

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО» МІНІСТЕРСТВО
ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО» МІНІСТЕРСТВО
ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Ігнатюк Євген Станіславович

УДК 621.313.8

ДИСЕРТАЦІЯ
ДІАГНОСТИКА ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВІДІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ
МАШИН ПРИ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ВПЛИВАХ

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____/Ігнатюк Є.С./

Науковий керівник Чумак Вадим Володимирович, к.т.н., доцент

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Ігнатюк Є.С. Діагностика шихтованих магнітопроводів електричних машин при високочастотних впливах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню надійності роботи електричних машин з різним рівнем відпрацьованості їх розрахункового ресурсу шляхом розробки та впровадження ефективних малозатратних методів діагностики шихтованих осердь, зокрема оцінки якості міжлистової ізоляції та стану пресування пакету в електричних двигунах загального призначення та надання обґрунтованих рекомендацій по їх подальшій експлуатації.

У першому розділі описано вплив технологічних факторів на характеристики шихтованих магнітопроводів електричних машин та огляд існуючих методів діагностики стану міжлистової ізоляції та рівня розпушеності пакету. Наведено причини виникнення дефектів у шихтованих магнітопроводах в процесі виробництва та ремонту. Показано аналіз існуючих методів діагностики стану якості ламінованих осердь, що використовуються для виявлення пошкоджень та можливого прогнозування виходу з ладу ЕМ. Проаналізовано основні види дефектів, що можуть виникати в магнітопроводах, наслідки їх впливу на загальний і місцевий стан магнітопроводу, а також на роботу електричної машини в цілому. Більш детально описано ватметровий метод діагностики, метод тепловізійного контролю та віброакустичні методи діагностики магнітопроводів ЕМ як найбільш інформативні та придатні до створення системи комплексної діагностики шихтованих осердь.

У другому розділі представлено фізичні основи зв'язку параметрів високочастотних перехідних процесів з питомими втратами в шихтованих магнітопроводах, приведено опис методу оцінки якості ламінованих осердь, що

базується на реакції випробуваного магнітопроводу на швидкоплинні індукційні впливи.

Надані статистичні оцінки зв'язку параметрів швидкоплинних індукційних процесів в магнітопроводі з втратами на перемагнічування при промислових частотах.

Проведено статистичний аналіз експериментів, що були виконані високочастотним індукційним методом, по дослідженню фактичного стану бездефектних та дефектних шихтованих магнітопроводів різної геометричної конструкції, потужності та полюсності.

Визначена регресійна залежність та приведені довірчі інтервали для оцінки точності діагностичних параметрів, що вимірюються. Визначено чотири ступеня дефектності магнітопроводів та відповідні межі діагностичних параметрів.

Встановлено значну кореляцію між питомими втратами в магнітопроводі $P_{1,0/50}$ та загальними магнітними втратами та температурами в обмотках в зібраних і працюючих машинах різної потужності та геометрії магнітопроводу. Показано, що в результаті встановлення діагностичних параметрів і пов'язаних з ними питомих втрат в осердях необхідно проводити післяремонтну паспортизацію машини з обґрунтованим зменшенням навантаження для забезпечення розрахункового ресурсу роботи.

Надані рекомендації по зміні номінальної потужності машини в залежності від рівня дефектності застосованого в ній магнітопроводу.

Третій розділ присвячений математичному моделюванню високочастотного процесів по запропонованому індукційному методу контролю якості шихтованих магнітопроводів електричних машин загального призначення. Описано та обґрунтовано параметри бездефектного магнітопроводу. Проведено польове та математичне моделювання дефектних та бездефектних пакетів листів електротехнічної сталі в програмному середовищі COMSOL Multiphysics.

Було проаналізовано вплив розвинутості дефектів магнітопроводів, пов'язаних з питомими втратами на вихрові струми шляхом моделювання зміни електричної провідності матеріалу сталі, збільшення товщини листів

магнітопроводу та утворенням паразитних контурів вихрових струмів, що відповідають локальним і інтегральним дефектам. Локальні дефекти моделювались шляхом металевого замикання сусідніх пластин, а інтегральні дефекти – збільшенням міжлистової поперечної електричної провідності пакету

Фізично та математично описано процеси, що протікають на прикладі умовного шихтованого пакету з 10 пластин товщиною 0,5мм, що потім експериментально досліджувався при фізичному моделюванні інтегральних і локальних дефектів. Результати моделювання та експериментальних досліджень показали хорошу збіжність, яка не перевищує 10% по оцінці загальних втрат в магнітопроводі згідно запропонованого індукційного методу. По отриманих даних було створено польову математичну модель в програмному пакеті COMSOL Multiphysics. Було проведено математичне моделювання та експериментальні дослідження магнітопроводу 4A90L4Y3. По результатам моделювання та експериментальних досліджень були запропоновані діагностичні ознаки для оцінки магнітопроводів різного ступеню дефектності міжлистової ізоляції.

Було проведено дослідження впливу локального дефекту магнітопроводу в зубцевій зоні двигуна AIP100L4Y3 в зібраній машині з закладеними термодатчиками в дефектних та бездефектних частинах машини. По результатах розрахунку по створених теплових схемах заміщення і виміряним температурам при роботі зібраної машини були оцінені локальні втрати в дефектних та бездефектних зонах, а також температури в обмотках, що були укладені в дефектних і бездефектних частинах. Оцінена небезпека локальних дефектів зубцевої зони в магнітопроводах, що може привести до виходу з ладу міжвиткової ізоляції частини обмотки, яка знаходиться в пазах між дефектними зубцями.

У четвертому розділі описано метод оцінки якості шихтованих магнітопроводів по стану міжлистової ізоляції та рівня розпушеності листів магнітопроводу. Метод дозволяє обґрунтувати рекомендації по подальшому використанню осердя по результатах аналізу діагностичних впливів при одночасному використанні швидкоплинних індукційних впливів та ударного вібраційного впливу при співвідношенні дефектів різного походження.

Було розглянуто лабораторні зразки інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) діагностики шихтованих магнітопроводів різного стану пресування, які були експериментально перевірені при виконанні відповідних досліджень. Наведено структурні схеми, описано алгоритми роботи, структуру та основні функції програмного забезпечення, що входить до складу розроблених ІВС.

Проведено низку експериментів на лабораторній базі Інституту електродинаміки НАНУ м.Київ.

Описано і показано поєднання експериментів з одночасним індукційним та віброакустичними впливами. Визначено три основні рекомендації по результатам запропонованого комплексного методу оцінки якості шихтованих магнітопроводів.

П'ятий розділ описує структурні та функціональні схеми дослідного макету для дослідження стану якості шихтованого магнітопроводу височастотним індукційним методом. Функціональна схема складається генератору синусоїдальних оливань високої частоти, блоку силових ключів на польових транзисторах, блоку живлення та блоку обробки та аналізу інформації. Структура вимірювально-діагностичної системи включає силову і вимірювальну частину, які пов'язані індукційним шляхом через об'єкт контролю на якому розташовано обмотку збудження та вимірювальну обмотку. пристрій дозволяє виконувати перевірку якості міжлистової ізоляції осердя електричних машин малої та середньої потужності (об'єктів) без застосування додаткових вимірювальних приладів.

Показані осцилограми бездефектних та дефектних магнітопроводів, що були отримані дослідним шляхом при вибраних тестових частотах 10кГц і 1кГц та відповідні їм амплітуди напруг на контрольній обмотці, відношення яких, дозволяють визначити діагностичний коефіцієнт K_d , який показує межі питомих втрат при $B_{1,0}/50$.

Вимірювання діагностичного коефіцієнту K_d за допомогою створеного макету дозволяє оцінити втрати в магнітопроводі різного рівня дефектності для чотирьох випадків:

1) Зелений колір – питомі втрати в магнітопроводі не перевищують 4 Вт/кг. Відповідає якісному магнітопроводу.

2) Жовтий колір – питомі втрати в магнітопроводі становлять від 4 до 8 Вт/кг. Магнітопровід першого ступеню дефектності. При його використанні потребується корекція паспортних даних зібраного на його основі двигуна.

3) Оранжевий колір – питомі втрати в магнітопроводі становлять від 8 до 12 Вт/кг. Відповідає магнітопроводу другого ступеню дефектності. При його використанні потребується суттєва зміна паспорту та перегляд режиму роботи.

4) Червоний колір – питомі втрати в магнітопроводі становлять більше 12 Вт/кг. Відповідає магнітопроводу аварійного стану. Рекомендується відбракувати магнітопровід.

Наукова новизна одержаних результатів в дослідженні полягає у наступному:

- Запропоновано індукційний метод контролю якості міжлистової ізоляції ламінованих магнітопроводів, який на відміну від існуючих, побудований на принципі порівняння реакції шляхів замикання вихрових струмів при наявності та відсутності дефектів на швидкоплинні процеси різної частоти в індукційно пов'язаних контурах збуджуючої та контрольної обмотки.

- Вдосконалено чисельну польову математичну модель швидкоплинних процесів в шихтованому магнітному осерді, яка на відміну від існуючих враховує нелінійні властивості магнітних матеріалів та явище гістерезису при зміні частоти перемагнічування.

- Вперше розроблено математичну модель, яка визначає зв'язок параметрів високочастотних процесів в випробуваних магнітних осердях з їх питомими втратами в змінних магнітних полях промислової частоти та індукціях, рекомендованих до нормативних випробувань та близьких до індукцій при роботі електричних машин.

- Обґрунтовано нову методику визначення ступеня пошкодження міжлистової ізоляції шихтованих магнітопроводів електричних машин при

наявності інтегральних і локальних дефектів з подальшими рекомендаціями до відбраковки магнітопроводів.

- на базі побудованих математичних моделей теоретично обґрунтовано можливі діагностичні ознаки шихтованих магнітопроводів електричних машин, які орієнтовані на використання ударного вібраційного сигналу з одночасним електромагнітним комутаційним впливом.

Отримані результати розкривають нові перспективи у вдосконаленні наявних методів діагностики міжлистової ізоляції в шихтованих магнітопроводах, сприяючи підвищенню надійності роботи електричних машин та збільшення терміну експлуатації.

Ключові слова: асинхронний двигун, асинхронний генератор, шихтований магнітопровід, технічний стан, дефект, температура, теплова енергія, електромагнітне поле, магнітна індукція, розподіл вихрових струмів, інформаційні сигнали, вібродіагностика, міжлистова ізоляція, діагностика, система діагностики, електротехнічне обладнання, польова математична модель, висока частота, вібраційні зусилля, розпушування листів магнітопроводу, втрати в магнітопроводі, втрати на вихрові струми, втрати на гістерезис, високочастотні впливи, інтегральні та локальні дефекти, високочастотний генератор, теплові схеми заміщення, мікроконтролер, індикаторний модуль, тепловізійний аналіз, аналогово-цифровий перетворювач, діагностичний параметр.

Список публікацій здобувача

1. В.В. Чумак, О.Л. Тимощук, А.С. Стулішенко, Є.С. Ігнатюк «Оцінка рівня дефектності шихтованих магнітопроводів електричних машин високочастотними методами», Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету, №1, Том 9, 2019, Мелітополь, doi: <http://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/issue/view/5>

2. V.V. Chumack, O.V. Vyshnevskiy, A.S. Stulishenko, Y.S. Ihnatiuk, IMPROVED HIGH-FREQUENCY MODEL OF ASYNCHRON MOTOR, April 2019, No. 3 (2018): Power engineering: economics, technique, ecology, DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2018.164026>

3. В.В. Чумак, О.Л. Тимошук, А.С. Стулішенко, Є.С. Ігнатюк, АНАЛІЗ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ З ВСИПНИМИ ОБМОТКАМИ НА ОСНОВІ ЛАНЦЮГОВИХ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ, Квітень 2019, №. 4 (2018): Енергетика: економіка, технології, екологія , DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2018.175643>

4. В.В. Чумак, М.А. Коваленко, Ю.О. Троценко. Є.С. Ігнатюк, А.С. Стулішенко, «RESEARCH OF PHYSICAL PROCESSES IN LAMINATED MAGNETIC CORES OF ELECTRIC MACHINES», Журнал –«Енергетика: економіка, технології, екологія», №4, 2021, Київ, с. 37-43, doi: <http://energy.kpi.ua/issue/view/15107>

5. Mykola Ostroverkhov, Vadim Chumack, Oksana Tymoshchuk, Mykhailo Kovalenko, Yevhen Ihnatiuk, Designing a voltage control system of the magnetoelectric generator with magnetic flux shunting for electric power systems, October 2022 Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 5(5 (119)):16-25 DOI: 10.15587/1729-4061.2022.265861 (**Scopus Q3**)

6. 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. June 2023 Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 3, 54-63. DOI: [10.15587/1729-4061.2023.282375](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282375) (**Scopus Q3**)

7. 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. August 2023 Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 4, 6-15. DOI: [10.15587/1729-4061.2023.286002](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286002) (**Scopus Q3**)

8. Mykola Ostroverkhov, Vadim Chumack, Mykhailo Kovalenko, Yevhen Ihnatiuk, Magnetoelectric Generator with Magnetic Flux Shunting for Electric Power Complexes, October 2022, Conference: 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969246

9. Mykola Ostroverkhov, Vadim Chumack, Mykhailo Kovalenko, Yevhen Ihnatiuk, Electrical Generator with Magnetic Flux Shunting for Autonomous Power Units, October 2022, Conference: 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916440

10. V.V. Chumack, V.V. Kotliarova, Y.S. Ihnatiuk, COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE QUALITY OF THE AC MACHINE STATOR BY ELECTROMAGNETIC AND VIBROACOUSTIC METHODS, 2019 Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики"

11. V.V. Chumack, V.V. Kotliarova, Y.S. Ihnatiuk, EVALUATION OF THE DEFECT LEVEL OF ELECTRICAL MACHINES BY HIGH-FREQUENCY METHODS, 2019 Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики"

12. V.V. Chumack, V.V. Kotliarova, Y.S. Ihnatiuk, EVALUATION OF QUALITY OF INTERLAYER INSULATION OF LAMINATED MAGNETIC CORES BY HIGH-FREQUENCY EFFECTS, 2020 Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики"

13. V. V. Kotliarova, A. S. Stulishenko, O. V. Vishnevskii, Y. S. Ihnatiuk, IMPROVED HIGH-FREQUENCY MODEL OF ASYNCHRONOUS MOTOR, 2020 Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики"

14. V.V. Chumack, V.V. Kotliarova, M.A. Kovalenko, V.A. Svyatnenko, Y.S. Ihnatiuk, DISTRIBUTION OF MAGNETIC INDUCTION IN LAMINATED MAGNETIC CORE WITH INTERSHEET INSULATION CONTROL, 2021 Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики"

ABSTRACT

Ihnatiuk Y.S. Diagnostics of magnetic cores of electric machines under high-frequency influences. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" MES of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is focused on solving the problem of diagnosing the condition of laminated cores and the quality of inter-sheet insulation in general-purpose electric machines. The work focuses on the development and implementation of an effective methodology that provides a comprehensive assessment of the state of the EM magnetic core of general purpose.

The first chapter describes the influence of technological factors on the characteristics of laminated magnetic cores of electric machines and an overview of existing methods for diagnosing the state of the inter-sheet insulation and the level of looseness of the package. The reasons for the occurrence of defects in laminated magnetic cores during the production and repair process are given. The analysis of the existing methods of diagnosing the state of the quality of laminated cores, which are used to detect damage and possible prediction of EM failure, is shown. The main types of defects that can occur in magnetic cores, the consequences of their influence on the general and local condition of the magnetic core, as well as on the operation of the electric machine as a whole, are analyzed. The wattmeter method of diagnosis, the method of thermal imaging control, and the vibroacoustic methods of diagnosing EM magnetic cores are described in more detail as the most informative and suitable for creating a system of complex diagnostics of laminated cores.

The second chapter presents the physical basis of the connection between the parameters of high-frequency transient processes and the specific losses in laminated magnetic cores, and describes the method of evaluating the quality of laminated cores, which is based on the reaction of the tested magnetic core to fast-moving induction influences.

Statistical estimates of the relationship between the parameters of fast-moving induction processes in the magnetic core and losses due to remagnetization at industrial frequencies are given.

A statistical analysis of the experiments performed by the high-frequency induction method was carried out to investigate the actual state of defect-free and defective laminated magnetic cores of different geometric designs, power and polarity.

The regression dependence is determined and confidence intervals are given for assessing the accuracy of the measured diagnostic parameters. Four degrees of defectiveness of magnetic cores and corresponding limits of diagnostic parameters are defined.

A significant correlation was established between the specific losses in the $P_{1.0/50}$ magnetic core and the total magnetic losses and temperatures in the windings in assembled and working machines of different power and magnetic core geometry. It is shown that as a result of establishing the diagnostic parameters and related specific losses in the cores, it is necessary to carry out post-repair certification of the machine with a justified reduction of the load to ensure the estimated work resource.

Recommendations are provided for changing the nominal power of the machine depending on the level of defectiveness of the magnetic core used in it.

The third section is devoted to the mathematical modeling of high-frequency processes by the proposed induction method of quality control of laminated magnetic cores of general-purpose electric machines. The parameters of the defect-free magnetic core are described and substantiated. Field and mathematical modeling of defective and defect-free bundles of electrical steel sheets was carried out in the COMSOL Multiphysics software environment.

The influence of the development of magnetic core defects associated with specific losses on eddy currents was analyzed by modeling the change in the electrical conductivity of the steel material, increasing the thickness of the magnetic core sheets, and the formation of parasitic eddy current contours corresponding to local and integral defects. Local defects were modeled by metallic shorting of adjacent plates, and integral defects by increasing the inter-sheet transverse electrical conductivity of the package.

The processes taking place are described physically and mathematically on the example of a conventional batched package of 10 plates with a thickness of 0.5 mm, which was then experimentally investigated during the physical modeling of integral and local defects. The results of modeling and experimental studies showed a good convergence, which does not exceed 10% in the estimation of total losses in the magnetic core according to the proposed induction method. Based on the obtained data, a field mathematical model was created in the COMSOL Multiphysics software package. Mathematical modeling and experimental studies of the 4A90L4U3 magnetic circuit were carried out. According to the results of modeling and experimental studies, diagnostic features were proposed for the evaluation of magnetic cores of different degrees of defectiveness of inter-sheet insulation.

A study of the effect of a local defect in the magnetic core in the gear area of the AIR100L4U3 motor in the assembled motor with embedded thermal sensors in the defective and defect-free parts of the machine was carried out. Local losses in defective and non-defective zones, as well as temperatures in the windings, which were laid in defective and non-defective parts, were estimated based on the results of the calculation based on the created thermal substitution schemes and the measured temperatures during the operation of the assembled motor. The danger of local defects of the toothed area in the magnetic cores, which can lead to the failure of the interturn insulation of the part of the winding located in the grooves between the defective teeth, is assessed.

The fourth chapter describes the method of assessing the quality of laminated magnetic cores based on the state of inter-sheet insulation and the level of loosening of magnetic core sheets. The method makes it possible to justify recommendations for the further use of the core based on the results of the analysis of diagnostic effects with the simultaneous use of fast-moving induction effects and impact vibration effects in the ratio of defects of various origins.

The laboratory samples of the information and measurement system (IMS) for the diagnosis of laminated magnetic cores of various pressing conditions were examined, which were experimentally verified during the performance of relevant studies. The

structural diagrams are presented, the work algorithms, structure and main functions of the software included in the developed IBS are described.

A number of experiments were conducted at the laboratory base of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Kyiv.

A combination of experiments with simultaneous induction and vibroacoustic effects is described and shown. Three main recommendations based on the results of the proposed comprehensive method of assessing the quality of charged magnetic conductors have been determined.

The fifth chapter describes the structural and functional schemes of the experimental layout for researching the state of the quality of the laminated magnetic core by the high-frequency induction method. The functional scheme consists of a generator of high-frequency sinusoidal oscillations, a block of power switches on field-effect transistors, a power supply unit and a block of information processing and analysis. The structure of the measuring and diagnostic system includes the power and measuring part, which are connected by induction through the control object on which the excitation winding and the measuring winding are located. the device allows you to check the quality of the inter-sheet insulation of the core of small and medium power electric motors (objects) without the use of additional measuring devices.

Shown are the oscillograms of defect-free and defective magnetic cores obtained experimentally at the selected test frequencies of 10kHz and 1kHz and the corresponding voltage amplitudes on the control winding, the ratio of which allows determining the diagnostic coefficient K_d , which shows the limits of specific losses at $B_{1.0/50}$.

Measuring the diagnostic coefficient K_d with the help of the created layout makes it possible to estimate the losses in the magnetic core of different levels of defectivity for four cases:

1) Green color - specific losses in the magnetic core do not exceed 4 W/kg. Corresponds to a high-quality magnetic core.

2) Yellow color - specific losses in the magnetic core are from 4 to 8 W/kg. Magnetic core of the first degree of defect. When using it, it is necessary to correct the passport data of the motor assembled on its basis.

3) Orange color - specific losses in the magnetic core are from 8 to 12 W/kg. Corresponds to the magnetic core of the second degree of defect. When using it, a significant change in the passport and revision of the work regime is required.

4) Red color – specific losses in the magnetic core are more than 12 W/kg. Corresponds to the magnetic core of the emergency state. It is recommended to reject the magnet core.

The scientific novelty of the results obtained in the study is as follows:

- An induction method for quality control of the inter-sheet insulation of laminated magnetic core is proposed, which, unlike the existing ones, is based on the principle of comparing the reaction of the eddy current closing paths in the presence and absence of defects to fast-flowing processes of different frequencies in the induction-connected circuits of the exciting and control windings.

- The numerical field mathematical model of fast-flowing processes in a laminated magnetic core has been improved, which, unlike the existing ones, takes into account the nonlinear properties of magnetic materials and the phenomenon of hysteresis when changing the frequency of remagnetization.

- For the first time, a mathematical model was developed that determines the relationship between the parameters of high-frequency processes in the tested magnetic cores and their specific losses in variable magnetic fields of industrial frequency and inductions recommended for regulatory tests and close to inductions during the operation of electric machines.

- A new methodology for determining the degree of damage to the inter-sheet insulation of laminated magnetic cores of electric machines in the presence of integral and local defects is substantiated, with further recommendations for the rejection of magnetic cores.

- on the basis of the constructed mathematical models, the possible diagnostic features of laminated magnetic cores of electric machines, which are oriented to the use of a shock vibration signal with a simultaneous electromagnetic switching effect, are theoretically substantiated.

The obtained results reveal new perspectives in improving the available methods of diagnosing inter-sheet insulation in laminated magnetic cores, contributing to increasing the reliability of electric machines and increasing their service life.

Keywords: asynchronous motor, asynchronous generator, laminated magnetic core, technical condition, defect, temperature, thermal energy, electromagnetic field, magnetic induction, eddy current distribution, information signals, vibration diagnostics, inter-sheet insulation, diagnostics, diagnostic system, electrical equipment, field mathematical model, high frequency, vibrational forces, loosening of magnetic core sheets, magnetic core losses, eddy current losses, hysteresis losses, high-frequency influences, integral and local defects, high-frequency generator, thermal substitution circuits, microcontroller, indicator module, thermal imaging analysis, analog-to-digital converter, diagnostic parameter.

Зміст

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАК ТА СКОРОЧЕНЬ	19
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1 ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВІДІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ЇХ СТАНУ	27
1.1 Причини виникнення дефектів шихтованих магнітопроводів в процесі виробництва та ремонту	27
1.1.1 Вплив зусиль пресування	28
1.1.2 Погіршення електромагнітних характеристик магнітопроводу в процесі виробництва	29
1.1.3 Погіршення якості шихтованих магнітопроводів в процесі експлуатації та ремонту, спайка, розпушування.....	32
1.1.4 Локальні дефекти магнітопроводів	37
1.2 Існуючі методи контролю визначення стану шихтованих магнітопроводів електричних машин.....	38
1.2.1 Ваттметровий метод оцінки втрат	38
1.2.2 Температурно-часовий метод	39
1.2.3 Перевірка якості пресування магнітопроводу за допомогою щупа....	40
1.2.4 Метод термоіндикаторного покриття	41
1.2.5 Використання тепловізійного контролю для перевірки активної сталі в електричних машинах	42
1.3 Високочастотні індукційні засоби контролю шихтованих магнітопроводів	44
1.4 Існуючі методи та засоби діагностики вузлів електротехнічного обладнання з використанням вібраційного сигналу	48
1.4.1 Сучасні технічні засоби вібраційної діагностики	51
1.4.2 Засоби для створення ударного впливу	55
Висновки до Розділу 1	60

РОЗДІЛ 2 ОПИС МЕТОДУ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ЛАМІНОВАНИХ ОСЕРДЬ, ФІЗИЧНІ ТА СТАТИСТИЧНІ ОЦІНКИ ЗВ'ЯЗКУ ПАРАМЕТРІВ ШВИДКОПЛИННИХ ІНДУКЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ З ВТРАТАМИ НА ПЕРЕМАГНІЧУВАННЯ.....	61
2.1 Фізичні основи зв'язку параметрів високочастотних перехідних процесів з питомими втратами в шихтованих магнітопроводах.....	61
2.2 Вибірка по зв'язку коефіцієнту дефектності і геометричних розмірів для якісних магнітопроводів	73
2.3 Визначення коефіцієнту кореляції і лінійний регресійний аналіз вбірок по зв'язку питомих втрат і узагальненого діагностичного параметру ..	78
2.4 Встановлення зв'язку між питомими втратами в окремому магнітопроводі з загальними втратами в зібраному двигуні.....	86
Висновки до Розділу 2	91
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРОЦЕСІВ В ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПРИ НАЯВНОСТІ ІНТЕГРАЛЬНИХ І ЛОКАЛЬНИХ ДЕФЕКТІВ МІЖЛИСТОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ	92
3.1 Розрахунок високочастотних процесів при наявності інтегральних дефектів	92
3.2 Моделювання бездефектного та дефектного шихтованого магнітопроводу	93
3.3 Математичне моделювання різних дефектів міжлистової ізоляції магнітопроводу при високочастотних впливах.....	107
3.4 Експериментальні дослідження низки реальних магнітопроводів різного ступеню дефектності за допомогою ватметрового способу	112
3.5 Розділення вимірюваних втрат на складові	113
Висновки до Розділу 3	147
РОЗДІЛ 4 ВИКОРИСТАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ВПЛИВІВ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ	148

4.1 Теоретичне обґрунтування діагностичних параметрів для ударної діагностики вузлів електрообладнання	148
4.2 Лабораторний зразок ІВС ударної діагностики елементів конструкції потужного ЕО	150
4.3 Програмне забезпечення для визначення чисельних параметрів розподілу та гістограмного аналізу по системі кривих Пірсона	151
4.4 Програма спектрально-кореляційного аналізу вібрацій окремих вузлів.....	155
4.5 Визначення ступеня пресування шихтованих магнітопроводів за допомогою ІВС ударної діагностики	158
4.6 Сумісний вплив комутаційних та вібраційних збурень	165
4.7 Розрахунок перехідного процесу.....	166
4.8 Експериментальні дані.....	172
Висновки до Розділу 4	178
РОЗДІЛ 5 АПАРАТНІ ЗАСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВІДІВ ЗАПРОПОНОВАНИМ МЕТОДОМ	180
5.1 Макетний зразок апаратури для діагностики ламінованих осердь.....	180
5.2 Система блоку генератора високої частоти.....	182
5.3 Розробка схеми силового ключа.....	188
5.4 Блок індикації на платформі Arduino	193
5.4.1 Вхідний підсилювач.....	193
5.4.2 Аналогово-цифровий перетворювач з цифровою обробкою даних ...	195
5.4.3 Клавіатура до Arduino.....	199
5.4.4 Рідкокристалічні індикатори.....	200
5.4.5 Загальна схема блоку вимірювання	202
5.4.6 Методика визначення рівня дефектності.....	203
Висновки до Розділу 5	206
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	207
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	213
Додаток А Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	223

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАК ТА СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун;

ЕМ – електрична машина;

ЕМПЕ – електромеханічний перетворювач енергії;

ЕРС – електрорушійна сила;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

АМ – асинхронна машина;

ХХ – холостий хід;

КЗ – коротке замикання;

КЗ виток – короткозамкнений виток.

$tg \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат

FEM – Метод скінченних елементів (Finite Element Method)

$K_{тр}$ – коефіцієнт трансформації трансформатора

t – час, с

T – період, с

f – частота напруги, Гц

R – електричний опір, Ом

ЕТС – еквівалентна теплова схема

ЕО – електрообладнання

ІВС – інформаційно вимірювальна система

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність роботи полягає в підвищенні надійності електричних машин шляхом удосконалення методів та пристроїв перевірки стану та діагностики шихтованих осердь ЕМ загального і спеціального призначення з метою обґрунтованої оцінки зміни робочих властивостей в цілому та з наданням рекомендацій по подальшій їх експлуатації. Для вирішення цієї задачі потрібно визначити критерії якості шихтованих магнітопроводів ЕМ, обґрунтованого відбракування осердь аварійного стану та визначення показників надійності АД в процесі технічного обслуговування та ремонту.

Для вирішення цієї задачі потрібно визначити критерії якості шихтованих магнітопроводів ЕМ, з метою обґрунтованого відбракування осердь аварійного стану, надання рекомендацій по післяремонтній експлуатації ЕМ з магнітопроводом погіршеної якості різного рівня та визначення показників надійності АД в процесі технічного обслуговування та ремонту.

Найбільш радикальним способом підтримання надійної роботи будь-якого електротехнічного комплексу є своєчасна заміна відпрацьованих вузлів, в тому числі і електричних машин на нові. Такий підхід спрощує систему сервісного обслуговування електричних машин в процесів їх експлуатації, зменшує затрати за рахунок відмови від середніх та капітальних ремонтів.

Однак в значній кількості випадків швидка заміна пошкодженої машини на нову не завжди можлива або суттєво ускладнена і супроводжується значними матеріальними витратами. Рішення про заміну відбракованої машини на нову або її ремонт приймається замовником на основі рекомендацій ремонтного підприємства.

В деяких випадках ремонт машини в рази дешевший ніж заміна на нову. Наприклад заміна малопотужного однофазного асинхронного двигуна в системі Grundfos Sololift на новий обійдеться в 4-6 разів дорожче ніж повний капітальний ремонт.

Магнітопровід є активною частиною електричних машин та один з найважливіших вузлів, що не підлягають заміні в процесі обслуговування та

ремонту. Погіршення стану шихтованого осердя викликає підвищене тепловиділення, вібрацію та механічні пошкодження осердь та конструкції ЕМ в цілому.

Питаннями дослідження надійності та енергетичної ефективності електричних машин присвячено роботи видатних вітчизняних та закордонних вчених таких як Счастливий Г.Г., Тітко О.І., Загірняк М.В, Прус В.В., Федоренко Г.М., Шумілов Ю.А., Васьковський Ю.М., Шинкаренко В.Ф., Пересада С.М., Розен В.П., Бешта О.С., Петрушин В.С., Копилов І.П., Радін В.І., Мілих В.І., Войтех О.А., Ращепкін А.П., Родькін Д.Й., Чорний О.П., Попович О.М., Вакуленко К.М., Плюгін В.Є., Єрмолін Н. П., Жеріхін І.П., Гольдберг О.Д., Котеленець Н.Ф., Хелемська С.П., Peter Tavner, Shahriyar Kaboli, Paolo Giangrande, Vincenzo Madonna, Giampaolo Buticchi, Keith E. Holbert, Michael Galea, Chris Gerada, He Zhang, Stephen Umans, Aldo Sornioti, Ming Cheng, Howard E. Jordan та інших.

Не зважаючи на велику кількість досліджень проблеми надійності експлуатації електричних машин залишаються до кінця не вирішеними. Однією з таких проблем є відсутність ефективних методів та апаратних засобів зручної, швидкої та малозатратної діагностики стану шихтованих магнітопроводів як одного з найбільш важливих вузлів електричної машини в цілому.

Мета і завдання дослідження. Теоретичне та експериментальне обґрунтування можливості використання швидкоплинних мультифізичних процесів для комплексної перевірки рівня дефектності шихтованих магнітопроводів щодо визначення їх фактичного стану, обґрунтованої оцінки експлуатаційних параметрів, характеристик електричних машин та рекомендацій по їх подальшій експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз існуючих методів та засобів діагностики ламінованих осердь. Визначити найбільш інформативні методи придатні для створення діагностично-вимірювальної системи для комплексної оцінки якості стану міжлистової ізоляції та щільності пресування магнітопроводів;

2. Надати порівняльний аналіз запропонованих високочастотних індукційних методів з існуючими методами перевірки магнітопроводів, пов'язаних з оцінкою питомих втрат в магнітопроводі, що на даний час є нормативним методом;

3. Розробити математичну модель високочастотних індукційних процесів в шихтованих магнітопроводах електричних машин, що дозволяє аналізувати особливості протікання вихрових струмів в якісних та пошкоджених ламінованих осердях при наявності дефектів міжлистової ізоляції різного типу та ступеню в широкому діапазоні частот перемагнічування;

4. Провести статистичну оцінку зв'язку параметрів перехідного процесу, покладеними в основу запропонованого методу з питомими втратами в магнітопроводах при фіксованому значенні індукції та промисловій частоти для великої кількості осердь реальних двигунів різної геометрії та потужності.

5. Вибрати та адаптувати найбільш інформативну та зручну систему вібродіагностики стану пресування магнітопроводу придатну для її поєднання з запропонованими високочастотними індукційними методами, яка дозволить надати обгрунтовані рекомендації для подальшої експлуатації магнітопроводу;

6. Розробити діагностичну систему та макет пристрою оцінки стану магнітопроводів, що дозволить оперативно визначити ступені дефектності магнітопроводів.

Об'єктом дослідження є шихтовані магнітопроводи електричних машин та апаратів.

Предметом дослідження є мультифізичні високочастотні електромагнітні та ударно-вібраційні процеси в шихтованих магнітопроводах електричних машин та апаратів.

Методи досліджень. Вирішення поставлених у роботі задач здійснювалося з використанням: загальної теорії електромеханічних перетворювачів енергії, методів математичного моделювання, в основі яких лежить чисельне розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь, методів теорії планування експерименту математичної статистики та фізичного моделювання при експериментальних

дослідженнях, відомих методик розрахунку швидкоплинних електромагнітних процесів методом скінчених елементів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- Запропоновано індукційний метод контролю якості міжлистової ізоляції ламінованих магнітопроводів, який на відміну від існуючих, побудований на принципі порівняння реакції швидкоплинних процесів різної частоти на шляхи замикання та інтенсивність вихрових струмів при наявності та відсутності дефектів магнітопроводу в індукційно пов'язаних контурах збуджуючої та контрольної обмотки.

- Вперше запропоновано метод комплексної оцінки якості шихтованих магнітопроводів, побудований на принципі визначення параметрів мультифізичного високочастотного електромагнітного і ударно-вібраційного процесу, які можуть служити вагомими діагностичними ознаками цілісності міжлистової ізоляції та рівня пресування пакету.

- Вперше розроблено математичну модель, яка дозволяє оцінити зв'язок параметрів високочастотних процесів в випробуваних магнітних осердях з їх питомими втратами в змінних магнітних полях промислової частоти та індукціях, рекомендованих до нормативних випробувань.

Отримані результати розкривають нові перспективи у вдосконаленні наявних методів діагностики міжлистової ізоляції в шихтованих магнітопроводах, сприяючи підвищенню надійності роботи електричних машин та збільшення терміну експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів:

Розроблена принципова та конструктивна схема, що дозволяє обробляти отриману інформацію про рівень дефектності магнітопроводів, яка може бути представлена в зручному вигляді для контрольної системи;

Розроблено макетний зразок пристрою контролю якості шихтованих магнітопроводів, який дозволяє провести оцінку інтегрального рівня якості міжлистової ізоляції та враховувати небезпечний вплив локальних дефектів;

Розроблено комплексний метод оцінки якості шихтованих магнітопроводів, що дозволяє одночасно перевіряти стан міжлистової ізоляції то послаблення пресування пакету магнітопроводу;

Обґрунтовано нову методику визначення ступеня пошкодження міжлистової ізоляції шихтованих магнітопроводів електричних машин при наявності інтегральних і локальних дефектів з подальшими рекомендаціями до відбракування магнітопроводів.

Обґрунтовано інформативний, швидкий та зручний метод тепловізійного контролю місцевих дефектів шихтованого магнітопроводу, який можна проводити одночасно з ватметровим способом оцінки питомих втрат. Ця методика дозволяє виявляти локальні дефекти за допомогою тепловізора протягом однієї хвилини шляхом визначення швидкості та порівняння зміни градієнту температур в дефектних та бездефектних зонах при нагріві індукційним методом.

Обґрунтовано методику визначення ступеня пошкодження міжлистової ізоляції шихтованих магнітопроводів електричних машин при наявності інтегральних і локальних дефектів з подальшими рекомендаціями до відбракування магнітопроводів.

Розроблено та виготовлено макетний зразок оцінки стану міжлистової ізоляції магнітопроводу, що дозволяє оперативно визначити рівень якості та ступені дефектності магнітопроводів як в умовах ремонтних підприємств з будь-яким рівнем технічної оснащеності.

Особистий внесок здобувача. Основні результати роботи отримані автором самостійно.

Безпосередньо дисертантом здійснено:

- за результатами літературно-патентного пошуку за темою дисертаційного дослідження проведено аналіз існуючих сучасних методів, способів та засобів для діагностики якості електричних машин;
- обґрунтовано вибір височастотного методу для дослідження стану міжлистової ізоляції електричних машин загального призначення;

- досліджено вплив високочастотних сигналів на рівень втрат в шихтованих осердях;

- розроблено чисельну польову математичну модель в програмному пакеті COMSOL Multiphysics для дослідження високочастотних впливів на дефектні та бездефектні ламіновані осердя;

- участь у проведенні експериментальних досліджень, їх обробці та аналізі.

Апробація результатів дисертації. Проміжні результати роботи доповідалися на:

- Mykola Ostroverkhov, Vadim Chumack, Mykhailo Kovalenko, Yevhen Ihnatiuk, Magnetoelectric Generator with Magnetic Flux Shunting for Electric Power Complexes, October 2022, Conference: 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969246;

- Mykola Ostroverkhov, Vadim Chumack, Mykhailo Kovalenko, Yevhen Ihnatiuk, Electrical Generator with Magnetic Flux Shunting for Autonomous Power Units, October 2022, Conference: 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916440;

- V.V. Chumack, V.V. Kotliarova, Y.S. Ihnatiuk, METHOD OF DETERMINATION THE QUALITY OF THE MAGNETIC CORE, 2018 Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики";

- V.V. Chumack, V.V. Kotliarova, Y.S. Ihnatiuk, COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE QUALITY OF THE AC MACHINE STATOR BY ELECTROMAGNETIC AND VIBROACOUSTIC METHODS, 2019 Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики";

- V.V. Chumack, V.V. Kotliarova, Y.S. Ihnatiuk, EVALUATION OF THE DEFECT LEVEL OF ELECTRICAL MACHINES BY HIGH-FREQUENCY METHODS, 2019 Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики";

- V.V. Chumack, V.V. Kotliarova, Y.S. Ihnatiuk, EVALUATION OF QUALITY OF INTERLAYER INSULATION OF LAMINATED MAGNETIC CORES BY HIGH-FREQUENCY EFFECTS, 2020 Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики";

- V. V. Kotliarova, A. S. Stulishenko, O. V. Vishnevskii, Y. S. Ihnatiuk, IMPROVED HIGH-FREQUENCY MODEL OF ASYNCHRONOUS MOTOR, 2020 Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики";

- V.V. Chumack, V.V. Kotliarova, M.A. Kovalenko, V.A. Svyatnenko, Y.S. Ihnatiuk, DISTRIBUTION OF MAGNETIC INDUCTION IN LAMINATED MAGNETIC CORE WITH INTERSHEET INSULATION CONTROL, 2021 Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики".

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи представлені у 14 публікаціях наукових робіт, серед яких 3 статті у міжнародних журналах, які індексуються у наукометричній базі даних Scopus(Q3), 4 статтях у фаховому виданні України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації 224 сторінок, 105 ілюстрацій, 12 таблиць.

Представлена робота є логічним продовженням магістерської дисертації, яка була успішно захищена автором на кафедрі Електромеханіки у 2018 році.

РОЗДІЛ 1

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ЇХ СТАНУ

1.1 Причини виникнення дефектів шихтованих магнітопроводів в процесі виробництва та ремонту

Основне призначення магнітопроводу полягає у забезпеченні концентрації та проведення магнітного потоку у магнітній системі. Основним параметром є магнітна проникність, яка визначає величину струму намагнічування. Цей струм, в свою чергу, залежить від структури матеріалу, що використовується, та його складу.

До характерних дефектів магнітопроводу відносяться наступні проблеми: розслаблення посадки сердечника у корпусі, зміщення пакету вздовж осі, розпушування крайніх листів магнітопроводу, ослаблення пресування та порушення ізоляції між листами, що може спричинити місцеве плавлення деяких ділянок.

Пошкодження ізоляції між листами магнітопроводу може виникати під час експлуатації або під час ремонту у майстернях. Також може спостерігатися порушення технології виготовлення, пресування та при перешихтуванні магнітопроводу.

Основні дефекти ізоляції можна розділити на інтегральні та локальні види.

Інтегральні дефекти представлені точковими перекриттями, які випадковим чином розміщуються вздовж ширини пакету.

Локальні дефекти - це пошкодження, розташовані на активній поверхні магнітопроводу і не поширюються углиб магнітопроводу.

Пошкодження ізоляції між листами спричиняє збільшення контурів замикання вихрових струмів. Це, в свою чергу, збільшує втрати через вихрові струми, при цьому втрати через гістерезис залишаються практично постійними. У

звичайному магнітопроводі компонента втрат через гістерезис значно перевищує компоненту втрат через вихрові струми у декілька разів.

Вирішальними є питомі втрати в магнітопроводі, що складаються з втрат через вихрові струми та втрат через перемагнічування. Втрати через перемагнічування залишаються майже сталими, тоді як втрати через вихрові струми зростають зі збільшенням кількості дефектних контурів, через які виникають вихрові струми.

Збільшення втрат через вихрові струми призводить до місцевих перегрівів та змін у тепловому режимі машини в цілому та на окремих ділянках. Найбільш небезпечними є перегрівання та можливість вигорання обмоток.

Пошкодження ізоляції між листами призводить до локальних перегрівів, які можуть бути контрольовані за допомогою термодатчиків, розміщених у активній сталі статора, тепловізорів або спеціальних термоіндикаторів, нанесених на критичні за перегрівом ділянки машини. Ці покриття застосовуються на поверхні таких критичних зон. При певній температурі виділяються спеціальні аерозолі та гази, які застосовуються для хімічного аналізу охолоджуючого газу. На різних ділянках машини використовують покриття з різним хімічним складом, що дозволяє фіксувати точки перегріву та визначати їх причини.

Також можуть бути встановлені термоетикетки на небезпечні ділянки, які змінюють колір при досягненні певної температури. Перевірка цих «етикеток» можлива тільки коли машина зупинена.

Діагностика шихтованих магнітопроводів відноситься до питань надійності електричних машин та будь яких електромеханічних перетворювачів енергії, електричних апаратів робота яких пов'язана зі змінним магнітним полем.

1.1.1 Вплив зусиль пресування

Достатня ізоляція між листами та підвищення щільності пресування – дві протилежні тенденції у технологічному процесі.

При підвищенні тиску під час пресування листи одночасно деформуються, разом із зростанням коефіцієнта заповнення сердечника сталлю. Це призводить до

зменшення електричного опору між ізольованими листами, а, отже, до збільшення вихрових струмів.

У випадку сердечників, які закріплені скобами, зварюванням та іншими методами, помітне погіршення параметрів статора не спостерігається навіть після зменшення тиску до рівня 100-150 МПа.

Фактичний питомий тиск між листами в готовому сердечнику після закріплення та видалення відрізняється від питомого тиску, який утворюється під час процесу пресування.

Максимальні напруження в сердечнику проявляються при його закріпленні за допомогою шайби. У такому випадку:

- під час заповнення стрижнів в сердечники впливає великий тиск перед заливкою (наприклад, при заповненні статорів малої і середньої потужності питомий тиск сягає 550 МПа);
- забезпечується максимальна площа контакту кріпильних елементів з торцями та діаметральними поверхнями сердечника; додаткові тиски, породжені охолодженням заповнених статорів, також впливають на сердечник.

Підвищення питомого тиску пресування призводить до помітного погіршення властивостей сердечників. Наприклад, при тиску близько 550 МПа збільшення питомих втрат у сталі при індукції $B = 1,5$ Тл та частоті $f = 50$ Гц склало 46%; при зниженні тиску з 550 до 60 МПа питомі втрати зменшилися на 10%.

1.1.2 Погіршення електромагнітних характеристик магнітопроводу в процесі виробництва

Листи електротехнічної сталі піддаються різним виробничим процесам під час виготовлення магнітопроводів для електромашин. Кожен з цих виробничих процесів впливає на фізичні та магнітні характеристики листового матеріалу.

Нижче наведено найбільш поширені етапи виробництва та їх наслідки.

Різання

Для отримання потрібної форми листа магнітопроводу застосовують штампування або різання з електричної сталі, що призводить до деформації, яка

майже досягає міжмолекулярної взаємодії. Ця деформація має вплив на проникність та робочу ефективність електричних машин, модифікує розподіл щільності магнітного потоку та підвищує втрати енергії.

Існує безліч методів різання матеріалу, серед яких штампування, різання та лазерне різання – найбільш розповсюджені. Ступінь деформації молекулярної структури кристала залежить від численних факторів самого процесу різання та властивостей листового матеріалу. Знос різального інструменту під час штампування, низька швидкість лазерного різання, великий розмір зерна та високий вміст кремнію збільшують ступінь зношування. Крім того, деформація матеріалу (задинок) безпосередньо на кромці штампку або різання створює додаткові контури короткого замикання під час складання пакетів з магнітопроводу, що підвищує втрати, що викликаються вихровими струмами.

Було проведено значну кількість досліджень, щоб дослідити та уточнити вплив деформацій, викликаних процесами різання. Деякі з цих наукових висновків спрямовані на аналіз різних видів зрізів. У роботі [11], було виявлено, що погіршення магнітних характеристик ізотропної електротехнічної сталі, що виникає внаслідок штампування, спостерігається на відстані до 10 мм від краю оброблення; при цьому значний вплив помічено на відстані до 5 мм від межі оброблення. Подібні висновки були підтверджені в роботі [12], яка проводилась на іншому об'єкті експерименту.

У статті [13] проводились дослідження впливу перфорації на розподіл магнітного поля та втрату потужності в зоні зуба. У своєму дослідженні автор моделював ефект перфорації як поступове експоненціальне зменшення проникності від центру зуба до його країв, застосовуючи рівняння (1.1), (1.2).

$$\mu_{\text{зубця}} = \mu_{\text{листа}} e^{\frac{-ax}{d}}, \quad (1.1)$$

$$\hat{B} = \mu_{\text{листа}} \hat{H}. \quad (1.2)$$

Навіть при високій щільності магнітного потоку, коли ефект пробивання припиняється, і з урахуванням відносно малої площі, на яку має вплив пробивання в області зуба, потік намагнічування збільшується приблизно на 5-10%.

Порівняння між процесами різання та лазерного різання було представлене у дослідженні [14]. Навпаки загальному уявленню, у роботі виявлено, що руйнування матеріалу під час лазерного різання є набагато більш виразним, ніж у випадку штампування. Це пояснюється тепловими напругами та зменшенням питомого опору теплоізоляції пластини через надзвичайно високу температуру на кромці під час лазерного різання.

Схожий висновок було зроблено в роботі [15], де вказано, що втрати від лазерного різання були вищими при низьких рівнях індукції, але нижчими при високих рівнях індукції порівняно з різанням, і подібна тенденція спостерігалася для пропускання.

Відпалювання

З вищезазначеної назви видно, що процес відпалу використовується для зниження залишкових напружень, що виникають внаслідок виробничих операцій. Однак через економічні обмеження відпал не є поширеною практикою у виробництві магнітних проводів.

Відпал передбачає однорідне нагрівання до встановленої температури, утримання цієї температури протягом певного часу, а потім поступове охолодження. Важливо, щоб охолодження було однорідним, оскільки в іншому випадку в матеріалі можуть утворюватись залишкові напруги, рівні або навіть перевищують ті, що були до відпалу. Визначена температура залежить від типу ізоляційного покриття, що застосовується на покриття листів. Додаткові витрати на відпал для поліпшення магнітних властивостей можуть бути обґрунтованими лише для дуже тонких листів [18].

Дослідження впливу відпалу на зрізи також були проведені і вказані у дослідженнях [13, 15]. Ці дослідження виявили значне зменшення втрат порівняно зі зразками, які не були піддані відпалу.

1.1.3 Погіршення якості шихтованих магнітопроводів в процесі експлуатації та ремонту, спайка, розпушування

Два найбільш розповсюджені методи з'єднання - зварювання та закріплення за допомогою скоб. Стискання з задирками створює додаткові міжламельні контури для вихрових струмів (рис. 1.1), що призводить до збільшення втрат.

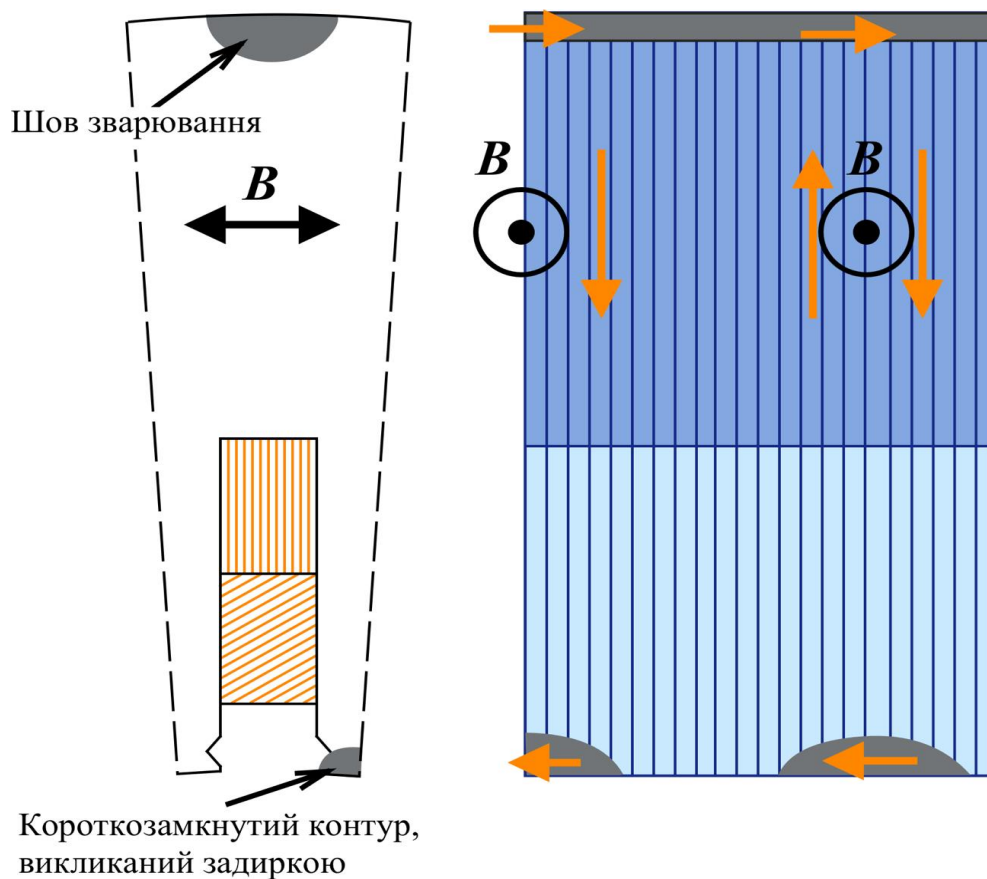


Рисунок 1.1 – Протікання струму між листами

У дослідженні [17] було виявлено, що підвищення втрат при зварюванні є більшим для електротехнічної сталі з крупним зерном.

Ремонт сердечників поділяють на місцевий, коли дефекти усуваються без перешихтовки, та ремонт з перешихтовкою частини або всього сердечника (зазвичай це потрібно лише для великих машин). Перешихтовка сердечників у малих машин, як правило, не є економічно доцільною і рідко виконується.

Ремонт сердечників здійснюється після видалення обмотки. виправлення дефектів на обмотаному осердді може призвести до пошкодження ізоляції та виходу обмотки з ладу під час подальшої експлуатації.

Місцевий ремонт передбачає відновлення ослабленого пресування, усунення дефектів на торцях сердечника та в місцях плавлення. У машинах з потужністю до 100 кВт зазвичай виправляють лише незначні дефекти, що виявляються після видалення обмотки.

