

В.В. ЧУМАК, М. А. КОВАЛЕНКО, Д.Д. ГОРБАТКО, Р.П. ДУХНО

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ І МАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ З ІНДУКТОРОМ І СТАТОРОМ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

Зроблено короткий огляд питання діагностування стану ізоляційної конструкції електричних машин з розподіленим обмотками класичної конструкції. Наведено обґрунтування та актуальність розробки і впровадження нових інноваційних методів діагностики і випробувань. Запропонований метод має суттєві діагностичні ознаки, яких немає у інших використовуваних на сьогодні методах. Основною відмінністю є створення високих випробувальних перенапруг шляхом швидкої зміни магнітних потоків в індукційно пов'язаних контурах один з яких виносний датчик-індуктор, а другий – частина магнітопроводу з дефектною або бездефектною обмоткою. Запропоновано просту і зручну схему проведення випробувань, яку можна реалізувати відповідною вимірювальною апаратурою. Проведено комплекс теоретичних і експериментальних досліджень системи індуктор–статор з обмоткою за допомогою програмного пакету MATLAB/Simulink та польовим методом у двовимірній постановці задачі у програмному пакеті COMSOL Multiphysics. Також проведено експериментальні дослідження на реальному зразку у вигляді статора малопотужного асинхронного двигуна загального призначення із всипною обмоткою за допомогою розробленої випробувальної схеми та приладу. Теоретичні та експериментальні дослідження мають достатню збіжність результатів для інженерних цілей. Теоретично та експериментально обґрунтована можливість отримання випробувальних перенапруг більше 100 В на виток при низьких енергетичних впливах на дефектні зони, що забезпечує мінімальний руйнівний ефект під час діагностики. Отримано ґрунтовні результати для подальших досліджень та розвитку напрямку діагностування стану ізоляції індукційними імпульсними методами. Показано, що запропонований метод буде корисним при діагностуванні стану ізоляції обмоток електричних машин в розібраному стані в процесі виробництва і ремонту.

Ключові слова: індукційні імпульсні методи, перехідні процеси, ізоляція обмоток, діагностика стану електродвигунів.

V.V. CHUMAK, M.A. KOVALENKO, D.D. HORBATKO, R.P. DUKHNO

MODELING OF ELECTRICAL AND MAGNETIC TRANSIENT PROCESSES IN A SYSTEM WITH AN INDUCTOR AND A STATOR OF AC ELECTRICAL MACHINES

A brief review of the issue of diagnosing the condition of the insulation structure of electrical machines with classical distributed windings is presented. The rationale and relevance of developing and implementing new, innovative diagnostic and testing methods are provided. The proposed method possesses significant diagnostic features that are absent in other currently used methods. The main difference lies in the creation of high test overvoltages through a rapid change in magnetic fluxes in inductively coupled circuits, one of which is an external sensor-inductor, and the second is a part of the magnetic core with a defective or non-defective winding. A simple and convenient testing scheme is proposed, which can be implemented using appropriate measuring equipment. A comprehensive set of theoretical and experimental studies of the inductor–stator system with a winding was conducted using the Matlab Simulink software package and the field method in a two-dimensional problem formulation in the COMSOL Multiphysics software package. Experimental studies were also conducted on a real sample in the form of a stator of a low-power general-purpose induction motor with a random winding, utilizing the developed testing scheme and device. The theoretical and experimental studies show sufficient convergence of results for engineering purposes. The possibility of achieving test overvoltages exceeding 100 V per turn with low energetic impact on defective zones is theoretically and experimentally substantiated, which ensures a minimal destructive effect during diagnostics. Substantial results were obtained for further research and development of the field of insulation condition diagnostics using inductive impulse methods. It is demonstrated that the proposed method will be useful for diagnosing the insulation condition of electrical machine windings in a disassembled state during manufacturing and repair processes.

Keywords: inductive impulse methods, transient processes, winding insulation, electric motor diagnostics.

