

ISSN (*print*) 2519-2884
ISSN (*online*) 2617-8389

Міністерство
освіти і науки України

Дніпровський державний
технічний університет

ЗБІРНИК

наукових праць
Дніпровського державного
технічного університету
(технічні науки)

COLLECTION

of scholarly papers
of Dniprovsky State
Technical University
(Technical Sciences)

**Науковий журнал
Заснований в червні 1999 р.**

Видається 2 рази на рік

1 (46) 2025

**Кам'янське
ДДТУ
2025**

ISSN (*print*) 2519-2884
ISSN (*online*) 2617-8389

УДК 621:658: 681:62-83:378:004:502:504:528:54:628:661:662

**Збірник наукових праць
Дніпровського державного
технічного університету (технічні
науки) № 1 (46) 2025
Науковий журнал**

**Collection of scholarly papers
of Dniprovsky State Technical
University (Technical Sciences)
№ 1 (46) 2025 Scientific Journal**

Засновник і видавець – Дніпровський
державний технічний університет

Founder and publisher Dniprovsky
State Technical University

Ідентифікатор медіа **R30-01533**

Media identifier **R30-01533**

У збірнику представлено результати наукових досліджень в галузі удосконалення металургійних процесів та процесів машинобудування, прикладної механіки, хімії та хімічних технологій, тепло- та електроенергетики, електромеханіки, енергозбереження, комп'ютерної інженерії, висвітлено актуальні питання біотехнології та промислової екології.

This collection of works includes the results of scientific research related to the upgrading of metallurgical processes, mechanical engineering processes, chemistry and chemical engineering, heat-and-power engineering, electromechanics, power saving methods, production processes automation, as well as some topical issues of biotechnology, industrial environment protection.

Наказами Міністерства освіти і науки України від 15.10.2019 № 1301, від 17.03.2020 № 409, від 24.09.2020 № 1188, від 30.11.2021 № 1290 та від 20.02.2023 №185 Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету внесено до Переліку наукових фахових видань України категорії «Б»

Реєстрація ДДТУ суб'єктом у сфері друкованих медіа за рішенням
Національної ради № 1085 від 16.10.2023

Статті індексуються системами Google Scholar (Google Академія), Academic Resource Index Research Bib, BASE-search, Directory of Open Access Scholarly Resources, Directory of Research Journals Indexing, Scientific Indexing Services, Journal Impact Factor, Національна бібліотека України ім. В.І.Вернадського, ДНТБ України

Друкується за рішенням Вченої Ради Дніпровського державного технічного університету,
протокол № 5, від 15.05.2025 р.

Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки).
Науковий журнал. Кам'янське, ДДТУ, 2025. № 1 (46), 208 с.

© Дніпровський державний технічний університет, 2025
© Dniprovsky State Technical University, 2025

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

- Перемітько Валерій Вікторович* - головний редактор, д.т.н., професор кафедри машинобудівних технологій та інженерії, декан металургійного факультету ДДТУ
- Альохіна Світлана Вікторівна* - д.т.н., Fachhochschule Technikum Wien, Vienna, Austria
- Бабенко Михайло Володимирович* - к.т.н., доцент кафедри програмного забезпечення систем ДДТУ
- Бельмас Іван Васильович* - д.т.н., професор, зав. кафедри машинобудівних технологій та інженерії ДДТУ
- Білоус Олена Іванівна* - к.т.н., доцент кафедри галузевого машинобудування ДДТУ
- Вакуленко Ігор Олексійович* - доктор технічних наук, професор, професор кафедри фізики конденсованого стану ДДТУ
- Вамболь Сергій Олександрович* - д.т.н., професор, завідувач кафедри безпеки праці та навколишнього середовища, НТУ «Харківський політехнічний інститут», м. Харків
- Вамболь Віола Владиславівна* - д.т.н., професор кафедри прикладної екології та природокористування Національного університету «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка», м. Полтава
- Волянський Роман Сергійович* - к.т.н., доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
- Гелеш Андрій Богданович* - д.т.н., професор кафедри хімії і технології неорганічних речовин Національного університету «Львівська політехніка»
- Гнатчук Єлизавета Геннадіївна* - к.т.н., доцент кафедри комп'ютерної інженерії та системного програмування Хмельницького національного університету
- Грицан Юрій Іванович* - д.б.н., професор, завідувач кафедри екології та охорони навколишнього середовища ДДТУ
- Гуляєв Віталій Михайлович* - д.т.н., професор, ректор ДДТУ
- Дерець Олександр Леонідович* - к.т.н., доцент кафедри електротехніки та електромеханіки ДДТУ

- Жульковський Олег Александрович** - к.т.н., доцент, в.о. завідувача кафедри програмного забезпечення систем, ДДТУ
- Іванченко Анна Володимирівна** - д.т.н., доцент, професор кафедри хімічних та біологічних технологій ДДТУ
- Клімов Роман Александрович** - к.т.н., доцент кафедри теплоенергетики ДДТУ
- Клюєв Олег Володимирович** - к.т.н., доцент кафедри електротехніки та електромеханіки ДДТУ
- Колосов Дмитро Леонідович** - д.т.н., доцент, завідувач каф. механічної та біомедичної інженерії, Національний технічний університет „Дніпровська політехніка”, м. Дніпро
- Корнієнко Ірина Михайлівна** - к.т.н., доцент кафедри біотехнології Державного університету «Київський авіаційний інститут», м. Київ
- Коровін Вадим Юрійович** - к.т.н., завідувач відділу Інституту геотехнічної механіки ім. М.С.Полякова НАНУ, м. Дніпро
- Крячко Геннадій Юрійович** - к.т.н., доцент кафедри металургії ім. В.І. Логінова ДДТУ
- Кульбачко Юрій Люцинович** - д. б. н. доцент, професор каф. біорізноманіття та екології Дніпровського національного університету ім. Олесь Гончара, м. Дніпро
- Кузнєцова Олена Александрівна** - к.т.н., доцент кафедри біотехнології Державного університету «Київський авіаційний інститут»
- Лавріненко Валерій Іванович** - д.т.н., професор, завідувач відділу Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАНУ, м. Київ
- Максименко Олег Павлович** - д.т.н., професор кафедри металургії ім. В.І. Логінова ДДТУ
- Непошивайленко Наталія Александрівна** - к.т.н., доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища ДДТУ
- Павлова Ольга Александрівна** - к.т.н., ст. викладач каф. комп'ютерної інженерії та системного програмування Хмельницького національного університету
- Пікареня Дмитро Сергійович** - д.т.н., професор кафедри екології та економіки ТОВ Технічного Університету «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Україна
- Садовой Александр Валентинович** - д.т.н., професор кафедри електротехніки та електромеханіки ДДТУ
- Середа Борис Петрович** - д.т.н., професор, завідувач кафедри автомобілів та транспортно-логістичних систем ДДТУ