Ремонт при ослабленні пресування сердечника

При загальному ослабленні пресування сердечників малих діаметрів між нажимною шайбою та зовнішніми листами через кожні 2...4 зубці забивають текстолітові клини для відновлення правильного пресування сердечника. Щоб визначити необхідну товщину клина, рекомендується попередньо обпресувати сердечник за тиску 1 МПа. Ширина клина не повинна перевищувати ширину зубця. Щоб запобігти випаданню клина під час установки, його обмашують клеєвим лаком та загинають крайній лист сердечника. При локальному ослабленні пресування сердечника статора, такому як дефект або випадіння вентиляційної розпірки, пошкоджену розпірку виправляють, а на місце випавшої вставляють текстолітовий клин, загинаючи крайні листи сердечника на обидва боки клина.

Ремонт при порушенні міжлистової ізоляції

Для виправлення порушень лакового покриття на невелику глибину, які спостерігаються на окремих сегментах поруч з місцем установки клинів, перед встановленням клина між цими сегментами використовують прокладки із слюди, покриті лаком БТ-99, які вдавлюються на глибину 20-35 мм. Якщо маємо локальні пошкодження ізоляції між листами статора, їх можна виправити за допомогою пелюсток слюди, вставлених між сегментами або шляхом ізоляції цих сегментів за допомогою рідкого лаку БТ-99. Для цього сегменти відокремлюються за допомогою спеціально вирізаних тонких сталевих смуг певної довжини.

Після намотування намагнічуючої та контрольної обмоток на статор, проводиться проходження струму через намагнічуючу обмотку для виявлення місць підвищеного нагріву, що може свідчити про ураження ізоляції.

Зона навколо пошкодженого місця очищується шпаклівкою і хімічно стійкою емаллю. Потім вже пошкоджену ділянку нагрівають до 75-105 °С за допомогою намагнічуючої обмотки, після чого, відключивши струм, область обробляють

концентрованою азотною кислотою. Після завершення травлення залишки кислоти нейтралізують за допомогою обробки 10% розчином кальцинованої соди протягом 4-5 разів: серветками, змоченими в цьому розчині, а потім ремонтване місце промивають гарячою дистильованою водою при температурі 40-60 °С. Після цього область очищається серветками і промивається спиртом.

Ремонт при вигоранні ділянки зубця сердечника

При випадках вигорання або оплавлення окремих ділянок зубця сердечника вони підлягають видаленню, а на їхнє місце встановлюється спеціальний "протез" з склотекстоліту. Це робиться для захисту обмотки від подальшого ушкодження. Видалення пошкодженої ділянки проводиться за допомогою гострого інструмента з можливим попереднім висвердлюванням, а потім усувають замикання аркушів матеріалу. Такий "протез" виготовляють на місці та кріплять за допомогою клею ЕЛ-4.

Усунення місцевих оплавлень активної сталі

Пошкодження ізоляції обмоток у пазовій частині, яке викликає електричну дугу, може призвести до локального оплавлення активної сталі в області одного-двох пакетів. Під час ремонту пошкодженого місця видаляють оплавлені листи так, щоб уникнути злипання листів між собою та розплавленої міді. Очищення проміжків між листами здійснюється за допомогою шліфувального каменю або гострого інструменту. Після видалення залишків листів займаються заливанням лаком БТ-99, після чого вставляють пластинки із слюди та закривають ділянку лаком БТ-99 на глибину не менше 10-15 мм.

При ремонті ушкодженої області у пазі вживають заходів для уникнення ушкодження обмотки. Для цього видалену зону наповнюють смужками текстоліту або гетинаксу або заповнюють спеціальною замазкою на основі епоксидної смоли. Перед наповненням видаленої зони проводять її очищення, видалення металевих та шліфувального пилу, продування стисненим сухим повітрям і очищення за допомогою уайт-спіриту. Після цього зону наповнюють металевою замазкою. Щоб запобігти витоку замазки з ремонтваної ділянки, вона попередньо розміщується у

горизонтальному положенні. Затвердіння замазки відбувається протягом 24 годин за кімнатної температури.

При ремонті великих пошкоджень, таких як видалення зубця на довжину одного-двох пакетів, застосовують наповнювачі з текстоліту або гетинаксу, які ретельно підганяють до місця пошкодження для гарного прилягання до сталі та обмотки. Ця ретельна підгонка дозволяє уникнути необхідності в спеціальному кріпленні заповнювача, оскільки його клиноподібна форма перешкоджає його випаданню з сердечника. Для додаткового закріплення заповнювача використовують пазові клини, змащені клеєвим лаком або клеєм БФ-2, та загинають краї суміжних аркушів сталі на заповнювач. Після завершення ремонту проводять повторні випробування активної сталі для оцінки ефективності ремонту з визначенням втрат і місцевих перегрівів.

При ремонті сердечників роторів встановлення зон заповнювачів з текстоліту або гетинаксу виконують за умови, якщо швидкість руху на поверхні сердечника не перевищує 20 м/с. Заповнювачі ретельно підганяють за місцем, виконуючи виступи по їх краях, які входять у вентиляційні канали під сусідні пази. Це дозволяє додатково закріпити заповнювач за допомогою обмотки, що розташована в сусідніх пазах. Якщо швидкість руху сердечника перевищує 20 м/с, встановлення заповнювачів з текстоліту або гетинаксу недопустиме, оскільки їх випадання може призвести до серйозних пошкоджень обмоток та активної сталі.

Усунення наслідків стирання зубців активної сталі статора з активною сталлю ротора відбувається через стирання активної сталі статора при зменшенні повітряного зазору між ротором і статором, що відбувається через знос підшипників. Довгочасне тертя ротора об статор призводить до утворення задирок на зубцях, пошкодження ізоляції між листами та місцевого перегріву активної сталі.

Для усунення цих дефектів використовується спеціальний ніж з пиляльним полотном. Ніж вводиться ударами молотка масою до 0,5 кг між сусідніми пластинами зубців активної сталі. Після усунення всіх задирок листи активної сталі по черзі розсовують за допомогою викрутки або ножа, а щілини заповнюють лаком

БТ-99, вкладаючи на глибину 10-15 мм пластинки із слюди товщиною 0,05-0,07 мм. Пошкоджені ділянки покривають лаком БТ-99. Після висихання лаку проводять випробування активної сталі. Порівнюючи результати випробувань до і після ремонту, проводять оцінку якості виконаних робіт з ізоляції листів.

Переізолювання листів активної сталі

Очищення листів сталі від старої ізоляції може проводитися різними методами. Механічні методи включають використання сталевих щіток, кардострічок або піскострумінного апарату для видалення лакової ізоляції. Хімічні методи можуть включати занурення листів у розчини, такі як 10%-вий розчин їдкого натру або 15%-вий розчин тринатрійфосфату, які підігрівають до 50°C. Розчини рекомендується використовувати з обережністю через їх високу токсичність, носити захисний одяг і працювати у вентильованому приміщенні.

Листи, які очищують від ізоляції, можна занурювати у розчин і залишати там до повного розпаду лакової плівки, а потім промивати в проточній воді, підігрітій до 70-80°C, і сушити. Для видалення паперової ізоляції листи також можна очищати у гарячій воді, доки папір і клей повністю не вийдуть.

Після очищення від ізоляції листи сталі необхідно негайно лакувати для запобігання корозії.

Сушіння лаку на листах сталі може виконуватися при температурі від 450 до 550°C, і тривалість цього процесу визначається через дослідні зразки. При зниженні температури сушіння слід збільшувати тривалість цього процесу.

У випадку великих і швидкохідних електричних машин з високою висотою спинки сердечника рекомендується лакувати листи сталі двічі. Товщину шару лаку варто підбирати методом дослідження. Після запікання товщина лакової плівки повинна бути в межах 0,015-0,02 мм, але в будь-якому випадку близькою до товщини шару в заводському виконанні. Це вимірюється перед і після лакування, а при вимірі за допомогою гідравлічного пристрою питомий тиск повинен бути в межах 1,2-1,3 МПа.

Важливо зазначити, що листи сталі, що проходять через гратознімальний верстат на заводі-виробнику, можуть мати нерівномірну товщину в зубцевій зоні порівняно з товщиною на спинці.

Ізольовані листи активної сталі можуть бути нерівномірними по товщині через відхилення в товщині матеріалу, які складають для гарячекатаних сталей $\pm 10\%$, а для холоднокатаних $\pm 8\%$. Крім цього, нерівномірність товщини листів може бути також результатом того, що лаковий шар в зубцевій зоні виходить тонше через більш інтенсивне вигоряння розчинника лаку.

1.1.4 Локальні дефекти магнітопроводів

Заводський процес, особливо при статичному пресуванні, створює підвищений тиск в певних частинах магнітопроводу, зазвичай у зоні зубців. Це через текстуру поверхні сталевих листів однакової товщини і наявність дефектів. Такі ураження можуть порушити ізоляцію, призводячи до локальних відмов через циркулюючі струми, які викликають місцеві підвищення тепловіддачі.

Коли провідність дефектів у певній зоні вище середньої, і щільність вихрових струмів значно збільшується під час роботи двигуна в цій зоні, це вже стає локальним дефектом, що призводить до підвищеної тепловіддачі.

Часто ремонтують двигуни у випадках, коли ротор неочікувано зривається від осі і зміщується, спричиняючи серйозні ушкодження в області зубів, так зване "зализування" частини поверхні, пластичне деформування пластин.

У багатьох ситуаціях дефект полягає в "вириванні" пластин зі зуба. Це може спричинити тріщини ізоляції між листами по всій висоті зубця.

У ремонтних майстернях відірвані та деформовані зубні пластини відновлюють до початкового положення за допомогою спеціальних кріплень.

Слід зазначити, що для двигунів, які перебувають у роботі і були піддані ремонту, важливість урахування місцевих дефектів вища, ніж при їх виготовленні.

Зазвичай якість магнітопроводу оцінюється за показниками питомих втрат під час перемагнічування, порівнюючи їх із табличними значеннями питомих втрат даного типу сталі з урахуванням технологічних коефіцієнтів механічної обробки і

з'єднання. Проте місцеві втрати є складовою загальних втрат, а їх наслідки складно належним чином урахувати.

1.2 Існуючі методи контролю визначення стану шихтованих магнітопроводів електричних машин

1.2.1 Ваттметровий метод оцінки втрат

Перевірка активної сталі на відсутність замикання між листами та визначення питомих втрат від вихрових струмів та перемагнічування є основними методами оцінки стану ізоляції між пластинами. Проведення цих випробувань до та після ремонту дозволяє оцінити ефективність виконаних заходів.

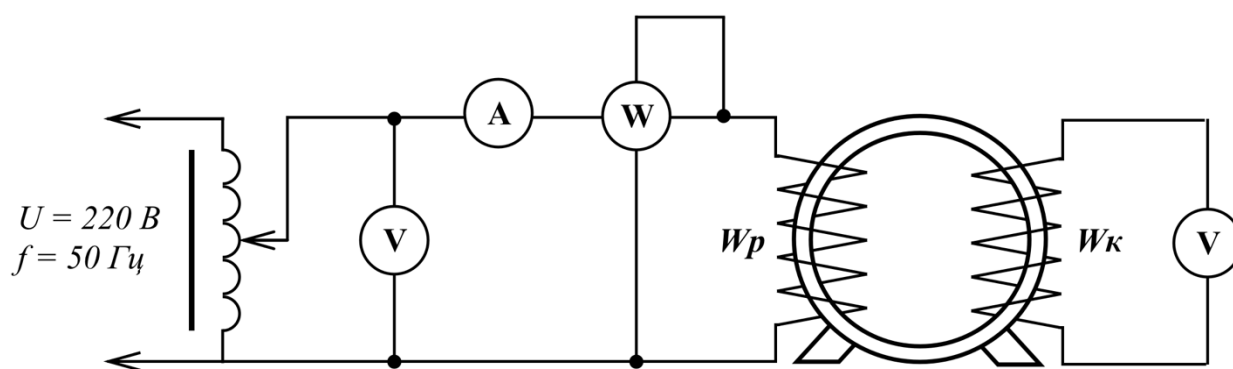


Рисунок 1.2 – Схема дослідження активної сталі ваттметровим методом

Випробування здійснюються у випадку наведення магнітної індукції на рівні 1 Тл або наближеної до цієї величини за умов частоти змінного струму 50 Гц. Наведення магнітного потоку виконується шляхом пропускання струму через намагнічувальну обмотку W_p , зображену на схемі випробування (рис. 1.2).

Сердечник статора перевіряють у розібраному стані машини. Випробування сердечника ротора або якоря можливе, якщо їх конструкція дозволяє намотати намагнічуючу обмотку.

Намагнічувальну обмотку рівномірно розміщують по колу сердечника статора або ротора і використовують мідний або алюмінієвий монтажний провід без металевої захисної оболонки. Також можна використовувати обмотувальний дріт, додатково ізольований бавовняним або скляним стрічками, просоченими

лаком. Для запобігання пошкодженню ізоляції проводу, обмотку намотують на підкладки з дерева або електрокартону.

Для отримання форми напруги, яка найбільш наближена до синусоїдальної, рекомендується живити намагнічувальну обмотку лінійною (а не фазною) напругою. З'єднання обмотки з джерелом живлення здійснюється через окремі запобіжники та двополюсний рубильник, які обрані залежно від струму, який споживається намагнічувальною обмоткою.

Для контролю параметрів під час випробування використовується контрольна обмотка W_k ввімкнення якої також показане на схемі (рис. 1.2). Усі вимірювальні прилади, що використовуються в цій схемі, повинні належати класу не нижче 0,5.

Слід враховувати, що при включенні живлення для намагнічувальної обмотки як сердечник, так і сама схема живлення можуть опинитися під небезпечним потенціалом, і їх не слід доторкатися. Тому, крім заземлення корпусу машини, необхідно дотримуватися всіх заходів безпеки. Наприклад, місце випробування повинно бути обмежене та відзначене попереджувальними знаками.

На столі, де розміщені вимірювальні прилади, виключно забороняється розміщувати елементи живлення схеми (рубильник, запобіжники та інше), щоб уникнути випадкового дотику до них. Після вимкнення напруги для намагнічувальної обмотки проводиться розрядка короткочасним з'єднанням із землею.

1.2.2 Температурно-часовий метод

Вимірювання втрат в сталі магнітопроводу може відбуватись, шляхом визначення втрат потужності в магнітопроводах при різних значеннях магнітного поля та температурі. Температурно-часовий метод полягає в замірі температури магнітопроводу за певний період часу після зміни магнітного поля. Під час зміни магнітного поля в магнітопроводі виникає електромагнітна енергія, яка призводить до нагрівання матеріалу магнітопроводу. Температурно-часовий метод дозволяє визначити втрати в магнітопроводі при певних значеннях магнітного поля та

температури. Цей метод може бути використаний для оцінки якості магнітопроводу та підтвердження відповідності його характеристик вимогам стандартів.

Однією з переваг цього методу є можливість виміряти втрати в магнітопроводі за всіх умов роботи, включаючи високі частоти, де інші методи можуть бути не ефективними. Крім того, цей метод дозволяє визначати втрати не лише в сердечнику, але й в інших частинах електромашини або трансформатора, таких як ротор, статор, затискні колодки тощо.

Проте, метод має свої недоліки. Вимірювання температури вимагає високої точності, а калібрування та налаштування обладнання можуть бути складними. Використання цих методів також може бути часо- та працезатратним, а також вимагати значних енергетичних витрат. Крім того, використання цих методів може бути складним для об'єктів з великою теплоємністю, оскільки зміни температури можуть бути незначними.

Таким чином, вимірювання втрат в сталі магнітопроводу за допомогою температурно-часового методу є ефективним засобом для визначення втрат потужності в магнітопроводах, проте вимагає уваги до точності вимірювань та інших технічних аспектів.

1.2.3 Перевірка якості пресування магнітопроводу за допомогою щупа

Щільність збірки сердечника перевіряють щупом товщиною 0,2 мм, який під тиском руки повинен входити між листами сердечника не більше ніж на 2...3 мм. Розпушення листів перевіряють шляхом вимірювання штангенциркулем довжини сердечника по дну пазів і по верхній частині зубців. У сердечниках довжиною до 100 мм допускається розпушення до 2 мм, а при довжині 101 ... 150 мм - до 3 мм. У двох взаємно перпендикулярних площинах проводять вимірювання діаметрів внутрішньої поверхні сердечника і замків корпусу, що необхідні для посадки підшипникових щитів. В машинах загальнопромислового виконання точність обробки замків повинна знаходитися в межах 7 ... 9 квалітетів.

Ослаблення пресування сердечника призводить до його підвищеної вібрації, яка контролюється спеціальними датчиками, встановленими на корпусі машини.

Сердечник повинен бути спресований так щільно, щоб сила тертя між листами виключала можливість навіть незначного їх переміщення відносно один одного. Щільність пресування перевіряють в зубцях і доступних місцях спинки сердечника контрольним ножом, який всувають між листами сердечника. Якщо при сильному натисканні на рукоятку ножа його лезо входить не більше ніж на 2-3 мм, щільність пресування вважається задовільною.

У деяких випадках застосовують спосіб контролю за допомогою тензометричних пристроїв, дія яких заснована на зміні опору тонкого дроту при її розтягуванні. Дріт наклеюють на пружну пластинку, яку вбудовують в щуп. Щуп забивають молотком між листами, при цьому він деформується. Про деформації судять по зміні опору дроту, яка вимірюється високочутливим приладом. Кожен щуп тарують під пресом, визначаючи показання приладу при відомих деформаціях.

1.2.4 Метод термоіндикаторного покриття

Як відомо, пошкодження міжлистової ізоляції призводить до локального перегріву, який контролюється спеціальними термоізоляційними покриттями. Ці покриття наносяться на поверхню компонентів, які піддаються критичному перегріву і при досягненні граничної температури виділяють певні гази і аерозолі, які виявляються за допомогою хімічного аналізу охолоджуючого газу. Різні компоненти машини покриті різними хімічними сполуками, які можуть не тільки виявляти локальний перегрів, але і виявляти його джерела. На додаток до покриттів термочутливі етикетки можуть наноситися на небезпечні ділянки, які змінюють колір при перевищенні температурного порогу місця нанесення [6].

Переваги методу:

- немає необхідності встановлювати термопари або термометри в компоненти машини;
- локальний перегрів може бути виявлений на початкових стадіях.

Недоліки:

- необхідність повторного нанесення покриття на термоіндикаторне покриття або термочутливої етикетки після локального перегріву;
- неможливість визначити точну температуру пошкодженого вузла;
- перевірка етикетки можлива тільки при зупиненій машині.

1.2.5 Використання тепловізійного контролю для перевірки активної сталі в електричних машинах

Тепловізійний контроль активної сталі статора дозволяє виявити дистанційно зони пошкодження в осерді сталі, розподілення і значення температури в зоні дефекту, ступень небезпечності його знаходження (рис. 1.3)

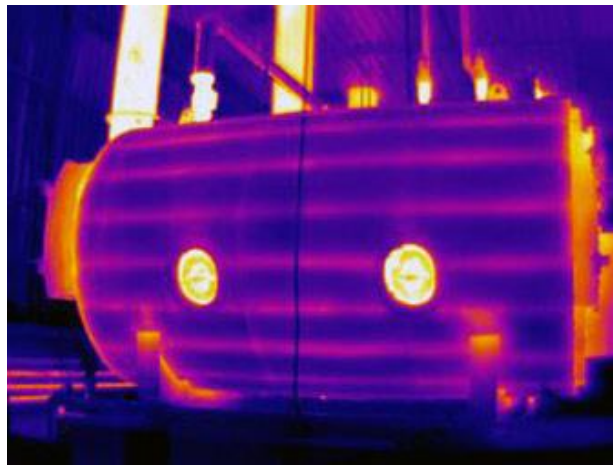


Рисунок 1.3 – Термограма електричної машини за допомогою тепловізора

Випробування сталі статора турбогенератора проводяться при знятому роторі і обмотках намагнічування і управління, намотаних на статор. Випробування гідрогенераторів можуть проводитися як зі знятим ротором, так і без демонтажу.

Перевищення температури, виміряне тепловізором під час випробувань, залежить від інтенсивності випромінювання поверхні розточки і її випромінювальної здатності. Отже, поверхня свердління статора повинна бути ретельно перевірена, перш ніж можна буде проводити інфрачервоний моніторинг. Поверхня отвору статора зазвичай забарвлена і має коефіцієнт випромінювання близько 0,94, незалежно від кольору пігментації. Коли фарба видаляється з

поверхні і присутня іржа, коефіцієнт випромінювання досягає 0,8, а фактичне нагрівання при 10 °С вимірюється як 12,5 °С.

Під час випробування сталі статора періодично знімаються термограми зубців і всієї поверхні сердечника. Перша термограма знімається перед подачею напруги на обмотку намагнічування, наступна знімається через 20 і 45 хвилин, а також через 15, 30 і 45 хвилин при охолодженні після прогріву статора. Термограми знімаються, коли обмотка намагнічування вимкнена.

Стандарт встановлює процедуру оцінки стану сталі статора на основі результатів інфрачервоного моніторингу. Слід зазначити, що локальне розсіювання тепла в сталі статора можна відрізнити за такими ознаками: яскравості плям, формою і характером зміни яскравості плям з плином часу в процесі охолодження сердечника після відключення обмоток нагрівальної пластини.

Якість сталі статора оцінюється в залежності від місця локального виробництва тепла. Поверхневі тепловідводи створюють нагрівальні елементи, які легко ізолювати. Оцінка їх допуску визначається максимальною різницею нагріву між максимальним ΔT_{max} і мінімальним $\Delta T_{тт}$, яка перевищує температуру зубців в кінці тесту, що становить не більше 10 °С.

Крім того, максимальне перевищення температури ΔT_{max} в кінці тесту не повинно перевищувати нормативних значень. Глибоке локальне розсіювання тепла створює слабкий нагрів поверхні, відповідний нормам перевищення температури. Отже, допустимість глибоких локальних тепловідводів визначається величиною розрахункової теплової потужності.

За відомими в процесі проведення випробування сталі статора значеннями t_1 , t_2 , ΔT_0 , ΔT_2 визначають глибину залягання дефекту та потужність тепловиділення в очах нагріву:

t_1 – сумарний час нагріву, години;

t_2 – час від моменту відключення живлення намагнічуючої обмотки до моменту термографічної зйомки, години;

ΔT_0 – перевищення температури в локальному тепловиділенні одразу після відключення нагріву, °С;

ΔT_2 – перевищення температури в локальному тепловиділенні в момент зйомки, тобто через t_2 після вимикання живлення намагнічуючої обмотки, °C.

Для цього визначають співвідношення $\Delta T_2 / \Delta T_0$. Для отриманого значення відношення і часу t_2 за допомогою розрахунків визначають орієнтовну глибину залягання дефекту.

Переваги методу:

- можливість оцінити пошкодження сталі машини та визначити глибину його залягання;
- висока точність вимірювання;
- випробування сталі потужних машин проводиться без вилучення ротора.

Недоліки:

- велика кількість випробувань.

1.3 Високочастотні індукційні засоби контролю шихтованих магнітопроводів

Один з найбільш поширених методів вимірювання втрат у сердечниках електричних машин - це метод петлі гістерезису [31, 32]. Він полягає в намотуванні двох обмоток на сердечник, що використовується для вимірювання. Перша обмотка використовується для збудження, а друга - для вимірювання індукованої напруги. Втрати в сердечнику обчислюються шляхом інтегрування добутку вимірюваної напруги та струму, що проходить через першу обмотку.

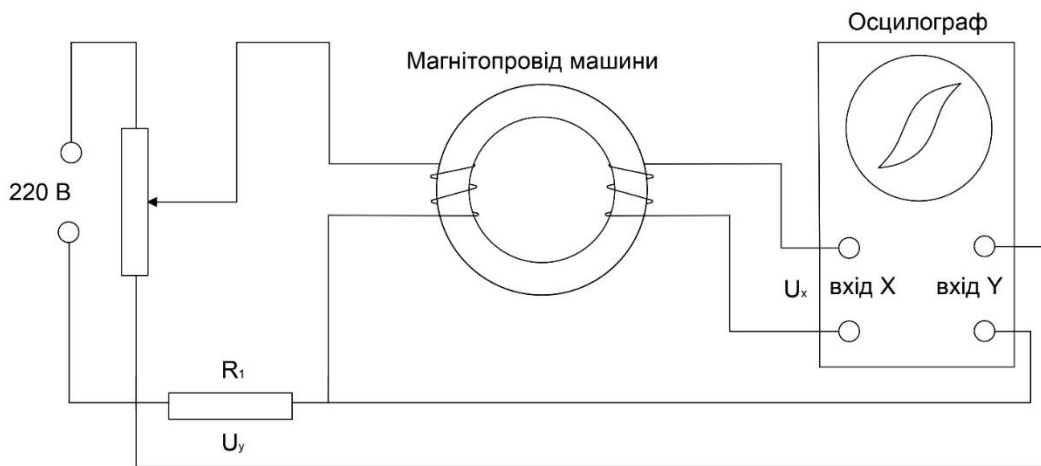


Рисунок 1.4 – Стенд зняття петлі гістерезису

Перша обмотка використовується для генерації збудження, а друга - для вимірювання магнітної індукції. Інтегрування напруги, яка вимірюється на другій обмотці, дає значення магнітної індукції:

$$B(t) = \frac{1}{N_2 A_e} \int_0^T v_s(\tau) d\tau \quad (1.3)$$

де N_2 – кількість витків вторинної обмотки;

A_e – площа поперечного перерізу досліджуваного магнітопроводу, що враховує ефективну площу його перетину.

Виробники магнітної електричної сталі проводять вимірювання втрат магнітопроводу для різних робочих точок, таких як частоти 50 Гц і 60 Гц при різних значеннях магнітної індукції. Ці дані використовуються для отримання кривої намагнічення. Існує кілька стандартів вимірювання втрат на різних частотах для виробників, яким вони мають слідувати. Хоча різні виробники дотримуються різних стандартів та номенклатури відносно свого продукту, такі властивості матеріалу, як втрати, опір і проникність, вважаються однаковими для однієї марки сталі. Для зменшення втрат до матеріалу додають кремній та алюміній, що підвищує електричний опір і проникність. Для рівня визначення стандартизації матеріалу Американський інститут металургійного виробництва (AISI) використовує властивості матеріалу, такі як рівень магнітострикції та температура Кюрі, які визначаються відсотками складових у сплаві. Низькосортні матеріали

мають найвищий відсоток кремнію, тому мають найвищий питомий опір і проникність, а отже, найнижчі втрати осердя. Товщина міжлистової ізоляції впливає на зменшення втрат на вихрові струми.

Існують три типи основних тестів для вимірювання втрат - рама Епштейна, тороїд та тестер одного листа. Ці тести показані на рис 1.5. Міжнародна асоціація випробувань та матеріалів (ITM) має стандарти для підготовки матеріалів, експериментальної установки та методів тестування для всіх трьох типів тестів.

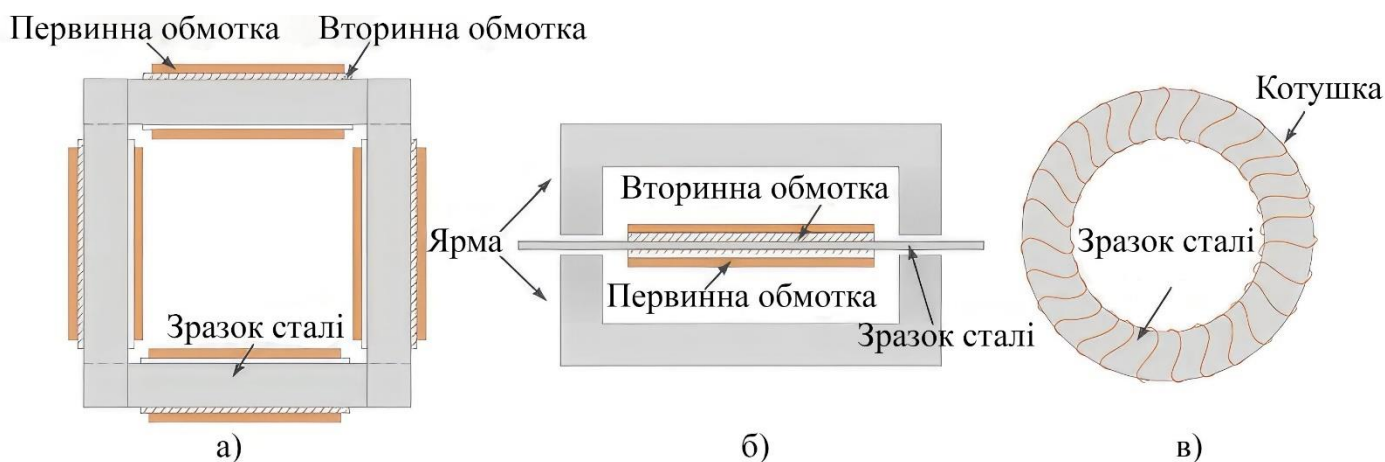


Рисунок 1.5 – Методи дослідження а) Рама Епштейна, б) метод Одного листа, в) метод Тороїда

Тест рами Епштейна - це метод вимірювання магнітних властивостей матеріалів, який базується на тому, що змінний магнітний потік, створений первинною обмоткою, індукує напругу у вторинній обмотці. Цей метод вимірює індукцію в зразку, яка відображається на вимірювальному приладі. Ізольований магнітний матеріал, такий як залізо-кремнієва сталь, є найчастішим матеріалом, який використовується у методі рами Епштейна. Щоб збільшити точність вимірювання, матеріал розрізають на смужки, які укладають в раму. Встановлення великої кількості ізольованих листів допомагає зменшити магнітний опір на низьких частотах, що забезпечує більш точне вимірювання. Однак, метод рами Епштейна має деякі недоліки. Головний недолік полягає в тому, що між складовими рами виникає повітряний зазор, що підвищує як магнітний опір, так і втрати. Це може привести до неточних результатів вимірювань, особливо на високих частотах. Крім того, підготовка листів для використання у методі рами

Епштейна вимагає багато часу і зусиль. У загальному, метод рами Епштейна є ефективним інструментом для вимірювання магнітних властивостей матеріалів, проте він має свої обмеження та недоліки.

Тест методом тороїда згідно зі стандартами ТМ передбачено розрізання сталевих листів на кільцеві ізолювані сегменти, які згодом збираються разом. Для збирання тороїдального сердечника спочатку намотується вторинна обмотка безпосередньо на сталевий тороїд, після чого первинна обмотка намотується на зовнішню поверхню вторинної обмотки. Кількість витків первинної обмотки визначається потрібним струмом та напругою на заданій частоті. На вторинній обмотці можуть бути кілька кнопок, що дозволяє регулювати кількість витків та варіювати частоту. Для підвищення точності при низьких частотах вимірювання проводяться послідовним підключенням декількох обмоток (вторинних, третинних і т.д.), тоді як високочастотні вимірювання виконуються лише з використанням однієї вимірювальної обмотки. Для перевірки ізоляції двигуна найбільш підходящим методом є тестування тороїдним тестером, оскільки він дозволяє визначити втрати сердечника через його замкнуту магнітну петлю та забезпечує подібність між геометричною структурою тестера та реального електродвигуна. Недоліком тороїдного тестера є те, що підготовка зразка для тестування вимагає значної кількості часу.

Тест методом одного аркуша це один із найпоширеніших методів тестування, що використовуються виробниками сталі. Цей метод дуже легкий у відтворенні та дозволяє перевіряти властивості лише одного листа. Однак, є деякі недоліки, що потребують уваги. Крім тестування одного аркуша, часто використовують інші методи, які доповнюють його результати. Так, наприклад, можна використовувати тест на зразках з різними орієнтаціями, щоб визначити анізотропію матеріалу. Важливо також пам'ятати, що стандартний тест вимірює потік тільки в центрі листа, тому він не дозволяє отримати повну інформацію про властивості матеріалу. Для отримання повної карти потоку можна використовувати покращену версію цього методу, яка дозволяє вимірювати потік через сталевий

лист. Таким чином, тестування одного аркуша є важливим методом тестування сталі, але потребує додаткових методів та уваги до його недоліків.

Незважаючи на очікування, що кожен метод тестування дасть однакові результати, фактичні вимірювання показують відмінності. Дослідження [33] проводили порівняння якості різних методів тестування згідно з різними стандартами. За результатами досліджень встановлено, що тороїдний метод має більші значення втрат сердечника, ніж інші методи на всіх частотах. Цей факт можна пояснити впливом процесу різання при підготовці ізольованих листів, який призводить до зниження проникності та підвищення втрат сердечника. Для отримання більш точних результатів, можна використовувати комбінації різних методів тестування. Наприклад, для того, щоб оцінити властивості матеріалу, можна використовувати стандартний тест вимірювання потоку в центрі листа та покращену версію тестування, яка вимірює потік через сталевий лист. Для вимірювання втрат сердечника, можна використовувати тороїдний метод разом з іншими методами тестування.

Крім того, важливо враховувати температуру сердечника під час вимірювань. Для забезпечення точних результатів, вимірювання повинні проводитися при постійній температурі 25°C, а кожен індивідуальний тест повинен бути зроблений протягом короткого проміжку часу. Для отримання високої точності вимірювань, можна скористатися автоматизованою системою збудження.

1.4 Існуючі методи та засоби діагностики вузлів електротехнічного обладнання з використанням вібраційного сигналу

В основу методів вібродіагностики різноманітного обладнання: машин і механізмів, масивних конструкцій, вузлів електротехнічного обладнання покладені однакові фізичні принципи. Тому апаратура для вимірювання вібрацій, в основному, не відрізняється по структурі та принципу роботи в залежності від конкретної області застосування. Разом з тим, різним галузям вібродіагностики характерні різні діапазони частот, а також різні рівні вимірюваних вібрацій,

використовуються різні діагностичні параметри, різні підходи до проведення діагностики.

Розгляду сучасних методів вібраційної діагностики різних видів обладнання присвячена значна кількість робіт [67, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 109]. Серед них можна виділити дві групи методів, що ґрунтуються на принципово різних підходах: детермінованому і статистичному.

В рамках детермінованого підходу до діагностики в якості моделей вимірюваних коливань вибираються детермінованими функції (найчастіше – полігармонічні, часом – майже періодичні). Діагностування здійснюють за пороговим критерієм: перевищення рівнем деякого вибраного параметра вібрацій наперед заданого граничного значення.

Вимірювання інтегральних вібраційних характеристик машин і механізмів під час їх роботи (функціональна діагностика) дозволяє визначити їх загальний технічний стан. В основу нормування абсолютної вібрації закладені рекомендації міжнародного стандарту ІСО 2372-74, в якому як критерій використовується середнє квадратичне значення (СКЗ) віброшвидкості в діапазоні частот від 10 Гц до 1 кГц. Ці рекомендації засновані на припущенні, що подібні по потужності, частоті обертання, способам установки, умовам монтажу і експлуатації агрегати мають приблизно однакові допустимі значення вібрації. Базовим нормативним документом по вібрації в даний час є ДСТУ ГОСТ ІСО 10816-1-2007 «Вібрація. Контроль стану машин за наслідками вимірювань вібрації на частинах, що не обертаються. Частина 1. Загальні вимоги». Як критерії оцінки використовують абсолютні значення вібрацій та їх зміну в процесі експлуатації.

Проте розвиток того або іншого дефекту у вузлі машини часто призводить не до збільшення сумарного значення вібрації, а до зростання амплітуди окремих гармонік, і тому організація контролю поведінки окремих частотних складових дозволяє розпізнавати різні несправності і стежити за ходом їх розвитку. Технічно це реалізується при розкладанні вібросигналу в спектр за допомогою перетворення Фур'є.

Статистичне накопичення і аналіз кореляційно-спектральних характеристик вібросигналів, проведений стосовно конкретних машин і їх вузлів, дозволяють встановити взаємозв'язки зі зносом у рухомих вузлах механізму. Істотним доповненням до експериментальних методів оцінки технічного стану машинного устаткування служить комп'ютерне моделювання динаміки і зношування вузлів, що дозволяє зв'язати воедино зміну функціональних і динамічних параметрів машини із зносом окремих її елементів і прогнозувати ці процеси на певний час майбутньої експлуатації. У такий спосіб визначаються гармоніки вібрації основних дефектів.

Несправний вузол, робота якого супроводжується ударом, ефективно діагностувати за допомогою аналізу амплітуди обвідної вібросигналу. Цей метод базується на тому, що періодична послідовність ударних імпульсів, що збуджує весь спектр власних частот механізму, найкращим чином виявляється у високочастотній області у вигляді амплітудної модуляції вібраційного процесу. Смугова фільтрація високочастотного сигналу з подальшим перетворенням Гільберта (або детектуванням) і спектральним аналізом амплітудної обвідної дозволяє по частоті проходження удару локалізувати дефектний вузол. Цей метод знайшов застосування при контролі стану підшипників кочення і зубчатих передач.

Функціональна вібродіагностика може ефективно застосовуватися лише до тих об'єктів, які в процесі роботи самі створюють коливання у своїх елементах, тобто містять внутрішнє джерело вібраційного збудження. Основним недоліком такого підходу є те, що в процесі діагностичного експерименту неможливо керувати видом та інтенсивністю вібраційного збудження, а також місцем його прикладення, оскільки вони залежать тільки від конструкції, технічного стану та режиму роботи об'єкта.

Тестова діагностика, на відміну від функціональної, вимагає прикладення до об'єкта діагностики спеціальних зовнішніх впливів. Тому з'являється можливість прикладати впливи з певними характеристиками і в певному місці, а це в свою чергу дає можливість покращити достовірність діагностики.

На даний час при діагностуванні машин, механізмів та масивних конструкцій використовують такі види впливів: гармонічний фіксованої частоти, гармонічний з розгорткою частоти, імпульсний, шумоподібний, ударний.

Для проведення вібраційних випробувань конструкції в режимі вільних коливань її збудження проводиться шляхом короткочасного силового впливу (удару), для чого застосовуються різноманітні засоби: маятникові пристосування, ударники різного принципу роботи. Коливання вимірюють за допомогою вібродатчиків. За результатами аналізу віброграм визначають власні частоти і характеристики згасання коливань. Недоліками такого підходу є велика трудоемність аналізу віброграм і низька точність його результатів. Методика проведення вібровипробувань конструкцій в режимі вимушених коливань по суті аналогічна, але застосовуються спеціальні потужні збудники коливань заданої форми.

Одним з методів тестової діагностики конструкцій ґрунтується на методі модального аналізу, який широко застосовується для визначення механічних властивостей конструкцій в авіації, автомобільній промисловості, будівництві тощо. Цей метод дає можливість визначити моди досліджуваної конструкції (елементарні форми коливань, їх частоти та параметри демпфування), що є основою аналізу вимушених коливань даної конструкції під впливом будь-яких збудників. З точки зору діагностики він дає можливість оцінити механічні параметри конструкції, що характеризують її технічний стан.

Таким чином, статистичні методи набувають останнім часом широкого використання у вібраційній діагностиці різноманітних конструкцій.

1.4.1 Сучасні технічні засоби вібраційної діагностики

На даний час існує широкий вибір вібровимірювальної та діагностичної апаратури, яка розрізняється за призначенням, набором виконуваних функцій, варіантами виготовлення тощо.

Фірмами “Ендевко” (США), “SKF” (Швеція), “PTC Piezotronics” (США), “Брюль і К’єр” (Данія), PRÜFTECHNIK Condition Monitoring GmbH (Німеччина),

та іншими виробляється широка номенклатура компонентів для діагностичної апаратури, а також ряд готових комплексних рішень. Використовуючи цю технічну базу, є можливість створювати апаратуру для реалізації деяких методів неруйнівної діагностики. Так, фірмою “Брюль і К’єр” виробляються компоненти для системи моніторингу стану потужного промислового обладнання, виявлення пошкоджень на різних стадіях їх розвитку та видачі попередження, коли пошкодження стає критичним. Крім того, фірми “Брюль і К’єр”, “Ендевко” “РТС Piezotronics” виробляють цілу низку різноманітних вимірювальних перетворювачів, що у комплексі з дво— чи багатоканальним аналізатором сигналів забезпечують вимірювання основних параметрів віброакустичних процесів.

Апаратура вимірювання вібрацій в будь-якому варіанті її виконання містить такі основні підсистеми [62]:

- 1) первинні вимірювальні перетворювачі (датчики), пристрої узгодження і засоби зв’язку;
- 2) засоби аналізу сигналів (аналізатори);
- 3) засоби зберігання даних і їх відображення;
- 4) бази даних (в найпростішому випадку — порогові значення для діагностичних критеріїв);
- 5) програмні засоби (підсистеми звертання до баз даних, проведення спеціалізованих видів аналізу даних, відображення результатів аналізу).

В якості вимірювальних перетворювачів найчастіше застосовуються п’єзоелектричні акселерометри, оптичні (лазерні) перетворювачі віброшвидкості і вихрострумові вимірювальні перетворювачі відносного вібропереміщення (проксиметри).

Для з’єднання віброперетворювачів із засобами аналізу використовуються лінії дротового та бездротового зв’язку і узгоджуючи пристрої (попередні підсилювачі, системи фільтрів). Для п’єзокерамічних акселерометрів можливе використання підсилювачів заряду або струму, які можуть бути зовнішніми або вмонтованими в один корпус з перетворювачем.

Аналізатор є основним елементом будь-якого засобу вібродіагностики. Це може бути як окремий спеціалізований прилад, так і комп'ютер загального призначення, оснащений набором відповідного спеціалізованого програмного забезпечення.

Основними метрологічними характеристиками технічних засобів вібродіагностики є частотний діапазон реєстрації параметрів вібрації, амплітудно-частотна характеристика первинних перетворювачів, динамічний діапазон вхідного сигналу, роздільна здатність приладів в частотному діапазоні. Частотний діапазон для більшості завдань вібродіагностики вимагається в межах від 2...5 Гц до 10...20 кГц [62].

Вібродіагностичну апаратуру за способом використання прийнято розділяти на два типи – портативну і стаціонарну. Портативну апаратуру, в свою чергу, можна умовно розділити на наступні види: віброметри, збирачі даних, віброаналізатори [62].

В залежності від призначення і виконуваних функцій існуючі технічні засоби вібродіагностики розділяють на :

- засоби допускового контролю і аварійного захисту;
- індикатори стану об'єктів контролю;
- засоби вібромоніторингу;
- засоби вібродіагностики;
- дослідницькі прилади і системи.

До найпростіших за конструкцією і набором виконуваних функцій технічних засобів аналізу вібрацій належать прилади та системи допускового контролю і аварійного захисту – віброметри, вібросигналізатори тощо. Їх основна функція – вимірювання величини віброшвидкості чи вібропереміщення у фіксованій смузі частот (наприклад від 2 Гц до 1000 Гц). Основні вимоги до таких приладів – форма АЧХ широкопasmового фільтра, швидкість спрацьовування при різкій зміні значення вимірюваного параметра, завадостійкість і надійність. В деяких засобах забезпечується також аналіз вібрацій в октавних та третьоктавних смугах часто, а

також одночасний контроль рівня акустичного шуму. Прилади такого класу виготовляють більшість фірм, що спеціалізуються в галузі вібраційної діагностики.

Основною задачею технічних засобів другої групи є раннє виявлення ознак одного чи групи дефектів контрольованого обладнання. На даний час серед таких засобів випускаються, в основному, лише індикатори стану підшипників кочення, які працюють по методу реєстрації ударних імпульсів, котрі виникають при зіткненні тіл кочення з кільцями підшипника. Індикатори стану підшипників вимірювання здійснюють в ультразвуковій області в досить широкій смузі з центральною частотою 20...30 кГц. Контрольованим параметром може бути середньоквадратичне значення вібрації або величина пік-фактора.

Технічні засоби третьої групи здатні виконувати аналіз вібрацій за більш складними алгоритмами (зокрема – спектральний аналіз), одночасно обробляти інформацію з великої кількості контрольованих точок, що надходить по великій кількості вимірювальних каналів. Їхнім основним призначенням є виявлення незворотних змін стану обладнання і часто також прогнозування швидкості розвитку дефектів. Верхня частота вібрацій, що аналізуються в таких системах, сягає 20 кГц, а в окремих випадках і більше.

Сучасні стаціонарні системи вібромоніторингу і вібродіагностики проектуються, в основному, під конкретний об'єкт діагностики. Разом з тим, існують типові системи, що легко модифікуються під потреби конкретного користувача.

Останнім часом спостерігається інтенсивний розвиток експертних систем за рахунок створення надійних і швидких алгоритмів пошуку несправностей [64]. Як їх методологічна основа використовується логічний аналіз причинно-наслідкових зв'язків. Є також роботи із створення автоматичних систем штучного інтелекту у вигляді нейрокомп'ютерів, нейромереж. Але зараз найпоширенішими є інформаційні технології, орієнтовані на використання нечітких множин, що реалізуються на базі традиційної обчислювальної архітектури.

Отже, при створенні системи вібродіагностики ЕО важливою і актуальною задачею є розробка нових методів ударної діагностики, алгоритмів та програмного забезпечення, яке їх реалізує.

1.4.2 Засоби для створення ударного впливу

При здійсненні тестової діагностики необхідне прикладення зовнішнього впливу до вузла чи конструкції, що діагностуються. На даний час для цього виготовляються різноманітні технічні засоби. Одним з таких засобів є так звана стандартна ударна машина – пристрій для збудження ударних коливань в горизонтальних елементах будівельних конструкцій. Іноді її ще називають «топальна машина» (англійською мовою – tapping machine), оскільки при дослідженнях міжповерхових перекриттів на звукопроникність така машина використовується для імітації впливу на перекриття серії кроків.

Конструкція стандартної ударної машини регламентується стандартами (ISO 140, ISO 117, DIN 52210 та іншими). Машина має п'ять молотків, розташованих вздовж однієї прямої, причому відстань між центрами крайніх молотків становить 0,4 м. Робоча частина кожного молотка виконана зі сталі і має форму циліндра діаметром 30 мм, нижня її частина – випукла. Радіус сфери ударної частини складає 0,5 м. Ефективна маса кожного молотка – $(0,5 \pm 0,0125)$ кг. При роботі машини молотки вільно падають з висоти (40 ± 1) мм послідовно один за одним, причому час між двома послідовними ударами складає (100 ± 5) мс. Відстань між стійками машини і молотками – не менше 0,1 мм.

Стандартні ударні машини виготовляються серійно. На рис.1.6 а) показана машина типу 3207 виробництва фірми Brüel & Kjær (Данія). Вона повністю відповідає стандартам. Молотки приводяться в рух за допомогою кулачків, розташованих на валу, який обертає двигун постійного струму через клинову передачу і редуктор. Управління машиною здійснюється безпосередньо з панелі керування або за допомогою дистанційного пульта.

На рис.1.6 б) показана ударна машина типу EM50 Look line (Італія). На відміну від попередньої моделі, молотки цієї машини мають електромагнітний

привід і електронне керування, що забезпечує вищу точність частоти ударів. Вмикання машини здійснюється з панелі керування або за допомогою пристрою дистанційного керування.

Стандартні ударні машини створюють вплив у вигляді періодичної серії ударів з нормованими параметрами як по силі, так і по частоті слідування окремих ударів. Але вони мають суттєві недоліки. По-перше, довжина машини не може бути меншою за 0,4 м, що робить неможливим її застосування для діагностики елементів конструкції невеликих розмірів. По-друге, машина повинна розташовуватися лише на горизонтальних поверхнях і використовуватися для нанесення ударів у вертикальному напрямку.



а)



б)

Рисунок 1.6 – Стандартні ударні машини

а) типу 3207 фірми Brüel & Kjær (Данія); б) типу EM50 Look line (Італія)

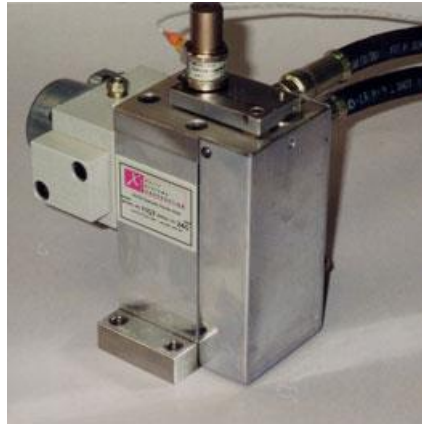
Вібробуджувачі (вібростенди, шейкери) – це пристрої, спеціально сконструйовані для прикладення вібраційних впливів заданої форми до елементів конструкцій, які діагностуються. На даний час виготовляються магнітні та гідравлічні вібробуджувачі, в основі роботи яких лежить, відповідно, електромагніт або гідравлічна головка.

Фірма Brüel & Kjær (Данія) виготовляє електромагнітні модальні вібробуджувачі, що забезпечують високу точність відтворення заданої форми сигналу збудження. Модельний ряд включає вібробуджувачі типу 4827 (рис.1.7, а) і 4828 для дослідження крупних автомобільних, авіаційних, залізничних вузлів, крупних двигунів, турбін, насосів тощо. Вони забезпечують максимальну силу вібробудження (в режимі синусоїдального сигналу) до 650 Н і 1000 Н відповідно

з переміщенням до 2 дюймів. Для тестування менших конструкцій виготовляється вібробуджувач на постійному магніті типу 4808, який є високоякісною компактною машиною і забезпечує максимальну силу 112 Н (25 фунтів) і переміщення до 12,7 мм (0,5 дюйма) в частотному діапазоні від 5 Гц до 10 кГц.



а)



б)



в)

Рисунок 1.7 – Модальні вібробуджувачі:

- а) електромагнітний вібробуджувач типу 4827 фірми Brüel & Kjær (Данія);
- б) головка гідравлічного вібробуджувача фірми Xcite Systems Corporation (США); в) вібробуджувач MODAL 1000 фірми MB Dynamics (США)

Для прикладення ударного впливу з нормованою енергією може використовуватися ударний випробувальний молоток, виготовлений згідно з рекомендаціями стандарту МЕК 60068-2-63. Він складається з трьох основних частин: корпусу, ударного механізму і конуса (рис.1.8).

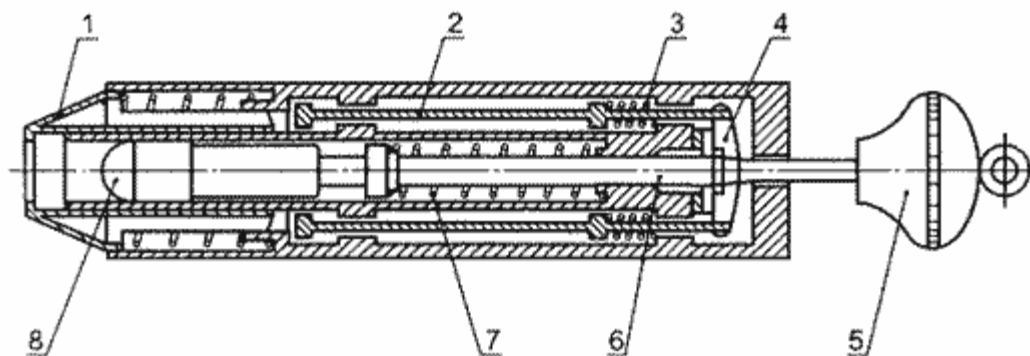


Рисунок 1.8 – Конструкція випробувального молотка
за стандартом МЕК 60068-2-63:

1 — підпружинений конус; 2 — стержень спускового механізму; 3 — пружина спускового механізму; 4 — спусковий кулачок; 5 — ручка для заводу пружини; 6 — шток; 7 — пружина молотка; 8 — головка молотка

Корпус містить кожух, направляючу ударного механізму, спусковий механізм і всі частини, жорстко закріплені на корпусі. Ударний механізм складається з головки молотка, штока і ручки для заведення пружини. Його маса складає 250 г. Головка молотка являє собою півсферу радіусом 10 мм з поліаміду твердістю 100 HR (за Роквеллом). Головка молотка прикріплена до штоку таким чином, що відстань від її вершини до площини зрізу конуса при розташуванні ударного елемента в точці спокою становить 20 мм. Конус має масу 60 г; коли спусковий механізм зведений для приведення в дію ударного механізму, пружина повертання конуса стиснута силою 20 Н. Пружину молотка регулюють так, що при стисненні приблизно на 20 мм добуток цього шляху (в міліметрах) і прикладеної сили (у ньютонках) становить 1000. При цьому енергія удару дорівнює $(0,5 \pm 0,05)$ Дж. Щоб встановити енергію удару інших рівнів, потрібні заміна пружини молотка і його подальше калібрування, що є суттєвим недоліком при проведенні вимірювань в польових умовах, коли потрібно діагностувати різні вузли ЕО.