Вступ. Протягом тривалого часу діагностика електрообладнання залишається актуальним і важливим напрямком для забезпечення надійності роботи і високих експлуатаційних показників обладнання, зменшення втрат від простоїв, планування заходів щодо удосконалення як окремих пристроїв, так і систем в цілому [1]. На сьогоднішній день більшою мірою випробування ізоляції обмоток полягає лише у випробуванні ізоляції відносно корпусу та між фазами [2]. При цьому повноцінні методи визначення стану міжвиткової ізоляції досі залишаються маловживаними на виробництвах електромеханічного спрямування, і майже не використовуються в експлуатації електричних машин [3, 4]. Електричні двигуни потужністю до 50 кВт фактично випробовуються лише за допомогою мегомметра та подаванням підвищеної випробувальної напруги промислової частоти [5]. Кінцевим результатом є вибракування певної кількості двигунів, які однозначно не можливо експлуатувати через недостатню міцність їхньої ізоляційної конструкції. Основною задачею методів виявлення прихованих дефектів ізоляції, а саме міжвиткових замикань, є виявлення локальних

ушкоджень на ранніх стадіях розвитку [6]. Такий підхід дозволяє отримувати інформацію про необхідність підготовки до заміни обладнання або ремонту перед настанням відмови і виходу з ладу. З існуючих сучасних методів більшість базуються на опосередкованих вимірюваннях, тобто вібродіагностика, тепловізійний контроль, вимірювання полів розсіювання, спектру шуму та інші методи [7]. У цій роботі пропонується індукційний метод діагностування міжвиткової ізоляції, який дозволяє за допомогою спеціального датчика-індуктора і електронного комутатора виявити не лише фазу з ушкодженням, а і місце (паз) розташування дефекту і дефектну секцію.

Метою роботи є отримання результатів чисельного моделювання високочастотних перехідних процесів при швидкому зрізанні струму у колі з обмоткою та порівняння їх з експериментальними даними.

Об'єкт дослідження. Методи експериментальних та математичних досліджень високочастотних перехідних процесів в електричних RLC колах з наявністю ємнісних та індуктивних зв'язків між схемами заміщень різних обмоток.

© В.В. Чумак, М. А. Коваленко, Д.Д. Горбатко, Р.П. Духно, 2025

Опис методу діагностування. В основі принципу дії лежить закон електромагнітної індукції та рівняння для електрорушійної сили. При наявності міжвиткового замикання у пазу у них індуктором наводяться індуковані струми, які в свою чергу створюють свій потік, який і є сигналом наявності дефекту. Для вимірювання цього потоку потрібна вимірювальна обмотка, на кінцях якої наводиться вихідний сигнал, за формою і рівнем якого можна робити висновок про наявність чи відсутність дефекту. При цьому за відсутності початкових значень можна використовувати метод порівняння з іншими секціями. Спрощену схему наведено на рис. 1.

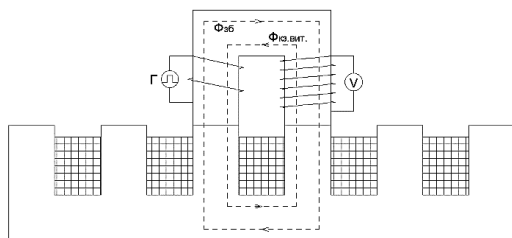


Рис. 1. Принцип дії індукційного методу виявлення міжвиткових замикань

На практиці магнітопроводи індуктора і вимірювальної обмотки мають бути розведені на достатню (наскільки можливо для конкретного двигуна) відстань для зменшення впливу на результати вимірювань потоків розсіювання [8]. Кількість витків, так само як і довжина можуть бути як однаковими, так і різними.

Для проведення досліджень потрібні джерело живлення, керований генератор коротких імпульсів, спеціальний прилад, статор асинхронного двигуна з обмоткою, двоканальний осцилограф. Завдяки такій схемі було отримано результати наведені на рис. 4.

Математичне моделювання у MATLAB/Simulink. Однією з найпоширеніших програм для моделювання динамічних процесів у системах різної фізичної природи на основі лінійних схем заміщення є MATLAB/Simulink. Перевагою є вбудована бібліотека Specialized Power Systems, яка має велику кількість стандартних блоків, за допомогою яких можна проводити розрахунки електромагнітних і електромеханічних систем різної складності [9]. Саме таку побудовану модель наведено на рис. 2. У табл. 1 надані параметри налаштувань всіх блоків схеми.

