЯ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ВИБОРОМ	
ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ	53
3.1 Сутність питання і огляд літературних джерел	53
3.2 Вибір і обґрунтування параметрів оптимізації	55
3.3 Аналіз результатів моделювання.....	60

	14
3.4 Оцінка впливу рівня навантаження на параметри оптимізації	62
Висновки до розділу	64
РОЗДІЛ 4 КОМБІНОВАНИЙ СПОСІБ АВТОМАТИЧНОГО ДЕМПФУВАННЯ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЗАСОБАМИ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ	65
4.1 Відомі способи нівелювання різко змінних навантажень.....	65
4.2 Синтез моделі двигуна і визначення параметрів регулятора	67
4.3 Обґрунтування алгоритму керування збудженням	80
4.4 Аналіз результатів досліджень	82
4.5 Практична реалізація системи завчасного форсування	87
Висновки до розділу	90
РОЗДІЛ 5 УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ І РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ КЕРУВАННЯ	91
5.1 Визначення рівня форсування збудження у функції навантаження.....	91
5.2 Визначення параметрів складових автоматичної системи керування збудженням	97
Висновки до розділу	99
ВИСНОВКИ.....	100
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	103
Додаток А Оцінка процесу ударного прикладання навантаження штатної системи привода з синхронним двигуном.....	113
Додаток Б Оцінка процесу демпфування за оптимальних параметрів електромеханічної системи	123
Додаток В Оцінка процесу демпфування за регулювання жорсткості механічної характеристики привода	133
Додаток Г Технічні данні синхронних електродвигунів.....	141
Додаток Д Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в проєктну практику компанії «НВП ТОВ СИЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА»	143

Додаток Ж Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в проектну практику компанії ТОВ «Інтерпайп Ніко Тьюб»	144
Додаток К Розрахунок економічної ефективності за впровадження нової системи збудження в умовах ТОВ «Інтерпайп Ніко Тьюб»	145
Додаток Л Проект технічних вимог на модернізацію збудника серії ВТЕ(П)-400/75	148

ВСТУП

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 унеможлиблює 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 простої високопродуктивного обладнання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках 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.

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.

Мета і задачі досліджень

Основна мета дослідження полягає в обґрунтуванні режимів безаварійної роботи синхронного двигуна приводу 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 цієї мети поставлені і вирішені 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-стана 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 системою 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 і 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.

Ідея роботи полягає у визначенні оптимальних параметрів рівня форсування та раціонального способу керування системою збудження і синтезу регулятора компенсації залишкової коливальності залежно від рівня навантаження синхронного двигуна металургійних машин.

Наукові положення, що виносяться на захист

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 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 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.

Обґрунтування і достовірність наукових положень і результатів 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 отриманих результатів:

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 навантажень.

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

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

Апробація результатів дисертації. Основні положення, наукові й 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.

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; опубліковано у співавторстві: [26] – відповідальний виконавець НДР, участь у проведенні досліджень на промисловому об’єкті задля встановлення фактичних причин аварійності автомат-стана ТПА-350, розроблення рекомендацій, укладання звіту; [67] – участь у вивченні та забезпеченні програмної підтримки під час розроблення програмно керованого збудника синхронних двигунів; [52] – участь в розробленні способу форсування та визначення параметрів і схеми системи збудження; [53] – аналіз впливу параметрів комбінованої автоматичної системи на форми перехідних характеристик синхронного двигуна, що працює у режимі періодичних ударних навантажень; [72] – 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; [51] – участь у розробленні алгоритмів та оцінка методів оптимізації на предмет встановлення найбільш раціонального; [83] – побудова моделей, отримання кількісних результатів та їх аналіз; [80, 81] – участь у розробленні ідеї, формулюванні основних принципів, схемних рішень способу та оформленні патенту України на винахід.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. 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.

РОЗДІЛ 1

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ПЛАСТИЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Виклики, пов'язані з руйнуванням або повним знищенням промислового комплексу в наслідок ведення військових дій, а також суттєве зношення інфраструктури комунального господарства через тривалу відсутність капітальних ремонтів, у найближчий час будуть вимагати значних обсягів будівельних матеріалів. Передбачається, що реалізація зазначених проєктів вимагатиме залучення значних обсягів конструкційного прокату та трубної продукції. Цей ресурс слугуватиме підґрунтям для будівельно-монтажних робіт та спорудження об'єктів, що забезпечить підвищення рівня зайнятості та сприятиме мінімізації соціальної напруги в українському соціумі.

1.1 Обґрунтування стратегічної актуальності теми

За даними звіту Київської школи економіки [1], прямі збитки на початок 2024 р., які виникли в наслідок ведення військових дій, становили: житлові будівлі – \$58,9 млрд, інфраструктура – \$36,8 млрд, що склало відповідно 37,5 % та 23,4 % від загальних оцінених втрат (див. рисунок 1.1).

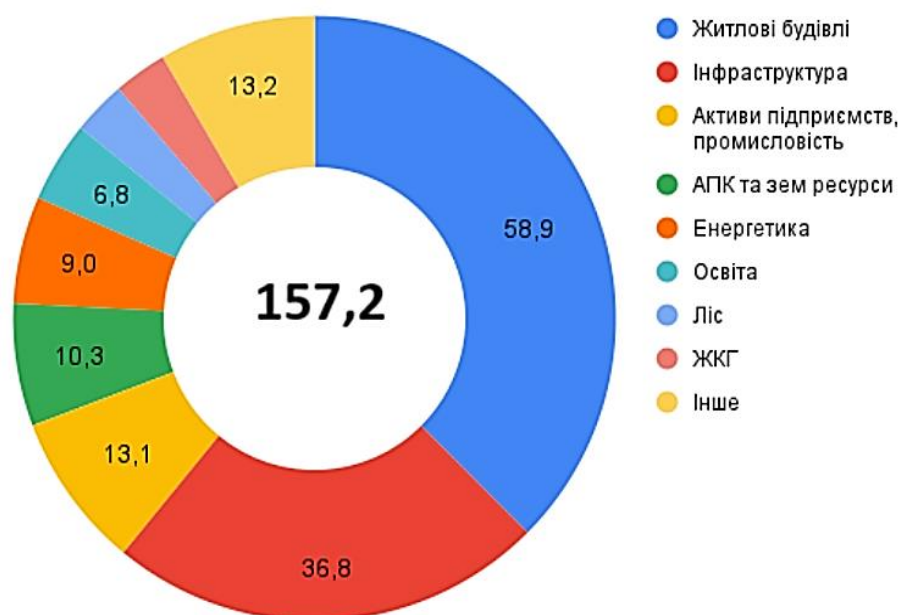


Рисунок 1.1 – Прямі збитки за секторами, \$ млрд [1]

Також слід зазначити, що інженерні мережі водопостачання, водовідведення та централізованого опалення були прокладені ще за радянських часів і значно перевищили нормативний амортизаційний термін експлуатації [2, 3], а рівень їх фізичного зносу становить до 85 %.

Крім того, сучасні технології каркасного будівництва багатоповерхових споруд, зумовлюють щільну забуду центральних районів великих міст, де наявні інженерні мережі не розраховані на таке навантаження. Тому реконструкція мереж в окремих районах і містах загалом є неминучою, навіть без урахування ступеня їх зносу.

Відомо, що продукцію прокатного виробництва поділяють на 5 класів [4, 5] (див. рисунок 1.2.). Оскільки робота спрямована на особливості трубного виробництва, надалі увагу в роботі буде зосереджено саме на цьому типі виробництва.

Заготовки	Листовий прокат	Сортовий прокат	Труби	Спеціальний прокат
Блюми Сляби Заготовки квадратні Трубні заготовки	Гарячекатаний Товсті листи Тонкі листи і смуги Холоднокатаний Листи й смуги Жерсть Фольга	Прості профілі загального призначення (коло, квадрат, смуга тощо) Фланцеві (фасонні) профілі загального призначення (балки, рейки, швелери, куточки рівнобокі й нерівнобокі, тавровий профіль тощо) Спеціальні профілі	Безшовні Зварні	заготовки для машинобудування кулі гнуті профілі свердла ребристі труби залізничні колеса тощо

Рисунок 1.2 – Різновиди продукції прокатного

Безшовні труби виробляють гарячо- та холоднокатаними, пресованими (діаметр до 820 мм) або литими (діаметр до 900 мм). За профілем поперечного перерізу їх поділяють на круглі та фасонні.

Залежно від призначення безшовні труби поділяють на такі групи: 1) для нафтової та газової промисловості; 2) для трубопроводів; 3) для будівництва; 4) для машинобудування; 5) для посудин та балонів [5].

Інструмент виготовлення безшовних труб – прокатний стан, який складається з комплексу агрегатів, машин і механізмів, призначених для пластичної обробки і транспортування. Агрегат, своєю чергою, є комплексом машин і механізмів та призначений для виконання певної технологічної операції.

Завдяки високій механічній міцності та здатності витримувати високі температури, металеві труби мають широкий спектр застосування – транспортування рідин і газів, спорудження інженерних комунікацій в будівлях різного призначення, елементи конструкції, основа для виготовлення деталей під час виробництва машин і будівельного обладнання, для облаштування обсадних конструкцій свердловин [6, 7].

Конструкційні труби є важливою частиною сучасних будівельних проєктів. Завдяки довговічності, міцності, пластичності й економічній ефективності, вони відіграють важливу роль в інфраструктурі, зокрема споруди, мости, вежі, стадіони, склади та промислові будівлі [8]. Ці труби особливо корисні у випадках застосування високоінтенсивного навантаження або під час створення асейсмічних конструкцій через їхній жорсткий механічний характер і здатність протистояти великим навантаженням без будь-якої деформації. Характеристики конструкційних сталевих труб також дозволяють використовувати їх у деяких нішевих галузях, як-от системи трубопроводів, опорні конструкції в системах відновлюваної енергії: вітрові та сонячні електростанції [9].

Останнім часом широкого вжитку набули труби з полімерних матеріалів, які використовують для створення трубопроводів транспортування рідин. Перевагами таких труб є менша вага, корозостійкість, гнучкість, менша вартість виготовлення. Водночас невисока механічна міцність, нестійкість до високих температур і тисків, обмежують сфери їхнього застосування.

1.2 Аналіз відмінностей систем прокатних станів

Конструкційні відмінності станів. Прокатні стани – це комплекс агрегатів і машин, які поділяють на основні й допоміжні [10, 11]. Залежно від виду прокату ці стани суттєво відрізняються один від одного конструктивними особливостями,

складом механізмів й технологією виробництва [10, 11, 12, 13]. Їх відповідно класифікують за призначенням [10, 11, 14, 15] (див. рисунок 1.3).

прокатні стани	обтискні
	заготівельні
	сортопрокатні
	листові / широкоштабові
	дресирувальні
	трубопрокатні
	рейкобалкові
	колесо-бандажні
	дротопрокатні
	спеціального призначення

Рисунок 1.3 – Класифікація прокатних станів за призначенням

Трубопрокатні стани, як основний предмет розгляду в роботі, також відрізняються великою різноманітністю конструкцій. До них належать – прошивні, автомат-стани, безперервні, пільгер-стани, розкатні тривалкові і поперечно-гвинтової прокатки. Для зменшення діаметра й отримання точних розмірів труб використовують редуційні і калібрувальні стани. При цьому в них застосовують технології гарячої і холодної пластичної деформації [15].

Безшовні труби отримують холодним витягуванням, обробкою гарячих заготовок прошивкою і розкаткою, тоді як для виготовлення зварних труб використовують холодноформовану смугу або пластину з подальшим зварюванням [16].

1.2.1 Технологічні відмінності виробництва безшовних труб

Незалежно від способу виробництва гарячедеформованих труб, технологічна схема містить в собі такі загальні етапи [6, 10]: нагрівання металу, отримання порожнистої заготовки (гільзи) та чорнової труби (розкатка гільзи), остаточне формування стінки та діаметра труби (редукування або калібрування). Водночас перед кожною технологічною операцією, за потреби, здійснюють підігрів заготовки.

Автоматичні стани і стани типу «тандем» мають високу маневреність і універсальність. На цих станах прокатують тонкостінні і товстостінні труби з різних сталей, зокрема з нержавіючих.

Пілігримові стани не забезпечують високої якості труб та мають низьку продуктивність. Такі стани доцільні лише для виробництва труб великого діаметра (понад 350...400 мм).

Найбільшого поширення у світовій та вітчизняній практиці виробництва труб набули агрегати з автоматичним станом, з безперервним багатоклітьовим станом, з пілігримовим станом та з тривалковими станами прокатки.

Таблиця 1.1 – Технологічні схеми, що використовують автоматичні стани

Операції	Склад обладнання	
Отримання гільзи	Прошивний стан, елонгатор	Пресвалковий прошивний стан, елонгатор
Отримання чорнової труби	Автоматичний стан, рилінг	Автоматичний стан
Отримання чистової труби	Калібрувальний та редуційні стани, розширювач	Калібрувальний та редуційні стани

До основних особливостей роботи електропривода валків прокатних станів належать: велика кількість вмикань (1000 на годину для реверсивних станів); ударний характер навантаження, яке перевищує номінальне навантаження двигуна; а також можливі прискорення і гальмування двигуна з металом у валках; забезпечення високої продуктивності.

З урахуванням цих особливостей визначаються такі вимоги до електропривода:

- широкі межі регулювання швидкості;
- висока перевантажувальна здатність;
- достатня експлуатаційна надійність;
- мінімальний маховий момент;
- великий пусковий момент;
- жорсткі механічні характеристики.

1.2.2 Агрегати стана повздовжньої прокатки з короткою оправкою

Агрегати зі станами повздовжньої прокатки на короткій оправці (з автомат-станами або станами типу «тандем») поділяють на три типорозміри. Малі агрегати (ТПА-140) призначені для виробництва труб діаметром до (146...159) мм, середні (ТПА-250) виробляють труби діаметром не більше (245...273) мм, великі (ТПА-350) – (245...325) мм та (ТПА-400) – до (402...420) мм. У складі устаткування агрегатів різних типорозмірів наявні деякі відмінності. У малих агрегатах завжди є редуційний стан, що дозволяє прокатувати на них труби, мінімальний діаметр яких становить (20...30) мм. Більшість середніх агрегатів також має редуційні стани, хоча є агрегати і без них. У першому випадку мінімальний діаметр труб становить (50...60) мм, а у другому він становить (102...114) мм. Великі агрегати не мають редуційних станів, і нижній діапазон діаметра труб обмежений (146...168) мм. Великі агрегати, а часто й середні, мають у своєму складі елонгатори. Конструктивно елонгатори не відрізняються від прошивних станів, тому їх іноді називають другим прошивним станом.

Трубопрокатні агрегати, створені 70 - 80 рр. і ті, що зазнали реконструкції з того часу, відрізняються від старих значним збільшенням потужності головних двигунів, що зумовлено значною інтенсифікацією роботи агрегатів, застосуванням більш високих швидкостей прокатки та переходом від трипрохідної до двопрохідної технології прошивки гільзи [17].

Прокат в автоматичному стані супроводжується завантаженням усередину гільзи кухонної солі, розплав якої виконує роль технологічного мастила. Після кожного проходу оправку знімають зі стрижня, а робочі валки розводять для пропуску труби на передній бік стана. Труба до валків подається пневматичним штовхачем. Після завершення першого проходу трубу кантують на кут приблизно 90°, і якщо для цієї операції використовують кантувальні ролики, то ними ж спрямовують трубу до валків. Повернення труби після чергового проходу на передню сторону стана здійснюється роликами зворотного подачі. Після закінчення прокатки труба скидається з вхідного жолоба на решітку і вона

скочується на рольганг, що веде до рилінгів. Іноді для передачі труб, крім похилої решітки, використовують шлепперную передачу. Валки автоматичного станна, зазвичай, є багатокаліберними. Різні калібри призначені для прокатки різних діаметрів. У зв'язку з цим передній стіл має можливість та встановлюватися таким чином, щоб вісь вхідного жолоба збігалася з віссю потрібного калібру. Відомі однокаліберні автоматичні стани, у яких перехід на прокатку труб нового діаметра вимагає заміни кліті, у таких випадках передній стіл є стаціонарним. Однокаліберні стани характеризуються більш жорсткою конструкцією, що підвищує точність геометричних показників труб.

1.2.3 Чинники якості труб та їх забезпечення

Якість труб визначається точністю їхніх розмірів, чистотою зовнішньої та внутрішньої поверхні, а також механічними властивостями, які регламентуються стандартами або технічними умовами. Деякі види труб характеризуються додатковими показниками, як-от корозійна стійкість, мікроструктура труб тощо.

Механічні властивості труб насамперед залежать від марки сталі, термічної обробки і технології температурно-деформаційних режимів прокатки.

Точність внутрішнього діаметра труб зазвичай не регламентується, хоча в багатьох випадках за умовами експлуатації вона має важливіше значення, ніж точність зовнішнього діаметра. Однак внутрішній діаметр труб у гарячому стані не калібрується.

Щодо точності зовнішнього діаметра готових труб, вона переважно визначається умовами калібрування або редукування (коливання середніх діаметрів труб) та правки овальності й мало залежить від попередніх стадій технологічного переділу.

Точність труб за товщиною стінки здебільшого визначається їхньою різностінністю. До складових різностінності труб належить поперечна та поздовжна різностінність. Найчастіше товщину стінки вимірюють на кінцях труб, і тому під поздовжньою різностінністю розуміють різницю у товщині стінки кінців труб. Це відхилення залежить від *температурних, швидкісних та деформаційних режимів налаштування* розкочувальних та редуційних станів,

оскільки відхилення від заданої товщини стінки зумовлено порушенням режиму натягу.

Різностінність гільзи. На підставі відомостей [18, 19] встановлено, що товщина стінки змінюється нерівномірно по твірній гільзі. Нерівномірність товщини стінки на кінцях завжди більша, ніж у середині, і розташовується спіралеподібно та у більшості випадків зумовлена ексцентричністю.

Одним із технологічних факторів, що впливають на різностінність гільзи, якість торців та її овальність, точність зацентрування, рівномірність нагріву, відповідність калібрування інструмента встановленим кутам подачі, величина обтиснень, знос технологічного інструменту.

На сучасних виробничих лініях активно використовується технологія прокатки безшовних труб із застосуванням оправки або без неї. Під час розкочування з утримуваною оправкою виготовляють труби різних зовнішніх діаметрів, які класифікуються за спеціальною системою калібрів. Весь асортимент труб формують на калібрувальному або редукційному станах [20]. Дослідження факторів впливу на відхилення геометричних розмірів гільз на автоматичному стані ТПА-350, зумовлених підвищеним зносом технологічних інструментів і коливаннями елементів робочої кліти, розглянуто в [21].

Отже, на якість готової продукції трубного виробництва впливає сукупність чинників: якість виплавленого матеріалу; точність налаштування основного обладнання; ступінь зносу інструментів; дотримання технологічних показників, як-от температура заготовки на всіх етапах формування, **режими деформації та швидкісні режими.**

1.3 Первинне вивчення об'єкта досліджень

Вхідний проєкт автоматичного стану ТПА-350 ТПЦ2 передбачав комплектацію головного привода асинхронним маховиковим приводом, номінальною потужністю 1840 кВт. Тенденція до нарощування інтенсивності прокатки і розширення сортаменту труб в 50-х роках призвела до заміни проєктного двигуна на синхронний двигун серії МС-324-8/12 номінальної

потужності 2300 кВт без маховика, а після подальшої реконструкції в 1966 р. на двигун серії МС-324-10/12 потужності 2880 кВт. В умовах сьогодення, як приводні двигуни, по чергово використовуються дві зазначених вище синхронні машини.

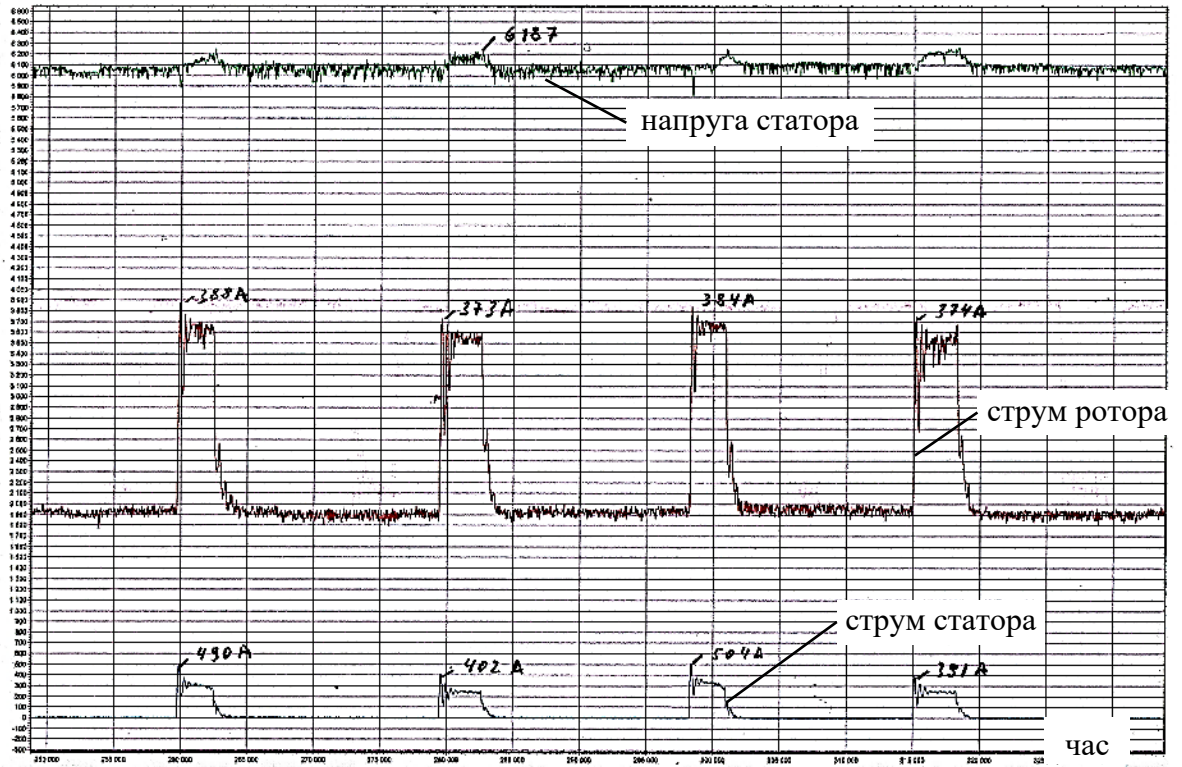
Основною проблемою роботи автомат-стана є висока експлуатаційна аварійність синхронного двигуна головного привода. Серед виявлених причин: погіршення та пробій ізоляції обмотки якоря в місці переходу проводів з пазової ділянки в лобову частину, і рідше – обмотки збудження.

Попередні виміри робочих режимів автомат-стана з приводним двигуном МС-324-10/12, які отримані у вигляді осцилограм струмів якоря та збудження і зафіксовані протягом часу прокату заготовки (див. рисунок 1.4) виявили, що при вході заготовки в кліть максимальні струми якоря короткочасно перевищують номінальне значення ($I_n=385$ А). Водночас слід зазначити, що середнє значення струму якоря під час прокату не перевищує номінального, до того ж система керування збудником форсує струм в обмотці збудження, що підвищує перевантажувальну здатність двигуна. Отже, на перший погляд можна стверджувати, що двигун не перевантажений і потужності цілком достатньо для виконання технологічного завдання.

Характер роботи прокатного стана та отримані дані свідчать про циклічне ударне навантаження, що спричиняє виникнення короткочасних перехідних процесів (анормальні режими роботи) в синхронному двигуні (СД) [22]. Разом з тим констатуємо, що протягом накиду навантаження використання автоматичного регулятора збудження (АРЗ) забезпечує стійкість синхронної машини, водночас викликає деякий перехідний процес.

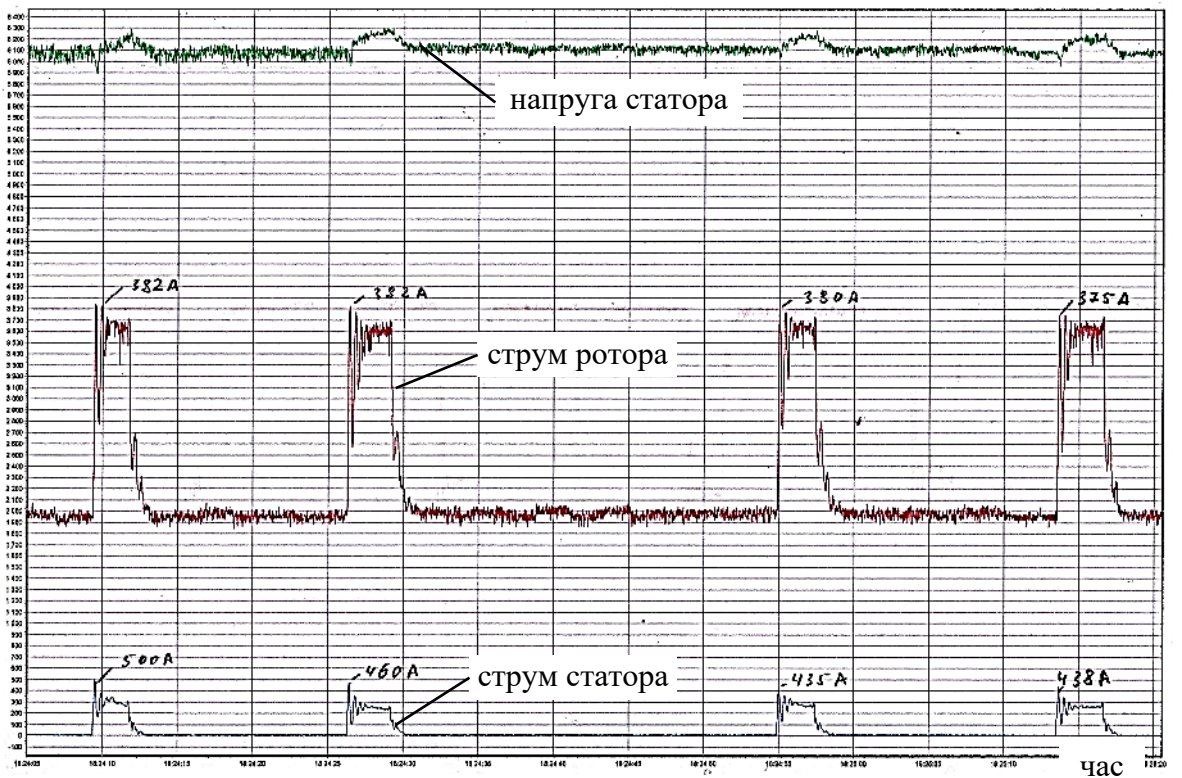
Відомо, що тривале збільшення струму в обмотках електричних машин небезпечно своєю тепловою та механічною дією. При перехідних процесах підвищення струму є короткочасне, отже, може розглядатися як адіабатичний процес. Тобто тепло, що виділяється за час протікання завищеного струму, повністю поглинається міддю, і відповідно до [22] може бути розраховане за рівнянням

U, B
I, A



а

U, B
I, A



б

а – 16.01.2012, б – 17.01.2012

Рисунок 1.4 – Напряга мережі, струм якоря та збудження під час прокату в автомат-стані ТПА-350

$$\Delta\vartheta = k_F \frac{j^2 - j_0^2}{175}, \text{ } ^\circ\text{C/сек}, \quad (1.1)$$

де j та j_0 – миттєва та початкова щільності струму А/мм²;
 k_F – коефіцієнт Фільда.

У джерелах [22, 23] зазначено, що швидке додаткове нагрівання обмоток двигуна може призвести до небезпечних наслідків через різні коефіцієнти розширення міді, ізоляції, сталі. Таке розширення може спричинити появу дефектів ізоляції, як-от перетирання та поява тріщин, в наслідок чого виникає електричний пробій.

Струми в перехідних процесах спричиняють електродинамічні та механічні зусилля як у пазових, так і особливо в лобових частинах обмотки. Для приблизного розрахунку діючого зусилля в лобових частинах можна скористатися формулою:

$$F = \frac{2 \cdot l \cdot i^2 \cdot 10^{-8} \cdot g}{d}, \text{ Н} \quad (1.2)$$

де l – довжина струмопровідного провідника, см;
 i – струм в провіднику, А;
 d – відстань між провідниками, см;
 g – прискорення вільного падіння, м/с².

Для точного розрахунку потрібні обмотувальні параметри машини, які зазвичай завод-виробник не надає. Проте скориставшись експериментально отриманими значеннями струму якоря, можна оцінити ступінь зростання зусилля в лобовій частині обмотки під час ударного прикладення навантаження. Відношення зусиль в обмотці під навантаженням F_H і неробочого ходу F_{HX} дорівнює відношенню квадратів відповідних струмів: навантаження i_H неробочого ходу i_{HX}

$$k_y = \frac{F_H}{F_{HX}} = \frac{2 \cdot l \cdot i_H^2 \cdot 10^{-8} \cdot g \cdot d}{2 \cdot l \cdot i_{HX}^2 \cdot 10^{-8} \cdot g \cdot d} = \frac{i_H^2}{i_{HX}^2} \quad (1.3)$$

де i_H – струм в провіднику після прикладання навантаження, А;

i_{HX} – струм в провіднику до прикладання навантаження, струм неробочого ходу, А.

Згідно з даними рисунка 1.4 а, при захваті заготовки валками, струм змінюється від значення неробочого ходу 20 А до 504 А (перший прохід), зусилля зростає в $k_y=635$ разів, для другого проходу струм змінюється від 20 А до 391 А – $k_y=382$.

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

Актуальність проведення наукових робіт також може бути обґрунтована за допомогою оцінки економічних втрат на проведення різного роду ремонтних робіт. З цією метою проаналізовано вартісні показники ліквідації аварій, які зведені у спеціальній довідці компанії Інтерпайп Ніко Тьюб. Відповідно до цих даних, головний привод автомат-стана ТПА-350 за період 04.2014 - 02.2025, більшу частку часу роботи механізму використовує основний двигун МС-324 10/12 потужності 2880 кВт, тобто 79 %, тоді як резервний МС-324 8/12 потужності 2300 кВт залучається лише у випадках ремонту основного (21 % часу). За вказаний період, ремонт виконувався п'ять разів: основний двигун – тричі на площадці ремонтних організацій; резервний двигун – двічі (один на площадці ремонтної організації та один раз в умовах заводу без зупинки виробництва).

Відповідно до наданих відомостей, один раз на місяць, або 12 разів на рік, компанія виконує планово-попереджувальні ремонти (ППР) ТПА-350, без заміни електродвигуна. До переліку ППР обов'язково входять такі види робіт: ревізія щіткового апарату, продування, чищення, огляд струмопровідних частин,

обмоток та ізоляторів, вимірювання опору ізоляції кіл статора та ротора, протягування болтових з'єднань та кріплень, контроль рівня та заміна мастила у вальницях.

Несистемний характер капітальних ремонтів, одночасно із щомісячними ППР, свідчить про недостатню якість обслуговування обладнання, що своєю чергою, призводить до зниження надійності привода загалом, і яка додатково послаблюється впливом ударного характеру навантаження.

Відповідно до даних сайту Мінфіну [24] станом на червень 2025 р. інфляція становить 383 %, порівняно з груднем 2014 р. (100 %). 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.

Вартість виконаних ремонтних робіт основного двигуна, пов'язаних із заміною заліза та обмоток становить 87 % від загальної вартості, решта 13 % – ремонт вальниць і місць їхньої посадки, елементів муфтових з'єднань тощо.

Таблиця 1.2 – 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)

Вартість ремонту змінюватиметься відповідно до ринкових цін на матеріали та розміру заробітної плати, тому на цю складову вплинути

неможливо. Згідно з даними MacroTrends [25] за період 07.2018 – 06.2025 світова ціна на мідь зросла вдвічі (з \$ 2,88/фунт до \$ 5,77/фунт). З огляду на значне збільшення курсу валют (308,8 %) в Україні, це зростання ще відчутніше. Відтак, вартість заміни обмоток двигуна постійно зростає лише за рахунок вартості матеріалів. Проте, зменшивши вплив ударного прикладання навантаження за допомогою алгоритмів керування, можна збільшити міжремонтний термін експлуатації і, відповідно, суттєво зменшити витрати на капітальні ремонти й простої обладнання.

Висновки до розділу

1. Відновлення промислового потенціалу та інфраструктури ЖКГ вимагає значної кількості будівельних матеріалів, зокрема конструкційного прокату та труб. Це, своєю чергою, сприятиме зайнятості населення.

2. Полімерні труби, зважаючи на свої властивості, широко застосовують для мереж водопостачання й водовідведення житлових і комунальних будівель, проте їхня слабка механічна й термічна стійкість обмежує сфери практичного застосування.

3. Металеві труби не втрачають своєї актуальності через свою високу міцність. Недоліки в корозійній стійкості вирішують нанесенням полімерного покриття на внутрішню та/або зовнішню поверхню металевих труб.

4. Залежно від виду прокату стани суттєво відрізняються один від одного конструктивними особливостями, складом обладнання й технологією виробництва.

5. Особливістю режимів роботи приводного електродвигуна реверсивних станів є періодичне прикладення ударного навантаження, що зумовлює коливання й перехідні процеси в кінематичній системі, і в обмотках двигуна. Заходи щодо зменшення впливу миттєвого зростання навантаження в електромеханічній системі покликані, з одного боку, забезпечити якісні стабільні показники технологічного процесу прокатки, а з іншого – захистити механічне й

електричне обладнання від надмірних пікових навантажень, подовжуючи міжремонтні періоди.

6. Характерною особливістю автомат-станів з багатокаліберною кліткою є швидкісне переналаштування виробництва одного типу труб на інший, що визначає їх як високоефективні за умови випуску малих партій труб.

7. Сучасні трубопрокатні автомат-стани, відрізняються від попередніх конструкцій значним збільшенням потужності головних двигунів, що зумовлено суттєвою інтенсифікацією роботи агрегатів, застосуванням більш високих швидкостей прокатки та переходом від трипрохідної до двопрохідної технології прошивки гільзи.

8. На якість готової продукції трубного виробництва впливає сукупність чинників: якість вхідного металу заготовки; точність налаштування основного обладнання; ступінь зносу інструментів; дотримання технологічних показників, як-то температура заготовки на всіх етапах формування, режими деформації та швидкісні режими. Виходячи із отриманого висновку якість продукції прокатки з боку головного привода може бути забезпечена двома показниками – стабільністю швидкості прокатки, що є характерним для синхронних двигунів та умовами гарантованого втягнення заготовки у валки.

9. Основною проблемою під час експлуатації автомат-стана є періодична відмова синхронного двигуна головного привода. Серед виявлених причин: погіршення та пробій ізоляції обмотки статора. Додатково проведено оцінку вартості ремонтних робіт, яка наочно довела безумовну необхідність виконання наукових досліджень задля підвищення надійності електромеханічної системи автомат-стана ТПА-350.

РОЗДІЛ 2

ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНИХ ПРИЧИН АВАРІЙНОСТІ СИНХРОННОГО ПРИВОДА АВТОМАТ-СТАНА ТПА-350

2.1 Загальні відомості

Особливістю виконання дисертаційної роботи є те, що дослідження здійснювалися на реальному виробничому автомат-стані ТПА-350 підприємства ТОВ «Інтерпайп Ніко Тьюб» м. Нікополь [26]. Етап промислово-експериментальних пошуків причин аварійності вимагав здійснення первинних вимірювань на діючому об'єкті, де отримання даних ускладнено через необхідність узгодження одночасного ведення технологічного процесу і санкціонованого приєднання вимірювальних приладів фіксації поточних величин у схемі приводного високовольтного електричного двигуна.

Як було встановлено, основними причинами впливу на аварійність головного привода автомат-стана ТПА-350 можуть бути показники теплового навантаження та динамічних зусиль в обмотках привідного двигуна [26, 27, 23]. Зазвичай фактичний рівень параметрів такого типу може бути зафіксований непрямым чином, і як згадувалось в п. 1.3, винятково через вимір струмів, напруг та потужності, відповідно, в якірних та індукторних обмотках синхронної машини. Крім того, технологія роботи привода прокатної кліті передбачає періодичні, досить швидкі перехідні процеси, які звичайними приладами контролю середньої або діючої електричної величини здійснити не можливо. Тому для досліджень було запропоновано і використано спеціалізований вимірювальний комплекс СКПЕП 2.2 [28], який є розробкою ТОВ НВП «Центр електромеханічної діагностики» (м. Дніпро). До того ж дослідні роботи виконувались за стандартизованою програмою, якою користуються технічні підприємства з паспортизації електричних двигунів [29], що гарантує достатній рівень достовірності отриманих результатів.

2.2 Обов'язкові фактори тестування працездатності

Наявність значних динамічних зусиль насамперед в якірних обмотках синхронного привідного двигуна автомат-стана, як зазначалось в п. 1.3, залежать від рівня струмів або від їхньої зміни в обмотках. Гіпотеза щодо причини руйнування електричних компонентів конструкції синхронної машини, власне, на цьому і базується. Тому задачею цього етапу є встановлення режимів роботи двигуна, які супроводжуються перехідними процесами, де відбуваються коливання струмів.