Порівняння переваг і недоліків різних засобів прикладання удару наведено в наступній таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик різних засобів прикладення ударного впливу

Засіб прикладення впливу	Вид збудження	Область застосування	Напрямок впливу	Переваги	Недоліки
Стандартні ударні машини	Ударне періодичне	Горизонтальні плоскі поверхні	Вертикальний	Висока точність сили і напрямку удару, а також частоти повторення	Великі геометричні розміри і маса
Вібробуджувачі	Гармонічні, імпульсні, шумоподібні коливання	Будь-які поверхні при умові можливості закріплення штовхача	Довільний	Широкий вибір форми збудження. Порівняно невеликі геометричні розміри і маса	Необхідно забезпечити фіксацію самого вібро-стенда на нерухомій опорі і робочого кінця штовхача на об'єкті діагностики
Ударний молоток за стандартом МЕК 60068-2-63	Ударне	Будь-які поверхні, в тому числі неплоскі	Довільний	Нормована енергія удару. Немає необхідності фіксації на об'єкті діагностики	Складно забезпечити точність напрямку і сили удару
Ручні ударні молотки	Ударне	Будь-які поверхні, в тому числі неплоскі	Довільний	Широкий вибір насадок з різною масою і твердістю забезпечує можливість підбору необхідної ширини спектру ударного впливу. Невелика маса і розміри. Немає необхідності у фіксації на об'єкті діагностики	Неможливо нормувати ширину спектру прикладеного впливу

Висновки до Розділу 1

1. Проведено аналіз погіршення якості шихтованих магнітопроводів електричних машин загального призначення та виникнення дефектів міжлистової ізоляції в процесі виробництва та ремонту.

Проаналізовано основні причини погіршення якості магнітопроводів, пов'язаних з погіршенням магнітних властивостей активної сталі, з руйнуванням ізоляційних проміжків між листами та послабленням пресування пакету та його розпушеністю.

Обґрунтована необхідність разом з оцінкою інтегральної якості міжлистової ізоляції оцінювати розвинутість та безпеку локальних дефектів.

2. Проведено огляд існуючих методів діагностики шихтованих магнітопроводів та виявлено їх переваги та недоліки.

Виявлена необхідність створення нових ефективних методів діагностики та оцінки якості магнітопроводів за фактичним станом та розробці на їх основі портативної та зручної апаратури контролю.

3. Показано, що найбільш перспективним є напрям розробки комплексних діагностичних методів, що ґрунтуються на використанні мультифізичних процесів поєднання височастотних індукційних методів та вібраційних впливів на шихтований магнітопровід, з подальшим аналізом отриманих діагностичних даних за допомогою інтелектуальних методів обробки інформації.

4. Показано, що розробка та впровадження ефективних методів контролю і діагностики шихтованих осердь ЕМ є важливим фактором при обґрунтуванні доцільності подальшого використання відремонтованих машин при економічній оцінці системи сервісного обслуговування в цілому на конкретних підприємствах.

Результатом проведеного аналізу була остаточно сформульована мета роботи, а також напрями та задачі досліджень.

РОЗДІЛ 2

ОПИС МЕТОДУ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ЛАМІНОВАНИХ ОСЕРДЬ, ФІЗИЧНІ ТА СТАТИСТИЧНІ ОЦІНКИ ЗВ'ЯЗКУ ПАРАМЕТРІВ ШВИДКОПЛИННИХ ІНДУКЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ З ВТРАТАМИ НА ПЕРЕМАГНІЧУВАННЯ

2.1 Фізичні основи зв'язку параметрів високочастотних перехідних процесів з питомими втратами в шихтованих магнітопроводах

Відомим методом оцінки якості магнітопроводу, як було вказано в попередньому розділі є вимір питомих втрат в магнітопроводі при фіксованому значенні індукції при промисловій частоті, як правило $B=1$ Тл і $f=50$ Гц ($B_{1,0/50}$).

По вказаним раніше труднощам при прямому вимірюванні втрат перспективним є спроба знайти фізичну величину або співвідношення фізичних величин які могли б бути використані в якості діагностичної ознаки. При порушенні міжлистової ізоляції в першу чергу зростають вихрові струми в магнітопроводі тому шуканий сигнал повинен характеризувати інтенсивність вихрових струмів по дефектних контурах. Було запропоновано використовувати аналіз швидкоплинних процесів при зміні магнітного потоку в магнітопроводі. Це може бути будь яка швидка зміна магнітного поля, наприклад включення обмотки збудження магнітопроводу на постійну напругу або живлення обмотки збудження гармонічними сигналами змінної високої частоти.

Задачами діагностики є загальна оцінка стану міжлистової ізоляції погіршення якої викликає підвищення втрат на вихрові струми та оцінка розвинутості локальних дефектів, як правило активної зубцевої зони, такі як поверхневі замикання листів осердь, місцеве порушення міжлистової ізоляції, які викликають підвищення локальних втрат і як наслідок місцеві перегріву. Замикання листів між собою в результаті різних видів пошкоджень міжлистової ізоляції створює так званий частковий ефект масивного магнітопроводу. Цей ефект проявляється в тому, що в магнітному осерді зібраному з окремих листів без достатньої ізоляції між ними з'являються додаткові вихрові струми, що

замикаються по дефектним контурам. Тому показником якості ламінованого осердя може служити оцінка впливу паразитних контурів вихрових струмів на ступень наближення шихтованого магнітопроводу до масивного у всьому об'ємі осердя або в його локальній зоні. При подачі імпульсу напруги на обмотку збудження магнітопроводу відбувається процес встановлення магнітного потоку який відбувається по експоненціальному закону.

Параметри перехідного процесу будуть визначатись початковим та встановленим станом магнітного поля в магнітопроводі демпфуючою дією вихрових струмів, що замикаються всередині кожного листа, а також демпфуючою дією дефектних контурів вихрових струмів.

Запропонований спосіб будується на оцінці рівня енергійності зміни потоку у випробуваному магнітопроводі на відміну від способів, що ґрунтуються на вимірюванні втрат в сталі.

При зміні потоку в обмотці збудження у всіх контурах зчеплених з потоком буде наводитись ЕРС пропорційна швидкості загасання потоку $d\Phi/dt$. Це відбувається у всіх контурах вихрових струмів в тому числі і дефектних, які в свою чергу створюють свої місцеві потоки від наведених струмів які мають розмагнічуючий характер по відношенню до основного потоку, а також гальмують швидкість його встановлення. Якщо нанести на спинку магнітопроводу контрольну обмотку, в ній буде наводитись ЕРС експоненційного характеру, величина і швидкість зміни якої буде залежати від величини і швидкості зміни основного магнітного потоку.

Вихрові струми в кожному листі магнітопроводу змінюються з постійною часу, яка залежить від властивостей матеріалу осердя та пропорційна квадрату товщини листів [6].

$$T = \frac{\mu_0 \mu d^2 \gamma}{4\pi^2}, \quad (2.1)$$

Де μ_0 - магнітна стала, μ - магнітна проникність матеріалу осердя, d – товщина листа, γ – питома електропровідність матеріалу осердя.

Паразитні контури вихрових струмів спричиняють збільшення постійної часу загасання вихрових струмів. Ця залежність буде визначатись еквівалентною провідністю дефектних контурів. В першому наближенні у формулі постійної часу загасання (1) це може відбуватись за рахунок збільшення еквівалентної товщини листа магнітопроводу, збільшенню електропровідності γ або комбінації зміни цих величин. Тому $\Phi = \Phi_0 (1 - e^{-t/T})$ де Φ_0 – стале значення потоку.

ЕРС в контрольній обмотці буде $e(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\Phi_0}{T} e^{-t/T}$. Видно, що збільшення постійної часу загасання вихрових струмів, що викликано наявністю дефектних контурів вихрових струмів, змінить форму наведеної ЕРС у порівнянні з якісною системою, що проявиться в зменшенні амплітуди ЕРС і сповільнення процесу її загасання.

Діагностичною ознакою може служити усереднена постійна часу загасання вихрових струмів. Відомо, що втрати на вихрові струми в магнітопроводі пропорційні квадрату товщини листа та електричній провідності матеріалу. Є чіткий зв'язок по цим параметрам між постійною загасання вихрових струмів і втратами в сталі.

При наявності дефектних контурів втрати в сталі на вихрові струми зростають у порівнянні з бездефектною конструкцією.

Відомою формулою визначення втрат на вихрові струми [1] при промисловій частоті є

$$p = 52,3 B_{\text{ср}}^2 \gamma b^2 V, \text{ Вт}, \quad (2.2)$$

Де $B_{\text{ср}}$ – середня індукція в магнітопроводі, $b = d/2$ – половина товщини листа, V – об'єм магнітопроводу.

При прийнятому методі визначення втрат ватметровим способом при індукції $B = 1 \text{ Тл}$ ця формула перетворюється в

$$p = 52,3 \gamma b^2 V, \text{ Вт}, \quad (2.3)$$

При порівнянні формули (3) і формули (1) видно, що визначення втрат нормативним методом можна проводити за допомогою визначення постійної часу загасання вихрових струмів.

Відомо, що втрати на вихрові струми в магнітопроводі зростають пропорційно квадрату частоти, а втрати на гістерезис пропорційно першій степені. Ця залежність дозволяє розділити втрати в магнітопроводі на гістерезис та вихрові струми при умові наявності вимірних втрат в магнітопроводі при частотах менше і більше промислової частоти. Однак ця залежність справедлива для частот від 600 до 1000 Гц в залежності від виду матеріалу магнітопроводу. При більш високих частотах ця залежність має більш складний характер саме для втрат на вихрові струми, головним чином внаслідок ефекту витіснення струму («skin effect»). При цьому формула втрат на вихрові струми при збільшенні частоти виглядає:

$$p = \frac{1}{6} B_{\text{ср}}^2 \gamma \omega^2 b^2 V F(\xi), \quad (2.4)$$

$$F(\xi) = \frac{3}{\xi} \cdot \frac{\text{sh}\xi - \sin\xi}{\text{ch}\xi - \cos\xi}, \quad (2.5)$$

де $\xi = \frac{2b}{a}$ – відношення товщини листа до глибини проникнення; $a = \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu}}$ –

глибина проникнення.

З ростом частоти зростають втрати на вихрові струми, але представляє інтерес не визначення втрат на високих частотах, а зв'язок наведених на високих частотах ЕРС в бездефектних та дефектних магнітопроводах з питомими магнітними втратами на промисловій частоті, які саме й будуть визначати втрати і теплові режими в зібраній машині при її експлуатації.

Збільшення частоти в магнітопроводах з бездефектною ізоляцією викликає зменшення магнітної індукції внаслідок ефекту витіснення при незмінній напруженості магнітного поля H [А/м]. Вихрові струми в кожному окремому листі магнітопроводу створюють свої магнітні потоки, які розмагнічують основний магнітний потік і відповідно індукцію. Цей ефект буде зростати зі збільшенням частоти і буде залежати від товщини листа, властивостей матеріалу магнітопроводу і його геометрії. ЕРС в кожному контурі буде пропорційна швидкості зміни магнітного потоку тобто від частоти, величини індукції та геометрії магнітопроводу. Поява додаткових паразитних контурів вихрових струмів буде підсилювати розмагнічуючий ефект і зменшить зростання ЕРС в залежності від

росту частоти. Тобто динаміка зростання ЕРС в бездефектному магнітопроводі буде вища ніж в дефектному в залежності від розвинутості пошкоджених зон та інтенсивності вихрових струмів.

Залежність магнітного потоку, що заданий потоком [1] в окремих пластинах для пакету з товщиною h і висотою d буде

$$\Phi = \frac{adh\mu}{(1+j)b} H_0 th(1+j) \frac{b}{a}, \quad (2.6)$$

При цьому напруга буде

$$U = j\omega N\Phi_c, \quad (2.7)$$

Внаслідок появи дефектних контурів вихрових струмів збільшується їх вплив на послаблення магнітної індукції в результаті їх розмагнічуючого впливу. Цей ефект зростає при збільшенні частоти. В результаті зменшується магнітний потік Φ , а також і напруга U .

Якщо нанести на спинку магнітопроводу контрольну котушку, в ній також буде наводитись ЕРС. В листовому магнітопроводі, при якісній міжлистовій ізоляції, можна розглядати як елемент окремий лист. Розглянемо в перерізі листа розподіл ЕРС, струмів і втрат на вихрові струми при змінному магнітному потоку в листі. Вважаємо, що екіпотенціальні лінії елементарного контуру симетричні відносно центру. При рості контуру його переріз q_x зростає по квадратичному закону, а довжина контуру l_x – по лінійному закону. Наведена ЕРС буде залежати від швидкості зміни потоку. Використовуючи для зручності запису оператор p можна отримати наступні співвідношення для контуру шириною $2x$.

$$e_x = p\Phi_x = pBq_x, \quad (2.8)$$

Де $q_x = 2x^2 \frac{h}{b}$ – переріз осесиметричного контуру, h – висота листа.

Опір контуру товщиною Δx при довжині ділянки $l = 1$

$$\Delta r_x = 2 \left(2x + \frac{h}{b} x \right) \frac{\rho_{ст}}{\Delta x}, \quad (2.9)$$

Де $\rho_{ст}$ – питомий опір сталі. Елементарний струм в розглянутому контурі буде

$$\Delta i_x = \frac{e_x}{\Delta r_x} = \frac{pB}{\rho_{ст}}, \quad (2.10)$$

Це справедливо для випадку коли $h \gg b$.

При $B = B_m \sin \omega t$ і $pB = 2\pi f B_m$ діюче значення ЕРС буде

$$E_x = \pi \sqrt{2} f B q_x, \quad (2.11)$$

Очевидно, що при зменшенні індукції в наслідок розмагнічуючої дії паразитних контурів вихрових струмів діюче значення ЕРС буде зменшуватись з ростом частоти.

Втрати в елементарному контурі на довжині $l = 1$ будуть

$$\Delta p_x = \frac{E_x^2}{\Delta r_x} = \frac{(\pi \sqrt{2} f B_m 2 \frac{h}{b} x^2)^2}{2 \frac{h}{b} x \rho} \Delta x, \quad (2.12)$$

Повні втрати на вихрові струми

$$P_B = \int_0^b dp_x = \frac{2\pi^2 f^2 B_m^2 2 \frac{h}{b}}{\rho} \int_0^b x^3 dx = \frac{\pi^2 f^2 B_m^2}{\rho} h b^3, \quad (2.13)$$

Питомі втрати на вихрові струми

$$P_{\text{пит.в}} = \frac{P_B}{m} = \frac{\pi^2 f^2 B_m^2 b^2}{2\rho g_{ст}}, \quad (2.14)$$

Де $m = 2hblg_{ст}$ – маса розглянутого елемента, $g_{ст}$ – щільність сталі $7,8 \cdot 10^3$ кг/м³. $P_{\text{пит.в}}$ пропорційні добутку $f^2 B_m^2$, постійний коефіцієнт в цій формулі $k_B = \frac{\pi^2 b^2}{2\rho g_{ст}}$.

Таким чином для сталюого листа $b = 0.25$ мм і $\rho = 2 \cdot 10^{-7}$ втрати становлять $P_{\text{пит.в}} = 0,5$ Вт/кг, що повністю відповідає табличним даним електротехнічної сталі. Втрати на гістерезис в декілька разів більше. Для сталі 2013 загальні втрати

$$(p_\Gamma + p_B) = 0,5 + 2 = \frac{2,5 \text{ Вт}}{\text{кг}}, \quad (2.15)$$

Тобто для того щоб сумарні втрати вирости суттєво втрати на вихрові струми внаслідок дефектів міжлистової ізоляції повинні вирости як мінімум в декілька разів.

Для дефектного магнітопроводу при припущенні рівномірності розподілення точкових дефектів міжлистової ізоляції окрім вихрових струмів, що замикаються в окремих листах з'являються загальні інтегральні струми які охоплюють весь пакет. При рівномірному розподілу дефектів процеси в пакеті будуть описуватись так само як і в одиночному листі але необхідно враховувати електричну анізотропію, тобто питомий опір в поперечному напрямі (через дефекти) значно вище опору сталі.

Відношення $\frac{h}{b}$ може бути будь яким, частіше менше одиниці. Величина b в даному випадку відіграє роль ширини всього пакету, тобто якби товщина листа дорівнювала b ширині пакету.

По аналогії з попереднім випадком ЕРС x -го контуру буде:

$$e_x = pB \frac{2hx^2}{b}, \quad (2.16)$$

Опір елементарного контуру

$$\Delta r_x = \frac{2 \left(2x\rho_{\text{деф}} + \frac{h}{b} x\rho_{\text{ст}} \right)}{\Delta x} = \frac{4x\rho_{\text{деф}}}{\Delta x}, \quad (2.17)$$

де $\rho_{\text{деф}}$ - електричний опір дефектного контуру

Струм в елементарному контурі

$$\Delta i_x = \frac{pB \frac{h}{b}}{2\rho_{\text{деф}}} x \Delta x, \quad (2.18)$$

$$\Phi_x = \left(\frac{1}{x} \int B_x dx \right) q_x = \frac{pB_x h^2 \mu x^2 \left(b^2 - \frac{x^2}{3} \right)}{2\rho_{\text{деф}} b^2}, \quad (2.19)$$

При змінному магнітному потоці втрати від вихрових струмів визначаються

$$\Delta p_x = \frac{E_x^2}{\Delta r_x} = \frac{\left(\pi \sqrt{2} f B_m 2 \frac{h}{b} x^2 \right)^2}{4 \rho_{\text{деф}} x}, \quad (2.20)$$

Втрати на вихрові струми в магнітопроводі з інтегральними дефектами

$$P_B = \int_0^b dp_x = \frac{\pi^2 2 f^2 B_m^2 \left(\frac{h}{b} \right)^2 b^4}{\rho_{\text{деф}} 4} = \frac{\pi^2 f^2 B_m^2 (hb)^2}{2 \rho_{\text{деф}}}, \quad (2.21)$$

$$P_{\text{пит.в}} = \frac{P_{\text{в}}}{m} = \frac{\pi^2 f^2 B_m^2 h b}{2 \rho_{\text{деф}} g_{\text{ст}}} = k_{\text{в.деф}} f^2 B_m^2, \quad (2.22)$$

$$k_{\text{в.деф.}} = \frac{\pi^2 h b}{2 \rho_{\text{деф}} g_{\text{ст}}}, \quad (2.23)$$

Як видно зв'язок між питомими втратами на вихрові струми в магнітопроводі з інтегральними дефектами прямий через $k_{\text{в.деф.}}$ який залежить від перерізу магнітопроводу (h/b) та опору дефектних контурів $\rho_{\text{деф}}$.

Для того, щоб сумарні питомі втрати зросли у порівнянні з бездефектним магнітопроводом, наприклад в 2 рази (до 5 Вт/кг) необхідно для магнітопроводів різної геометрії різна степінь дефектності.

Для цього визначимо $\rho_{\text{деф}}$

$$\rho_{\text{деф}} = \frac{\pi^2 f^2 B_m^2 h b}{2 g_{\text{ст}} P_{\text{пит.в}}} = 0.63 h b, \quad (2.24)$$

Для магнітопроводу малої машини $hb=0,01*0,1=0,001 \text{ м}^2$, а $\rho_{\text{деф}}=6,3*10^{-4} \text{ Ом*м}$.

З ростом перерізу такий самий ефект буде досягатись при більших значеннях $\rho_{\text{деф}}$, а повні втрати в сталі зростають пропорційно квадрату перерізу.

Інерційність і розмагнічуюча дія дефектних контурів накладається на власну магнітну інерційність і зменшення індукції в магнітопроводі.

Зменшення середнього значення індукції буде відбуватись швидше в дефектних магнітопроводах у порівнянні з бездефектними з ростом частоти.

По відношенню до котушки, яка створює магнітне поле в магнітопроводі повний опір Z буде визначатись [1]

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{j}{1+j} \cdot \frac{adh\omega\mu}{lb} N^2 t h (1+j) \frac{b}{a}, \quad (2.25)$$

Якщо на контрольній котушці міряти ЕРС високочастотної області на різних частотах, то співвідношення амплітуди наведеної ЕРС на більш високій частоті до амплітуди ЕРС на меншій частоті буде визначати рівень дефектності магнітопроводів, це співвідношення може служити діагностичною ознакою через яку визначаються питомі втрати в магнітопроводі.

Перевагою такого підходу є можливість визначати рівень дефектності магнітопроводів шляхом оцінки динаміки росту наведеної ЕРС в контрольній котушці в самому магнітопроводі не звертаючись до порівняння його з еталонним магнітопроводом.

Було встановлено, що найбільш інформативним показником, який добре корелюється з втратами в магнітопроводах при нормативних методах випробувань ($P_{\text{пит}}$ при $B_{1,0/50}$) і при цьому дуже просто фіксується і обробляється це відношення напруги на частоті 10000 Гц до напруги на частоті 1000 Гц при постійному значенню напруженості поля А/м.

Для цього можна використовувати початкову ділянку кривої намагнічування, де $\mu_r = \text{const}$. Це дає можливість позбутись нелінійної залежності індукції від напруженості поля.

Визначені діагностичні ознаки, а саме постійна часу загасання вихрових струмів (мкс) та безрозмірний діагностичний коефіцієнт при високочастотних гармонічних впливах $K_d = \frac{U_{f_{10000}, \text{MB}}}{U_{f_{1000}, \text{MB}}}$ були покладені в основу подальших досліджень.

На основі запропонованого методу контролю якості шихтованих магнітопроводів було створені макетні установки, які дозволили автору провести широкомасштабні експерименти на підприємствах «Міськводоканал» СМР м.Суми та виробничому цеху ТОВ «ЕНЕРСІС УКРАЇНА».

Експеримент проведений на великій кількості магнітопроводів різного ступеню дефектності АД потужністю від 0,37 кВт до 37 кВт. При цьому вимірювались магнітні втрати в осердях ватметровим способом при індукції 1 Тл і відповідно їм визначались постійна часу загасання вихрових струмів $T_{\text{усер}}$ [мкс] та діагностичний коефіцієнт K_d . Результати представлені в табл. 2.1.

Експеримент включав перевірку більше 200 магнітопроводів різного ступеня якості та різної геометрії, що відповідає ряду потужностей парку двигунів доступних на підприємствах.

В якості зразків для експерименту використовувались як магнітопроводи, що не були в експлуатації, так і магнітопроводи, що знаходяться в експлуатації, а також магнітопроводи, що пройшли неодноразовий технологічний цикл з нагрівання в печі до температури 350-450 °С з ціллю випалювання старої обмотки перед перемоткою електродвигунів.

Таким чином, було дві групи магнітопроводів: якісні та дефектні, з різним ступенем пошкодження міжлистової ізоляції.

Таблиця 2.1 – Зв'язок питомих втрат в магнітопроводах різної ступені дефектності з $T_{\text{усер}}$ та K_d

$R_{\text{пит}}$	3,47	3,61	3,40	3,33	3,54	3,26	3,89
$T_{\text{усер}}$	50	48	47	46	44	42	49
K_d	5,75	5,78	5,79	5,81	5,84	5,86	5,76
$R_{\text{пит}}$	4,17	4,03	4,44	5,21	5,00	5,56	5,56
$T_{\text{усер}}$	52	54	56	55	51	64	58
K_d	5,72	5,69	5,66	5,68	5,73	5,55	5,63
$R_{\text{пит}}$	5,63	5,00	4,51	5,69	5,83	5,07	5,69
$T_{\text{усер}}$	67	49	52	63	64	59	60
K_d	5,50	5,76	5,72	5,56	5,55	5,62	5,60
$R_{\text{пит}}$	4,44	5,07	4,17	4,79	4,93	5,69	5,90
$T_{\text{усер}}$	65	69	62	68	69	71	72
K_d	5,53	5,47	5,58	5,49	5,47	5,45	5,43
$R_{\text{пит}}$	6,39	6,25	6,25	5,83	5,69	6,18	6,53
$T_{\text{усер}}$	75	79	75	73	75	80	82
K_d	5,39	5,33	5,39	5,42	5,39	5,31	5,29
$R_{\text{пит}}$	5,90	6,25	6,11	6,04	6,32	6,39	6,11
$T_{\text{усер}}$	84	88	87	85	90	91	95
K_d	5,26	5,20	5,21	5,24	5,17	5,16	5,10
$R_{\text{пит}}$	6,88	6,94	7,08	6,18	6,67	6,11	6,32
$T_{\text{усер}}$	92	95	97	98	99	94	97
K_d	5,14	5,10	5,07	5,05	5,04	5,11	5,07
$R_{\text{пит}}$	6,94	7,22	7,36	6,46	6,60	6,18	7,08
$T_{\text{усер}}$	93	98	101	102	107	108	101
K_d	5,13	5,05	5,01	5,00	4,92	4,91	5,01
$R_{\text{пит}}$	7,57	7,78	7,64	7,92	7,64	8,33	8,68

Т _{усер}	110	111	106	104	109	114	112
КД	4,88	4,87	4,94	4,97	4,90	4,82	4,85
Р _{пит}	7,08	7,22	8,19	8,26	8,33	8,40	7,64
Т _{усер}	111	108	119	110	111	114	115
КД	4,87	4,91	4,75	4,88	4,87	4,82	4,81
Р _{пит}	8,26	8,89	9,03	8,26	7,64	9,31	9,03
Т _{усер}	118	121	120	119	115	126	125
КД	4,77	4,72	4,74	4,75	4,81	4,65	4,66
Р _{пит}	9,10	8,61	8,33	8,26	7,92	8,68	8,40
Т _{усер}	126	121	125	127	129	127	121
КД	4,65	4,72	4,66	4,63	4,61	4,63	4,72
Р _{пит}	8,26	7,92	8,13	8,82	8,19	8,33	9,65
Т _{усер}	127	128	128	129	134	135	130
КД	4,63	4,62	4,62	4,61	4,53	4,52	4,59
Р _{пит}	9,38	8,40	10,42	9,72	9,03	9,17	9,51
Т _{усер}	131	134	136	134	135	137	138
КД	4,58	4,53	4,50	4,53	4,52	4,49	4,48
Р _{пит}	8,96	9,10	9,03	9,31	9,72	9,79	9,79
Т _{усер}	135	139	137	140	140	141	142
КД	4,52	4,46	4,49	4,45	4,45	4,43	4,42
Р _{пит}	10,00	10,42	11,11	9,31	9,17	9,72	10,42
Т _{усер}	148	149	150	149	157	151	154
КД	4,33	4,32	4,30	4,32	4,20	4,29	4,24
Р _{пит}	10,56	11,11	10,97	11,04	11,18	10,35	9,72
Т _{усер}	156	154	152	156	154	157	159
КД	4,22	4,24	4,27	4,22	4,24	4,20	4,17
Р _{пит}	10,35	10,49	11,11	10,97	10,90	10,56	10,42
Т _{усер}	160	153	155	157	153	154	155
КД	4,16	4,26	4,23	4,20	4,26	4,24	4,23
Р _{пит}	10,97	11,11	10,21	11,25	11,60	11,32	11,11
Т _{усер}	156	159	161	162	164	166	165
КД	4,22	4,17	4,14	4,13	4,10	4,07	4,09
Р _{пит}	11,04	11,60	11,67	11,18	11,81	11,74	11,46
Т _{усер}	164	165	168	169	168	165	170
КД	4,10	4,09	4,04	4,03	4,04	4,09	4,01
Р _{пит}	10,69	11,11	11,04	10,42	10,35	10,07	11,18

T _{усер}	165	164	167	168	167	168	169
Kд	4,09	4,10	4,06	4,04	4,06	4,04	4,03
P _{пит}	11,81	11,39	11,04	11,74	11,81	11,53	11,04
T _{усер}	170	165	162	171	172	174	172
Kд	4,01	4,09	4,13	4,00	3,98	3,95	3,98
P _{пит}	10,56	12,08	11,67	11,46	11,46	11,11	11,67
T _{усер}	174	175	177	175	174	175	172
Kд	3,95	3,94	3,91	3,94	3,95	3,94	3,98
P _{пит}	11,25	11,04	11,11	11,18	10,97	12,08	11,81
T _{усер}	171	174	175	174	175	177	175
Kд	4,00	3,95	3,94	3,95	3,94	3,91	3,94
P _{пит}	11,04	11,39	11,60	12,36	12,50	12,57	11,94
T _{усер}	179	180	181	182	184	180	187
Kд	3,88	3,87	3,85	3,84	3,81	3,87	3,77
P _{пит}	12,29	11,81	12,50	12,57	11,94	12,08	12,50
T _{усер}	185	188	180	184	185	185	190
Kд	3,80	3,75	3,87	3,81	3,80	3,80	3,72
P _{пит}	12,85	12,64	11,81	13,89	12,92	13,19	13,13
T _{усер}	194	197	198	199	195	197	199
Kд	3,67	3,62	3,61	3,59	3,65	3,62	3,59
P _{пит}	12,57	13,47	13,13	14,31	13,26	13,06	12,57
T _{усер}	200	205	204	210	211	205	210
Kд	3,58	3,51	3,52	3,43	3,42	3,51	3,43
P _{пит}	12,50	12,15	13,61	13,33			
T _{усер}	208	210	210	214			
Kд	3,46	3,43	3,43	3,38			

Ціллю експерименту було встановлення статистичного зв'язку між питомими втратами і діагностичними параметрами високочастотних індукційних процесів для магнітопроводів різної геометрії і різного рівня якості.

Таким чином, статистичний аналіз проведених експериментів повинен дати підтвердження теоретичних передумов про можливості оцінки якості магнітопроводів по параметрах високочастотних процесів.

Визначені діагностичні параметри:

- Усереднена постійна часу загасання вихрових струмів $T_{усер}$ [мкс];

- Діагностичний коефіцієнт Кд [безрозмірна величина].

Основні задачі, які вирішувались для поставленої задачі, були:

1. Встановлення статистичного зв'язку між узагальненими діагностичними параметрами і ступенем дефектності шихтованих магнітопроводів різної геометрії.
2. Побудова довірчих інтервалів, в межах яких знаходяться досліджувані параметри з відомим ступенем достовірності, ціллю виявлення можливої точності в оцінці якості магнітопроводів.
3. Встановлення значної кореляції між питомими втратами в магнітопроводі і діагностичними параметрами.
4. Побудова регресійної залежності між $P_{\text{пит}}$ та діагностичними параметрами $T_{\text{усер}}$ і Кд на основі регресивного аналізу для повної вибірки магнітопроводів різної геометрії і різного рівня якості.

2.2 Вибірка по зв'язку коефіцієнту дефектності і геометричних розмірів для якісних магнітопроводів

Для більш якісної оцінки стану шихтованих осердь при наступних дослідженнях використовувався високочастотний індукційний метод. Особлива увага приділялась вимірюванню відношення напруги на частотах 10кГц до 1кГц.

$$K_d = \frac{U_{f10\text{кГц}}}{U_{f1\text{кГц}}}, \quad (2.26)$$

По цьому відношенню Кд можна більш інформативно оцінити стан магнітопроводу та з певною точністю дізнатись питомі втрати в досліджуваному осерді.

В табл. 2.2. представлена вибірка по зв'язку між коефіцієнтом дефектності Кд в магнітопроводах при фіксованих $P_{\text{пит}}$ і різної геометрії якісних шихтованих магнітопроводів. 35 незалежних спостережень, отриманих по результатах експериментів, проведених у виробничих цехах ТОВ «ЕНЕРСІС УКРАЇНА» та «Міськводоканал» СМР м.Суми, містять 7 груп по 5 осердь двигунів, упорядкованих по зростанню потужності, що відповідає змінній геометрії

магнітопроводів. Магнітопроводи всіх цих двигунів серії 4А мали питомі втрати $P_{\text{пит}} = \sim 4 \text{ Вт/кг}$ при $f=50 \text{ Гц}$ і $B = 1 \text{ Тл}$, що являється допустимим з точки зору якості.

Таблиця 2.2 – Вибірка по зв'язку між питомим втратами і коефіцієнтом K_d

Серія	Р, кВт	Питомі втрати (1/50Тл)/Діагностичний коефіцієнт K_d				
4A71B4	0.75	3,15/6,1	3.95/6,1	4.2/5,8	4/5,95	3,4/5,9
4A80A4	1,1	4.1/5,6	2.8/6,1	4.1/5,55	3.85/5,86	3.85/5,65
4A80B4	1.5	2,7/6	3.2/6	3.8/5,7	3.8/5,75	3.9/5,63
4A90L4	2,2	3.9/5,82	4.3/5,5	3.25/5,9	3.35/5,85	2,8/6,04
4A100S4	3,0	3.3/5,9	3.4/5,65	4/5,5	3.2/5,8	2,9/5,85
4A100L4	4,0	4/5,58	4.1/5,5	3.2/5,8	3.8/5,59	3,1/5,81
4A112M4	5,5	3.9/5,63	3.2/5,86	3.2/5,92	4/5,62	3/5,87
4A132S4	7,5	4.1/5,56	3.9/5,8	2,8/6	3.8/5,67	4/5,58
4A160S4	15	3,5/5,88	3,5/5,85	3.4/5,74	2,7/6,1	3,0/5,76

Статистичний аналіз передбачає пошук функції розподілу даної випадкової величини x .

При Гаусовому (або нормальному) розподілу стандартна густина і функція розподілу :

$$p(z) = (\sqrt{2\pi})^{-1} e^{-z^2/2}, \quad (2.27)$$

Де z – випадкова величина виду

$$z = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x}, \quad (2.28)$$

Де μ_x і σ_x – відповідні середнє значення і стандартне відхилення випадкової величини $x(k)$.

Виконаємо розрахунок по даним табл. 2.1, використовуючи наступні формули:

Оцінимо середнє значення випадкової величини

$$\bar{x} = \mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = 48.5, \quad (2.29)$$

Дисперсія випадкової величини

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 = 37.2, \quad (2.30)$$

Графік отриманої функції розподілу показано на рис 2.1.

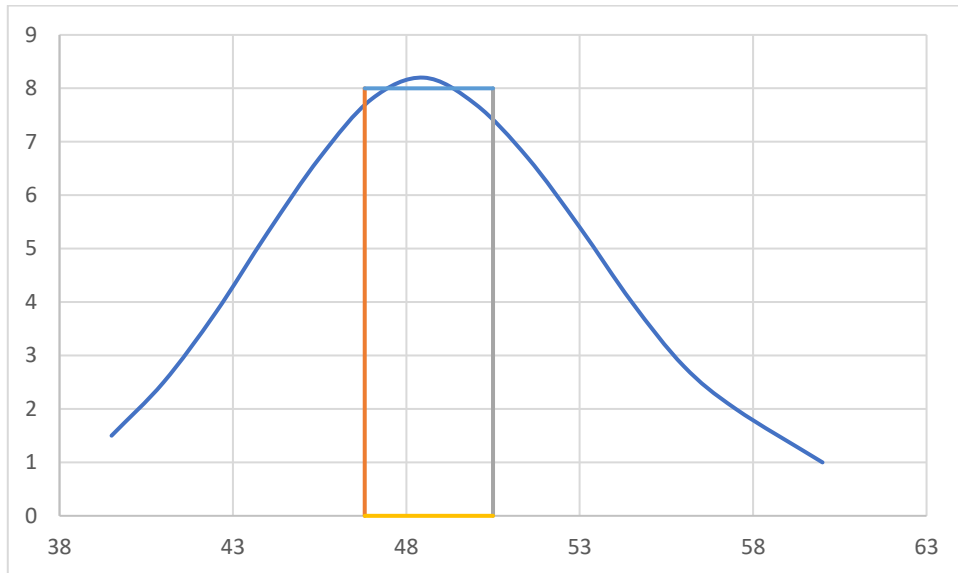


Рисунок 2.1 – Графік розподілу отриманої функції

Як видно, ця функція майже ідеально відповідає Гаусовій функції розподілу випадкової величини, унімодальна, монотонно змінюється по обидва боки моди. Той факт, що приведена функція підкоряється закону нормального розподілу, дозволяє стверджувати, що діагностичний параметр для якісних магнітопроводів практично не залежить від зміни геометрії магнітопроводів.

Далі необхідна процедура оцінки параметрів, пов'язана з побудовою інтервалу, в якому знаходиться оцінюваний параметр $T_{\text{усер}}$ з відомим ступенем достовірності. Нехай вибіркове середнє \bar{x} , знайдене по N незалежним спостереженням випадкової величини x ($T_{\text{усер}}$), використовується в якості оцінки середнього μ_x . Зазвичай представляє інтерес оцінити μ_x в термінах деякого інтервалу $x \pm \alpha$, в який μ_x попадає з заданим ступенем достовірності. Такі інтервали можна будувати, якщо відомі вибіркові розподіли оцінки, що розглядається.

Відомо, що відносно значень вибіркового середнього X можна зробити наступне ймовірнісне твердження:

$$Prob \left[Z_{1-\alpha/2} < \frac{(\bar{x} - \mu_x)\sqrt{N}}{\sigma_x} \leq Z_{\alpha/2} \right] = 1 - \alpha, \quad (2.31)$$

Формально це твердження правильне до отримання вибірки і розрахунку \bar{x} . Після отримання вибірки значення \bar{x} стає досить визначеним числом, а не випадковою величиною. Відповідно, можна сказати, що ймовірнісне твердження, що міститься у формулі (2.31), втрачає сенс, оскільки величина $(\bar{x} - \mu_x)\sqrt{N}/\sigma_x$ або попадає у вказані межі, або не попадає. Іншими словами, після отримання вибірки формально правильним буде наступне твердження:

$$Prob \left[Z_{1-\alpha/2} < \frac{(\bar{x} - \mu_x)\sqrt{N}}{\sigma_x} \leq Z_{\alpha/2} \right] = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, \quad (2.32)$$

Зазвичай істинне значення ймовірності (2.32), рівне або нулю, або одиниці, невідомо. Проте у міру зменшення α (збільшення інтервалу, між $Z_{1-\alpha/2}$ і $Z_{\alpha/2}$) розумно вважати, що ця вірогідність скоріше рівна одиниці, ніж нулю. Інакше кажучи, якщо проводиться багато вибірок і для кожної з них вираховується значення \bar{x} , то можна очікувати, що величина, що приймає участь в формулі (2.32) буде попадати в указаний інтервал з відносною частотою, приблизно рівній $1-\alpha$. При такому підході можна стверджувати, що існує інтервал, в якому величина $(\bar{x} - \mu_x)\sqrt{N}/\sigma_x$ попадає з більшим ступенем достовірності. Такі твердження називаються довірчими. Інтервал, відносно якого робиться твердження, називається довірчим інтервалом. Ступінь довіри, що зіставляється довірчому твердженню, називається рівнем довіри.

При оцінюванні середнього значення довірчого інтервалу для середнього μ_x можна побудувати по вибіркового значенню \bar{x} , перегрупувавши члени у формулі

$$\bar{x} - \frac{\sigma_x Z_{\alpha/2}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{\sigma_x Z_{\alpha/2}}{\sqrt{N}}, \quad (2.33)$$

Далі, якби σ_x відома, то довірчий інтервал для μ_x можна побудувати по будувати по вибірковим значенням \bar{x} і S , перегрупувавши члени в формулі

$$\left[\bar{x} - \frac{St_{n,\alpha/2}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{St_{n,\alpha/2}}{\sqrt{N}} \right], n = N - 1, \quad (2.34)$$

В формулах використані властивості $Z_{1-\alpha/2} = -Z_{\alpha/2}$ і $t_{n,1-\alpha/2} = -t_{n,\alpha/2}$. Цим інтервалам відповідає рівень довіри $1 - \alpha$. Відповідно, довірче твердження звучить так: істинне значення μ_x попадає в указаний інтервал з довірчою вірогідністю $1 - \alpha$ або (в загальноприйнятих термінах) з довірчою вірогідністю $100(1 - \alpha)\%$. Схожі твердження можна робити відносно будь яких оцінок параметрів, тільки б були відомі відповідні вибіркові розподіли. Наступна формула дозволяє побудувати довірчий інтервал з рівнем довіри $1 - \alpha$ для дисперсії σ_x^2 по вибірковій дисперсії S^2 , що вирахована по вибірці розміром N :

$$\frac{nS^2}{\chi_{n,\alpha/2}^2} \leq \sigma_x^2 < \frac{nS^2}{\chi} , n = N - 1, \quad (2.35)$$

Де χ_n^2 – хі-квадрат розподіл х $n - N$ ступенем свободи.

В нашому випадку вибірка містить $N = 35$ незалежне спостереження розподіленої випадкової величини x (усереднене значення μ_x для якісних магнітопроводів різних геометрій).

Знайдемо 90-відсоткові довірчі інтервали для середнього значення і дисперсії випадкової величини X .

Відповідно формулі (2.34) довірчий інтервал з рівнем довіри $1 - \alpha$ для середнього значення μ_x будується по вибіркового середньому \bar{x} і дисперсії S^2 при розмірі вибірки $N = 35$.

$$\left[\left(\bar{x} - \frac{St_{34,\alpha/2}}{\sqrt{35}} \right) \leq \mu_x < \left(\bar{x} + \frac{St_{30,\alpha/2}}{\sqrt{31}} \right) \right], \quad (2.36)$$

З таблиці відсоткових точок t -розподілу Стюдента, приведеної в джерелі [74], знаходимо для $\alpha = 0.1$ $t_{34,\alpha/2} = t_{34,0.05} = 1.697$, тому інтервал має вигляд:

$$[(\bar{x} - 0.3048S) \leq \mu_x < (\bar{x} + 0.3048S)], \quad (2.37)$$

Відповідно формулі (2.37) довірчий інтервал для дисперсію σ_x^2 з рівнем довіри $1 - \alpha$ будується по вибірковій дисперсії S^2 при розмірі вибірки $N = 35$

$$\left[\frac{30S^2}{\chi_{30,\alpha/2}^2} \leq \sigma_x^2 < \frac{n30}{\chi_{30,1-\alpha/2}^2} \right], \quad (2.38)$$

З таблиці відсоткових точок, приведеної в джерелі [74], хі-квадрат розподілу для $\alpha = 0.1$ знаходимо $\chi^2_{34,\alpha/2} = \chi^2_{30,0.05} = 43.77$ і $\chi^2_{34,1-\alpha/2} = \chi^2_{30,0.95} = 18.49$ тому інтервал приймає вигляд:

$$(0.7768S^2) \leq \sigma_x^2 < (1.838S^2), \quad (2.39)$$

Залишається підставити вибіркове середнє і вибіркву дисперсію в формули для довірчих інтервалів.

Вибіркова дисперсія

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = 48.5, \quad (2.40)$$

Вибіркова дисперсія

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 = 39.7, \quad (2.41)$$

Отже, довірчі інтервали з рівнем довіри 90% для середнього значення і дисперсії випадкової величини x такі:

$$46.58 \leq \mu_x < 50.42$$

$$30.83 \leq \sigma_x^2 < 72.97$$

Проведення дослідження дозволяє стверджувати, що розподіл високоякісних магнітопроводів по μ_x можна виконувати з дуже високим рівнем точності для будь яких геометрій осердь, при умові можливості точно визначати саме значення μ_x .

2.3 Визначення коефіцієнту кореляції і лінійний регресійний аналіз вибірок по зв'язку питомих втрат і узагальненого діагностичного параметру

Існування взаємозв'язків і їх відносну силу можна виміряти коефіцієнтом кореляції ρ . В простому випадку двох випадкових величин x і y коефіцієнт кореляції задається формулою

$$\rho_{xy} = \frac{C_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (2.42)$$

Де C_{xy} – кореляція x і y

$$C_{xy} = E\{x(k)y(k)\} - E\{x(k)\}E\{y(k)\}, \quad (2.43)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2} = \sqrt{E\{(x(k) - \mu_x)^2\}}, \quad (2.44)$$

$$\mu_x = E\{x(k)\}, \quad (2.45)$$

Нехай тепер для випадкових величин x і y маємо вибірку, отриману з N пар спостережних значень. Коефіцієнт кореляції можна оцінити по вибірковим даним наступним чином:

$$r_{xy} = \hat{\rho}_{xy} = \frac{S_x}{S_x S_y} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - N \bar{x} \bar{y}}{[\sum_{i=1}^N (x_i^2 - N \bar{x}^2) (y_i^2 - N \bar{y}^2)]^{1/2}}, \quad (2.46)$$

Як і ρ_{xy} , вибірковий коефіцієнт кореляції лежить між -1 і +1 і приймає одне з граничних значень тільки при наявності ідеальної лінійки зв'язку між спостереженнями. Нелінійний зв'язок і (або) розкид даних, викликані помилками виміру або неповною корельованістю випадкових величин, призводить до зменшення абсолютного значення r_{xy} .

Для оцінки точності вибіркового значення r_{xy} зручно використовувати деяку функцію від r_{xy}

$$\omega = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{1 + r_{xy}}{1 - r_{xy}} \right], \quad (2.47)$$

Відомо, що розподіл випадкової величини ω можна апроксимувати нормальним розподілом з середнім значенням і дисперсією виду:

$$\mu_\omega = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{1 + \rho_{xy}}{1 - \rho_{xy}} \right], \quad (2.48)$$

На основі цих відношень легко побудувати довірчі інтервали для ρ_{xy} по вибірковій оцінці r_{xy} .

Через вибіркoву змінність оцінок кореляції зазвичай приходитьcя перевіряти, чи свідчить нульове значення вибіркового коефіцієнту кореляції про існування статистично значної кореляції між випадковими величинами, що досліджуються. Зробити це можна, перевібивши гіпотезу $\rho_{xy} = 0$, при чому відношення гіпотези буде говорити про значимість кореляції. З формул (2.47), (2.48) слідує, що при $\rho_{xy} = 0$ вибірковий розподіл ω буде нормальним з середнім $\mu_\omega = 0$ і дисперсією

$\sigma_{\omega}^2 = 1/N - 3$. Тому область прийняття гіпотези з нульовою кореляцією буде мати вигляд

$$\left[-Z_{\alpha/2} \leq \frac{\sqrt{N-3}}{2} \ln \left[\frac{1+r_{xy}}{1-r_{xy}} \right] < Z_{\alpha/2} \right], \quad (2.49)$$

Де Z – стандартна, нормально розподілена випадкова величина. Якщо значення виявиться поза цим інтервалом, то це буде ознакою наявності статистичної кореляції з рівнем значимості α .

Виходячи з даних експерименту про зв'язок діагностичних параметрів з питомими втратами в магнітопроводах однотипних двигунів 4А потужністю 2,2 кВт. Визначимо рівень корельованості μ_x і P з рівнем значимості $\alpha=0,05$.

Нехай x – коефіцієнт μ_x , а y – питомі втрати.

$$\sum_{i=1}^N x_i y_i = 23843; \sum_{i=1}^N x_i^2 = 215467; \sum_{i=1}^N y_i^2 = 2822.93;$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \frac{2517}{32} = 78.66; \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i = \frac{281.9}{32} = 8.8$$

Підставимо ці значення в формулу (2.47) і отримаємо оцінку коефіцієнту кореляції:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - N \bar{x} \bar{y}}{[\sum_{i=1}^N (x_i^2 - N \bar{x}^2) (y_i^2 - N \bar{y}^2)]^{1/2}} = 0.7, \quad (2.50)$$

По формулі (2.48) величина $N = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{1+r_{xy}}{1-r_{xy}} \right] = 0.87$ тому $\omega \sqrt{N-3} = 4.7$.

Гіпотеза $r_{xy} = 0$ повинна бути відкинута з рівнем значимості 5% оскільки $\omega \sqrt{N-3} = 4.7$ не попадає в область прийняття гіпотези, що обмежена величинами $\pm Z_{\alpha/2} = \pm 1.96$. Отже, можна рахувати, що по даних представленої вибірки між узагальненим діагностичним параметром k_d і питомими втратами ρ' існує значима кореляція.

Розглянуте дослідження було приведено для прикладу. Для подальших вибірок використовують повністю автоматизований розрахунок так як наступні вибірки будуть на порядок і на декілька порядків більше. Найбільша вибірка $N =$

200 представлена для зв'язку між μ_x і $p_{\text{пит}}$ для магнітопроводів по експериментам на (табл. 2.1). В цій таблиці значення питомих втрат, вимірюваних при індукції 1 Тл і промисловій частоті дано в Вт/кг.

Кореляційний аналіз дозволяє встановити ступінь взаємозв'язку двох чи більше величин. Однак поруч з цим бажано мати модель цього зв'язку, яка дала б можливість передбачати значення однієї випадкової величини по конкретним значенням іншої.

В нашому випадку кореляційний аналіз даних численних експериментів встановив значний лінійний зв'язок між діагностичними параметрами в магнітопроводах, що досліджуються, і питомими втратами на перемагнічування. Логічний наступний крок, конкретизувати цей зв'язок так, щоб по даному узагальненому діагностичному параметру можна було б передбачати питомі втрати $P_{\text{пит}}$.

Методи вирішення подібних задач мають назву «регресійний аналіз». В нашому випадку x може бути діагностичним параметром, а y – питомими втратами. Лінійний зв'язок між двома випадковими величинами означає, що прогноз значення величини y по даному аналізу має вигляд

$$\tilde{y} = A + Bx, \quad (2.51)$$

Де A і B – це відповідно відрізок осі ординат, що відсікається прямою, і її нахил. Якщо дані пов'язані ідеальною лінійною залежністю $r_{xy} = 1$, то передбачене значення \tilde{y}_i буде точно рівнятись спостережному значенню y_i при будь якому даному x_i .

Проте на практиці зазвичай відсутня ідеальна лінійна залежність між даними. Тим не менш, якщо все ж припустити існування лінійного зв'язку і наявність необмеженої вибірки, то можна підібрати такі значення A і B , які дадуть можливість передбачити очікуване значення y_i для будь якого даного x_i . Це означає, що \tilde{y}_i не обов'язково співпадає зі значенням, що спостерігається y_i , відповідному даному x_i , проте воно буде рівне середньому значенню всіх таких значень.

Загальноприйнята процедура визначення коефіцієнтів рівняння (2.51) полягає в виборі таких значень A і B , які мінімізують суму квадратів відхилень значень від передбаченого значення y . Ця процедура називається методом найменших квадратів. Точніше, оскільки відхилення значень, що спостерігаються, від передбачених рівні

$$y_i - \tilde{y}_i = y_i - (A + Bx_i), \quad (2.52)$$

то сума квадратів відхилень має вигляд

$$Q = \sum_{i=1}^N (y_i - A - Bx_i)^2, \quad (2.53)$$

Отже, найкраще погодження в сенсі найменших квадратів забезпечить значення A і B , для яких

$$\frac{\partial Q}{\partial A} = \frac{\partial Q}{\partial B} = 0, \quad (2.54)$$

На практиці зазвичай є обмежена вибірка з N пар спостережних значень x і y . Це означає, що рівняння (2.54) дає всього на всього тільки оцінки A і B . Позначимо їх a і b відповідно. Підставляючи (2.53) в рівняння (2.54) і вирішуючи його відносно оцінок величин A і B , отримаємо

$$a = \bar{y} - b\bar{x}, \quad (2.55)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - N\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - N\bar{x}^2}, \quad (2.56)$$

Ці оцінки можна тепер використовувати для побудови моделі, що дозволяє передбачати y по даному x :

$$\hat{y} = a + bx = (\bar{y} - b\bar{x}) + bx = \bar{y} + b(x - \bar{x}), \quad (2.57)$$

Пряма лінія, що задається рівнянням (2.57), називається прямою лінійної регресії y на x . Замінивши ролями залежну і незалежну змінну в рівняннях (2.55) і (2.56), отримаємо пряму регресії x на y

$$\hat{x} = \bar{x} + b'(y - \bar{y}), \quad (2.58)$$

$$b' = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - N\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^N y_i^2 - N\bar{y}^2}, \quad (2.59)$$

Порівняння формул (2.55) і (2.56) з формулою (2.46) показує, що нахили прямих регресії y на x і x на y пов'язані з вибіркоvim коефіцієнтом кореляції відношенням

$$r_{xy} = [bb']^{1/2}, \quad (2.60)$$

Встановимо точність a і b , визначених по формулах (2.55), (2.60), як показано в [74], в передбаченні нормальності розподілу y при даному x . Оцінки a і b є незміщеними оцінками A і B відповідно. Їх вибіркоvi розподіли пов'язані з t -розподілом відношень

$$\frac{Q - A}{\left(\frac{1}{N} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right)^{1/2}} = S_{y|x} t_{N-2}, \quad (2.61)$$

$$\frac{b - B}{\left(\frac{1}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right)^{1/2}} = S_{y|x} t_{N-2}, \quad (2.62)$$

Особливий інтерес представляє вибіркоvi розподіл \hat{y} при конкретному $x = x_0$. Воно має вигляд

$$\frac{\hat{y} - \tilde{y}}{\left(\frac{1}{N} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right)^{1/2}} = S_{y|x} t_{N-2}, \quad (2.63)$$

В формулах (2.61)-(2.63) величина $S_{y|x}$ це вибіркoве стандартне відхилення значення y_i , що спостерігається, від передбаченого $\hat{y}_i = a + bx_i$ рівне

$$S_{y|x} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - 2} \right]^{1/2} = \left[\left(\frac{n-1}{n-2} \right) S_y^2 (1 - r_{xy}^2) \right]^{1/2}, \quad (2.64)$$

Приведені вище співвідношення (2.64) дають можливість побудувати довірчі інтервали для A , B і \hat{y} по оцінках a , b і \hat{y} .