Таблиця 1 – Налаштування блоків Simulink у побудованій моделі

Параметри	Значення
Напруга живлення	13 В
Опір R3 / Індуктивність L1	0,1 Ом / 0,2 мГн
Обмотка 1 V1/R1/L1	0,3 В/0,1 Ом/0,1 мГн
Обмотка 2 V2/R2/L2	9 В/0,6 Ом/0,5 мГн
Гілка намагнічування	10 Ом/0,55 мГн
R1, C1 опір та ємність первинного контуру	1000 Ом/0,1 нФ
R2, C2 опір та ємність вторинного контуру	2500 Ом/0,25 нФ
Ємність транзистора C3	15 нФ
Частота/тривалість імпульсів генератора	50 Гц/200 мкс

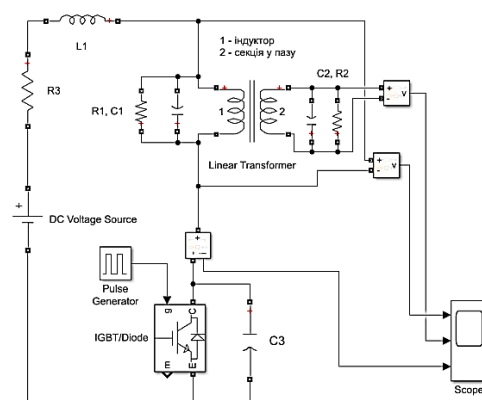


Рис. 2. Побудована модель у MATLAB/Simulink

Експериментальні дослідження. Схематичне зображення експериментальної установки наведено на рисунку 3. В якості джерела живлення використовується свинцево-кислотний акумулятор. Комутатором є спеціально розроблений прилад для регулювання параметрів імпульсу струму. Датчик-індуктор складається з індуктора і вимірювального модуля, закріплені вздовж однієї осі. Для підвищення універсальності доцільно виконати один з магнітопроводів з обмоткою рухомим, для зміни відстані в залежності від довжини розточки статора випробовуваної машини. Секції обмотки електричного двигуна випробовуються короткими імпульсами перенапруги з великою амплітудою. Завдяки цьому відбувається випробування перш за все міцності міжвиткової ізоляції. Відбувається цей процес шляхом порівняння осцилограм отриманих для різних секцій між собою.

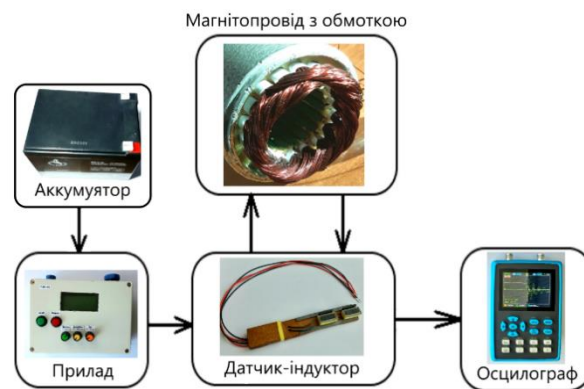


Рис. 3. Схема експериментальної установки

Розроблений експериментальний зразок приладу побудований на базі IGBT-транзистора напругою до 1200 В та максимальним імпульсним струмом до 120 А. Завдяки рідкокристалічному дисплею LCD1604 та платі з мікроконтролером Atmega328P на екран виводяться параметри, значення яких налаштовуються обертанням ручок потенціометрів на передній панелі. До них відносяться тривалість та частота імпульсів. Також реалізовано можливість регулювання часу зрізання струму силовим ключем.

Враховуючи складність проведення досліджень на реальному статорі АД і виготовлення до нього спеціального приладу, у першому наближенні для

математичного і фізичного моделювання було обрано спрощену модель лише з двома обмотками, а саме індуктора і секції. В якості фізичної моделі обрано Ш-подібний магнітопровід з трансформаторної сталі з секцією і П-подібний індуктор з того ж феромагнітного матеріалу. Кількість витків обмотки індуктора 2, витків у секції 63.

Значення струму вимірювалось шляхом підключення одного з каналів двоканального осцилографа до безіндуктивного резистора опором 0,1 Ом. Значення напруги за допомогою другого каналу щупом з дільником $\times 100$ і максимальною амплітудою напруги сигналу до 2 кВ. Якщо значення перенапруги на затискачах обмотки може перевищувати допустиме, необхідно обмежити значення перенапруги за допомогою варистора або за можливості збільшувати значення перенапруги поступово без різких змін.