- Сігарьов Євген Миколайович*** - д.т.н., професор, завідувач кафедри металургії ім. В.І. Логінова ДДТУ
- Солод Володимир Юрійович*** - к.т.н., доцент, перший проректор ДДТУ
- Скиба Маргарита Іванівна*** - к.т.н., доцент кафедри технології неорганічних речовин та екології, Український державний хіміко-технологічний університет, м. Дніпро
- Стеблянко Павло Олексійович*** - д.ф.-м.н., професор, провідний науковий співробітник Інституту механіки ім. С.П.Тимошенко НАН України, м. Київ
- Туукіп Іван*** - PhD, Dr. Sc., RCUK Academic Fellow, Department of Mathematics, Group of Applied Mathematics, University of Leicester, UK
- Чейлітко Андрій Олександрович*** - д.т.н., професор, Deutsches Zentrum fur Luft- und Raumfahrt (DLR), Cologne, Germany
- Черняк Лариса Миколаївна*** - к.т.н., доцент кафедри біотехнології Державного університету «Київський авіаційний інститут», м. Київ
- Чернятевич Анатолій Григорович*** - д.т.н., професор, провідний науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро
- Ялова Катерина Миколаївна*** - к.т.н., доцент кафедри програмного забезпечення систем ДДТУ
- Jacobson Boris*** - PhD, Dr. Sc. Hasselmann Chair of Engineering, Professor of Materials Science and NanoEngineering and Professor of Chemistry Rice University Houston, Texas, USA

ЗМІСТ

МЕТАЛУРГІЯ

- Слисєєв В.І., Маначин І.О., Кисляков В.Г., Руденко О.Л., Чубіна О.А.**
Yeliseiev Volodymyr, Manachyn Ivan, Kislyakov Volodymyr, Rudenko Oleksandr, Chubina Olena
Випаровування та розчинення магнію в рухомих бульбашках
Evaporation and dissolution of magnesium in moving bubbles..... 9
- Руденко Р.М., Сігарьов Є.М., Руденко М.Р., Кашєєв М.А., Чубіна О.А., Божко К.М.**
Rudenko Roman, Sigarev Yevhen, Rudenko Mykola, Kashcheev Mykhailo, Chubina Olena, Bozhko Kateryna
Дослідження ефективності використання конвертерного шлаку в агломераційній шихті
Study of the efficiency of use of converter slag in the agglomeration charge..... 19
- Самохвал В.М., Васильєв О.С., Концедал Р.В., Лабузов Н.С.**
Samokhval Volodymyr, Vasyliiev Oleksandr, Kontsedal Roman, Labuzov Mykyta
Оцінка точності методів апроксимації експериментальних даних розширення овальних розкатів в круглих калібрах
Estimate of the accuracy of methods for approximation of experimental data of the spread of oval workpiece in round pass..... 28

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

- Максименко О.П., Нікулін О.В.**
Maksimenko Oleg, Nikulin Oleksandr
Моделювання моменту прокатки з урахуванням натягіння штаби та її поздовжньої стійкості в осередку деформації
Modeling of rolling moment taking into account the tension of the workpiece and its longitudinal stability in the zone of deformation..... 37

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- Приймак А.Б., Максименко О.П., Самохвал В.М., Стасько Є.В.**
Pryimak Anna, Maksimenko Oleg, Samokhval Volodymyr, Stasko Yevhen
Аналіз показників механічних властивостей арматурних профілів діаметром 16 мм
Analysis of mechanical properties of concrete reinforcement bars with a diameter of 16 mm..... 44
- Popil Oleg, Tomina Anna-Mariia, Bashev Valerii, Kalinina Tetiana**
Попіль О.І., Томіна А.-М.В., Башев В.Ф., Калініна Т.В.
Influence of binary alloy of the Al-Cr system on the thermophysical properties of ultra-high-molecular-weight polyethylene
Вплив бінарного сплаву системи Al-Cr на теплофізичні властивості надвисокомолекулярного поліетилену..... 54

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

- Sasov Oleksandr, Shmatko Dmytro, Svibovych Evgen**
Сасов О.О., Шматко Д.З., Свібович Є.І.
Experimental studies of loading modes of the portal machine's carrier system on pneumatic wheels
Експериментальні дослідження режимів навантаження несучої системи порталної машини на пневматичних колесах..... 61
- Kabakov Daniil, Kabakov Anatolii, Telipko Leonid**
Кабаков Д.Ю., Кабаков А.М., Теліпко Л.П.
Optimization devices for vibro-protection and dynamic load in lifting cranes
Пристрої оптимізації віброзахисту та динамічного навантаження вантажопідійомних кранів..... 69

Молчанов В.Ф., Латішев Д.В. Molchanov Vitalii, Latyshev Dmytro Розробка фільтрувальних установок для систем експлуатації технологічних рідин та методики розрахунку параметрів Development of filtration units for process fluid operation systems and methods for calculating parameters.....	76
---	-----------

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. ЕЛЕКТРОНІКА

Клюєв О.В., Садовой О.В., Сохіна Ю.В., Ящук О.О., Бородай І.В. Kliuiev Oleh, Sadovoi Oleksandr, Sokhina Yuliya, Yashchuk Oleh, Borodai Illia Спостерігач поточкозчеплення з ідентифікацією активних опорів асинхронної машини. Flux linkage observer with identification of active resistances of an asynchronous machine.....	84
---	-----------

Дерець О.Л., Садовой О.В., Костенко В.І., Лобко Я.І., Білько Д.С. Derets Oleksandr, Sadovoi Oleksandr, Kostenko Volodymyr, Lobko Yaroslav, Bilko Dmytro Вплив структурної реалізації релейної системи керування положенням на ефективність її оптимізації за швидкодією Influence of structural implementation of a relay position control system on the efficiency of its speed optimization	95
--	-----------

Хмельницький Є.Д., Клюєв О.В., Сокурєнко Є.О., Новоселець В.М. Khmelnitskyi Evgen, Kliuiev Oleh, Sokurenko Evgen, Novoselets Vitalii Експериментальне дослідження вірогідних характеристик процесу електроспоживання підприємства Experimental study of the degenerative characteristics of the enterprise's electricity consumption process.....	103
--	------------

Чугунов Д.В., Гулєша О.М., Донченко А.П., Нізімов В.Б., Сухоруков Я.В. Chugunov David, Guliesha Olena, Donchenko Andrii, Nizimov Victor, Sukhorukov Yaroslav Динаміка асинхронного пуску синхронного двигуна з обмеженням струмів статора та перенапруг на обмотці збудження Dynamics of asynchronous start of a synchronous motor with stator current limitation and overvoltage on the excitation winding.....	110
---	------------