Визначимо по даним, що є в таблиці 2.1, пряму, що задає лінійний прогноз питомих втрат в магнітопроводі $P_{\text{пит}}$ по діагностичним параметрам $T_{\text{усер}}$ і K_d . Треба відмітити, що для регресії в загальному випадку більш складніша залежність, ніж лінійна, але так як коефіцієнт кореляції великий, можна задаватись лінійною

функцією регресії. Нехай так як і раніше x позначає діагностичний параметр, а $y=P_{\text{пит}}$. Величини, що необхідні для визначення нахилу та відрізка, що обмежується прямою, вже були вираховані раніше. Підставивши їх в формули (2.55) і (2.56), знайдемо

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - N\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - N\bar{x}^2}, \quad (2.65)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}, \quad (2.66)$$

Відповідно, пряма регресії, що оцінює середні питомі втрати по діагностичному параметру $T_{\text{усер}}$ має вид

$$y = 0.38 + 0.068x$$

Звідки для $T_{\text{усер}}=50$ $\mu\text{с}$ отримуємо $P=3.78$ Вт/кг; для $T_{\text{усер}}=80$ $\mu\text{с}$ $P=5,82$ Вт/кг; для $T_{\text{усер}}=130$ $\mu\text{с}$ $P=9,22$ Вт/кг; для $T_{\text{усер}}=180$ $\mu\text{с}$ $P=12,62$ Вт/кг.

Для побудови довірчого інтервалу для середніх питомих втрат $y(P)$ по оцінках $y=3,78$ Вт/кг, $y=5,82$ Вт/кг, $y=9,22$ Вт/кг і $y=12,62$ Вт/кг необхідно визначити по формулах (2.63). З обчислювальної точки зору зручніше користуватись формулою

$$S_{y|x} = \left[\frac{1}{N-2} \left(\sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y})^2 - \frac{\sum_{i=1}^N ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.67)$$

Розрахунки по яким можна спростити, замітивши, що

$$\sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2 = \sum_{i=1}^N v_i^2 - N\bar{v}^2, \quad (2.68)$$

$$\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum_{i=1}^N x_i y_i - N\bar{x}\bar{y}, \quad (2.69)$$

Тоді по формулі (2.63) 95-відсотковий довірчий інтервал для середніх питомих втрат по діагностичному параметру $T_{\text{усер}}$ (для 4-х значень $T_{\text{усер}}=50; 80; 130; 180$) визначається так:

$$\hat{y}_1 \pm S_{y|x} t_{N-2; \alpha/2} \left[\frac{1}{N} + \frac{x_0 - \bar{x}}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right]^{1/2}, \quad (2.70)$$

Отже, по отриманих результатах кореляційного і регресійного аналізу представленої вибірки можна констатувати, що по діагностичну параметру $T_{\text{усер}} = 50 \text{ мкс}$ можна оцінити питомі втрати в межах від 3,4 до 4,15 Вт/кг, по $T_{\text{усер}} = 80 \text{ мкс}$ питомі втрати від 5,56 до 6,15 Вт/кг, по $T_{\text{усер}} = 130 \text{ мкс}$ питомі втрати від 8,92 до 9,6 Вт/кг, по $T_{\text{усер}} = 180 \text{ мкс}$ питомі втрати від 12,12 до 13,4 Вт/кг.

Користуючись цією ж методикою та створеними програмами автоматизованого розрахунку визначимо регресійну залежність між $P_{\text{пит}} = y$ і $K_d = x$.

Отриманий вираз для регресійної залежності

$$y = 30,8 - 4,7x$$

В даному випадку коефіцієнт B має від'ємне значення. По отриманих результатах кореляційного і регресійного аналізу представленої вибірки можна констатувати, що по діагностичну параметру $K_d = 5,85$ можна оцінити питомі втрати в межах від 3,12 до 3,57 Вт/кг, по $K_d = 5,35$ питомі втрати від 5,48 до 5,73 Вт/кг, по $K_d = 4,7$ питомі втрати від 8,57 до 9,03 Вт/кг, по $K_d = 4$ питомі втрати від 11,68 до 12,42 Вт/кг.

Базуючись на отриманих фізичних та статистичних залежностях між питомими втратами в магнітопроводі $P_{\text{пит}}$ і діагностичними параметрами $T_{\text{усер}}$ і $K_d = \frac{U_{f10000}}{U_{f1000}}$ визначено чотири ступені якості (дефектності) магнітопроводів, що представлені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Ступені дефектності магнітопроводів в залежності від діагностичних параметрів K_d і $T_{\text{усер}}$

Рівень дефектності	$P_{\text{пит}}$ Вт/кг	K_d	$T_{\text{усер}}$, мкс
Якісний	2,6-4	5,5-6	35-52
Брак 1	4-8	4,7-5,5	55-115
Брак 2	8-12,	4-4,7	120-175
Аварійний	більше 12	менше 4	180 і більше

Якщо оцінювати апаратні складнощі в вимірюванні діагностичних параметрів $T_{\text{усер}}$ та K_d , то переваги простоти і зручності на боці останнього. Оцінка

$T_{\text{усер}}$ є більш складною схемною операцією пов'язаною з вимірюванням та аналізом імпульсної величини наведеної ЕРС.

Значно простіше вимірювати діюче значення гармонійного сигналу на контрольній обмотці на двох фіксованих частотах 1 і 10 кГц та визначати їх співвідношення. Для цього існують відпрацьовані схемні рішення, тому основна увага в подальших дослідженнях буде приділена саме вивченню височастотних гармонійних процесів. Усереднена стала часу загасання вихрових струмів буде використовуватись при реалізації комплексного методу оцінки якості міжлистової ізоляції та рівня пресування та розпушеності пакету, побудованого на аналізі одночасного механічного (ударно-вібраційного) та електромагнітного (індукційного) впливу на магнітопровід.

2.4 Встановлення зв'язку між питомими втратами в окремому магнітопроводі з загальними втратами в зібраному двигуні

Ватметровий спосіб оцінки питомих втрат базується на використанні живлячої обмотки при $f=50\text{Гц}$ і створенні індукції 1Тл і вимірюванні активної складової повних втрат з наступним діленням на масу магнітопроводу. В даному випадку зубці не враховуються в магнітному відношенні, тому що магнітний потік в них майже не заходить, але в електричному відношенні паразитні контури вихрових струмів, що замикають пластини між собою є КЗ контурами, що охоплюють потік у ярмі магнітопроводу та суттєво впливають на питомі магнітні втрати.

В існуючій практиці проектування ЕМ на прикладі асинхронних машин загальні втрати в магнітопроводі при роботі в машині визначаються за формулами

$$P_{\text{ст.осн}} = p_{1,0} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta (k_{\text{да}} B_a^2 m_a + k_{\text{дз}} B_z^2 m_z), \quad (2.71)$$

За цими виразами на основі емпіричних залежностей достатньо точно рахуються основні втрати в магнітопроводі та пов'язані з ними загальні магнітні втрати в залежності від питомих втрат в вибраній для магнітопроводу

електротехнічній сталі з певною товщиною листа, фіксованою індукцією $B=1\text{Тл}$ при частоті $f=50\text{Гц}$. Наприклад для сталі 2013 $P_{\text{пит}(1,0/50)}=2,6\text{ Вт./кг.}$

На прикладі двигуна 4A160S4Y3 15кВт 4р показано вплив питомих втрат в магнітопроводах різного рівня дефектності на загальні втрати в зібраному асинхронному двигуні. Також оцінювався вплив ступеню дефектності магнітопроводів на перевищення температури обмотки в пазах зібраної машини табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Зв'язок питомих втрат $P_{\text{пит}1,0/50}$ та температури в обмотці з основними магнітними втратами в робочому двигунів 4A160S4Y3

$P_{\text{пит}},$ Вт/кг	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
$P_{\text{ст.осн}},$ Вт	266,1	319,3	372,5	425,7	479	532,2	585,4	638,6	691,8
T, °C	130,9	133,1	135,3	137,4	139,5	141,7	143,9	146,1	148,3
$P_{\text{пит}},$ Вт/кг	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11
$P_{\text{ст.осн}},$ Вт	745	798,2	851,4	904,6	957,8	1011	1064	1117	1170
T, °C	150,5	152,7	154,8	157	159,2	161,4	163,6	165,8	168
$P_{\text{пит}},$ Вт/кг	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	
$P_{\text{ст.осн}},$ Вт	1223	1277	1330	1383	1436	1490	1543	1596	
T, °C	170	172,4	174,6	176,8	179	181,2	183,4	185,6	

Виходячи з експериментальних даних можна зробити висновок, що вимірювання питомих втрат в магнітопроводі достатньо точно дозволяють оцінити загальні втрати в двигуні одного габариту та певного діапазону потужності.

Дані дослідження втрат у 54 двигунах різної потужності та габариту показано в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Залежність основних втрат в сталі від питомих втрат $P_{1,0/50}$ для двигунів різної потужності та габариту

№	Назва двигуна	P_2 , кВт	$P_{\text{пит}}$, Вт/м	$P_{\text{ст.осн}}$, Вт
1	4AA63B4Y3	0,37	3,65	10,39

2	4AA63B4Y3	0,37	5,85	16,65
3	4A71B4Y3	0,75	5,03	29,02
4	4A71B4Y3	0,75	6,3	36,35
5	4A71B2Y3	1,1	3,8	32,15
6	4A80A4Y3	1,1	3,9	33,00
7	4A80A4Y3	1,1	6,3	53,31
8	4A80B4Y3	1,5	5,4	62,31
9	4A80B4Y3	1,5	8,9	102,69
10	4A80B4Y3	1,5	5,5	63,46
11	4A80B4Y3	1,5	3,8	43,85
12	4A90L6Y3	1,5	4,25	49,04
13	4A100L6Y3	2,2	5,04	85,29
14	4A100L6Y3	2,2	7,2	121,85
15	4A100L6Y3	2,2	6,8	115,08
16	4A90L2Y3	3	8,85	204,23
17	4A90L2Y3	3	4,15	95,77
18	4A90L2Y3	3	5,6	129,23
19	4A100L4Y3	4	5,5	169,23
20	4A100L4Y3	4	7,85	241,54
21	4A100L4Y3	4	5	153,85
22	4A112M4Y3	5,5	3,6	152,31
23	4A112M4Y3	5,5	3,8	160,77
24	4A112M4Y3	5,5	9,8	414,62
25	4A100L2Y3	5,5	5,85	247,50
26	4A100L2Y3	5,5	6,3	266,54
27	4A100L2Y3	5,5	7,8	330,00
28	4A100L2Y3	5,5	6,1	258,08
29	4A112M2Y3	7,5	6,6	380,77

30	4A112M2Y3	7,5	5,4	311,54
31	4A112M2Y3	7,5	5,12	295,38
32	4A132S4Y3	7,5	11,9	686,54
33	4A132M4Y3	11	8,5	719,23
34	4A132M4Y3	11	9,3	786,92
35	4A132M4Y3	11	9,4	795,38
36	4A132M2Y3	11	8	676,92
37	4A132M2Y3	11	5,6	473,85
38	4A180M8Y3	15	5,6	646,15
39	4A180M8Y3	15	4,7	542,31
40	4A180M8Y3	15	3,95	455,77
41	4A180M8Y3	15	9,9	1142,31
42	4A180M6Y3	18,5	12,3	1750,38
43	4A180M6Y3	18,5	7,65	1088,65
44	4A160M4Y3	18,5	7,9	1124,23
45	4A160M4Y3	18,5	4,3	611,92
46	4A180S4Y3	22	5,1	863,08
47	4A180S4Y3	22	8,9	1506,15
48	4A180M4Y3	30	4,5	1038,46
49	4A180M2Y3	30	7,6	1753,85
50	4A180M2Y3	30	3,8	876,92
51	4A200M2Y3	37	5,2	1480,00
52	4A200M4Y3	37	9,3	2646,92
53	4A200L2Y3	45	11,6	4015,38
54	4A200L2Y3	45	9,7	3357,69

Проаналізувавши отримані дані можна зробити висновок, що двигуни мали різні питомі втрати, що в свою чергу відповідає різному ступеню дефектності та стану міжлистової ізоляції.

Якщо віднести пораховані та виміряні експериментальним шляхом з дослідження холостого ходу загальні втрати до маси магнітопроводу, то є значна кореляція між рівнем дефектності магнітопроводу визначену ватметровим способом та загальними магнітними втратами при роботі машини не зважаючи на різницю габаритів обумовлену зростанням потужності машини. Тобто простежується наступна кореляційна низка: питомі втрати в окремому магнітопроводі, загальні магнітні втрати в зібраній машині і температура обмотки в пазах магнітопроводу з різними загальними втратами.

Для того, щоб забезпечити розрахунковий ресурс машини при збільшенні питомих втрат, обумовлених дефектністю магнітопроводу та відповідним зростанням температури в обмотках при роботі машини необхідно провести післяремонтну паспортизацію машини. Необхідно зменшувати номінальну потужність машини до забезпечення розрахункових значень температур обмоток.

Оскільки простежується значний фізичний і статистичний зв'язок між питомими втратами $P_{1,0/50}$ в магнітопроводі і загальними втратами в машині та температурою обмоток, яка в значній мірі визначає ресурс машини і при цьому є фізичний і статистичний зв'язок між визначеними діагностичними параметрами K_d і $T_{усер}$ і питомими втратами можна вважати, що ці параметри в значній мірі визначають надійність машини в цілому.

Висновки до Розділу 2

1. Запропоновані та обґрунтовані індукційні методи діагностики шихтованих магнітопроводів ЕМ, що використовують оцінку параметрів швидкоплинних електромагнітних процесів для визначення інтенсивності вихрових струмів обумовлених порушенням міжлистової ізоляції осердь

2. Проаналізовано швидкоплинні процеси в контурах з феромагнетиками показано, що при наявності інтегральних дефектів існує суттєва пряма залежність між питомими втратами в сталі і параметрами високочастотних процесів

3. Проведено статистичний аналіз по результатам експериментів на реальних зразках який підтверджує теоретичні висновки про можливість оцінки питомих втрат в магнітопроводі по параметрам швидкоплинних процесів. Встановлено значну кореляцію між питомими втратами в пакеті з усередненою постійною часу загасання вихрових струмів та відношенням наведених ЕРС на частотах 1кГц і 10кГц.

4. Визначена регресійна залежність та приведені довірчі інтервали для оцінки точності діагностичних параметрів, що вимірюються. Визначено чотири ступеня дефектності магнітопроводів та відповідні межі діагностичних параметрів.

5. Встановлено значну кореляцію між питомими втратами в магнітопроводі $P_{1,0/50}$ та загальними магнітними втратами та температурами в обмотках в зібраних і працюючих машинах різної потужності та геометрії магнітопроводу. Показано, що в результаті встановлення діагностичних параметрів і пов'язаних з ними питомих втрат в осердях необхідно проводити післяремонтну паспортизацію машини з обґрунтованим зменшенням навантаження для забезпечення розрахункового ресурсу роботи.

6. Окремо доведено, що магнітопроводи з аварійним рівнем дефектності повинні відбраковуватись і взагалі не підлягати ремонту.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРОЦЕСІВ В ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПРИ НАЯВНОСТІ ІНТЕГРАЛЬНИХ І ЛОКАЛЬНИХ ДЕФЕКТІВ МІЖЛИСТОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

3.1 Розрахунок високочастотних процесів при наявності інтегральних дефектів

Для розрахунку високочастотних процесів в шихтованих магнітопроводах при наявності інтегральних дефектів спершу слід змодельовати бездефектний магнітопровід в програмному пакеті COMSOL Multiphysics.

Для дослідження динамічних процесів в окремих листах шихтованого магнітопроводу використовуються загальновідомі рівняння Максвелла.

$$\operatorname{rot}(H) = J, \quad (3.1)$$

$$B = \operatorname{rot}(A), \quad (3.2)$$

$$\operatorname{rot}(E) = -\partial B / \partial t, \quad (3.3)$$

$$J = \gamma \cdot E + (v \times B) + \gamma E_{\text{ст}}, \quad (3.4)$$

де γ – питома електропровідність досліджуваного матеріалу, H і E вектори напруженості магнітного та електричного полів, B – вектор магнітної індукції, v – швидкість руху електропровідного середовища, $\gamma \cdot E_{\text{ст}}$ – визначає величину індукованої ЕРС в електропровідному середовищі.

Якщо досліджувана система має відому питому електропровідність γ (S/m), магнітну проникність μ (H/m) та вектори магнітного та електричного полів змінюються з кутовою частотою ω (rad/s) то рівняння Максвелла перетворюються і мають такий вигляд:

$$\frac{d^2 H}{dx^2} = k^2 \cdot H, \quad (3.5)$$

$$k^2 = j \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \mu, \quad (3.6)$$

Глибина проникнення (a) визначається за відомим виразом:

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu}}, \quad (3.7)$$

Зі зміною координати x змінюється не тільки величина щільності струму, а й її фаза. Джоулеві втрати можна визначити або за допомогою вектора Пойнтінга, або за допомогою інтегралу за об'ємом:

$$P = \frac{1}{\gamma} \cdot \int_V |J|^2 dv, \quad (3.8)$$

Якщо прийняти, що $R_0 = 1/4 \cdot b \cdot h \cdot \gamma$, [Ohm/m] – опір постійному струму, то ефективний опір провідника змінному струму R_{\sim} для випадку коли $2b > a$ можна записати у наступному вигляді:

$$R_{\sim} = \frac{b}{a} R_0 \left[\frac{\text{Ohm}}{m} \right], \quad (3.9)$$

У разі, якщо для досліджуваного провідника справедливе співвідношення $b \gg a$, то опір змінному струму, особливо при високих частотах, буде істотно відрізнятися від дійсного. У цьому випадку використовується наступний вираз для визначення R_{\sim} [1]:

$$R_{\sim} = \frac{1}{4 \cdot a \cdot h \cdot \gamma} \cdot \frac{\text{sh} \frac{2b}{a} + \sin \frac{2b}{a}}{\text{ch} \frac{2b}{a} - \cos \frac{2b}{a}}, \quad (3.10)$$

З виразу для напруженості електричного поля E (V/m) можна визначити значення ЕРС самоіндукції та щільності струму на поверхні провідника при $x = \pm b$. Виходячи з цього визначається повний Z , індуктивний x та активний опір R .

3.2 Моделювання бездефектного та дефектного шихтованого магнітопроводу

В якості прикладу для моделювання беремо умовний пакет з ізольованих листів електротехнічної сталі марки 2013 з відомими нормованими величинами магнітної проникності, електричної провідності та питомих втрат при індукції $B=1$ Тл і частоті $f=50$ Гц (рис. 3.1). Напруженість магнітного поля складає $H_0=4000$ А/м, електрична провідність сталі $\gamma=5 \cdot 10^6$ См/м.

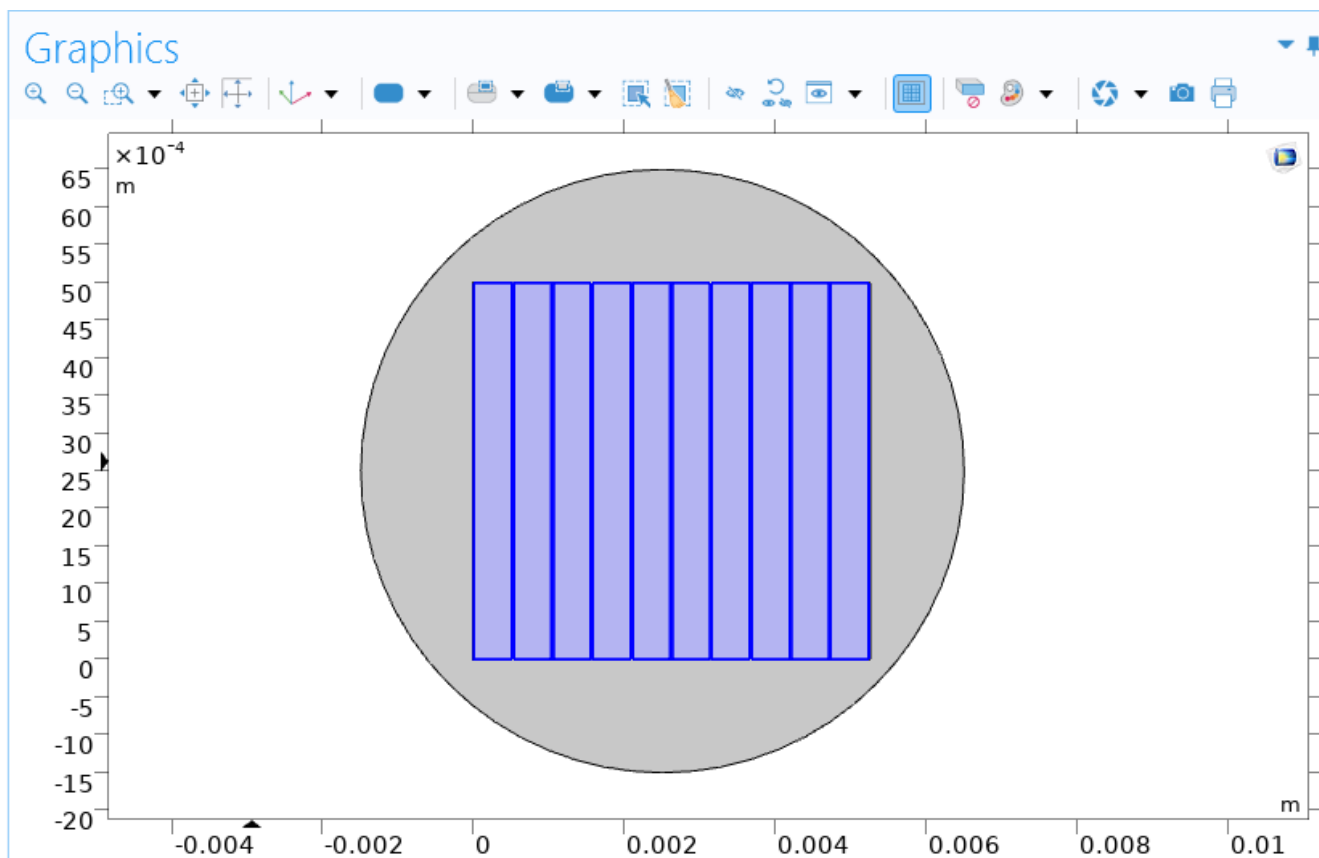
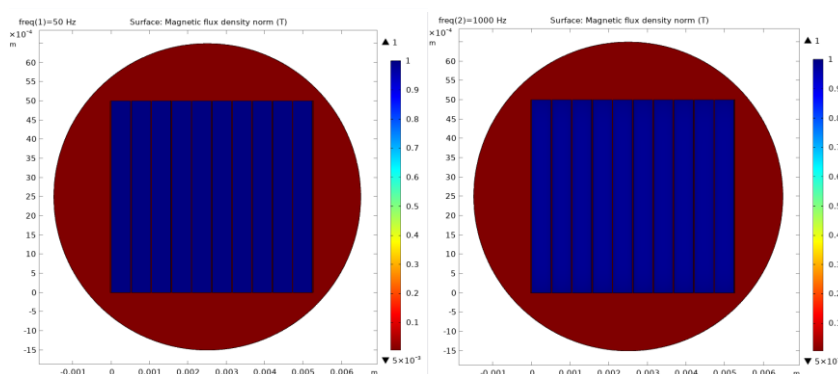


Рисунок 3.1 – Пакет з 10 пластин товщиною 0,5мм і висотою 5 мм

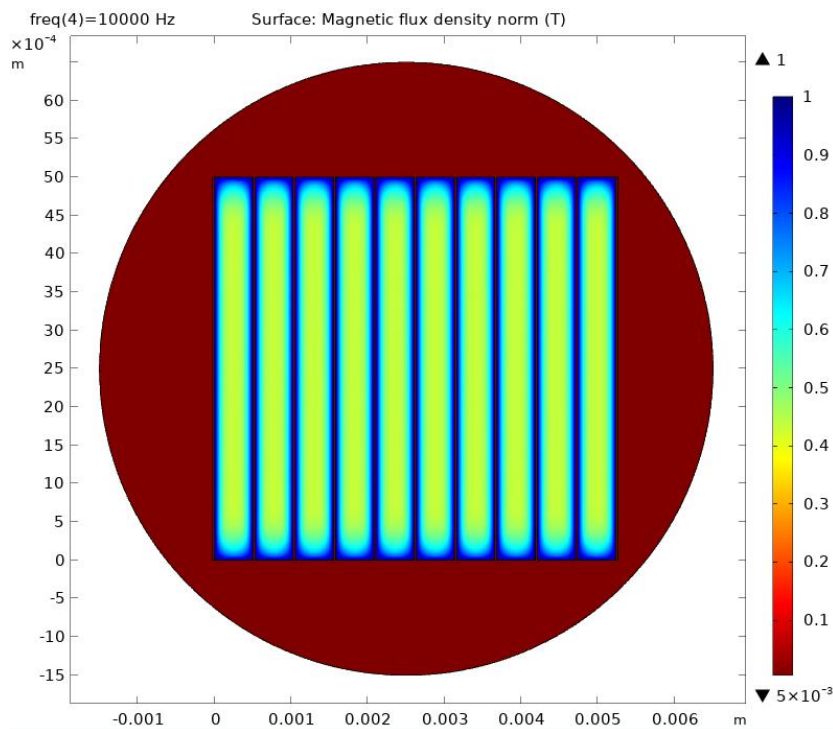
В двовимірній постановці задачі об'єм пакету рахується виходячи з умовної глибини $l=1\text{ м}$ тобто об'єм пакету складає $V=2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$. Для того щоб перейти від втрат, що приходяться на об'єм на більш прийнятні в практиці питомі втрати на масу $[\text{Вт/кг}]$ потрібно поділити об'єм на щільність електротехнічної сталі яка дорівнює 7800 кг/м^3 .

На рисунку 3.2 представлено розподіл магнітної індукції при частотах 50, 1000 і 10000 Гц.



А)

Б)



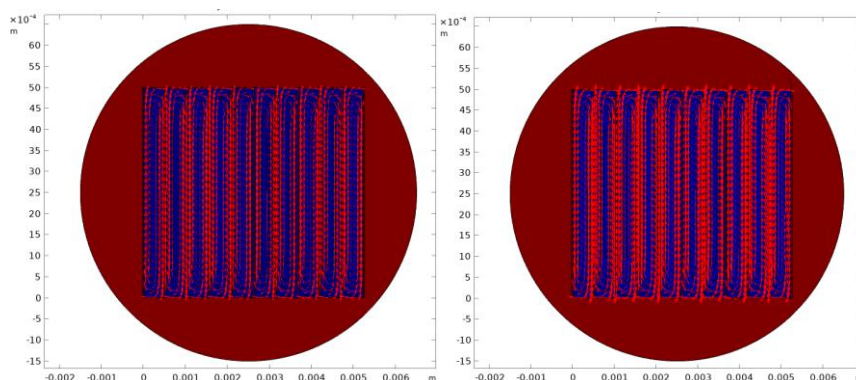
В)

Рисунок 3.2 – Картина розподілу магнітної індукції по товщині листів в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

Середня індукція становить:

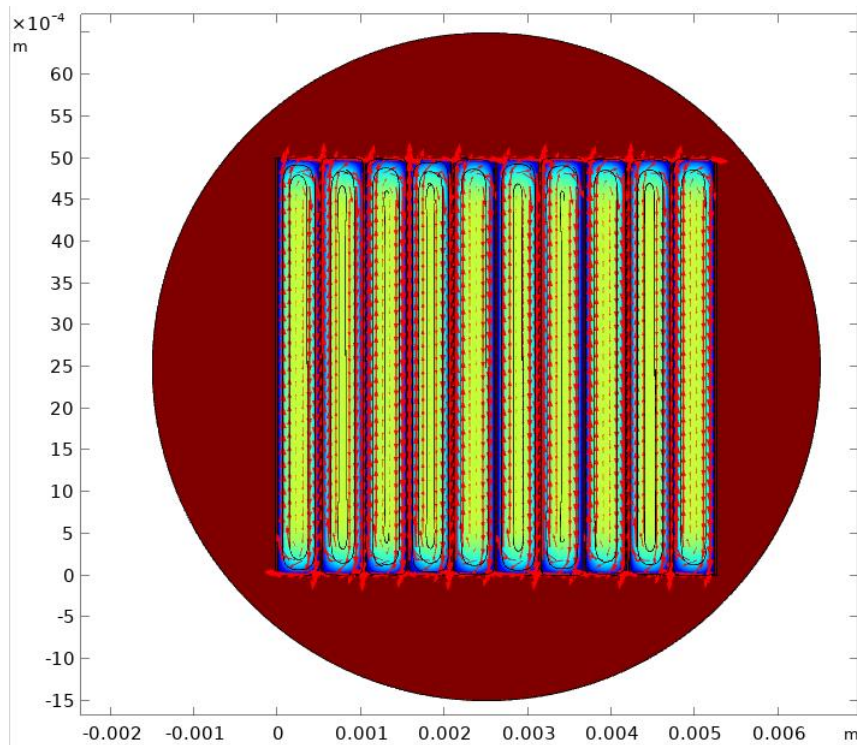
$$B_{\text{ср}/50} = 1 \text{ Тл}; B_{\text{ср}/1000} = 0,98 \text{ Тл}; B_{\text{ср}/10000} = 0,59 \text{ Тл}.$$

Картина поля свідчить про зменшення середньої індукції при зростанні частоти, при незмінній початковій напруженості поля, що свідчить про розмагнічуючу дію вихрових струмів інтенсивність яких зростає пропорційно квадрату частоти. Чітко видно ефект витіснення струму з середини листів на їх поверхню.



А)

Б)



В)

Рисунок 3.3 – Картина розподілу густини струмів по товщині листів в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

Втрати отримані при моделюванні:

$$P_{\text{пит}/50} = 0,62 \text{ Вт/кг}; P_{\text{пит}/1000} = 238,42 \text{ Вт/кг}; P_{\text{пит}/10000} = 5602,7 \text{ Вт/кг}.$$

Напруга:

$$U_{50} = 0,005 \text{ В}; U_{1000} = 0,109 \text{ В}; U_{10000} = 0,656 \text{ В}.$$

$$\frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 6.02$$

Зрозуміло, що таких високих втрат як на 10кГц на вихрові струми в реальності бути не може, хоча б тому що, при цьому повинна збільшуватись температура яка в свою чергу перевищить точку Кюрі.

Втрати на вихрові струми залежать від їх інтенсивності. Вихрові струми в пакеті магнітопроводу зростають при збільшенні електричної провідності матеріалу магнітопроводу, від збільшення товщини пластин, від зростання частоти та від паразитних контурів, обумовлених порушенням міжлистової ізоляції.

Першим кроком для оцінки втрат від збільшення вихрових струмів можна вважати умовне збільшення електричної провідності сталі. На рис.3.4 показано

розподіл магнітної індукції при зміні частоти переманічування $f=50, 1000$ і 10000 Гц при підтриманні напруженості магнітного поля $H_0=4000$ А/м і збільшенні електричної провідності сталі вдвічі, у порівнянні з базовим варіантом.

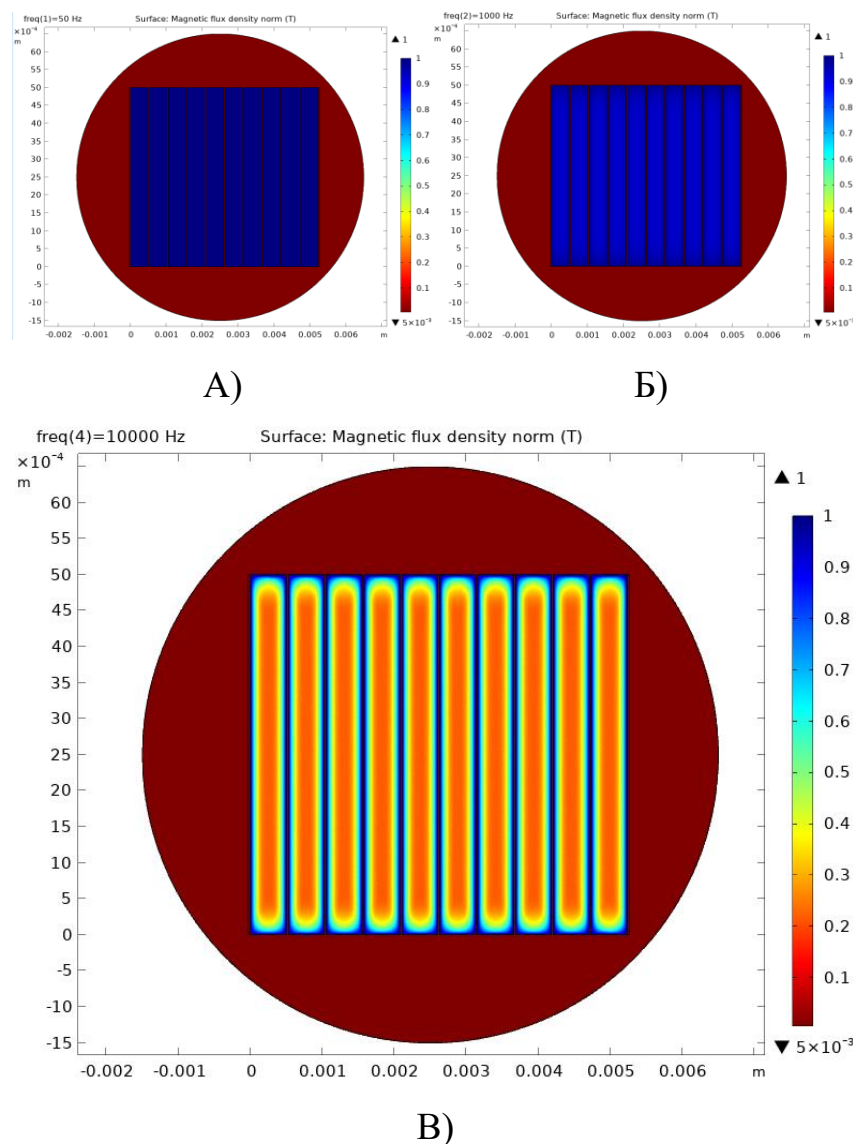
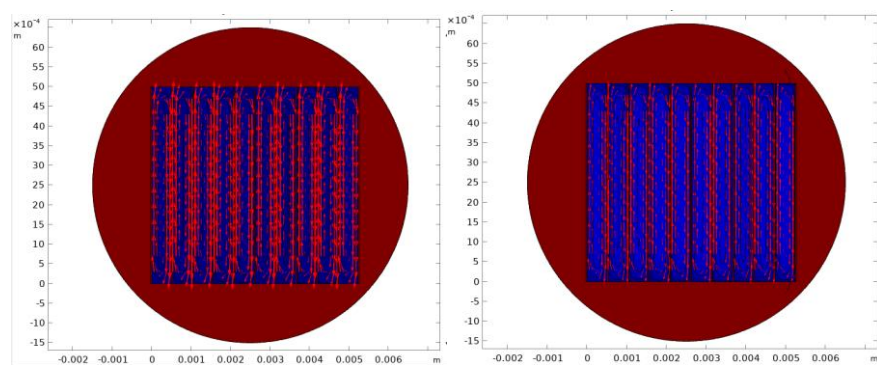


Рисунок 3.4 – Картина розподілу магнітної індукції по товщині листів при зміні електричної провідності в залежності від частоти: А) 50Гц; Б)1000Гц; В) 10000Гц

Середня індукція становить:

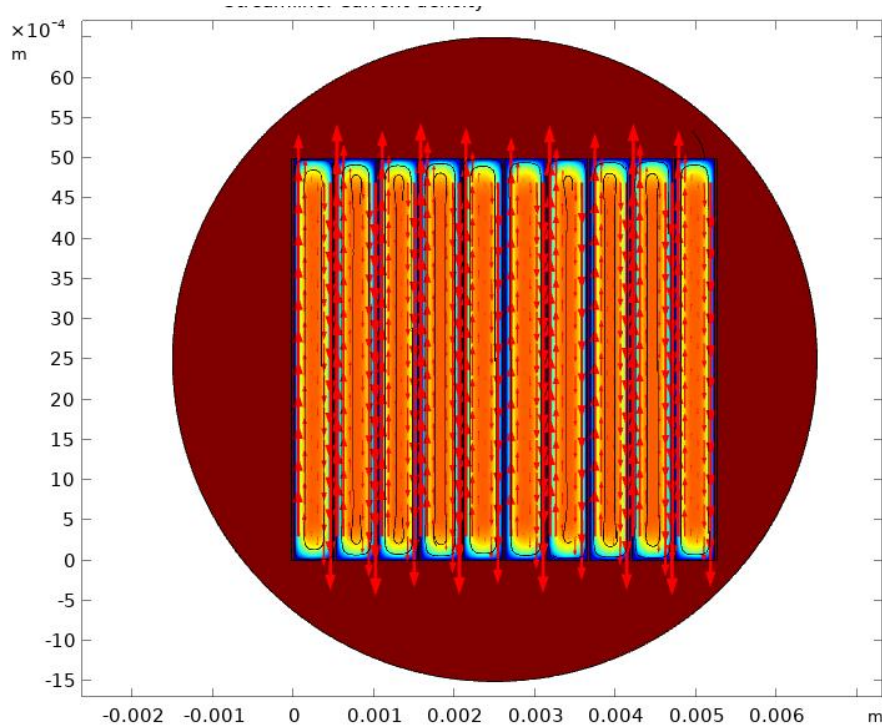
$$B_{\text{ср}/50} = 1\text{Тл}; B_{\text{ср}/1000} = 0,94\text{Тл}; B_{\text{ср}/10000} = 0,43\text{Тл}.$$

У порівнянні з попереднім випадком значення середньої магнітної індукції зменшується більше, що свідчить про розмагнічуючу дію вихрових струмів, що залежить не тільки від частоти а також і від провідності матеріалу осердя. Ефект витіснення струму також стає більш помітний.



А)

Б)



В)

Рисунок 3.5 – К артина розподілу густини струмів по товщині листів при зміні електричної провідності в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц;

В) 10000Гц

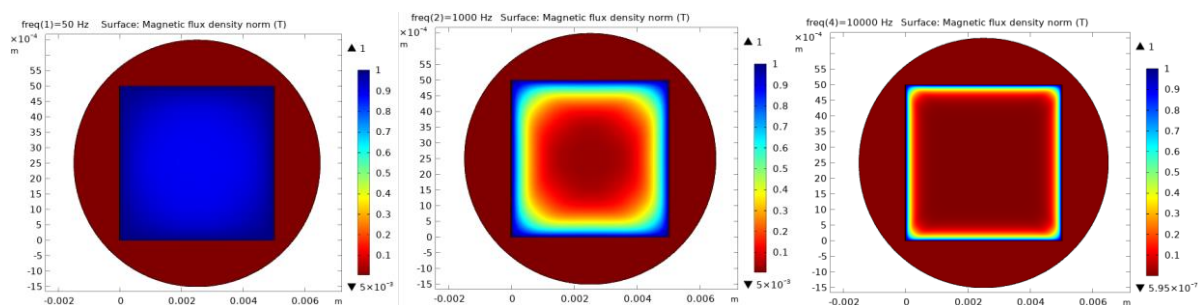
Втрати отримані при моделюванні:

$P_{\text{пит}/50} = 1,235 \text{ Вт/кг}$; $P_{\text{пит}/1000} = 430,91 \text{ Вт/кг}$; $P_{\text{пит}/10000} = 3863 \text{ Вт/кг}$.

Таблиця 3.1 – Зміна товщини листа

Товщина мм	Кількість листів шт	$V_{\text{сеп}/50}$ Тл	$V_{\text{сеп}/1000}$ Тл	$V_{\text{сеп}/10000}$ Тл	$P_{\text{пит}/50}$ Вт/кг	U_{1000} В	U_{10000} В	$\frac{U_{f10000}}{U_{f1000}}$
0,5	10	1	0,98	0,59	0,62	0,109	0,656	6,02
0,6	8	1	0,97	0,5	0,87	0,103	0,54	5,24

0,8	6	1	0,92	0,4	1,51	0,098	0,433	4,42
1	5	1	0,85	0,34	2,3	0,094	0,384	4,08
1,25	4	1	0,75	0,29	3,46	0,083	0,326	3,92
2,5	2	0,98	0,48	0,18	10,825	0,054	0,199	3,68
5	1	0,93	0,35	0,12	22,54	0,038	0,135	3,55



А)

Б)

В)

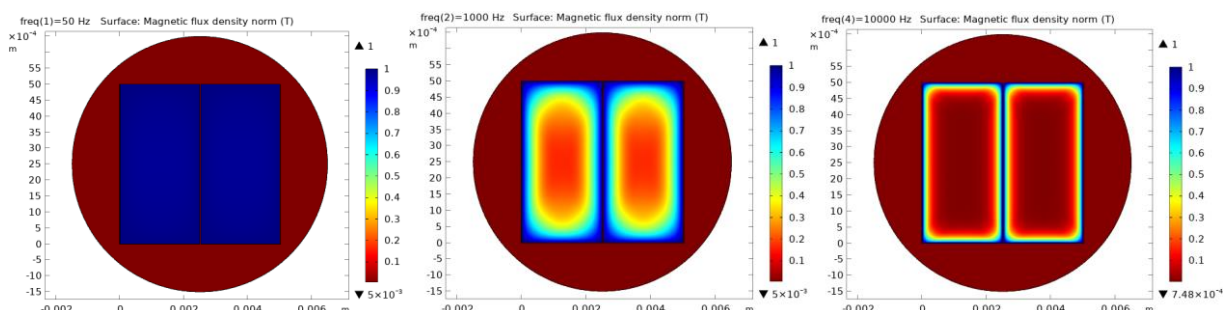
Рисунок 3.6 – Картина розподілу магнітної індукції по товщині 1 листа в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

Середня індукція становить: $V_{\text{ср}/50} = 0,93\text{Тл}$; $V_{\text{ср}/1000} = 0,35\text{Тл}$; $V_{\text{ср}/10000} = 0,12\text{Тл}$.

Питомі втрати: $P_{\text{пит}/50} = 22,54\text{ Вт/кг}$; $P_{\text{пит}/1000} = 281,58\text{ Вт/кг}$; $P_{\text{пит}/10000} = 979,35\text{ Вт/кг}$.

Напряга: $U_{50} = 0,005\text{ В}$; $U_{1000} = 0,038\text{ В}$; $U_{10000} = 0,135\text{ В}$.

$$\frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 3.55$$



А)

Б)

В)

Рисунок 3.7 – Картина розподілу магнітної індукції по товщині 2 листів в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

Середня індукція становить: $B_{\text{ср}/50} = 0,98\text{Тл}$; $B_{\text{ср}/1000} = 0,48\text{Тл}$; $B_{\text{ср}/10000} = 0,18\text{Тл}$.

Питомі втрати: $P_{\text{пит}/50} = 10,825\text{ Вт/кг}$; $P_{\text{пит}/1000} = 406,2\text{ Вт/кг}$; $P_{\text{пит}/10000} = 1453,4\text{ Вт/кг}$.

Напруга: $U_{50} = 0,005\text{ В}$; $U_{1000} = 0,054\text{ В}$; $U_{10000} = 0,199\text{ В}$.

$$\frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 3.68$$

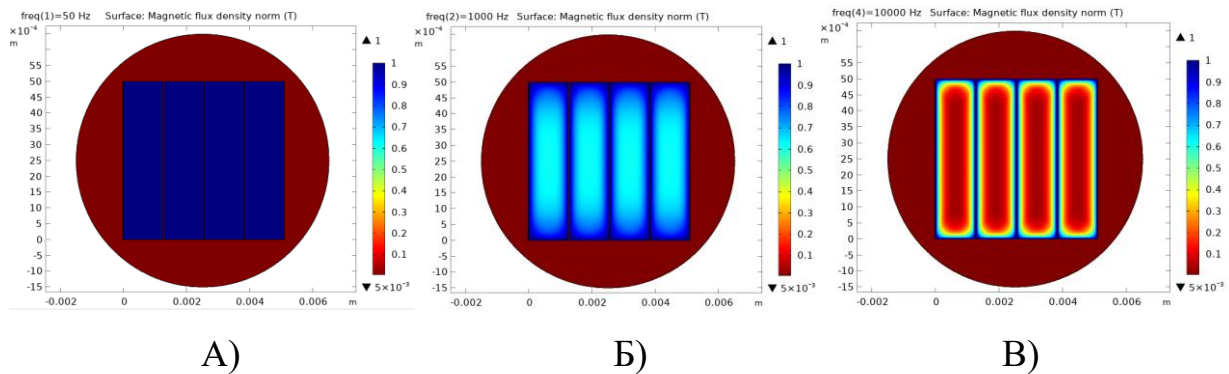


Рисунок 3.8 – Картина розподілу магнітної індукції по товщині 4 листів в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

Середня індукція становить: $B_{\text{ср}/50} = 1\text{Тл}$; $B_{\text{ср}/1000} = 0,75\text{Тл}$; $B_{\text{ср}/10000} = 0,29\text{Тл}$.

Питомі втрати: $P_{\text{пит}/50} = 3,46\text{ Вт/кг}$; $P_{\text{пит}/1000} = 627,86\text{ Вт/кг}$; $P_{\text{пит}/10000} = 2385,3\text{ Вт/кг}$.

Напруга: $U_{50} = 0,005\text{ В}$; $U_{1000} = 0,083\text{ В}$; $U_{10000} = 0,326\text{ В}$.

$$\frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 3.92$$

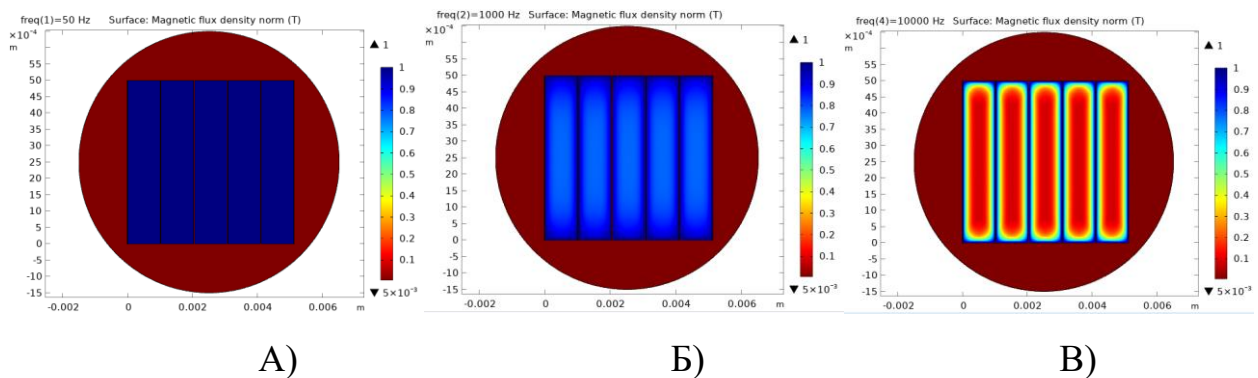


Рисунок 3.9 – Картина розподілу магнітної індукції по товщині 5 листів в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

Середня індукція становить: $B_{\text{ср}/50} = 1\text{ Тл}$; $B_{\text{ср}/1000} = 0,85\text{Тл}$; $B_{\text{ср}/10000} = 0,34\text{Тл}$.

Питомі втрати: $P_{\text{пит}/50} = 2,3 \text{ Вт/кг}$; $P_{\text{пит}/1000} = 600,37 \text{ Вт/кг}$; $P_{\text{пит}/10000} = 2847,9 \text{ Вт/кг}$.

Напруга: $U_{50} = 0,005 \text{ В}$; $U_{1000} = 0,094 \text{ В}$; $U_{10000} = 0,384 \text{ В}$.

$$\frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 4.08$$

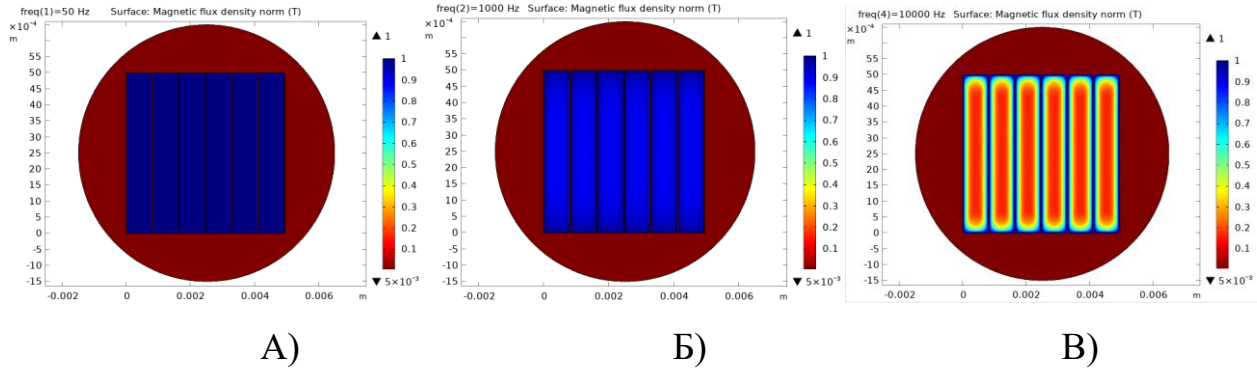


Рисунок 3.10 – Картина розподілу магнітної індукції по товщині 6 листів в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

Середня індукція становить: $B_{\text{сеп}/50} = 1 \text{ Тл}$; $B_{\text{сеп}/1000} = 0,92 \text{ Тл}$; $B_{\text{сеп}/10000} = 0,4 \text{ Тл}$.

Питомі втрати: $P_{\text{пит}/50} = 1,51 \text{ Вт/кг}$; $P_{\text{пит}/1000} = 493,7 \text{ Вт/кг}$; $P_{\text{пит}/10000} = 3468,8 \text{ Вт/кг}$.

Напруга: $U_{50} = 0,005 \text{ В}$; $U_{1000} = 0,098 \text{ В}$; $U_{10000} = 0,433 \text{ В}$.

$$\frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 4.42$$

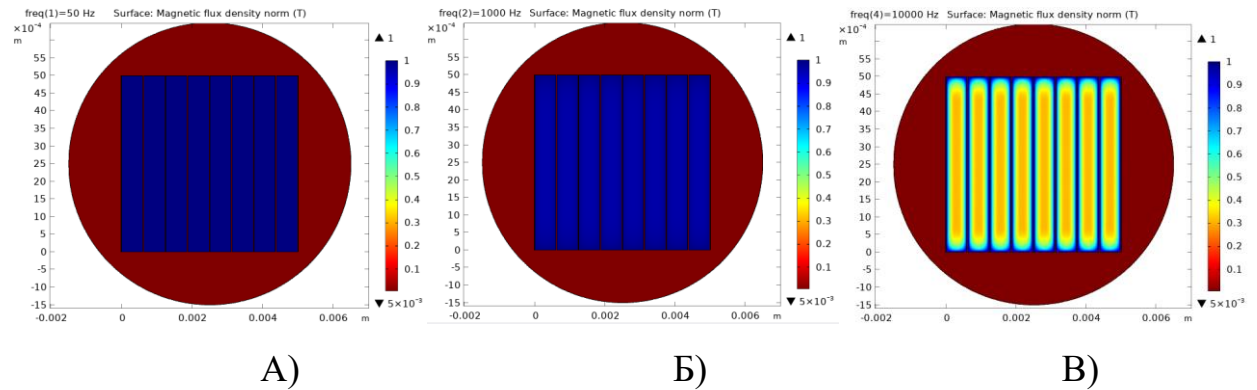


Рисунок 3.11 – Картина розподілу магнітної індукції по товщині 8 листів в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

Середня індукція становить: $B_{\text{сеп}/50} = 1 \text{ Тл}$; $B_{\text{сеп}/1000} = 0,97 \text{ Тл}$; $B_{\text{сеп}/10000} = 0,5 \text{ Тл}$.

Питомі втрати: $P_{\text{пит}/50} = 0,87 \text{ Вт/кг}$; $P_{\text{пит}/1000} = 326,56 \text{ Вт/кг}$; $P_{\text{пит}/10000} = 4672,9 \text{ Вт/кг}$.

Напруга: $U_{50} = 0,005 \text{ В}$; $U_{1000} = 0,103 \text{ В}$; $U_{10000} = 0,54 \text{ В}$.