На рис. 4 зображено зовнішній вигляд фізичної моделі. На рис. 5 отримані експериментально і в результаті розрахунку моделі на рис. 2 осцилограми перехідних процесів при швидкому зрізанні струму.



Рис. 4. Фізична модель індуктора і статора з секцією

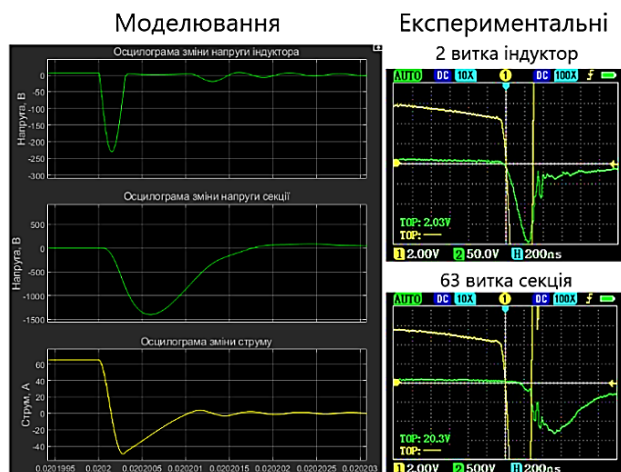


Рис. 5. Отримані осцилограми перехідних процесів у обмотках

Як можна побачити як у першому, так і у другому випадку тривалість імпульсу перенапруги на затискачах секції у пазу є більшою за тривалість імпульсу на затискачах обмотки індуктора. Таким чином можна зробити висновок про менше значення резонансної частоти котушки з більшою кількістю витків та більшу тривалість півперіоду синусоїди. Окрім того значення амплітуд напруги обмотки індуктора і секції для

експериментального і розрахункового варіантів відрізняються несуттєво, що додатково свідчить про відповідність побудованої електричної схеми заміщення і моделі реальній фізичній системі. Таким чином отриману модель можна використовувати для подальших розрахунків подібних систем. Запропонована модель у подальшому може бути уточнена та змінена в залежності від цілей і особливостей дослідження.

Моделювання за допомогою COMSOL Multiphysics. Найбільш універсальним і потужним інструментом для моделювання електричних і магнітних фізичних процесів у електромеханічних системах є польові та коло-польові методи, виконання розрахунків за допомогою яких і реалізовано у COMSOL Multiphysics [10]. Перевагою є отримання двовимірних або навіть тривимірних картин розподілу електричних і магнітних полів, що дозволяє досліджувати вплив геометрії та локальні процеси. Недоліком є потреба у великій обчислювальній потужності та великому об'ємі пам'яті для збереження результатів. Як наслідок, такі дослідження займають велику кількість часу та потребують високого рівня підготовки дослідника, розуміння принципів побудови складних моделей та налаштування оптимальних параметрів розрахунку, в залежності від поставленої задачі [11]. З цієї причини було здійснено розрахунок для двовимірної постановки задачі. Такий підхід вносить певні похибки, проте враховуючи низький вплив крайових ефектів у досліджуваній системі отримувані результати мають достатню точність для практичного використання.

Імпульси струму прямокутної форми частотою 5 кГц було задано за допомогою постійної складової та ряду синусоїд різної частоти, а саме непарні гармоніки до п'ятнадцятої від першої частотою 5000 Гц [12]. Отримані імпульси струму наведені на рис. 7. Рівняння зміни струму у часі має наступний вигляд:

$$I = 50 + 62 \cdot \sin(\omega \cdot t) + 19 \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t) + 9.8 \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t) + 5.4 \cdot \sin(7 \cdot \omega \cdot t) + 3 \cdot \sin(9 \cdot \omega \cdot t) + 1.5 \cdot \sin(11 \cdot \omega \cdot t) + 0.75 \cdot \sin(13 \cdot \omega \cdot t) + 0.55 \cdot \sin(15 \cdot \omega \cdot t) \quad (1)$$

На рис. 6 наведено отримані розподіли магнітної індукції і щільності струму у переріз активної частини при тривалості імпульсу 100 мкс і часі зрізу струму 10 мкс. Ліворуч наведено розподіли для випадку з секцією у пазу без ушкоджень. Праворуч ушкоджена секція з п'ятьма короткозамкненими витками. У моделі враховано вплив на результати кривої намагнічування сталі. Час розрахунку було обрано від 0 до 500 мкс з кроком 1 мкс. Таке співвідношення є оптимальним для одночасного отримання результатів достатньої якості та економії обмежених обчислювальних ресурсів комп'ютеру і часу розрахунку моделі. Щільність сітки скінчених елементів Coarse.