Розглянемо електромеханічну систему головного привода автомат-стана ТПА-350 з двигуном потужністю 2880 кВт, стосовно електромеханічних процесів, де відбуваються коливання струмів. Серед таких режимів насамперед слід звернути увагу на: режим запуску, входження двигуна у синхронізм, процес накиду навантаження з контролем на стійкість або процесу випадіння машини із синхронізму, режими регулювання системи збудження і, зрештою, оцінити кількісний рівень зусиль, які можуть виникати внаслідок коливання струмів.

На основі аналізу експериментів та вимірювань електричних параметрів, отриманих під час пуску та в режимах навантаження, буде сформульовано остаточні висновки щодо фактичних причин аварійності головного привода автомат-стана ТПА-350, а також визначено контрдії, які можуть бути реалізовані засобами системи керування синхронного привода.

2.3 Технічна характеристика об'єкта досліджень

Конструкція механічної складової прокатної кліті автомат-стана ТПА-350 представлена кінематичною схемою (див. рисунок 2.1), а її кількісні параметри зведено у таблицю 2.1.

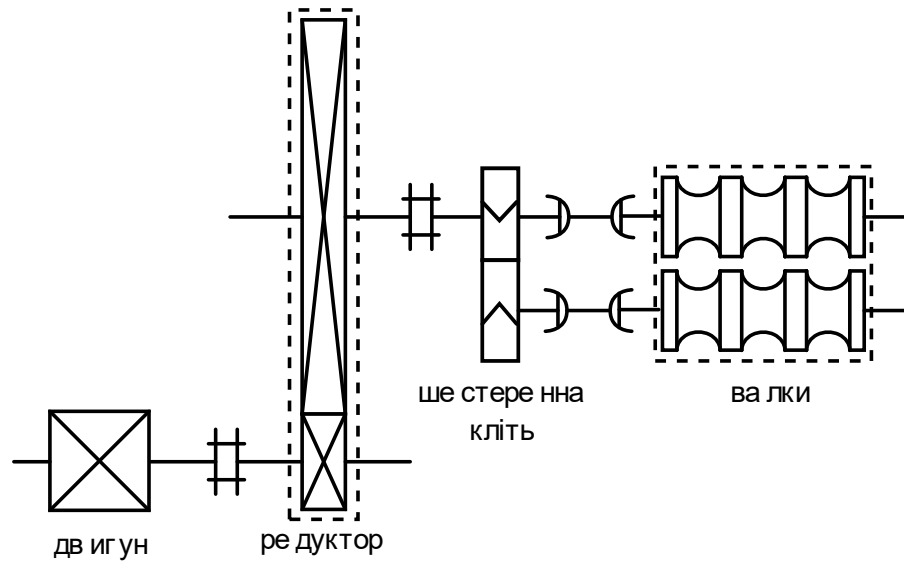


Рисунок 2.1 – Кінематика автомат-стана

Таблиця 2.1 – Параметри механічної складової стана

Параметр	Значення	
	тихохідний	швидкохідний
ККД шпинделів	0,97	
ККД шестеренної кліті	0,93	
ККД редуктора	0,95	
ККД муфти	0,99	
Передавальне відношення редуктора	4,98	
Момент інерції редуктора, кгс·м·с ²	262,5	
	тихохідний	швидкохідний
Момент валу, кг·м ²	12264,36	800
Швидкість валу, об/хв	100,4	500
Діаметр валу, мм	240	270
Діаметр шестерні, мм	2370	535
Сполучна муфта, встановлена на виході редуктора		
Тип муфти	ч. 4692 СБ	
Жорсткість пружних елементів	—	
Момент інерції, кг·м ²	1633,36	

Електрична складова стана містить головний привод – основний – МС-324-10/12 та резервний – МС-324-8/12. Їх паспортні дані наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри приводних двигунів автомат-стана

Параметр	Значення	
	МС-324-10/12	МС-324-8/12
Тип двигуна	МС-324-10/12	МС-324-8/12
Номинальна напруга, В	6000	6000
Номинальний струм статора, А	385	290
Номинальна активна потужність, кВт	2880	2300
Номинальна швидкість, об/хв	500	500
Число пар полюсів	6	6
ККД, %	92	95,3
cos φ	0,75	0,8
Кратність $M_{пуск}/M_{ном}$	1,2	0,7
Кратність $M_{макс}/M_{ном}$	2,5	2,4
Кратність $I_{пуск}/I_{ном}$	3,5	3,7
Номинальна напруга збудження, В	68	75
Максимальна напруга збудження, В	90	90
Номинальний струм збудження, А	310	340
Момент інерції двигуна, кг·м ²	1300	1030

2.4 Дослідження роботи вхідної електромеханічної системи

2.4.1 Оцінка режиму пуску

Дослідження режимів роботи головного привода стана здійснювались безпосередньо на виробництві (ТПЦ2 СД автомат-стана, N724) за розробленою програмою [29]. Для реєстрації фактичних даних було використано систему контролю параметрів електропривода (СКПЕП), яку розроблено, спроектовано і виготовлено ТОВ НВП «Центр електромеханічної діагностики». Її конструкція складається з модуля аналого-цифрового перетворення, блоків гальванічної

розв'язки та давачів електричних величин (струмів і напруг). Схема електричних приєднань комплексу СКПЕП до об'єкта досліджень зображена на рисунку 2.2.

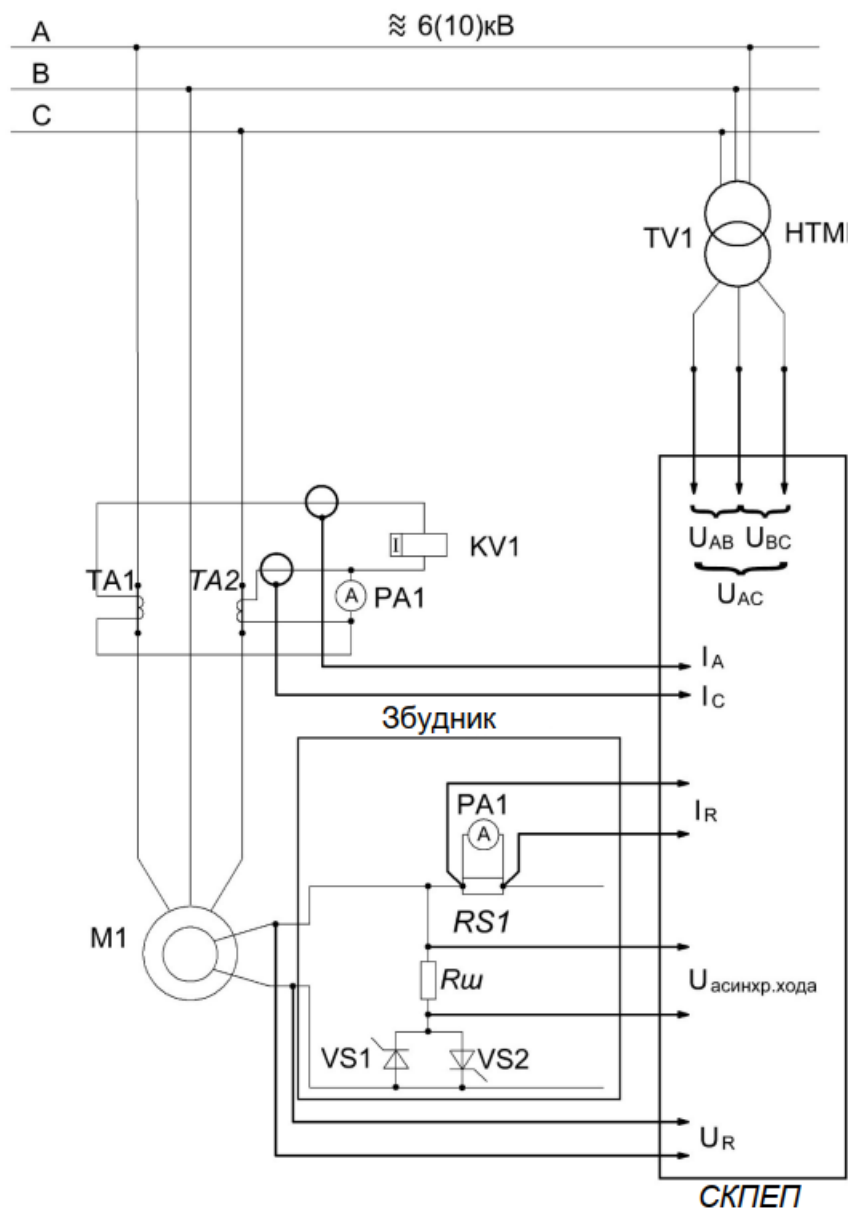
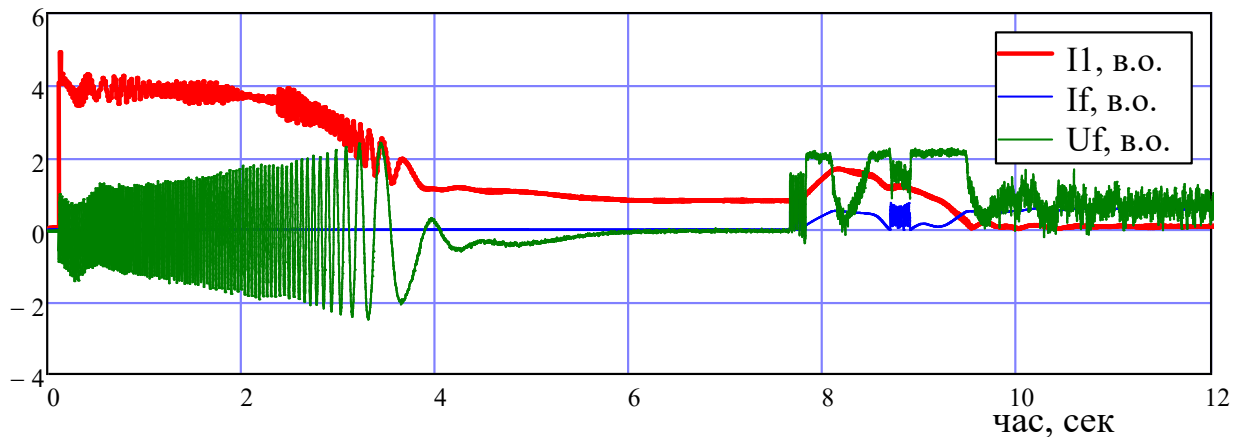


Рисунок 2.2 – Схема під'єднання датчиків до вимірювального комплексу СКПЕП в систему керування з приводним синхронним електродвигуном напругою 6 (10) кВ

Під час проведення експерименту контролювалися:

- напруга якоря U_S ;
- струм якоря I_S ;
- напруга збудження U_f ;
- струм збудження I_f .

Параметри реального запуску приводного двигуна МС-324-10/12 (2880 кВт) зображено на рисунку 2.3. Для зручності всі зняті характеристики подано в одній системі координат, а вимір сигналів представлено у відносних одиницях, де за базові величини прийняті відповідні номінальні параметри двигуна.



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

Рисунок 2.3 – Пуск та один прохід заготовки повз прокатну кліть

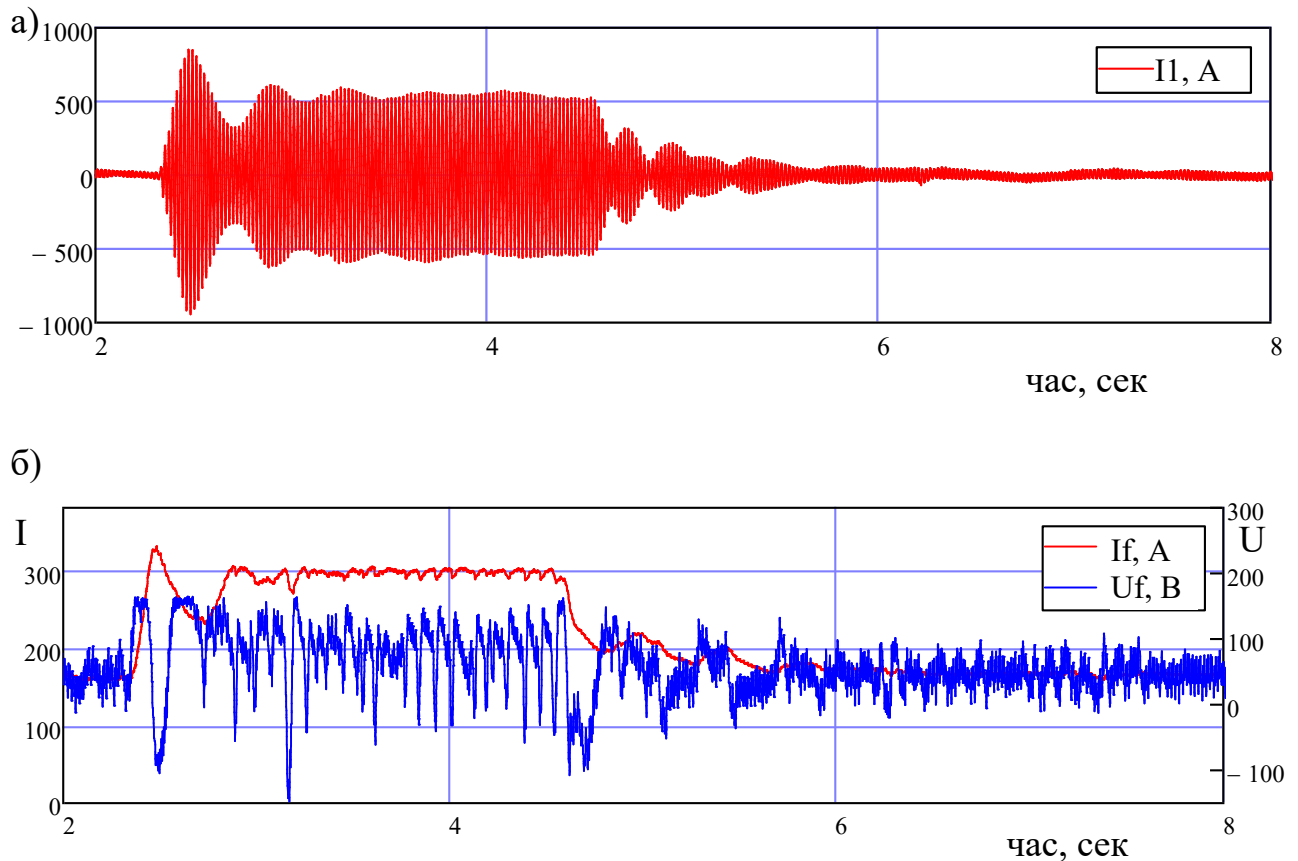
Максимальне значення струму під час запуску – 1887 А, що відповідає приблизно п'ятикратному номінальному значенню. Розгін двигуна відбувається при струмі близько 1500 А (3,8 номінального значення). Тривалість виходу на підсинхронний режим не перевищує 4 сек. Процес синхронізації дещо затягнутий (2 секунди), оскільки система збудження очікує сприятливих умов подачі збудження в коло ротора двигуна.

Параметри пуску є цілком задовільними для синхронних двигунів такого класу та потужності [30, 31].

2.4.2 Енергетичні параметри приводного електродвигуна

Штатний режим роботи електропривода автомат-стана оцінювався на основі енергетичних параметрів експлуатації. Мета поставленого експерименту – отримання даних для непрямой оцінки зусиль у механічній системі під час ударного прикладання навантаження.

Результати експерименту (див. рисунок 2.4) отримані протягом одного проходу заготовки труби зовнішнього діаметру 219 мм, товщини стінки – 8 мм і марки сталі – ст.20.



а) I_1 – миттєвий струм якоря; б) I_f , U_f – напруга і струм збудження

Рисунок 2.4 – Процес одиничного проходу заготовки крізь валки

До подачі заготовки у валки струм неробочого ходу якоря електродвигуна становить близько 12 А. Під дією моменту опору відбувається збільшення струму якоря, на що реагує система керування збудником – починається зростання струму збудження.

Навантажувальна здатність електродвигунів визначається двома основними критеріями: максимально допустимим струмом статора – за умовами утримання в синхронному режимі, і еквівалентним струмом за період за умовами нагрівання двигуна. На рисунку 2.5 показана зміна діючого значення струму статора упродовж двох проходів заготовки.



Рисунок 2.5 – Діючий струм статора упродовж двох проходів заготовки

Експериментально встановлено, що максимальне значення струму статора на початку прошивки становить 663 А (1,72 номінального значення), а еквівалентне значення за цикл обробки однієї заготовки – 115 А (близько 30 % номінального значення). Під час прошивки під навантаженням струм статора становить близько 390 А, тобто практично дорівнює номінальному значенню.

Значення миттєвої потужності, споживаної двигуном, опосередковано характеризує зусилля на валу, тому вона може бути використана для оцінювання навантажувальної здатності привода.

Рисунок 2.6 ілюструє залежність миттєвої потужності, спожитої приводним двигуном протягом процесу прокатки.

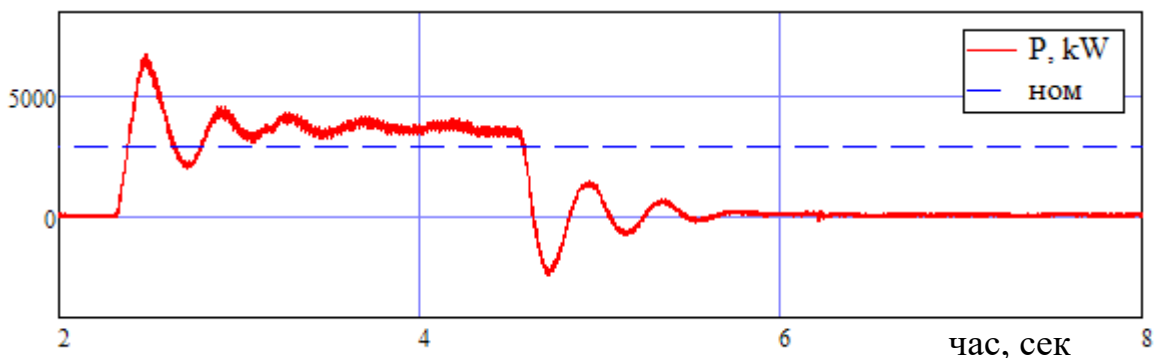


Рисунок 2.6 – Миттєва потужність споживання двигуна за прохід заготовки

Максимальна потужність споживання під час втягування заготовки у валки становить 6470 кВт, що відповідає двократному значенню номінальної споживаної потужності. Протягом проходу заготовки двигун споживає близько

3680 кВт (1,15 номінального значення). У середньому, за цикл обробки однієї заготовки двигун споживає потужність на рівні 365 кВт, що не перевищує 15 % номінального значення.

Таким чином, отримані експериментальні параметри перебувають у межах допустимого навантаження для синхронних двигунів цього класу, що підтверджує коректність режимів роботи електропривода в реальних умовах експлуатації.

2.4.3 Оцінка роботи системи збудження

Традиційно експлуатація синхронних двигунів супроводжується використанням їхньої здатності генерувати реактивну потужність, тобто працювати в режимі ємнісного навантаження. Завдяки цьому здійснюють корекцію коефіцієнта потужності в електричних мережах підприємства.

Характер реактивної потужності, спожитої синхронним двигуном, визначається величиною навантаження і струму збудження. Залежність між цими параметрами переважно описується сімейством U-подібних характеристик (див. рисунок 2.7).

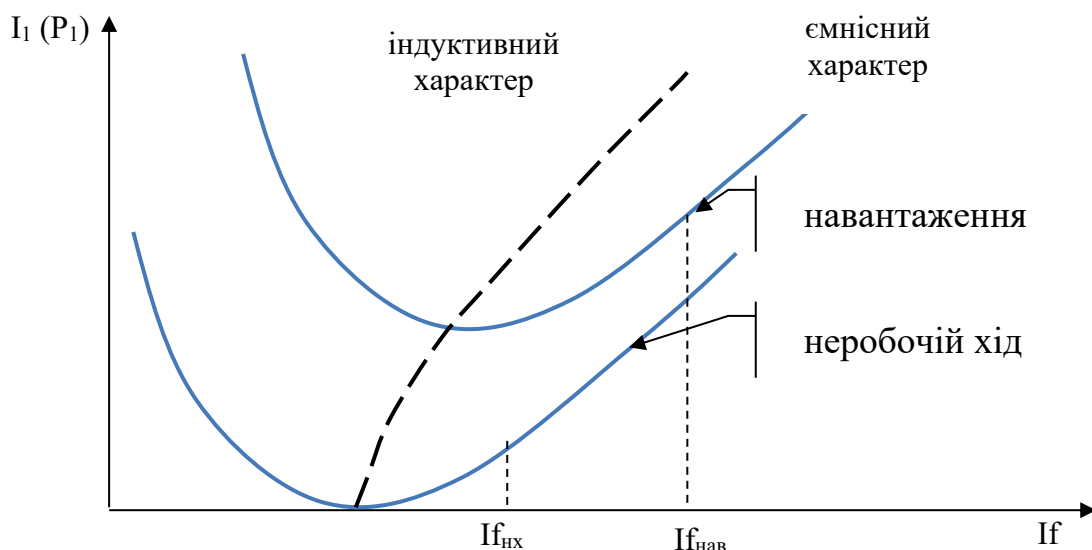


Рисунок 2.7 – U-подібні характеристики синхронного двигуна

Тому для забезпечення мінімального струму статора та ємнісного характеру роботи синхронного двигуна, під час неробочого ходу струм

підтримується на рівні $I_{f_{нх}}$. Під час роботи в режимі навантаження, або при просіданні напруги в мережі живлення, струм збудження необхідно підвищувати, щоб утримувати двигун у синхронному режимі.

Питання захисту синхронного електродвигуна від переходу в асинхронний режим за різкого динамічного навантаження залежно від параметрів мережі живлення розглянуто в [32, 33].

Для слабких, протяжних і сильно завантажених мереж, зокрема кар'єрних, застосовують класичний алгоритм:

1. У режимі неробочого ходу струм збудження встановлюється на сідлі U -подібної характеристики, тобто відповідає мінімальному значенню струму статора.

2. У діапазоні напруги мережі $(1,0 \dots 0,95) \cdot U_{ном}$ струм збудження лишається сталим.

3. За зниження напруги в мережі до $(0,95 \dots 0,8) \cdot U_{ном}$ встановлюється номінальне значення струму збудження, разом з тим $\cos\phi = 0,9$ ємнісного характеру.

4. За умови зниження напруги нижче $0,8 \cdot U_{ном}$ відбувається форсування струму збудження до $1,75$ його номінального значення

5. Усі описані процеси коригуються за сигналом давача активної потужності незалежно від величини напруги мережі. Сигнал, пропорційний активній потужності, додають до сигналу завдання струму збудження, але не східчасто (через компаратор), а через підсилювач із більшим коефіцієнтом підсилення, що забезпечує плавне зростання струму збудження.

Слід зазначити, що інерційність контуру збудження може негативно позначатися на величині струму статора під час ударного прикладення навантаження. Це зумовлено тим, що в цьому випадку двигун «зустрічає» навантаження з послабленим полем, і для створення необхідного моменту на валу він змушений споживати більший струм статора.

Рисунок 2.8 демонструє осцилограми струмів статора і збудження, а також миттєвої потужності споживаної приводним електродвигуном на початку

прикладення навантаження (струм збудження наведено з масштабним коефіцієнтом).

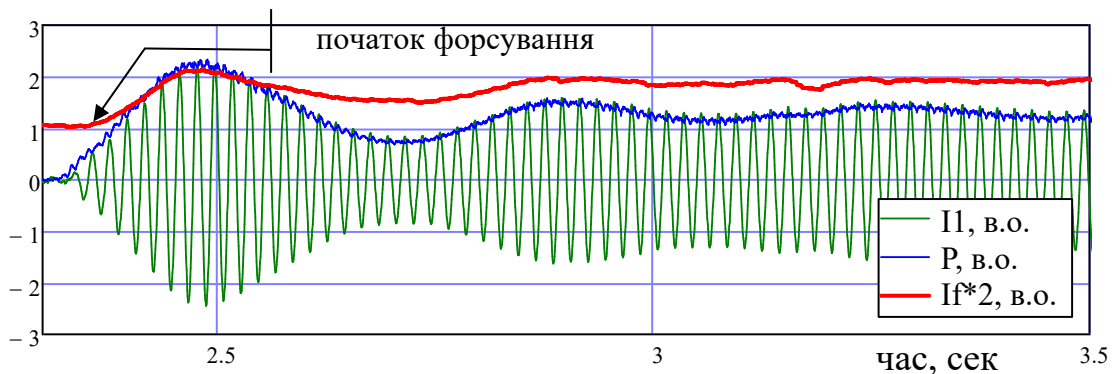


Рисунок 2.8 – Форсування струму збудження за ударного навантаження

Аналіз рисунка 2.8 свідчить, що система керування збудженням форсує двигун на другому періоді струму статора. Запізнення форсування становить близько 0,025 с. За цей час струм і споживана потужність встигають досягти величини майже 50% номінального. Перехідні процеси, пов'язані з коливаннями струму збудження, накладаються на процеси, спричинені зміною навантаження на валу.

У режимі неробочого ходу система збудження підтримує струм ротора на рівні близько 0,5 номінального значення, а під час обробки заготовки – номінальний струм збудження.

Таким чином, система збудження є працездатною та в поточній конфігурації забезпечує максимально можливу якість перехідних процесів. Єдиним методом зниження ударних навантажень у двигуні засобами системи збудження може бути попереджувальне форсування за сигналами від датчиків наявності заготовки.

2.4.4 Оцінка впливу ударного навантаження на стійкість

Попередню оцінку впливу ударного навантаження на синхронний двигун можна здійснити за кутовою характеристикою, яка є залежністю електромагнітної потужності P або моменту M від кута навантаження θ . Для зручності оцінки скористаємося виразом:

$$M = M' + M'' = \frac{3U_{\phi}E_0}{\omega_0 x_d} \sin(\theta) + \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin(2\theta), \quad (2.1)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга мережі живлення;

E_0 – значення ЕРС за ненасиченою характеристикою неробочого ходу;

ω_0 – швидкість обертання електромагнітного поля статора;

θ – кут навантаження;

x_d – індуктивний опір обмотки статора по поздовжній осі;

x_q – індуктивний опір обмотки статора по поперечній осі.

У таблиці 2.3. наведено параметри, необхідні для розрахунку кутової характеристики.

Таблиця 2.3 – Розрахунок параметрів СД

Параметр	Значення
$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{6}$, рад/с	52,36
$M_H = \frac{P_H}{\omega_0} = \frac{P_H \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{2880 \cdot 6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50}$, кН·м	55
$M_{\max} = M_H \cdot 2,5 = 55 \cdot 2,5$, кН·м	137,51
$Z_{\text{баз}} = \frac{U_L}{\sqrt{3} \cdot I_H} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 385}$, Ом	8,998
$x_d = x_d^* \cdot Z_{\text{баз}} = 1,252 \cdot 8,998$, Ом	11,265
$x_q = x_q^* \cdot Z_{\text{баз}} = 0,73106 \cdot 8,998$, Ом	6,578
$E^* = \frac{I_H \cdot x_d}{U_{\phi}} = \frac{385 \cdot 11,265}{6000/\sqrt{3}}$	1,252
$E_0 = E^* \cdot U_L = 1,25 \cdot 6000$, В	7511

Максимальний піковий експериментальний момент, що виникає в процесі захоплення труби валками, а також середній момент у сталому режимі прокатки визначаються на основі значень струму $I_e^p=663$ А і $I_e^y=390$ А за осцилограмою (див. рисунок 2.5.):

$$M_e^{\Pi} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_e^{\Pi} \cdot \cos \phi}{\omega_0} = \frac{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 638 \cdot 0,75}{52,36} = 98,96 \text{ кН} \cdot \text{м} \quad (2.2)$$

$$M_e^y = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_e^y \cdot \cos \phi}{\omega_0} = \frac{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 390 \cdot 0,75}{52,36} = 58,05 \text{ кН} \cdot \text{м} \quad (2.3)$$

Рисунок 2.9 ілюструє, що значення середнього сталого моменту M_e^y розташоване на лінійній робочій ділянці кутової характеристики і незначно (на 5,5 %) перевищує номінальне значення. Значення максимального пікового моменту M_e^{Π} не досягає значення максимального моменту двигуна і перевищує номінальне значення майже на 80 %.

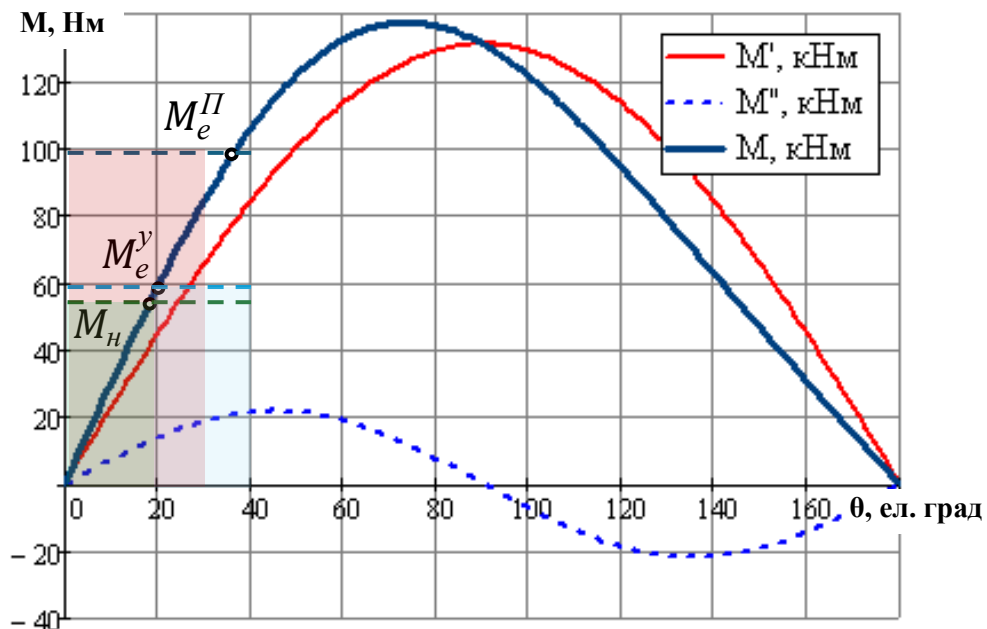


Рисунок 2.9 – Кутова характеристика двигуна МС-324-10/12

Отримані експериментальні дані демонструють, що навантаження, які виникають у приводі, не призводять до випадіння двигуна із синхронізму.

Висновки до розділу

1. Стани гарячої прокатки металу з головним синхронним приводом характеризуються наявністю значних динамічних навантажень. Їхній вплив спричиняє руйнування всіх без винятку робочих механізмів, які входять до складу

загальної конструкції. Водночас в синхронних приводах клітьових валків також виникають пошкодження і пробой пазової ізоляції обмоток якоря (85...95 %), а в потужних машинах, і в лобових частинах, протягом перехідних процесів [34].

2. Результати досліджень автомат-стану ТПА-350 наочно доводять теоретично висвітлені проблеми серйозних аварій, пов'язаних із виходом з ладу обмоток якоря синхронного двигуна. Значні грошові витрати, що виникають унаслідок регулярних аварій, іноді кілька разів на рік, потребують дороговартісних капітальних ремонтів двигунів. Це спонукало електротехнічні служби підприємства звернутися до науковців з метою здійснення аналізу та надання рекомендацій щодо роботи системи керування головного привода автомат-стану ТПА-350.

3. Проблема аварійності синхронного електропривода автомат-стану ТПА-350 зумовила здійснення цілого комплексу теоретичних і практичних перевірок. Так, вимірювання максимального струму запуску показав рівень 1887 А, що дорівнює п'яти номіналам. Розгін двигуна відбувається за струму близько 1500 А (3,8 номінального значення). Час розгону до підсинхронної швидкості не перевищує 4 с, а синхронізація триває 2 с, що є дещо затягнутим, але не критичним.

4. Енергетичні параметри приводного електродвигуна за результатами експериментальних досліджень не перевищують допустимих меж навантаження для електричної машини.

5. Оцінка роботи системи збудження виявила, що інерційність контуру збудження може негативно впливати на величину струму статора. Це пов'язано із «зустріччю» накиду навантаження з послабленим полем збудження, через що для створення необхідного моменту на валу двигун змушений споживати більший струм якоря. Отже, єдиним методом зниження ударних навантажень у двигуні засобами системи збудження може бути завчасне форсування за сигналами від датчиків наявності заготовки.

6. Перевірка стійкості показує, що навантаження, які виникають у приводі, не призводять до випадання двигуна із синхронізму.

РОЗДІЛ 3

КОМПЕНСАЦІЯ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ВИБОРОМ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

3.1 Сутність питання і огляд літературних джерел

Головний висновок попереднього розділу свідчить, що причиною руйнування обмоток синхронного двигуна автомат-стана ТПА-350 і механізмів подібного типу [26, 58] є виникнення значних динамічних зусиль під час екстремального перепаду струму якоря (див. рисунок 2.5), який виникає за одночасної дії ударного прикладання механічного навантаження.

Нами встановлено, що на цей процес можливо впливати через контур збудження встановленням регулятора повздовжнього струму якоря або ступінчастої зміни завдання на збудження із заздалегідь відомими рівнем і часом нарощування струму індуктора. Оскільки ступінчастий спосіб є більш простою задачею розглянемо його першим і почнемо з дослідження актуального стану питання.

Дослідженням впливу періодичних динамічних коливань в трубопрокатних агрегатах з автомат-станами і пошук шляхів зменшення їх впливу займалися Рахманов С.Р. [36, 37, 38, 39, 40, 41], Балакін В.Ф. [42], Хацкелян І.П. [43, 44], Поворотний В.В. [45, 46, 47], Крот П.В. [48, 49, 50] та ін. Ними досліджувались процеси деформації гільзи та навантаження, що виникають в механічній частині стана, не враховуючи вплив приводного двигуна.

Традиційно головний привод прокатних станів комплектувався двигунами постійного струму, що пояснювалося їхніми значними регулювальними можливостями. З часом, для потужних промислових механізмів, яким не потрібно регулювання швидкості, зокрема в окремих установках металургійного виробництва для механізмів з ударним навантаженням (приводи валків трубопрокатних станів, ножиці, приводи чорнових клітей тощо) почали застосовувати асинхронні двигуни з маховиком. У подальшому їх поступово

замінювали на синхронні електродвигуни, які мають низку переваг, зумовлених їхніми конструктивними властивостями [51].

Серед основних переваг синхронних двигунів – висока надійність завдяки збільшеному повітряному зазору, можливість компенсації реактивної потужності, високий ККД, значна жорсткість механічної характеристики, а також можливість використання тихохідних двигунів, які допускають вилучення редукторів зі складу кінематичних схем. Сукупність цих властивостей робить синхронні двигуни конкурентоспроможними та доцільними для використання в приводах прокатних станів [52, 53].

У режимі неробочого ходу синхронний електропривод прокатного стану працює зі зниженою напругою збудження з метою зменшення нагріву обмотки і енерговитрат. Найбільш суттєві зміни навантаження відбуваються під час захвату валками металу й при виході його з кліті. У цей час автоматична система регулювання збудження забезпечує необхідну стійкість двигуна, утримуючи його в синхронізмі завдяки форсуванню напруги збудження. З цією метою застосовують різні методи й засоби. Наприклад, у працях авторів [54, 55] система збудження оснащується ємнісним накопичувачем енергії з метою компенсації постійної частоти обмотки збудження. У роботі [56] пропонується разом із застосуванням, при форсуванні, ємнісного накопичувача чергувати періоди форсування напруги з періодами гасіння поля.

Запропоновані способи забезпечують стійкість при різкому прикладанні навантаження, проте не враховують впливу електродинамічних навантажень на обмотки двигуна.

Зазвичай дію динамічних ударів компенсують механічними або електромагнітними способами, як-от наявність маховикового механізму в електромеханічних системах з м'якою механічною характеристикою двигуна, регулювання жорсткості пружних муфт і використання автоматичної системи збудження з можливістю форсування напруги.

Висока жорсткість механічної характеристики синхронного двигуна не дає змоги застосовувати маховики, як демпферний механізм. Тому такий спосіб втрачає сенс, як потенційно можливий.

Ще один спосіб компенсації ударних навантажень – введення в кінематичну схему пружних муфт. Встановлено, що застосування абсолютно жорсткого зв'язку призводить до непрацездатності системи через значне зростання її коливальності [26]. Отже, на першому етапі досліджень пріоритетним є визначення рівня жорсткості пружних зв'язків, який забезпечив би задовільну працездатність привода за одночасного одержання позитивного ефекту демпфування.

Крім механічних підходів розв'язання проблеми роботи синхронного електропривода, необхідно також застосовувати автоматичну систему керування збудженням. Однак, у цьому разі необхідно сформулювати закон регулювання або визначити фіксовані параметри налаштування системи.

3.2 Вибір і обґрунтування параметрів оптимізації

Аналіз причин виникнення аварій показує, що для реалізації заходів компенсації ударних навантажень може бути задіяно два методи: перший – метод регулювання жорсткості пружних елементів у межах, що не спричиняють значних механічних коливань; другий – метод завчасного форсування збудження заданого рівня. Для розв'язання цієї проблеми необхідно сформулювати оптимізаційну задачу, яка дасть змогу визначити параметри системи за означених умов роботи привода.