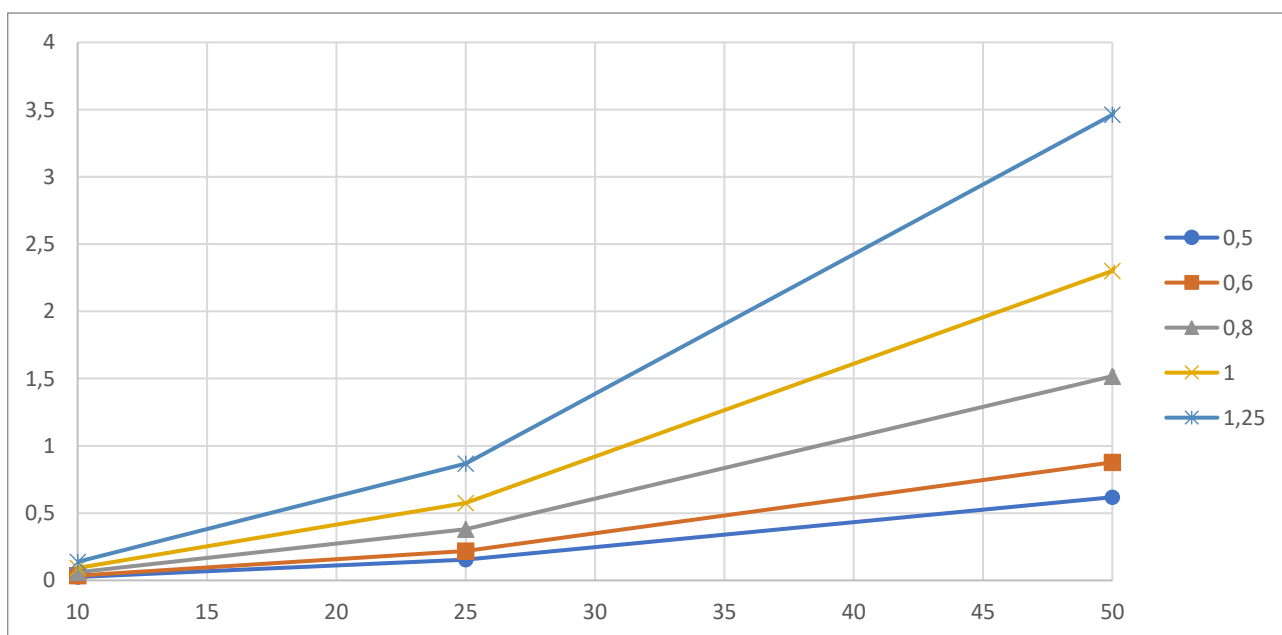
$$\frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 5.24$$

На наступних графіках показано втрати в магнітопроводах з різною товщиною пластин відповідно: 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,25мм при частоті від 50 до 10000Гц. При початковій частоті 50Гц та індукції 1Тл, що відповідає нормативним методам випробування втрати показано в табл. 3.2.

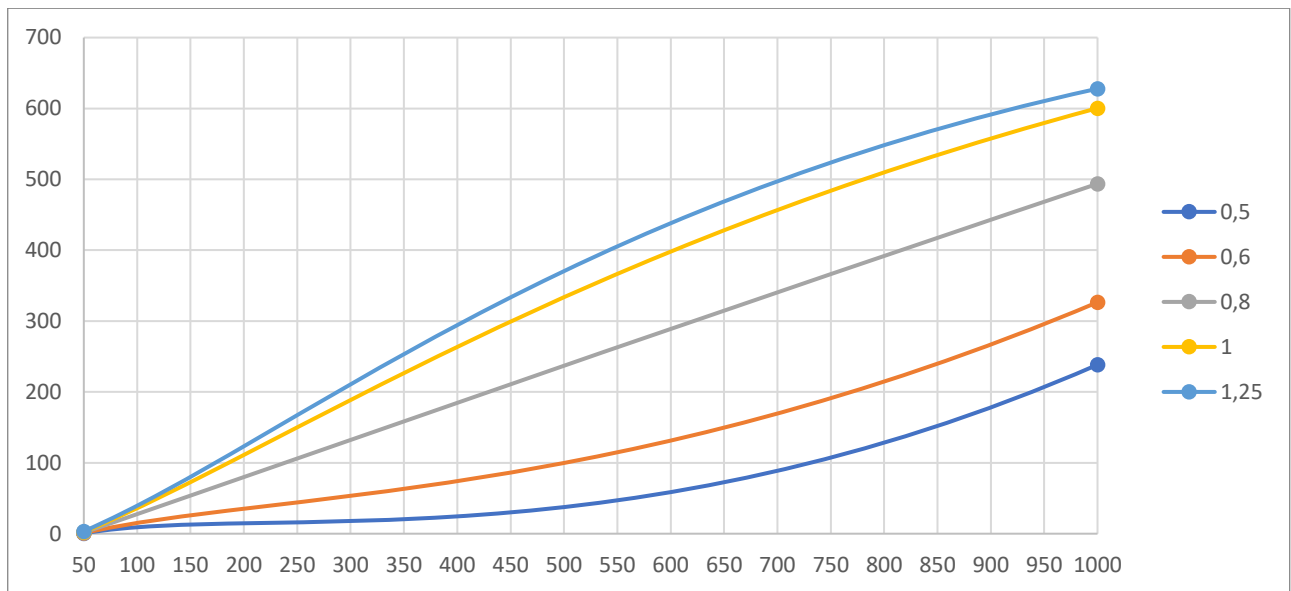
Таблиця 3.2 – Залежність втрат від товщини листа

2b, мм	0,5	0,6	0,8	1,0	1,25	2,5
P _{пит} , Вт/кг	0,618	0,878	1,517	2,3	3,462	10,825

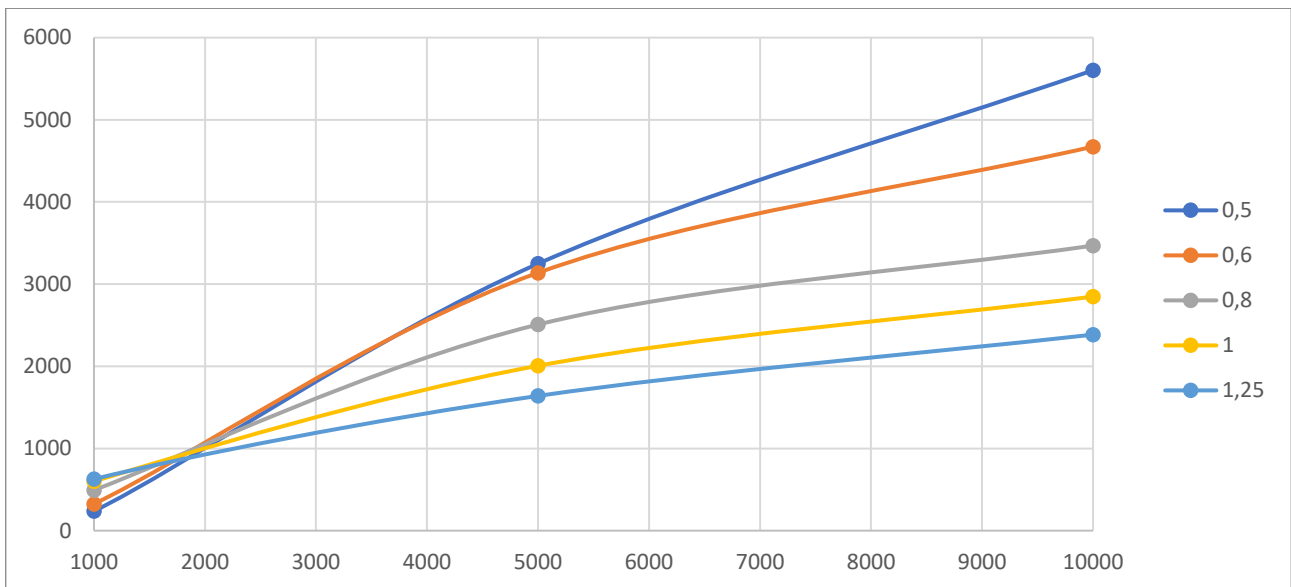
Втрати на гістерезис для вибраної електротехнічної сталі при частоті 50Гц складають близько 2 Вт/кг, тобто сумарні ($p_H + p_v$) втрати при товщині листа 0,5мм складають 2,6 Вт/кг, що чітко відповідає табличним даним електротехнічної сталі 2013. Для зручності сприйняття залежність втрат на вихрові струми від товщини листа розділено на три ділянки: 10-50 Гц; 50 – 1000 Гц; 1000-10000 Гц.



А)



Б)



В)

Рисунок 3.12 – Графіки розподілу втрат в магнітопроводах різної товщини в залежності від частоти: А) 10-50 Гц; Б) 50-1000 Гц; В) 1000-10000 Гц

У великій кількості відомих джерел залежність втрат від товщини листа в магнітопроводі вважається функцією від квадрату частоти, але це справедливо лише для частот до 300-400 Гц, потім залежність має більш складний характер, який визначається ефектами витіснення струму, розподілом магнітної індукції та зменшення її середнього значення.

Збільшення втрат від товщини листа може служити еквівалентом підвищення втрат на вихрові струми при наявності інтегральних, локальних чи змішаних

дефектів. При цьому в обох випадках втрати на гістерезис залишаються приблизно постійними, тобто не залежать від збільшення товщини листа та появи дефектних контурів вихрових струмів в магнітопроводах з нормативною товщиною листа.

Підсумовуючи загальні втрати шляхом додавання втрат на гістерезис до втрат на вихрові струми можна зробити висновок, що суттєве збільшення загальних втрат починається зі збільшення втрат на вихрові струми в декілька разів або й на порядок. Так для зростання загальних втрат до величини 4Вт/кг і більше, що характеризує межу якісного і початково бракованого магнітопроводу втрати на вихрові струми повинні вирости приблизно в 5 разів. Для того щоб втрати вирости до величин 8Вт/кг та більше, що характеризує наступний рівень дефектності магнітопроводу, втрати на вихрові струми повинні на порядок перевищити нормативні втрати. Це може відбуватися за рахунок появи дефектних контурів. Відповідно приведеним розрахункам еквівалентна товщина листа, що відповідає приведеним вище втратам складає 1 мм, а для другого ступеню браку товщина відповідає 1,5 мм і вище.

Замикання двох листів по внутрішній поверхні умовного магнітопроводу відповідає 20% від об'єму магнітопроводу. Виходячи з розрахунків видно, що загальні втрати на вихрові струми, в пошкоджених і не пошкоджених ділянках, в магнітопроводі зросли на 54%. При цьому сумарні втрати, тобто втрати на вихрові струми і на гістерезис, зросли відносно непомітно, але співвідношення втрат в бездефектній частині магнітопроводу, який складає 80%, становить 0,488 Вт/кг, а в 20% дефектній частині становить 0,452 Вт/кг, тобто майже рівні. Тому в реальних магнітопроводах, при збільшенні кількості пластин (100 і значно більше) перекриття п'ятої частини магнітопроводу також дасть незначне підвищення загальних втрат на вихрові струми, а також сумарних втрат $p_r + p_v$. При цьому в дефектній частині ці втрати будуть практично близькі по значенню з втратами в бездефектній частині, що безумовно спричинить суттєвий локальний нагрів дефектної ділянки магнітопроводу. Ситуація буде погіршуватись з ростом геометричних розмірів магнітопроводу.

Як висновок небезпечність локальних дефектів підтверджується даними розрахунками.

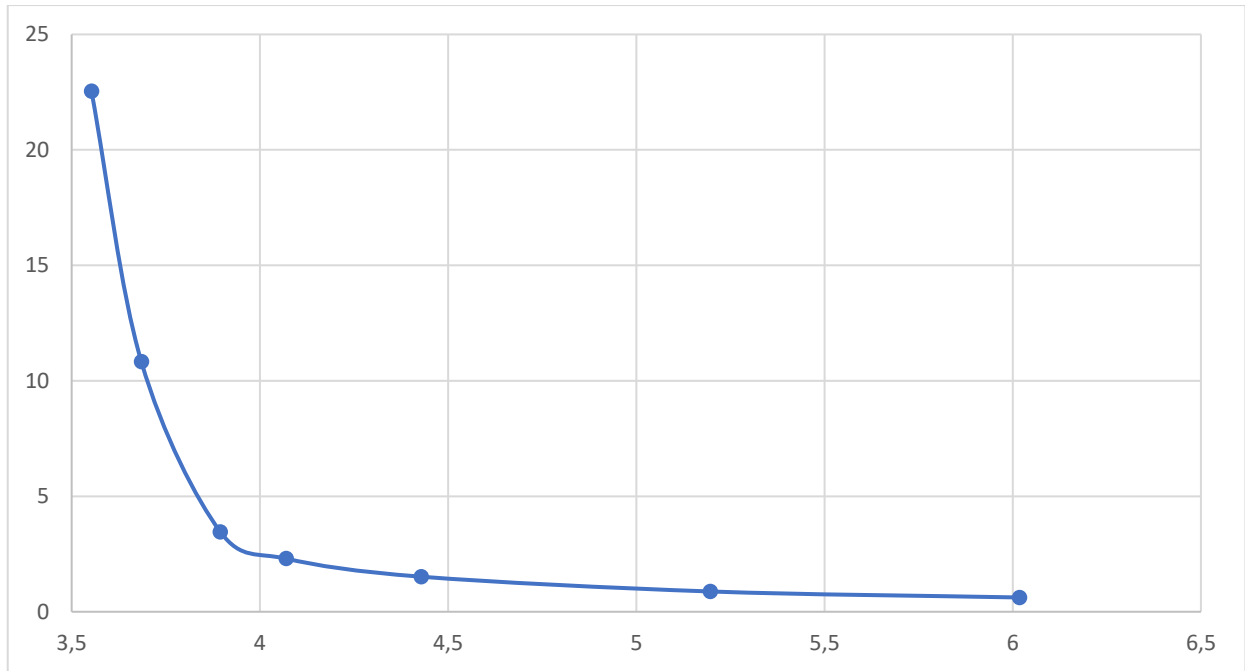


Рисунок 3.13 – Залежність співвідношення напруг U_{f10000}/U_{f1000} від втрат на вихрові струми при частоті 50 Гц

На основі моделі умовного магнітопроводу з 10 пластин змодельовано дефект міжлистової ізоляції магнітопроводу, що відповідає металевому перекриттю двох крайніх пластин.

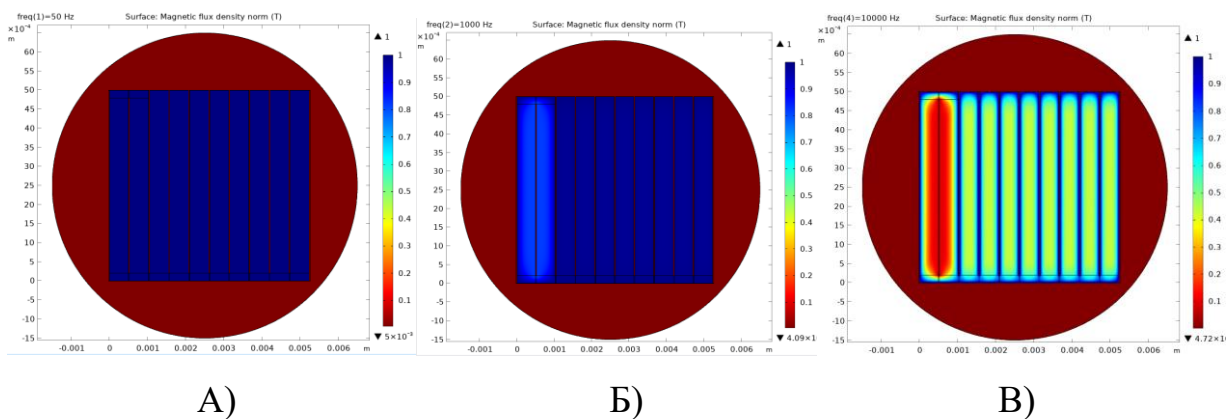
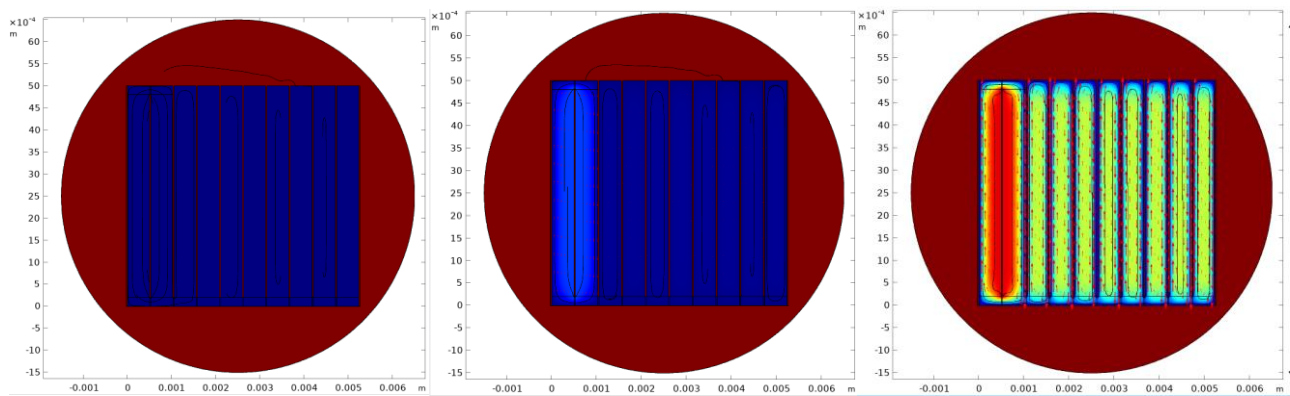


Рисунок 3.14 – Картина розподілу магнітної індукції в дефектному магнітопроводі в залежності від частоти: А) 50Гц; Б)1000Гц; В) 10000Гц

Середня індукція становить: $B_{ср/50} = 1\text{Тл}$; $B_{ср/1000} = 0,96\text{Тл}$; $B_{ср/10000} = 0,54\text{Тл}$



А)

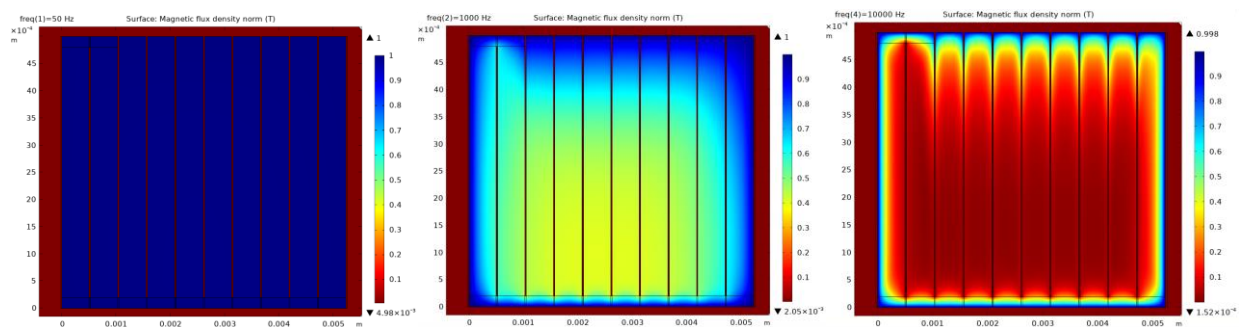
Б)

В)

Рисунок 3.15 – Картина розподілу магнітної індукції в дефектному магнітопроводі в залежності від частоти: А) 50Гц; Б)1000Гц; В) 10000Гц

Втрати отримані при моделюванні: $P_{\text{пит}/50} = 0,94$ Вт/кг; $P_{\text{пит}/1000} = 311,5$ Вт/кг; $P_{\text{пит}/10000} = 5063$ Вт/кг.

Моделювання інтегральних дефектів шляхом збільшення поперечної провідності магнітопроводу



А)

Б)

В)

Рисунок 3.16 – Картина розподілу магнітної індукції в дефектному магнітопроводі зі збільшеною провідністю в залежності від частоти: А) 50Гц; Б)1000Гц; В) 10000Гц

Середня індукція становить: $B_{\text{ср}/50} = 1$ Тл; $B_{\text{ср}/1000} = 0,60$ Тл; $B_{\text{ср}/10000} = 0,18$ Тл

Втрати отримані при моделюванні: $P_{\text{пит}/50} = 2.62$ Вт/кг; $P_{\text{пит}/1000} = 293.3$ Вт/кг; $P_{\text{пит}/10000} = 1127.3$ Вт/кг.

Напряга: $U_{50} = 0,005$ В; $U_{1000} = 0,101$ В; $U_{10000} = 0,372$ В.

$$\frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 3.68$$

При моделюванні локального дефекту шляхом металевого замикання двох крайніх пластин втрати на вихрові струми зросли на $\sim 50\%$ у порівнянні з бездефектною конструкцією, але сумарні втрати, що включають втрати на гістерезис зросли не значно.

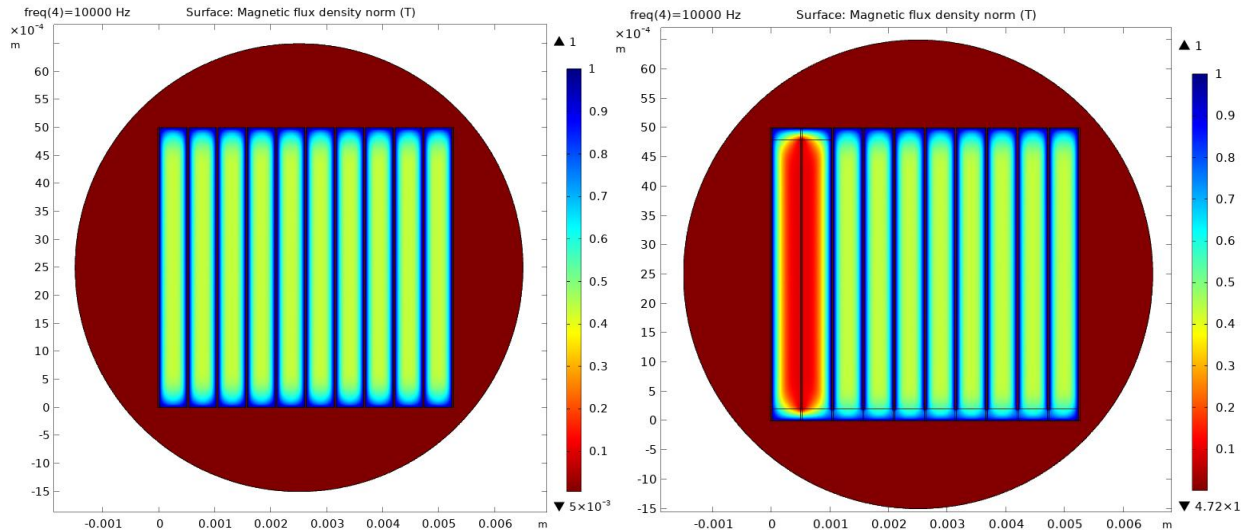


Рисунок 3.17 – Порівняння картин розподілу магнітної індукції в дефектному магнітопроводі та бездефектному магнітопроводах при частоті 10000Гц

При моделюванні змішаного дефекту шляхом додавання до попереднього випадку поперечної міжлистової провідності $\gamma_{\text{деф}}=1000 \text{ S/m}$ втрати на вихрові струми зросли в 4,3 рази, що суттєво збільшило сумарні втрати та як наслідок зменшилось співвідношення U_{f1000}/U_{f10000} до 3,68 в порівнянні з бездефектним 6.02.

3.3 Математичне моделювання різних дефектів міжлистової ізоляції магнітопроводу при високочастотних впливах

На основі моделі, що описана раніше побудовано нову модель з змодельованими дефектами, що мають місце бути в реальному магнітопроводі. Закорочення листів по зовнішній поверхні моделює зварювальний шов листів набірного пакету та запресування його в корпус. Дефектні ділянки, що знаходяться між листами по середині пакету, імітують металеві контакти в місцях, де міжлистова ізоляція може пошкоджуватись в силу різних технологічних та експлуатаційних умов.

Суттєве закорочення листів по поверхні розточки магнітопроводу відповідає можливим металевим контактам кромek листів в зубцевій зоні у випадку тертя ротора об статор при аварії підшипникового вузла і відповідного критичного ексцентриситету повітряного проміжку.

Не значне закорочення листів по поверхні розточки магнітопроводу відповідає можливим металевим контактам кромek листів в зубцевій зоні при технологічній обробці в процесі проточки та хонінгування внутрішньої поверхні пакету.

Дефекти можуть мати як місцевий характер, тобто пошкодження ізоляції в окремій ділянці магнітопроводу, так і інтегральний при замиканні пластин всередині магнітопроводу по стохастичному закону, а також мати змішаний характер - локально-інтегральний.

Моделювання проводилось для частот 100кГц, 50кГц, 10кГц, 5кГц, 1кГц і 50Гц. Далі показано процеси, що протікають в дефектному магнітопроводі з різним характером та ступенем дефектності.

Далі показано зміну загальної картини розподілу магнітної індукції в магнітопроводі з наявністю дефектів та з ростом частот. В даному випадку дефекти моделювались як ділянки перекриття між окремими пластинами всередині магнітопроводу

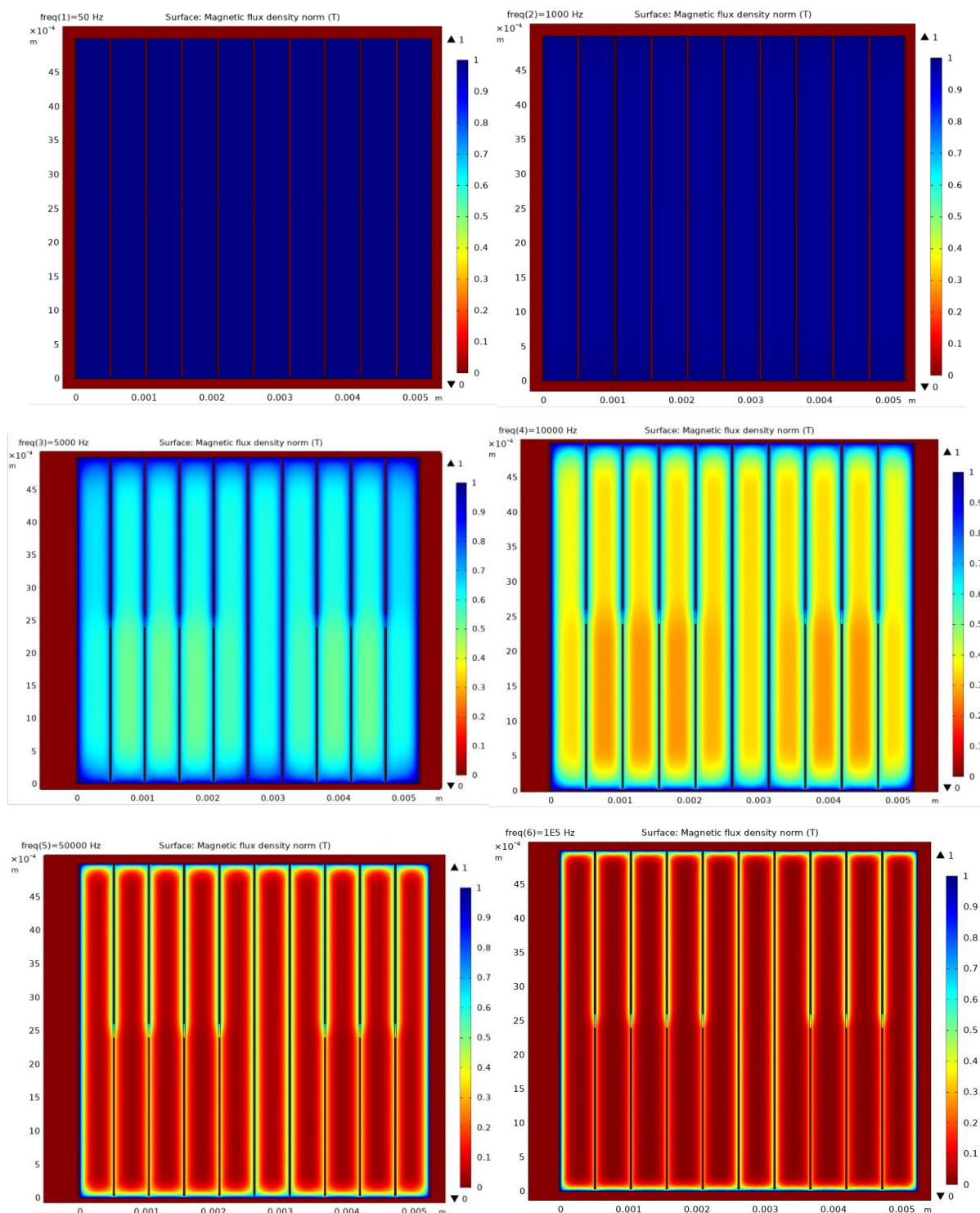


Рисунок 3.18 – Картина розподілу магнітної індукції в дефектному магнітопроводі з ростом частоти від 50 Гц до 100кГц

Як видно з отриманих картин, з ростом частоти, починає проявлятися ефект витіснення, тобто струми починають витіснятися до країв листів та пакету в цілому. Середня індукція, з ростом частоти, падає при незмінній напруженості зовнішнього поля, що пов'язано з розмагнічуючою дією вихрових струмів, яка зростає з

підвищенням частоти переманічування. ЕРС, що наводиться в пакеті магнітопроводу збільшується з ростом частоти, але при наявності дефектів темп цього росту зменшується по мірі послаблення індукції, ефектів витіснення та інтенсивності вихрових струмів в дефектних контурах.

Аналізуючи представлені картини розподілу поля при моделюванні дефектів між пластинами всередині магнітопроводу видно, що контури вихрових струмів більш інтенсивно впливають на ділянку магнітопроводу обмежену закороченими ділянками між листами магнітопроводу всередині та закороченою зовнішньою поверхнею у порівнянні з ділянкою між незакороченою внутрішньою поверхнею. В місці, де перекриття немає, між пластинами поле розподіляється рівномірно по висоті магнітопроводу.

На наступних рисунках показано локальну зміну індукції в області дефектних ділянок при зростанні частоти.

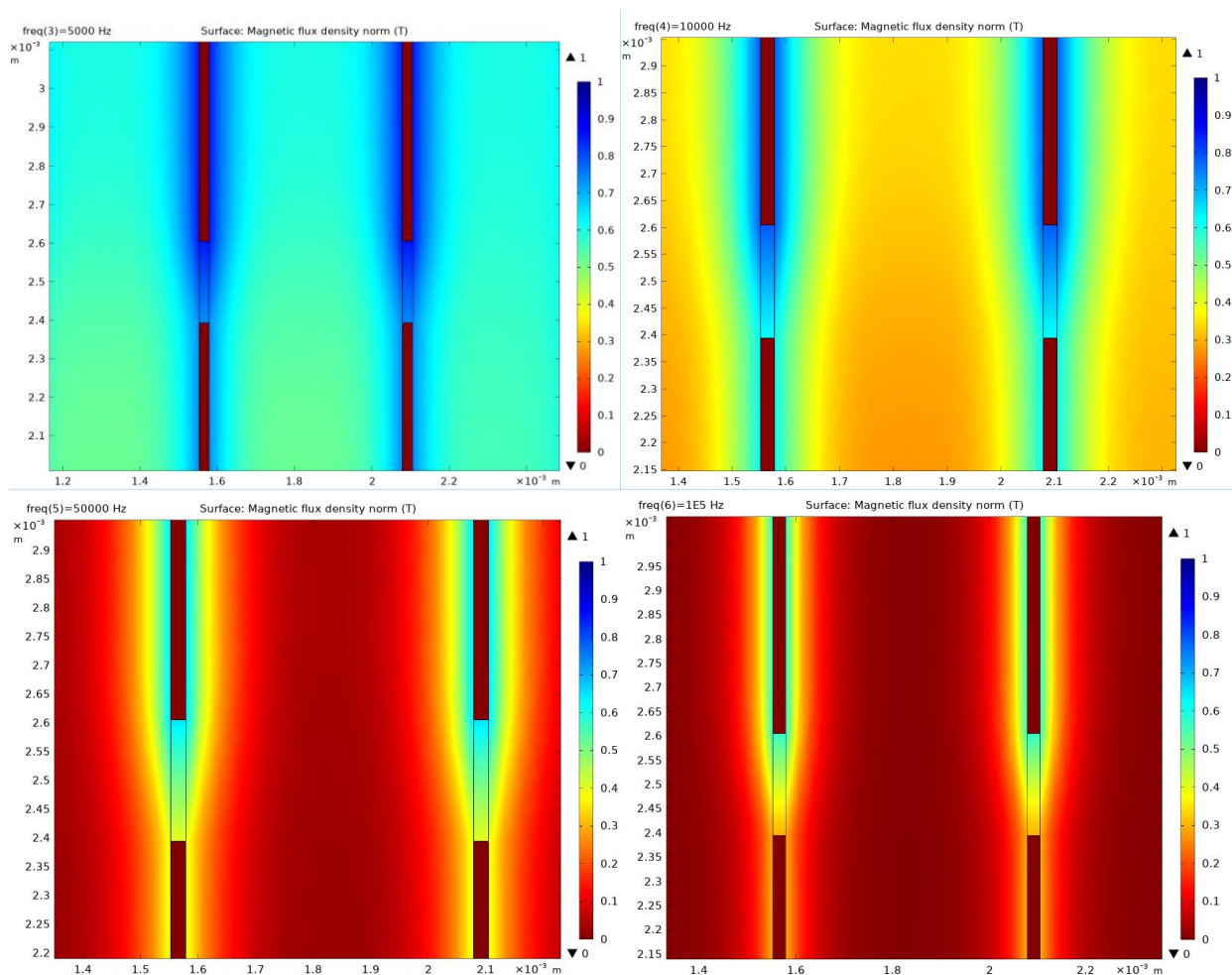


Рисунок 3.19 – Картина розподілу магнітної індукції в місцях закорочень з ростом частоти від 5 кГц до 100кГц

На наступному рисунку показано розподіл щільності вихрових струмів в листах магнітопроводу з закороченими та не закороченими пластинами. В цілому картина відповідає розподілу індукції.

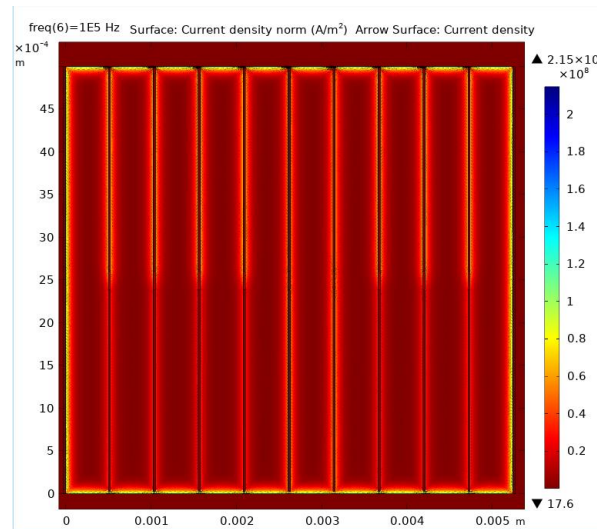


Рисунок 3.20 – Картина розподілу густини струмів в дефектному магнітопроводі при частоті 100кГц

Загальна картина розподілу щільності вихрових струмів в набірному пакеті.

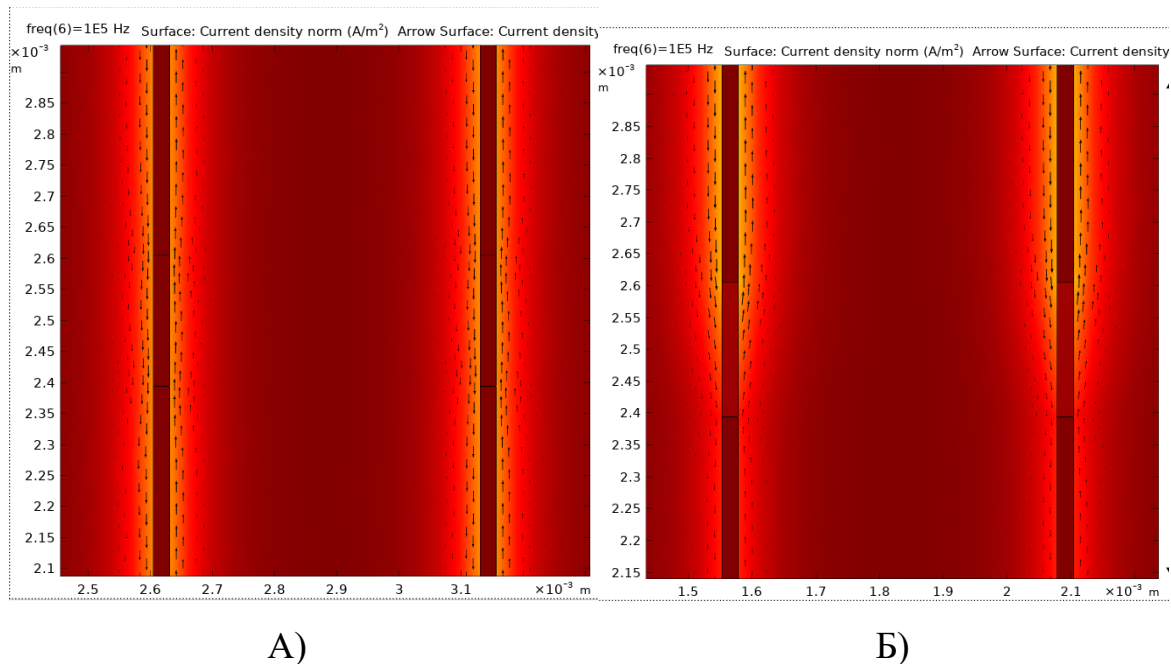


Рисунок 3.21 – Місцева картина розподілу щільності вихрових струмів в набірному пакеті: А) – відсутність перекриття між пластинами та Б) – наявність перекриття між пластинами

3.4 Експериментальні дослідження низки реальних магнітопроводів різного ступеню дефектності за допомогою ватметрового способу

У математичному пакеті COMSOL Multiphysics на базі готової розрахункової моделі було розраховано розподілення магнітної індукції в одному досліджуваному магнітопроводі під час дослідження ватметровим методом. На рис. 3.22 представлено розподіл магнітної індукції в магнітопроводі АД серії 4АА63В4У3 0,37 кВт. Пікове значення індукції відповідає положенню обмотки збудження.

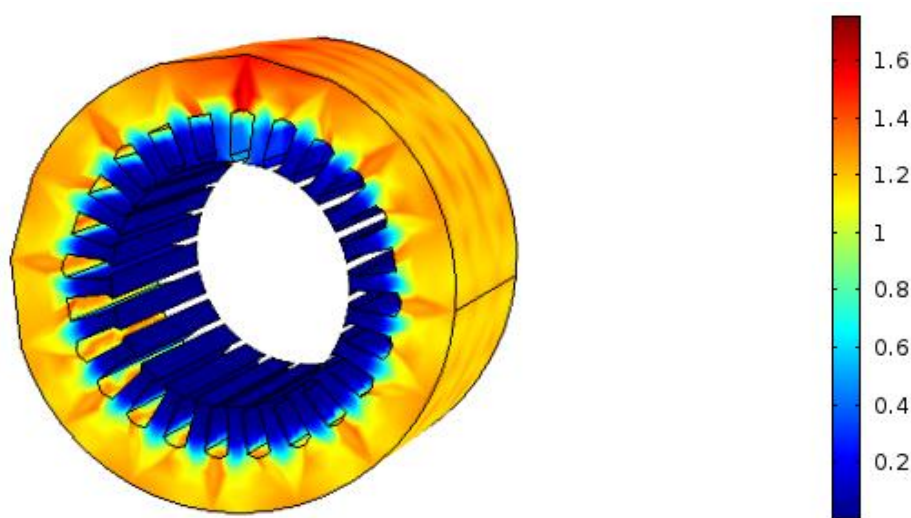


Рисунок 3.22 – Картина розподілу магнітної індукції у магнітопроводі змодельованому на основі двигуна 4АА63В4У3

Цей розрахунок візуально відображає шляхи протікання магнітного потоку, та підтверджує формули, що використовувались під час розрахунків, а саме – магнітний потік не заходить у зубці. Таким чином те, що для розрахунку площі активної сталі використовувалась висота лише спинки статора та те, що при розрахунку маси активної сталі розраховується лише маса спинки є теоритично и математично обгрунтованим.

Також на основі готової математичної моделі було розраховано розподіл індукції по товщині листа на різних частотах. Тобто представляє картину впливу поверхневого ефекту. На рисунку 3.22 зображено розподіл магнітної індукції в листі магнітопроводу при різних значеннях частоти.

Так, при частоті 50 Гц якій відповідає фіолетова лінія видно, що індукція розподіляється рівномірно по ширині листа, тобто повністю його пронизує. А зі збільшенням частоти видно, що в центрі листа значення індукції зменшується і майже дорівнює нулю, що говорить про те, що магнітний потік пронизує лист лише на поверхні та не проникає в глиб.

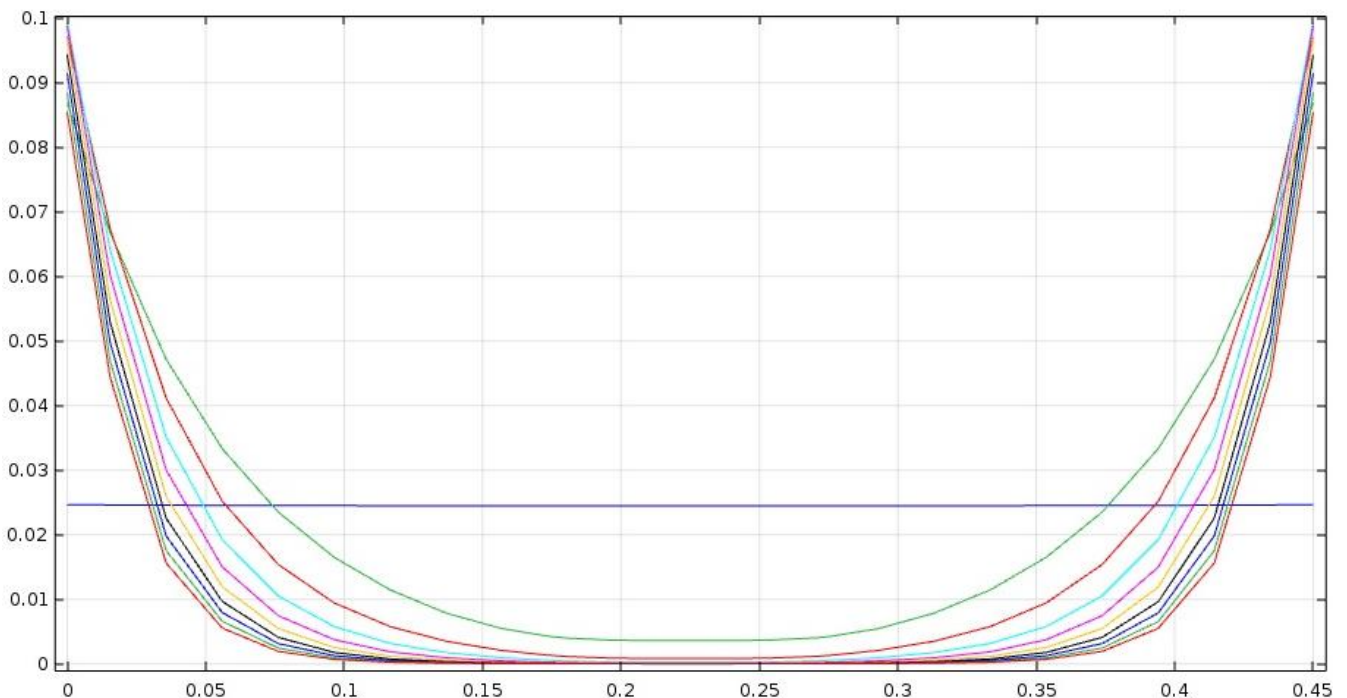


Рисунок 3.23 – Візуалізація розподілу магнітної індукції по товщині листа в залежності від росту частоти

3.5 Розділення вимірних втрат на складові

Відомими методами розділення втрат на гістерезис та вихрові струми в залежності від частоти, є описані в джерелах [21, 33]. Ці методи застосовуються при дослідженні окремого магнітопроводу з можливістю вимірювати втрати на частотах нижче і вище промислової.

В інженерних цілях розподіл втрат на гістерезис та на вихрові струми проводиться емпірично шляхом зміни частоти при постійному значенні індукції. Обидва види втрат виділяють тепло, якщо у випадку гістерезисних втрат це відбувається за рахунок переміщення магнітних доменів то вихрові струми теж обумовлені тим явищем але вони безпосередньо створюють тепло, яке пропорційне

квадрату струму в контурі та його опору. В першому наближенні втрати на вихрові струми залежать від величини цих струмів, які в свою чергу залежать від наведеної ЕРС в контурах, яка в свою чергу залежить від швидкості зміни магнітного поля, що при синусоїдальній формі є залежністю від квадрату частоти. Втрати на гістерезис пропорційні площі гістерезисної петлі і кількості циклів перемагнічування тобто залежать від першої степені частоти. Такий розподіл втрат у більшості випадків показує значну кореляцію за результатами вимірювань по даних багатьох джерел [34,35,36,37].

На лабораторній базі кафедри електромеханіки був створений стенд для вимірювання втрат в сталі ватметровим методом в залежності від частоти живлення рис.3.24.

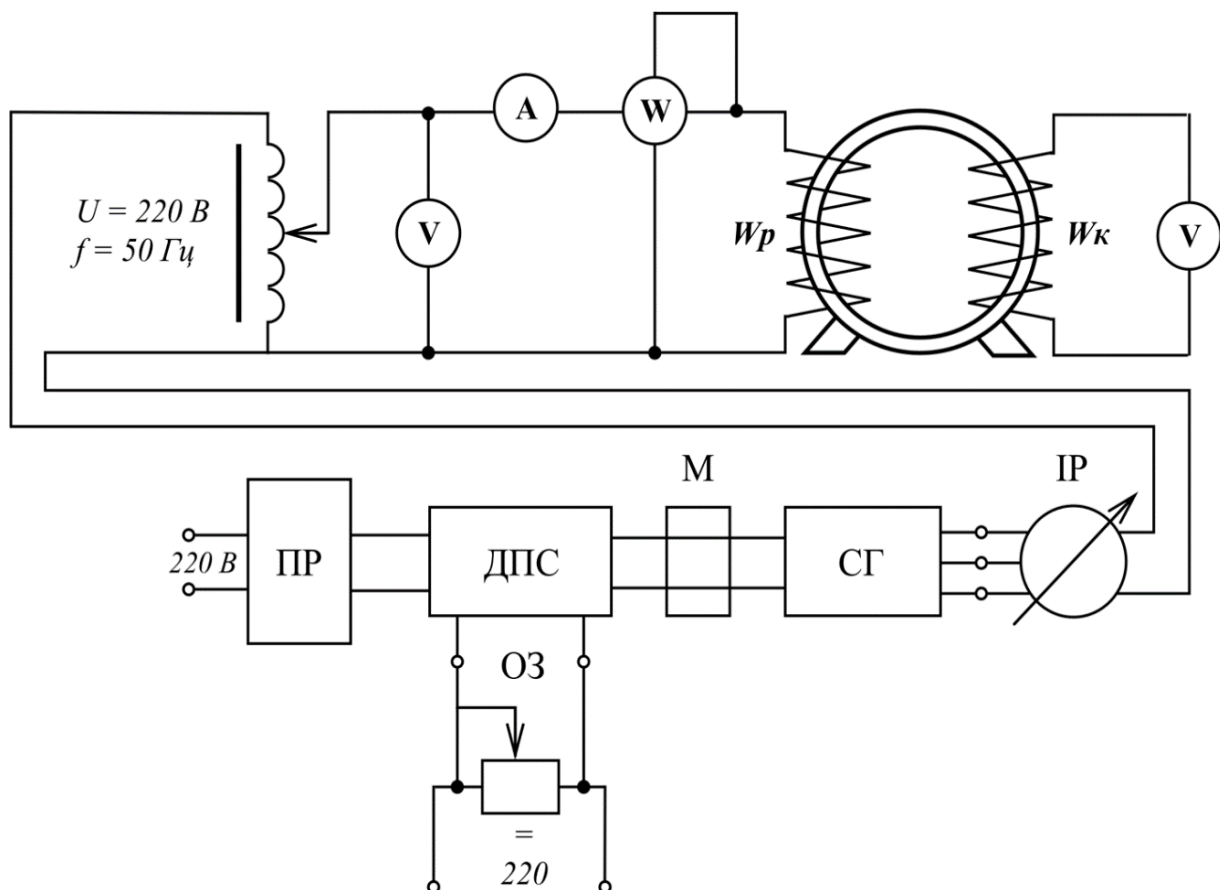


Рисунок 3.24 – Модифікована схема дослідження втрат в магнітопроводі ватметровим методом

На схемі показано: ПР – пусковий реостат; ДПС – двигун постійного струму; ОЗ – обмотка збудження; СГ – синхронний генератор; ІР – індукційний регулятор; М – муфта; Вимірювальні пристрої.

3.6 Метод оцінки повних втрат в активній робочій машині при знятті характеристики холостого ходу

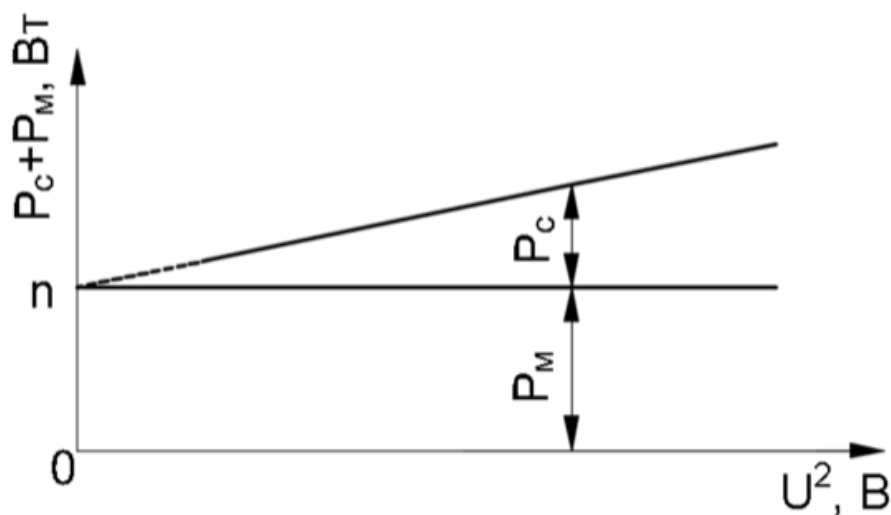


Рисунок 3.25 – Графік залежності втрат від квадрату напруги

Розподіл втрат при неробочому ході електродвигунів:

P_c – втрати в сталі; P_m – механічні втрати.

Втрати в активній сталі визначаються як різниця втрат неробочого ходу при номінальному значенні напруги та механічних втрат:

$$P_c = P_0 - P_m, \quad (3.11)$$

$$P_{ст.осн} = p_{1,0} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta (k_{да} B_a^2 m_a + k_{дз} B_{зср}^2 m_{z1}), \quad (3.12)$$

Де $p_{1,0/50}$ - втрати в сталі 2013 товщиною 0,5мм при $B=1$ Тл і $f=50$ Гц

$$P_{пул1} \approx 0,11 \left(\frac{Z_{1n}}{1000} B_{пул1} \right)^2 m_{z1}, \quad (3.13)$$

Для двигуна 15кВт $2p=4$ основні втрати становлять приблизно 280 Вт, а додаткові – 90 Вт для ідеального магнітопроводу

3.7 Розділення втрат на перемагнічування в шихтованих магнітопроводах на гістерезисну та вихроструміву складові

Методика розділення втрат на гістерезисну та вихроструміву розглянуто у великій кількості робит [13, 14, 15, 16, 17].

Використовуються наступні формули:

$$p_{\text{СТ}} = p_{\text{Г}} + p_{\text{В}} = C_{\text{Г}} f \hat{B}^2 + C_{\text{В}} f^2 \hat{B}^2, \quad (3.14)$$

де $C_{\text{Г}}$ та $C_{\text{В}}$ – коефіцієнти гістерезису та вихрових струмів відповідно.

Втрати на гістерезис $p_{\text{Г}}$ пропорційні площі кривої намагнічування сталі на низьких частотах ($f \rightarrow 0$ Гц), тобто лінійно залежить від частоти перемагнічування

$$p_{\text{В}} = \frac{d^2 \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2}{12\rho\gamma}, \quad (3.15)$$

Складова втрат від вихрових струмів $p_{\text{В}}$ може бути отримана шляхом апроксимації рівнянь Максвелла.