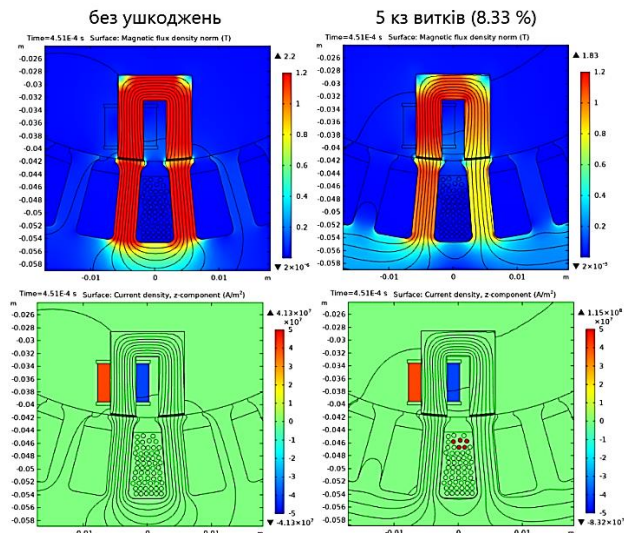


Рис. 6. Розподіли магнітної індукції і щільності струму без ушкодження та при наявності міжвиткового замикання 8,33% (5 витків з 60)

Порівнюючи отримані результати помітний суттєвий вплив наявності п'яти короткозамкнених витків на розподіл магнітної індукції у перерізі активної частини. Її значення суттєво знизилось з наближено 1,3 Тл до 0,9 Тл. Така суттєва зміна магнітного потоку у осерді може порівняно легко бути зафіксованою на практиці за допомогою вимірювальної обмотки.

Для порівняння отриманих величин перенапруги на обмотці індуктора та отримання розподілу у часі значення індукovanого в ушкоджених витках струму побудовано на основі розрахованих даних графіки зображені на рис. 7.

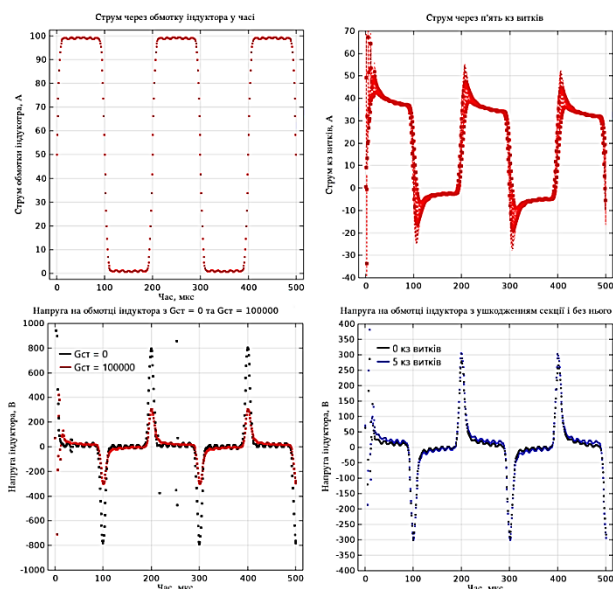


Рис. 7. Результати дослідження впливу дефектів на перехідні процеси

Проаналізувавши отримані дані, отримано наступні висновки. По-перше, форма кривої індукovanого напруги у короткозамкнених витках має передбачуваний вигляд, а саме різкий підйом до максимального значення на початку перехідного процесу і поступове

затухання протягом часу 100 мкс. Такий час за отриманими результатами є не достатнім для повного затухання струму. Максимальне значення і індукovanого струму і перенапруги на затискачах обмотки індуктора співпадає з моментом найбільшої швидкості зміни струму обмотки індуктора, що відповідає попередньо отриманим даним іншими описаними у цій роботі методами.