Чугунов Д.В., Шрамко Ю.Ю., Нізімов В.Б., Росєнко Ю.С., Коваленко А.Є., Черніков М.В. Chugunov David, Shramko Yury, Nizimov Victor, Roienko Yukhym, Kovalenko Artem, Chernikov Mykhailo Пристрій для асинхронного пуску синхронного двигуна з нелінійним накопичувачем енергії в контурі збудження Device for asynchronous starting of a synchronous motor with a nonlinear energy accumulator in the excitation circuit.....	118
---	------------

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

Соколовська І.Є., Крицький Є.Д. Sokolovska Iryna, Krytskyi Yevhen Математична модель газодинаміки потоків у вихровому апараті Mathematical model of gasdynamics of flows in a vortex apparatus.....	128
--	------------

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

Шаповалова Н.Н., Доценко І.О., Саїтгарєєв Н.Х., Трачук А.А. Shapovalova Nonna, Dotsenko Iryna, Saithareiev Nail, Trachuk Annait Інтеграція методів машинного навчання в семантичний аналіз osint-даних: алгоритми та результати Integration of machine learning methods into semantic analysis of osint data: algorithms and results	135
---	------------

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРІЯ

- Гуляєв В.М., Кравченко О.В., Коваленко А.Л., Анацький М.С.**
Gulyaev Vitalii, Kravchenko Oleksandr, Kovalenko Alla, Anatskyi Maksym
Огляд способів виробництва магній оксиду
Review of methods of magnesium oxide production..... 143
- Гуляєв В.М., Кравченко О.В., Головань С.С.**
Gulyaev Vitalii, Kravchenko Oleksandr, Golovan Sergii
Дослідження термодинамічних процесів утворення гідроген поліоксидів у водних розчинах при дії нерівноважної низькотемпературної плазми
Investigation of thermodynamic processes of formation of hydrogen polyoxides in aqueous solutions under the action of non-equilibrium low-temperature plasma..... 152
- Коровін В.Ю., Погорєлов Ю.М., Шестак Ю.Г., Валяєв О.М.**
Korovin Vadym, Pohorielov Yurii, Shestak Yurii, Oleksandr Valiaiev
Сорбція скандію з розчинів, що моделюють розсоли опріснення морської води
Scandium sorption from the solutions simulates seawater desalination brines..... 159
- Рябік П.В., Амосов А.О.**
Riabik Pavlo, Amosov Andrii
Аналітичний огляд отримання оксидних сполук з хлоридних травильних розчинів
Analytical review of obtaining oxide compounds from chloride pickling solutions..... 170
- Білоусова А.О., Миронюк О.В.**
Bilousova Anna, Myronyuk Oleksii
Одержання плівок з дисперсних частинок полілактиду
Formation of films based on dispersed polylactide particles..... 178

БІОТЕХНОЛОГІЇ ТА БІОІНЖЕНЕРІЯ

- Корнієнко І.М., Гуляєв В.М., Крижова М.В., Анацький А.С., Коваленко А.Л., Філімоненко О.Ю.**
Korniienko Iryna, Gulyaev Vitalii, Kryzhova Mariya, Anatskyi Andrii, Kovalenko Alla, Filimonenko Olga
Оцінка впливу процесу криоконсервації на якість хлібної закваски в біотехнології отримання функціонального бездріжджового хліба
Evaluation of the impact of the cryopreservation process on the quality of bread sourter in the biotechnology of obtaining functional yeastless bread 185

ЕКОЛОГІЯ

- Божко К. М., Карась О. Г., Фаріна Д., Махіна В. О.**
Vozhko Kateryna, Karas Olena, Farina Dmytro, Mahina Veronika
Сучасний стан бархату амурського (*phellodendron amurense*) у природних екосистемах заповідника «Дніпровсько-Орільський»
Current state of amur cork tree (*phellodendron amurense*) in natural ecosystems of the "Dnipro-Oril" nature reserve..... 196
- Світлій пам'яті Постоляника Юрія Степановича** 207

DOI: 10.31319/2519-2884.46.2025.14

УДК 621.313.323

Чугунов Д.В.¹, асистент, ORCID: 0009-0001-9227-8717, e-mail: davidchugunov00@gmail.com

Шрамко Ю.Ю.², к.т.н, ORCID: 0000-0002-8141-260X,

email: yurii.shramko@mipolytech.education

Нізімов В.Б.¹, докт. техн. наук, ORCID: 0000-0002-4580-5262, email: vikbor36@gmail.com

Роєнко Ю.С.¹, ст. викладач, ORCID: 0000-0001-9408-2171, e-mail: efim.mail@gmail.com

Коваленко А.Є.³, викладач, email: kovalenko1965@i.ua

Черніков М.В.¹, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

¹ Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

² ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка», м. Запоріжжя

³ Донбаський фаховий коледж технологій та управління, м. Кам'янське

Chuhunov David¹, Assistant of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Shramko Yury², Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation, Electrical, and Robotic Systems

Nizimov Victor¹, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Roienko Yukhym¹, Senior Lecturer of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Kovalenko Artem³, Lecturer of the Donbass Applied College of technology and management

Chernikov Mykhailo¹, master's degree student

¹ Dniprovsky State Technical University, Kamyanske

² Technical University «Metinvest Polytechnic», Zaporizhzhia

³ Donbass Applied College of technology and management, Kamyanske

ПРИСТРІЙ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ПУСКУ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З НЕЛІНІЙНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ В КОНТУРІ ЗБУДЖЕННЯ

Ефективними методами успішного пуску завантажених синхронних двигунів є методи, що ґрунтуються на компенсації електромагнітної інерційності контурів збудження шляхом підключення резисторів, накопичувачів енергії, компенсуючої електрорушійної сили, а також розчеплення обмотки збудження з ємностями. Визначені оптимальна величина ємності нелінійного накопичувача енергії та електромагнітний момент в режимі асинхронного пуску. Досліджені та розраховані динамічні характеристики асинхронного пуску синхронного двигуна. Здійснена порівняльна оцінка режимів асинхронного пуску дискретного накопичувача у порівнянні із запропонованим пристроєм.

Ключові слова: асинхронний пуск; синхронний двигун; накопичувач енергії; ємнісні стрижні.

Effective methods of successful starting of loaded synchronous motors are those based on compensation of electromagnetic inertia of excitation circuits by connecting resistors, energy storage devices, compensating electromotive force, and decoupling of excitation winding from capacitors. The optimum value of the nonlinear energy storage capacitance and electromagnetic torque in the asynchronous starting mode are determined. The dynamic characteristics of the asynchronous starting of a synchronous motor are investigated and calculated. A comparative assessment of the asynchronous starting modes of a discrete energy storage device in comparison with the proposed device is made.