де $B(t)$ – індукція як функція часу; d – товщина ізолюваного листа; ρ і γ – питомий опір і щільність матеріалу листів відповідно.

Отриманий вираз для сумарних втрат в сталі

$$p_{\text{СТ}} = p_{\text{Г}} + \eta_{\text{над}} p_{\text{В}} = C_{\text{Г}} f \hat{B}^2 + \eta_{\text{над}} C_{\text{В}} f^2 \hat{B}^2, \quad (3.16)$$

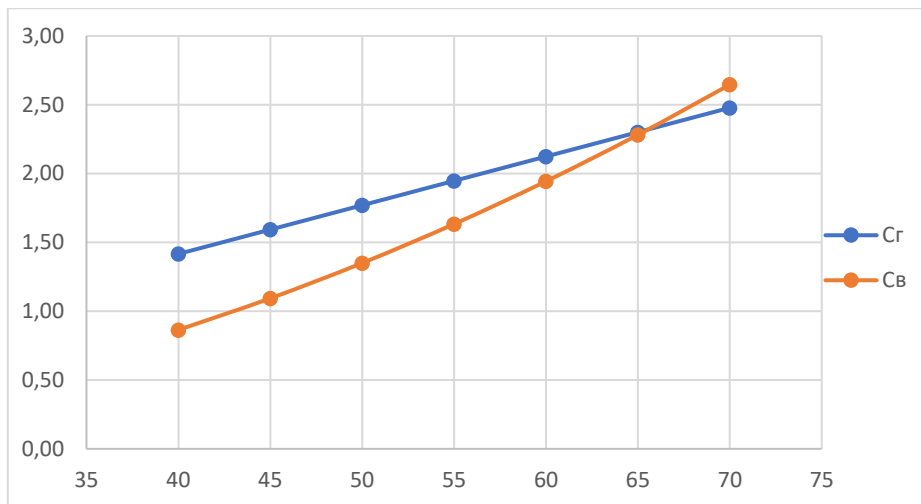
$$\text{де } \eta_{\text{над}} = \frac{p_{\text{В, виміряне}}}{p_{\text{В, розраховане}}} > 1$$

Уточнені вирази:

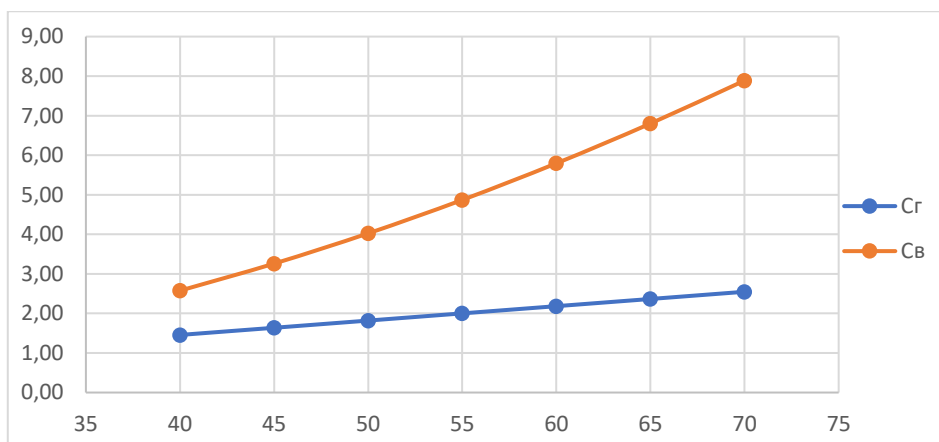
$$p_{\text{СТ}} = p_{\text{Г}} + p_{\text{В}} + p_{\text{над}} = C_{\text{Г}} f \hat{B}^2 + C_{\text{В}} f^2 \hat{B}^2 + C_{\text{над}} f^{1.5} \hat{B}^{1.5}, \quad (3.17)$$

$$p_{\text{СТ}} = p_{\text{Г}} + p_{\text{В}} + p_{\text{над}} = C_{\text{Г}} f \hat{B}^{\alpha} + C_{\text{В}} f^2 \hat{B}^2 + C_{\text{над}} f^{1.5} \hat{B}^{1.5}, \quad (3.18)$$

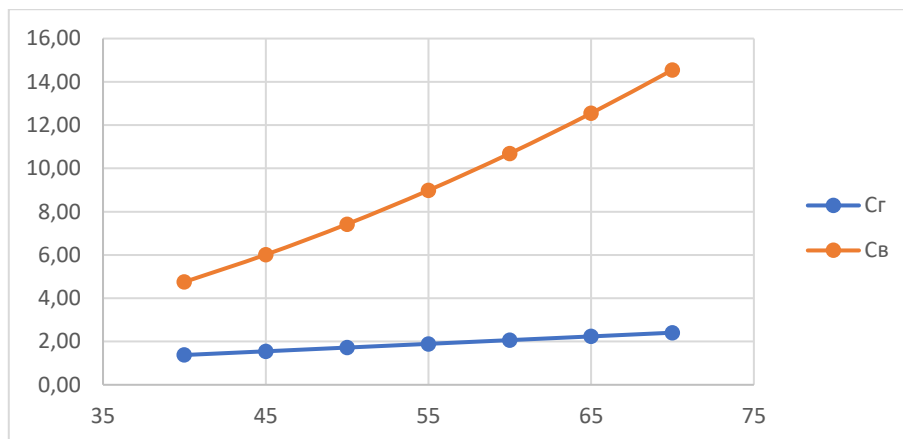
Приклади розділення втрат за методикою Штейнміца [93] за допомогою створеного стенду



А)



Б)







В)

Рисунок 3.26 – Графіки розподілу складових втрат на гістерезис та на вихрові струми: А) Бездефектний магнітопровід $P_{1.0/50}=3,12$ Вт/кг, $P_r=1,77$ Вт/кг і $P_b=1,35$ Вт/кг; Б) Дефектний магнітопровід 1 $P_{1.0/50}=5,85$ Вт/кг, $P_r=1,82$ Вт/кг і $P_b=4,03$ Вт/кг; В) Дефектний магнітопровід 2 $P_{1.0/50}=9,15$ Вт/кг, $P_r=1,72$ Вт/кг і $P_b=7,43$ Вт/кг

Експерименти по дослідженню питомих втрат в шихтованих магнітопроводах проводились відповідно відомому ватметровому методу, що наведено в першому розділі дисертаційної роботи. Для зручності та більшої інформативності отримання експериментальних даних ватметр замінили мультиметром.

Дані отримані під час експериментів показано в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Експериментальні дані

№	Об'єкт досліджень	I, А	U _p , В	U _к , В	cos γ	P _{заг} , Вт/кг	P _{пит} , Вт/кг	
1		Без. Деф.	14,7	2,34	6	0,319	10,97	3,15
		Деф.	18,3	2,34	6	0,475	20,34	5,85
2		Без. Деф.	21,9	1,72	6	0,686	25,9	7,4
		Деф.	22,7	1,72	6	0,703	27,5	7,85
3		Без. Деф.	25,7	1,72	6	0,703	31	8,85
		Деф.	26	1,72	6	0,716	32,02	9,15
4		Без. Деф.	19,7	2,34	13,6	0,579	26,71	5,04
		Деф.	23,1	2,34	13,6	0,692	26,71	7,06

Для досліджень було обрано магнітопроводи двигунів різної потужності та геометрії. Для кожного магнітопроводу додатково проводилась симуляція дефекту у вигляді короткозамкненого витка, що намотаний на спинку статора. Це дає можливість збільшити загальний опір ділянки, де він намотаний, що призводить до збільшення контуру вихрових струмів про що свідчать отримані дані.

Для знаходження загальних втрат попередньо проводились розрахунки геометрії кожного магнітопроводу. До уваги бралась тільки спинка статора, так як з загальної теорії електричних машин відомо, що хвилі магнітної індукції майже не заходять в зубці. Це також підтверджується польовою моделлю створеною в програмному пакеті COMSOL Multiphysics, що показана на рис 3.22.

З рисунку 3.22 видно, що в самих зубцях значення індукції мінімальне, тобто при розрахунку об'єму та маси магнітопроводу враховували тільки ширину спинки статора та його довжину. Ця обставина дозволяє значно спростити польову математичну модель за рахунок відсутності необхідності врахування зубців та переходу на двовимірну задачу.

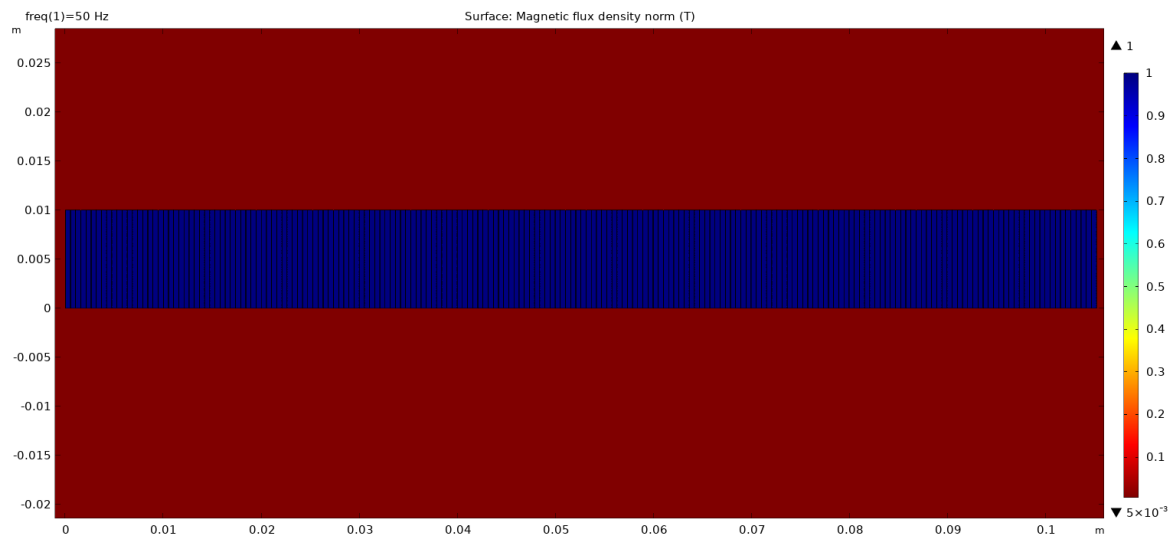
Тривимірна постановка задачі практично не можлива тому що потребує значних обчислювальних ресурсів та часу.

По виміряним струму, напрузі та коефіцієнту потужності $\cos\phi$ знаходилося значення загальних втрат. Щоб знайти питомі втрати необхідно розділити загальні втрати на масу магнітопроводу.

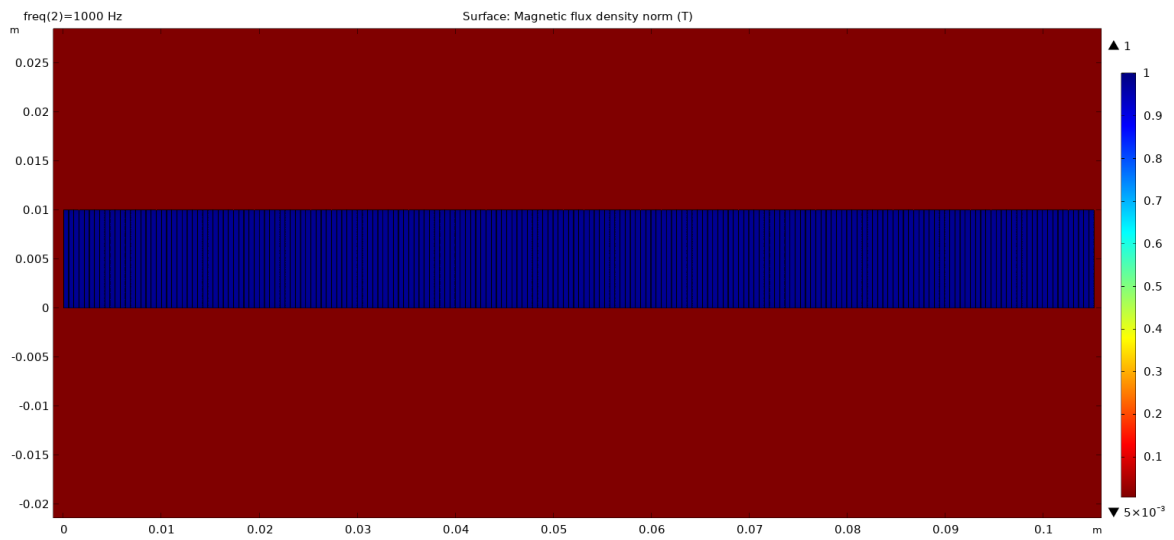
3.8 Моделювання високочастотних процесів в реальному магнітопроводі

Магнітопровід двигуна 4A90L2Y3 був розділений на дві рівні частини. На одній з частин моделювались дефекти і втрати порівнювались з втратами в бездефектній частині. Машина має 36 пазів, товщина спинки 0,01 м, кількість пластин 200 товщиною 0,5мм, довжина силової лінії 0,33м, під цю довжину встановлювалась напруженість магнітного поля, що забезпечувала значення індукції величиною 1Тл.

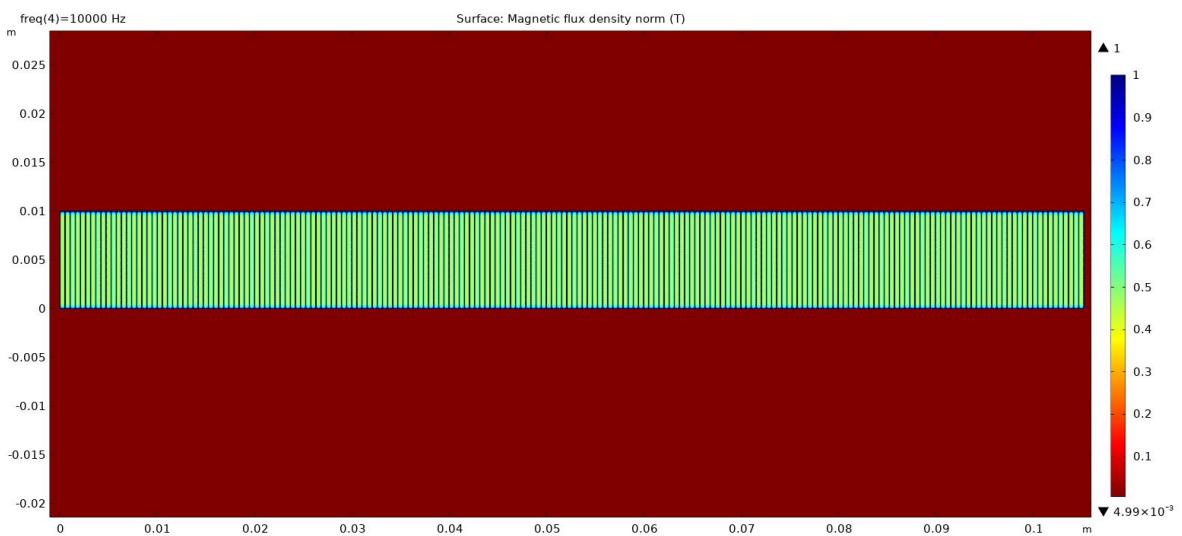
Програма налаштована аналогічно попередньому розділу. Процеси рахувались для частот 50, 1000 і 10000 Гц для бездефектного та дефектного магнітопроводу.



А)



Б)

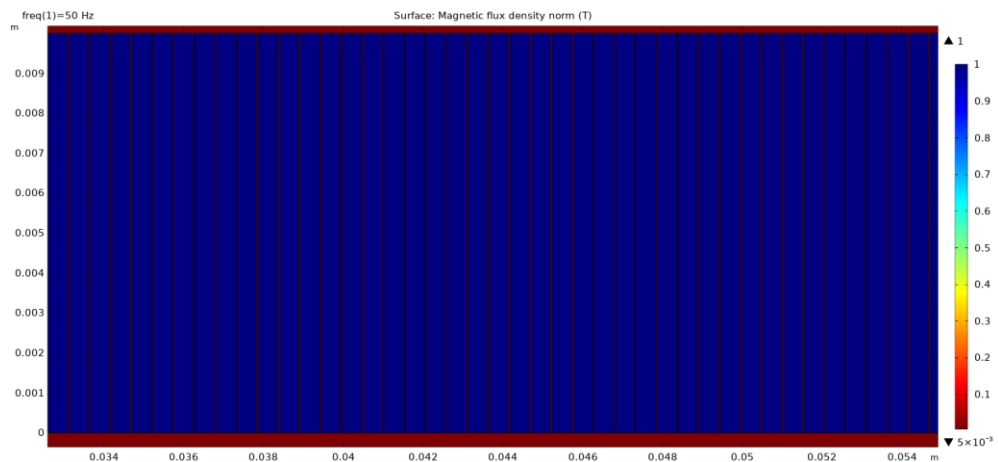


В)

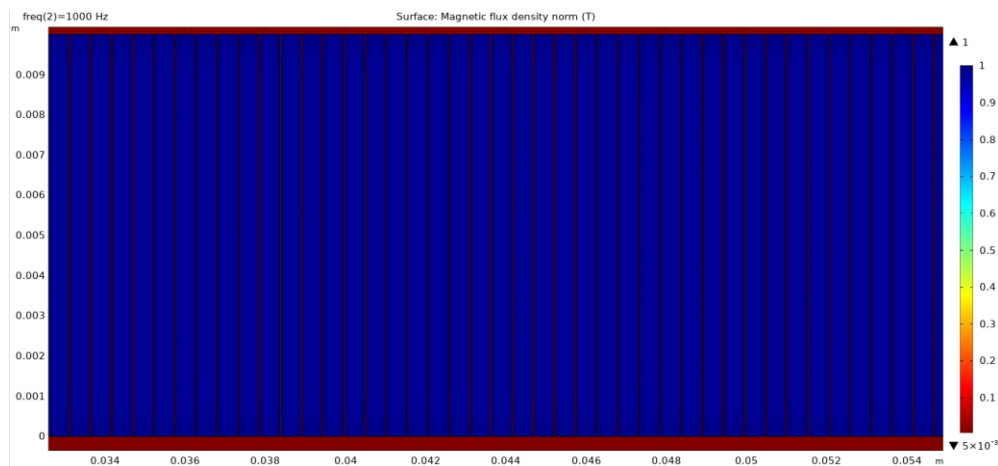
Рисунок 3.27 – Картина розподілу магнітної індукції в бездефектному магнітопроводі в залежності від частоти: А) 50Гц; Б)1000Гц; В) 10000Гц

Порахована магнітна індукція для частот 50, 1000 та 10000 Гц середнє значення відповідно 1.05, 0.98 і 0.57 Тл.

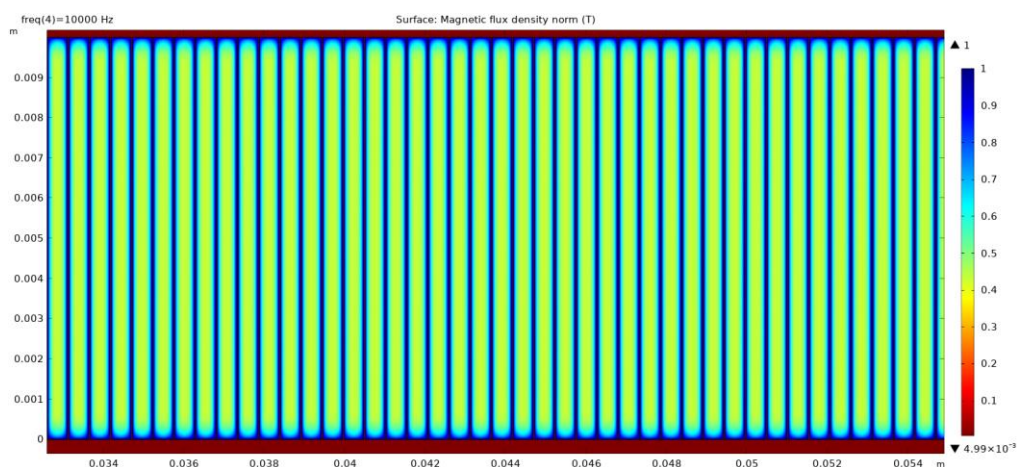
В подальшому будемо для зручності представляти ділянки магнітопроводу



А)



Б)



В)

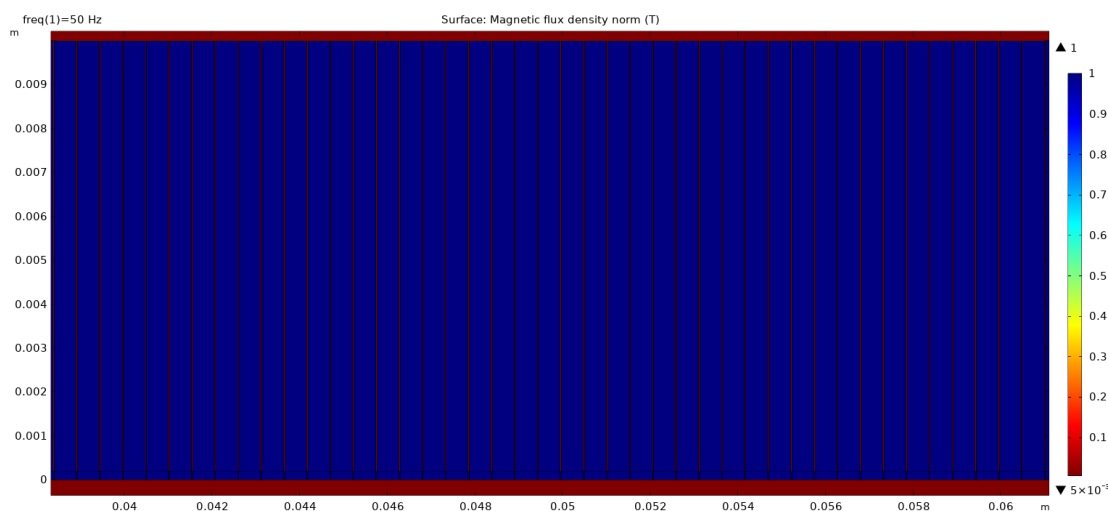
Рисунок 3.28 – Картина розподілу магнітної індукції в ділянці магнітопроводу в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

З представлених картин розподілу поля можна зробити висновок, що розподіл індукції та вихрових струмів, в залежності від частоти, відповідає розглянутому раніше умовному магнітопроводу з десяти пластин по 0,5мм.

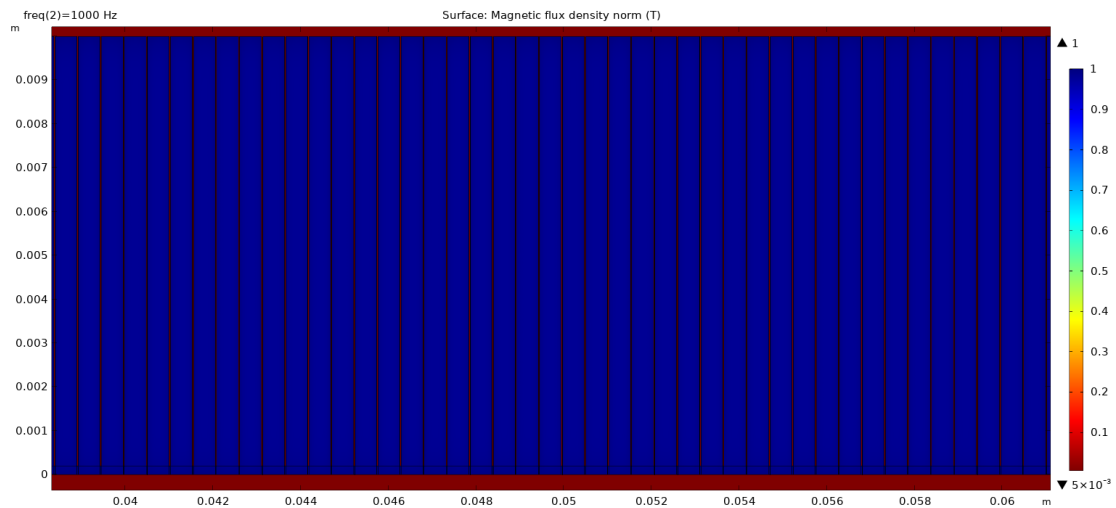
Для бездефектного магнітопроводу представленого на цих ілюстраціях пораховані втрати на вихрові струми при індукції 1Тл і частоті 50 Гц складають 0.63 Вт/кг.

При вимірених втратах на гістререзис 2 Вт/кг сумарні втрати в бездефектному магнітопроводі складають 2.63 Вт/кг. У порівнянні з виміряними втратами ватметровим способом для бездефектного магнітопроводу (3,15 Вт/кг) розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними складає ~16%. Розбіжність результатів пояснюється тим, що в реальному магнітопроводі є не враховані втрати наприклад в результаті прошліфовки зубцевої зони та точкових металевих перекриттів між кромками листів зубця.

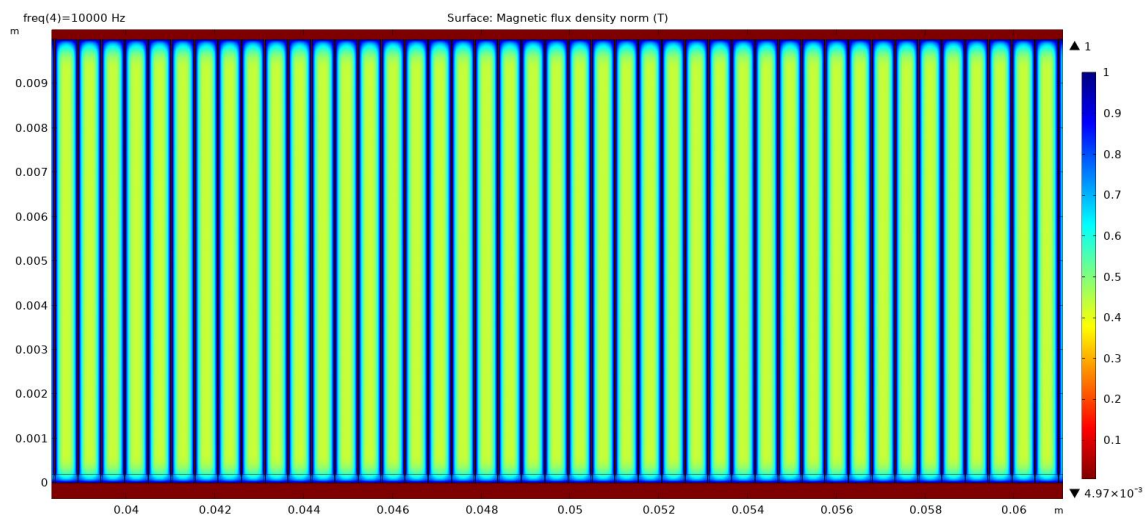
В реальному магнітопроводі його зовнішня поверхня перекрита по всій площі, тому що магнітопровід запресований в металевий корпус. До того ж часто зовнішня поверхня з'єднується зварювальним швом в чотирьох місцях поперек шихтовки. На наступних рисунках показано незначне збільшення питомих втрат в магнітопроводі, де змодельовано запресовка магнітопроводу в металевий корпус.



А)



Б)

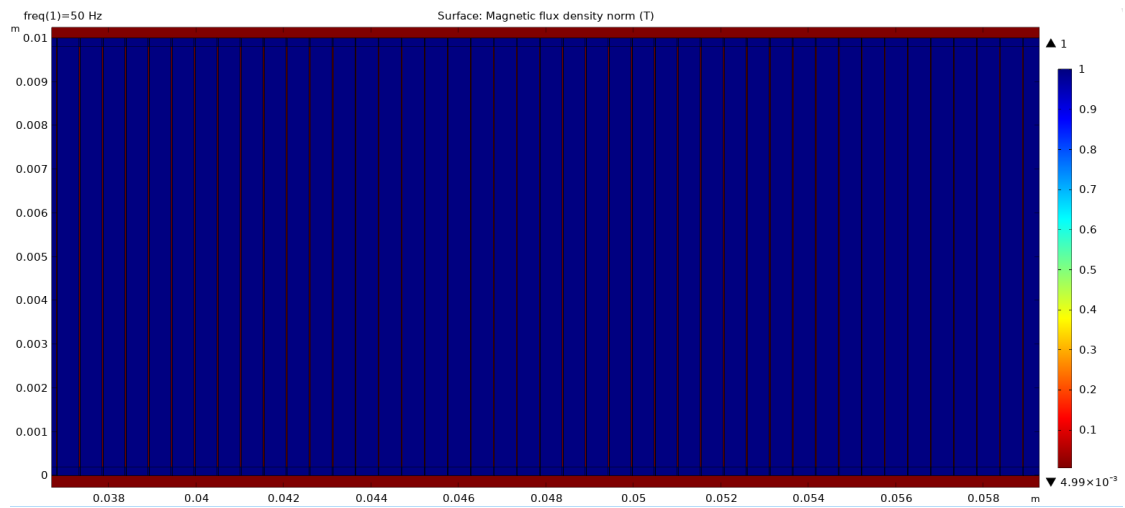


В)

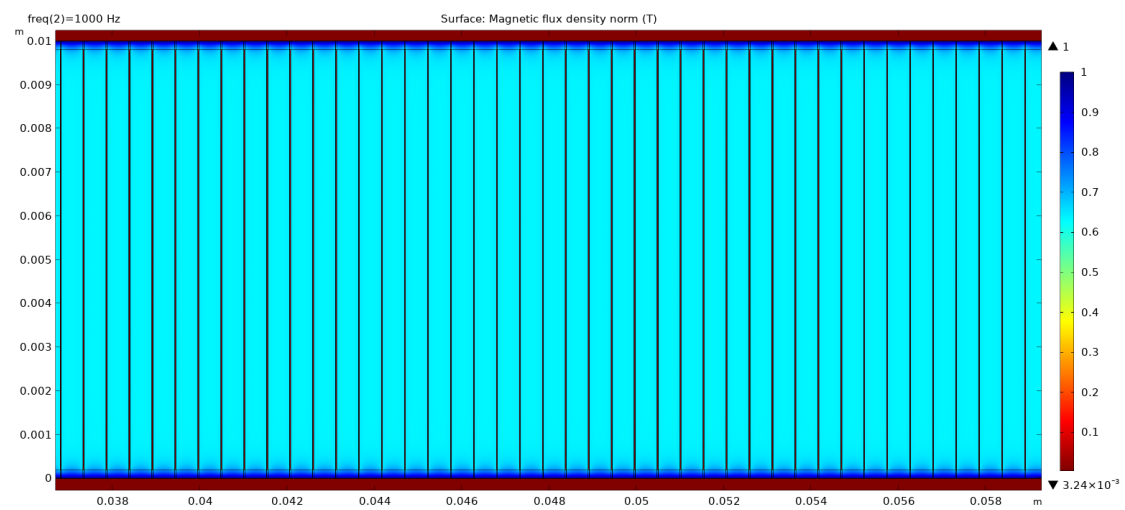
Рисунок 3.29 – Картина розподілу магнітної індукції в магнітопроводі зі зварним швом в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

В порівнянні з попереднім випадком індукція залишилась незмінна на всіх частотах, а втрати становлять 0,64 Вт/кг що відповідає різниці ~1.2%.

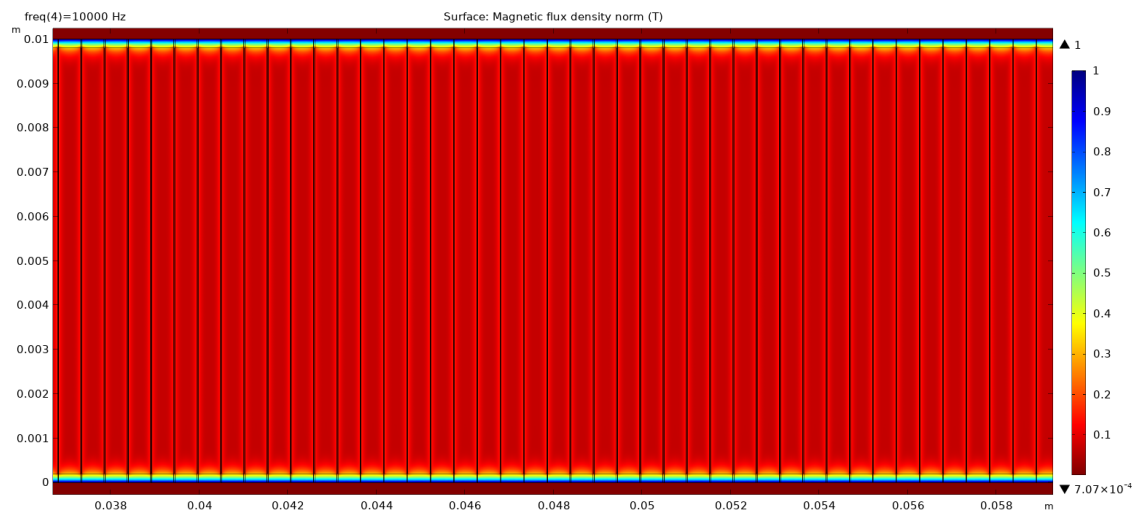
При перекритті поверхні розточки $\gamma_{\text{деф.шару}} = 2 \cdot 10^4$ сумарні втрати ($p_r + p_v$) суттєво ростуть і складають 6.67 Вт/кг, що відповідає жовтому рівню дефектності.



А)



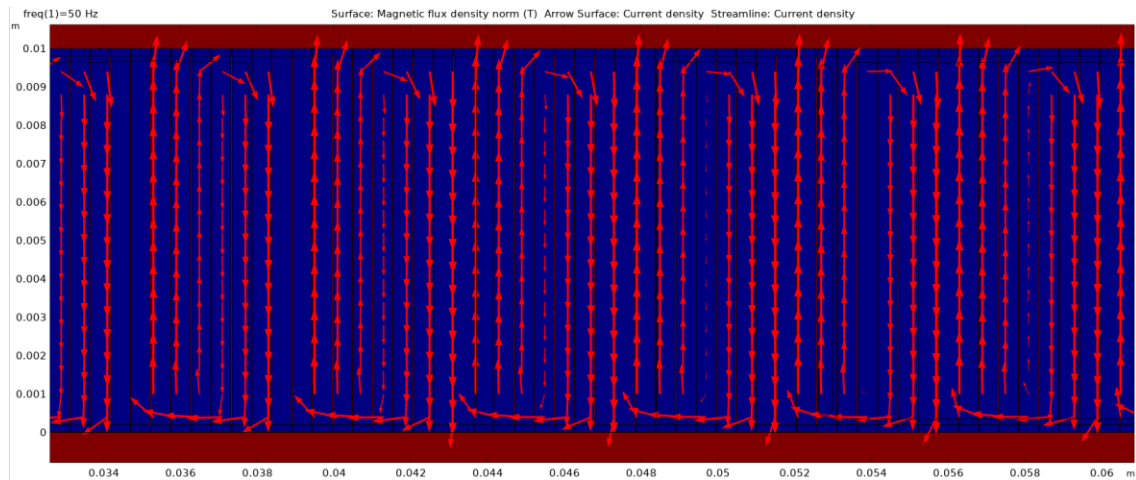
Б)



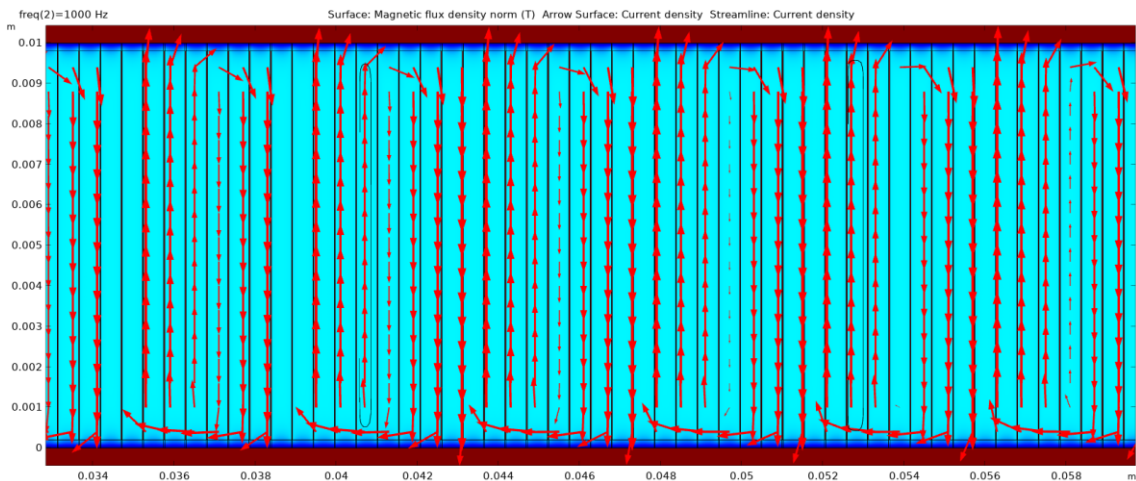
В)

Рисунок 3.30 – Картина розподілу магнітної індукції в магнітопроводі зі зварним швом та перекритті поверхні розточки в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

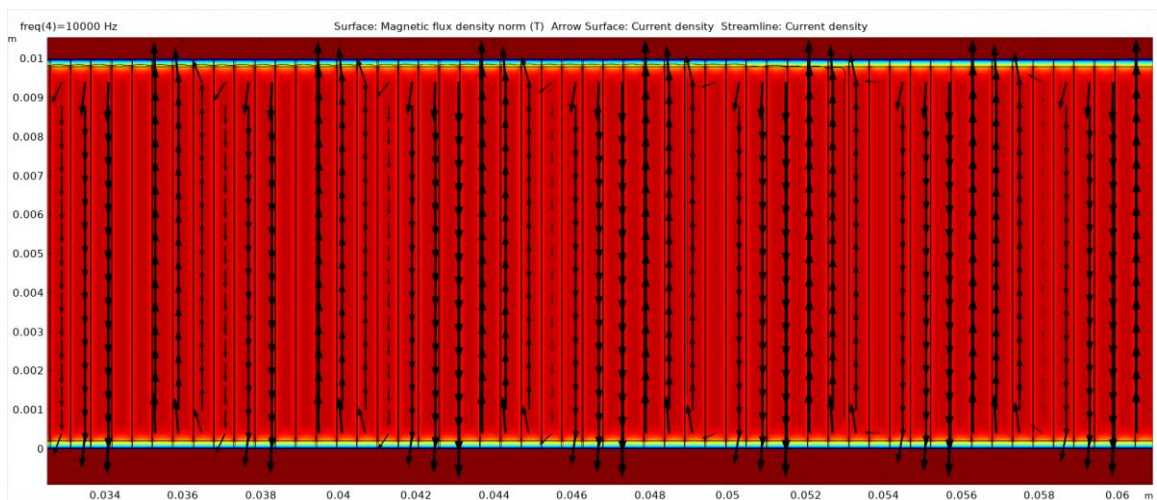
На наступних рисунках показано розподіл вихрових струмів по перерізу листів магнітопроводу.



А)



Б)



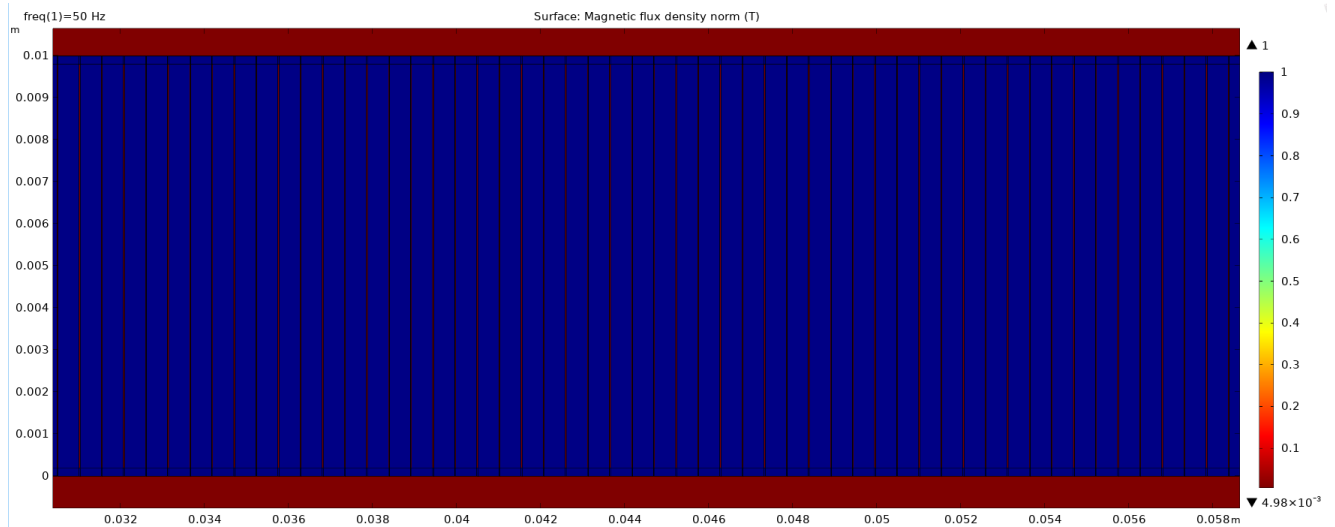
В)

Рисунок 3.31 – Картина розподілу вихрових струмів по перерізу пакету магнітопроводу в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

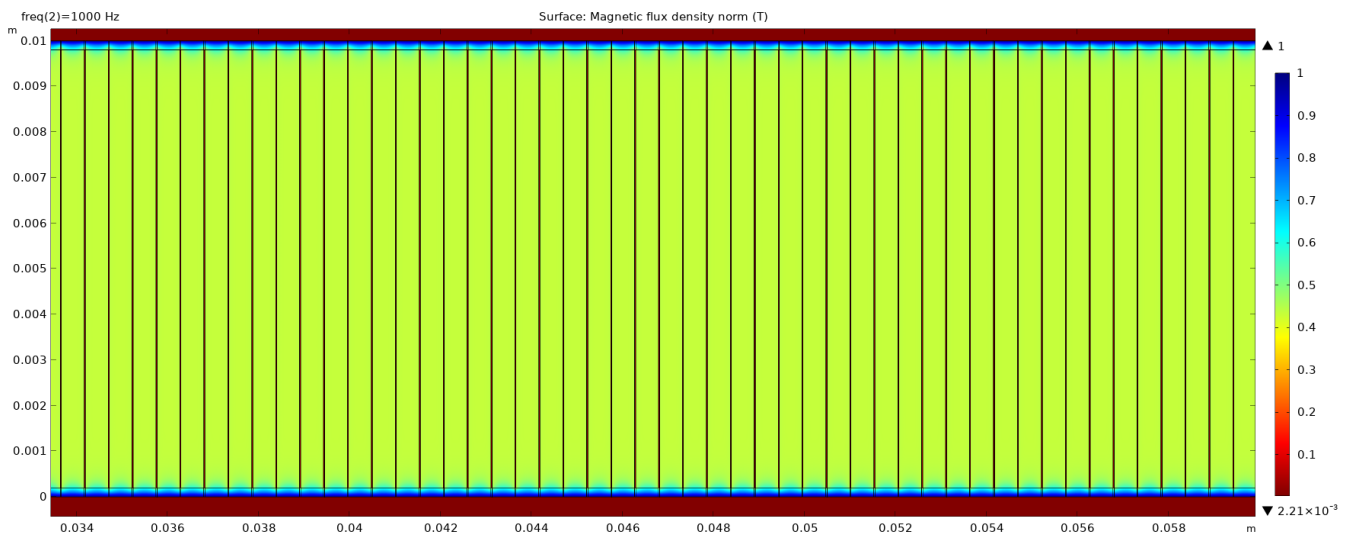
Порахована середня магнітна індукція для частот 50, 1000 та 10000 Гц становить відповідно 0.98, 0.65 і 0.12 Тл. Діагностичний коефіцієнт становить

$$K_d = \frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 5.38$$

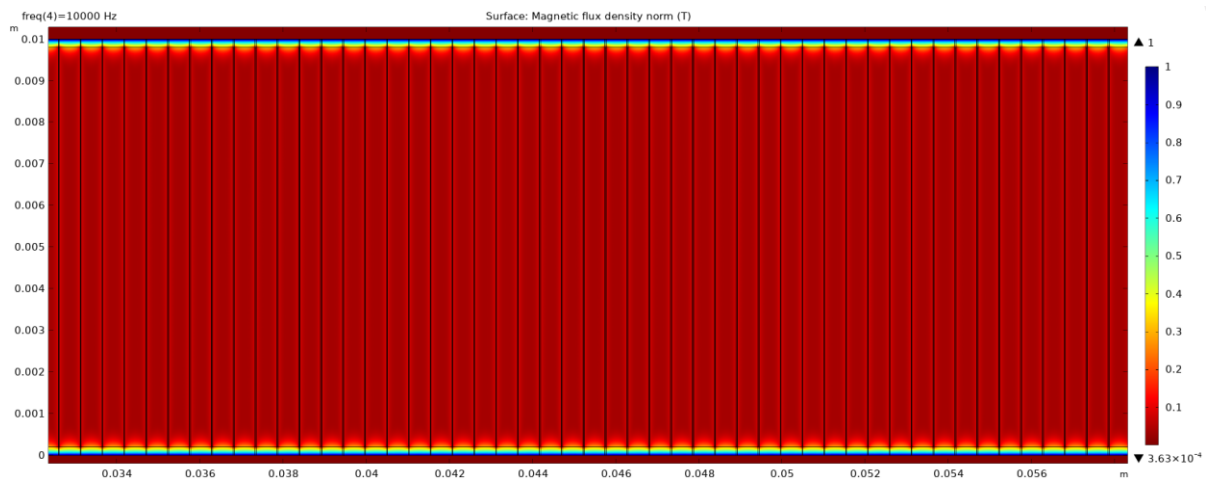
При перекритті поверхні розточки $\gamma_{\text{деф.шару}} = 4 \cdot 10^4$ сумарні втрати ($p_r + p_v$) ще більше ростуть і складають 9.92 Вт/кг, що відповідає помаранчевому рівню дефектності.



А)



Б)



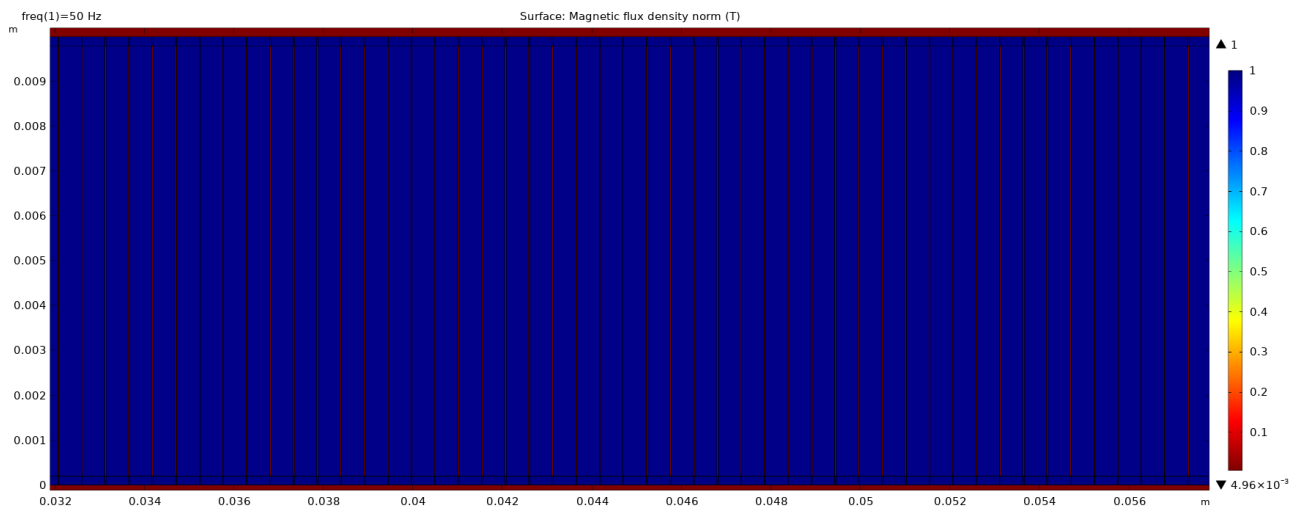
В)

Рисунок 3.32 – Картина розподілу магнітної індукції в магнітопроводі зі зварним швом та перекритті поверхні розточки з провідністю $\gamma_{\text{деф.шару}} = 4 \cdot 10^4$ в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

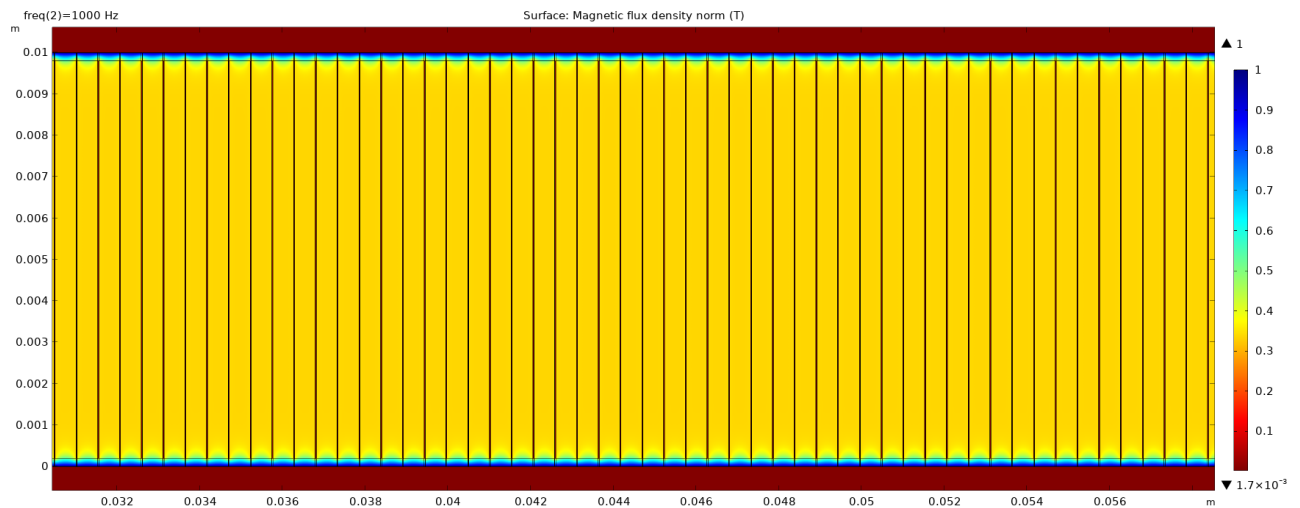
Порахована середня магнітна індукція для частот 50, 1000 та 10000 Гц становить відповідно 0.98, 0.45 і 0.078 Тл. Діагностичний коефіцієнт становить

$$K_d = \frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 4,57$$

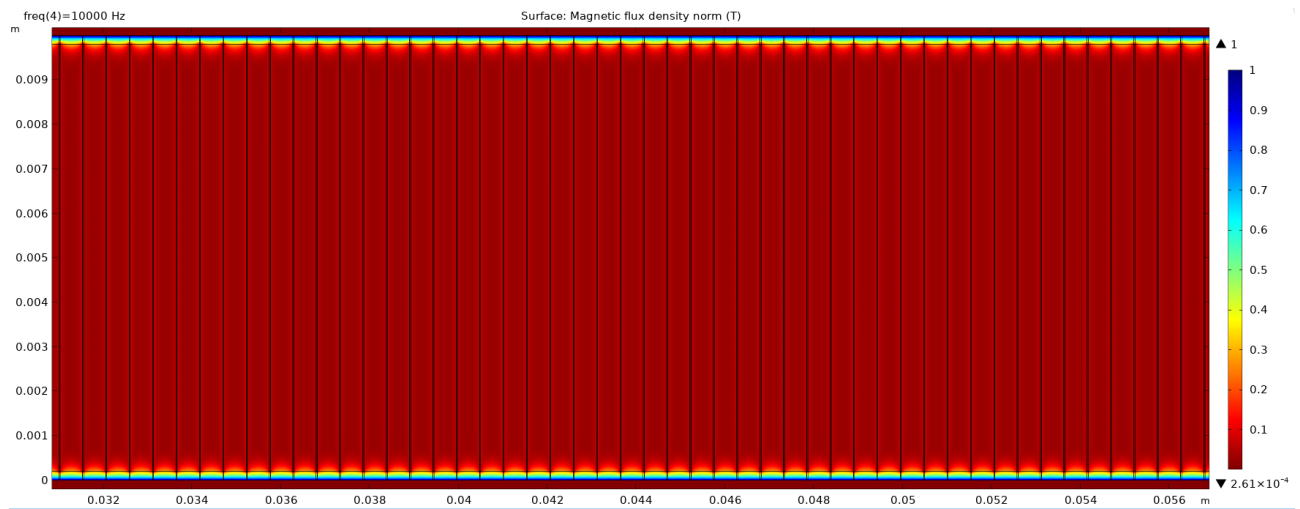
При перекритті поверхні розточки $\gamma_{\text{деф.шару}} = 6 \cdot 10^4$ сумарні втрати ($p_r + p_v$) найбільші і становлять 12.58 Вт/кг, що відповідає червоному, тобто аварійному рівню дефектності.