Способом математичного моделювання визначимо параметри системи привода з двигуном СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4 при накиданні номінального навантаження зі стану неробочого ходу.

Експериментально встановлено межі регулювання факторів оптимізації:

- кратність форсування збудження 1...1,75 номінального, обмежена можливістю збудника;

- межі кратності жорсткості муфти 1...4, що лімітується максимумом коливальності системи;
- можливий інтервал часу завчасного ввімкнення форсування 0...3 секунди до початку навантаження, що визначається п'ятьма постійними часу обмотки збудження.

Як функцію мети запропоновано використовувати мінімум середньоквадратичного відхилення від сталого значення струму якоря під час накиду номінального навантаження [57].

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(i_i - I_{ст})^2}{n-1}} \quad (3.1)$$

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

Розв'язання задачі пропонується виконати за допомогою вбудованої функції Minimize пакета MathCAD, де використовується градієнтний спосіб пошуку оптимального рішення. За даними [57] градієнтний метод є доцільним для розв'язання поставленої наукової задачі оптимізації, адже він забезпечує швидку збіжність та можливість роботи з великою кількістю факторів і обмежень. Його перевагою є формування напрямку пошуку та отримання результату за кінцеве число кроків з бажаною точністю.

Традиційно динаміку пуску синхронного привода оцінюють з урахуванням електромагнітних перехідних процесів. Під час моделювання двигуна використано рівняння Парка-Горєва [58]:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{d\psi_d}{dt} = U_d + \psi_q \omega_\delta - r_a i_d; \\
 \frac{d\psi_q}{dt} = U_q - \psi_d \omega_\delta - r_a i_q; \\
 \frac{d\psi_f}{dt} = U_f - r_f i_f; \\
 \frac{d\psi_{kd}}{dt} = -r_{kd} i_{kd}; \\
 \frac{d\psi_{kq}}{dt} = -r_{kq} i_{kq}; \\
 \frac{d\omega_\pi}{dt} = \frac{M_\pi - \beta(\omega_\pi - \omega_M) - C_o \frac{(\varphi_\pi - \varphi_M)}{p}}{T_{M\pi}}; \\
 \frac{d\varphi_\pi}{dt} = \omega_\pi; \\
 \frac{d\theta}{dt} = 1 - \varphi_\pi, \\
 \frac{d\omega_M}{dt} = \frac{\beta(\omega_\pi - \omega_M) + C_o \frac{(\varphi_\pi - \varphi_M)}{p} - M_M}{T_{MM}}; \\
 \frac{d\varphi_M}{dt} = \omega_M
 \end{array} \right. \quad (3.2)$$

де ω_M – швидкість обертання механізму;

φ_π, φ_M – кут закручування валу механізму;

$T_{M\pi}, T_{MM}$ – механічні постійні часу двигуна та механізму.

Миттєві значення струмів і моменту визначено з урахуванням надперехідних параметрів синхронного двигуна:

Надперехідний індуктивний опір за повздовжньою віссю, в.о.

$$x_d'' = \frac{D}{x_f x_{kd} - x_{ad}^2}; \quad (3.3)$$

Надперехідний індуктивний опір за поперечною віссю, в.о.

$$x_q'' = \frac{x_q x_{kq} - x_{ad}^2}{x_{kq}}; \quad (3.4)$$

Надперехідний індуктивний опір обмотки збудження, в.о.

$$x_f'' = \frac{D}{x_d x_{kd} - x_{ad}^2}; \quad (3.5)$$

Надперехідний індуктивний опір демпферної обмотки за поздовжньою віссю, в.о.

$$x_{kd}'' = \frac{D}{x_f x_d - x_{ad}^2}; \quad (3.6)$$

Надперехідний індуктивний опір за поздовжньою віссю між обмоткою статора та демпферною обмоткою, в.о.

$$x_{dkd}'' = \frac{D}{x_f x_{ad} - x_{ad}^2}; \quad (3.7)$$

Надперехідний індуктивний опір взаємної індукції між обмоткою збудження та поздовжнім контуром демпферної обмотки, в.о.

$$x_{fkd}'' = \frac{D}{x_d x_{ad} - x_{ad}^2}; \quad (3.8)$$

Надперехідний індуктивний опір взаємної індукції між обмоткою збудження та поздовжнім контуром обмотки статора, в.о.

$$x_{fd}'' = \frac{D}{x_{kd} x_{ad} - x_{ad}^2}; \quad (3.9)$$

Надперехідний індуктивний опір за поперечною віссю між обмоткою статора та демпферною обмоткою, в.о.

$$x''_{qkq} = \frac{x_q x_{kq} - x_{aq}^2}{x_{ad}}, \quad (3.10)$$

де $D = x_d x_f x_{kd} - x_{ad}^2 (x_d + x_f + x_{kd}) + 2x_{ad}^3$ – допоміжний параметр для визначення опорів.

Розв'язання наведеної системи диференціальних рівнянь виконується з урахуванням виразів для визначення струмів і електромагнітного моменту:

Проекція струму статора на повздовжню вісь

$$i_d = \frac{\psi_d}{x''_d} - \frac{\psi_f}{x''_{fd}} - \frac{\psi_{kd}}{x''_{dkd}}; \quad (3.11)$$

Проекція струму статора на поперечну вісь

$$i_q = \frac{\psi_q}{x''_q} - \frac{\psi_{kq}}{x''_{qkq}}; \quad (3.12)$$

Струм обмотки збудження

$$i_f = \frac{\psi_f}{x''_f} - \frac{\psi_d}{x''_{fd}} - \frac{\psi_{kd}}{x''_{fkd}}; \quad (3.13)$$

Проекція струму демпферної обмотки за повздовжньою віссю

$$i_{kd} = \frac{\psi_{kd}}{x''_{kd}} - \frac{\psi_f}{x''_{fkd}} - \frac{\psi_d}{x''_{dkd}}; \quad (3.14)$$

Проекція струму демпферної обмотки за поперечною віссю

$$i_{kq} = \frac{\psi_{kq}}{x_{kq}''} - \frac{\psi_q}{x_{qkq}''}; \quad (3.15)$$

Момент двигуна

$$M_\delta = (\psi_d i_q - \psi_q i_d); \quad (3.16)$$

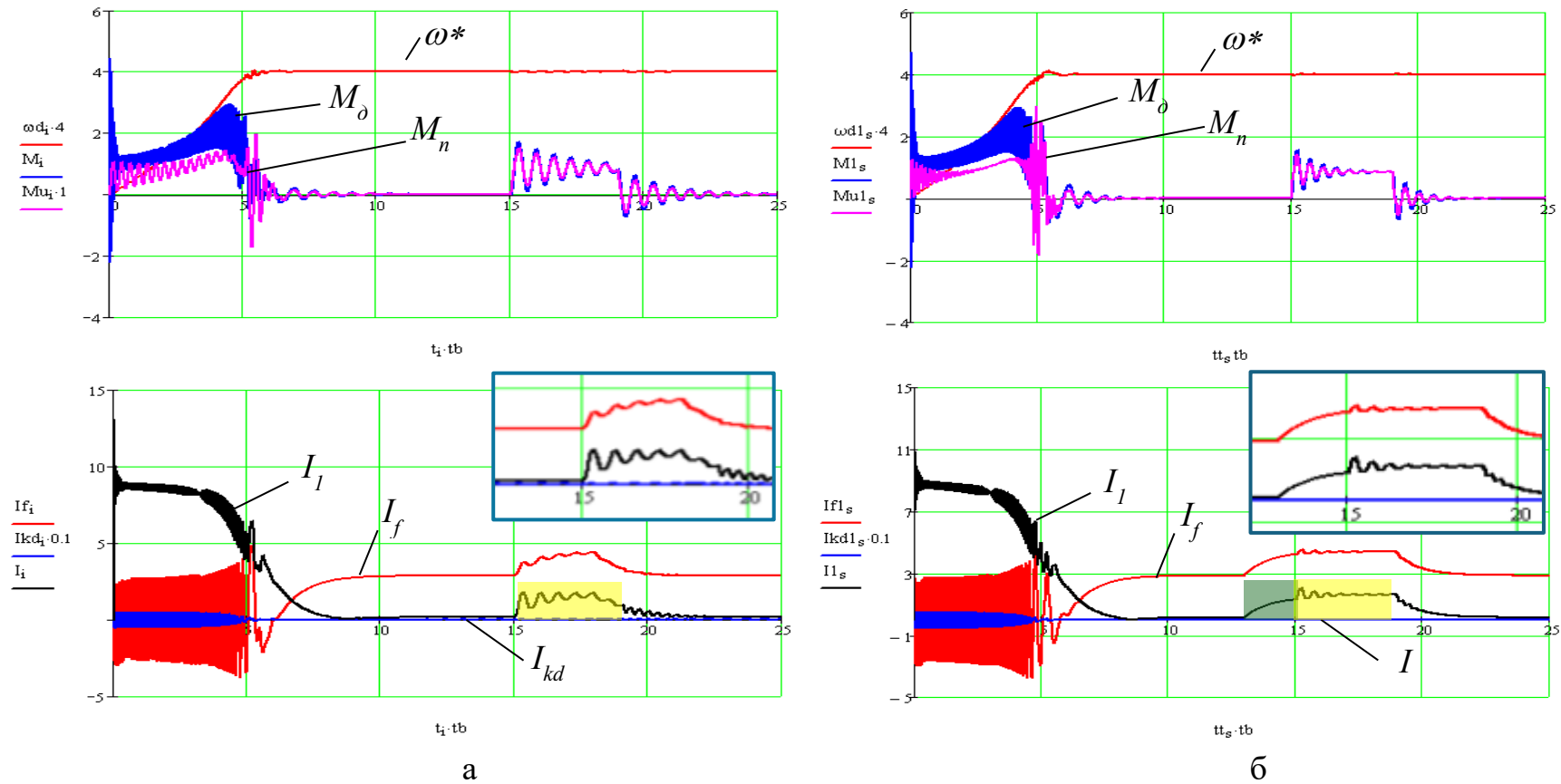
Модуль струму статора

$$i_c = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}. \quad (3.17)$$

3.3 Аналіз результатів моделювання

Результат моделювання наведено на рисунку 3.1.

Розмір показника середньоквадратичного відхилення становить $\sigma = 0,002707$, кратність форсування і жорсткості відповідно 0,178012 і 1,436994 за часу завчасного увімкнення напруги збудження 1,5 секунди. Коливання системи особливо збільшилося для ділянки синхронізації. Однак загалом якість перехідних процесів покращилася. У разі обмеження нижнього рівня кратності збудження на величині 1, оптимізаційне завдання також має розв'язок. До того ж у цьому разі форсування і час завчасного увімкнення збудження стають більшими, ніж на рисунку 3.1, а якість перехідних процесів погіршується. Критерієм ухвалення рішення вибору нижньої межі форсування, більшої або меншої за 1, має бути мінімум потужності, що виділяється в індукторній обмотці та визначається площею під кривою струму якоря ділянки накидання навантаження, що характерно для випадку, зображеного на рисунку 3.1, б. Якщо порівнювати потужність втрат керування для класичної системи збудження (див. рисунок 3.1, а) та оптимізованої (див. рисунок 3.1, б), спостерігається незначне збільшення площі під кривою струму якоря. Цей факт підтверджує можливість збереження теплового навантаження електричної машини на рівні, який наближено дорівнює паспортному.



I_l, I_f, I_{kd} – струми індуктора, збудження і демпферної обмотки, в.о.;

M_ϕ, M_n – електромагнітний і пружний момент, в.о.; ω – кутова швидкість обертання двигуна; в.о.

Рисунок 3.1 – Ілюстрація до розв'язання оптимізаційної задачі з використанням стандартних (а) та оптимізованих (б) параметрів

3.4 Оцінка впливу рівня навантаження на параметри оптимізації

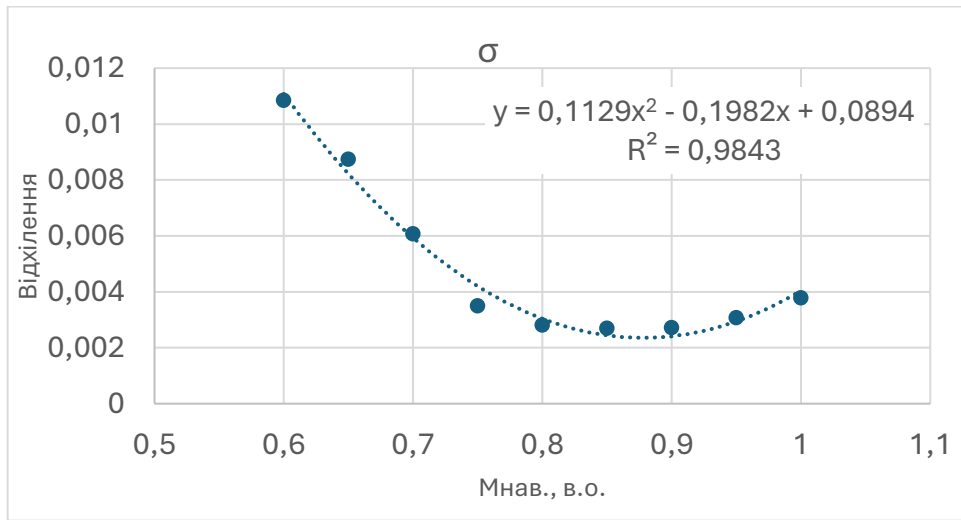
Аналіз результатів досліджень параметрів електромеханічної системи наочно продемонстрував їхню залежність від рівня завантаження. Очевидно, що різний типорозмір труби прокатки зумовить необхідність переналаштування системи загалом. У зв'язку з цим у роботі ухвалено рішення щодо необхідності оцінки впливу 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 – 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.

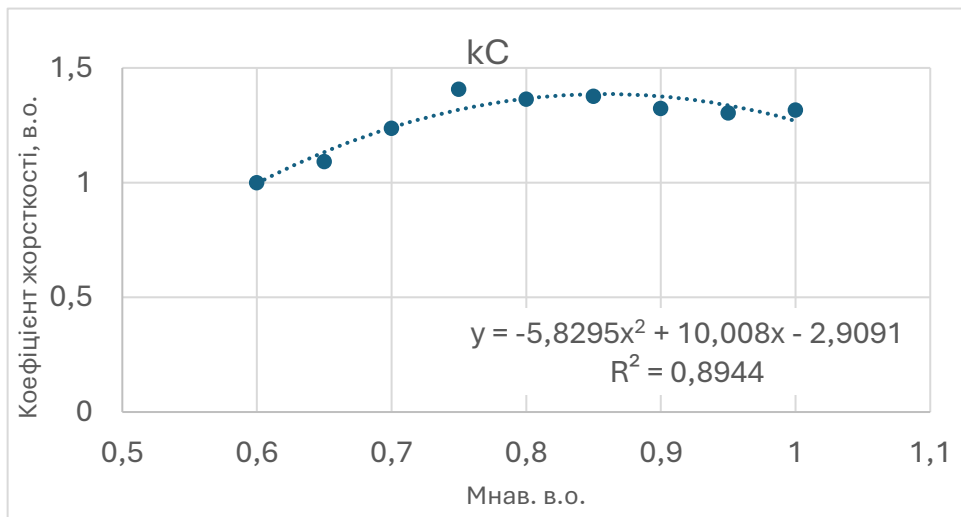
Отже, зміна параметрів налагодження системи не вимагатиме значного часу, особливо за умови, що регулятори цих параметрів будуть відградуєвані для кожного типу труби.

Попередніми дослідженнями встановлено, що бажаний інтервал зміни навантаження у межах 0,6...1 від номінального. Використовуючи розроблену модель та план однофакторного експерименту виконано комплекс розрахунків, на основі яких побудовано лінії тренду для низки рівнів навантажень (див. рисунок 3.2.).

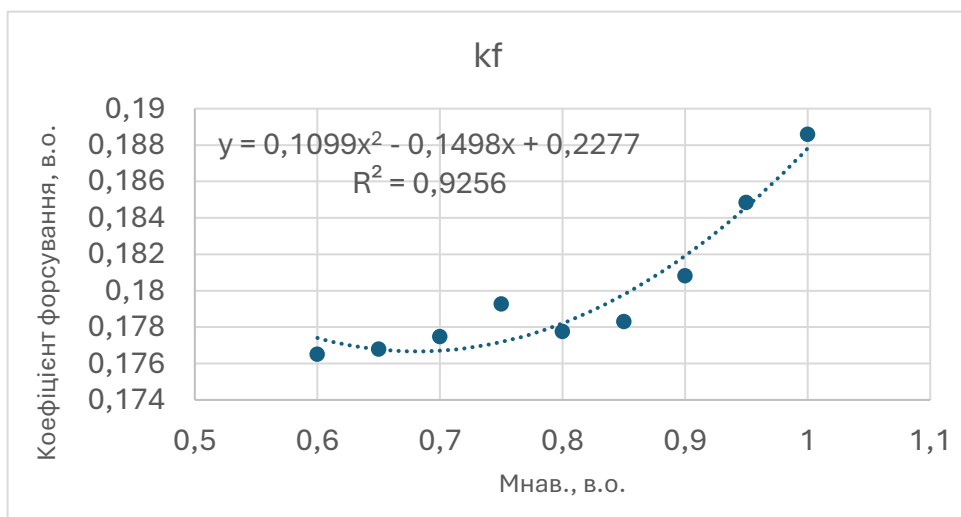
Отримані залежності мають нелінійний характер. Їх апроксимацію виконано у вигляді поліномів другого порядку. Якість ліній тренду оцінена за допомогою коефіцієнтів детермінації, значення яких становить не менше 0,9, що цілком достатньо для використання в технічних розрахунках.



а



б



в

Рисунок 3.2 – Лінії регресії оцінки впливу навантаження на параметри оптимізації

Висновки до розділу

Виконаний комплекс досліджень дає змогу зробити такі висновки:

1. Навантаження агрегатів прокатного виробництва має періодичний ударний характер, що спричиняє виникнення динамічних коливальних перехідних процесів в кінематичній схемі та обмотках приводного двигуна.

2. Динамічну стійкість приводного синхронного двигуна забезпечують методами форсування напруги збудження, які підвищують перевантажувальну здатність, проте не обмежують електродинамічні зусилля в обмотках.

3. Для синхронного привода без маховика компенсація ударних навантажень може бути реалізована регулюванням жорсткості пружних зв'язків і кратністю форсування збудження.

4. Оптимізаційну задачу доцільно розв'язувати градієнтним методом і з функцією мети – мінімум середньоквадратичного відхилення миттєвого струму статора від його сталого значення під час накиду навантаження.

5. Обмеження чинників оптимізації визначається технічними можливостями збудника, допустимою амплітудою коливань системи та постійною часу обмотки збудження.

6. Параметри оптимізації забезпечують суттєве зниження динамічних кидків струмів обмоток двигуна, одночасно покращуючи якість перехідних процесів.

7. Параметри налаштування системи створюють умови для незначного збільшення потужності втрат керування, за яких зберігаються допустимі теплові режими синхронного двигуна.

8. Побудовані лінії регресії наочно демонструють істотний вплив навантаження на параметри налаштування системи. Водночас проведена попередня оцінка свідчить, що запропоновані способи налаштування технічно здійсненні і не потребують значних зусиль. Якість отриманих поліноміальних залежностей від факторів оптимізації оцінювалась за допомогою коефіцієнтів детермінації, значення яких не менше за рівень 0,9, що допускає їх застосування у технічних розрахунках.

РОЗДІЛ 4

КОМБІНОВАНИЙ СПОСІБ АВТОМАТИЧНОГО ДЕМПФУВАННЯ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЗАСОБАМИ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ

Матеріал третього розділу доказово демонструє ефективність налагодження електромеханічної системи головного привода автомат-стана ТПА-350 завдяки індивідуальному налагодженню пружного елемента та оптимальних параметрів системи збудження у функції поточного навантаження. Водночас такий підхід привносить певні незручності в роботі вальцювальників, оскільки потребує періодичного налагодження пружності, яка не завжди може бути реалізована наявними засобами сучасних регульованих муфт.

4.1 Відомі способи нівелювання різко змінних навантажень

Наступний етап досліджень передбачає розв'язання задачі з 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 під час втягування заготовок у валки.

Подібно до нерегульованих систем, розглянутих в попередньому розділі, у випадку застосування автоматичних систем керування синхронним приводом основними залишаються механічні та електромагнітні способи компенсації пікових навантажень. Серед механічних особливо заслуговує на увагу спосіб передрозгону двигуна [59], який забезпечує до початку робочого режиму підвищення жорсткості електромеханічної системи через вибір зазорів шпindelних пристроїв прокатних валків. Це суттєво зменшує ударне навантаження в момент захвату металу, але спосіб потребує визначення оптимального режиму передрозгону, оскільки існує ймовірність повторного розкриття люфтів зубчастих зачеплень.

Щодо електромагнітних способів, то в цій групі маємо більшу різноманітність у порівнянні з механічними. Зокрема, не потребує доказу той факт, що для ефективного електромагнітного демпфування коливань кута навантаження лише завдяки індукторному контуру [60] необхідно забезпечити швидке та суттєве форсування напруги збудження. Однак реалізації такої умови перешкоджає неспроможність серійних автоматичних збудників забезпечити кратність форсування напруги необхідного рівня, а також недостатня стійкість ізоляції обмоток двигунів до різко змінного підвищення напруги. У підсумку швидкодія регулювання поля збудження стає недостатньою, а ефективність компенсації коливань суттєво падає.

Досить перспективним є спосіб підвищення протидії синхронних приводів [61] ударним навантаженням завдяки прискоренню швидкості форсування збудження розрядом попередньо зарядженого конденсатора в цьому ж контурі з одночасною подачею напруги від тиристорного перетворювача. Однак і в цьому випадку питання забезпечення належної стійкості ізоляції обмоток двигуна залишається невирішеним.

До традиційних методів електромагнітного демпфування коливань електромеханічних систем належать відомі закони керування збудженням [62, 63, 64]:

- підтримання постійного рівня коефіцієнта потужності двигуна;
- стабілізація реактивної потужності двигуна заданої величини;
- компенсація реактивного струму якоря.

У методі [65] застосовано векторну систему збудження потужного двигуна зі стабілізацією коефіцієнта потужності. Такий підхід ефективно нейтралізує коливання системи з незначною амплітудою, однак під час пікового навантаження його результативність істотно знижується.

Існує клас автоматичних систем збудження, де якість компенсації коливань забезпечується завдяки нелінійним зворотним зв'язкам [66], які ефективно поглинають збурення малої амплітуди, проте при максимальних навантаженнях їхня ефективність суттєво знижується.

У джерелі [67] показано доцільність використання методу програмного керування напругою збудника для зниження динамічних навантажень у перехідних режимах. Суть методу полягає в цілеспрямованому живленні обмотки збудження періодичною змінною напругою, що не лише зменшує періодичну складову електромагнітного моменту, а й частково підвищує його середню складову, достатню для плавного розгону двигуна до синхронної частоти обертання. Основним недоліком методу є необхідність використання реверсивного збудника.

Як один із варіантів протидії ударним навантаженням пропонується електромеханічна система граничного ступеня стійкості із мінімальною коливальністю пружної механічної підсистеми [68]. Суть методу полягає в оптимальному налагодженні регулятора та пружності системи за попередньо визначених умов, проте і цей підхід лише частково відповідає вимогам компенсації екстремальних навантажень.

Метод, наведений у джерелах [69, 70, 71], демонструє потенційну можливість компенсації пускових струмів завдяки випереджальному збільшенню напруги збудження на прогнозований провал напруги живлення. Однак система збудження у цьому випадку адаптована для роботи синхронного генератора.

Усі розглянуті методи, на жаль, мало відповідають умовам нейтралізації шкідливих зусиль в якірних котушках, що є пріоритетом при розв'язанні поставленої задачі.

4.2 Синтез моделі двигуна і визначення параметрів регулятора

З вищенаведеного можна дійти висновку, що відомі способи покращення демпфування ударних навантажень є мало придатними. Навіть використання нелінійних регуляторів не дозволяє повністю поглинати пікові струми якоря в моменти втягнення заготовки у валки. Завданням поточного розділу є, зокрема, розробка адаптованої моделі синхронного двигуна, яка забезпечує можливість впливати на контур збудження. Крім того, невід'ємною задачею є синтез перехідної функції регулятора для оцінки можливостей нівелювати дію пікового

струму якоря, що і є основною причиною аварій головного привода автомат-стана ТПА-350 [72].

Для опису електромеханічних процесів у синхронній машині, використовуються рівняння струмів і напруг для електричних кіл, а також рівняння швидкості та моменту на валу. Для спрощення рівнянь струмів і напруг синхронної машини застосовують ортогональну систему координат d, q .

Математичний опис СД в осях d, q представлено системою диференціальних рівнянь Парка-Горєва:

$$\begin{cases} p\Psi_d = u_d + \Psi_q \cdot (1 - s) - r_a \cdot i_d; \\ p\Psi_q = u_q - \Psi_d \cdot (1 - s) - r_a \cdot i_q; \\ p\Psi_f = u_f - i_f \cdot r_f; \\ p\Psi_{kd} = -i_{kd} \cdot r_{kd}; \\ p\Psi_{kq} = -i_{kq} \cdot r_{kq}; \\ p\omega = [m_e - m_c]/T, \end{cases} \quad (4.1)$$

де $u_d = u_m \cdot \cos \theta$, $u_q = u_m \cdot \sin \theta$ – напруги живлення по поздовжній і поперечній осях.

Вирази для струмів, що входять у систему (4.1), мають вигляд:

$$\begin{cases} i_d = \frac{\Psi_d}{x_d''} - \frac{\Psi_f}{x_{fd}''} - \frac{\Psi_{kd}}{x_{dkd}''}; \\ i_q = \frac{\Psi_q}{x_q''} - \frac{\Psi_{kq}}{x_{qkq}''}; \\ i_f = \frac{\Psi_f}{x_f''} - \frac{\Psi_d}{x_{fd}''} - \frac{\Psi_{kd}}{x_{fkd}''}; \\ i_{kd} = \frac{\Psi_{kd}}{x_{kd}''} - \frac{\Psi_d}{x_{dkd}''} - \frac{\Psi_f}{x_{fkd}''}; \\ i_{kq} = \frac{\Psi_{kq}}{x_{kq}''} - \frac{\Psi_q}{x_{qkq}''}. \end{cases} \quad (4.2)$$

де x_{kq} – повний індуктивний опір за поперечною віссю демпферної обмотки, в.о.;

x_q – синхронний індуктивний опір двигуна за поперечною віссю, в.о.;

x_d – синхронний індуктивний опір за поздовжньою віссю, в.о.;

x_f – повний індуктивний опір обмотки збудження, в.о.

x_{kq} – повний індуктивний опір за поздовжньою віссю демпферної обмотки, в.о.;

x_{ad} – індуктивний опір взаємної індукції між статорною обмоткою та обмоткою збудження, в.о.;

x_{akd} – індуктивний опір взаємної індукції між статорною обмоткою та поздовжнім контуром демпферної обмотки, в.о.

Електромагнітний момент:

$$m_e = \Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d. \quad (4.3)$$

Скористаємося математичним описом синхронного двигуна, який реалізовано у відносних одиницях. Вхідні рівняння балансу напруг синхронної машини із повним набором обмоток роторної частини мають вигляд [73].

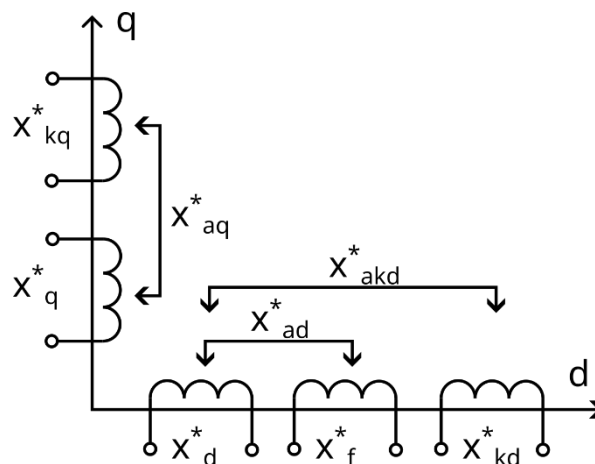


Рисунок 4.1 – Схема заміщення обмоток СД в ортогональній системі

$$\begin{cases} U_d = i_d r_a + p\Psi_d - \omega_1 \Psi_q \\ U_q = i_q r_a + p\Psi_q + \omega_1 \Psi_d \\ U_f = i_f r_f + p\Psi_f \\ 0 = i_{kd} r_{kd} + p\Psi_{kd} \\ 0 = i_{kq} r_{kq} + p\Psi_{kq} \end{cases}, \quad (4.4)$$

Опис механічної складової системи здійснюється рівнянням руху

$$\Psi_d i_q - \Psi_q i_d - M_c = H p \omega_n \quad (4.5)$$

де механічна стала

$$H = \frac{J \cdot \omega_{\delta}}{M_{\delta} \cdot p_n} \quad (4.6)$$

Для побудови моделі скористаємося базовим часом

$$t = t \cdot \omega_{\delta} \quad (4.7)$$

і оператором Лапласа

$$p = \frac{1}{\omega_{\delta}} \cdot \frac{d}{dt}. \quad (4.8)$$

В основу визначення допоміжних коефіцієнтів покладена система рівнянь потокозчеплень:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_d = x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{kd} \\ \Psi_q = x_q i_q + x_{aq} i_{kq} \\ \Psi_f = x_{ad} i_d + x_f i_f + x_{ad} i_{kd} \\ \Psi_{kd} = x_{ad} i_d + x_{ad} i_f + x_{kd} i_{kd} \\ \Psi_{kq} = x_{aq} i_q + x_{kq} i_{kq} \end{array} \right. \quad (4.9)$$

Визначимо струм пускової обмотки за повздовжньою віссю через його потокозчеплення:

$$\Psi_{kd} = x_{ad} \cdot i_d + x_{ad} \cdot i_f + x_{kd} \cdot i_{kd}; \quad (4.10)$$

$$i_{kd} = \frac{\Psi_{kd}}{x_{kd}} - \frac{x_{ad}}{x_{kd}} \cdot i_d - \frac{x_{ad}}{x_{kd}} \cdot i_f; \quad (4.11)$$

У рівнянні (4.11) позначимо

$$k_1 = \frac{1}{x_{kd}}; \quad k_2 = \frac{x_{ad}}{x_{kd}}. \quad (4.12)$$

З урахуванням цих рівнянь отримуємо

$$i_{kd} = k_1 \Psi_{kd} - k_2 \cdot i_d - k_2 \cdot i_f. \quad (4.13)$$

Виконаємо підстановку отриманого рівняння (4.13) в (4.9) і здійснимо приведення подібних:

$$\Psi_f = x_{ad} \cdot i_d + x_f \cdot i_f + x_{ad} [k_1 \cdot \Psi_{kd} - k_2 (i_d + i_f)]; \quad (4.14)$$

або

$$\Psi_f = i_d (x_{ad} - x_{ad} \cdot k_2) + i_f (x_f - x_{ad} \cdot k_2) + x_{ad} \cdot k_1 \cdot \Psi_{kd} \quad (4.15)$$

Тепер із (4.15) отримаємо наступні коефіцієнти:

$$k_3 = x_{ad} - x_{ad}k_2; k_4 = x_f - x_{ad}k_2; k_5 = x_{ad}k_1. \quad (4.16)$$

З рівнянь (4.15) та (4.16) запишемо рівняння потокозчеплення обмотки збудження:

$$\Psi_f = k_3 \cdot i_d + i_f \cdot k_4 + k_5 \cdot \Psi_{kd}. \quad (4.17)$$

Для розв'язання задачі побудови моделі виконаємо її виведення для випадку частотного керування приводом. Для цього із рівнянь потокозчеплень контуру збудження та демпферної обмотки (4.4) отримано струми i_{kd}, i_f :

$$i_f = \frac{\Psi_f}{k_4} - \frac{k_3}{k_4} \cdot i_d - \frac{k_5}{k_4} \cdot \Psi_{kd}. \quad (4.18)$$

Для спрощення подальшого виведення позначимо коефіцієнтами

$$k_6 = \frac{1}{k_4}; k_7 = \frac{k_3}{k_4}; k_8 = \frac{k_5}{k_4}. \quad (4.19)$$

З урахуванням позначень (4.12), (4.19) маємо

$$i_{kd} = k_1 \cdot \Psi_{kd} - k_2 \cdot i_d - k_2[k_6 \cdot \Psi_f - k_7 \cdot i_d - k_8 \cdot \Psi_{kd}]; \quad (4.20)$$

або

$$i_{kd} = \Psi_{kd}[k_1 + k_2 \cdot k_8] - i_d[k_2 - k_2 \cdot k_7] - k_2 \cdot k_6 \cdot \Psi_f; \quad (4.21)$$

З цих рівнянь переозначимо коефіцієнти

$$k_9 = k_1 + k_2k_8; k_{10} = k_2 - k_2k_7; k_{11} = k_2k_6. \quad (4.22)$$

Після підстановки маємо струми

$$i_{kd} = k_9\Psi_{kd} - k_{10}i_d - k_{11}\Psi_f; \quad (4.23)$$

та

$$i_f = k_6 \Psi_f - k_7 i_d - k_8 \Psi_{kd}. \quad (4.24)$$

Із системи рівнянь потокозчеплень (4.9) визначимо потокозчеплення якоря за повздовжньою віссю d

$$\Psi_d = x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{kd}; \quad (4.25)$$

та враховуючи (4.23) та (4.24):

$$\Psi_d = x_d i_d + x_{ad} [k_6 \Psi_f - k_7 i_d - k_8 \Psi_{kd}] + x_{ad} [k_9 \Psi_{kd} - k_{10} i_d - k_{11} \Psi_f]; \quad (4.26)$$

або

$$\Psi_d = i_d [x_d - x_{ad} k_7 - x_{ad} k_{10}] + \Psi_f [x_{ad} - x_{ad} k_{11}] - \Psi_{kd} [x_{ad} k_8 - x_{ad} k_9]; \quad (4.27)$$

де

$$k_{12} = x_d - x_{ad} [k_7 + k_{10}]; \quad k_{13} = x_{ad} [k_6 - k_{11}]; \quad k_{14} = x_{ad} [k_8 - k_9]. \quad (4.28)$$

Тоді

$$\Psi_d = k_{12} i_d + k_{13} \Psi_f - k_{14} \Psi_{kd}. \quad (4.29)$$

Із системи напруг (4.4) отримаємо похідні потокозчеплень

$$\begin{aligned} p\Psi_f &= U_f + k_{16} i_d + k_{17} \Psi_{kd} - k_{15} \Psi_f; \\ p\Psi_{kd} &= k_{19} i_d + k_{20} \Psi_f - k_{18} \Psi_{kd}; \\ p\Psi_{kq} &= k_{22} i_q - k_{21} \Psi_{kq} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Позначимо:

$$\begin{aligned}
k_{15} &= r_f k_6; \quad k_{16} = r_f k_7; \quad k_{17} = r_f k_8; \quad k_{18} = r_{kd} k_9; \\
k_{19} &= r_{kd} k_{10}; \quad k_{20} = r_{kd} k_{11}; \quad k_{21} = \frac{r_{kq}}{x_{kq}}; \quad k_{22} = \frac{r_{kq} x_{aq}}{x_{kq}}.
\end{aligned} \tag{4.31}$$

Скориставшись отриманими вище залежностями, запишемо вираз U_d

$$U_d = i_d r_a + p \Psi_d - \omega_1 \Psi_q; \tag{4.32}$$

де швидкість обертання ротора

$$\omega_1 = (1 - s). \tag{4.33}$$

З врахуванням (4.29) та (4.33) напруга за віссю d

$$U_d = i_d r_a + k_{12} p i_d + k_{13} p \Psi_f - k_{14} p \Psi_{kd} - \omega_1 \Psi_q \tag{4.34}$$

ЕРС за повздовжньою віссю

$$E_d = k_{13} p \Psi_f - k_{14} p \Psi_{kd} - \omega_1 \Psi_q. \tag{4.35}$$

Проекція напруги якоря на повздовжню вісь

$$U_d - E_d = i_d [r_a + k_{12} p]; \tag{4.36}$$

$$U_d = i_d [r_a + k_{12} p] + E_d. \tag{4.37}$$

Тоді перехідна функція із останнього рівняння напруги матиме вигляд:

$$\frac{i_d}{U_d - E_d} = \frac{1/r_a}{T_d p + 1}, \tag{4.38}$$

де стала часу, визначається як

$$T_d = \frac{k_{12}}{r_a}. \quad (4.39)$$

Перехідна функція електромагнітної частини двигуна за віссю d

$$W_d = \frac{\frac{1}{r_a}}{T_d p + 1}. \quad (4.40)$$

Напруга обмотки збудження

$$U_f = i_f r_f + p \Psi_f. \quad (4.41)$$

Похідна потокозчеплення обмотки збудження

$$p \Psi_f = -r_f (k_6 \cdot \Psi_f - k_7 \cdot i_d - k_8 \cdot \Psi_{kd}) + U_f. \quad (4.42)$$

З урахуванням позначень (4.31)

$$p \Psi_f = k_{16} \cdot i_d + k_{17} \cdot \Psi_{kd} - k_{15} \cdot \Psi_f + U_f. \quad (4.43)$$

Похідна потокозчеплення демпферної обмотки за повздовжньою віссю

$$p \Psi_{kd} = -r_{kd} \cdot \dot{i}_{kd} = -r_{kd} (k_9 \cdot \Psi_{kd} - k_{10} \cdot i_d - k_{11} \cdot \Psi_f); \quad (4.44)$$

З урахуванням позначень (4.31)

$$p \Psi_{kd} = k_{19} \cdot i_d + k_{20} \cdot \Psi_f - k_{18} \cdot \Psi_{kd}. \quad (4.45)$$

Аналогічним чином формується перехідна функція за віссю q . Запишемо струм i_{kq} із (4.9)

$$i_{kq} = \frac{\Psi_{kq}}{x_{kq}} - \frac{x_{aq}}{x_{kq}} i_q; \quad (4.46)$$

тоді похідна потокозчеплення

$$p\Psi_{kq} = -r_{kq} i_{kq} = -\frac{r_{kq}}{x_{kq}} \Psi_{kq} + \frac{r_{kq} \cdot x_{aq}}{x_{kq}} i_q. \quad (4.47)$$

Позначимо

$$k_{21} = \frac{r_{kq}}{x_{kq}}; \quad k_{22} = \frac{r_{kq} \cdot x_{aq}}{x_{kq}}. \quad (4.48)$$

З урахуванням позначень (4.48)

$$p\Psi_{kq} = k_{22} i_q - k_{21} \Psi_{kq}. \quad (4.49)$$

Введемо позначення для (4.46)

$$k_{23} = \frac{1}{x_{kq}}; \quad k_{24} = \frac{x_{aq}}{x_{kq}}. \quad (4.50)$$

Тоді струм демпферної обмотки за повздожньою віссю (4.46) набуває вигляду

$$i_{kq} = k_{23} \Psi_{kq} - k_{24} i_q. \quad (4.51)$$

Потокозчеплення за поперечною віссю

$$\begin{aligned} \Psi_q &= x_q i_q + x_{aq} i_{kq} = x_q i_q - x_{aq} [k_{23} \Psi_{kq} - k_{24} i_q] = \\ &= i_q [x_q - x_{aq} k_{24}] + x_{aq} k_{23} \Psi_{kq} \end{aligned} \quad (4.52)$$

Позначимо

$$k_{25} = x_q - x_{aq} k_{24}, \quad k_{26} = x_{aq} k_{23}. \quad (4.53)$$

З врахуванням (4.53) потокозчеплення за поперечною віссю

$$\Psi_q = k_{26} \Psi_{kq} + k_{25} i_q; \quad (4.54)$$

Напруга якоря за віссю q

$$U_q = i_q r_a + p \Psi_f + \omega_1 \Psi_d = i_q r_a + k_{25} p i_q + k_{26} p \Psi_{kq} + \omega_1 \Psi_d; \quad (4.55)$$

ЕРС за поперечною віссю

$$E_q = k_{26} p \Psi_{kq} + \omega_1 \Psi_d. \quad (4.56)$$

Проекція напруги якоря на поперечну вісь

$$U_q - E_q = i_q [r_a + k_{25} p]; \quad (4.57)$$

$$U_q = i_q [\dot{r}_a + k_{25} p] + E_q. \quad (4.58)$$

Тоді перехідна функція електромагнітної частини двигуна із останнього рівняння напруги матиме вигляд

$$\frac{i_q}{U_q - E_q} = \frac{1/r_a}{T_q p + 1}, \quad (4.59)$$

де стала часу, визначається як

$$T_q = \frac{k_{25}}{r_a}. \quad (4.60)$$

Для завершення побудови динамічної моделі синхронного двигуна запишемо рівняння механічної частини привода:

$$\begin{cases} M_e = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d; \\ M_e - M_c = T_m p \omega_1; \\ T_m = \frac{j \omega_0}{M_0 p_n}. \end{cases} \quad (4.61)$$

з цього отримано перехідну функцію механічної частини

$$\frac{\omega_1}{M_e - M_c} = \frac{1}{T_m p}. \quad (4.62)$$

На підставі отриманого математичного апарату (4.10) – (4.62), побудовано структурну схему моделі двигуна, до контуру збудження якої додано ланку перетворювача напруги, регулятора струму за віссю d та підсилювача зворотного зв'язку (див. рисунок 4.2).