Keywords: asynchronous starting; synchronous motor; energy storage; capacitive rods.

Постановка проблеми

Синхронні двигуни (СД) широко застосовуються в промисловості там, де необхідна висока потужність і жорсткість механічних характеристик. Ці двигуни забезпечують стабільність обертання навіть за значних змін навантаження, що робить їх незамінними для механізмів із

великим моментом опору та високою інерційністю. З конструктивної точки зору, синхронні двигуни умовно можна поділити на три основні групи:

1. Класичні електричні машини — ці двигуни мають обмотку збудження (ОЗ) та короткозамкнену обмотку, які забезпечують стабільність і надійність роботи. Такий тип двигунів є найбільш розповсюдженим, завдяки відносно простій конструкції та перевіреним технологіям виробництва та експлуатації.

2. Двигуни з постійними магнітами — містять постійні магніти, що забезпечують високу ефективність роботи, однак їх впровадження обмежується високою вартістю матеріалів, зокрема рідкоземельних постійних магнітів, а також чутливістю таких двигунів до перемагнічування.

3. Синхронно-реактивні двигуни — мають особливу будову ротора, яка дозволяє знизити втрати та покращити енергетичну ефективність. Вони поки що перебувають на етапі впровадження для застосувань із великими потужностями.

Велика кількість синхронних двигунів (СД) використовується у механізмах із підвищеним моментом опору та значною інерційністю, зокрема в промислових установках, насосних агрегатах, компресорах, дробарках тощо. Пуск таких двигунів ускладнюється необхідністю забезпечення високого пускового моменту за умови обмеження пускових струмів, що зумовлено як технічними, так і економічними чинниками.

Недоліками більшості існуючих СД є недостатній пусковий момент без спеціальних пристроїв або систем збудження, високі пускові струми, а також складність керування пусковими режимами. Це призводить до перевантажень у мережі, зниження надійності електропостачання та скорочення ресурсу обладнання.

Таким чином, розробка та впровадження ефективних способів покращення пускових характеристик синхронних двигунів є важливим науково-технічним завданням, що має значний практичний інтерес для багатьох галузей промисловості.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Унаслідок широкого розповсюдження СД другої та третьої груп, які характеризуються підвищеними вимогами до умов пуску, значна увага зосереджена на вирішенні проблеми забезпечення ефективного запуску таких електричних машин. Цій задачі присвячено низку наукових досліджень, що охоплюють різні підходи: прямий пуск від мережі [1—4], пуск із застосуванням додаткових технічних заходів, включаючи модернізацію конструктивних елементів двигуна [5—7], а також використання напівпровідникових перетворювачів частоти та інших засобів керованого електроприводу.

Незважаючи на розвиток та популяризацію двигунів другої і третьої груп, класичні СД залишаються найбільш використовуваними, що пояснюється їх відносною доступністю, досконалістю технології, а також меншими витратами на впровадження в промислові процеси. Ситуацію ускладнює той факт, що двигуни з постійними магнітами мають високу вартість і чутливість до робочих умов, а синхронно-реактивні двигуни поки що не можуть повністю конкурувати з класичними СД за потужністю.

Велика кількість СД використовується в механізмах, де необхідно підтримувати постійну швидкість без її регулювання в певному діапазоні. У таких випадках найпростішим і найпоширенішим методом пуску залишається прямий пуск від мережі. Для запуску механізмів із великим статичним моментом опору необхідний високий пусковий момент. Найпростішим способом його збільшення є включення пускового резистора або ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ) в контур збудження. Ці елементи дозволяють перерозподілити струми й моменти між контурами двигуна.

Існуючі способи асинхронного пуску СД спрямовані на компенсацію електромагнітної інерційності контурів збудження шляхом застосування резисторів, накопичувачів енергії, розчеплення обмоток збудження з ємностями, а також введення компенсуючої електрорушійної сили [8—13].

Підвищення середнього значення моменту в режимі асинхронного пуску може бути досягнуто збільшенням активного опору в контурі збудження. Однак зі збільшенням кратності пускового резистора фаза струму наближається до оптимального, а його амплітуда зменшується.

ся. Тому найбільше значення середнього моменту при фіксованому ковзанні забезпечується при пусковому опорі, коли фаза струму складає $\pi/4$, але при цьому амплітуда струму зменшується в $\pi/8$ разів у порівнянні з її значенням при короткозамкненій ОЗ, що обмежує подальше підвищення середнього моменту цієї обмотки.

Підключення до контуру збудження ЄНЕ з незмінною ємністю дозволяє покращувати асинхронну характеристику СД в деякому обмеженому діапазоні ковзання, а в інших зонах ковзання може статися значне погіршення пускових властивостей двигуна, аж до появи гальмівних моментів в області напівсинхронної швидкості. Для покращення характеристик застосовується багатоступеневий накопичувач енергії, що ускладнює конструкцію. Тому необхідно визначити таку величину ємності ЄНЕ залежно від параметрів двигуна і ковзання, яка забезпечить здобуття максимально можливого електромагнітного моменту протягом всього пуску СД. Точне аналітичне визначення цієї величини ємності представляє складне завдання, зважаючи на електричну та магнітну несиметрію СД. Проте проведені розрахункові дослідження показують, що максимум моменту двигуна досягається при повній компенсації ємністю опору розсіювання контурів ротора за прямою віссю полюсів [1].

Для реалізації безперервної зміни ємнісного опору відповідно до ковзання та параметрів двигуна необхідно розробити спрощені методи керування, які забезпечують надійність і ефективність роботи синхронних двигунів в умовах великих навантажень.

У наведених роботах недостатньо визначено вплив ємнісного накопичувача енергії на моменти і струми контурів СД.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розробка та дослідження нового пристрою для асинхронного пуску СД, який використовує нелінійний накопичувач енергії (НЕ) в контурі збудження. Це дає можливість оптимізувати пускові режими двигуна шляхом підвищення ефективності компенсації електромагнітної інерційності контурів збудження. Особлива увага приділена визначенню оптимальної ЄНЕ для забезпечення максимального електромагнітного моменту у широкому діапазоні ковзання, а також оцінці динамічних характеристик пуску та порівнянню ефективності запропонованого пристрою з існуючими методами.

Виклад основного матеріалу

1. Визначення оптимальної величини ємності нелінійного накопичувача енергії.