А)



Б)



Б)

Рисунок 3.33 – Картина розподілу магнітної індукції в магнітопроводі зі зварним швом та перекритті поверхні розточки з провідністю $\gamma_{\text{деф.шару}} = 6 \cdot 10^4$ в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

Порахована середня магнітна індукція для частот 50, 1000 та 10000 Гц становить відповідно 0.98, 0.36 і 0.064 Тл. Діагностичний коефіцієнт становить

$$K_d = \frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 3,43$$

Виходячи з аналізу результатів розрахунків можна зробити висновок, що збільшення провідності дефектних контурів в області розточки магнітопроводу по всій поверхні збільшує загальні втрати магнітопроводу. При зміні провідності

дефектного шару від $2 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^4$ См/м загальні питомі втрати ($p_r + p_v$) при початковій індукції 1Тл збільшується з 0.63 Вт/Кг до 12.58 Вт/кг.

Представлено чотири рівні дефектності:

- зелений – бездефектний магнітопровід. Загальні питомі втрати до 4Вт/кг;
- жовтий – бракований магнітопровід першого ступеня. Загальні питомі втрати з 4 до 8 Вт/кг;
- помаранчевий – бракований магнітопровід другого ступеня. Загальні питомі втрати від 8 до 12 Вт/кг;
- червоний – магнітопровід аварійного стану. Загальні питомі втрати більше 12 Вт/кг.

3.9 Експериментальне і математичне моделювання дефектних і бездефектних магнітопроводів на реальних зразках

Для експериментального дослідження в лабораторіях кафедри електромеханіки було створено стенд для дослідження дефектних та бездефектних магнітопроводів.



Рисунок 3.34 – Лабораторний стенд для дослідження магнітопроводів ватметровим методом



Рисунок 3.35 – Лабораторний стенд для дослідження магнітопроводів ватметровим методом з викроситанням тепловізора

Стенд складається з зварювального трансформатора, вимірювальної апаратури та тепловізора Fluke Ti100. Об'єкт дослідження - магнітопроводи асинхронних двигунів загального призначення.

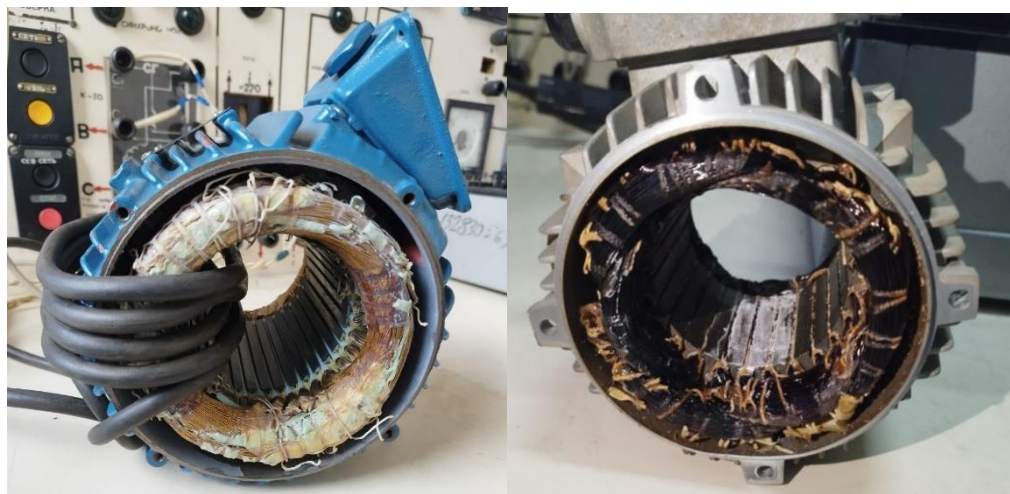


Рисунок 3.36 – Дефектні магнітопроводи



Рисунок 3.37 – Приклад сканування тепловізійної картини магнітопроводу тепловізором

Випробування проводились ватметровим способом шляхом намотування робочої обмотки на спинку магнітопроводу. Робоча обмотка живиться від зварювального трансформатора, максимальний струм до 100А. Наводилась індукція 1 Тл, яка контролювалась за допомогою вимірювальної обмотки.

Визначались загальні втрати в магнітопроводах різного рівня дефектності, визначались питомі втрати і давалось заключення по ступеню дефектності магнітопроводу.

Було запропоновано чотири рівні дефектності магнітопроводів які описані в попередньому розділі.

Результати досліджень представлені в попередньому розділі в таблиці 3.3. Там же представлено розділення втрат на гістерезис та на вихрові струми.

Цим же ватметровим методом проводилось дослідження локальних дефектів шляхом нагріву магнітопроводів при індукції 1.6-1.8 Тл зі скануванням температур за допомогою тепловізора протягом певних проміжків часу.

3.10 Експериментальне визначення локальних дефектних зон за допомогою тепловізора

Для проведення експериментів використовувався тепловізор Fluke Ti100. Завдяки наявності екрану і можливості зберігання тепловізійних картин можна оцінити як під час досліджень пошкоджених осердь змінюється температура в дефектних зонах.

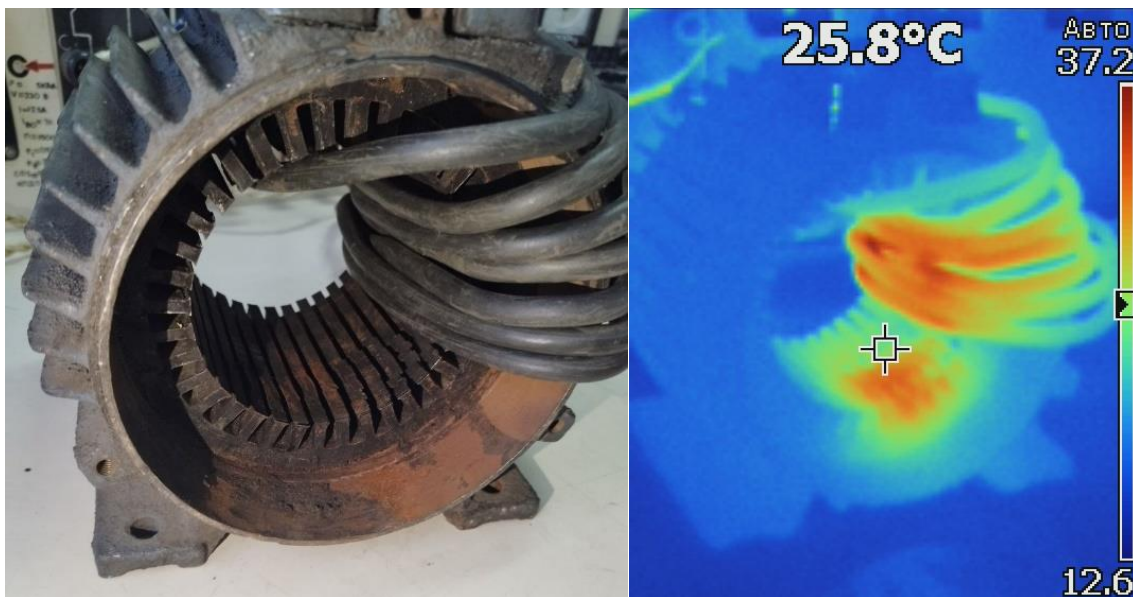


Рисунок 3.38 – Тепловізійна картина досліджуваного дефектного магнітопроводу

Проаналізувавши дані з тепловізора, можна зробити висновок, що в місці дефекту, конкретно в цьому випадку, пошкоджені зубці більше нагріваються, ніж весь магнітопровід.

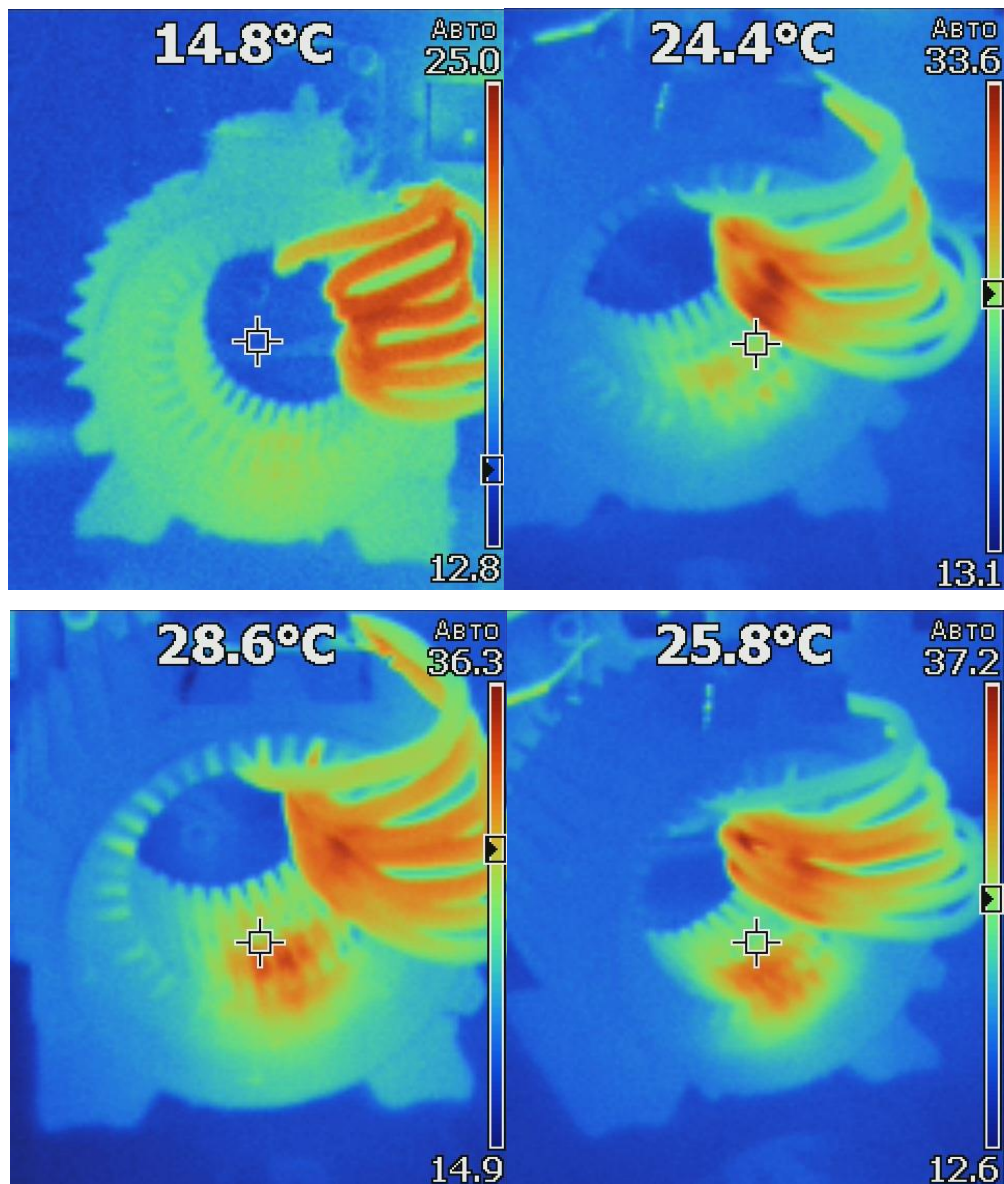


Рисунок 3.39 – Тепловізійні картини дефектного магнітопроводу під час нагрівання 1хв, 2хв, 6хв і 8хв

Зображені картини відповідають нагріванню магнітопроводу за певний період часу при наведенні індукції 1 Тл. З часом локальна зона з дефектними зубцями починає нагріватись більше.

Процес виділення тепла в дефектній зоні проходить аналогічно як у зібраній робочій дефектній машині. Під час довготривалого використання такої машини, в місці виділення тепла можуть розвинутиись існуючі та виникнути інші дефекти, в першу чергу пошкоджується міжлистова ізоляція, що призводить до збільшення металевого контакту між пластинами, а відповідно збільшення тепла.

Коли температура дефектної ділянки починає значно збільшуватись, тоді починає пошкоджуватись ізоляція обмотки закладеної в пазах статора і може призвести до повного виходу з ладу машини та подальшої відбраковки.

Більш детально оцінити теплову картину можна по еквівалентних теплових схемах.

Таким же методом було проведено сканування тепловізійних картин для половини магнітопроводу двигуна 4A90L2Y3

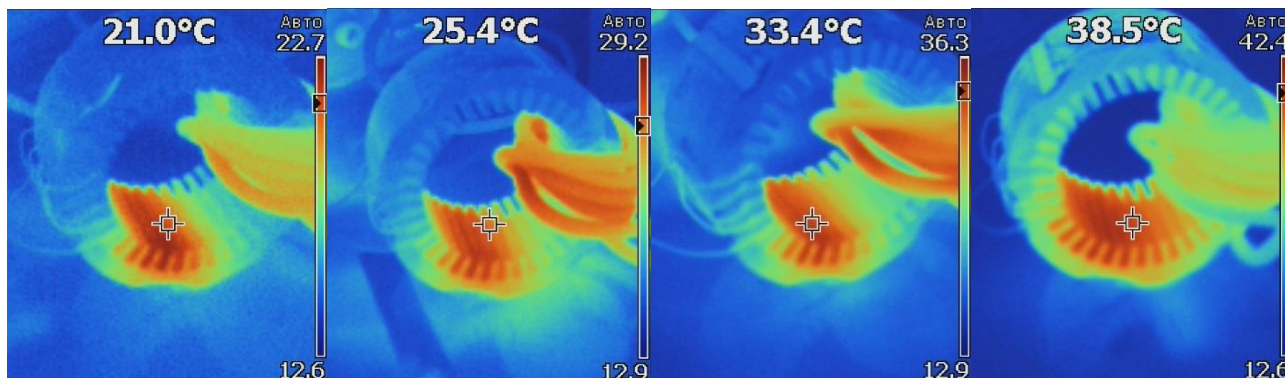


Рисунок 3.40 – Сканування тепловізійних картин половини магнітопроводу двигуна 4A90L2Y3

Після 10хв нагріву тепло від дефектної зони починає розподілятися по всьому магнітопроводу, що спотворює загальну картину локалізації дефектної зони.

Ці випробування проводились для магнітопроводів машин до 7,5кВт та різної геометрії. При збільшенні розмірів картина може мінятися кількісно але якісно буде така ж.

3.11 Математичне моделювання локальних дефектів реального магнітопроводу

Моделювання здійснено на прикладі другої частини магнітопроводу відповідно до показаного в попередньому випадку. Як було описано раніше магнітопровід був розрізаний на 2 рівних частини.

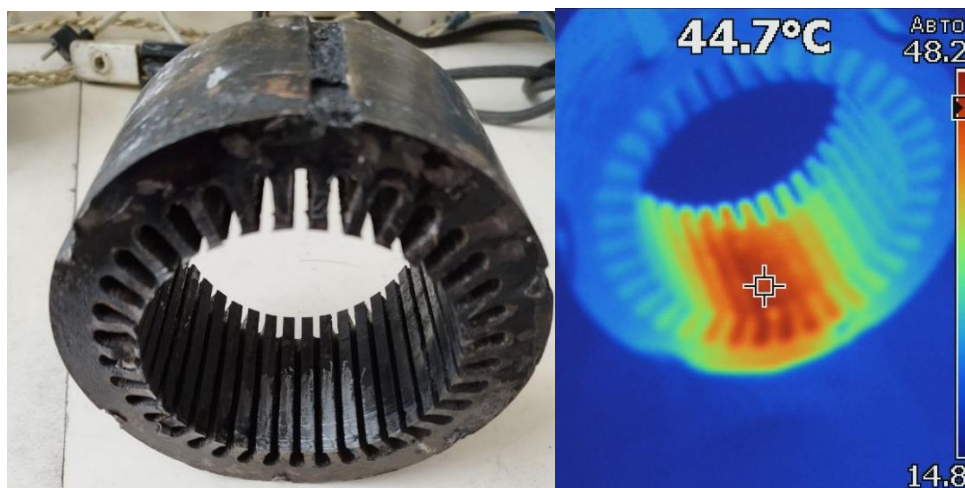


Рисунок 3.41 – Сканування тепловізійної картини магнітопроводу зі змодельованим дефектом

З фотографії видно, що дефект зубцевої зони був отриманий в результаті штучного механічного пошкодження частини зубців. Закорочена ділянка складає приблизно шосту частину об'єму магнітопроводу. При індукційному нагріві від зварювального трансформатора ця ділянка нагрівалась до температури 48 °С протягом 10 хв.

Враховуючи температурну картину можна порахувати магнітні втрати за допомогою зворотної задачі розрахунку електричної провідності пошкодженої зони по заданим втратам при певному значенні індукції.

В розрахунках стосовно до польової задачі глибина дефектного шару становить 0,2мм з провідністю сталі $5 \cdot 10^6$ С/м. Така глибина дефектного шару та її провідність не може бути наслідком порушення технологічних операцій проточки, шліфування, хонінгування магнітопроводу в процесі виробництва і ремонту. Це є наслідком аварії двигуна при зриві бочки ротора з вісі обертання і гальмуванні ротора об статор. Було змодельовано саме такий тип дефекту.

Саме ці дані були задані під час моделювання дефектної частини досліджуваного магнітопроводу. Пошкоджена ділянка моделювалась як 1/6 від об'єму всього магнітопроводу.

Результати моделювання:

1) Середня індукція при частоті 50 Гц складає 0,9 Тл. Що менше в порівнянні з бездефектним магнітопроводом при однаковій напруженості поля на

~10%. Індукція в пошкодженій ділянці – 0,72 Тл. Загальні втрати на вихрові струми в магнітопроводі – 11,73 Вт/кг. Втрати в пошкодженій ділянці ~30-35 Вт/кг

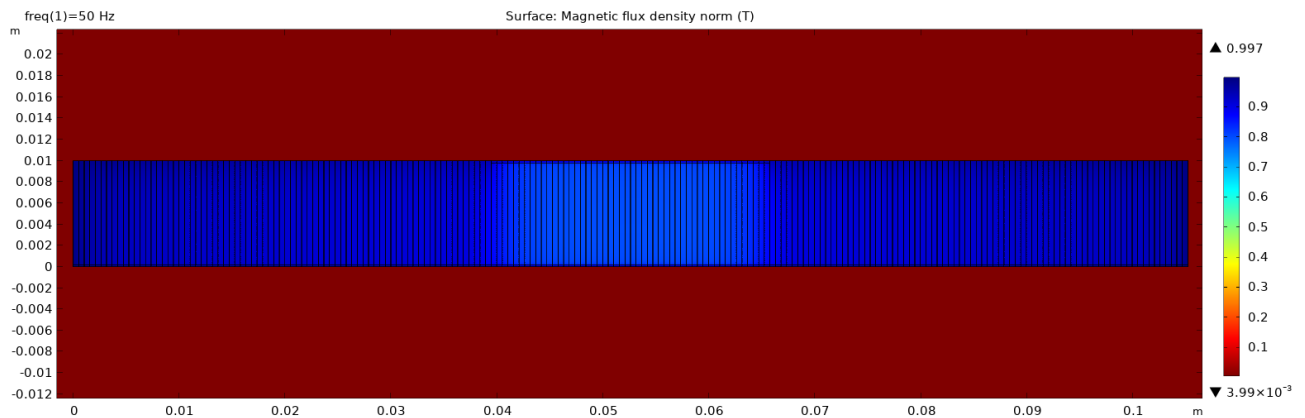
2) При частоті 1000 Гц середня індукція становить 0,18 Тл при незмінній напруженості поля. В пошкодженій ділянці індукція складає ~0,1 Тл.

3) При частоті 10000 Гц середня індукція становить 0,03 Тл при незмінній напруженості поля.

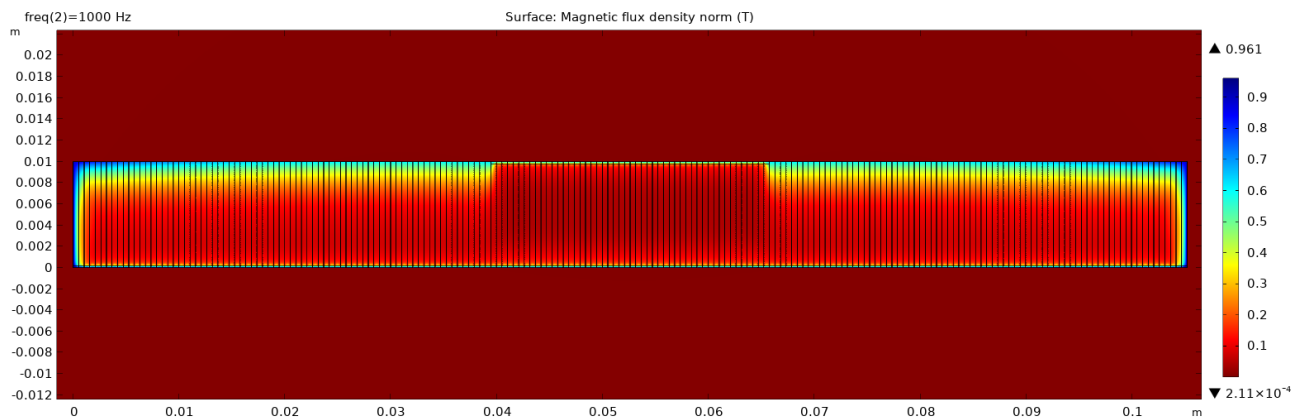
Відношення напруги при 1000 і 10000Гц становить:

$$K_d = \frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 3.83$$

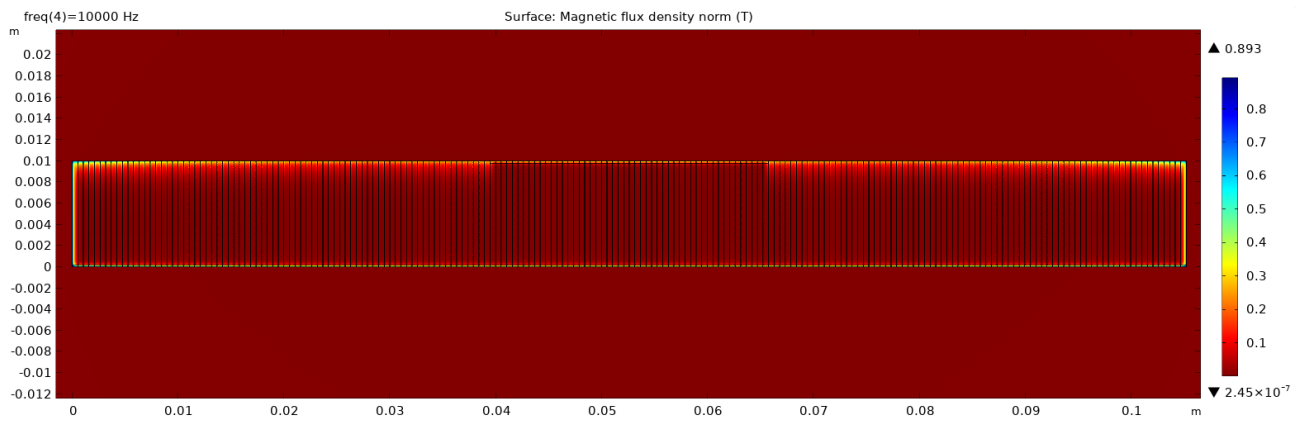
Отриманий коефіцієнт відповідає аварійному стану магнітопроводу.



А)



Б)

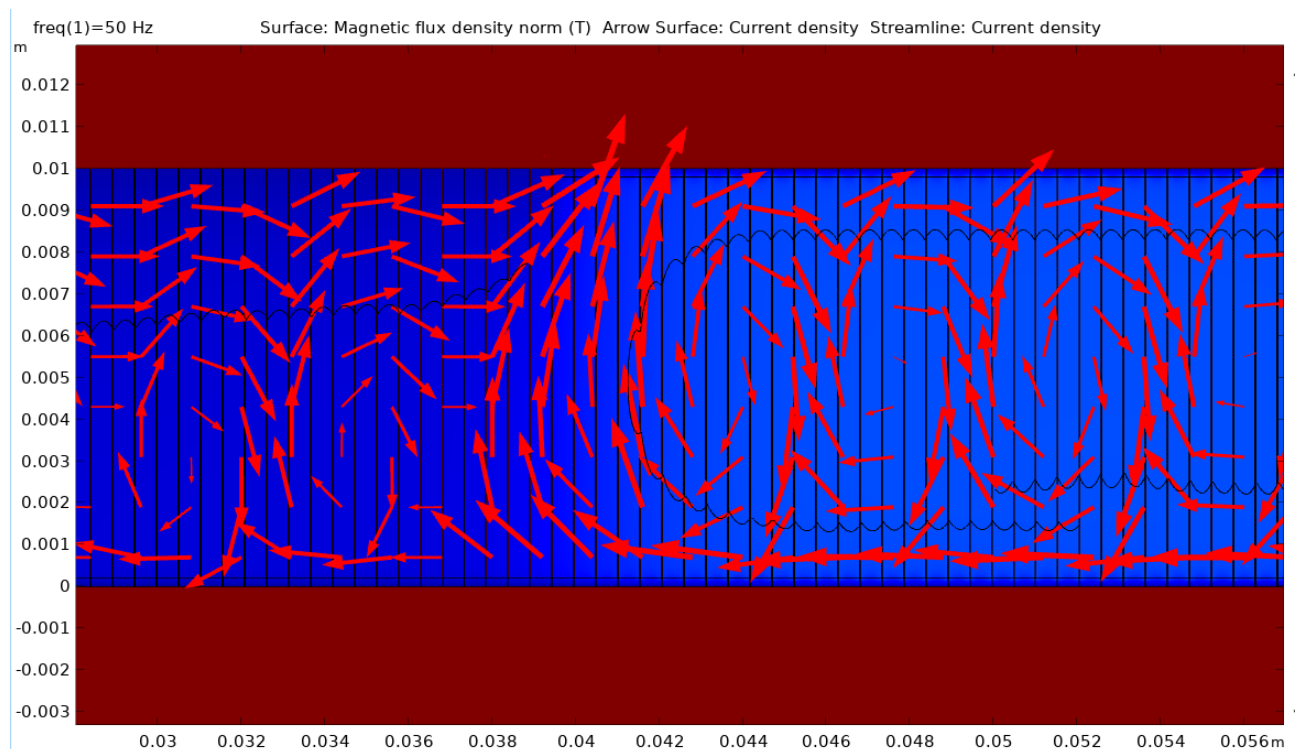


В)

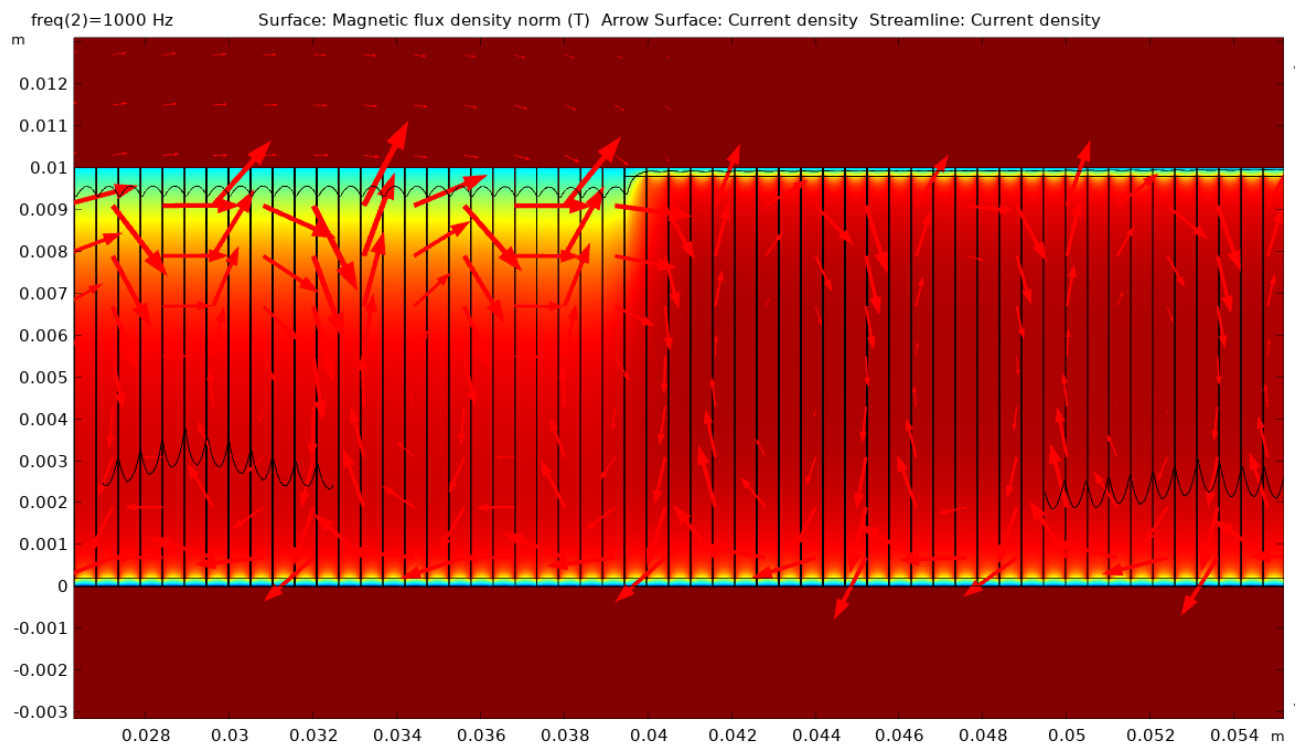
Рисунок 3.42 – Картина розподілу магнітної індукції в магнітопроводі з змодельованим дефектом в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

Представлені ілюстрації є результатом розрахунків високочастотних процесів в магнітопроводі при моделюванні дефектної зони.

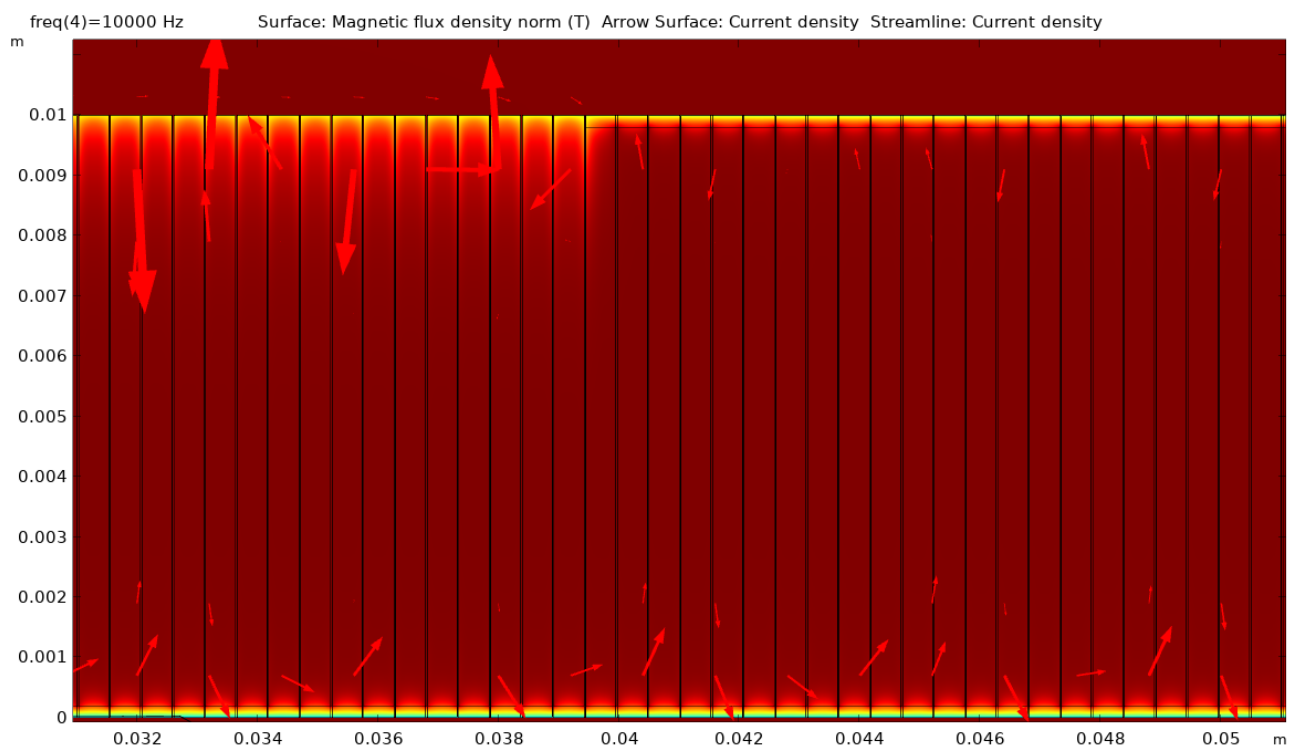
Шляхи замикання вихрових струмів в дефектних зонах при частотах 50 1000 і 10000 Гц.



А)



Б)



В)

Рисунок 3.43 – Картина розподілу вихрових струмів по перерізу пакету магнітопроводу зі змодельованим дефектом в залежності від частоти: А) 50Гц; Б) 1000Гц; В) 10000Гц

Загальні втрати збільшилися з 2,64 Вт/кг до 4,76 Вт/кг, але пораховані втрати в ділянці зони циркуляції дефектних контурів вихрових струмів (1/8 частина об'єму) складають 19.2 Вт/кг, що безумовно призведе до суттєвого місцевого перегріву. Такий магнітопровід не придатний до подальшої експлуатації, що ілюструється даними тепловізійного контролю при нагріві магнітопроводу ватметровим методом.

Не зважаючи на те, що загальні питомі втрати виросли не суттєво (перехід на жовтий рівень) але локальні втрати є такими, що унеможлиблює подальше використання магнітопроводу.

3.12 Експериментальне дослідження втрат в локальних дефектних зонах

В більшості випадків, в разі механічного пошкодження, як приклад зрив бочки ротора з вісі обертання через пошкодження підшипникового вузла, пошкоджується певна ділянка магнітопроводу, коли інша частина залишається не ушкодженою. На рис. 3.44 представлено один з таких випадків.



Рисунок 3.44 – Локальна дефектна зона спричинена зривом бочки ротора з вісі обертання

Стандартні методи визначення втрат показують загальні втрати в магнітопроводі, проте ці втрати розподіляються нерівномірно. В місцях локальних дефектів, частіше всього, закорочуються пластини осердя між собою, що спричиняє збільшення контуру протікання вихрових струмів. Як показали

результати моделювання закорочених пластин, що відповідають 20% від магнітопроводу, втрати в цих місцях можуть дорівнювати а іноді і перевищувати втрати в непошкодженій частині.

Було створено польову тривимірну модель масивного магнітопроводу з двома дефектними зубцями. В цій моделі магнітопровід задавався масивним з різною провідністю по поздовжній та поперечній осі. По поздовжній вісі задавалась звичайна провідність сталі, а по поперечній - провідність дефектних контурів, яка відповідає електричній провідності дефектного шару. Розподіл втрат показано на рис. 3.45.

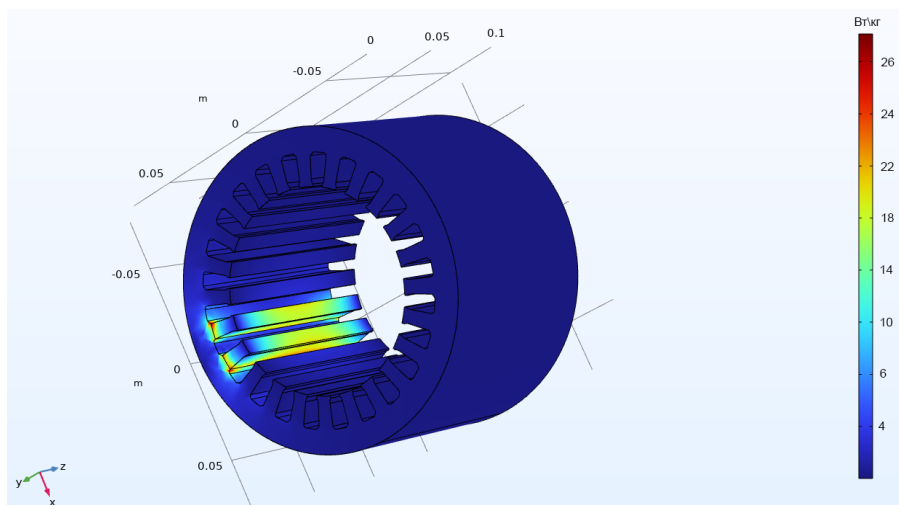


Рисунок 3.45 – Розподіл втрат в магнітопроводі з дефектними зубцями

В реальному магнітопроводі візуально оцінити наявність локальних дефектів не завжди можливо. Як відомо, в пошкоджених зонах з'являються дефектні контури вихрових струмів, а відповідно і локальні втрати. Збільшення втрат на вихрові струми викликає більший нагрів пошкодженої зони. В таких випадках, щоб оцінити пошкодження магнітопроводу використовують тепловізійні методи.

3.13 Тепловий розрахунок асинхронного двигуна АІР100L4У3 з магнітопроводом з локальним дефектом в зубцевій зоні

Локальні дефекти магнітопроводів проявляються у вигляді місцевого перевищення температури. У порівнянні з бездефектною частиною вони можуть не впливати на загальні втрати в магнітопроводі але потребують окремої діагностичної оцінки.

Діагностичною ознакою можуть служити темпи наростання температури в дефектних зонах у порівнянні з бездефектними частинами при індукційному нагріві магнітопроводу з максимально можливими значеннями наведеної індукції. Достатнім часом для виявлення небезпечних дефектів є сканування тіла магнітопроводу протягом однієї хвилини. Перевищення температури нагріву в дефектній зоні над бездефектною зоною в 5-6 градусів протягом 1 хвилини свідчить про небезпечний локальний дефект з рекомендацією відбракування всього магнітопроводу, тобто діагностична ознака - це швидкість наростання температури яка становить 5-6 градусів в хвилину.

Але ці висновки обґрунтовані для окремого магнітопроводу але не відомо як ці дефекти будуть проявляти себе в зібраній машині при її роботі. Безумовно очікуються перегріву в частинах обмотки які лежать в пазах між дефектними зубцями. Оскільки загальні питомі втрати в магнітопроводі виросли не суттєво то і загальні магнітні втрати в зібраній машині при її роботі також зростуть не суттєво. Тобто це не може служити діагностичною ознакою для виявлення локальних дефектів. Тому було проведено експериментальне дослідження на реальному магнітопроводі з пошкодженою дефектною зоною реального двигуна AIP100L4Y3.

Експерименти проводились на підприємстві ТОВ «ЕНЕРСІС Україна». В магнітопровід з дефектними зубцями була вкладена обмотка в частині якої вкладались термопари, для того щоб оцінити тепловий режим та локальні втрати в різних частинах двигуна, а саме в такі місця:

- На бічну поверхню пошкоджених та непошкоджених зубців;
- На бічну поверхню ярма;
- В дефектну та бездефектну зубцеву зону на поверхні магнітопроводу;
- В частини обмотки, які лежать в пазах між пошкодженими та не пошкодженими зубцями;
- В лобові частини обмотки;
- На дно пазу в пошкоджених та не пошкоджених зонах;
- На корпусі.

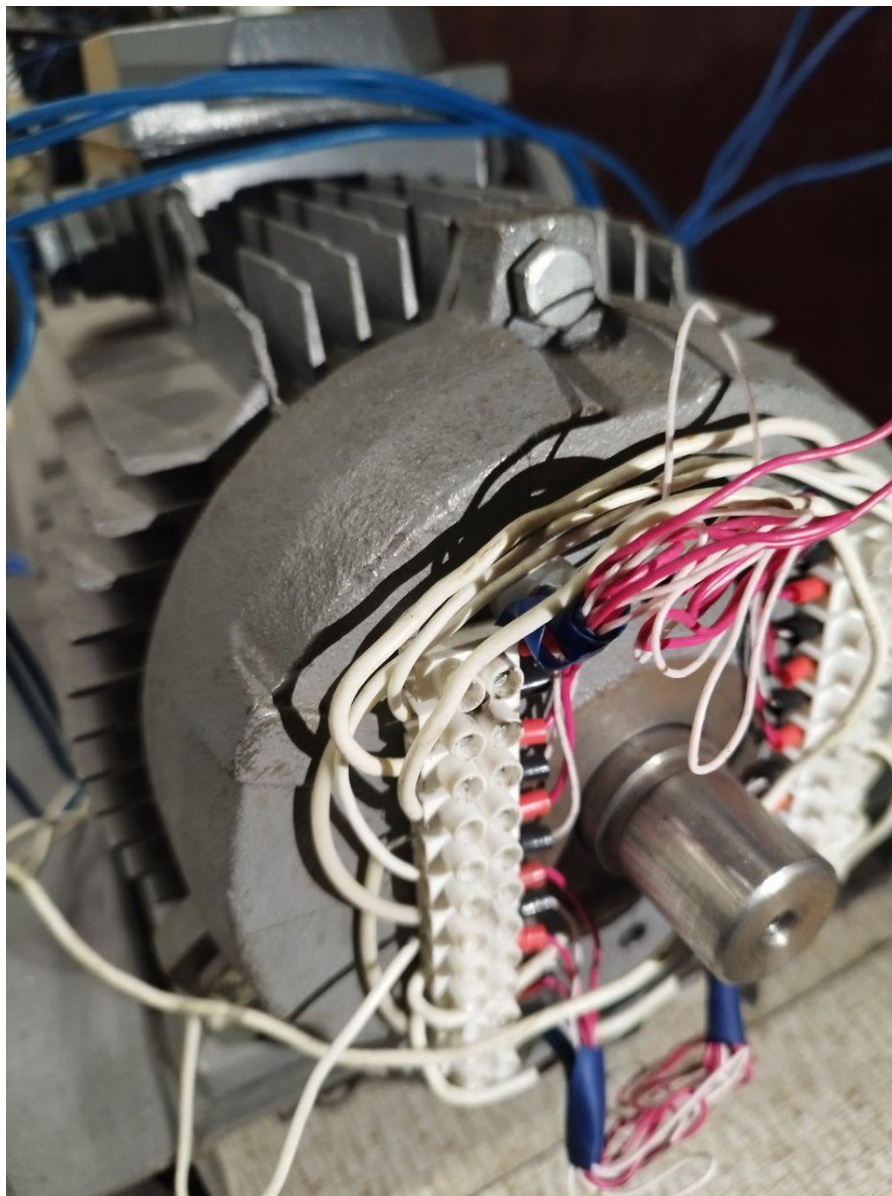


Рисунок 3.46 – Фото зібраного двигуна з виводами кінців термопар

На наступному рисунку представлена ділянка зубцевої зони з пошкодженими зубцями та вказано вузли для теплового розрахунку по тепловим схемам заміщення. Розрахунки було проведено за відомою методикою [84].

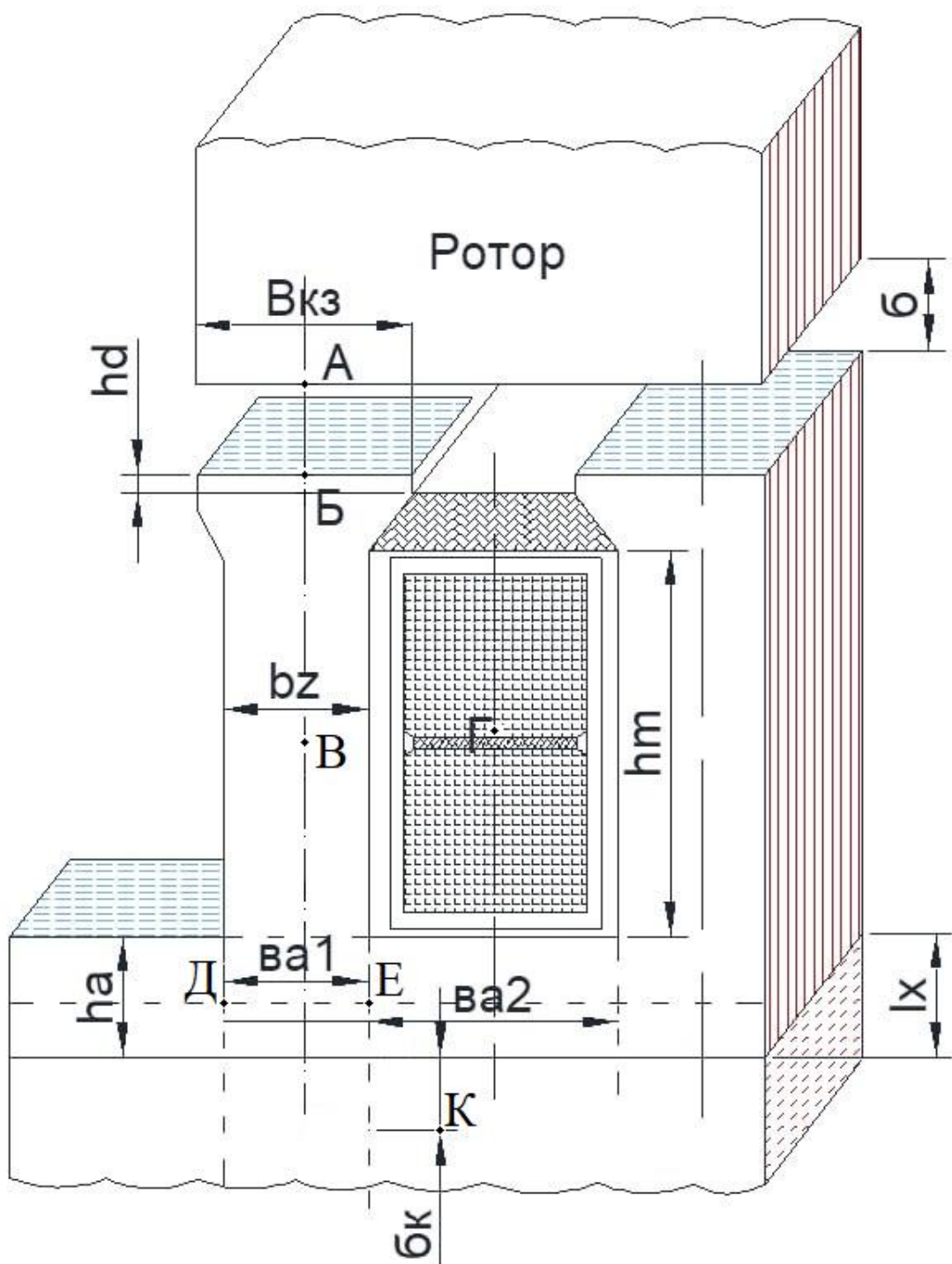


Рисунок 3.47 – Ділянка розрахункової зубцевої зони з закладеними датчиками температури

Частини еквівалентної схеми заміщення зображено на наступних рисунках.

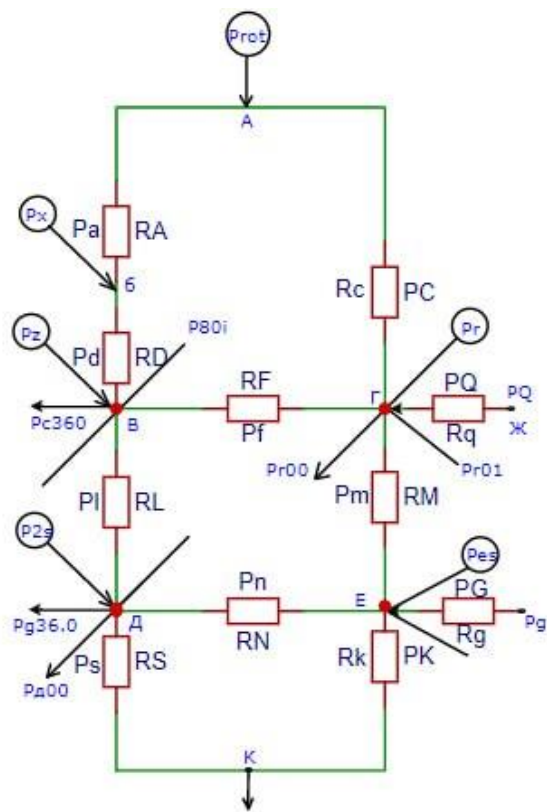


Рисунок 3.48 – Змінена еквівалентна схема заміщення двигуна

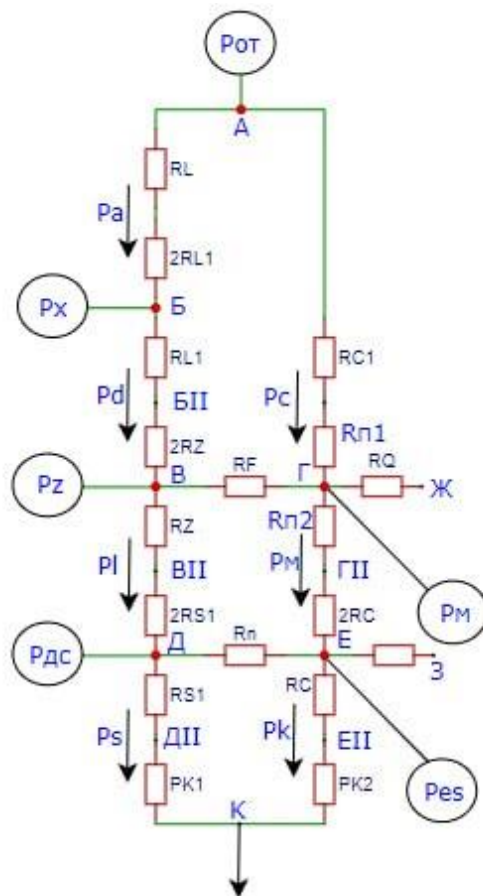


Рисунок 3.49 – (ЕТС) розрахункової ділянки двигуна

Аналіз рекомендованих розрахункових формул для визначення втрат показує, що всі вони містять поправочні коефіцієнти, що граничні на основі статистичних даних виготовлених машин. Тому можливе використання вже існуючих формул, але з уточненими коефіцієнтами. Однак краще ділити розрахунок втрат від вихрових струмів окремо. Оскільки механічна дія на поверхню шихтованого сердечника, в першу чергу призводить до збільшення вихрових струмів і відповідно втрат в них.

Дефектну зону будемо розглядати як сталій масив з певним значенням електричної провідності

$$P_{VW} = \frac{\omega \cdot B^2 \cdot S_{\text{деф.д}}^2}{\Pi_{\text{деф.д}}^2 \cdot \rho} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{М}^3}, \quad (3.19)$$

де, $\omega = 2\pi f$ – кругова частота; f – частота, Гц; B – середнє значення індукції в коронці зубця, Тл; $S_{\text{деф.д}}$ – площа дефектної ділянки, кв . м; $\Pi_{\text{деф.д}}$ – периметр дефектної ділянки, м; ρ – електричний опір Ом*м.

При розрахунку втрат за попередніми виразами необхідно визначити об'єм, де замикаються контури вихрових струмів, які залежать від ступеню розвинутості та природи дефекту.

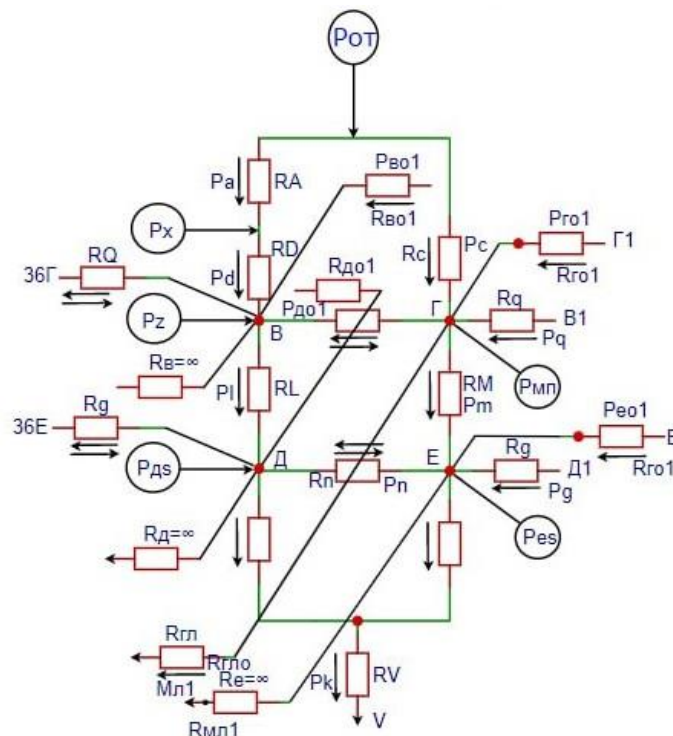


Рисунок 3.50 – Фрагмент повної ЕТС у зоні лобових частин обмотки статора

В таблиці 3.4 представлені температури в вузлах теплової схеми заміщення та дано їх порівняння з вимірними температурами на термопарах при роботі машини.