Для синтезу регулятора бажаного контуру використано його перехідну функцію яку налагоджено за модульним оптимумом.

$$W_{\text{баж}} = \frac{1}{2a\Gamma_\mu [T_\mu p + 1]}. \quad (4.63)$$

При налагодженні на модульний оптимум отримаємо пропорційно-інтегральну структуру регулятора

$$W_p = \frac{T_d p + 1}{y \Gamma_\mu p}, \quad (4.64)$$

де

$$y = \frac{2a \cdot k_p \cdot k_{13} \cdot k_{id}}{r_a}. \quad (4.65)$$

4.3 Обґрунтування алгоритму керування збудженням

Як відомо, причиною аварій синхронного привода прокатних станів є вібрування лобових частин котушок якоря в момент втягнення заготовки у валки прокатної кліти. Це є результатом дії зусиль, що виникають у проводах обмоток якоря внаслідок стрімкого зростання струму до пікового значення. Водночас слід враховувати, що рівень величини зусилля залежить від квадрата струму в якірних котушках. Тобто, зменшити вібрування – це зменшити величину динамічного струму і його коливальність.

Режим роботи головного привода прокатної кліти реверсивного автомат-стана передбачає почергову роботу в режимах неробочого ходу (ділянка 1) та різко змінного навантаження (ділянка 2) (див. рисунок 4.3).

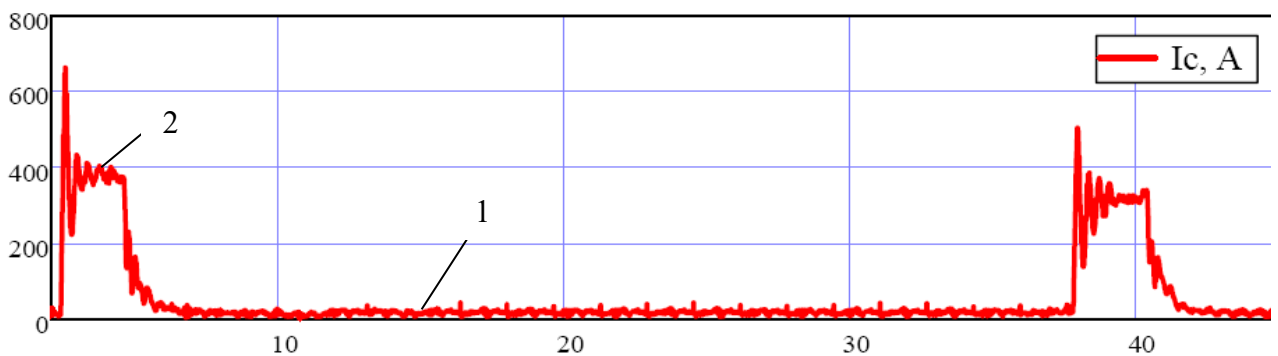
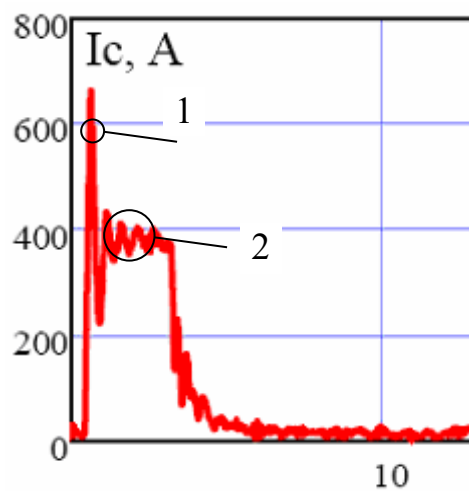


Рисунок 4.3 – Струм якоря при двох проходах прокатки реального прокатного стана

Обидва інтервали дії струму якоря зазвичай налагоджують на функціонування системи із раціональним використанням енергоресурсу. Одним із можливих засобів впливу на регулювання цього струму є автоматична система збудження. Реалізація енергоощадного режиму за відсутності механічного навантаження можлива у випадку перезбудження двигуна та відповідному ємнісному характеру його потужності, за якого струм якоря підтримується нульовим. Синхронна стійкість привода у промислових умовах досягається завдяки традиційним законам керування збудженням [62].

Детальний аналіз кривої перехідного процесу струму якоря (див. рисунок 4.4) дозволяє виокремити декілька ділянок, а саме – пікове зростання (1), характерне для моменту прикладення навантаження; та залишкова коливальність (2), що відповідає завершенню процесу втягнення заготовки в валки прокатної кліті. Такий характер перехідного процесу зумовлений значною інерційністю контуру збудження і пов'язаний з тим, що при накиді навантаження двигун «зустрічає» збурення з послабленим полем. Як наслідок, для створення необхідного моменту на валу двигун змушений споживати більший струм якоря.



1 – максимальне збурення, 2 – залишкова коливальність

Рисунок 4.4 – Перехідний процес струму якоря

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 ефективної протидії максимальному струму якоря (ділянка 1) (див. рисунок 4.4), пропонується завчасне підвищення напруги збудження, що зменшить різницю між поточним сталим та миттєвим збільшеним значенням струму якоря під час накиду навантаження. Щодо залишкової коливальності (ділянка 2) (див. рисунок 4.4), то ця задача успішно може бути вирішена завдяки, наприклад, закону регулювання збудженням при стабілізації повздовжнього

струму якоря на майже нульовому рівні. Такий алгоритм керування збудженням може бути практично втіленим за відомих параметрів рівня форсування напруги, інтервалів часу його завчасного увімкнення та скиду завдання на струм у нульовий стан.

4.4 Аналіз результатів досліджень

За пропонованою структурою (див. рисунок 4.2) розрахована та побудована Matlab-модель (див. рисунок 4.5) серійного синхронного двигуна СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4. 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, що пропорційна частина регулятора практично не впливає на зменшення коливальності, тоді як інтегральна частина, при зменшенні коефіцієнта підсилення, дає задовільний результат компенсації коливальності струму якоря. Цикл експериментів (див. рисунок 4.6) дозволив визначити коефіцієнт корекції інтегральної частини регулятора на рівні 0,22 одиниці, що дозволило суттєво зменшити розмах та час тривалості перехідного процесу струму.

Зменшення динаміки системи (див. рисунок 4.5) на підготовчому етапі до появи збурення досягнуто завдяки встановленню на вході вузла вводу завдання на збудження задавача інтенсивності, коефіцієнт підсилення якого на час поточних досліджень прийнято таким, що дорівнює контурному коефіцієнту k_{15} розрахунку потокозчеплення збудження.

Під час визначення необхідного рівня форсування збудження було встановлено, що при досягненні деякого зменшеного значення динамічного струму якоря його піковий максимум починає зростати (див. рисунок 4.7), через що подальше прагнення до мінімізації параметра форсування втрачає сенс.

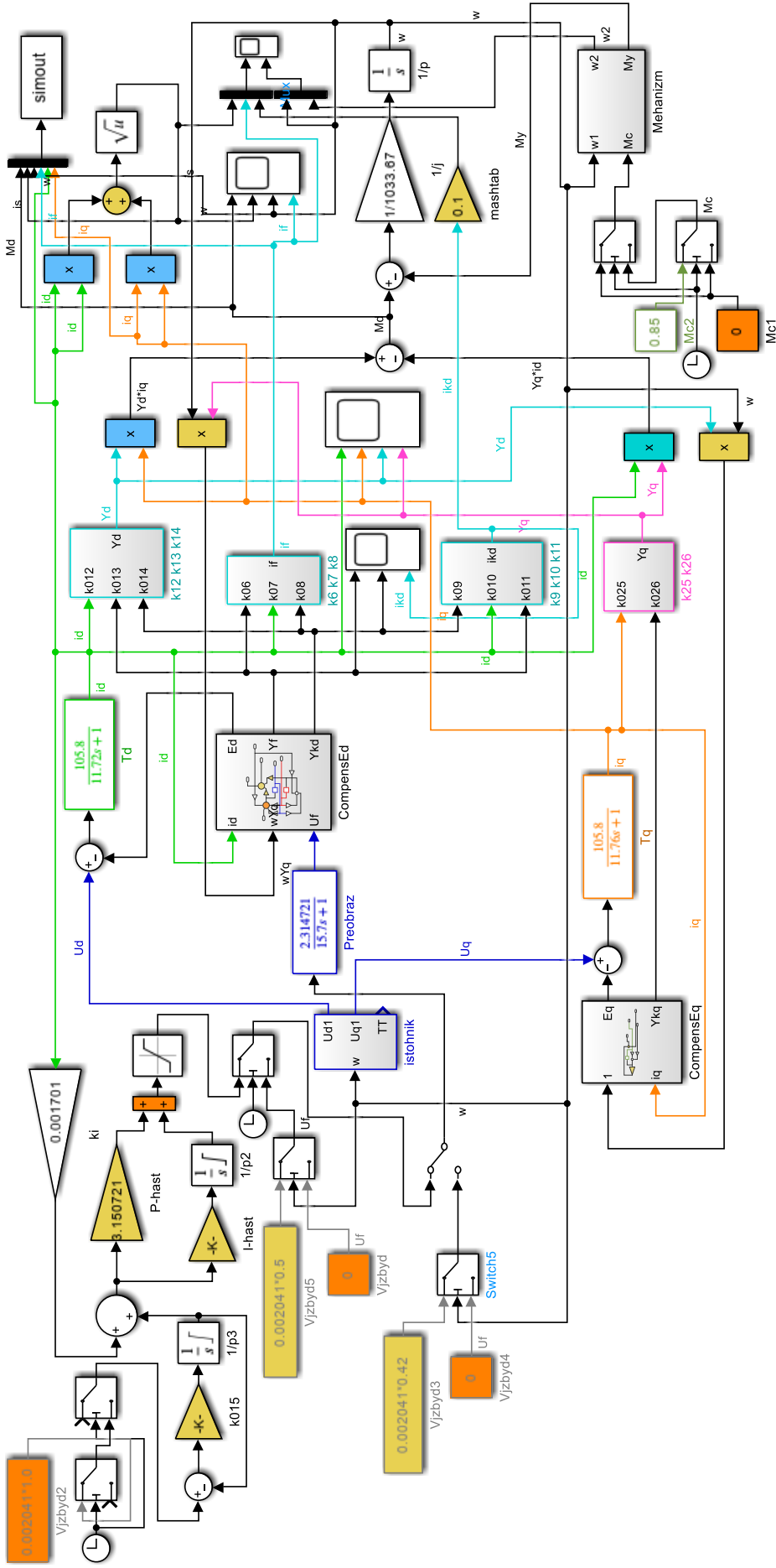


Рисунок 4.5 – Структурна схема системи керування синхронним двигуном із регулятором демпфування коливаний

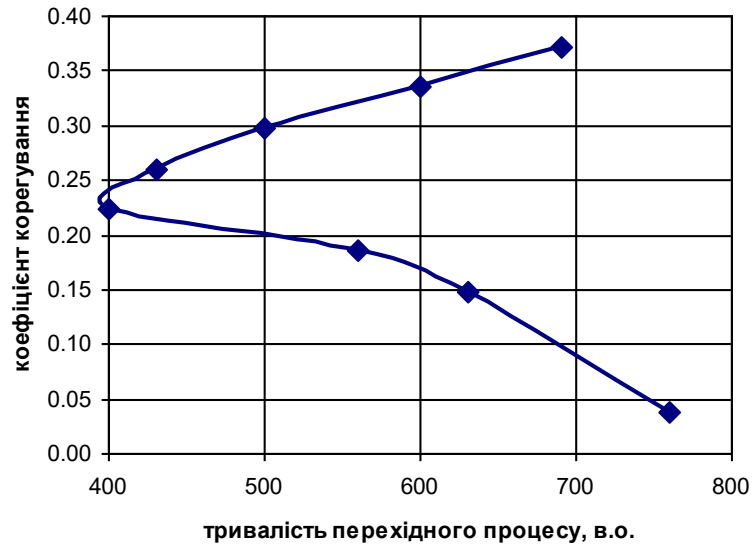
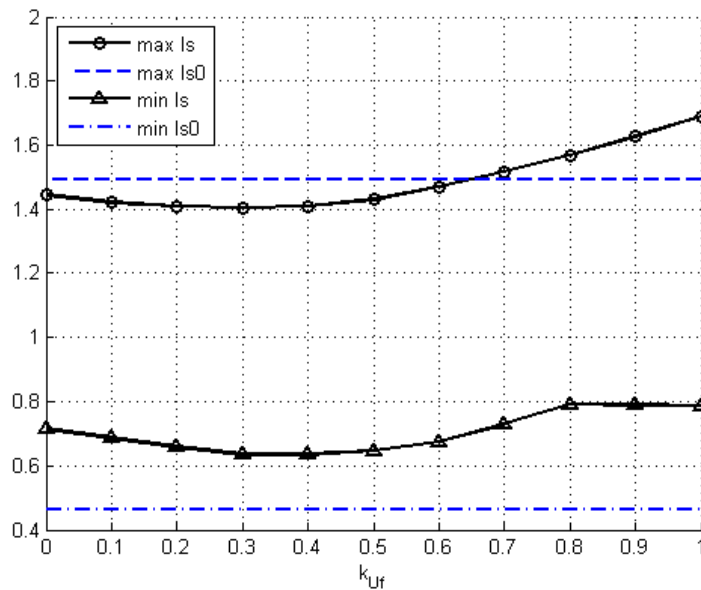


Рисунок 4.6 – Коефіцієнт корегування інтегральної частини регулятора



$\max I_{s0}$, $\min I_{s0}$ – струм якоря стандартного збудження, в.о.;

$\max I_s$, $\min I_s$ – струм якоря нового збудження, в.о.;

k_{uf} – кратність завдання на форсування струму

Рисунок 4.7 – Визначення максимально можливого рівня форсування збудження

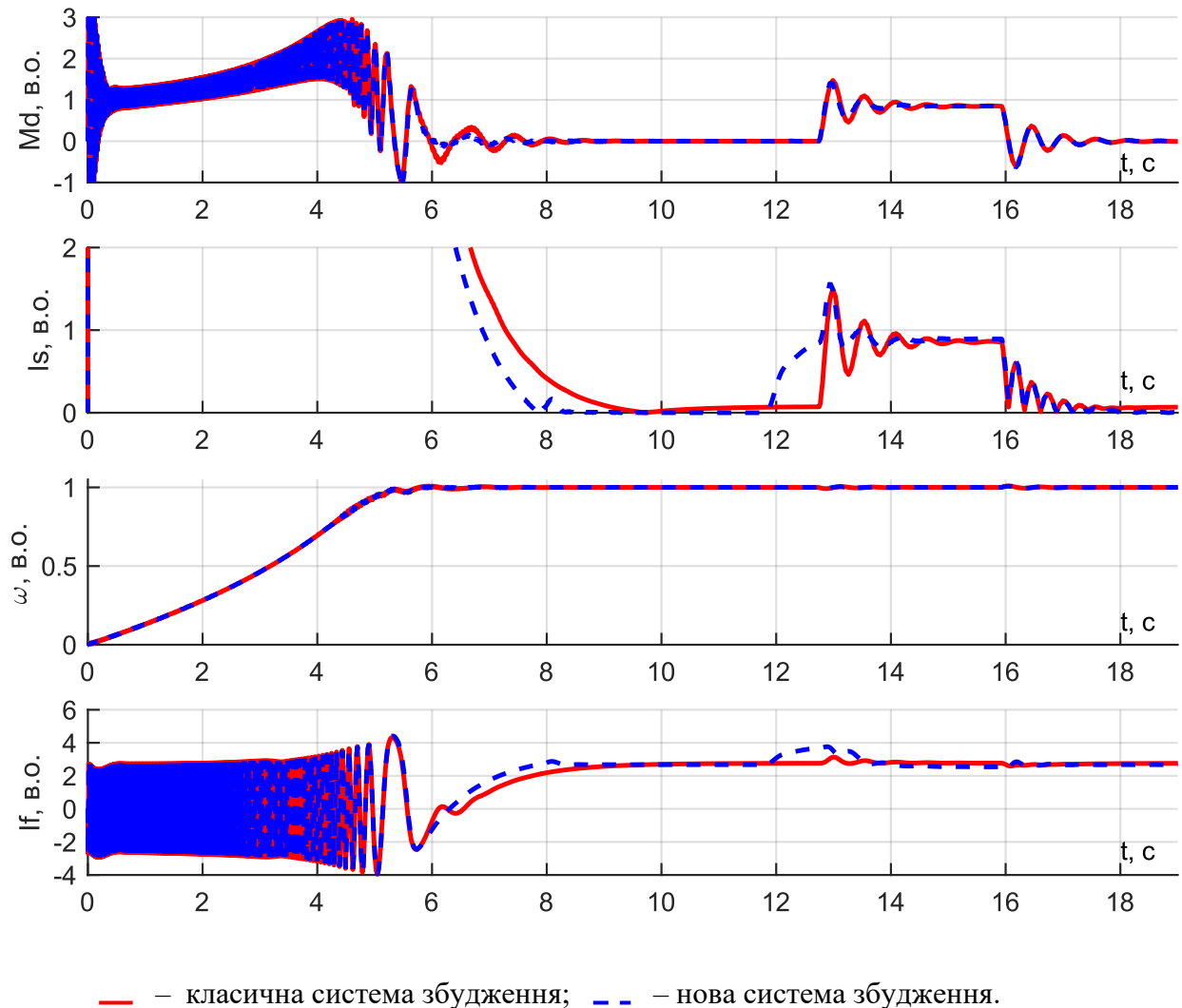
Підхід до визначення часових інтервалів регулювання збудження слід розділити на два етапи: на час завчасного форсування для гарантованого досягнення визначеного рівня струму якоря перед моментом прокатки та час одного напівперіоду його максимального коливання з моменту втягнення заготовки у валки. Очевидно, що тривалість форсування залежить від швидкодії зростання струму в обмотці збудження. Можна вважати, що гарантована тривалість форсування буде достатньою для будь-яких випадків навантаження при її дотриманні на рівні п'яти постійних часу обмотки збудження. У разі використання надлишкового часу можливий перегрів двигуна, тому тривалість пропонується оптимізувати за методом, наведеним у джерелі [53]. Щодо визначення часу одного напівперіоду максимальної коливальності, який додається до часу форсування і є межею, після якої завдання на збудження скидається до рівня раціонального споживання струму якоря, то він може бути розрахований через частоту власних коливань системи.

Запропонований алгоритм керування збудженням буде неповним, якщо не враховувати процес пуску двигуна. У цьому випадку початок запуску практично не відрізняється від стандартного методу. Проте синхронізація за ввімкненого регулювання повздовжнього струму якоря унеможливорює успішне завершення цього процесу через наявність позитивного зворотного зв'язку та використання в системі задавача інтенсивності. Тому такий спосіб керування збудженням передбачає введення в роботу регулятора за відсутності на ньому завдання та при розвантаженому двигуні і тільки після завершення синхронізації, яку потрібно здійснювати із номінальною напругою збудника.

Система електропривода та алгоритм керування збудженням випробувані на моделі, результат роботи якої наведено на рисунку 4.8.

Запуск двигуна здійснюється завдяки демпферній обмотці, а процес синхронізації – подачею напруги в обмотку збудження після досягнення швидкості обертання двигуна на рівні 0,95 від номінальної. Регулятор, при завданні 0,8 максимального форсування, увімкнувся після завершення перехідного процесу в контурі збудження в момент часу 8 с (див. рисунок 4.8).

Через 0,5 с після накиду навантаження завдання на струм статора за віссю d було зменшено до нуля, що відповідає завершенню часу дії максимального сплеску струму якоря. Скид статичного моменту виконано через 3 с.



M_d – електромагнітний момент двигуна, в.о. (відносних одиниць);

I_s – струм якоря, в.о.;

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

I_f – струм обмотки збудження, в.о.

Рисунок 4.8 – Результати порівняльного моделювання

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.

4.5 Практична реалізація системи завчасного форсування

Функціональну схему системи завчасного форсування наведено на рисунку 4.9. Основою системи є інтелектуальний модуль – програмований логічний контролер (ПЛК), що коригує завдання струму збудження приводного двигуна. Вхідними сигналами ПЛК є сигнали від датчиків наявності металу ДГМ1 та ДГМ2. Використання двох зміщених у просторі датчиків підвищує надійність системи та дозволяє визначити напрямок і швидкість руху заготовки для коректного розрахунку моменту подачі сигналу завчасного форсування. Програмний блок визначення напрямку (БВН) видає сигнал під час руху заготовки до кліті з необхідною затримкою часу. Вихідний сигнал цього блоку активує тригер завдання та одночасно запускає програмний таймер. Таймер призначений для зняття зовнішнього сигналу форсування після закінчення уставки (≈ 15 секунд) у випадку, якщо заготовка з якоїсь причини не потрапила в кліть і штатна система форсування не була активована.

У нормальному режимі роботи для скидання тригера завдання (і таймера) використовується сигнал активної потужності, що споживається приводним двигуном. Наявність цього сигналу свідчить про початок проходження заготовки, під час якого активується штатна система форсування в збуднику. Сигнал активної потужності може бути отриманий безпосередньо зі збудника або розрахований за сигналами струму та напруги статора, що надходять із трансформатора НТМІ.

У якості датчика металу можуть бути використані, наприклад, оптичні безконтактні вимикачі OSH AF47A5-43P-LZ. Ці датчики мають ступінь захисту IP65, призначені для застосування в ливарному та прокатному виробництві. Принцип дії датчика оснований на реєстрації інфрачервоного випромінювання від об'єкта, що детектується. Інфрачервоне випромінювання від гарячого об'єкта перетворюється датчиком на напругу (U_T), рівень якого пропорційний

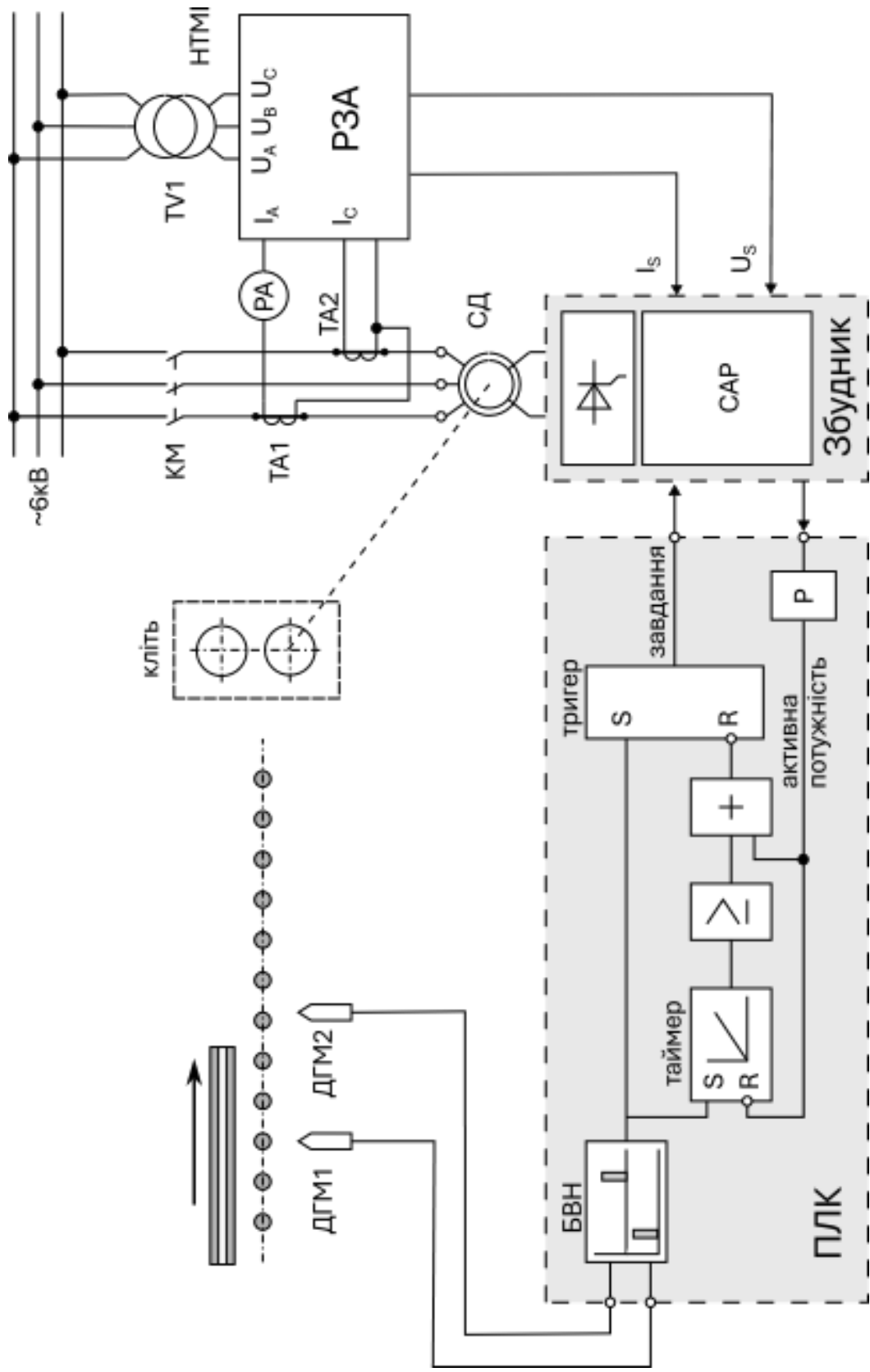


Рисунок 4.9 – Функціональна схема системи завчасного форсування

температурі об'єкта. Ця напруга (U_t) порівнюється в датчику з регульованою напругою (U_k), яка еквівалентна встановленому температурному порогу. Коли температура об'єкта перевищує температурний поріг, напруга (U_t) стає більшою (U_k). Це призводить до зміни стану ключів на виході датчика. Технічні характеристики датчика наведено у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики датчика металу

Тип	OSH AF47A5-43P-LZ
Розмір корпусу, мм	M18x1x110
Матеріал корпусу	Д16Т
Кут візування	15°
Діапазон регулювання контрольованої температури	+500°C...+1250°C
Дальність дії	0,5...10 м
Регулювання чутливості	з регулюванням
Спектр випромінювання	інфрачервоний
Діапазон робочої напруги, $U_{роб}$.	12...30 В DC
Тип контакту/Структура виходу	PNP перемикальний
Максимальний робочий струм, I_{max}	250 мА
Власний струм споживання, I_0	≤ 25 мА
Затримка увімкнення/вимкнення, не більше	0,5 с
Допустима освітленість навколишнього середовища	3000 Люкс
Діапазон робочих температур	-15°C...+65°C
Захист від коротких замикань	Є
Захист від неправильної полярності	Є
Світлова індикація	Є
Приєднання / Підключення	Кабель ПМВ 5x0,25 мм ²
Ступінь захисту по ГОСТ 14254-96	IP65

Висновки до розділу

1. Для адаптованої динамічної моделі синхронного двигуна СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4 коефіцієнти підсилення регулятора збудження, синтезовані за класичним методом, роблять систему привода частково коливальною. Цикл додаткових досліджень підтвердив, що зміна підсилення пропорційної частини регулятора не впливає на роботу системи. Водночас встановлено, що у випадку фіксації пропорційної частини на розрахунковому рівні та корекції інтегральної частини регулятора на рівні 21%...25% (що перевірено на моделях) від розрахованого значення, робота привода стає стабільною.

2. Для ефективної протидії ударним навантаженням автоматична система збудження повинна забезпечувати різні принципи роботи на інтервалах максимального збурення та залишкової коливальності струму якоря.

3. Порівняльним моделюванням доведено, що на останньому інтервалі, де тривалість перехідного процесу скоротилась на 34%, компенсувальні властивості регулятора струму є досить високими.

4. Оскільки максимальне збурення є найбільш руйнівною складовою, що діє на ізоляцію котушок якоря, пропонується скоротити його вплив зменшенням перепаду струму в момент накиду навантаження. Для цього слід до початку прокатки протягом п'яти постійних часу обмотки збудження збільшити напругу збудження до рівня 0,8 від максимального форсування, а після завершення дії удару (тривалість 0,5 с) скинути завдання до нуля, що забезпечить роботу привода в режимі енергозбереження. Водночас рівень форсування збудження лімітується: з одного боку – мінімумом перепаду струму якоря, з іншого – обмеженням екстремуму на рівні, що не перевищує максимум, характерний для класичної системи збудження.

РОЗДІЛ 5

УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ І РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ КЕРУВАННЯ

Практика застосування наукових результатів є особливо цінною у випадку її поширення на низку класів електромеханічних систем. У нашому випадку основними механізмами для впровадження є металургійні машини пластичної обробки металів (стани прокатки різного сортаменту, летючі ножиці [74]) та гірничі машини дробарно-подрібнювального циклу (валкові, молоткові та щоківі дробарки). Їх об'єднує подібний процес роботи, який характеризується хаотичним роздавлюванням продуктів подрібнення або створенням бажаної форми, що супроводжуються періодичними ударними навантаженнями.

Донедавна приводами таких механізмів слугували двигуни постійного струму та асинхронні машини з накопичувачем кінетичної енергії. Наявність в останніх м'якої механічної характеристики гармонійно узгоджувалася з роботою маховика. На жаль, невисокі енергетичні характеристики цих двигунів вимагають застосування синхронного привода, ККД якого може досягати 98 %, що значно перевищує ефективність машин попереднього типу. Водночас компенсація періодичного ударного навантаження унеможлиблюється абсолютно жорсткою механічною характеристикою синхронного привода. Крім того, виникають додаткові проблеми пов'язані зі значними динамічними зусиллями, які здатні руйнувати конструкцію двигуна.

5.1 Визначення рівня форсування збудження у функції навантаження

В основу досліджень цього етапу покладено той факт, що для зазначених механізмів зазвичай застосовують двигуни потужністю від сотень до тисяч кіловат. Двигуни такого типу є унікальними електричними машинами, де виробництво навіть двох машин розглядається як серійне. Це дозволяє стверджувати, що для обраного ряду електродвигунів потужностей рівня

(1600...4000) кВт і діапазону швидкостей (75...150) об/хв кількість унікальних машин є достатньо великою.

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 через конструктивні особливості пружного елемента. На цьому етапі досліджень було вирішено обмежити перелік факторів впливу оптимізаційної задачі одним параметром – рівнем форсування контуру збудження, одночасно контролюючи величину середньоквадратичного відхилення поточного значення струму якоря.

Як дослідні двигуни прийнято такі електричні машини (див. таблицю 5.1): 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. Вхідний матеріал для моделювання отримано із розрахункових формулярів заводів-виробників унікальних потужних електричних машин (Додаток Г).

Таблиця 5.1 – 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
Р _н , кВт	1600	2000	2500	3150	4000
пн, об/хв	100	150	150	150	75
Ј _д , кг·м ²	23250	12750	15000	19325	250000
Ј _н , кг·м ²	6128.93	2620.93	2620.93	5161.21	51612.07
М _н , 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.

Також попередніми дослідженнями встановлено вплив рівня навантаження на величину завдання на збудження. У програмі випробувань навантаження варіювалось у межах від 0,6 до 1 номінального, що є достатнім для охоплення всіх можливих варіантів навантаження. Щодо форсування, то у цьому випадку

межі визначені в діапазоні 0,8...1,75 номінального значення, що зумовлено технічними можливостями збудника промислового типу.

Почергово змінюючи вхідні дані параметрів двигунів та рівня навантаження в алгоритмі (Додаток А), отримано фактичні результати середньоквадратичного відхилення (див. таблицю 5.2) та коефіцієнтів форсування збудження (див. таблицю 5.3), які надалі подано у графічній формі (див. рисунок 5.1).