Дослідження виконувалося для СД типу СДСЗ — 2000–100 з наступними параметрами: $U_{лN} = 6000$ В; $U_N = 3464,2$ В; $I_{1N} = 229$ А; $P_N = 20000$ кВт; $n_N = 100$ об/хв; $\omega_0 = 314$ 1/с; $p = 30$; $\cos\varphi_N = 0,9$; $S_N = 2300$ кВА; $i_{fN} = 276$ А; $U_{fN} = 184$ В; $J_{дв} = 37500$ кг·м²; $J_{бар} = 11500$ кг·м²; $J_M = 7000$ кг·м²; $r_{120\sigma} = 0,165$ Ом; $X_{1\sigma} = 1,92$ Ом; $X_{f\sigma} = 2,29$ Ом; $X_d = 10,18$ Ом; $X_q = 7,1$ Ом; $X_{ad} = 8,26$ Ом; $X_{aq} = 5,18$ Ом; $r_{f20\sigma} = 0,419$ Ом; $K_i = 0,307$; $K_U = 0,204$; $r_f' = 0,0308$ Ом; $r_{ud}' = 1,148$ Ом; $r_{uq}' = 0,877$ Ом.

Значення у відносних одиницях: $r_1^* = 0,0109$ Ом; $x_1^* = 0,127$; $x_{ad}^* = 0,546$; $x_{aq}^* = 0,342$; $r_f^* = 0,0204$; $x_{f\sigma}^* = 0,151$; $r_{kd}^* = 0,0759$; $r_{kq}^* = 0,058$; $x_{kd\sigma}^* = 0,0642$; $x_{kq\sigma}^* = 0,0491$.

$$i_{fn}^* = \frac{i_{fN}}{\sqrt{2} \cdot I_{1N} \cdot K_i} = 2,776.$$

$$u_{fn}^* = \frac{K_u \cdot U_{fN}}{\sqrt{2} \cdot U_N} = 0,00766.$$

Знаходимо ємнісний опір у в.о. системи x_{ad} [2]:

$$X_c = \frac{A}{2} - \sqrt{\frac{A^2}{4} - B}, \quad (1)$$

де

$$A = x_{\sigma kd} s^2 + 2x_{\sigma f} s^2 + \frac{r_{kd}^2}{x_{\sigma kd}}; \quad (2)$$

$$B = x_{\sigma f} x_{\sigma kd} s^4 + x_{\sigma f}^2 s^4 + \frac{r_{kd}^2}{x_{\sigma kd}} x_{\sigma f} s^2 + R_f^2 s^2.$$

Визначаємо залежність відносного ємнісного опору у функції ковзання та параметрів двигуна, що забезпечує повну компенсацію опору розсіювання контурів ротора на основі виразів (1)—(2), а також вплив кратності пускового резистора.

Відносне значення ємності ЄНЕ може бути отримане для будь-якого ковзання у відповідності з розрахунковою залежністю за формулою:

$$c = \frac{1}{2\pi f x_c}. \quad (3)$$

Значення ємності в іменованих одиницях (мкФ) визначається за виразом:

$$C = \frac{K_{\text{ПР}}}{2\pi f x_c}, \quad (4)$$

де

$$K_{\text{ПР}} = \frac{K_i K_u I_H 10^6}{U_H},$$

$K_{\text{ПР}}$ — коефіцієнт приведення для ємнісного опору; K_i , K_u — відповідно коефіцієнти приведення струму та напруги контуру збудження СД; U_H , I_H — номінальні значення фазної напруги та струму статора; f — частота мережі живлення.

Отриману залежність $x_c = f(s)$ апроксимовано емпіричним виразом:

$$x_c = \frac{ab + cs^d}{b + s^d}, \quad (5)$$

де a , b , c , d — коефіцієнти апроксимації параметрів СД.

Залежність x_c для досліджуваного двигуна наведено на рис. 1.

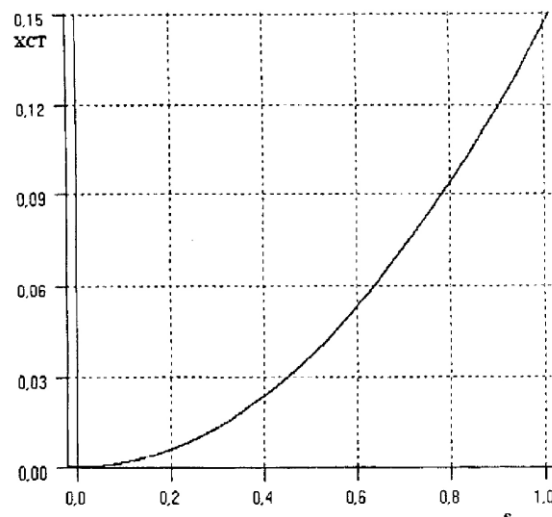


Рис. 1. Залежність x_c для досліджуваного двигуна

2. Дослідження динаміки асинхронного пуску з ємнісними стрижнями.

На рис. 2 приведено принципову схему пристрою для реалізації пуску синхронного двигуна (а) та схему розташування ємнісних стрижнів накопичувача енергії (б).

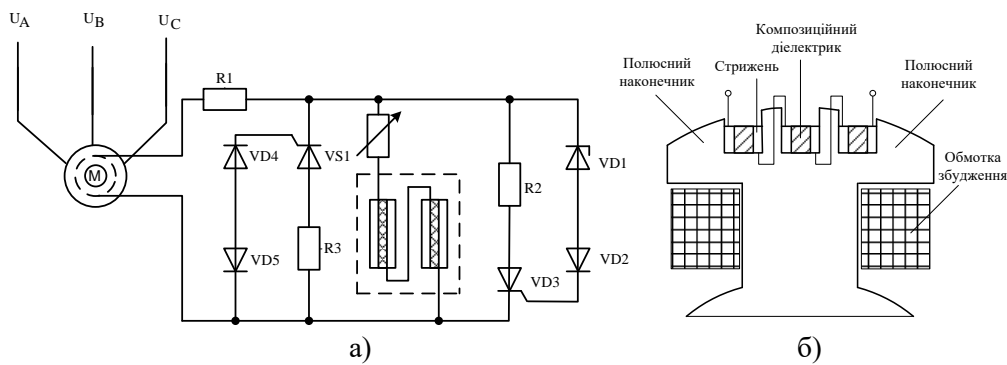


Рис. 2. Принципова схема пристрою для реалізації пуску СД та схема розташування ємнісних стрижнів НЕ

У початковий момент пуску через явище витіснення струму у шини ємнісного стрижня ефективна площа останнього є мінімальною. Це обумовлено тим, що високочастотні складові струму концентруються на поверхні провідника, знижуючи площу поперечного перерізу, через яку протікає струм. Як наслідок, початкове значення ємності накопичувача енергії визначається саме цією зменшеною ефективною площею. У цей момент опір пускового резистора досягає свого максимального значення, що сприяє обмеженню струму в контурі збудження і захищає обмотки від перевантажень.