По-друге, наявність вихрових струмів у магнітопроводі суттєво знижує амплітуду перенапруги, а наявність короткозамкнених витків на максимальну амплітуду напруги на затискачах обмотки індуктора впливає не суттєво. При цьому змінюється лише амплітуда, тоді як форма імпульсів залишається не змінною. Такий результат в цілому відповідає експериментально отримуваним, а відхилення пов'язані зі спрощеністю самої моделі.

Таким чином і результати моделювання у COMSOL Multiphysics підтверджують працездатність запропонованого підходу з впливу на ізоляцію витків різкими змінами струму і магнітного потоку зчепленого з ними.

Висновки. У даній роботі було проведено ґрунтовне дослідження перехідних електричних і магнітних процесів у системі статор електричного двигуна з розподіленою всипною обмоткою та спеціальний індуктор з маловитковою обмоткою та великою швидкістю зміни струму.

Основним результатом є те, що отримані значення перенапруги є більшими за 100 В на частину секції з нерозвиненим дефектом і досягають 1,3 кВ в максимальному значенні, що обмежується пробивною напругою комутуючого транзистора. Та можуть дозволити виявляти не лише металеві короткі замикання, а і приховані дефекти ізоляції на ранніх стадіях розвитку. Особливістю роботи є одночасне дослідження системи трьома методами, а саме експериментальним, за допомогою MATLAB/Simulink, польовими методами у COMSOL Multiphysics. Таким чином отримано найбільш повну картину протікання процесів різної фізичної природи у досліджуваній системі.

Результати показали, що на рис. 5 експериментальні та розрахункові дані мають досить високу збіжність, що підтверджує точність побудованої математичної моделі. Результати отримані польовим методом мають відмінності, що пов'язано з особливостями процесу побудови і розрахунку моделі. Основною причиною є не врахування ємнісних зв'язків між елементами конструкції та не відповідність форми кривої струму реальній з метою спрощення процесу побудови моделі. Задля отримання результатів більш близьких до реальних необхідно будувати мультифізичну коло-польову модель зі збільшенням кількості кроків розрахунку. Такий підхід вимагає великого досвіду і обчислюваних потужностей для розрахунку подібних складних моделей. Попри це, отриманий результат є достатнім для підтвердження виникнення перенапруги величиною близькою до отримуваних експериментальних, а також суттєвий вплив вихрових струмів у магнітопроводі на значення перенапруги, що добре проілюстровано на рис. 7 (нижній лівий кут).

Список літератури

- Deckner, A., Baranski, M., Jarek, T., & Berhausen, S. (2022). Methods for diagnosing winding insulation of electrical machine windings. *Energia*, 15 (22), 8465.
- Liu, X.; Miao, W.; Xu, Q.; Cao, L.; Liu, C.; Pong, P.W.T. Inter-Turn Short-Circuit Fault Detection Approach for Permanent Magnet Synchronous Machines Through Stray Magnetic Field Sensing. *IEEE Sens. J.* 2019,19, 7884–7895.
- Florkowski, M.; Florkowska, B.; Zydron, P. Partial Discharges in Insulating Systems of Low Voltage Electric Motors Fed by Power Electronics—Twisted-Pair Samples Evaluation. *Energies* 2019,12, 768
- Chumack, V., Kovalenko, M., Tymoshchuk, O., Stulishenko, A., & Ihnatiuk, Y. (2023). Design of a multilink system for calculating high-frequency processes in electric machines with mesh windings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8 (123), 54–63.
- G. Joksimovic and J. Penman, "The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 5, pp. 1078–1084, 2000.
- M. Ghassemi. (2019). Accelerated insulation aging due to fast, repetitive voltages: A review identifying challenges and future research needs. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 5, 1558–1568.
- Zhou, X.; Giangrande, P.; Ji, Y.; Zhao, W.; Ijaz, S.; Galea, M. Insulation for Rotating Low-Voltage Electrical Machines: Degradation, Lifetime Modeling, and Accelerated Aging Tests. *Energies* 2024, 17, 1987.
- Chumack, V., Tymoshchuk, O., Kovalenko, M., Bazenov, V., Ihnatiuk, Y., & Stulishenko, A. (2023). Research of high-frequency remagnetization model in laminated magnetic cores of electromechanical and electromagnetic energy converters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(5 (124), 6–15.
- Chumak V., Dukhno R., Stulishenko A. & Svyatnenko V. (2024) High-frequency processes in the windings of general-purpose electrical machines in the presence of defects in the ground-wall insulation. *Engineering, Energy, Transport Aic*, 2 (125), 130-141.
- Експлуатація та діагностування електричних машин і апаратів: Навч. посібник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 228 с.
- Електричні апарати. Низьковольтна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: підручник / М. В. Хай, М. В. Бурштинський, Б. М. Харчишин. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 480 с.
- Pusca R, Romary R, Touti E, et al. Procedure for detection of stator inter-turn short circuit in ac machines measuring the external magnetic field. *Energies*, 2021, 14(1132): 1637-1642.