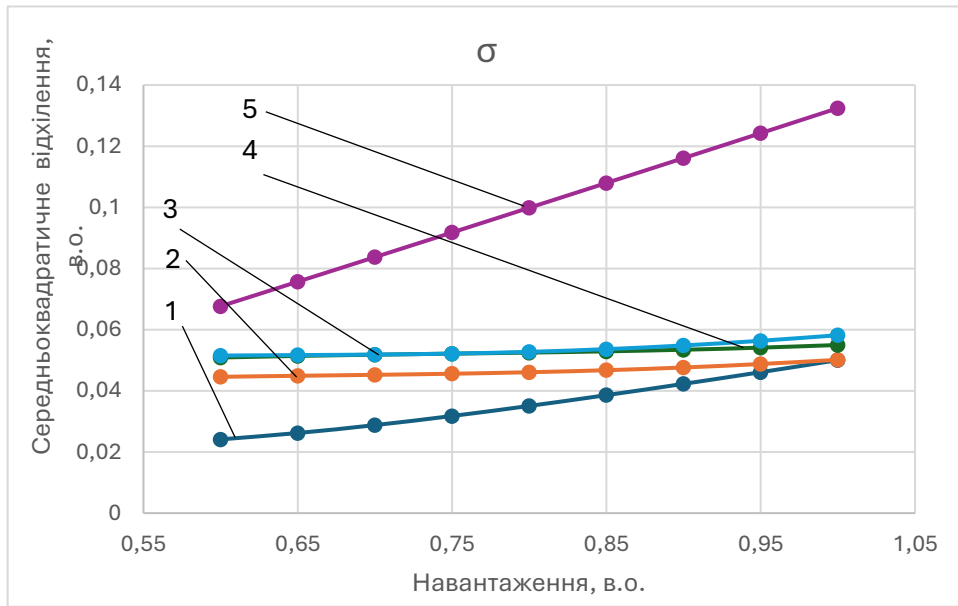
Таблиця 5.2 – Матриця відповідності середньоквадратичного відхилення σ

k_{mc}	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
	1	2	3	4	5
0.6	0.02412	0.044579	0.050885	0.051538	0.067657
0.65	0.026205	0.044918	0.05141	0.051685	0.075683
0.7	0.028787	0.045229	0.05181	0.051855	0.083719
0.75	0.031771	0.045591	0.05215	0.052175	0.091775
0.8	0.035062	0.046076	0.052495	0.052747	0.099857
0.85	0.038582	0.046743	0.052906	0.05363	0.107966
0.9	0.042274	0.047632	0.053434	0.054841	0.116102
0.95	0.046095	0.048762	0.054118	0.056367	0.124261
1	0.050018	0.050136	0.054985	0.05818	0.132439

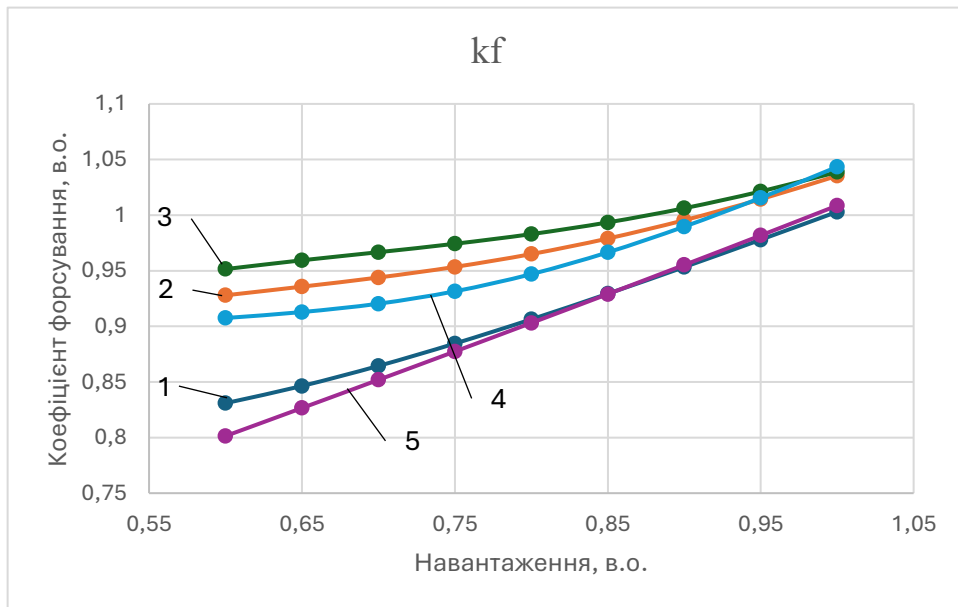
Таблиця 5.3 – Матриця показника форсування збудження k_f

k_{mc}	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
	1	2	3	4	5
0.6	0.830894	0.927888	0.951465	0.907494	0.801344
0.65	0.846382	0.935692	0.959387	0.912831	0.826565
0.7	0.864411	0.9439	0.966662	0.920353	0.851891
0.75	0.884536	0.953432	0.974226	0.931503	0.87737
0.8	0.906304	0.964984	0.982931	0.946932	0.903052
0.85	0.929322	0.978948	0.993444	0.966515	0.928983
0.9	0.953268	0.995424	1.006175	0.989637	0.955195
0.95	0.977879	1.014286	1.021281	1.015507	0.981714
1	1.00294	1.035286	1.038709	1.043376	1.008551

де k_{mc} – коефіцієнт рівня навантаження від номіналу.



а



б

а – середньоквадратичне відхилення (див. таблицю 5.2);

б – коефіцієнт форсування збудження (див. таблицю 5.3)

Рисунок 5.1 – Фактичні результати моделювання

Для даних наведених у таблиці 5.2 та таблиці 5.3 отримано залежності у вигляді ліній тренду. Вони дають змогу, відповідно до типу двигуна та конкретного рівня навантаження, визначити бажаний коефіцієнт форсування збудження, який забезпечить мінімум динамічного зусилля, що діє в обмотках

якоря у момент прикладання максимально ударного навантаження. Універсальне рівняння поліномів має вигляд:

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (5.1)$$

де y – функція пошуку;

a, b, c – коефіцієнти;

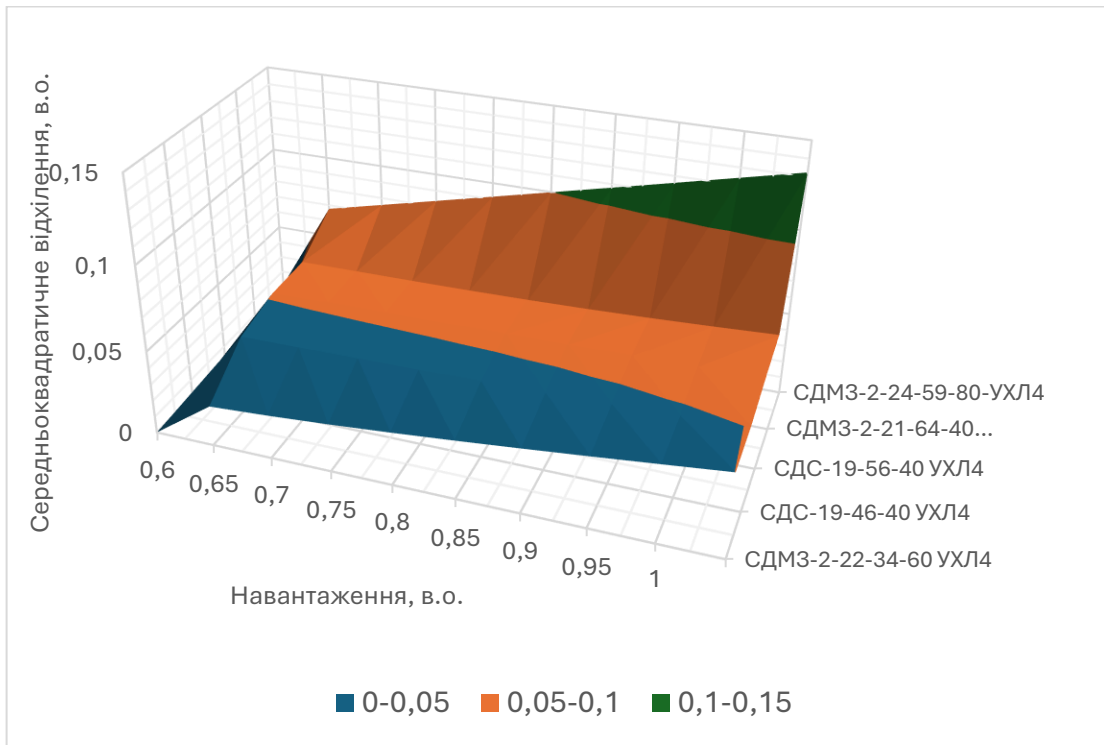
x – рівень навантаження в долях номінального, в.о.

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 5.4.

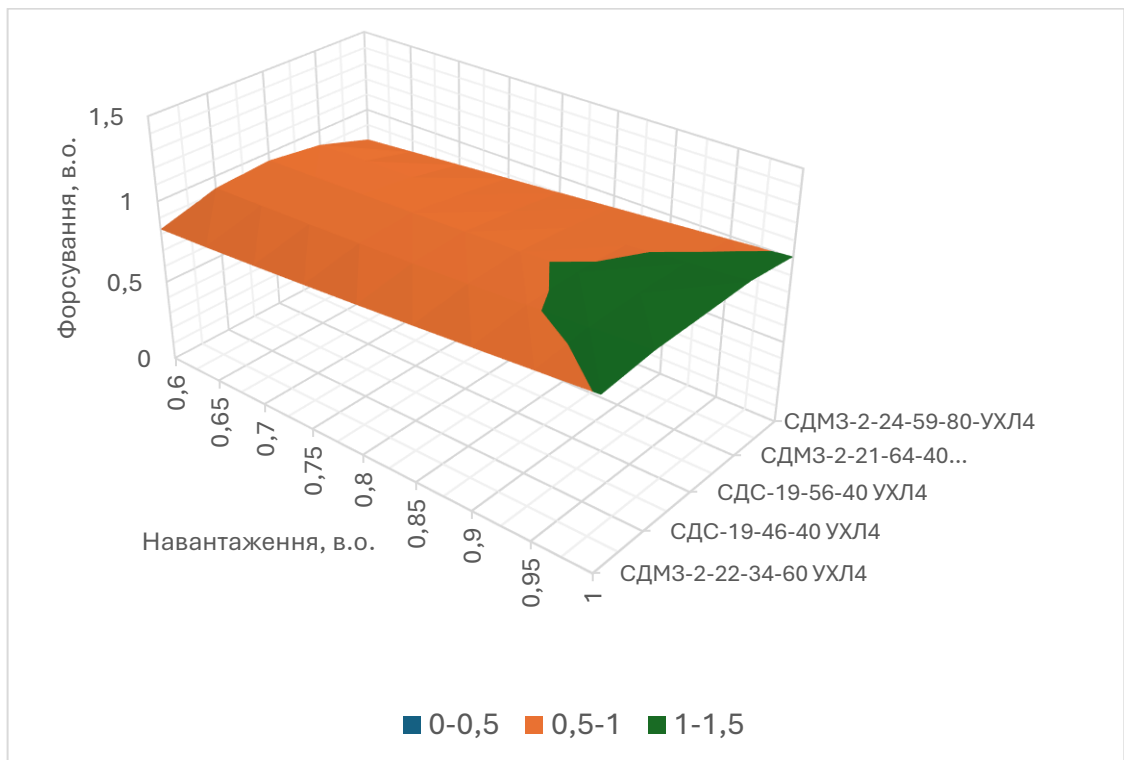
Таблиця 5.4 – Параметри поліномів за типами двигунів і функції навантаження

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

Найбільш зручним для аналізу, протягом подальшого виконання досліджень, є побудова отриманих даних у вигляді функції двох змінних. Тому із табличного представлення функцій (див. таблицю 5.2 та таблицю 5.3) побудовано у середовищі програмного продукту Excel розділу 3D діаграми (див. рисунок 5.2.).



а



б

а) – середньоквадратичне відхилення;

б) – рівень форсування

Рисунок 5.2 – Графіки функцій пошуку задачі оптимізації

Для побудови автоматичних систем керування збудженням синхронних приводів промислового типу необхідні значення форсування, що реалізують алгоритм керування, мають бути заздалегідь завантажені у пам'ять контролера у вигляді таблиці. Вибір бажаного параметра форсування, як зазначалось раніше, визначається типом двигуна та поточним навантаженням.

5.2 Визначення параметрів складових автоматичної системи керування збудженням

За запропонованим алгоритмом побудови комбінованої системи керування етап 2 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 також впливає на динамічне 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.

У поточних дослідженнях прийнято, що як і в попередніх розрахунках (п. 4.4), кореговане значення підсилення інтегральної ланки становить 22 % від розрахованого за модульним оптимумом.

Параметри автоматичної системи збудження визначено також за допомогою алгоритму розв'язання оптимізаційної задачі (Додаток А). При цьому розрахункові рівняння мають вигляд:

підсилення задавача інтенсивності

$$k_{iz} = \frac{r_f}{x_f - x_{ad}} \cdot \frac{x_{ad}}{x_{kd}}; \quad (5.2)$$

підсилення пропорційної ланки ПІ-регулятора

$$k_p = \frac{T_d \cdot r_a}{2 \cdot k_{\Pi} \left[x_{ad} \cdot \left[\frac{1}{x_f - x_{ad}} \frac{x_{ad}}{x_{kd}} \frac{x_{ad}}{x_{kd}} \frac{1}{x_f - x_{ad}} \frac{x_{ad}}{x_{kd}} \right] \right]} \cdot k_{id} \cdot T_{\mu} \quad (5.3)$$

підсилення інтегральної ланки ПІ-регулятора

$$k_i = \frac{r_a}{2 \cdot k_{\Pi} \left[x_{ad} \cdot \left[\frac{1}{x_f - x_{ad}} \frac{x_{ad}}{x_{kd}} \frac{x_{ad}}{x_{kd}} \frac{1}{x_f - x_{ad}} \frac{x_{ad}}{x_{kd}} \right] \right]} \cdot k_{id} \cdot T_{\mu} \quad (5.4)$$

де r_a, r_f – активний опір якоря і збудження, в.о.;

x_{ad}, x_{kd}, x_f – реактивні опіри реакції якоря, розсіювання демпферної обмотки та обмотки збудження, в.о.;

k_{Π}, T_{μ} – коефіцієнт підсилення та постійна часу перетворювача напруги, в.о.;

T_d – електромагнітна постійна за віссю d, в.о.

Виходячи з визначених параметрів і моделі, побудованої відповідно до структури, наведеної на рисунку 4.2, виконано перевірку працездатності синхронного привода, а фактичні коефіцієнти підсилення зведені у таблицю (див. таблицю 5.5).

Таблиця 5.5 – 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 проєктній та експлуатаційній практиці.

Висновки до розділу

1. Цінність отриманих результатів досліджень визначається можливістю їхнього застосування до максимальної кількості об'єктів керування.

2. У механізмах пластичної обробки металів застосовують переважно унікальні потужні електричні двигуни, для яких виготовлення навіть двох машин розглядається як серійне виробництво. Тому вибір п'яти серійних двигунів можна вважати достатнім для визначення узагальнених параметрів форсування та регулятора системи керування збудженням.

3. Отримані рівняння ліній тренду та функцій, залежних від двох змінних, дають змогу розробляти автоматичні системи, які забезпечують необхідний параметр форсування збудження залежно від поточного значення навантаження та типу унікального двигуна.

4. Запропонований спосіб отримання параметрів узагальненого типу для визначеного переліку двигунів переконливо демонструє здатність системи привода суттєво компенсувати динамічні зусилля в обмотках двигуна.

5. Отримані результати досліджень обґрунтовують рекомендацію проєктним організаціям щодо застосування запропонованого способу визначення параметрів форсування (п. 5.1) та значення коефіцієнтів підсилення системи керування (див. таблицю 5.5). У разі відсутності відповідного типу двигуна в переліку слід застосувати цей спосіб із використанням вхідних даних розрахункових формулярів заводів-виробників та параметрів конкретного об'єкта керування.

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 забезпечить обмеження результату дії екстремального зусилля; на другому – роботу регулятора, який забезпечує демпфування залишкової коливальності у режимі сталого навантаження та додатково знижує динамічний вплив на обмотки двигуна, сприяючи подовженню терміну 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 значним соціально-економічним чинником, створюючи робочі місця для понад 200 тисяч працівників [75, 76, 77, 78]. Тактичною складовою – експлуатація високопродуктивного обладнання, зокрема автомат-стана ТПА-350, супроводжується значними експлуатаційними ризиками. Згідно з даними

заводів-виробників, регулярні аварійні простої 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 знайдено.

Водночас встановлено, що алгоритм роботи привода передбачає три основні режими – неробочий хід (рух заготовки по напрямку або від прокатної кліті); 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 прикладення 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 управління системою збудження в умовах оптимального налагодження зумовила необхідність синтезу спеціального регулятора стабілізації подовжнього струму якоря. Аналіз наявних способів керування контуром збудження виявив нездатність сучасних автоматизованих 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 5.4 та 5.5), 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на початок 2024 року. *Kyiv School of Economics - Kyiv School of Economics*. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf (дата звернення: 05.05.2025).
2. Предун К. М. Аналіз стану інженерних мереж та можливостей їх використання для потреб теплопостачання населених пунктів України. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2012. № 16. С. 67–71. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/votp_2012_16_14.
3. Стасюк В. М. Комунальна інфраструктура: техногенна безпека в нових умовах господарювання. *Економіка та суспільство*. 2017. № 8. С. 497–501. URL: https://economyandsociety.in.ua/journals/8_ukr/85.pdf.
4. Клименко В. М., Шиліна О. П., Осадчук А. Ю. Технологія конструкційних матеріалів. / Частина друга. Конструкційні матеріали: властивості, класифікація, виробництво : навч. посіб. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 154 с.
5. Системи технологій : навч. посіб. / С. Ф. Поважний та ін. 3-тє вид. Донецьк : ДонДУУ, 2012. 198 с.
6. Друян В. М., Гуляєв Ю. Г., Чукмасов С. О. Теорія та технологія трубного виробництва : підручник. Дніпропетровськ : РВА “Дніпро-VAL”, 2000. 587 с.
7. Класифікація сталевих труб - основні типи та види. *КТ-СТАЛЬ*. URL: <https://kt-stal.com.ua/klassifikaciya-stalnyx-trub-osnovn> (дата звернення: 22.05.2025).
8. Конструкційна труба. *Cangzhou Yizeng Industry Co., Ltd.* URL: <https://ua.czyzindustry.com/info/structural-pipe-87736371.html> (дата звернення: 22.05.2025).

9. Повний посібник із сталевих труб: усе, що вам потрібно знати про труби, список 40 тощо. URL: <https://kingsunmachining.com/uk/blog/steel-piping/> (дата звернення: 22.05.2025).
10. Бешта О. С., Балахонцев О. В., Бородай В. А. Автоматизований електропривод у прокатному виробництві : навч. посіб. Дніпропетровськ : НГУ, 2010. 224 с.
11. Целиков А. И., Полухин П. И., Гребеник В. М. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т. 3 Машины и агрегаты для производства и обработки проката. : Уч. для вузов. М. : Металлургия, 1988. 674 с.
12. Vladimir B. Ginzburg. Metallurgical design of flat rolled steels. Taylor & Francis : Routledge and CRC Press, 2019. 726 p.
13. Youngseog Lee. Rod and bar rolling. theory and applications. Taylor & Francis : Routledge and CRC Press, 2004. 480 p.
14. Ніколаєв В. О., Мазур В. Л. Технологія виробництва сортового та листового прокату : підручник. Запоріжжя : ЗДІА, 2000. Частина. II. 220 с.
15. Класифікація прокатних станів. URL: <https://iua.waykun.com/articles/klasifikacija-prokatnih-staniv.php> (дата звернення: 25.05.2025).
16. A500 Round Structural Pipe. URL: <https://shangangsteelsupply.com/uk/astm-a500-structural-steel-pipe-and-tubing/> (дата звернення: 25.05.2025).
17. Ханін М. І., Солдатов В. Ю., Алексеев А. В. Параметри процесу прошивки під час виробництва труб найбільш трудомісткого сортаменту на ТПА-350. *Сучасні проблеми металургії*. 2008. Т. 11. С. 12–17.
18. Нова технологія прошивки суцільних заготовок у стані гвинтової прокатки, що реалізує отримання гільз та труб підвищеної точності / М. І. Ханін та ін. *Пластична деформація металів*. 2014. Т. 1. С. 75–76.
19. Статистичний аналіз точності товщини стінки гарячедеформованих труб / О. В. Соболенко та ін. *Сучасні проблеми металургії*. 2020. № 23. С. 113–120.

20. Удосконалення технології прокатки труб на безперервному розкатному стані з утримуваною оправкою / Д. О. Струїн та ін. *Вісник ПУДУ*. 2018. Т. 18, № 2. С. 72–80.
21. Рахманов С. Р., Поворотний В. В. Дослідження динаміки елементів робочої кліти автоматичного стану ТПА 350. *Чорна металургія. Бюлетень науково-технічної та економічної інформації*. 2020. Т. 76, № 8. С. 830–840.
22. Аномальні режими роботи крупних синхронних машин / Е. Я. Казовський та ін. Л : Наука, 1968. 363 с.
23. Грубой А. П., Гакал П. Г., Третьяк А. В. Визначення теплового стану лобових частин стрижнів обмотки турбогенераторів великої і середньої потужності. *Авіаційно-космічна техніка і технології*. 2012. № 8 (95). С. 144–118.
24. Індекс інфляції (2000-2025). *Ставки, індекси, тарифи*. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/economy/index/inflation/> (дата звернення: 17.05.2025).
25. Copper Prices (1959-2025). *Macrotrends | The Long Term Perspective on Markets*. URL: <https://www.macrotrends.net/1476/copper-prices-historical-chart-data> (date of access: 17.05.2025).
26. 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.
27. Бесонов А. О. Зниження динамічних навантажень електромеханічних систем чорнових клітей з синхронними нерегульованими двигунами : Дис. ... канд. техн. наук. Липецьк, 2006. 154 с. URL: <http://tekhnosfera.com/snizhenie-dinamicheskikh-nagruzok-elektromehaniicheskikh-sistem-chernovyh-kletey-s-sinhronnymi-nereguliruemymi-dvigateliyami>.
28. Паспорт виробу. СКПЕП-16 Система контролю параметрів електроприводів / Пельтек І.І. Дніпро, 2017. 7 с.

29. Типова програма робіт з електромеханічної діагностики електроприводів і обертових електричних машин/ ТОВ НВП «ЦЕД» / Джур Р.В. Дніпро, 2025. 13 с.
30. Електричні машини і трансформатори : підручник / ред. В. І. Мілих. Харків : ХПІ, 2017. 452 с.
31. Коваль А. М., Машуков М. Ю. Модернізація системи пуску та керування збудженням синхронного двигуна. *Матеріали ЛІІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, м. Вінниця, 20–22 берез. 2024 р. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2024/paper/view/20893>.
32. Релейний захист високовольтних електродвигунів. : електронний навч. посіб. комбінованого (локального та мережного) використання / В. В. Тептя та ін. Вінниця : ВНТУ, 2022. Ч. 1. 137 с.
33. Релейний захист високовольтних електродвигунів. : електронний навч. посіб. комбінованого (локального та мережного) використання / В. В. Тептя та ін. Вінниця : ВНТУ, 2022. Ч. 2. 136 с.
34. Губаревич О. В. Надійність і діагностика електрообладнання : підручник. Сєверодонецьк : СНУ ім. В. Даля, 2016. 248 с.
35. Довідник з електричних машин. У двох томах. / ред.: І. П. Копилов, Б. К. Клоков. М : Енергоатоміздат, 1988. Т. 1. 456 с.
36. Рахманов С. Р. Динаміка стрижневої системи механізму утримання оправки прошивного стану трубопрокатного агрегату. *«Сучасні напрями виробництва зварних і безшовних труб із чорних і кольорових металів»* : Матеріали Міжнар. конф., м. Дніпропетровськ. 2007. С. 45–51.
37. Рахманов С. Р., Морозова Л. А. Динаміка лінії приводу стану гвинтової прокатки труб. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2009. № 2 (54). С. 76–82..
38. Рахманов С. Р. Дослідження динаміки процесу прошивки трубної заготовки на прошивному стані. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2011. № 1. С. 46–52.

39. Особливості функціонування і шляхи зниження динамічних навантажень в лінії привода автоматичного стану трубопрокатного агрегату з зазором в зчленуваннях / С. Р. Рахманов та ін. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2013. № 3. С. 85–91.
40. Рахманов С. Р. Особливості функціонування головної силової лінії автоматичного стану трубопрокатного агрегату з врахуванням зазорів в зчленуваннях. *Металургійна і гірничорудна промисловість*. 2015. № 6. С. 106–113. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MGRP_2015_6_24.
41. Рахманов С. Р., Вишинський В. Т. Дослідження динаміки робочої кліті автоматичного стану трубопрокатного агрегату. *Металургійна і гірничорудна промисловість*. 2018. № 4. С. 74–80.
42. Шляхи розвитку процесів гарячої прокатки труб / В. Ф. Балакін та ін. *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. 2018. № 3(116). С. 104–109.
43. Дослідження напружено-деформованого стану робочої кліті автоматичного стану ТПА 350 із застосуванням інформаційних технологій / І. П. Хацкелян та ін. *Комп'ютерне моделювання: аналіз, керування, оптимізація*. 2019. № 2 (6). С. 83–90.
44. Рахманов С. Р., Хацкелян І. П., Гармашов Д. Ю. Дослідження динаміки перехідних процесів на автоматичному стані трубопрокатного агрегату. *Пластична деформація металів*. 2017. С. 203–209.
45. Рахманов С. Р., Поворотний В. В. Динаміка елементів робочої кліті автоматичного стану ТПА 350. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2020. № 1. С. 57–70.
46. Рахманов С. Р., Поворотний В. В. Дослідження динаміки елементів робочої кліті автоматичного стану ТПА 350. *Чорна металургія. Бюлетень науково-технічної і економічної інформації*. 2020. № 8. С. 830–840.
47. Поворотний В. В. Підвищення ефективності роботи станів холодної прокатки труб шляхом раціонального синтезу деталей робочих клітей: дис.

... канд. техн. наук : спец. 05.05.08 – Машины для металлургійного виробництва. Дніпро, 2021. 203 с.

48. Model Based Monitoring of Dynamic Loads and Remaining Useful Life Prediction in Rolling Mills and Heavy Machinery / P. Krot et al. *Advances in Asset Management and Condition Monitoring*. 2020. P. 399–416.
49. Krot P. V. Dynamics and diagnostics of the rolling mills drivelines with non-smooth stiffness characteristics. *Proceedings of the 3rd International Conference of Nonlinear Dynamic*, Kharkiv, 21–24 September 2010. P. 115–120.
50. Krot P. V., Korennoy V. V. Nonlinear Effects in Rolling Mills Dynamics. *Proceedings of the 5th International Conference on Nonlinear Dynamics*, Kharkiv, 27–30 September 2016. P. 117–124.
51. Бородай В. А., Боровик Р. О., Шепетько Д. О. Раціональна схема збудження із непрямым розщепленням і конденсаторами потужних синхронних приводів з гарантованим запуском. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. 2019. № 101. С. 25–29.
52. Бородай В. А., Боровик Р. О., Котлярова Е. В. Демпфування ударних навантажень гірничо-металургійних механізмів засобами синхронного привода. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. 2015. № 95. С. 47–50.
53. 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.
54. Бялобржеський О. В., Слободенюк Д. В. Система керування динамічними режимами збудження синхронного двигуна. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. 2013. № 91. С. 94–98.
55. Чугунов Д. В., Нізімов В. Б. Забезпечення стійкості роботи синхронних двигунів при посадці напруги в мережі або прикладанні значного навантаження. *Збірник наукових праць ДДТУ*. 2024. № 2(45). С. 112–116.

- 56.Хоменко В. І., Нізімов В. Б., Количев С. В. Підвищення стійкості роботи синхронної машини шляхом удосконалення системи збудження. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. № 1/8(73). С. 31–36.
- 57.Бородай В. А., Нестеренко М. О. Метод та критерій оптимізації пускових характеристик синхронних двигунів з важкими умовами пуску. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2010. № 85. С. 180–182.
- 58.Павлюк Д. П., Біднарик С. Пуск і асинхронні режими синхронних двигунів. М : Енергія, 1971. 271 с.
- 59.Малакова Е. А. Використання передприскорення двигуна прокатної кліті для зменшення динамічного навантаження. *Internet Journal of Electrical Engineering*. 2016. Т. 4, № 1. С. 19–22.
- 60.Линьков С. А., Сарваров А. С., Бачурін І. В. Аналіз систем керування синхронних електроприводів. *ЕСіК. Серія „Теорія і практика автоматизованого електропривода”*. 2014. № 2(23). С. 25–28.
- 61.Слободенюк Д. В., Бялобржеський О. В. Ємнісний накопичувальний пристрій у контурі збудження синхронної машини для форсування та гасіння поля. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2015. № 2. С. 16–20.
- 62.Шевченко І. С., Морозов Д. І. Спеціальні питання теорії електропривода. Динаміка синхронного електропривода : навч. посіб. Київ : Кафедра, 2014. 267 с.
- 63.Спосіб стабілізації реактивної потужності синхронного генератора шляхом слідкую чого коригування його напруги збудження : пат. 53711 Україна : (2009) Н02М 1/08. № U201005973 ; заявл. 10.01.2011.
- 64.Спосіб послідовного коригування струму збудження синхронного генератора для стабілізації його реактивної потужності : пат. 56988 Україна : (2010) Н02М 1/08. № U201005970 ; заявл. 10.02.2011.
- 65.Шуригіна Г. В. Покращання експлуатаційних характеристик синхронних електроприводів металургійних агрегатів : автореф. автореф. дис. ... канд. техн. наук. Магнітогорськ, 2005. 20 с.

66. Babaei M., Nazarzadeh J., Faiz J. Nonlinear feedback control of chaos in synchronous reluctance motor drive systems. *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, Chengdu, 21–24 April 2008. 2008. P. 1–5.
67. Програмно керований збудник синхронних двигунів / В. І. Кириченко та ін. *Наука та інновації*. 2006. Т. 2, № 3. С. 28–37.
68. Задорожня І. Н., Задорожній Н. А. Синтез електромеханічної системи граничної ступені стійкості і мінімальної коливальності пружної механічної підсистеми. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2017. № 27(1249). С. 150–155.
69. Спосіб випереджаючого коригування напруги збудження генератора при роботі на асинхронний двигун : пат. 63053 Україна : (2010) Н02М 1/08. № U201102430 ; заявл. 26.09.2011.
70. Спосіб випереджаючого коригування генератором, що працює на асинхронний двигун : пат. 62906 Україна : (2010) Н02М 1/08. № U201100496 ; заявл. 26.09.2011.
71. Спосіб випереджаючого коригування генератором, що працює на асинхронний двигун : пат. 62904 Україна : (2010) Н02М 1/08. № U201100491 ; заявл. 26.09.2011.
72. 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.
73. Нізимов В. Б., Сніжко А. А. Система векторного керування синхронним двигуном з ємкісним накопичувачем енергії у контурі збудження. *Вісник СумДУ. Серія „Технічні науки”*. 2011. № 3. С. 7–12.
74. Аналіз можливих шляхів підвищення продуктивності обладнання поточкових ліній прокатних цехів. / О. М. Гречаний та ін. *ВІСНИК Херсонського національного технічного університету*. 2021. № 3 (78). С. 36–42. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.3.4>.

- 75.Економічний огляд металургійної галузі України – РЕЙТИНГ. Бізнес в офіційних цифрах. *РЕЙТИНГ. Бізнес в офіційних цифрах*. URL: <https://rating.zone/ekonomichnyj-ohliad-metalurhijnoi-haluzi-ukrainy/> (дата звернення: 15.06.2025).
- 76.Двуліт З. П., Андрусак К. А. Виклики металургійної галузі України в умовах сьогодення. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення та проблеми розвитку*. 2023. № 1 (9). С. 261–269. URL: <https://doi.org/10.23939/smeu2023.01.261>.
- 77.Мельник О. В. Тенденції та перспективи розвитку металургійних підприємств України. *Електронний журнал «Ефективна економіка»*. 2017. № 8. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7629> (дата звернення: 18.06.2025).
- 78.Гончар В. В. Дослідження виробничого потенціалу підприємств чорної металургії в межах проведення стратегічних досліджень. *Електронний журнал «Ефективна економіка»*. 2014. № 1. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2684> (дата звернення: 18.06.2025).
- 79.Райхман Е. Н. Стан та перспективи впровадження синхронного електропривода в металургії. М : Інформелектро, 1980. 51 с.
- 80.Спосіб регулювання збудження синхронних машин : пат. 135216 Україна : Н02К 19/36 (2006.01). № 201813087 ; заявл. 29.12.2018 ; опубл. 25.06.2019, Бюл. № 12.
- 81.Спосіб регулювання збудження синхронних машин : пат. 123955 Україна. Опубл. 30.06.2021, Бюл. № 26.
- 82.Бородай В. А., Боровик Р. О. Спосіб регулювання жорсткості механічної характеристики синхронного привода механізмів з різко-змінним навантаженням. *Актуальні проблеми науки, освіти і технологій в XXI столітті* : зб. тез доп. міжнар. науково-практ. конф., 19 черв. 2025 р. Полтава. С. 136–139. URL: <https://www.economics.in.ua/2025/06/19.html>.

- 83.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>.