У процесі розгону синхронного двигуна частота струму, індукованого в роторі, поступово знижується, що призводить до зменшення ефекту витіснення струму. Це дозволяє більшій частині струму проникати у внутрішні шари стрижня, збільшуючи ефективну площу його поперечного перерізу. В результаті цього відбувається поступове збільшення величини ємності накопичувача енергії, оскільки ємність прямо залежить від площі провідника. Одночасно зі збільшенням ефективною площею стрижня відбувається також збільшення його поперечного перерізу, що зменшує активний опір стрижня [14, 15].

Зниження опору ємнісного стрижня позитивно впливає на розподіл струмів у контурі збудження, покращуючи пускові характеристики двигуна. Це сприяє досягненню більшого середнього електромагнітного моменту, що є важливим для забезпечення плавного та ефективного запуску двигуна, особливо в умовах високого статичного моменту опору. Таким чином, динамічна зміна параметрів накопичувача енергії є ключовим фактором для оптимізації режиму пуску синхронного двигуна.

3. Розрахунок динамічних характеристик асинхронного пуску СД.

Динаміка описується системою диференціальних рівнянь СД в системі координат d, q та системі відносних одиниць (о.е.):

$$\left\{ \begin{array}{l} p\psi_d = -U \sin \theta - r_1 i_d - \psi_q (1-s)\omega_0; \\ p\psi_q = -U \cos \theta - r_1 i_q + \psi_d (1-s)\omega_0; \\ p\psi_f = U_f - U_c - i_f R_f; \\ p\psi_{kd} = -r_{kd} i_{kd}; \\ p\psi_{kq} = -r_{kq} i_{kq}; \\ p\theta = S; \\ pS = (M_c + \psi_d i_q - \psi_q i_d) / H_j; \\ pU_c = x_c \cdot i_f. \end{array} \right. \quad (6)$$

де $H_j = \omega_0 T_i = \frac{J \omega_0^3}{p^2 P_6}$ — стала агрегату.

Обчислення струмів контурів здійснюється за виразами:

$$\begin{cases} i_d = \Delta_{ID}/\Delta_{AD}; \\ i_q = \Delta_{IQ}/\Delta_{AQ}; \\ i_f = \Delta_{IF}/\Delta_{AD}; \\ i_{kd} = \Delta_{IKD}/\Delta_{AD}; \\ i_{kq} = \Delta_{IKQ}/\Delta_{AQ}. \end{cases} \quad (7)$$

Обчислення значень $\Delta_{ID}, \Delta_{IQ}, \Delta_{IF}, \Delta_{IKD}, \Delta_{IKQ}, \Delta_{AD}, \Delta_{AQ}$ здійснюється за співвідношенням

$$\begin{cases} \Delta_{AD} = x_{\sigma}(x_{\sigma f}x_{\sigma kd}) + x_{ad}(x_{\sigma f}x_{\sigma kd} + x_{\sigma}x_{\sigma kd} + x_{\sigma}x_{\sigma f}); \\ \Delta_{AQ} = x_{\sigma}x_{\sigma kq} + x_{aq}x_{\sigma kq} + x_{aq}x_{\sigma}; \\ \Delta_{ID} = (x_{\sigma f}x_{\sigma kd} + x_{ad}x_{\sigma kd} + x_{\sigma f}x_{ad})\psi_d - x_{ad}x_{\sigma kd}\psi_f - x_{ad}x_{\sigma f}\psi_{kd}; \\ \Delta_{IQ} = (x_{\sigma kq} + x_{aq})\psi_q - x_{aq}\psi_q; \\ \Delta_{IF} = -x_{ad}x_{\sigma kd}\psi_d + (x_{\sigma}x_{\sigma kd} + x_{ad}x_{\sigma kd} + x_{\sigma}x_{ad})\psi_f - x_{ad}x_{\sigma}\psi_{kd}; \\ \Delta_{IKD} = -x_{ad}x_{\sigma f}\psi_d - x_{\sigma}x_{ad}\psi_f + (x_{\sigma}x_{\sigma f} + x_{ad}x_{\sigma f} + x_{\sigma}x_{ad})\psi_{kd}; \\ \Delta_{IKQ} = -x_{aq}\psi_q + (x_{\sigma}x_{aq})\psi_{kq}. \end{cases} \quad (8)$$

Розрахункові залежності пускових характеристик при ступінчастій зміні величини ємності ЄНЕ наведені на рис. 3, а при безперервній зміні величини ємності ЄНЕ — на рис. 4.

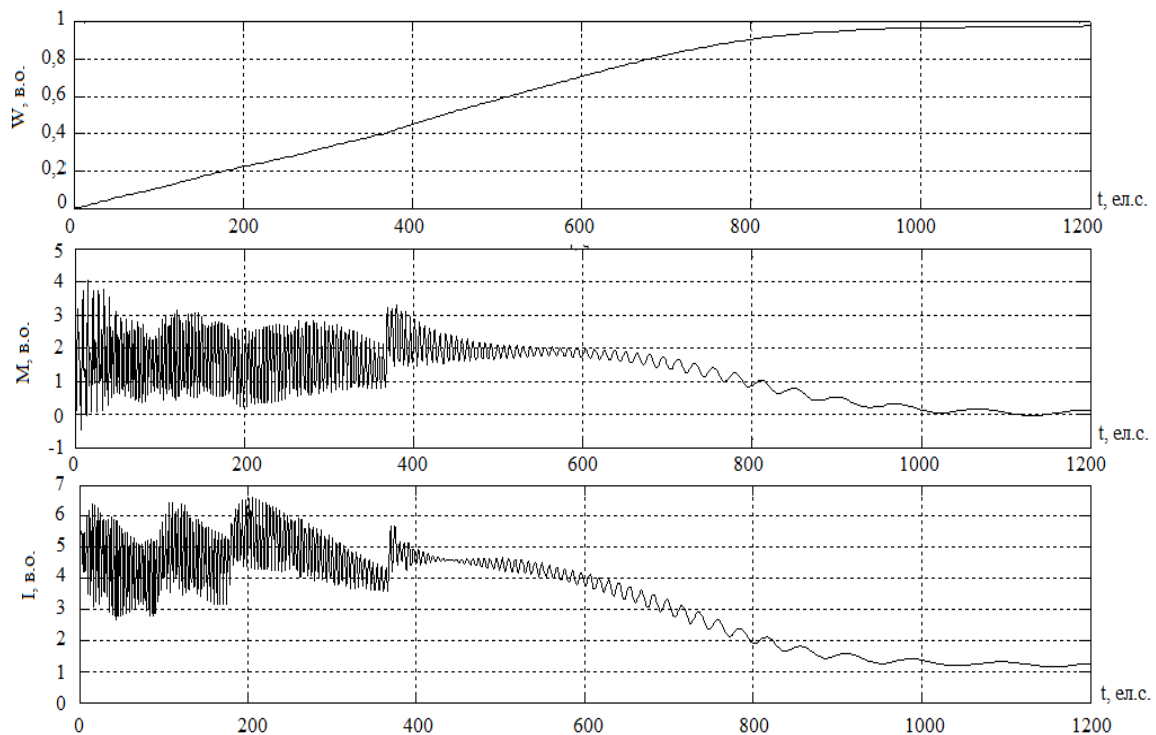


Рис. 3. Залежності пускових характеристик при ступінчастій зміні величини ємності ЄНЕ