References (transliterated)

- Deckner, A., Baranski, M., Jarek, T., & Berhausen, S. (2022). Methods for diagnosing winding insulation of electrical machine windings. *Energia*, 15 (22), 8465.
- Liu, X.; Miao, W.; Xu, Q.; Cao, L.; Liu, C.; Pong, P.W.T. Inter-Turn Short-Circuit Fault Detection Approach for Permanent Magnet Synchronous Machines Through Stray Magnetic Field Sensing. *IEEE Sens. J.* 2019,19, 7884–7895.
- Florkowski, M.; Florkowska, B.; Zydron, P. Partial Discharges in Insulating Systems of Low Voltage Electric Motors Fed by Power Electronics—Twisted-Pair Samples Evaluation. *Energies* 2019,12, 768
- Chumack, V., Kovalenko, M., Tymoshchuk, O., Stulishenko, A., & Ihnatiuk, Y. (2023). Design of a multilink system for calculating high-frequency processes in electric machines with mesh windings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8 (123), 54–63.
- G. Joksimovic and J. Penman, "The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 5, pp. 1078–1084, 2000.
- M. Ghassemi. (2019). Accelerated insulation aging due to fast, repetitive voltages: A review identifying challenges and future research needs. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 5, 1558–1568.
- Zhou, X.; Giangrande, P.; Ji, Y.; Zhao, W.; Ijaz, S.; Galea, M. Insulation for Rotating Low-Voltage Electrical Machines: Degradation, Lifetime Modeling, and Accelerated Aging Tests. *Energies* 2024, 17, 1987.
- Chumack, V., Tymoshchuk, O., Kovalenko, M., Bazenov, V., Ihnatiuk, Y., & Stulishenko, A. (2023). Research of high-frequency remagnetization model in laminated magnetic cores of electromechanical and electromagnetic energy converters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(5 (124), 6–15.
- Chumak V., Dukhno R., Stulishenko A. & Svyatnenko V. (2024) High-frequency processes in the windings of general-purpose electrical machines in the presence of defects in the ground-wall insulation. *Engineering, Energy, Transport Aic*, 2 (125), 130-141.
- Ekspluatatsiia ta diahnostuvannia elektrychnykh mashyn i aparativ: Navch. posibnyk. – Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu "Lvivska politehnika", 2010. – 228 p.
- Elektrychni aparaty. Nyz'kovol'tna aparatura komutatsii, keruvannia ta zakhystu. Zahal'nyi kurs: pidruchnyk / M. V. Khai, M. V. Burshtynskyi, B. M. Kharchyshyn. – Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politehniky, 2021. – 480 p.
- Pusca R, Romary R, Touti E, et al. Procedure for detection of stator inter-turn short circuit in ac machines measuring the external magnetic field. *Energies*, 2021, 14(1132): 1637-1642.

Надійшла (received) 22.10.2025

Відомості про авторів / About the authors

Чумак Вадим Володимирович (Chumak Vadym) – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", завідувач кафедри електромеханіки; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8401-7931>; e-mail: chumack_kpi@ukr.net

Коваленко Михайло Анатолійович (Kovalenko Mykhaylo) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: kovalenko_ma@i.ua.

Горбатко Дмитро Дмитрович (Horbatko Dmytro) – студент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри електромеханіки; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6376-2829>; e-mail: di-magorbatko20034567@gmail.com.

Духно Роман Павлович (Dukhno Roman) – аспірант, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри електромеханіки; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9506-2234>; e-mail: 4opper1@gmail.com.