ДОДАТОК А

ОЦІНКА ПРОЦЕСУ УДАРНОГО ПРИКЛАДАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ
ШТАТНОЇ СИСТЕМИ ПРИВОДА З СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ*Розрахунок параметрів синхронного двигуна**Паспортні дані:*

$$S_n \equiv 470000 \text{ P}_n \equiv 400000 \text{ U}_n \equiv 600 \text{ I}_n \equiv 451 \text{ f} \equiv 50 \cos\phi_n \equiv 0.9 \text{ n}_n \equiv 75$$

Реактивні опори (Ом)

$X_s \equiv 0.53$	$X_l \equiv X_s$	Розсіювання обмотки статора
$X_d \equiv 3.4$		Реакції статора по поздовжній осі
$X_q \equiv 2.45$		Реакції статора поперечної осі
$X_{fs} \equiv 1.12$		Розсіювання обмотки збудження
$X_d' \equiv 1.34$		Перехідний опір по поздовжній осі
$X_q'' \equiv 0.854$		Перехідний опір по поперечній осі
$X_d'' \equiv 0.85$		Надперехідний опір по поздовжній осі

Постійні часу (в с):

$T_d' \equiv 0.91$	Обмотки збудження при замкненій обм. статора та розімкн. демпферній обмотці
$T_q'' \equiv 0.015$	Демпферної обмотки при замкнутій статорі
$T_{do}'' \equiv 0.019$	Демпферної обмотки при замкнутому збудженні та розімкнутій статорі

Активні опори обмоток:

$R_{15} \equiv 0.055$	Опір статора фази при 15 С
-----------------------	----------------------------

Інші вихідні дані:

$GD_2 \equiv 1000000$	Маховий момент
$I_{vn} \equiv 270$	Номінальний струм збудження
$U_{vn} \equiv 240$	Номінальна напруга збудження
$U_{vm} \equiv 360$	Максимальна напруга збудження

Навантаження:

$R_{dob} \equiv 1.6$	Розрядний опір
$J_{mm} \equiv 387225$	Неприведений момент інерції механізму
$i_z \equiv 10.0805$	Передаточне число зачеплення
$C \equiv 6067093$	Жорсткість муфти
$\Psi \equiv 0.77$	Коефіцієнт поглинання для зубчастого зачеплення

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ

Базовий струм:	$I_b \equiv I_n \cdot \sqrt{2}$	$I_b = 637.810317$
Базова напруга:	$U_b \equiv U_n \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$	$U_b = 4898.979486$
Базова потужність:	$P_b \equiv \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n$	$P_b = 4.686929 \times 10^6$
Базова частота:	$f_b \equiv f$	$f_b = 50.000000$
Базова частота обертання:	$\omega_b \equiv 2 \cdot \pi \cdot f$	$\omega_b = 314.159265$
	$p \equiv 60 \cdot \frac{f_b}{n_n}$	$p = 40.000000$
Базова кутова частота обертання:	$\Omega_b \equiv \frac{\omega_b}{p}$	$\Omega_b = 7.853982$
Базовий момент:	$M_b \equiv \frac{P_b}{\Omega_b}$	$M_b = 596758.396405$
Базовий опір:	$Z_b \equiv \frac{U_b}{I_b}$	$Z_b = 7.680935$
Базова індуктивність:	$L_b \equiv \frac{Z_b}{\omega_b}$	$L_b = 0.024449$
Базове потокозчеплення:	$\Psi_b \equiv \frac{U_b}{\omega_b}$	$\Psi_b = 15.593936$
Базовий час	$t_b \equiv \frac{1}{\omega_b}$	$t_b = 0.003183$
Момент інерції двигуна:	$\phi_b \equiv \omega_b \cdot t_b$	$\phi_b = 1.000000$
Приведений момент інерції механізму:	$J_d \equiv 250000$	$J_d = 250000.000000$
	$J_m \equiv 350000$	$J_m = 350000.000000$
Відносна жорсткість муфт для моделі:		
Постійна інерції двигуна:	$C_o \equiv \frac{C}{64888.695187}$	$C_o = 93.500000$
		$C_o = 93.50000000$
в секундах	$T_{dv} \equiv J_d \cdot \frac{\Omega_b^2}{P_b}$	$T_{dv} = 3.290269$
у віднос. од.:	$T_{dvo} \equiv \frac{T_{dv}}{t_b}$	$T_{dvo} = 1033.668364$
		0.001296356
Постійна інерція механізму:		
в секундах	$T_m \equiv J_m \cdot \frac{\Omega_b^2}{P_b}$	$T_m = 4.606376$
у віднос. од.:	$T_{mo} \equiv T_m \cdot \omega_b$	$T_{mo} = 1447.135709$

Частота власних коливань
двомасової системи:

$$\Omega_0 \equiv \sqrt{C \cdot \frac{(J_d + J_m)}{J_d \cdot J_m}}$$

$$\Omega_0 = 6.450033$$

Відносний коефіцієнт
демпфування для моделі:

$$\beta \equiv \frac{C \cdot \Psi}{2 \cdot \pi \cdot \Omega_0} \cdot \frac{\Omega_b^2}{P_b}$$

$$\beta = 1.517123$$

Індуктивний опір
реакції статора у віднос. од.:

$$x_d \equiv \frac{X_d}{Z_b}$$

$$x_d = 0.442654$$

Індуктивний опір реакції
якоря за поздовжньою віссю в Ом:

$$X_{ad} \equiv X_d - X_1$$

$$X_{ad} = 2.870000$$

у віднос. од.:

$$x_{ad} \equiv \frac{X_{ad}}{Z_b}$$

$$x_{ad} = 0.373652$$

Індуктивний опір
обмотки збудження в Ом:

$$X_f \equiv \frac{X_{ad}^2}{X_d - X_{d'}}$$

$$X_f = 3.998495$$

у віднос. од.:

$$x_f \equiv \frac{X_f}{Z_b}$$

$$x_f = 0.520574$$

Перехідний індуктивний опір
обмотки збудження в Ом:

$$X_f' \equiv X_f - \frac{X_{ad}^2}{X_d}$$

$$X_f' = 1.575877$$

у віднос. од.:

$$x_f' \equiv \frac{X_f'}{Z_b}$$

$$x_f' = 0.205167$$

Приведений активний опір
обмотки збудження в Ом:

$$R_f \equiv \frac{X_f'}{\omega_b \cdot T_{d'}}$$

$$R_f = 0.005512$$

у віднос. од.:

$$r_f \equiv \frac{R_f}{Z_b}$$

$$r_f = 0.000718$$

Індуктивний опір розсіювання демпферної
обмотки за поздовжньою віссю в Ом:

$$X_{eds} \equiv X_{fs} \cdot X_{ad} \cdot \frac{(X_{d''} - X_s)}{(X_s - X_{d''}) \cdot (X_{fs} + X_{ad}) + X_{ad} \cdot X_{fs}}$$

$$X_{eds} = 0.530867$$

у віднос. од.:

$$x_{eds} \equiv \frac{X_{eds}}{Z_b}$$

$$x_{eds} = 0.069115$$

Індуктивний опір демпферної
обмотки за поздовжньою віссю в Ом:

$$X_{ed} \equiv X_{ad} + X_{eds}$$

$$X_{ed} = 3.400867$$

у віднос. од.:

$$x_{ed} \equiv \frac{X_{ed}}{Z_b}$$

$$x_{ed} = 0.442767$$

Перехідний індуктивний опір демпферної
обмотки за поздовжньою віссю в Ом:

$$X_{ed}' \equiv X_{ed} - \frac{X_{ad}^2}{X_f}$$

$$X_{ed}' = 1.340867$$

у віднос. од.:

$$x_{ed}' \equiv \frac{X_{ed}'}{Z_b}$$

$$x_{ed}' = 0.174571$$

Активний опір демпферної
обмотки за поздовжньою віссю в Ом:

$$R_{ed} \equiv \frac{X_{ed}'}{\omega_b \cdot T_{do''}}$$

$$R_{ed} = 0.224637$$

у віднос. од.:	$red \equiv \frac{Red}{Z_b}$	$red = 0.029246$
Активний опір демпферної обмотки за поперечною віссю в Ом:	$X_{aq} \equiv X_q - X_s \quad X_{eq} \equiv \frac{X_{aq}^2}{X_q - X_q''}$	$X_{eq} = 2.309774$
у віднос. од.:	$x_{eq} \equiv \frac{X_{eq}}{Z_b}$	$x_{eq} = 0.300715$
Надперехідний опір індуктивної демпферної обмотки за поперечною віссю в Ом:	$X_{eq}'' \equiv X_{eq} - \frac{X_{aq}^2}{X_q}$	$X_{eq}'' = 0.805121$
у віднос. од.:	$x_{eq}'' \equiv \frac{X_{eq}''}{Z_b}$	$x_{eq}'' = 0.104821$
Активний опір демпферної обмотки по поперечній осі в Ом:	$Req \equiv \frac{X_{eq}''}{\omega_b \cdot T_q''}$	$Req = 0.170852$
у віднос. од.:	$req \equiv \frac{Req}{Z_b}$	$req = 0.022244$

Інші параметри

$D \equiv x_d \cdot x_f \cdot x_{ed} - x_{ad}^2 \cdot (x_d + x_f + x_{ed}) + 2 \cdot x_{ad}^3$	$D = 0.010065$
$x_d'' \equiv \frac{D}{x_f \cdot x_{ed} - x_{ad}^2}$	$x_d'' = 0.110753$
$x_f'' \equiv \frac{D}{x_d \cdot x_{ed} - x_{ad}^2}$	$x_f'' = 0.178530$
$x_{ed}'' \equiv \frac{D}{x_f \cdot x_d - x_{ad}^2} \quad x_{ed} = 0.442767$	$x_{ed}'' = 0.110825$
$x_{ded}'' \equiv \frac{D}{x_f \cdot x_{ad} - x_{ad}^2}$	$x_{ded}'' = 0.183340$
$x_{fed}'' \equiv \frac{D}{x_d \cdot x_{ad} - x_{ad}^2}$	$x_{fed}'' = 0.390375$
$x_{fd}'' \equiv \frac{D}{x_{ed} \cdot x_{ad} - x_{ad}^2}$	$x_{fd}'' = 0.389737$
$x_q \equiv \frac{X_q}{Z_b} \quad x_{aq} \equiv \frac{(X_q - X_s)}{Z_b} \quad x_q = 0.318972 \quad x_{aq} = 0.249970$	
$x_q'' \equiv \frac{x_q \cdot x_{eq} - x_{aq}^2}{x_{eq}}$	$x_q'' = 0.111184$
$x_{qeq}'' \equiv \frac{x_q \cdot x_{eq} - x_{aq}^2}{x_{aq}}$	$x_{qeq}'' = 0.133756$
Неприведений опір обмотки збудження в Ом:	$R_{f2} \equiv \frac{U_{vn}}{I_{vn}} \quad R_{f2} = 0.888889$

Коефіцієнт приведення опору:	$K_r \equiv \frac{R_f}{R_f^2}$	$K_r = 0.006201$
Коефіцієнт приведення струму:	$K_i \equiv \sqrt{\frac{3 \cdot K_r}{2}}$	$K_i = 0.096447$
Коефіцієнт приведення напруги:	$K_u \equiv \frac{K_r}{K_i}$	$K_u = 0.064298$
Напруга збудження приведена до статора: у віднос. од.:	$U_f \equiv U_{vn} \cdot K_u$ $u_{f0} \equiv \frac{U_f}{U_b}$	$U_f = 15.431476$ $u_{f0} = 0.003150$
Максимальна напруга форсування, приведена	$u_{fm} \equiv U_{vm} \cdot \frac{K_u}{U_b}$	$u_{fm} = 0.004725$
Додатковий опір обмотки збудження:	$r_{fd} \equiv R_{dob} \cdot \frac{K_r}{Z_b}$	$r_{fd} = 0.001292$
Відносний активний опір статора:	$r_a \equiv \frac{1.32 \cdot R_{15}}{Z_b}$	$r_a = 0.009452$
Відносний номінальний момент навантаження:	$M_{cno} \equiv \frac{P_n}{\Omega_b M_b}$	$M_{cno} = 0.853437$

$$x_d = 0.442654 \quad x_q = 0.318972 \quad x_{ad} = 0.373652 \quad x_{aq} = 0.249970 \quad \text{в.о.}$$

$$x_{ed} = 0.442767 \quad x_{eq} = 0.300715 \quad x_f = 0.520574 \quad r_f = 0.000718$$

$$r_{ed} = 0.029246 \quad r_{eq} = 0.022244$$

$$k_{01} := \frac{1}{x_{ed}} \quad k_{01} = 2.258523$$

$$k_{02} := \frac{x_{ad}}{x_{ed}} \quad k_{02} = 0.843902$$

$$k_{03} := x_{ad} - x_{ad} \cdot k_{02} \quad k_{03} = 0.058326$$

$$k_{04} := x_f - x_{ad} \cdot k_{02} \quad k_{04} = 0.205248$$

$$k_{05} := x_{ad} \cdot k_{01} \quad k_{05} = 0.843902$$

$$k_{06} := \frac{1}{k_{04}} \quad k_{06} = 4.872159$$

$$k_{07} := \frac{k_{03}}{k_{04}} \quad k_{07} = 0.284175$$

$$k_{08} := \frac{k_{05}}{k_{04}} \quad k_{08} = 4.111627$$

$$k_{09} := k_{01} + k_{02} \cdot k_{08} \quad k_{09} = 5.728334$$

$$k_{010} := k_{02} - k_{02} \cdot k_{07} \quad k_{010} = 0.604087$$

$$k_{011} := k_{02} \cdot k_{06} \quad k_{011} = 4.111627$$

$$k_{012} := x_d - x_{ad} \cdot (k_{07} + k_{010}) \quad k_{012} = 0.110753$$

$$k_{013} := x_{ad} \cdot (k_{06} - k_{011}) \quad k_{013} = 0.284175$$

$$k_{014} := x_{ad} \cdot (k_{08} - k_{09}) \quad k_{014} = -0.604087$$

$$k_{015} := r_f \cdot k_{06} \quad k_{015} = 0.003497$$

$$k_{016} := r_f \cdot k_{07} \quad k_{016} = 0.000204$$

$$k_{017} := r_f \cdot k_{08} \quad k_{017} = 0.002951$$

$$k_{018} := r_{ed} \cdot k_{09} \quad k_{018} = 0.167532$$

$$k_{019} := r_{ed} \cdot k_{010} \quad k_{019} = 0.017667$$

$$k_{020} := r_{ed} \cdot k_{011} \quad k_{020} = 0.120249$$

$$k_{021} := \frac{r_{eq}}{x_{eq}} \quad k_{021} = 0.073969$$

$$k_{022} := \frac{r_{eq} \cdot x_{aq}}{x_{eq}} \quad k_{022} = 0.018490$$

$$k_{023} := \frac{1}{x_{eq}} \quad k_{023} = 3.325405$$

$$k_{024} := \frac{x_{aq}}{x_{eq}} \quad k_{024} = 0.831250$$

$k_{025} := xq - xaq \cdot k_{024}$		$k_{025} = 0.111184$	
$k_{026} := xaq \cdot k_{023}$		$k_{026} = 0.831250$	$\frac{1}{ra} = 105.798001$
$T_{dd} := \frac{k_{012}}{ra \cdot 1}$		$T_{dd} = 11.717490$	
$T_{qq} := \frac{k_{025}}{ra \cdot 1}$		$T_{qq} = 11.763085$	
$T_{mm} := Jd \cdot \frac{\omega b^2}{Mb \cdot p}$	Jm	$T_{mm} = 1033.6683636$	$\frac{ufm}{uf0} = 1.500000$
$k_{\pi} := \frac{ufm \cdot Ub}{10}$	$\frac{10}{Ub \cdot 1} = 0.002041$	$k_{\pi} = 2.314721$	$\frac{10}{1.5} = 6.666667$
$T_{\mu} := \frac{0.05}{tb}$	0.001361	$T_{\mu} = 15.707963$	Коефіцієнт перетворювача Постійна часу перетворювача, в.о.
$k_{id} := \frac{5}{0.6 \cdot Ub}$		$k_{id} = 0.001701$	Коеф. зворотного зв'язку за id
$y := \frac{2 \cdot k_{\pi} \cdot k_{013} \cdot k_{id}}{ra}$		$y = 0.236758$	
$k_p := \frac{T_{dd}}{y \cdot T_{\mu}}$	Ku	$k_p = 3.150721$	Пропорційна частина регулятора
$k_i := \frac{1}{y \cdot T_{\mu}}$	Ki	$k_i = 0.268890$	Інтегральна частина регулятора
$k_{zi} := k_{015}$		$k_{zi} = 0.003497$	підсилення задавача інтенсивності

$$400 \cdot tb = 1.273240$$

Моделирование синхронного ЕП

$$u_0(x) \equiv 1 \begin{cases} 1 & \text{if } x_0 \leq 1800 \cdot \pi \\ 0.0005 & \text{otherwise} \\ 1 & \text{if } x_0 \geq 1950 \cdot \pi \end{cases}$$

$$id(x) \equiv \frac{x_1}{xd''} - \frac{x_3}{xfd''} - \frac{x_4}{xded''}$$

$$iff(x) \equiv \frac{x_3}{xf''} - \frac{x_1}{xfd''} - \frac{x_4}{xfed''}$$

$$mu(x) \equiv \frac{Co \cdot (x_7 - x_{10})}{p} \quad m(x) \equiv x_1 \cdot iq(x) - x_2 \cdot id(x)$$

$$M_{ж} \equiv 0.85 \quad mc(x) \equiv \begin{cases} 0 \\ M_{ж} & \text{if } x_0 \geq 1500 \cdot \pi \\ 0 & \text{if } x_0 \geq 1900 \cdot \pi \end{cases}$$

$$ud(x) \equiv u_0(x) \cdot \cos(x_8) \quad uf(x) \equiv \begin{cases} 0 \\ uf0 \cdot 0.65 & \text{if } x_6 \geq 0.9 \\ 1.005 \cdot uf0 & \text{if } x_0 \geq 1500 \cdot \pi \\ uf0 \cdot 0.65 & \text{if } x_0 \geq 1800 \cdot \pi \end{cases}$$

$$uq(x) \equiv u_0(x) \cdot \sin(x_8)$$

$$iq(x) \equiv \frac{x_2}{xq''} - \frac{x_5}{xqeq''}$$

$$ieq(x) \equiv \frac{x_5}{xeq''} - \frac{x_2}{xqeq''}$$

$$ied(x) \equiv \frac{x_4}{xed''} - \frac{x_1}{xded''} - \frac{x_3}{xfed''}$$

$$un \equiv \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$F(t, x) \equiv \begin{bmatrix} 1 \\ ud(x) - ra \cdot id(x) + x_2 \cdot x_6 \\ uq(x) - ra \cdot iq(x) - x_1 \cdot x_6 \\ uf(x) - rf \cdot iff(x) \\ -red \cdot ied(x) \\ -req \cdot ieq(x) \\ \frac{m(x) - \beta \cdot (x_6 - x_9) - Co \cdot \frac{(x_7 - x_{10})}{p}}{Tdvo} \\ x_6 \\ 1 - x_6 \\ \frac{Co \cdot \frac{(x_7 - x_{10})}{p} + \beta \cdot (x_6 - x_9) - mc(x)}{Tmo} \\ x_9 \end{bmatrix}$$

$$Z := Rkadapt(un, 0, \pi \cdot 2500, 7000, F)$$

$$\Psi_d := Z^{(2)} \quad \Psi_q := Z^{(3)} \quad \Psi_f := Z^{(4)} \quad \Psi_{kd} := Z^{(5)} \quad \Psi_{kq} := Z^{(6)}$$

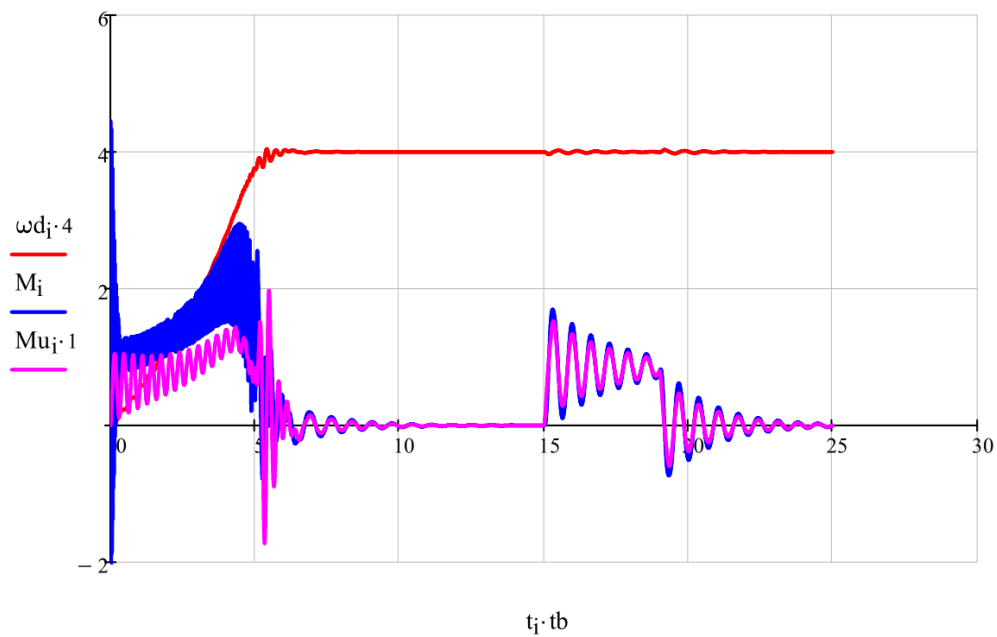
$$\omega_d := Z^{(7)} \quad \Theta := Z^{(8)} \quad \Theta_m := Z^{(11)} \quad \omega_m := Z^{(10)} \quad t := Z^{(0)} \quad i \equiv 0..7000$$

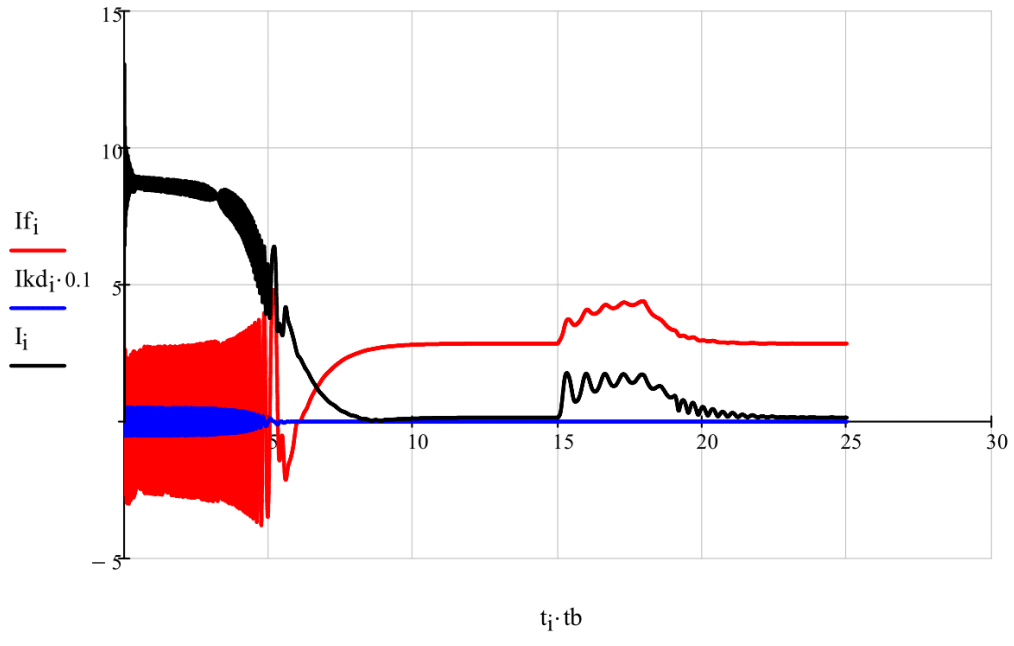
$$I_{d_i} := \left(\frac{\Psi_{d_i}}{x_{d_i}''} - \frac{\Psi_{f_i}}{x_{f_i}''} - \frac{\Psi_{k_{d_i}}}{x_{d_{ed_i}''}} \right) \quad I_{q_i} := \left(\frac{\Psi_{q_i}}{x_{q_i}''} - \frac{\Psi_{k_{q_i}}}{x_{q_{eq_i}''}} \right) \quad M_i := (\Psi_{d_i} \cdot I_{q_i} - \Psi_{q_i} \cdot I_{d_i})$$

$$M_{u_i} := \frac{Co \cdot (\Theta_i - \Theta_{m_i})}{p} \quad I_{f_i} := \left(\frac{\Psi_{f_i}}{x_{f_i}''} - \frac{\Psi_{d_i}}{x_{f_{d_i}''}} - \frac{\Psi_{k_{d_i}}}{x_{f_{ed_i}''}} \right) \quad I_{k_{q_i}} := \left(\frac{\Psi_{k_{d_i}}}{x_{eq_i}''} - \frac{\Psi_{q_i}}{x_{qe_{q_i}''}} \right)$$

$$I_{k_{d_i}} := \left(\frac{\Psi_{k_{d_i}}}{x_{ed_i}''} - \frac{\Psi_{d_i}}{x_{d_{ed_i}''}} - \frac{\Psi_{f_i}}{x_{f_{ed_i}''}} \right) \quad I_i := \sqrt{(I_{d_i})^2 + (I_{q_i})^2}$$

$$1000 \cdot 0.003183 = 3.183000$$





ДОДАТОК Б

ОЦІНКА ПРОЦЕСУ ДЕМПФУВАННЯ ЗА ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Розрахунок параметрів синхронного двигуна

Паспортні дані:

$$S_n \equiv 470000 \text{ P}_n \equiv 400000 \text{ U}_n \equiv 600 \text{ I}_n \equiv 451 \text{ f} \equiv 50 \cos\phi_n \equiv 0.9 \text{ n}_n \equiv 75$$

Реактивні опори (Ом)

$X_s \equiv 0.53$	$X_l \equiv X_s$	Розсіювання обмотки статора
$X_d \equiv 3.4$		Реакції статора по поздовжній осі
$X_q \equiv 2.45$		Реакції статора поперечної осі
$X_{fs} \equiv 1.12$		Розсіювання обмотки збудження
$X_{dh} \equiv 1.34$		Перехідний опір по поздовжній осі
$X_{qhh} \equiv 0.854$		Перехідний опір по поперечній осі
$X_{dhh} \equiv 0.85$		Надперехідний опір по поздовжній осі

Постійні часу (в с):

$T_{dh} \equiv 0.91$	Обмотки збудження при замкненій обм. статора та розімкн. демпферній обмотці
$T_{qhh} \equiv 0.015$	Демпферної обмотки при замкнутій статорі
$T_{dohh} \equiv 0.019$	Демпферної обмотки при замкнутому збудженні та розімкнутій статорі

Активні опори обмоток:

$R_{15} \equiv 0.055$	Опір статора фази при 15 С
-----------------------	----------------------------

Інші вихідні дані:

$GD^2 \equiv 1000000$	Маховий момент
$I_{vn} \equiv 270$	Номінальний струм збудження
$U_{vn} \equiv 240$	Номінальна напруга збудження
$U_{vm} \equiv 360$	Максимальна напруга збудження

Навантаження:

$R_{dob} \equiv 1.6$	Розрядний опір
$J_{mm} \equiv 387225$	Неприведений момент інерції механізму
$i_z \equiv 10.0805$	Передаточне число зачеплення
$C \equiv 6067093$	Жорсткість муфти
$\Psi \equiv 0.77$	Коефіцієнт поглинання для зубчастого зачеплення

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ

Базовий струм:	$I_b \equiv I_n \cdot \sqrt{2}$	$I_b = 637.810317$
Базова напруга:	$U_b \equiv U_n \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$	$U_b = 4898.979486$
Базова потужність:	$P_b \equiv \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n$	$P_b = 4.686929 \times 10^6$
Базова частота:	$f_b \equiv f$	$f_b = 50.000000$
Базова частота обертання:	$\omega_b \equiv 2 \cdot \pi \cdot f$	$\omega_b = 314.159265$
	$p \equiv 60 \cdot \frac{f_b}{n_n}$	$p = 40.000000$
Базова кутова частота обертання:	$\Omega_b \equiv \frac{\omega_b}{n}$	$\Omega_b = 7.853982$
Базовий момент:	$M_b \equiv \frac{P_b}{\Omega_b}$	$M_b = 596758.396405$
Базовий опір:	$Z_b \equiv \frac{U_b}{I_b}$	$Z_b = 7.680935$
Базова індуктивність:	$L_b \equiv \frac{Z_b}{\omega_b}$	$L_b = 0.024449$
Базове потокозчеплення:	$\Psi_b \equiv \frac{U_b}{\omega_b}$	$\Psi_b = 15.593936$
Базовий час	$t_b \equiv \frac{1}{\omega_b}$	$t_b = 0.003183$
	$\phi_b \equiv \omega_b \cdot t_b$	$\phi_b = 1.000000$
Момент інерції двигуна:	$J_d \equiv 250000$	$J_d = 250000.000000$
Приведений момент інерції механізму:	$J_m \equiv 350000$	$J_m = 350000.000000$
Відносна жорсткість муфт для моделі:	$C_o \equiv \frac{C}{64888.695187}$	93.500000 $C_o = 93.500000$
Постійна інерції двигуна:		
в секундах	$T_{dv} \equiv J_d \cdot \frac{\Omega_b^2}{P_b}$	$T_{dv} = 3.290269$
у віднос. од.:	$T_{dvo} \equiv \frac{T_{dv}}{t_b}$	$T_{dvo} = 1033.668364$
Постійна інерція механізму:		
в секундах	$T_m \equiv J_m \cdot \frac{\Omega_b^2}{P_b}$	$T_m = 4.606376$
у віднос. од.:	$T_{mo} \equiv T_m \cdot \omega_b$	$T_{mo} = 1447.135709$

Частота власних коливань
двомасової системи:

$$\Omega_0 \equiv \sqrt{C \cdot \frac{(J_d + J_m)}{J_d \cdot J_m}}$$

$$\Omega_0 = 6.450033$$

Відносний коефіцієнт
демпфування для моделі:

$$\beta \equiv \frac{C \cdot \Psi}{2 \cdot \pi \cdot \Omega_0} \cdot \frac{\Omega_b^2}{P_b}$$

$$\beta = 1.517123$$

Індуктивний опір
реакції статора у віднос. од.:

$$x_d \equiv \frac{X_d}{Z_b}$$

$$x_d = 0.442654$$

Індуктивний опір реакції
якоря за поздовжньою віссю в Ом:

$$X_{ad} \equiv X_d - X_1$$

$$X_{ad} = 2.870000$$

у віднос. од.:

$$x_{ad} \equiv \frac{X_{ad}}{Z_b}$$

$$x_{ad} = 0.373652$$

Індуктивний опір
обмотки збудження в Ом:

$$X_f \equiv \frac{X_{ad}^2}{X_d - X_{dh}}$$

$$X_f = 3.998495$$

у віднос. од.:

$$x_f \equiv \frac{X_f}{Z_b}$$

$$x_f = 0.520574$$

Перехідний індуктивний опір
обмотки збудження в Ом:

$$X_{fh} \equiv X_f - \frac{X_{ad}^2}{X_d}$$

$$X_{fh} = 1.575877$$

у віднос. од.:

$$x_{fh} \equiv \frac{X_{fh}}{Z_b}$$

$$x_{fh} = 0.205167$$

Приведений активний опір
обмотки збудження в Ом:

$$R_f \equiv \frac{X_{fh}}{\omega_b \cdot T_{dh}}$$

$$R_f = 0.005512$$

у віднос. од.:

$$r_f \equiv \frac{R_f}{Z_b}$$

$$r_f = 0.000718$$

Індуктивний опір розсіювання демпферної
обмотки за поздовжньою віссю в Ом:

$$X_{eds} \equiv X_{fs} \cdot X_{ad} \cdot \frac{(X_{dhh} - X_s)}{(X_s - X_{dhh}) \cdot (X_{fs} + X_{ad}) + X_{ad} \cdot X_{fs}}$$

$$X_{eds} = 0.530867$$

у віднос. од.:

$$x_{eds} \equiv \frac{X_{eds}}{Z_b}$$

$$x_{eds} = 0.069115$$

Індуктивний опір демпферної
обмотки за поздовжньою віссю в Ом:

$$X_{ed} \equiv X_{ad} + X_{eds}$$

$$X_{ed} = 3.400867$$

у віднос. од.:

$$x_{ed} \equiv \frac{X_{ed}}{Z_b}$$

$$x_{ed} = 0.442767$$

Перехідний індуктивний опір демпферної
обмотки за поздовжньою віссю в Ом:

$$X_{edh} \equiv X_{ed} - \frac{X_{ad}^2}{X_f}$$

$$X_{edh} = 1.340867$$

у віднос. од.:

$$x_{edh} \equiv \frac{X_{edh}}{Z_b}$$

$$x_{edh} = 0.174571$$

Активний опір демпферної
обмотки за поздовжньою віссю в Ом:

$$R_{ed} \equiv \frac{X_{edh}}{\omega_b \cdot T_{dohh}}$$

$$R_{ed} = 0.224637$$

у віднос. од.:

$$r_{ed} \equiv \frac{R_{ed}}{Z_b}$$

$$r_{ed} = 0.029246$$

Активний опір демпферної обмотки за поперечною віссю в Ом:

у віднос. од.:

Надперехідний опір індуктивної демпферної обмотки за поперечною віссю в Ом:

у віднос. од.:

Активний опір демпферної обмотки по поперечній осі в Ом:

у віднос. од.:

$$X_{aq} \equiv X_q - X_s \quad X_{eq} \equiv \frac{X_{aq}^2}{X_q - X_{qhh}} X_{eq} = 2.309774$$

$$x_{eq} \equiv \frac{X_{eq}}{Z_b} \quad x_{eq} = 0.300715$$

$$X_{eqhh} \equiv X_{eq} - \frac{X_{aq}^2}{X_q} \quad X_{eqhh} = 0.805121$$

$$x_{eqhh} \equiv \frac{X_{eqhh}}{Z_b} \quad x_{eqhh} = 0.104821$$

$$R_{eq} \equiv \frac{X_{eqhh}}{\omega_b \cdot T_{qhh}} \quad R_{eq} = 0.170852$$

$$r_{eq} \equiv \frac{R_{eq}}{Z_b} \quad r_{eq} = 0.022244$$

Інші параметри

$$D \equiv x_d \cdot x_f \cdot x_{ed} - x_{ad}^2 \cdot (x_d + x_f + x_{ed}) + 2 \cdot x_{ad}^3 \quad D = 0.010065$$

$$x_{dhh} \equiv \frac{D}{x_f \cdot x_{ed} - x_{ad}^2} \quad x_{dhh} = 0.110753$$

$$x_{fhh} \equiv \frac{D}{x_d \cdot x_{ed} - x_{ad}^2} \quad x_{fhh} = 0.178530$$

$$x_{edhh} \equiv \frac{D}{x_f \cdot x_d - x_{ad}^2} \quad x_{edhh} = 0.110825$$

$$x_{dedhh} \equiv \frac{D}{x_f \cdot x_{ad} - x_{ad}^2} \quad x_{dedhh} = 0.183340$$

$$x_{fedhh} \equiv \frac{D}{x_d \cdot x_{ad} - x_{ad}^2} \quad x_{fedhh} = 0.390375$$

$$x_{fdhh} \equiv \frac{D}{x_{ed} \cdot x_{ad} - x_{ad}^2} \quad x_{fdhh} = 0.389737$$

$$x_q \equiv \frac{X_q}{Z_b} \quad x_{aq} \equiv \frac{(X_q - X_s)}{Z_b} \quad x_q = 0.318972 \quad x_{aq} = 0.249970$$

$$x_{qhh} \equiv \frac{x_q \cdot x_{eq} - x_{aq}^2}{\dots} \quad x_{qhh} = 0.111184$$

$$x_{qeqhh} \equiv \frac{x_q \cdot x_{eq} - x_{aq}^2}{x_{aq}} \quad x_{qeqhh} = 0.133756$$

Неприведений опір обмотки збудження в Ом:

$$R_{f2} \equiv \frac{U_{vn}}{I_{vn}} \quad R_{f2} = 0.888889$$

Коефіцієнт приведення опору:

$$K_r \equiv \frac{R_f}{R_{f2}} \quad K_r = 0.006201$$

Коефіцієнт приведення струму:	$K_i \equiv \sqrt{\frac{3 \cdot K_r}{2}}$	$K_i = 0.096447$
Коефіцієнт приведення напруги:	$K_u \equiv \frac{K_r}{K_i}$	$K_u = 0.064298$
Напруга збудження приведена до статора: у віднос. од.:	$U_f \equiv U_{vn} \cdot K_u$ $u_{f0} \equiv \frac{U_f}{U_b}$	$U_f = 15.431476$ $u_{f0} = 0.003150$
Максимальна напруга форсування, приведена	$u_{fm} \equiv U_{vm} \cdot \frac{K_u}{U_b}$	$u_{fm} = 0.004725$
Додатковий опір обмотки збудження:	$r_{fd} \equiv R_{dob} \cdot \frac{K_r}{Z_b}$	$r_{fd} = 0.001292$
Відносний активний опір статора:	$r_a \equiv \frac{1.32 \cdot R_{15}}{Z_b}$	$r_a = 0.009452$
Відносний номінальний момент навантаження:	$M_{cno} \equiv \frac{P_n}{\Omega_b M_b}$	$M_{cno} = 0.853437$