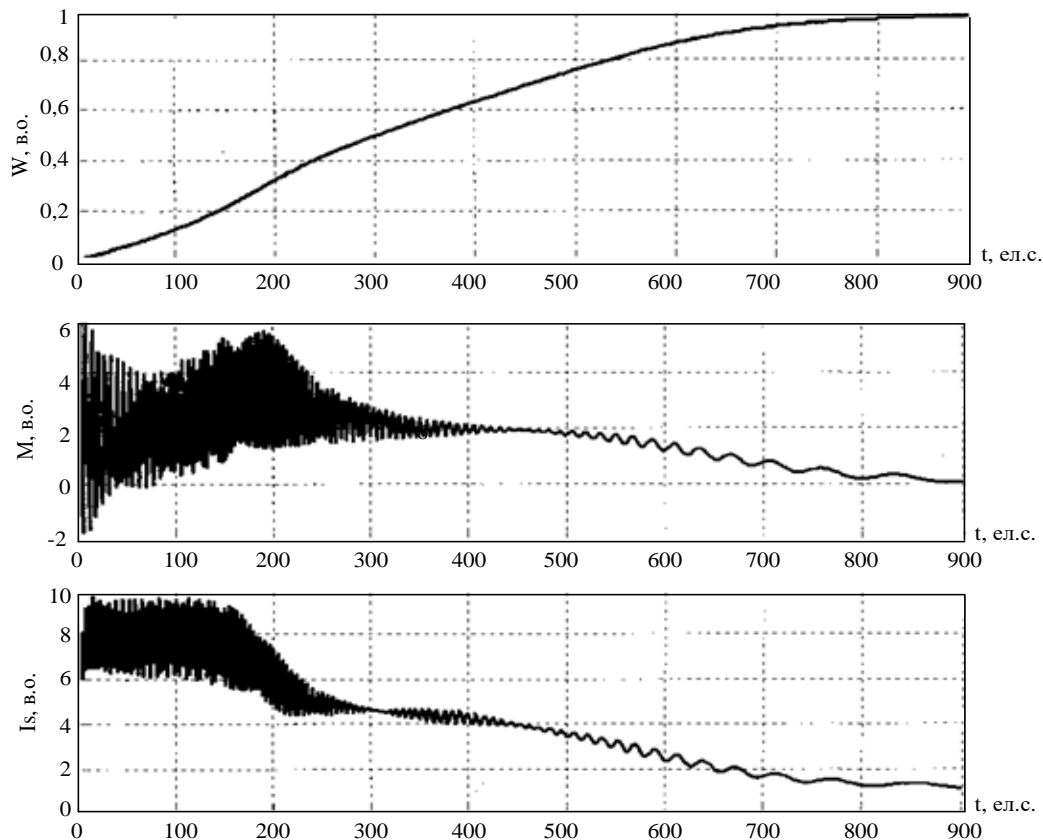


Рис. 4. Залежності при безперервній зміні величини ємності ЄНЕ

Висновки

1. Запропоновано новий пристрій для асинхронного пуску синхронного двигуна (СД), який використовує нелінійний накопичувач енергії у контурі збудження, що змінює свої параметри залежно від ковзання ротора.

2. Розроблено математичний опис роботи пристрою, який дозволяє оцінити пускові режими СД. Визначено залежності між параметрами накопичувача енергії, ковзанням і електромагнітним моментом.

3. Проведено розрахунки динамічних характеристик пуску для різних режимів зміни ємності накопичувача, зокрема для ступінчастого та безперервного варіантів. Результати показали, що використання запропонованого пристрою забезпечує більш ефективний пуск.

4. Використання накопичувача енергії з нелінійною залежністю ємності дозволяє уникнути погіршення пускових характеристик у зоні напівсинхронної швидкості, що покращує стабільність та ефективність роботи СД.

5. Запропонований пристрій має потенціал для практичного застосування в промисловості, особливо в механізмах із високим моментом опору та інерційністю, забезпечуючи оптимізацію енергоспоживання та покращення пускових характеристик.

6. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на технічну реалізацію пристрою для широкого спектра двигунів та розробку спрощених методів налаштування параметрів накопичувача енергії під конкретні умови роботи.

Список використаної літератури

1. Villani M., Fabri G., Credo A., Di Leonardo L., Parasiliti Collazzo F. Line-Start Synchronous Reluctance Motor: A Reduced Manufacturing Cost Avenue to Achieve IE4 Efficiency Class // *IEEE Access*. 2022. Т. 10. С. 100094–100103.
2. Park H.J., Hong H.B., Lee K.D. A Study on a Design Considering the Transient State of a Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor Satisfying the Requirements of the IE4 Efficiency Class // *Energies*. 2022. Т. 15. С. 9644.
3. SARAC V. Comparative Analysis of Line-start Synchronous Motor and Asynchronous Motor // *Electrotehnica, Electronica, Automatica*. 2021. Т. 69. С. 11–18.
4. Šarac V. LINE-START SYNCHRONOUS MOTOR A VIABLE ALTERNATIVE TO ASYNCHRONOUS MOTOR // *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics*. 2020. Т. 19. С. 039.
5. Knypiński Ł., Gillon F. Sizing by optimization of line-start synchronous motor // *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 2021. Т. 41. С. 690–702.
6. Muteba M. Transient Analysis of a Line-Start Synchronous Reluctance Motor with Symmetrical Distributed Brass Rotor Bars // *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2020. Т. 5. С. 94–102.
7. Ogbuka C., Nwosu C., Agu M. Dynamic and steady state performance comparison of line-start permanent magnet synchronous motors with interior and surface rotor magnets. *Archives of Electrical Engineering*. 2016. Vol. 65, no. 1. P. 105–116. URL: <https://doi.org/10.1515/ae-2016-0008>.
8. Grycmacher M., Lyskawinski W., Szelag W. Comparison analysis of induction and line-start synchronous reluctance motors. *ITM Web of Conferences*. 2019. Vol. 28. P. 01005. URL: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20192801005>.
9. Jung T.-U., Nam H. Rotor Design to Improve Starting Performance of the Line-start Synchronous Reluctance Motor. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2006. Vol. 1, no. 3. P. 320–326. URL: <https://doi.org/10.5370/jeeet.2006.1.3.320>.
10. Гладирь А. І., Гомілко В. І. Система формування пускових характеристик електроприводів змінного струму з важкими умовами пуску. *Електроінформ*. 2003. № 1. С. 17–19.
11. Пускові системи нерегульованих електроприводів: монографія. / О. П. Чорний та ін. Кременчук : ПП А. В. Щербатих, 2006. 280 с.
12. Нізімов В. Б. Застосування накопичувачів енергії для асинхронного пуску синхронних двигунів. *Науковий вісник НДА України*. 2000. № 1. С. 49–51.
13. Півняк Г. Г., Кириченко В. І., Бородай В. А. Про новий напрямок удосконалення крупних синхронних електродвигунів. *НАН України. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск*. 2002. Ч. 2. С. 62–55.
14. Спосіб пуску синхронного двигуна : пат. 98412 Україна. № 201103138 ; заявл. 17.03.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. 8 с.
15. Спосіб пуску синхронного двигуна та пристрій для його реалізації : пат. 106667 Україна : Н02Р 1/50, Н02Р 1/46. № 201300459 ; заявл. 14.01.2013 ; опубл. 29.09.2014, Бюл. № 18. 9 с.