Моделивання синхронного ЕП

Функція розрахунку оптимального відношення пружності муфт та кратності форсування збудження синхронного приводу

$$\sigma(V, W) := \left\{ \begin{array}{l} C \leftarrow V \\ t_0 \leftarrow 0 \\ \Psi_{d0} \leftarrow 0 \\ \Psi_{q0} \leftarrow 0 \\ \Psi_{f0} \leftarrow 0 \\ \Psi_{kd0} \leftarrow 0 \\ \Psi_{kq0} \leftarrow 0 \\ \omega_{d0} \leftarrow 0 \\ \Theta_0 \leftarrow 0 \\ \Theta_{l0} \leftarrow 0 \\ \omega_{m0} \leftarrow 0 \\ \Theta_{m0} \leftarrow 0 \\ n \leftarrow \text{ceil}(\pi \cdot 5000) \\ dt \leftarrow \frac{25}{n \cdot t_b} \\ m_c \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..n \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned}
uf &\leftarrow \begin{cases} 0 & \text{if } \omega d_{i-1} < 0.9 \\ uf0 & \text{if } \omega d_{i-1} \geq 0.9 \\ W \cdot uf0 & \text{if } t_{i-1} \geq 1300 \cdot \pi \end{cases} \\
m_c &\leftarrow \begin{cases} 0 \\ M_{\text{ж}} & \text{if } t_{i-1} \geq 1500 \cdot \pi \\ M_{\text{ж}} & \text{if } t_{i-1} \geq 1900 \cdot \pi \end{cases} \\
\Psi d_i &\leftarrow \left[\cos(\Theta 1_{i-1}) - ra \cdot \left(\frac{\Psi d_{i-1}}{xdhh} - \frac{\Psi f_{i-1}}{xfdhh} - \frac{\Psi kd_{i-1}}{xdedhh} \right) + \Psi q_{i-1} \cdot \omega d_{i-1} \right] \cdot \frac{dt}{2} + \Psi d_{i-1} \\
\Psi q_i &\leftarrow \left[\left[\sin(\Theta 1_{i-1}) - ra \cdot \left(\frac{\Psi q_{i-1}}{xqhh} - \frac{\Psi kq_{i-1}}{xqeqhh} \right) \right] - \Psi d_{i-1} \cdot \omega d_{i-1} \right] \cdot \frac{dt}{2} + \Psi q_{i-1} \\
\Psi f_i &\leftarrow \left[uf - rf \cdot \left(\frac{\Psi f_{i-1}}{xfhh} - \frac{\Psi d_{i-1}}{xfdhh} - \frac{\Psi kd_{i-1}}{xfedhh} \right) \right] \cdot \frac{dt}{2} + \Psi f_{i-1} \\
\Psi kd_i &\leftarrow -red \cdot \left(\frac{\Psi kd_{i-1}}{xedhh} - \frac{\Psi d_{i-1}}{xdedhh} - \frac{\Psi f_{i-1}}{xfedhh} \right) \cdot \frac{dt}{2} + \Psi kd_{i-1} \\
\Psi kq_i &\leftarrow -req \cdot \left(\frac{\Psi kq_{i-1}}{xeqhh} - \frac{\Psi q_{i-1}}{xqeqhh} \right) \cdot \frac{dt}{2} + \Psi kq_{i-1} \\
\omega d_i &\leftarrow \frac{\left[\Psi d_{i-1} \cdot \left(\frac{\Psi q_{i-1}}{xqhh} - \frac{\Psi kq_{i-1}}{xqeqhh} \right) - \Psi q_{i-1} \cdot \left(\frac{\Psi d_{i-1}}{xdhh} - \frac{\Psi f_{i-1}}{xfdhh} - \frac{\Psi kd_{i-1}}{xdedhh} \right) \right] - \left(\frac{C}{2 \cdot 7} \right)}{Tdvo} \\
\Theta_i &\leftarrow \omega d_{i-1} \cdot \frac{dt}{2} + \Theta_{i-1} \\
\Theta 1_i &\leftarrow (1 - \omega d_{i-1}) \cdot \frac{dt}{2} + \Theta 1_{i-1} \\
\omega m_i &\leftarrow \frac{\frac{C}{64888.695187} \cdot \frac{(\Theta_{i-1} - \Theta m_{i-1})}{p} + \left(\frac{C \cdot \Psi}{2 \cdot \pi \cdot \Omega 0} \cdot \frac{\Omega b^2}{Pb} \right) \cdot (\omega d_{i-1} - \omega m_{i-1}) - m_c}{Tmo} \\
\Theta m_i &\leftarrow \omega m_{i-1} \cdot \frac{dt}{2} + \Theta m_{i-1} \\
\Psi d_i &\leftarrow \left[\cos(\Theta 1_i) - ra \cdot \left(\frac{\Psi d_i}{xdhh} - \frac{\Psi f_i}{xfdhh} - \frac{\Psi kd_i}{xdedhh} \right) + \Psi q_i \cdot \omega d_i \right] \cdot dt + \Psi d_{i-1} \\
\Psi q_i &\leftarrow \left[\sin(\Theta 1_i) - ra \cdot \left(\frac{\Psi q_i}{xqhh} - \frac{\Psi kq_i}{xqeqhh} \right) - \Psi d_i \cdot \omega d_i \right] \cdot dt + \Psi q_{i-1} \\
\Psi f_i &\leftarrow \left[uf - rf \cdot \left(\frac{\Psi f_i}{xfhh} - \frac{\Psi d_i}{xfdhh} - \frac{\Psi kd_i}{xfedhh} \right) \right] \cdot dt + \Psi f_{i-1} \\
\Psi kd_i &\leftarrow -red \cdot \left(\frac{\Psi kd_i}{xedhh} - \frac{\Psi d_i}{xdedhh} - \frac{\Psi f_i}{xfedhh} \right) \cdot dt + \Psi kd_{i-1}
\end{aligned}$$

$$\Psi k_{qi} \leftarrow -\text{req} \cdot \left(\frac{\Psi k_{qi}}{x_{eqhh}} - \frac{\Psi q_i}{x_{qeqhh}} \right) \cdot dt + \Psi k_{qi-1}$$

$$\omega_{d_i} \leftarrow \frac{\left[\Psi d_i \cdot \left(\frac{\Psi q_i}{x_{qhh}} - \frac{\Psi k_{qi}}{x_{qeqhh}} \right) - \Psi q_i \cdot \left(\frac{\Psi d_i}{x_{dhh}} - \frac{\Psi f_i}{x_{fdhh}} - \frac{\Psi k_{d_i}}{x_{dedhh}} \right) \right] - \left(\frac{C \cdot \Psi \cdot \Omega}{2 \cdot \pi \cdot \Omega} \right)}{T_{dvo}}$$

$$\Theta_i \leftarrow \omega_{d_i} \cdot dt + \Theta_{i-1}$$

$$\Theta l_i \leftarrow (1 - \omega_{d_i}) \cdot dt + \Theta l_{i-1}$$

$$\omega_{m_i} \leftarrow \frac{\frac{C}{64888.695187} \cdot \frac{(\Theta_i - \Theta_{m_i})}{p} + \left(\frac{C \cdot \Psi \cdot \Omega b^2}{2 \cdot \pi \cdot \Omega \cdot P_b} \right) \cdot (\omega_{d_i} - \omega_{m_i}) - m_c}{T_{mo}} \cdot dt + \omega_{m_i}$$

$$\Theta_{m_i} \leftarrow \omega_{m_i} \cdot dt + \Theta_{m_i-1}$$

$$t_i \leftarrow t_{i-1} + dt$$

$$n1 \leftarrow 1$$

$$x \leftarrow 0$$

$$\text{for } i \in 10000 \dots n$$

$$I_{d_i} \leftarrow \frac{\Psi d_i}{x_{dhh}} - \frac{\Psi f_i}{x_{fdhh}} - \frac{\Psi k_{d_i}}{x_{dedhh}}$$

$$I_{q_i} \leftarrow \frac{\Psi q_i}{x_{qhh}} - \frac{\Psi k_{q_i}}{x_{qeqhh}}$$

$$I_i \leftarrow \sqrt{(I_{d_i})^2 + (I_{q_i})^2}$$

$$x \leftarrow (1.6 - I_i)^2 + x$$

$$n1 \leftarrow n1 + 1$$

$$\sigma \leftarrow \sqrt{\frac{x}{n1 - 1}}$$

$$\sigma$$

Початкові умови для розрахунку задані оптимізації

$$\underline{V} := 20067093 \quad \text{Вихідна пружність з'єднання пружних муфт}$$

$$\underline{W} := 1 \quad \text{Вихідна кратність форсування}$$

Given

$$6067093 \leq V \leq 20067093 \quad 0.1 \leq W \leq 1.75$$

$$Z := \text{Minimize}(\sigma, V, W)$$

$$C = 6.067093 \times 10^6$$

$$k_c := \frac{C}{C_0} = 64888.695187$$

Несмещенное стандартное отклонение

$$\sigma(Z_0, Z_1) = 0.002702$$

$$C_0 = 93.500000$$

$$\frac{6067093}{kc} = 93.500000 \quad \frac{20067093}{kc} = 309.254069$$

Результат оптимізації

$$C := Z_0 \quad k := Z_1$$

$$C = 8348486.225832$$

$$k = 0.178301$$

Перевірка роботи привода для оптимізованих параметрів

$$uf1(x) := \begin{cases} 0 & \\ uf0 \cdot 0.65 & \text{if } x_6 \geq 0.9 \\ k \cdot uf0 & \text{if } x_0 \geq 1300 \cdot \pi \\ uf0 \cdot 0.65 & \text{if } x_0 \geq 1800 \cdot \pi \end{cases} \quad mc(x) := \begin{cases} 0 & \\ M_{ж} & \text{if } x_0 \geq 1500 \cdot \pi \\ 0 & \text{if } x_0 \geq 1900 \cdot \pi \end{cases}$$

$$un := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad Ff(x) := \begin{bmatrix} \cos(x_8) - ra \cdot \left(\frac{x_1}{xdhh} - \frac{x_3}{xfdhh} - \frac{x_4}{xdedhh} \right) + \\ \sin(x_8) - ra \cdot \left(\frac{x_2}{xqhh} - \frac{x_5}{xqeqhh} \right) - x_1 \cdot x_6 \\ uf1(x) - rf \cdot \left(\frac{x_3}{xfhh} - \frac{x_1}{xfdhh} - \frac{x_4}{xfedhh} \right) \\ -red \cdot \left(\frac{x_4}{xedhh} - \frac{x_1}{xdedhh} - \frac{x_3}{xfedhh} \right) \\ -req \cdot \left(\frac{x_5}{xeqhh} - \frac{x_2}{xqeqhh} \right) \\ \left[x_1 \cdot \left(\frac{x_2}{xqhh} - \frac{x_5}{xqeqhh} \right) - x_2 \cdot \left(\frac{x_1}{xdhh} - \frac{x_3}{xfdhh} - \frac{x_4}{xdedhh} \right) \right] - \left(\frac{C \cdot \Psi}{2 \cdot \pi \cdot \Omega 0} \cdot \frac{\Omega b^2}{Pb} \right) \\ Tdvo \\ x_6 \\ 1 - x_6 \\ \frac{C}{64888.695187} \cdot \frac{(x_7 - x_{10})}{p} + \left(\frac{C \cdot \Psi}{2 \cdot \pi \cdot \Omega 0} \cdot \frac{\Omega b^2}{Pb} \right) \cdot (x_6 - x_7) \\ Tmo \\ x_9 \end{bmatrix}$$

$$Zz := \left\{ \begin{array}{l} n \leftarrow \text{ceil}(\pi \cdot 5000) \\ dt \leftarrow \frac{25}{n \cdot tb} \\ y^{(0)} \leftarrow un \\ \text{for } i \in 1..n \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} y^{(i)} \leftarrow Ff(y^{(i-1)}) \cdot \frac{dt}{2} + y^{(i-1)} \\ y^{(i)} \leftarrow Ff(y^{(i)}) \cdot dt + y^{(i-1)} \end{array} \right. \\ y^T \end{array} \right.$$

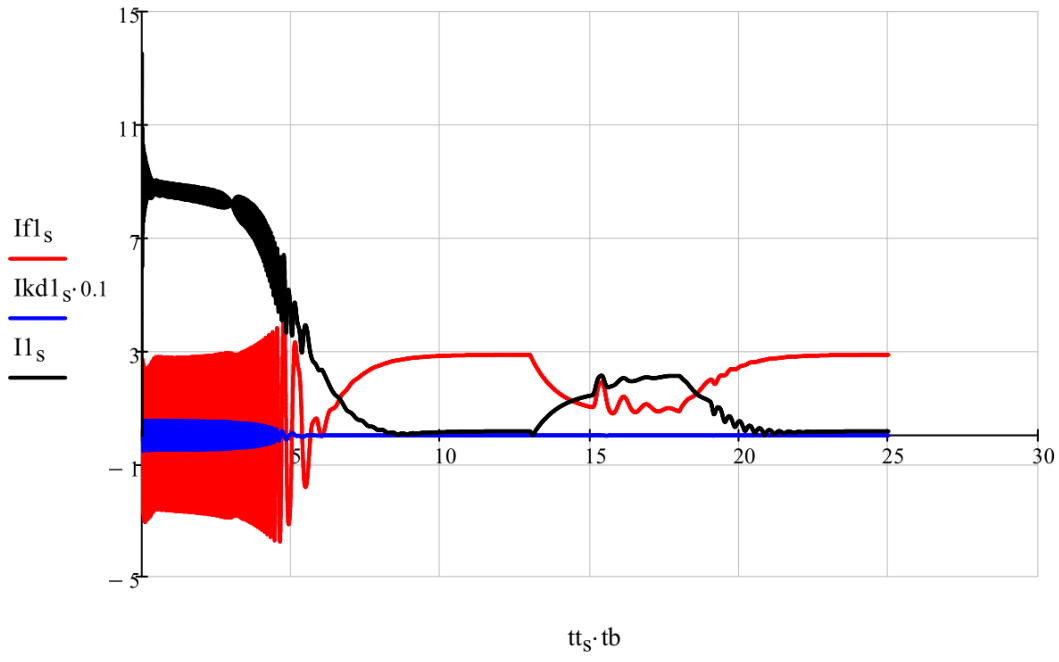
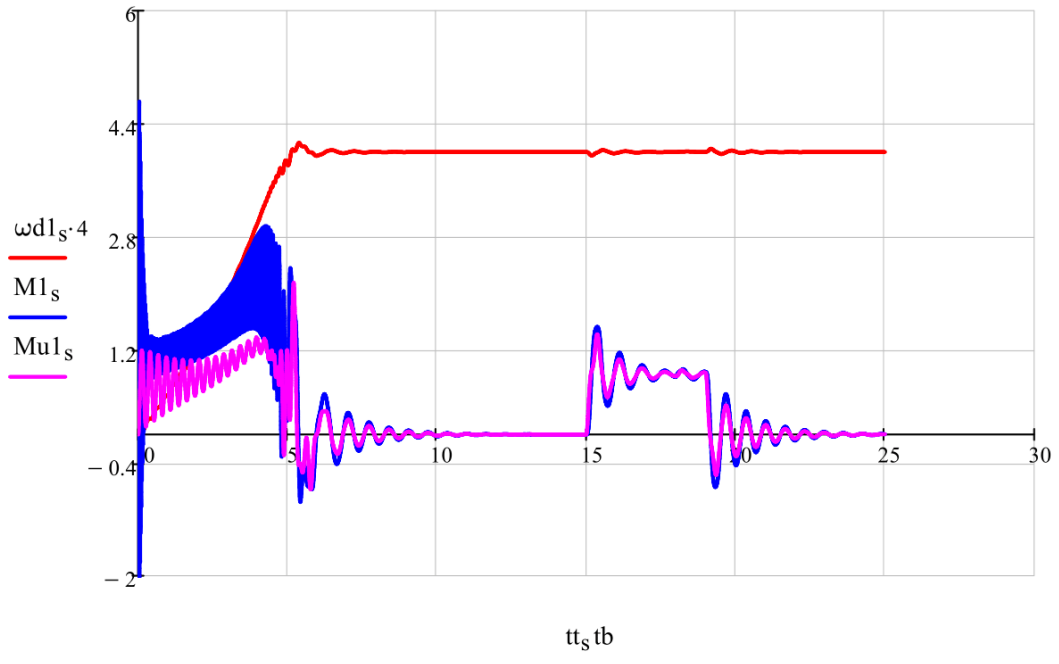
$$tt := Zz^{(0)} \quad \Psi d1 := Zz^{(1)} \quad \Psi q1 := Zz^{(2)} \quad \Psi f1 := Zz^{(3)} \quad \Psi kd1 := Zz^{(4)} \quad \Psi kq1 := Zz^{(5)}$$

$$\omega d1 := Zz^{(6)} \quad \Theta 1 := Zz^{(7)} \quad \omega m1 := Zz^{(9)} \quad \Theta m1 := Zz^{(10)} \quad \underline{s} := 0.. \text{ceil}(\pi \cdot 5000)$$

$$Id1_s := \left(\frac{\Psi d1_s}{xdhh} - \frac{\Psi f1_s}{xfdhh} - \frac{\Psi kd1_s}{xdedhh} \right) \quad Iq1_s := \left(\frac{\Psi q1_s}{xqhh} - \frac{\Psi kq1_s}{xqeqhh} \right) \quad M1_s := (\Psi d1_s \cdot Iq1_s - \Psi q1_s \cdot Id1_s)$$

$$Mu1_s := \frac{C}{64888.695187} \cdot (\Theta 1_s - \Theta m1_s) \quad If1_s := \left(\frac{\Psi f1_s}{xfhh} - \frac{\Psi d1_s}{xfdhh} - \frac{\Psi kd1_s}{xfedhh} \right)$$

$$Ikq1_s := \left(\frac{\Psi kd1_s}{xeqhh} - \frac{\Psi q1_s}{xqeqhh} \right) \quad Ikd1_s := \left(\frac{\Psi kd1_s}{xedhh} - \frac{\Psi d1_s}{xdedhh} - \frac{\Psi f1_s}{xfedhh} \right) \quad \underline{I1}_s := \sqrt{(Id1_s)^2 + (Iq1_s)^2}$$



ДОДАТОК В

ОЦІНКА ПРОЦЕСУ ДЕМПФУВАННЯ ЗА РЕГУЛЮВАННЯ ЖОРСТКОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИВОДУ

Розрахунок параметрів синхронного двигуна

Паспортні дані:

$$S_n \equiv 470000 \quad P_n \equiv 400000 \quad U_n \equiv 600 \quad I_n \equiv 451 \quad f \equiv 50 \quad \cos\phi_n \equiv 0.9 \quad n_n \equiv 75$$

Реактивні опори (Ом)

$X_s \equiv 0.53$	$X_1 \equiv X_s$	Розсіювання обмотки статора
$X_d \equiv 3.4$		Реакції статора по поздовжній осі
$X_q \equiv 2.45$		Реакції статора поперечної осі
$X_{fs} \equiv 1.12$		Розсіювання обмотки збудження
$X_d' \equiv 1.34$		Перехідний опір по поздовжній осі
$X_q'' \equiv 0.854$		Перехідний опір по поперечній осі
$X_d'' \equiv 0.85$		Надперехідний опір по поздовжній осі

Постійні часу (в с):

$T_d' \equiv 0.91$	Обмотки збудження при замкненій обм. статора та розімкн. демпферній обмотці
$T_q'' \equiv 0.015$	Демпферної обмотки при замкнутій статорі
$T_{do}'' \equiv 0.019$	Демпферної обмотки при замкнутому збудженні та розімкнутій статорі

Активні опори обмоток:

$R_{15} \equiv 0.055$	Опір статора фази при 15 С
-----------------------	----------------------------

Інші вихідні дані:

$GD^2 \equiv 1000000$	Маховий момент
$I_{vn} \equiv 270$	Номінальний струм збудження
$U_{vn} \equiv 240$	Номінальна напруга збудження
$U_{vm} \equiv 360$	Максимальна напруга збудження

Навантаження:

$R_{dob} \equiv 1.6$	Розрядний опір
$J_{mm} \equiv 387225$	Неприведений момент інерції механізму

$i_z \equiv 10.0805$	Передаточне число зачеплення
$C \equiv 6067093$	Жорсткість муфти
$\Psi \equiv 0.77$	Коефіцієнт поглинання для зубчастого зачеплення

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ

Базовий струм:	$I_b \equiv I_n \cdot \sqrt{2}$	$I_b = 637.810317$
Базова напруга:	$U_b \equiv U_n \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$	$U_b = 4898.979486$
Базова потужність:	$P_b \equiv \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n$	$P_b = 4.686929 \times 10^6$
Базова частота:	$f_b \equiv f$	$f_b = 50.000000$
Базова частота обертання:	$\omega_b \equiv 2 \cdot \pi \cdot f$	$\omega_b = 314.159265$
	$p \equiv 60 \cdot \frac{f_b}{n_n}$	$p = 40.000000$
Базова кутова частота обертання:	$\Omega_b \equiv \frac{\omega_b}{p}$	$\Omega_b = 7.853982$
Базовий момент:	$M_b \equiv \frac{P_b}{\Omega_b}$	$M_b = 596758.396405$
Базовий опір:	$Z_b \equiv \frac{U_b}{I_b}$	$Z_b = 7.680935$
Базова індуктивність:	$L_b \equiv \frac{Z_b}{\omega_b}$	$L_b = 0.024449$
Базове потокозчеплення:	$\Psi_b \equiv \frac{U_b}{\omega_b}$	$\Psi_b = 15.593936$
Базовий час	$t_b \equiv \frac{1}{\omega_b}$	$t_b = 0.003183$
	$\phi_b \equiv \omega_b \cdot t_b$	$\phi_b = 1.000000$
Момент інерції двигуна:	$J_d \equiv 250000$	$J_d = 250000.000000$
Приведений момент інерції механізму:	$J_m \equiv 350000$	$J_m = 350000.000000$

Відносна жорсткість муфт для моделі:

$$C_o \equiv \frac{C}{64888.695187}$$

$$C_o = 93.5000000$$

Постійна інерції двигуна:

в секундах

$$T_{dv} \equiv J_d \cdot \frac{\Omega b^2}{P_b}$$

$$T_{dv} = 3.290269$$

у віднос. од.:

$$T_{dvo} \equiv \frac{T_{dv}}{t_b}$$

$$T_{dvo} = 1033.668364$$

$$0.001296356$$

Постійна інерція механізму:

в секундах

$$T_m \equiv J_m \cdot \frac{\Omega b^2}{P_b}$$

$$T_m = 4.606376$$

у віднос. од.:

$$T_{mo} \equiv T_m \cdot \omega_b$$

$$T_{mo} = 1447.135709$$

Частота власних коливань двомасової системи:

$$\Omega_0 \equiv \sqrt{C \cdot \frac{(J_d + J_m)}{J_d \cdot J_m}}$$

$$\Omega_0 = 6.450033$$

Відносний коефіцієнт демпфування для моделі:

$$\beta \equiv \frac{C \cdot \Psi}{2 \cdot \pi \cdot \Omega_0} \cdot \frac{\Omega b^2}{P_b}$$

$$\beta = 1.517123$$

Індуктивний опір реакції статора у віднос. од.:

$$x_d \equiv \frac{X_d}{Z_b}$$

$$x_d = 0.442654$$

Індуктивний опір реакції якоря за поздовжньою віссю в Ом:

$$X_{ad} \equiv X_d - X_1$$

$$X_{ad} = 2.870000$$

у віднос. од.:

$$x_{ad} \equiv \frac{X_{ad}}{Z_b}$$

$$x_{ad} = 0.373652$$

Індуктивний опір обмотки збудження в Ом:

$$X_f \equiv \frac{X_{ad}^2}{X_d - X_d'}$$

$$X_f = 3.998495$$

у віднос. од.:

$$x_f \equiv \frac{X_f}{Z_b}$$

$$x_f = 0.520574$$

Перехідний індуктивний опір обмотки збудження в Ом:

$$X_f' \equiv X_f - \frac{X_{ad}^2}{X_d}$$

$$X_f' = 1.575877$$

у віднос. од.:

$$x_f' \equiv \frac{X_f'}{Z_b}$$

$$x_f' = 0.205167$$

Приведений активний опір обмотки збудження в Ом:

$$R_f \equiv \frac{X_f'}{\omega_b \cdot T_d'}$$

$$R_f = 0.005512$$

у віднос. од.:	$r_f \equiv \frac{R_f}{Z_b}$	$r_f = 0.000718$
Індуктивний опір розсіювання демпферної обмотки за поздовжньою віссю в Ом:	$X_{eds} \equiv X_{fs} \cdot X_{ad} \cdot \frac{(X_{d''} - X_s)}{(X_s - X_{d''}) \cdot (X_{fs} + X_{ad}) + X_{ad} \cdot X_{fs}}$	$X_{eds} = \blacksquare$
у віднос. од.:	$x_{eds} \equiv \frac{X_{eds}}{Z_b}$	$x_{eds} = 0.069115$
Індуктивний опір демпферної обмотки за поздовжньою віссю в Ом:	$X_{ed} \equiv X_{ad} + X_{eds}$	$X_{ed} = 3.400867$
у віднос. од.:	$x_{ed} \equiv \frac{X_{ed}}{Z_b}$	$x_{ed} = 0.442767$
Перехідний індуктивний опір демпферної обмотки за поздовжньою віссю в Ом:	$X_{ed'} \equiv X_{ed} - \frac{X_{ad}^2}{X_f}$	$X_{ed'} = 1.340867$
у віднос. од.:	$x_{ed'} \equiv \frac{X_{ed'}}{Z_b}$	$x_{ed'} = 0.174571$
Активний опір демпферної обмотки за поздовжньою віссю в Ом:	$R_{ed} \equiv \frac{X_{ed'}}{\omega_b \cdot T_{d0''}}$	$R_{ed} = 0.224637$
у віднос. од.:	$r_{ed} \equiv \frac{R_{ed}}{Z_b}$	$r_{ed} = 0.029246$
Активний опір демпферної обмотки за поперечною віссю в Ом:	$X_{aq} \equiv X_q - X_s$	$X_{eq} = 2.309774$
	$X_{eq} \equiv \frac{X_{aq}^2}{X_q - X_{q''}}$	
у віднос. од.:	$x_{eq} \equiv \frac{X_{eq}}{Z_b}$	$x_{eq} = 0.300715$
Надперехідний опір індуктивної демпферної обмотки за поперечною віссю в Ом:	$X_{eq''} \equiv X_{eq} - \frac{X_{aq}^2}{X_q}$	$X_{eq''} = 0.805121$
у віднос. од.:	$x_{eq''} \equiv \frac{X_{eq''}}{Z_b}$	$x_{eq''} = 0.104821$
Активний опір демпферної обмотки по поперечній осі в Ом:	$R_{eq} \equiv \frac{X_{eq''}}{\omega_b \cdot T_{q''}}$	$R_{eq} = 0.170852$

у віднос. од.:

$$r_{eq} \equiv \frac{R_{eq}}{Z_b}$$

$$r_{eq} = 0.022244$$

Інші параметри

$$D \equiv x_d \cdot x_f \cdot x_{ed} - x_{ad}^2 \cdot (x_d + x_f + x_{ed}) + 2 \cdot x_{ad}^3$$

$$D = 0.010065$$

$$x_d'' \equiv \frac{D}{x_f \cdot x_{ed} - x_{ad}^2}$$

$$x_d'' = 0.110753$$

$$x_f'' \equiv \frac{D}{x_d \cdot x_{ed} - x_{ad}^2}$$

$$x_f'' = 0.178530$$

$$x_{ed}'' \equiv \frac{D}{x_f \cdot x_d - x_{ad}^2}$$

$$x_{ed} = 0.442767$$

$$x_{ed}'' = 0.110825$$

$$x_{ded}'' \equiv \frac{D}{x_f \cdot x_{ad} - x_{ad}^2}$$

$$x_{ded}'' = 0.183340$$

$$x_{fed}'' \equiv \frac{D}{x_d \cdot x_{ad} - x_{ad}^2}$$

$$x_{fed}'' = 0.390375$$

$$x_{fd}'' \equiv \frac{D}{x_{ed} \cdot x_{ad} - x_{ad}^2}$$

$$x_{fd}'' = 0.389737$$

$$x_q \equiv \frac{X_q}{Z_b}$$

$$x_{aq} \equiv \frac{(X_q - X_s)}{Z_b}$$

$$x_q = 0.318972$$

$$x_{aq} = 0.249970$$

$$x_q'' \equiv \frac{x_q \cdot x_{eq} - x_{aq}^2}{x_{eq}}$$

$$x_q'' = 0.111184$$

$$x_{qeq}'' \equiv \frac{x_q \cdot x_{eq} - x_{aq}^2}{x_{aq}}$$

$$x_{qeq}'' = 0.133756$$

Неприведений опір обмотки збудження в Ом:

$$R_{f2} \equiv \frac{U_{vn}}{I_{vn}}$$

$$R_{f2} = 0.888889$$

Коефіцієнт приведення опору:

$$K_r \equiv \frac{R_f}{R_{f2}}$$

$$K_r = 0.006201$$

Коефіцієнт приведення струму:

$$K_i \equiv \sqrt{\frac{3 \cdot K_r}{2}}$$

$$K_i = 0.096447$$

Коефіцієнт приведення напруги:

$$K_u \equiv \frac{K_r}{K_i}$$

$$K_u = 0.064298$$

Напряга збудження приведена до статора:	$U_f \equiv U_{vn} \cdot K_u$	$U_f = 15.431476$
у віднос. од.:	$uf0 \equiv \frac{U_f}{U_b}$	$uf0 = 0.003150$
Максимальна напруга форсування, приведена	$ufm \equiv U_{vm} \cdot \frac{K_u}{U_b}$	$ufm = 0.004725$
Додатковий опір обмотки збудження:	$rfd \equiv R_{dob} \cdot \frac{K_r}{Z_b}$	$rfd = 0.001292$
Відносний активний опір статора:	$ra \equiv \frac{1.32 \cdot R_{15}}{Z_b}$	$ra = 0.009452$
Відносний номінальний момент навантаження:	$M_{cno} \equiv \frac{P_n}{\Omega_b M_b}$	$M_{cno} = 0.853437$

$$x_d = 0.442654 \quad x_q = 0.318972 \quad x_{ad} = 0.373652 \quad x_{aq} = 0.249970 \quad \text{в.о.}$$

$$x_{ed} = 0.442767 \quad x_{eq} = 0.300715 \quad x_f = 0.520574 \quad r_f = 0.000718$$

$$r_{ed} = 0.029246 \quad r_{eq} = 0.022244 \quad 0.85$$

Моделювання синхронного ЕП

$$u_o(x) \equiv 1 \quad M_{ж} \equiv 0.85 \quad mc(x) \equiv \begin{cases} 0 & \text{if } x_0 < 1500 \cdot \pi \\ M_{ж} & \text{if } x_0 \geq 1500 \cdot \pi \\ 0 & \text{if } x_0 \geq 1900 \cdot \pi \end{cases}$$

$$\begin{cases} 1 & \text{if } x_0 \leq 1800 \cdot \pi \\ 0.0005 & \text{otherwise} \\ 1 & \text{if } x_0 \geq 1950 \cdot \pi \end{cases} \quad \begin{aligned} ud(x) &\equiv u_o(x) \cdot \cos(x_8) \\ uq(x) &\equiv u_o(x) \cdot \sin(x_8) \end{aligned} \quad uf(x) \equiv \begin{cases} 0 & \text{if } x_6 < 0.9 \\ uf0 \cdot 0.65 & \text{if } x_6 \geq 0.9 \\ 0 \cdot 1.005 \cdot uf0 & \text{if } x_0 \geq 1300 \cdot \pi \\ uf0 \cdot 0.65 & \text{if } x_0 \geq 1800 \cdot \pi \end{cases}$$

$$id(x) \equiv \frac{x_1}{x_d''} - \frac{x_3}{x_{fd}''} - \frac{x_4}{x_{ded}''} \quad iq(x) \equiv \frac{x_2}{x_q''} - \frac{x_5}{x_{qeq}''}$$

$$iff(x) \equiv \frac{x_3}{x_f''} - \frac{x_1}{x_{fd}''} - \frac{x_4}{x_{fed}''} \quad ieq(x) \equiv \frac{x_5}{x_{eq}''} - \frac{x_2}{x_{qeq}''} \quad ied(x) \equiv \frac{x_4}{x_{ed}''} - \frac{x_1}{x_{ded}''} - \frac{x_3}{x_{fed}''}$$

$$\text{mu}(x) \equiv \frac{\text{Co} \cdot (x_7 - x_{10})}{p} \quad m(x) \equiv x_1 \cdot \text{iq}(x) - x_2 \cdot \text{id}(x)$$

$$\text{un} \equiv \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad F(t, x) \equiv \begin{bmatrix} 1 \\ \text{ud}(x) - \text{ra} \cdot \text{id}(x) + x_2 \cdot x_6 \\ \text{uq}(x) - \text{ra} \cdot \text{iq}(x) - x_1 \cdot x_6 \\ \text{uf}(x) - \text{rf} \cdot \text{iff}(x) \\ -\text{red} \cdot \text{ied}(x) \\ -\text{req} \cdot \text{ieq}(x) \\ \frac{m(x) - \beta \cdot (x_6 - x_9) - \text{Co} \cdot \frac{(x_7 - x_{10})}{p}}{\text{Tdvo}} \\ x_6 \\ 1 - x_6 \\ \frac{\text{Co} \cdot \frac{(x_7 - x_{10})}{p} + \beta \cdot (x_6 - x_9) - \text{mc}(x)}{\text{Tmo}} \\ x_9 \end{bmatrix}$$

$$Z := \text{Rkadapt}(\text{un}, 0, \pi \cdot 2500, 7000, F)$$

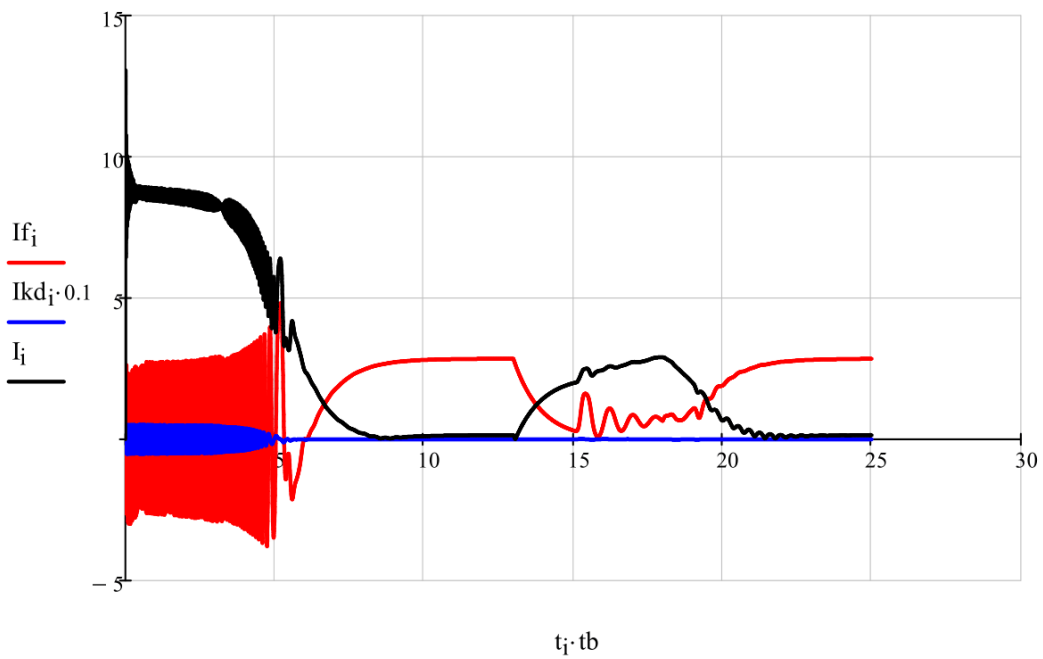
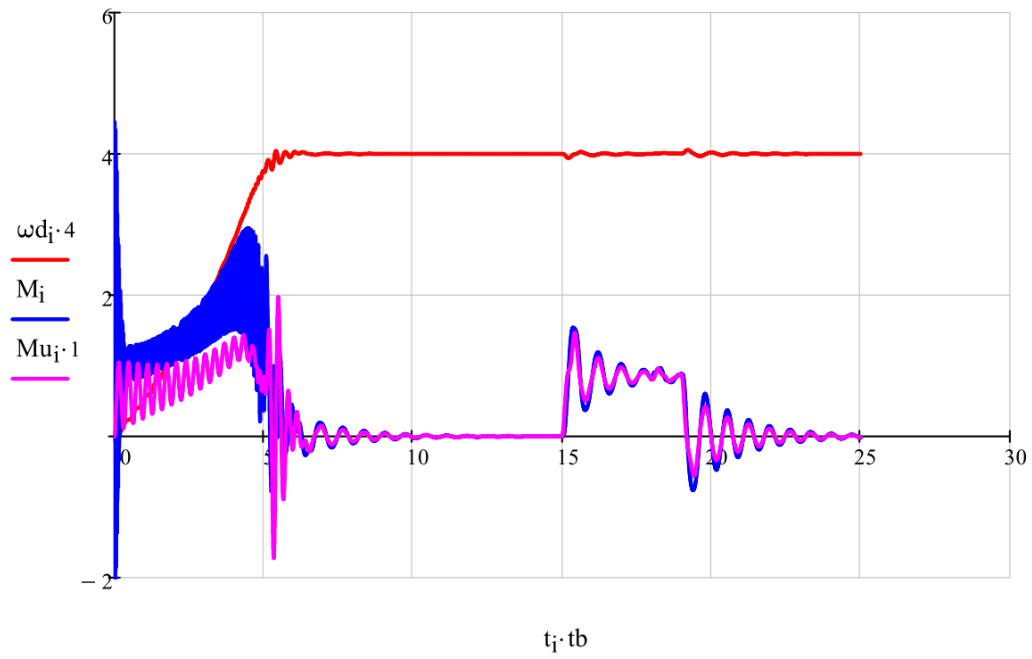
$$\Psi_d := Z^{\langle 2 \rangle} \quad \Psi_q := Z^{\langle 3 \rangle} \quad \Psi_f := Z^{\langle 4 \rangle} \quad \Psi_{kd} := Z^{\langle 5 \rangle} \quad \Psi_{kq} := Z^{\langle 6 \rangle}$$

$$\omega_d := Z^{\langle 7 \rangle} \quad \Theta := Z^{\langle 8 \rangle} \quad \Theta_m := Z^{\langle 11 \rangle} \quad \omega_m := Z^{\langle 10 \rangle} \quad t := Z^{\langle 0 \rangle} \quad i \equiv 0..7000$$

$$\text{Id}_i := \left(\frac{\Psi_{d_i}}{x_d''} - \frac{\Psi_{f_i}}{x_{fd}''} - \frac{\Psi_{kd_i}}{x_{ded}''} \right) \quad \text{Iq}_i := \left(\frac{\Psi_{q_i}}{x_q''} - \frac{\Psi_{kq_i}}{x_{qeq}''} \right) \quad \text{M}_i := (\Psi_{d_i} \cdot \text{Iq}_i - \Psi_{q_i} \cdot \text{Id}_i)$$

$$\text{Mu}_i := \frac{\text{Co} \cdot (\Theta_i - \Theta_{m_i})}{p} \quad \text{If}_i := \left(\frac{\Psi_{f_i}}{x_f''} - \frac{\Psi_{d_i}}{x_{fd}''} - \frac{\Psi_{kd_i}}{x_{fed}''} \right) \quad \text{Ikq}_i := \left(\frac{\Psi_{kd_i}}{x_{eq}''} - \frac{\Psi_{q_i}}{x_{qeq}''} \right)$$

$$I_{kd_i} := \left(\frac{\Psi_{kd_i}}{x_{ed}''} - \frac{\Psi_{d_i}}{x_{ded}''} - \frac{\Psi_{f_i}}{x_{fed}''} \right) \quad I_i := \sqrt{(I_{d_i})^2 + (I_{q_i})^2}$$



ДОДАТОК Г

ТЕХНІЧНІ ДАННІ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

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
P_n , кВт	Активна потужність	1600	2000	2500	3150	4000
S_n , кВА	Повна потужність	1930	2340	2930	3670	4700
U_n , В	Номінальна напруга живлення статора	6000	6000	6000	6000	6000
I_n , А	Номінальний струм статора	185	223	281	353	451
n_n , об/хв	Номінальні оберти	100	150	150	150	75
f_n , Гц	Номінальна частота мережі	50	50	50	50	50
$\cos \varphi_n$	Ном. коеф. потужності	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
<i>Опори</i>						
X_s , Ом	Розсіювання обмотки статора	2,06	1,73956	1,42168	1,05	0,53
X_d , Ом	Реакції статора по поздовжній осі	11,74	12,72882	10,69238	8,26	3,4
X_q , Ом	Реакції статора поперечної осі	8,12	8,13812	6,82025	5,18	2,45
X_{fs} , Ом	Розсіювання обмотки збудження	2,36	2,43140	2,04683	1,52	1,12
X_d' , Ом	Перехідний опір по поздовжній осі	4,13	3,73047	3,09833	2,31	1,34
X_q'' , Ом	Перехідний опір по поперечній осі	2,81	2,46409	2,02116	1,53	0,854
X_d'' , Ом	Надперехідний опір по поздовжній осі	2,8	2,44368	2,00696	1,52	0,85
R_{15} , Ом	Опір статора фази при 15 °С	0,261	0,172864	0,126615	0,109	0,055
<i>Постійні часу</i>						
T_d' , с	Обмотки збудження при замкненій обм. статора та розімкн. демпферній обмотці	0,443	0,4843	0,5051	0,525	0,91

Tq'' , с	Демпферної обмотки при замкнутій статорі	0,011	0,0113	0,0111	0,00953	0,015
Tdo'' , с	Демпферної обмотки при замкнутому збудженні та розімкнутій статорі	0,012	0,0124	0,0122	0,0105	0,019
<i>Момент інерції</i>						
GD^2 , кг·м ²	Маховий момент	9300	51000	60000	77300	250000
<i>Обмотка збудження</i>						
I_{fn} , А	Номінальний струм збудження	300	230	225	285	270
U_{fn} , В	Номінальна напруга збудження	140	145	162	150	240
U_{fm} , В	Максимальна напруга збудження	245	253	283	262	420
R_d , Ом	Розрядний опір	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6

ДОДАТОК Д
АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ В
ПРОЄКТНУ ПРАКТИКУ КОМПАНІЇ
«НВП ТОВ СИЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА»

Україна
 ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
 «НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО
 «СИЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА»
 49000, Дніпропетровська обл., м. Дніпро,
 вул. Калинова, 49, кв. 73
 Тел. +38 050 614 12 00
 Код ЄДРПОУ 44940075
 e-mail: sylovaelektronika@gmail.com



Ukraine
 RESEARCH AND PRODUCTION ENTERPRISE
 «POWER ELECTRONICS» LTD
 49000, Dnipropetrovsk oblast, Dnipro,
 49 Kalinova st, Apartment 73
 Phone +38 050 614 12 00
 EDRPOU code 44940075
 e-mail: sylovaelektronika@gmail.com

ЗАТВЕРДЖУЮ:



Директор
 ТОВ «НВП «СИЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА»

(Signature)

Каложний М.О.

(підпис)

21 липня 2025 р.

Довідка

Про використання результатів дисертаційної роботи Боровика Р.О.
«СИСТЕМА КОМПЕНСАЦІЇ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ СИНХРОННИХ
ДВИГУНІВ ПРИВОДА МЕТАЛУРГІЙНИХ МАШИН»

ТОВ «НВП «СИЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА» (м. Дніпро) підтверджує, актуальність і перспективність запропонованого комбінованого способу керування обмоткою збудження синхронного двигуна та готовий використовувати на практиці матеріали дисертаційної роботи Боровика Р.О. для впровадження і реалізації законів керування синхронних приводів з ударним навантаженням.

Слід зауважити, що в дисертаційній роботі Боровика Р.О. запропонований комбінований спосіб демпфування наслідків ударного прикладання навантаження, який складається з двох етапів керування: зменшення перепаду струму якоря, для зниження максимальних електродинамічних навантажень в обмотці і демпфування залишкових коливань, шляхом впливу на обмотку збудження. Запропоновані способи вибору часу завчасного форсування і метод розрахунку коефіцієнтів регулятора дають змогу реалізувати запропонований алгоритм.

ДОДАТОК Ж
АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ В
ПРОЄКТНУ ПРАКТИКУ КОМПАНІЇ
ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ»



ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор

ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ»

В.М. Чернов

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Цей акт складений про те, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи Боровика Романа Олексійовича на тему «**СИСТЕМА КОМПЕНСАЦІЇ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИВОДА МЕТАЛУРГІЙНИХ МАШИН**» представляють суттєвий інтерес для ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ».

Даним актом ми підтверджуємо, що питання підвищення терміну безаварійної роботи синхронного двигуна з ударним характером навантаження за рахунок системи керування є вкрай актуальним, зокрема для електроприводів прокатного устаткування.

Результати вирішення задач щодо встановлення закономірностей впливу рівня форсування і параметрів регулятора системи збудження на величину електромагнітних зусиль в обмотках синхронного двигуна протягом термінів прикладання ударного навантаження та усталеного режиму, що підвищує його надійність та економічність у складі приводу металургійних машин, будуть враховані нашим підприємством при формулюванні технічного завдання на формування законів керування АРЗ для постачальників тиристорних збудників.

Відзначаємо адекватність даних, використаних для виконання дисертаційної роботи, що свідчить про обґрунтованість її результатів для застосування в реальних умовах.

Директор з ремонтів
та енергозабезпечення

Головний енергетик

С.М. Нікулін

Ю.А. Рожко

ДОДАТОК К
РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗА ВПРОВАДЖЕННЯ
НОВОЇ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ В УМОВАХ ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО
ТЬЮБ»

Розрахунок очікуваного економічного ефекту від використання комбінованого способу керування збудження при ударному навантаженні синхронного двигуна

Розрахунок виконаний на прикладі двигунів МС-324-10/12 (основний) та МС-324-8/12 (резервний), що по чергово використовують як головний привод прокатної кліти автомат-стана ТПА-350. Переважну більшість часу використовується основний двигун (2880 кВт), а резервний (2300 кВт) встановлюється, коли основний перебуває в ремонті. Застосування запропонованого комбінованого способу керування збудження при ударному навантаженні синхронного двигуна дозволить уникнути незапланованих капітальних ремонтів двигуна, отже можливим стає використання тільки основного двигуна (новий варіант) замість по чергового основний/резервний (базовий варіант).

Таблиця 1 – Вартість основних компонентів комплексу

№ з/п	Обладнання	Маса, т	Вартість, грн/т	Разом, грн
<i>Основне</i>				
1	Двигун МС-324-10/12	28,2	616043,9	17 372 438
2	Двигун МС-324-8/12	22	616043,9	13 552 966
<i>Додаткове</i>				
3	ПЛК ТМ241С24R			16 624
4	SD Карта пам'яті ТМАСD1			1 502
5	Цифрова ліцензія, EcoStructure Machine Expert ESEEXPCZZSPAZZ			19 560
6	Датчик гарячого метала OSH AF86A5-43P-LZ			13 545

При визначенні капітальних витрат враховано витрати на транспортування та монтаж обладнання в розмірі 30 % його кошторисної вартості.

Річні експлуатаційні витрати визначені за зміною відповідних статей. Амортизаційні витрати визначено із розрахунку 15 % від капітальних витрат (субрахунок 1014 «Машини та обладнання» підгрупа 2). Витрати на поточний ремонт становлять 50 % від суми амортизаційних. Інші та не враховані витрати прийняті у розмірі 10 % від суми амортизаційних та поточних витрат (підгрупа 1).

Кошторис витрат за порівнюваними варіантами наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Кошторис витрат за порівнюваними варіантами

№ з/п	Витрати	Базовий варіант	Новий варіант
1	2	3	4
1	Капітальні витрати, грн $(17\,372\,438 + 13\,552\,966) \cdot 1,3$ $(17\,372\,438 + 16\,624 + 1\,502 + 19\,560 + 13\,545) \cdot 1,3$	40 203 025	22 650 769
2	Річні експлуатаційні витрати, грн		
2.1	Амортизаційні відрахування (15 % від п. 1) $40\,203\,025 \cdot 0,15$ $22\,650\,769 \cdot 0,15$	6 030 454	3 397 615
2.2	Поточний ремонт (50 % від п. 2.1) $6\,030\,454 \cdot 0,5$ $3\,397\,615 \cdot 0,5$	3 015 227	1 698 808
2.3	Інші та невраховані (10 % від пп. 2.1...2.2) $(6\,030\,454 + 3\,015\,227) \cdot 0,1$ $(3\,397\,615 + 1\,698\,808) \cdot 0,1$	904 568	509 642
	Загалом експлуатаційні витрати	9 950 249	5 606 065

Річний економічний ефект, грн

$$PEE = (E_B - E_H) + (K_B - K_H) \cdot 0,15 = (9\,950\,249 - 5\,606\,065) + (40\,203\,025 - 22\,650\,769) \cdot 0,15 = 6\,977\,022 \text{ грн}$$

Тут $(E_B - E_H)$ – різниця в річних експлуатаційних витратах базового та нового обладнання (за статтями, що змінюються);
 $(K_B - K_H)$ – різниця у капітальних витратах діючого/наявного та нового обладнання.

Строк окупності нового варіанту

$$T_{ок} = 22\,650\,769 / 6\,977\,022 \cdot 12 = 39 \text{ міс.}$$

ДОДАТОК Л

**ПРОЄКТ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ НА МОДЕРНІЗАЦІЮ ЗБУДНИКА СЕРІЇ
ВТЕ(П)-400/75**

Проєкт створено на основі «Збудники синхронних двигунів. Тиристорні збудники серії ВТЕ/ВТП»¹.

1. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

Прийняті скорочення:

АРЗ – автоматичний регулятор збудження;

АРМ – автоматизоване робоче місце (чоловік-машинний інтерфейс);

БЩУ/ГЩУ – блочний/головний щит управління блока/станції;

ВАФ – вольтамперфазометр;

ВВ – високовольтний вимикач;

в.о. – відносні одиниці;

КВП – контрольно-вимірювальні прилади;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПЧ – перетворювач частоти;

СЗ – система збудження;

СД – синхронний двигун;

СК – система керування;

Т-р – трансформатор;

ТП – тиристорний перетворювач;

ТН – вимірювальний трансформатор напруги;

ТС – вимірювальний трансформатор струму;

ШПР – шафа перемикачів резерву;

ШТП – шафа тиристорного перетворювача.

¹ <https://pcomplex.ua/wp-content/uploads/BTE.doc>

1.1 Загальна характеристика двигунів та збудника серії ВТЕ(П) привода автомат-стана ТПА-350 компанії ТОВ «ІНТЕРПАЙП Ніко Тьюб».

Таблиця 1 – Параметри двигунів

Параметр	Значення	
	МС-324-10/12	МС-324-8/12
Тип двигуна	МС-324-10/12	МС-324-8/12
Номинальна напруга, В	6000	6000
Номинальний струм статора, А	385	290
Номинальна активна потужність, кВт	2880	2300
Номинальна швидкість, об/хв	500	500
Число пар полюсів	6	6
ККД, %	92	95,3
cos φ	0,75	0,8
Кратність Мпуск/Мном	1,2	0,7
Кратність Ммакс/Мном	2,5	2,4
Кратність Іпуск/Іном	3,5	3,7
Номинальна напруга збудження, В	68	75
Максимальна напруга збудження, В	90	90
Номинальний струм збудження, А	310	340
Момент інерції двигуна, кг·м ²	1300	1030

Таблиця 2 – Вхідні параметри статичного збудника ВТЕ-400/75

Позначення	Коментар
1	2
Потужність перетворювача, кВт	100
Тип збудження	щіткове
Номинальний струм збудження, А	400
Номинальна напруга збудження, В	75
Тип пуску	прямий
Схема випрямлення	Трифазна мостова (міст Ларіонова)
Наявність трансформатора	З трансформатором

Позначення	Коментар
1	2
Наявність і схема резервування	Холодне резервування з шафою перемикачів – Один СЗ для двох двигунів
Охолодження силового перетворювача	Природне повітряне – ВТЕ до 400 А
Регулятори збудження	Автоматичне, ручне
Мережні інтерфейси	Profibus DP; Modbus RTU; Ethernet; CAN та ін.
Час введення в експлуатацію, год	4

1.2 Проектування, матеріали, виробництво і дослідження СЗ повинні відповідати вимогам таких нормативних документів в останній редакції:

- ГОСТ 24688-81 «Збудники статичні напівпровідникові для трифазних синхронних двигунів».
- ТУ У 31.1-13626132-002:2009 «Збудники синхронних двигунів ВТЕ, ВТП».

1.3 Основні параметри і розміри

1.3.1 Технічні умови експлуатації подано в таблиці 3

Таблиця 3 – Вимоги до умов технічної експлуатації збудника ВТЕ (П)

Позначення	Коментар
1	2
Висота над рівнем моря, м	До 1000
Припустима температура навколишнього середовища: експлуатації, °С; зберігання, °С;	-10°...+45° -25°...+60°
Припустима вологість повітря: 25 °С, % не більше 35 °С, % не більше	80 90
Навколишнє середовище	невибухонебезпечне,

Позначення	Коментар
1	2
	не містить шкідливих домішок та струмопровідного пилу, що знижує рівень ізоляції в неприпустимих межах
Група умов експлуатації	М2 за ГОСТ 17516-72 при цьому рівень вібрації підлоги, де встановлено СЗ, у діапазоні частот 10-50 Гц повинен відбуватися з прискоренням не більше 4.9 м/с ²
Сейсмічність Припустиме відхилення установки шафи від вертикалі	9 (дев'ять) балів за MSK-64 (горизонтальне прискорення – 0,3g) Не більше 5 градусів
Кліматичне виконання	УХЛ (помірний клімат)
Категорія розміщення	4

1.3.2 Параметри обладнання

Таблиця 4 – Силовий перетворювач ВПТ-400/75

Позначення	Коментар
Номінальний струм, А	400
Номінальна напруга, В	75
Кратність форсування, в.о.	2,0
Тривалість форсування, Іном/с,	2,0/10 1,75/60
Швидкодія, с, не більше	0,06
Напруга власних потреб, В	380
Частота напруги, Гц	50
Припустиме відхилення напруги від номінального, %	+10...-15
Резервне живлення постійного струму, В	220

Таблиця 5 – Силовий трансформатор

Позначення	Коментар
1	2
Тип перетворювача	ВТП-400/75
Потужність трансформатора, кВА	100
Напруга первинної обмотки, кВ	0,4
Напруга вторинної обмотки, В	92
Частота напруги, Гц	50
Схема та група з'єднання	Y/Δ-11
Тип	Сухий
Розміщення	У приміщенні
Ступінь захисту	IP21
Ізоляція обмоток: Клас/максимальна температура, °С	«F»/120

1.3.3 Структурна схема перетворювача ВТП-400/75 з холодним резервуванням (див.рисунок 1).

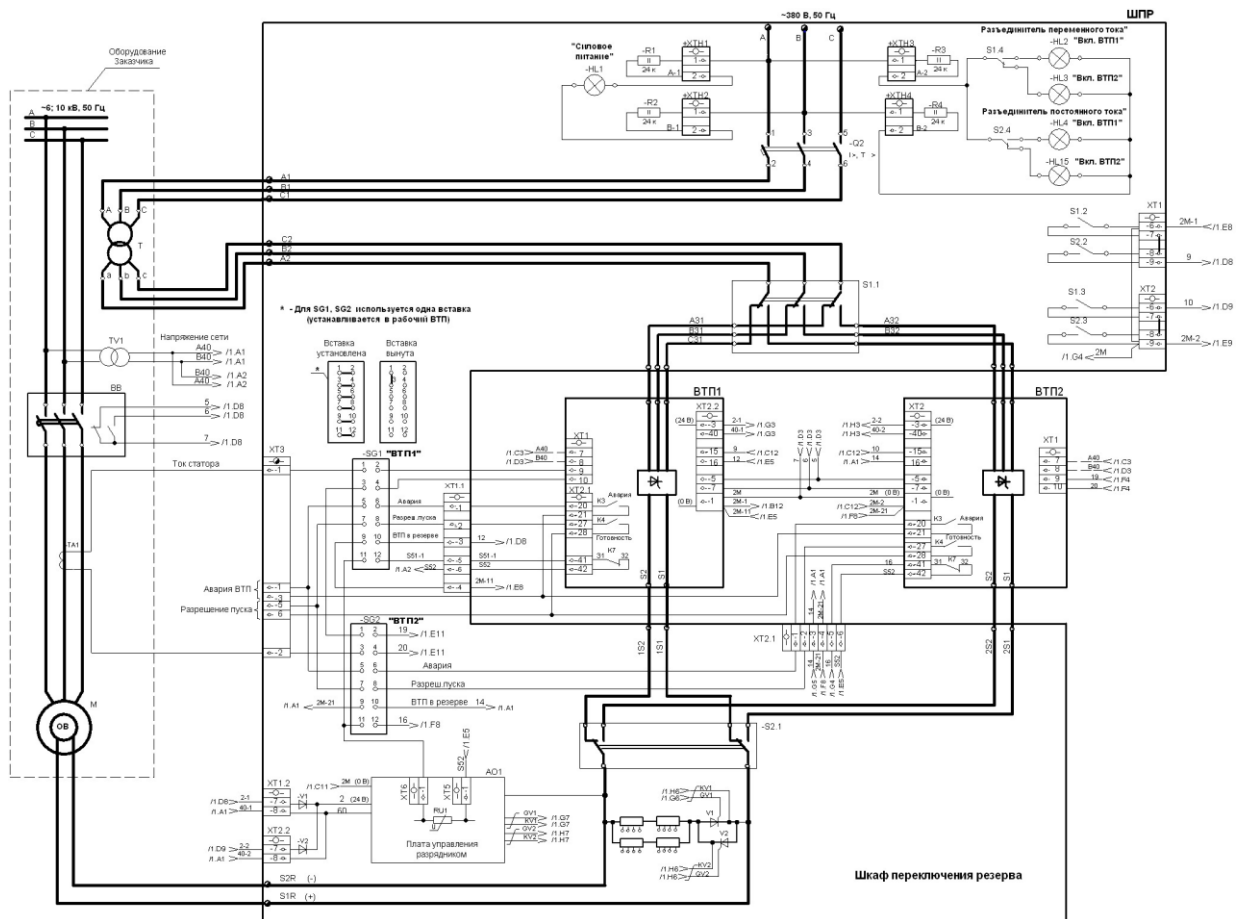


Рисунок 1 – Структурна схема СЗ с холодним резервуванням «1+1»

1.3.4 Конструктивний склад СЗВ таблиці 6. Усі елементи СЗ, за винятком АРМ настільного виконання, встановлюються у шафу. Трансформатор оснащений захисним кожухом.

Таблиця 6 – Типовий склад шафи СЗ з холодним резервуванням «1+1»

Позначення	Коментар
ШТП1, ШТП2	Шафи перетворювача і АРЗ каналів №1 та №2;
Т (Т, Т2)	Силовий трансформатор: загальний або індивідуальний для ШТП 1,2;
ШПР	Шафа перемикання резерву
Загальна складова для усіх видів СЗ є АРМ, яка встановлюється один на групу СЗ	

1.3.5 Характеристика конструкції СЗ:

- Виконання СЗ дозволяє розташовувати шафи в один ряд або окремо одна від одної.

- Шафи двобічного обслуговування із ступенем захисту IP21/IP54.
- Двері шаф оснащені внутрішніми замками, що відмикаються ключем.
- Внутрішня ошиновка шаф виконується алюмінієвими шинами.
- Введення кабелів (силових та контрольних) здійснюється через отвори у днищі шафи з ущільненням у вигляді гумових прокладок.
- Конструктивне виконання АРМ:
 - Мінішафне, для розміщення у приміщенні СЗ, ступінь захисту IP54;
 - Настільне, офісного виконання, для розміщення ГЩУ.

Габаритне креслення СЗ наведено на рисунках 2 та 3.

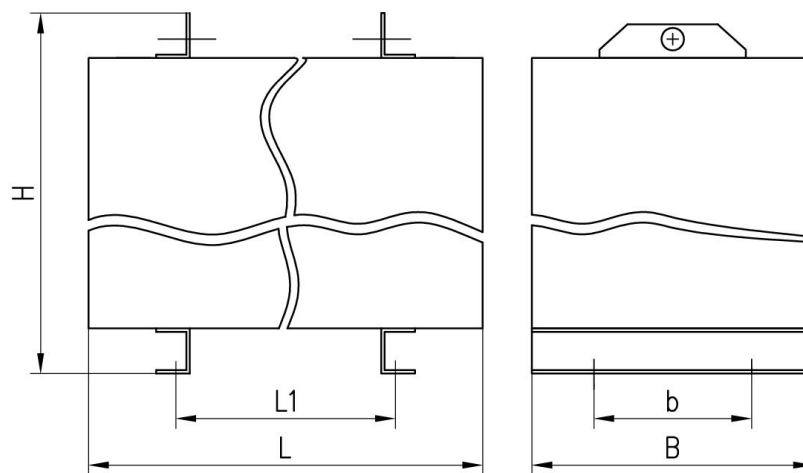


Рисунок 2 – Габаритне креслення трансформатора (дивись таблицю 7)

Таблиця 7 – Габаритні розміри трансформатора

Типова потужність т-ра, кВА	L, мм	L1, мм	B, мм	B1, мм	H, мм	Маса, кг
100	1080	610	590	530	1120	615

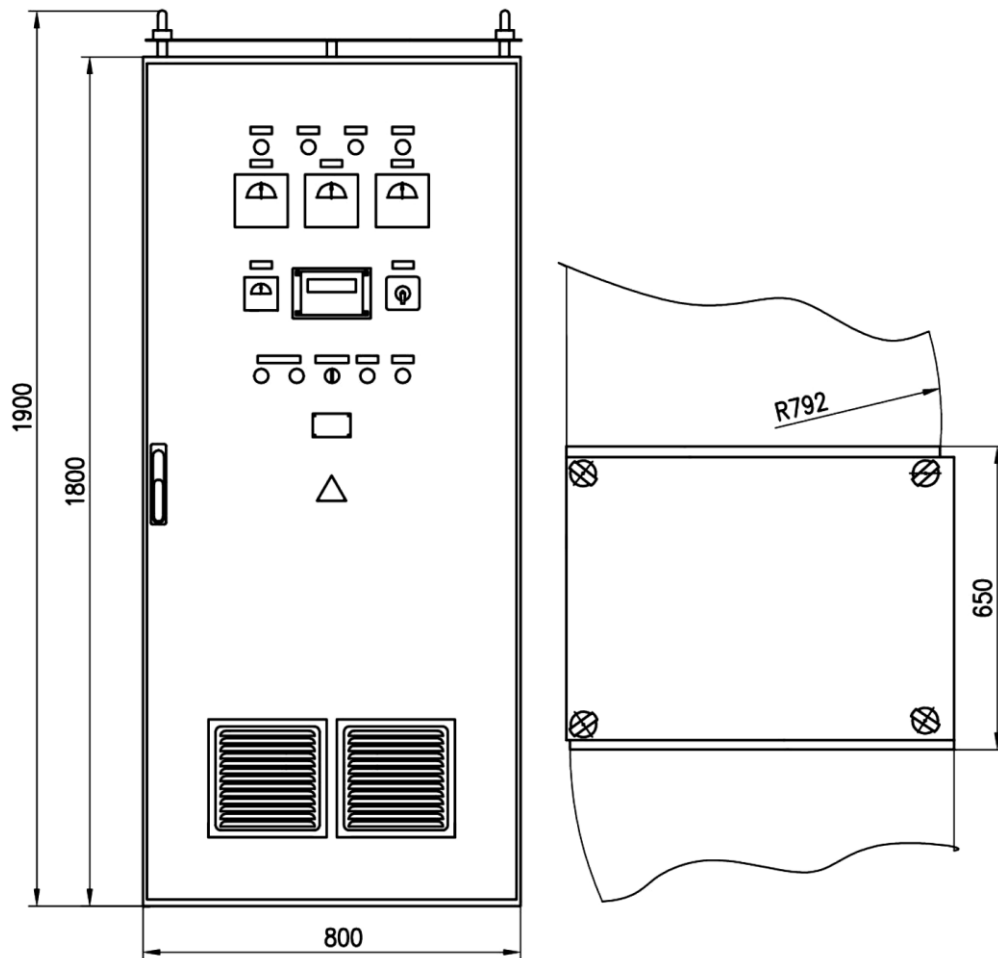


Рисунок 3 – Габаритний кресленик СЗ

1.4 Функціональна характеристика силової схеми:

- Загальний для двох каналів силовий трансформатор;
- Нереверсивний трифазний тиристорний перетворювач (забезпечує простоту конструкції, підвищену надійність та зниження вартості обладнання);
- Автоматичний вимикач захисту від КЗ аварій;
- РС – схема захисту перетворювача від перенапруги.
- Роз'єднувачі на стороні змінного та постійного струму на випадок ремонту та резервування.
- Захисний розрядник та пуско-розрядний резистор.
- Живлення силового трансформатора за схемою незалежного збудження від напруги власних потреб цеха.

1.4.1. Холодне резервування:

- Схема резервування «1+1» – для двох СД: одна робоча СЗ плюс одна резервна;
- Ввід резервного каналу здійснюють вручну комутацією апарату ШПР;
- Перемикання силових ланцюгів живлення СЗ та кіл збудження;
- Перемикання контрольних кіл СЗ: вимірювальних кіл ТН, ТС двигуна, вторинних кіл зовнішніх схем, реле готовності збудників, реле Аварійного від'єднання основного та резервного збудника, кіл вмикання / вимикання вимикача двигуна, кіл керування тиристорним ключем;
- Розрядник і пусковий резистор перенести із ШТП в ШПР поза ланки перемикання ланцюга збудження з метою виключення можливості помилкового пуску двигуна за відключеного розрядника.

1.4.2 Охолодження силового перетворювача:

- Повітряне природне охолодження ВТЕ: повинен містити масивні радіатори з великою площею тепловіддачі;
- Ступінь захисту перетворювача IP21.

1.4.3 Гасіння поля збудження:

- Основний засіб – інвертування струму збудження в живильну мережу;
- Допоміжний засіб – вимкнення на ввіді змінного струму перетворювача.

1.4.4 Захист обмотки збудження від перенапруг:

- Захист при асинхронному пуску, асинхронному ході;
- Склад схеми захисту: розрядник, розрядний опір, блок електронного керування розрядним резистором, реле увімкнення розрядника при пуску двигуна.
- Тип розряднику – тиристорний;
- Розрядний опір – лінійна характеристика, конструкція у вигляді ящиків, потужність повинна забезпечувати тривалість пуску до 2-х хвилин та необмежену тривалість асинхронних режимів.

1.4.5 Живлення власних потреб:

- Здійснюється від двох ввідів напруги;

- Освітлення від джерела власних потреб замовника «220 В»;
- Підігрів системи АРЗ і живлення АРМ здійснюється від джерела власних потреб Замовника «220 В».

1.4.6 Автоматичний регулятор збудження:

- Тип: цифровий;
- Найменування АРЗ – СДПК;
- Принцип регулювання: ПІД + стабілізатор сильної дії.
- Спосіб пуску – прямий;
- Регулювання в автоматичному та ручному режимі:
 - Компенсація реактивної потужності суміжного обладнання;
 - Стабілізація напруги мережі живлення;
 - Регулювання $\cos \varphi$ для стабілізації стійкості двигуна до змінного навантаження;
 - Регулювання реактивної потужності у вузлі навантаження на ввіді ділянки, цеху, підстанції;
- Спосіб переходу при зміні режиму регулювання – безударний, на задану уставку:
 - у паузах між навантаженням – головного параметру обраного автоматичного режиму;
 - у момент появи навантаження – форсування збудження із заданим рівнем для підвищення стійкості двигуна з різко-змінним навантаженням;
 - зниження динамічних зусиль в обмотках двигуна за різко-змінних навантажень схемне рішення та принцип роботи;

Функціональна схема системи завчасного форсування наведено на рисунку 4. Основою системи є інтелектуальний модуль – програмований логічний контролер (ПЛК), що коригує завдання струму збудження приводного двигуна. Вхідними сигналами ПЛК є сигнали від датчиків наявності металу ДГМ1 та ДГМ2. Використання двох зміщених у просторі датчиків підвищує надійність системи, дозволяє визначити напрямок і швидкість заготовки для

коректного розрахунку моменту подачі сигналу завчасного форсування. Програмний блок визначення напрямку (БВН) видає сигнал під час руху заготовки у напрямку до кліті з необхідною затримкою часу. Вихідний сигнал цього блоку активує тригер завдання та одночасно запускає програмний таймер. Таймер використовується для зняття зовнішнього сигналу форсування після закінчення уставки (до 15 с.) у тому випадку, якщо з будь-яких причин заготовка не потрапила в кліть і штатна система форсування не була активована.

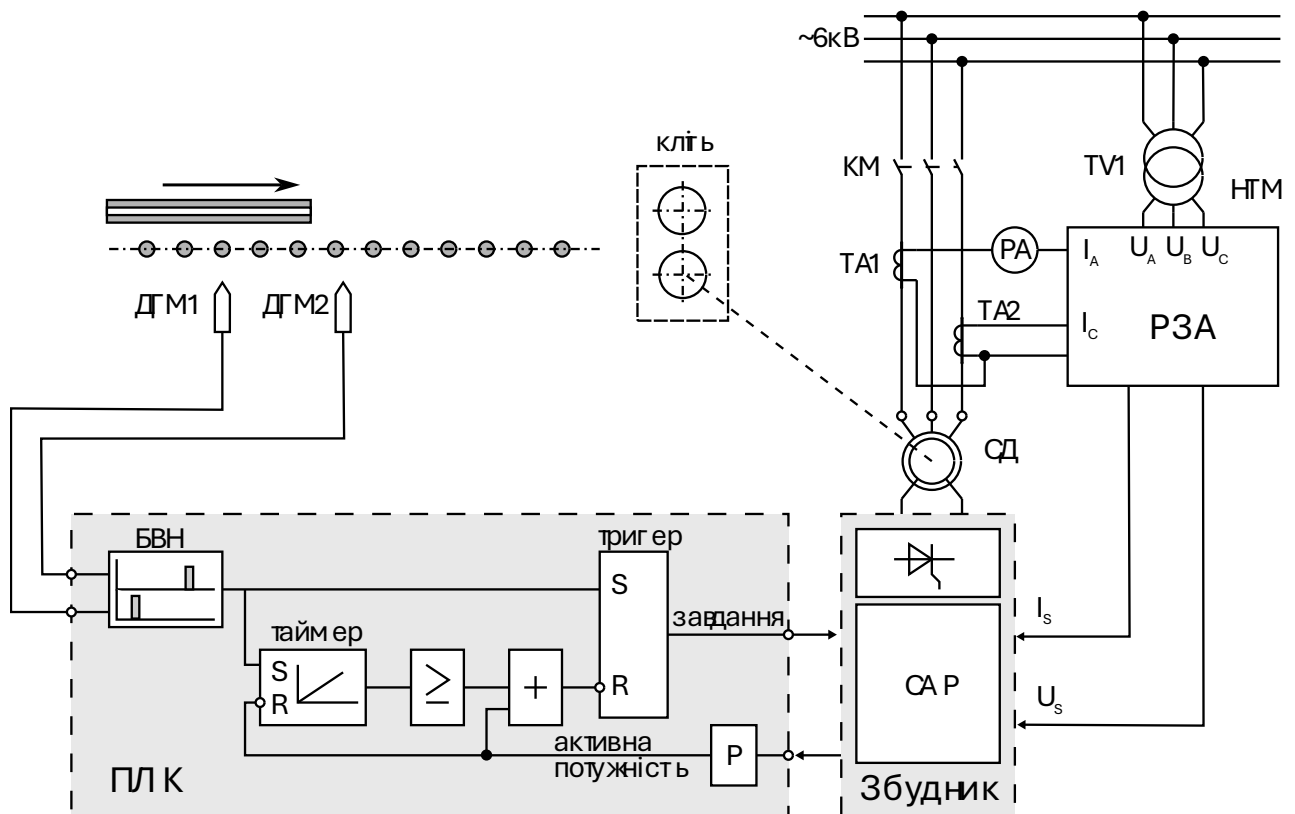


Рисунок 4 Функціональна схема системи завчасного форсування

У нормальному режимі роботи для скидання тригера завдання (і таймера) використовується сигнал активної потужності, що споживається приводним двигуном. Наявність цього сигналу свідчить про початок проходження заготовки, в ході якого активується штатна система форсування в збуднику. Сигнал активної потужності може бути отриманий або зі збудника, або розрахований за сигналами струму і напруги статора, що надходять з трансформатора НТМІ.

Як датчики металу можуть бути використані, наприклад, оптичні безконтактні вимикачі OSH AF47A5-43P-LZ. Датчики мають ступінь захисту IP65, призначені для застосування в ливарному та прокатному виробництві. Принцип дії датчика заснований на реєстрації інфрачервоного випромінювання від детектованого об'єкта. Інфрачервоне випромінювання від гарячого об'єкта перетворюється датчиком на напругу (U_t), рівень якого пропорційний температурі об'єкта. Ця напруга (U_t) порівнюється всередині датчика з регульованою напругою (U_k), яка еквівалентна встановленому температурному порогу. Коли температура об'єкта перевищує температурний поріг, напруга (U_t) стає вищою (U_k). Це призводить до зміни стану ключів на виході датчика.

Таблиця 8 – Перелік обладнання системи завчасного форсування

№ з/п	Обладнання	Кількість
1	ПЛК TM241C24R	1
2	SD Карта пам'яті TMASD1	1
3	Цифрова ліцензія, EcoStructure Machine Expert ESEEXPCZZSPAZZ	1
4	Датчик гарячого металу OSH AF86A5-43P-LZ	2

- Випробування збудника перед запуском: перевірка чергування фаз силової напруги, цілісності пускового опору; струмова перевірка збудника і кола збудження, вимірювання опору ізоляції;
- Точності регулювання: напруги двигуна 0,2 %, реактивної потужності, $\cos(\varphi)$, струму збудження – 0,5 %;
- Структура регулювання АРЗ:

ПІ(Д) регулятор: за відхиленням регульованого параметру – ПІ-ланка; за похідною напруги двигуна – Д-ланка, за стабілізацією сильної дії (PPS, напруги двигуна): за похідною струму збудження, за похідною частоти двигуна, за відхиленням частоти двигуна.

- Статизм (компаундування) регулювання за повним і реактивним струмом;
- Форсування збудження;

- Режим динамічного гальмування;
- Режим ресинхронізації за режимів АРЗ, АПВ за живленням двигуна;
- Облік споживаної активної, індуктивної та ємнісної енергії від моменту пуску до моменту зупинки і за весь період експлуатації СЗ.

1.4.7 Система обмеження АРЗ:

- мінімальної та максимальної напруги двигуна;
- мінімального та максимального струму збудження;
- мінімального та максимального струму збудження за відсутності провідності будь-якого плеча перетворювача;
- «P/Q» обмеження реактивної потужності залежно від активної;
- перевантаження за струмом статора протягом час-залежної характеристики;
- перевантаження за струмом ротора протягом час-залежної характеристики;
- тривалість форсування протягом час-залежної перевантажувальної характеристики ротора.

1.4.8 Система захисту:

- від внутрішнього КЗ;
- від зовнішніх КЗ (на боці постійного струму);
- від втрати збудження;
- від тривалого запуску;
- від асинхронного ходу;
- від перенапруги в роторі;
- від несправності блок-контактів статорного вимикача з дублюванням їх контролю за струмом статора;
- від наявності збудження при зупиненому двигуні;
- від обриву кола зворотного зв'язку ТН статора;
- від обриву кола зворотного зв'язку ТС статора (заборона старту машини за відсутності зворотного зв'язку);
- від відмови обмежувача перевищення тривалості форсування і перевантаження за струмом збудження;

- від відмови обмежувача мінімального збудження «P/Q» з переходом на ручне керування й уставкою в перезбуджений режим;
- від втрати провідності плеча перетворювача – продовження роботи СЗ з обмеженим струмом;
- від відмови щіткового апарату і кола збудження – контроль опору кола збудження;
- захист за розрахунковою температурою обмотки збудження;
- контроль опору ізоляції силового кола;
- зовнішні захисти: прийом сигналів типу «сухий контакт» КВП Замовника з можливістю формування, як попереджувального сигналу, так і аварійного відключення.

1.4.9 Контроль вхідних вимірювальних кіл та вхідних сигналів (типу «сухий контакт»).

1.4.10 Формування вихідних керівних сигналів (типу «сухий контакт»).

1.4.11 Формування вхід/вихід аналогових сигналів «4-20 мА».

1.4.12 Забезпечення органів локального керування і сигналізації.

1.4.13 Забезпечення засобів реєстрації і діагностики.

1.4.14 Забезпечення АРМ (людино-машинний інтерфейс).

1.4.15 Забезпечення Інтернет доступу для можливості дистанційного обслуговування обладнання.

1.4.16 Забезпечення «Налагоджувально-діагностичним» комплексом.

1.5 Комплектність постачання

1.5.1 Система збудження у складі:

- Силовий перетворювальний трансформатор 1 шт.;
- комплект шаф холодного резервування: ШТП – 2 шт., ШПР – 1 шт.;
- Комплект ЗПП – 1 шт.

1.5.2 Додаткове та допоміжне устаткування:

- Комплект резервних плат СК і АРЗ одного каналу;
- Налагоджувально-діагностичний комплекс;

- Вимірювально-контрольні прилади.

1.6 Вимоги до безпеки

- Конструкція і електричні схеми системи збудження виконуються відповідно до вимог «Правил улаштування електроустановок» (ПУЕ);
- Система збудження відповідає вимогам безпеки за ГОСТ 12.2.007.0 та ГОСТ 12.2.007.1, а також вимогам «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів»;
- Двері шаф систем збудження, які надають доступ до струмоведучих частин повинні мати замки й відмикатися спеціальним ключем;
- Шафи системи мають заземлювальні затискачі;
- Температура нагріву зовнішньої оболонки шаф у найбільш нагрітій важкодоступній точці (крім силового перетворювального трансформатора) не перевищує 70 °С за нормальних умов роботи.
- Конструкція системи забезпечує пожежну безпеку за допомогою:
 - використання негорючих і важкогорючих матеріалів;
 - вибору необхідних відстаней між різнопотенціальними струмопровідними частинами, а також між струмопровідними частинами і корпусом, застосуванням в необхідних випадках ізоляційних негорючих перегородок;
 - застосування засобів захисту, які забезпечують швидке знеструмлення струмоведучих частин;
- Шумові характеристики системи та допустимі рівні звукового тиску відповідають ГОСТ 12.1.003-83 «ССТ ШУМ Загальні вимоги» і не перевищують 80 ДБ.