DEVICE FOR ASYNCHRONOUS STARTING OF A SYNCHRONOUS MOTOR WITH A NONLINEAR ENERGY ACCUMULATOR IN THE EXCITATION CIRCUIT**Abstract**

The article addresses the urgent task of ensuring effective asynchronous starting of loaded synchronous motors (SM), which are widely used in mechanisms with high torque resistance and inertia. A novel device is proposed, based on the application of a nonlinear energy accumulator (EA) in

the excitation circuit. The study aims to enhance the efficiency of asynchronous starting by optimizing the device's parameters.

The paper presents an analysis of existing methods and devices for asynchronous starting, which include the use of starting resistors, capacitive energy accumulators, and other compensating elements. The authors propose a method for determining the optimal capacitance of the EA that ensures the maximum electromagnetic torque throughout the starting process.

The research was conducted for motors of the SDS3 — 2000 — 100 type. The dependencies between the parameters of the capacitive accumulator and the motor characteristics under different starting modes were established. In particular, the methodology for determining the relative capacitive resistance that fully compensates for the leakage resistance of the rotor circuits is described. For simplified engineering calculations, the dependencies of the accumulator parameters are approximated using empirical formulas.

A key feature of the study is the proposed device design, which employs a multistage energy accumulator with nonlinear capacitance dependence on slip. This design avoids performance deterioration in the semi-synchronous speed zone. The article includes the schematic diagram of the device and describes its operation at various starting stages.

The dynamics of asynchronous starting are also explored through mathematical modeling, which includes a system of differential equations. Numerical calculations were carried out to evaluate the starting characteristics under conditions of stepped and continuous variation of the accumulator's capacitance. The results are presented as graphical dependencies.

In the conclusions, the authors highlight the advantages of the developed device for asynchronous starting of SMs and its practical industrial applications. The development ensures an increase in starting torque and optimization of dynamic characteristics, making the device competitive compared to existing analogs.

References

- [1] Villani, M., Fabri, G., Credo, A., Di Leonardo, L., & Parasiliti Collazzo, F. (2022). Line-start synchronous reluctance motor: A reduced manufacturing cost avenue to achieve IE4 efficiency class. *IEEE Access*, 10, 100094—100103.
- [2] Park, H. J., Hong, H. B., & Lee, K. D. (2022). A study on a design considering the transient state of a line-start permanent magnet synchronous motor satisfying the requirements of the IE4 efficiency class. *Energies*, 15, 9644.
- [3] Sarac, V. (2021). Comparative analysis of line-start synchronous motor and asynchronous motor. *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, 69, 11—18.
- [4] Šarac, V. (2020). LINE-START SYNCHRONOUS MOTOR A VIABLE ALTERNATIVE TO ASYNCHRONOUS MOTOR. *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics*, 19, 039.
- [5] Knypiński, Ł., & Gillon, F. (2021). Sizing by optimization of line-start synchronous motor. *COMPEL. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 41, 690—702.
- [6] Muteba, M. (2020). Transient analysis of a line-start synchronous reluctance motor with symmetrical distributed brass rotor bars. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 5, 94—102.
- [7] Ogbuka, C., Nwosu, C., & Agu, M. (2016). Dynamic and steady state performance comparison of line-start permanent magnet synchronous motors with interior and surface rotor magnets. *Archives of Electrical Engineering*, 65(1), 105—116. Retrieved from <https://doi.org/10.1515/aee-2016-0008>
- [8] Grycmacher, M., Lyskawinski, W., & Szelag, W. (2019). Comparison analysis of induction and line-start synchronous reluctance motor. *ITM Web of Conferences*, 28, 01005. Retrieved from <https://doi.org/10.1051/itmconf/20192801005>
- [9] Jung, T.-U., & Nam, H. (2006). Rotor design to improve starting performance of the line-start synchronous reluctance motor. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 1(3), 320—326. Retrieved from <https://doi.org/10.5370/jeeet.2006.1.3.320>

- [10] Rodkin, D. I., & Hladyr, A. I. (2003). Systema formuvannia puskovykh kharakterystyk elektropryvodiv zminnoho strumu z vazhkymy umovamy pusku[System of forming starting characteristics of AC electric drives under heavy starting conditions]. *KDPI, Elektroinform*, (1), 17–19
- [11] Chorni, O. P., Hladyr, A. I., Osadchuk, Yu. H., Kurbanov, I. R., & Voshun, A. N. (2006). Puskovyi systemy nerehulovanykh elektropryvodiv: monohrafiya [Starting systems of unregulated electric drives]. *Kremenchuk, Ukraine: PP A. V. Shcherbatykh*.
- [12] Nizimov, V. B. (2000). Zastosuvannia nakopychuvachiv enerhii dlia asynkhronnoho pusku synkhronnykh dvyhuniv. [Application of energy accumulators for asynchronous starting of synchronous motors]. *Naukovyi visnyk NDA Ukrainy — Scientific Bulletin of NDA Ukraine*, (1), 49–51.
- [13] Pivnyak, H. H., Kyrychenko, V. I., & Borodai, V. A. (2002). Pro novyi napriamok udoskonalennia krupnykh synkhronnykh elektrodvyhuniv [On a new direction of improving large synchronous electric motors]. *NAN Ukrainy — NAS of Ukraine. Technical Electrodynamics. Thematic issue. Part 2*, 62–65.
- [14] Sposib pusku synkhronnoho dvyhuna [Method of starting a synchronous motor], pat. 98412 Ukraine, No. 201103138. (2012).
- [15] Sposib pusku synkhronnoho dvyhuna ta prystrii dlia yoho realizatsii [Method of starting a synchronous motor and device for its implementation], pat. 106667 Ukraine, No. 201300459. (2014).

Надійшла до редколегії 11.03.2024