Таблиця 3.4 – Порівняння вимірної температури у вузлах ЕМ з розрахунковою

Позначення вузла	Розрахункові значення температур у вузлах	Виміряні значення температур	Похибка розрахунку
А - ротор	112,3 °C	-	-
Б – поверхня зубця статора	76,7 °C	77,7 °C	1,3%
В – бічна поверхня зубця статора	73,2 °C	74,8	2,2%
Г – середина обмотки	84,4 °C	78,9 °C	6,6%
Д – середина спинки статора	71,8 °C	72,5	1%
Е – середина спинки статора під пазом	70,9 °C	72,3	2%
К - корпус	70,2 °C	70,5 °C	0,5%

Висновки до Розділу 3

1. В результаті математичного моделювання високочастотних впливів на умовний магнітопровід перерізом 5x5 мм були розраховані і представлені картини розподілу магнітних індукцій та вихрових струмів при напруженості магнітного поля 4000 А/м і частотах перемагнічування 50, 1000 і 10000 Гц.

Були прораховані втрати на вихрові струми в магнітопроводах і співвідношення наведених напруг при вказаних частотах в дефектних і бездефектних магнітопроводах.

2. Доведено, що рівень дефектності магнітопроводів, пов'язано з питомими втратами на вихрові струми можливо моделювати шляхом збільшення електричної провідності матеріалу сталі, збільшенням товщини листів магнітопроводу та створенням паразитних контурів вихрових струмів, що відповідають локальним і інтегральним дефектам. Локальні дефекти моделювались шляхом металевго замикання сусідніх пластин, а інтегральні дефекти – збільшенням міжлистової поперечної електричної провідності пакету.

3. Показано, що у всіх розглянутих варіантах відстежується чітка тенденція – розмагнічуючий вплив вихрових струмів в дефектних контурах, що виражається в зменшенні середньої індукції, ефектах витіснення струмів в магнітопроводі при зростанні частоти і як наслідок зменшенням його еквівалентного перерізу.

4. Визначено найбільш інформативний показник, що свідчить про збільшення дефектності магнітопроводу а саме співвідношення наведеної напруги при частоті 10кГц до напруги при частоті 1кГц. Цей коефіцієнт чітко корелюється з втратами в магнітопроводі при перемагнічуванні з частотою 50Гц.

5. Результатом дослідження є доказ можливості створення простого і достатньо точного методу оцінки питомих втрат [Вт/кг] в магнітопроводі при $B_{1,0/50}$ шляхом вимірювання наведених ЕРС при встановлених частотах 10 і 1 кГц за допомогою контрольної обмотки в реальному зразку з визначенням їх співвідношення та відповідного рівня дефектності магнітопроводу.

РОЗДІЛ 4

ВИКОРИСТАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ВПЛИВІВ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ

4.1 Теоретичне обґрунтування діагностичних параметрів для ударної діагностики вузлів електрообладнання

У процесі роботи електрообладнання відбуваються незворотні зміни характеристик його вузлів (спрацьовування), що можуть проявлятися у вигляді втомлювальних дефектів або дефектів типу тріщини.

У шихтованих магнітопроводах, які входять до складу генератора, одним з основних дефектів є ослаблення пресування активної сталі й у результаті цього відшарування пластин зубців від шихтованого масиву магнітопроводу. Цей процес можна охарактеризувати зміною величин пружних зв'язків між окремими пластинами шихтованого магнітопроводу.

Очевидно, що такі зміни повинні впливати на чисельні характеристики інформативних сигналів, що вимірюються системою діагностики. Ті характеристики, що мають найбільш сильну залежність від зміни стану об'єкта діагностики, вибирають в якості діагностичних ознак.

Дослідження, що приведені в даному розділі, було проведено спільно з науковцями Інституту електродинаміки НАНУ на їх обладнанні.

В багатьох дослідженнях по вібродіагностиці показано, що зміна стану досліджуваних вузлів призводить до зміщення частотних максимумів у спектрі вимірних вібраційних сигналів (відповідають частотам максимумів густини потужності коливальних систем другого порядку, якими представлена модель вузла) або до появи нових спектральних максимумів (а отже і збільшення числа n). Теоретично зміщення частот максимумів густини потужності можна обґрунтувати, враховуючи взаємозв'язок між внутрішніми параметрами вузла (наприклад, демпфуванням, яке залежить від ступеня розвитку втомлювальних дефектів) та частотою його власних коливань. Появу нових піків на спектрограмі можуть зумовлювати тріщини, що викликають нелінійні явища.

Модель відображає внутрішню структуру об'єкта діагностики опосередковано через функцію ядра лінійного випадкового процесу, але неможливо вказати точну залежність між параметрами стану об'єкта і параметрами, що задають функцію ядра, оскільки ця залежність індивідуальна для кожного конкретного вузла і пов'язана з його геометричною формою, матеріалом, умовами закріплення в складі машини чи агрегату тощо.

Отже, на етапі теоретичного аналізу математичної моделі відгуку масивних вузлів електрообладнання (ЕО) на ударний вплив можна лише запропонувати потенційно придатні в якості діагностичних ознак параметри. До них, перш за все, віднесемо такі параметри: $n, c, \omega_j, j=1, n$.

До можливих діагностичних ознак віднесемо також чисельні значення статистичних моментів процесу вібрацій, оскільки їх легко визначити статистичними методами за вимірюною реалізацією відгуку на ударний вплив.

Таким чином, у якості можливих діагностичних ознак можна обрати:

- кількість максимумів спектральної густини потужності n ;
- вагові коефіцієнти α_j , що характеризують канали поширення хвилі;
- коефіцієнти згасання $\beta_j, j=1, n$;
- частоти максимумів густини потужності $\omega_j, j=1, n$;
- величини початкових і центральних моментів до деякого порядку.

Таким чином, вібраційну хвилю у масивних вузлах ЕО, викликану в результаті ударного впливу, можна представити у вигляді багаторезонансного ЛВП з ядром, що являє собою лінійну комбінацію імпульсних реакцій коливальних систем другого порядку, і вхідним збудженням у вигляді зашумленого дзвоноподібного імпульсу.

На основі теоретичного аналізу цієї моделі запропоновано ряд параметрів, що можуть бути використані в якості діагностичних ознак. Інформативність цих параметрів при діагностиці конкретних видів дефектів потрібно перевірити експериментальним шляхом (під час навчання системи діагностики на реальних об'єктах).

4.2 Лабораторний зразок ІВС ударної діагностики елементів конструкції потужного ЕО

До його складу увійшли більш сучасні компоненти, які мають компактні розміри, за рахунок чого лабораторний зразок ІВС може використовуватися як в стаціонарному варіанті (настільний персональний комп'ютер), так і в переносному варіанті (ноутбук).

Схема нового лабораторного зразка ІВС вібродіагностики показана на рис. 4.1.

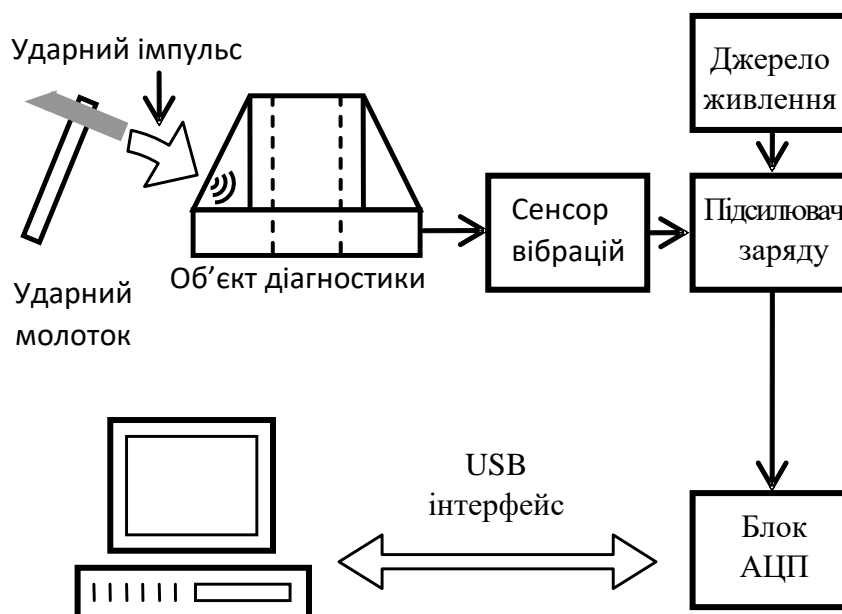


Рисунок 4.1 – Схема лабораторного зразка ІВС вібродіагностики масивних вузлів потужного ЕО

До його складу входять:

- Ударний молоток – PCB Piezotronics Modally Tuned Impulse Hammer type 083C03;
- Об'єкт діагностики – елемент конструкції, що діагностується;
- Сенсор вібрацій – Brüel & Kjær miniature triaxial piezoelectric charge accelerometer type 4326A for vibration and shock measurements on low-mass structures (мініатюрний триосьовий акселерометр з виходом по заряду для вимірювання вібрацій малогабаритних конструкцій і ударів). Цей акселерометр має три незалежних індивідуально відкаліброваних виходи для одночасних вимірювань в

трьох взаємно перпендикулярних напрямках. При проведенні експериментів, описаних в даному розділі, використовувався лише один вихід, позначений на корпусі акселерометра як «Z». Частотний діапазон вимірювань за допомогою акселерометра 4326A складає від 1 Гц до 8000 Гц;

– Підсилювач заряду – Brüel & Kjær Type 2634 two-stage charge amplifier – перетворює вихідний сигнал з виходу п'єзоелектричного сенсора вібрацій перед вимірюваннями за допомогою АЦП. Призначений для проведення вимірювань у промислових умовах;

– Джерело живлення – акумуляторна батарея напругою близько 20 В для живлення підсилювача заряду (акумуляторна батарея була використана для того, щоб уникнути завад частотою 50 Гц по колах живлення);

– Блок АЦП – National Instruments multifunction data acquisition device Type USB-6218 – дає можливість багатоканальних вимірювань з частотою до 250 кГц (відліків за секунду). Пристрій живиться по шині USB, до якої він приєднується.

При проведенні діагностики вузлів ЕО з використанням розробленого лабораторного зразка ІВС удар прикладається за допомогою спеціального ударного молотка, який комплектується набором наконечників з різною масою та твердістю. Замінюючи наконечники, можна змінювати ширину спектру ударного імпульсу. Наприклад, при проведенні експериментів, що будуть описані в наступному розділі цієї дисертаційної роботи, застосовувався найбільш твердий наконечник, що дає максимально широкий спектр ударного імпульса.

Акселерометр кріпиться до досліджуваної деталі за допомогою спеціального воску для швидкого кріплення акселерометрів виробництва фірми Brüel & Kjær.

4.3 Програмне забезпечення для визначення чисельних параметрів розподілу та гістограмного аналізу по системі кривих Пірсона

Для проведення гістограмного аналізу діагностичних сигналів, виміряних ІВС статистичної діагностики БЕА, була розроблена програма PIRSON, яка працює в середовищі Microsoft Windows.

Детальну блок-схему алгоритму роботи програми не наводимо, оскільки програма побудована за принципом обробки подій, внаслідок чого не має чіткої наперед заданої послідовності операцій. Послідовність виконання фрагментів програми (підпрограм) залежить від конкретних дій користувача.

Основне вікно програми PIRSON наведене на рис.4.1. Воно розділене на кілька смислових частин.

Зверху розташована область меню програми (рис.4.2), за допомогою якого виконуються такі функції:

- вибір файлу даних для аналізу;
- друк графіка;
- експорт графіка і таблиць в програму Microsoft Word;
- вихід з програми.

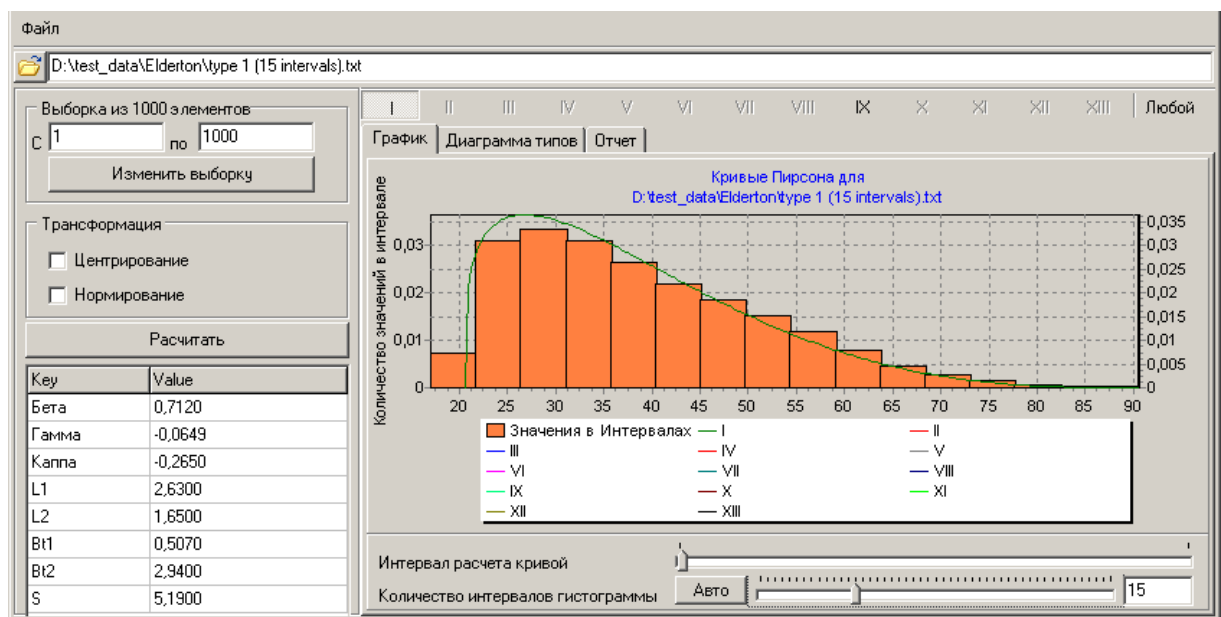


Рисунок 4.2 – Основне вікно програми PIRSON

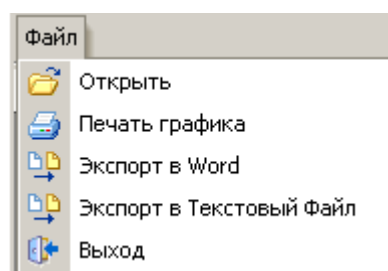


Рисунок 4.3 – Головне меню програми PIRSON

При виборі пункту меню «Открыть» з'являється стандартне для системи Microsoft Windows діалогове вікно відкриття документа. Вибрати файл з даними для аналізу можливо також за допомогою кнопки, що розташована зліва безпосередньо під областю головного меню програми. Назва вибраного файлу буде відображена в полі справа від цієї кнопки.

Вхідні дані для програми PIRSON оформляються у виді текстового файлу (у кодах ASCII).

В лівій частині вікна містяться елементи управління для вибору частини вибірки: «С (.....) по (.....)», центрування та нормування часового ряду, а також кнопка для запуску розрахунків «Рассчитать». Після натискання на неї в нижньому лівому куті вікна програми виводяться числові значення розрахованих параметрів, а в правій частині вікна – графічні або табличні результати, вибір між якими здійснюється з допомогою закладок.

Можливе відображення таких результатів:

- гістограма з накладеним на неї графіком вибраної кривої (рис.4.2);
- діаграма типів (рис.4. 4);
- звіт про результати розрахунків у текстовій формі, що містить значення всіх розрахованих параметрів, а також таблиці, за якими можна побудувати графіки в сторонній програмі (рис.4.5).

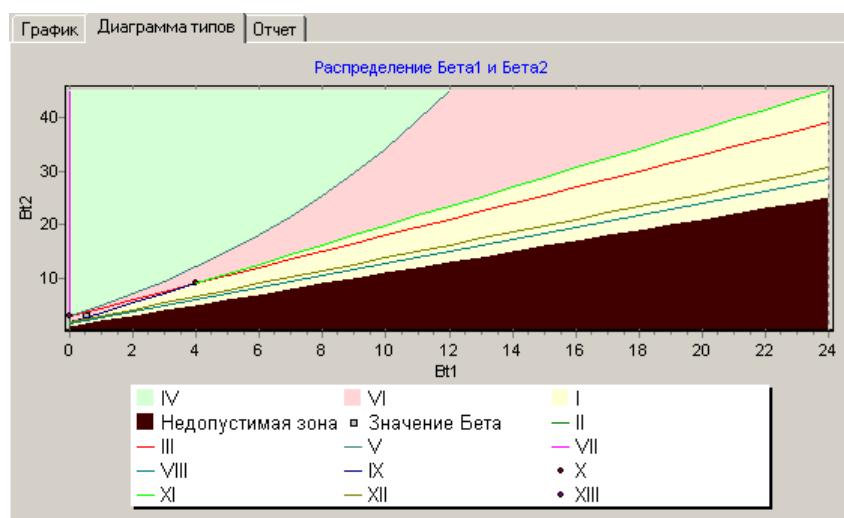


Рисунок 4.4 – Діаграма типів

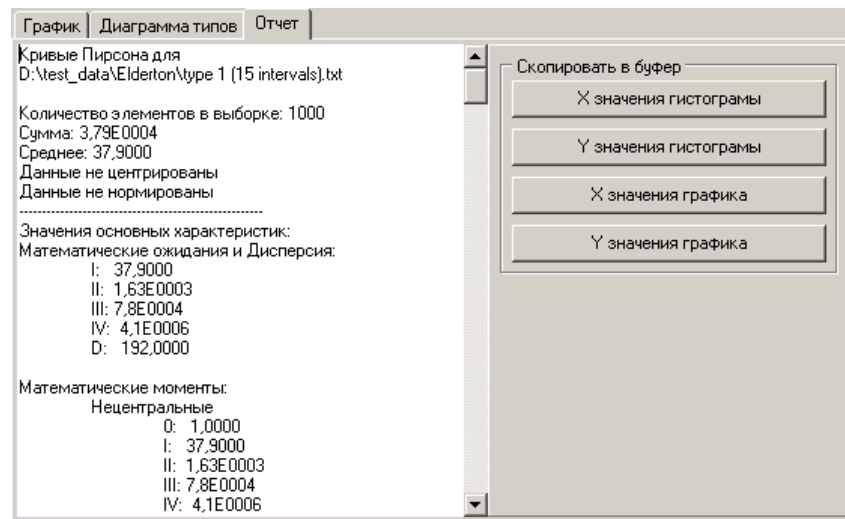


Рисунок 4.5 – Звіт про результати розрахунків
з кнопками додаткових операцій

Звіт містить наступне:

- вид гістограми: центрована, нормована чи ні;
- обсяг вибірки, кількість інтервалів у гістограмі;
- оцінки початкових моментів;
- оцінку дисперсії, середньоквадратичного відхилення, інтервал гістограми, найменше і найбільше спостереження;
- оцінки центральних моментів, коефіцієнти асиметрії й ексцесу, каппи Пірсона;
- тип згладжуючої кривої та її параметри (по можливості – більше однієї кривої);
- таблиці значень згладжуючої кривої і гістограми, відповідні графіки.

На закладці, котра відображає звіт про результати розрахунків у текстовій формі, є додаткові кнопки, що дозволяють записати в текстовий файл вибірково деякі табличні результати.

При можливості підбору кількох типів кривих Пірсона одночасно, з'являється можливість вибрати тільки ті з них, які цікавлять дослідника, приховавши при цьому графіки тих, що його не цікавлять. Для цього введені кнопки від «I» до «XIII», а також «Любой» зверху правої частини основного вікна програми. Кнопка «Любой» призначена для досвідчених користувачів, які глибоко

розуміють принципи роботи програми і теоретичні основи підбору кривих розподілу за методом Пірсона.

4.4 Програма спектрально-кореляційного аналізу вібрацій окремих вузлів

Для спектрально-кореляційного аналізу виміряних реалізацій вібраційних процесів в ППП для ІВС статистичної діагностики БЕА була включена програма SPECTR. Вона вирішує задачу обчислення авто-кореляційної функції і спектра потужності досліджуваного сигналу.

Програма працює у відповідності з наступним узагальненим алгоритмом:

- знаходиться оцінка математичного сподівання часового ряду;
- здійснюється центрування ряду;
- знаходяться оцінки авто-кореляційної функції;
- знаходяться оцінки нормованої авто-кореляційної функції (нормування за дисперсією);
- для оцінок нормованих кореляційних функцій гаусових часових рядів здійснюється перевірка гіпотези про «нуль-кореляцію»;
- за допомогою перетворення Фур'є знаходиться оцінка спектральної щільності досліджуваного процесу.

Часовий ряд, що аналізується, програма зчитує з файлу вхідних даних. Числові результати виконання програми записуються у файл, графіки спектрів виводяться на екран монітора.

Основне вікно програми SPECTR одразу після запуску програми порожнє. Воно містить лише головне меню програми, що складається з пунктів «Файл» та «Параметри».

Після вибору елемента меню «Файл -> Відкрити», відкривається вікно вибору файлу даних для аналізу (рис.4.3).

Коли файл вибрано, на наступному кроці користувач задає параметри формату файлу: розділювач даних, десятковий знак, чи є в файлі заголовки колонок.

Коли всі параметри задані вірно, слід натиснути кнопку «ОК», після цього з'явиться нове вікно, в якому можна задати крок або частоту дискретизації та параметри відображення спектру (рис.4.3).

Після натискання на кнопку «ОК» буде відображено графік спектра потужності досліджуваного сигналу (рис.4.4), а також автоматично буде створено текстові файли з таблицями даних по кореляційній функції та спектру потужності.

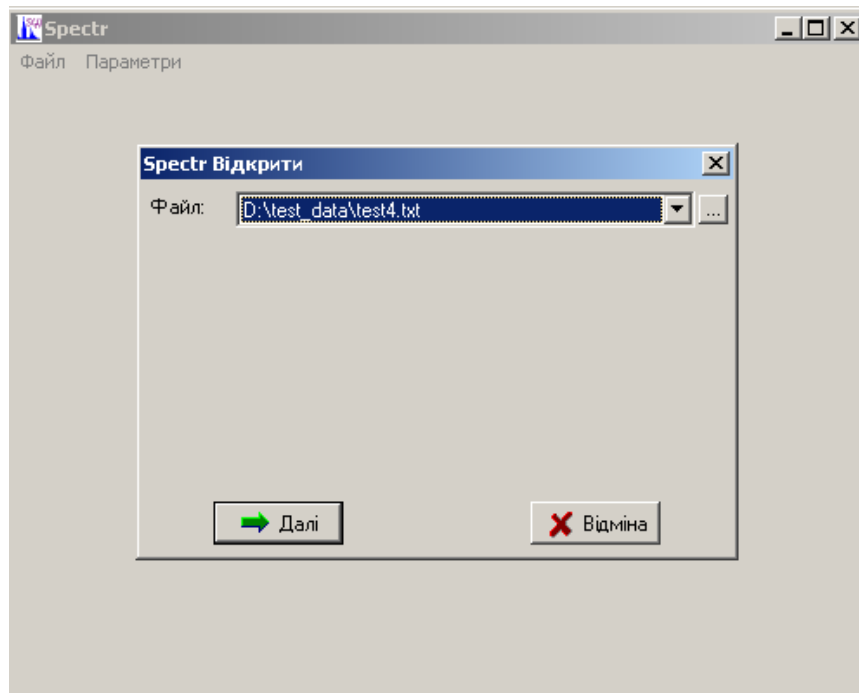


Рисунок 4.6 – Вікно вибору файлу даних

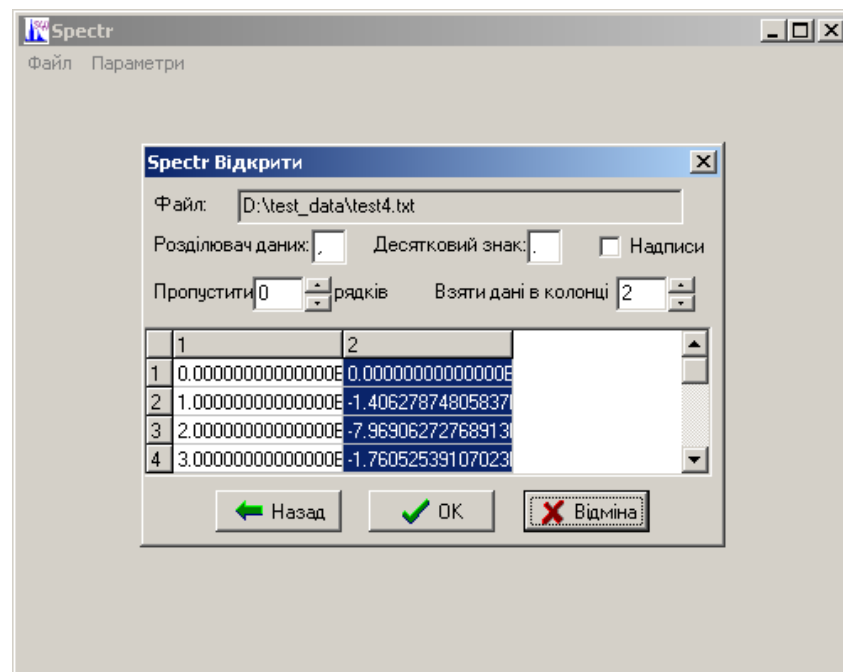


Рисунок 4.7 – Вікно вибору форматування файлу даних

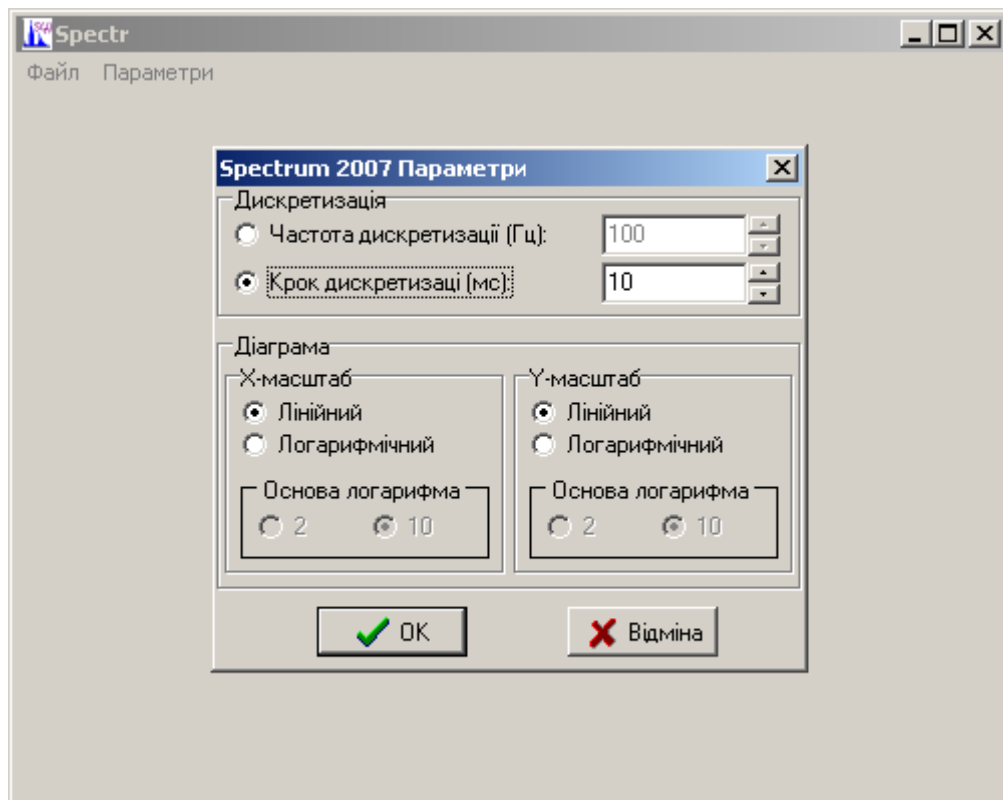


Рисунок 4.8 – Вікно вибору параметрів відображення спектру

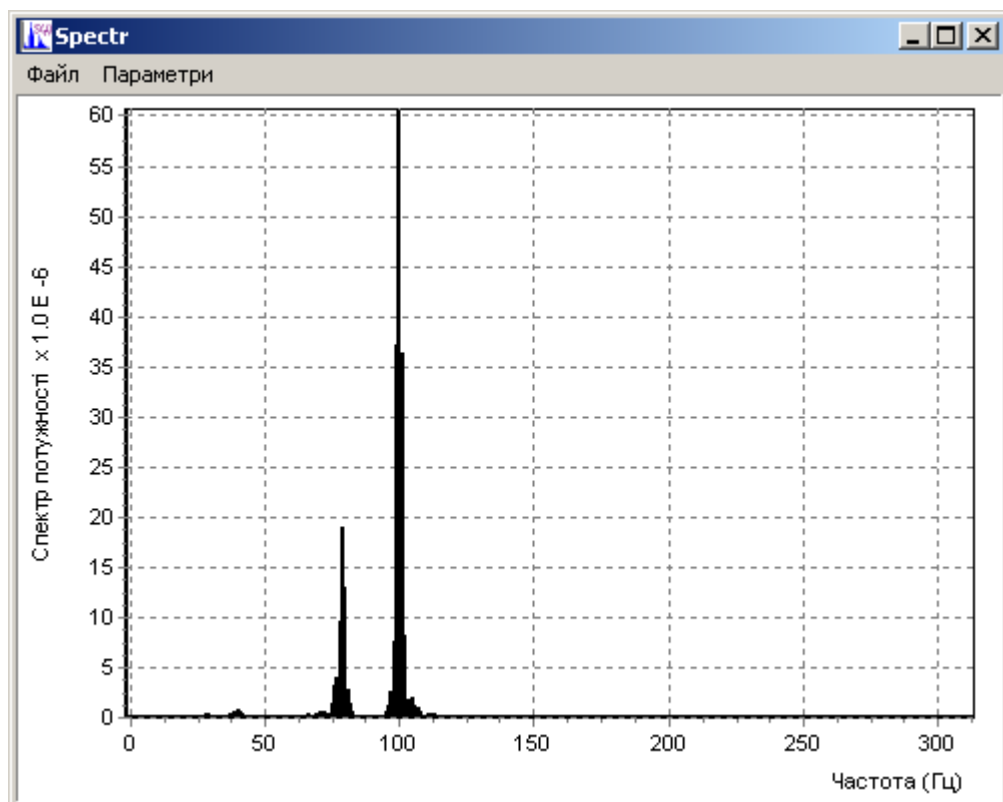


Рисунок 4.9 – Графік спектру потужності

Детальна блок-схема алгоритму роботи програми не наводиться, оскільки програма побудована за принципом обробки подій, внаслідок чого не має наперед заданої чіткої послідовності операторів.

4.5 Визначення ступеня пресування шихтованих магнітопроводів за допомогою ІВС ударної діагностики

Під час роботи електротехнічного обладнання, яке містить в своєму складі шихтований магнітопровід (трансформатори, турбогенератори та інше), відбувається поступове ослаблення пресування активної сталі в магнітопроводі. Цей процес супроводжуються підвищенням вібрацій, а також нагрівом магнітопроводу і обмоток, що може привести до серйозних неполадок і в подальшому до аварійного виходу з ладу всього трансформатора.

Тому було проведено серію експериментів по вимірюванню вібрацій шихтованих магнітопроводів з використанням розробленого лабораторного зразка системи ударної вібродіагностики. Використовувався макет шихтованого магнітопровода, що являє собою набірний пакет листів магнітної сталі, яка використовується в магнітопроводах сухих трансформаторів малої та середньої потужності. За допомогою двох шпильок, виготовлених з немагнітного матеріалу, можна регулювати ступінь пресування пластин, моделюючи таким чином різні технічні стани магнітопроводу.

Результати проведених експериментів по діагностиці ступеня пресування шихтованого магнітопроводу наведені нижче.

Пресування пластин магнітопроводу здійснювалася за допомогою шпильок, затяжка яких проводилася динамометричним ключем з моментом 30 Н·м. Вібраційна хвиля, що збуджувалася ударним молотком в тілі шихтованого магнітопроводу, вимірювалася за допомогою акселерометра типу АВС-017, який встановлювався на досліджуваному магнітопроводі з допомогою спеціального воску.

Експеримент по діагностуванню стану пресування пластин магнітопровода здійснювався наступним чином. З допомогою зажимних гайок, встановлених на

шпильках, з силою 30 Н·м стискався пакет пластин магнітопроводу. Потім включався і наструювався лабораторний зразок ІВС ударної діагностики. Після настройки макету в напрямку, перпендикулярному до площини пластин, проводився удар, який викликав вібрації магнітопроводу. Замір вібраційного сигналу здійснювався акселерометром, закріпленим на протилежному торці магнітопроводу.

Після цього повністю відпускалися гайки шпильок, якими були стягнуті пластини шихтованого магнітопроводу, і повторявся експеримент, аналогічний описаному. На рис.4.10 представлені спектрограми, виміряні на шихтованому магнітопроводі, затиснутому з силою 30 Н·м (рис.4.10, а), і в випадку, коли затискаючі гайки повністю ослаблені (рис.4.10, б) [35].

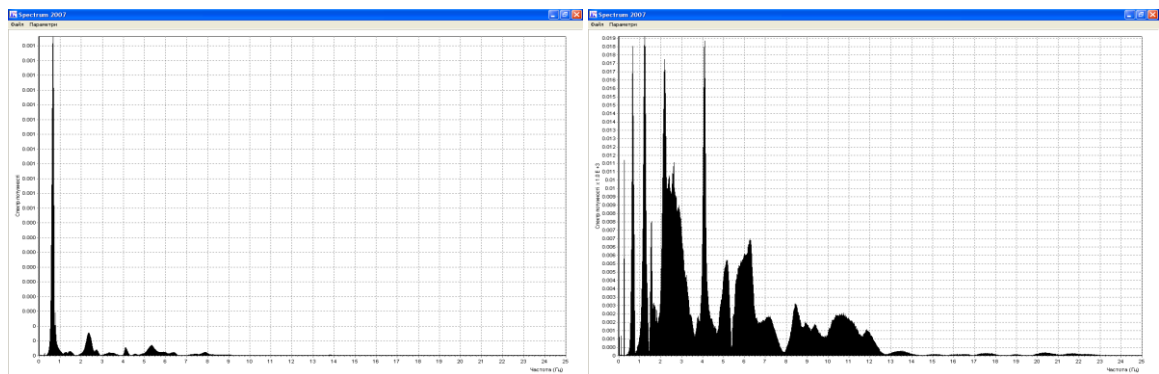


Рисунок 4.10 – Спектрограми, виміряні на шихтованому магнітопроводі:
а) затиснутий магнітопровід; б) ослаблений магнітопровід

Частота дискретизації складала 50 кГц, тобто представлені на рис. 4.10 спектрограми містять інформацію про частоти аналізованого сигналу в полосі з верхньою граничною частотою 25 кГц.

Із рис. 4.10, а видно, що для затиснутого магнітопроводу основна частота вібрацій спостерігається в області 600 Гц. Відмічені також менш інтенсивні складові в області 2300 і 5400 Гц.

При знятті стягуючого зусилля в спектрограмі вібрацій шихтованого магнітопроводу крім основної частоти в області 600 Гц відмічені численні інтенсивні частотні складові в смузі частот аж до 15 кГц.

Таким чином, це підтверджує теоретичні припущення, що в якості однієї з діагностичних ознак стану пресування шихтованого магнітопроводу можуть бути використані амплітуди і частоти основних максимумів, а також число основних частотних максимумів в фіксованій полосі частот. Розглянемо тепер побудову навчальних сукупностей і вирішуючих правил по діагностиці стану пресування шихтованих магнітопроводів.

Як відомо [40], задача статистичної діагностики включає в себе наступні основні елементи:

- джерело діагностичної інформації;
- попередню статистичну обробку;
- вибір простору дослідження;
- побудова вирішуючих правил.

Джерело діагностичної інформації створює деякий процес, який залежить від діагностичних параметрів, кожен з яких представляє собою вектор або скаляр. В найпростішому випадку розглядається тільки один параметр, який може приймати два різних значення. Кожному з цих значень відповідає одна гіпотеза: основна H_0 і конкуруюча H_1 .

Попередня статистична обробка будується таким чином, ніби вже відомо, яка гіпотеза є істинною. Базуючись на такій апіорній інформації, отримуємо певну точку в просторі спостереження. Вважається, що при проведенні обробки вноситься деяка незалежна від гіпотез адаптивна випадкова компонента. Вона спотворює значення діагностичного параметра, тому з кожним гіпотетичним значенням параметра пов'язується ймовірнісний закон розподілу, який однозначно відповідає кожній зі згаданих гіпотез.

Простір спостережень включає в себе всі можливі значення вимірюваних параметрів, які вони можуть приймати в процесі експерименту. В результаті дії перешкод в просторі спостереження множини точок, які відповідають різним гіпотезам, перетинаються. В зв'язку з цим необхідно здійснити розбиття простору спостережень на підмножини спостереження – образи, які відповідають кожній із гіпотез – котрі не перетинаються.

Кінцевим етапом при проведенні діагностики є побудова вирішуючого правила. Це правило будується з урахуванням навчальних сукупностей і являє собою оптимальне розбиття певним чином перетвореного простору спостереження на підмножини, котрі не перетинаються.

Навчальні сукупності являють собою множини тих значень параметрів, які відповідають умовно придатному стану діагностованого вузла чи його стану, зв'язаному з наявністю одного із діагностованих дефектів.

Пояснимо на прикладі спектрограм, представлених на рис.4.10, яким чином відбувається формування навчальних сукупностей за результатами спектрального аналізу. При збудженні ударним молотком шихтованого магнітопроводу, затисненого з силою 30 Н·м, на спектрограмі його вібрацій можна виділити три основних максимуми частоти: в областях 600, 2300 і 5400 Гц. При знятті стискаючого зусилля крім основних максимумів у спектрограмі з'являються інтенсивні частотні складові у смузі частот до 15 кГц. Зупинимося на цих результатах спектрального аналізу, в якості діагностичного параметра виберемо число основних максимумів спектрограми у фіксованій смузі частот. Кількість максимумів спектрограми, які будуть враховуватися при формуванні навчальних сукупностей, будемо визначати на рівні 0,5 від максимального значення. Виходячи з вибраного діагностичного параметра, формування методичних сукупностей здійснимо в одновимірному діагностичному просторі \mathcal{S} .

Із рис. 4.10, а видно, що на рівні 0,5 відмічається один максимум спектрограми, який відповідає вібраціям магнітопроводу, спресованого з силою 30 Н·м. В той же час на спектрограмі рис.4.10, б, що відповідає вібраціям магнітопроводу, у якого стискаюче зусилля відсутнє, на рівні 0,5 відмічається уже 7 максимумів.

Рівень 0,5, по якому фіксується кількість максимумів спектрограм, вибраний довільно для простоти підрахунку цих максимумів. Аналіз кожної із спектрограм дає у вибраному діагностичному просторі по одній точці, яка відповідає різному ступеню пресування шихтованого магнітопроводу.

Для побудови навчальних сукупностей в діагностичному просторі ϑ було проведено 164 експерименти по дослідженню вібрацій шихтованого магнітопроводу, стиснутого з зусиллям 30 Н·м, а потім ще 166 експериментів на магнітопроводі зі знятим стягуючим зусиллям. На рис.4.11 наведені навчальні сукупності у вигляді полігонів частот числа максимумів ϑ , побудованих за результатами аналізу спектрограм цих вібрацій.

На рис.4.12 показані криві, згладжуючі гістограми усередненого числа ϑ максимумів спектрограм вібрацій шихтованого магнітопроводу за системою кривих Пірсона. Видно, що розподіли числа ϑ , які відповідають різним зусиллям пресування шихтованого магнітопроводу, зміщені відносно один одного і мають різні математичні сподівання: $\Theta_1=4,47$ і $\Theta_2=8,78$.

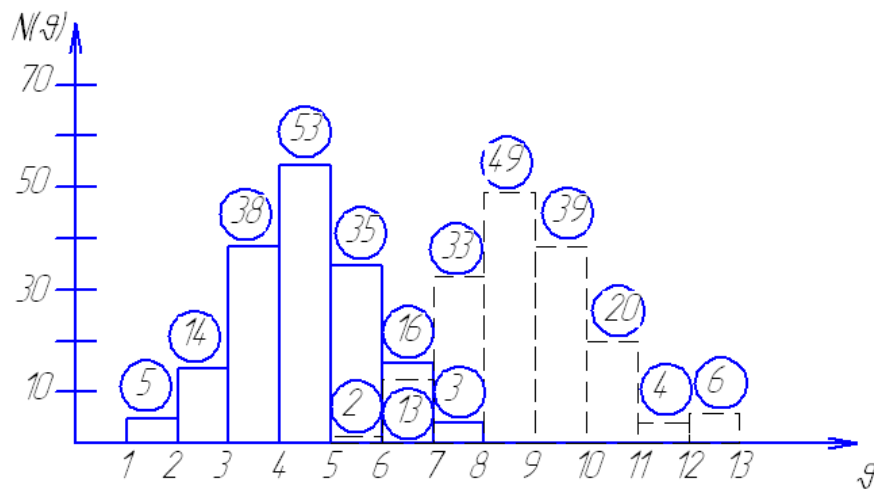


Рисунок 4.11 – Навчальні сукупності

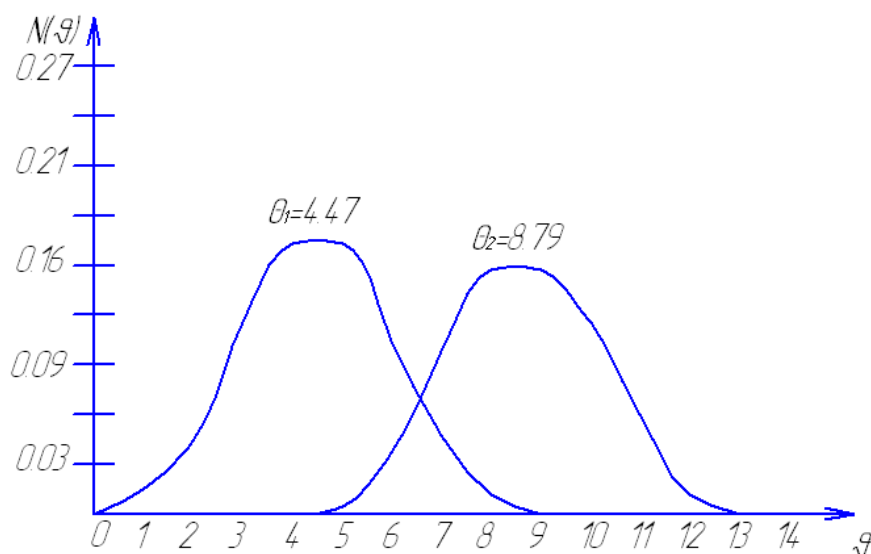


Рисунок 4.12 – Криві, згладжуючі гістограми

Сформувавши навчальні сукупності, перейдемо безпосередньо до побудови вирішуючих правил по діагностиці стану пресування шихтованих магнітопроводів.

Представлені на рис. 4.12 згладжуючі криві відносяться до четвертого типу кривих із системи Пірсона, тобто можуть бути апроксимовані нормальним законом розподілу. Отже, для побудови вирішуючих правил при діагностиці ступеня пресування шихтованого магнітопроводу можна використовувати класичну двоальтернативну процедуру перевірки статистичних гіпотез по Нейману-Пірсону, яка для нормального розподілу описується відносно простими математичними виразами.

Таким чином, для діагностики ступеня пресування шихтованого магнітопроводу побудуємо двоальтернативне рішення правило, яке зводиться до перевірки гіпотез $H_0: \Theta_1=4.47$ (магнітопровід спресований з силою 30 Н·м) проти $H_1: \Theta_2=8.78$ (стягуюче зусилля відсутнє).

Задавшись ймовірностями похибок першого і другого роду $\alpha=0,05$ і $\beta=0,01$ і знайшовши для них за таблицями стандартного нормального розподілу відповідні квантілі $u_{1-\alpha}=-1.645$ і $u_{1-\beta}=-2,326$, визначимо необхідне число спостережень n і величину порогу C . Скористаємося для цього наступними виразами:

Необхідне число спостережень з урахуванням $u_{1-\alpha}=-u_\alpha$, $u_{1-\beta}=-u_\beta$,

$$n = \frac{(u_\alpha + u_\beta)^2 \sigma^2}{(\Theta_1 - \Theta_2)^2} = \frac{15,769 \cdot 4.36}{(4,31)^2} = \frac{68,75}{18,58} = 3,7 \approx 4$$

де σ – найбільше значення дисперсії серед розподілів, криві яких наведені на рис.4.12. Для розглядуваної задачі $\sigma = 2,09$.

Величина порогу:

$$C = \frac{(\Theta_1 - \Theta_2)(u_\alpha - u_\beta)^2 \sigma^2}{2(u_\alpha + u_\beta)} + \frac{1}{2}(\Theta_1 + \Theta_2) = \frac{2,935}{7,942} + 6,625 = 6,255.$$

Отримавши в результаті проведеного планування експерименту всі потрібні дані для побудови вирішуючих правил, здійснимо діагностування ступеня пресування шихтованих магнітопроводів. Для перевірки методики було проведено п'ять серій експериментів. У кожному випробуванні було виміряно по чотири

вибірки, які містять вібрації шихтованого магнітопроводу. Значення кількості максимумів спектрограм цих вібрацій на рівні 0,5 наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Отримані значення за параметрами спостереження

Параметр спостереження	Номер серії експериментів				
	1	2	3	4	5
	Магнітопровід, спресований з силою 30 Н·м				
ϑ_1	3	5	4	3	5
ϑ_2	1	3	4	4	6
ϑ_3	1	5	3	3	4
ϑ_4	2	5	4	2	4
$\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \xi_j$	1,75	4,5	3,75	3	4,75
Магнітопровід без стягуючого зусилля					
ϑ_1	8	11	6	9	7
ϑ_2	6	8	7	10	9
ϑ_3	7	9	8	10	8
ϑ_4	6	8	7	11	9
$\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \xi_j$	6,75	9	7	10	8,25

Отже, з розглянутого прикладу випливає, що число максимумів спектрограм вібрацій шихтованого магнітопроводу може використовуватися в якості діагностичного параметра для визначення ступеня його пресування.

Таким чином, на основі отриманих результатів приймається гіпотеза H_1 – досліджуваний магнітопровід спресований із зусиллям 30 Н·м. Після цього було знято стягуюче зусилля і знову проведені експерименти по вимірюванню і обробці вібрацій, викликаних ударною дією. Оцінка значення параметрів ϑ вібрацій наведена в таблиці. Після підстановки даних із таблиці ліва частина для 1-ї – 5-ї серії приймає значення, рівні 6,75; 9; 7; 10; 8,25, тобто, для всіх п'яти випадків ліва

частина нерівності більша правої, тому приймається гіпотеза H_1 – в магнітопроводах відсутня стягуюча сила.

Отже, з розглянутого прикладу випливає, що число максимумів спектрограм вібрацій шихтованого магнітопроводу може використовуватися в якості діагностичного параметра для визначення ступеня його пресування.

4.6 Сумісний вплив комутаційних та вібраційних збурень

Слід зазначити, що одночасне виявлення дефектів між листової ізоляції та послаблення пресування пакету є складною задачею. Послаблення пресування збільшує відстань між листами магнітопроводу і зменшує поверхню дотику між листами пакету. Однак в експлуатаційному режимі внаслідок вібраційних сил дотик буде супроводжуватися пропорційно частоті перемагнічування (наприклад 50 Hz) і вихрові струми будуть проявлятися при роботі машини, хоча вони не будуть виявлені тестовими методами діагностики в розібраному стані машини.

Тому виникає необхідність сумістити два методи тестової діагностики: ударної і діагностики з використанням індукційних методів (рис. 4.13).

Для того, щоб сумістити два методи була розроблена установка яка дозволяє одночасно перевіряти якість пресування і якість міжлистової ізоляції. Приведений спектр механічних коливань показує, що найбільш інформативні частини знаходяться в діапазоні 500-700 Hz. Необхідно, щоб ініційований електромагнітний процес комутації струму в області збудження був синхронізований з початком механічного впливу.

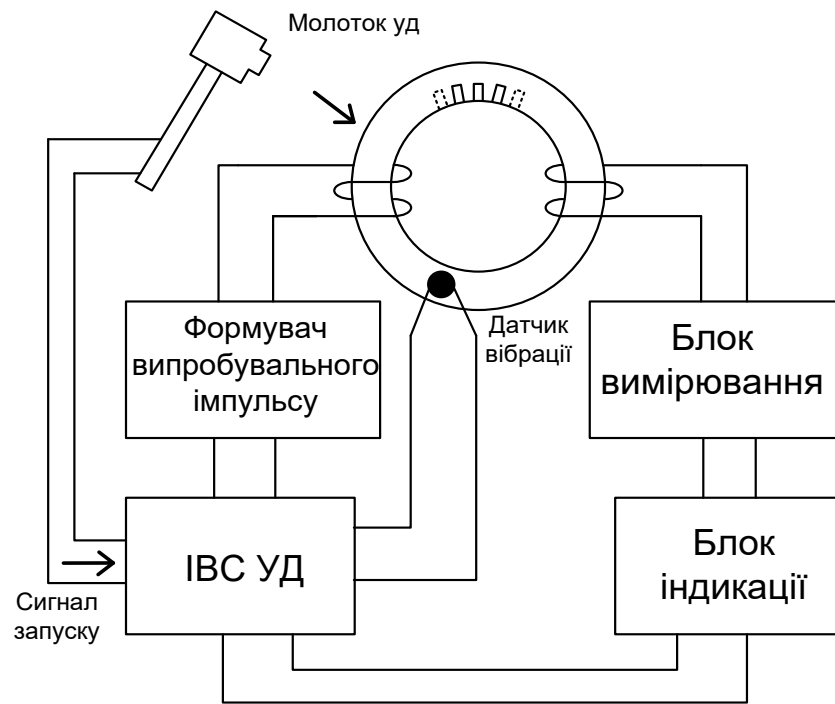


Рисунок 4.13 – Функціональна схема системи сумісної діагностики якості між листової ізоляції та ступеню пресування магнітопроводу

4.7 Розрахунок перехідного процесу.

Математична модель перехідного процесу при відключення струму.

Діюче значення ЕРС, що наводиться в контурі

$$E_x = \pi\sqrt{2}fBq_x = 2\pi\sqrt{2}fB\frac{h}{b}x^2, \quad (4.1)$$

Струм в контурі на одиницю довжини листа

$$\Delta i_x = jx\Delta x \cdot 1 = \frac{e_x}{\Delta r_x} = 2\pi\sqrt{2}fB\gamma_{cm}\Delta x = k_i x\Delta x, \quad (4.2)$$

де $k_i = 2\sqrt{2}\pi f$;

γ_{cm} – питома електропровідність сталі сердечника.

Магнітна напруженість і індукція:

$$H_x = \int_0^x dx_i = k_i \frac{x^2}{2} + C, \quad (4.3)$$

$$B_x = k_i \mu \left(\frac{b^2}{2} - \frac{x^2}{2} \right), \quad (4.4)$$

Створене вторинне магнітне поле при гармонічному зовнішньому полі, зсунуте по фазі на 90^0 , у порівнянні слабо впливає на сумарне поле, але створює свої ЕРС і струми.

$$e_{2x} = \pi\sqrt{2}f\Phi_{2x}, \quad (4.5)$$

$$i_{2x} = j_{2x}\Delta x = \frac{e_{2x}}{\Delta r_x} = k_i\mu \frac{h}{b} \left(\frac{b^2x^2}{4} - \frac{x^3}{8} \right), \quad (4.6)$$

Магнітний потік в елементарному контурі

$$\Phi_{2x} = \int_0^x d\Phi_x = k_i\mu \frac{h}{b} \left(\frac{b^2x^2}{4} - \frac{x^4}{8} \right), \quad (4.7)$$

ЕРС і магнітна напруженість елементарного контуру

$$e_{2x} = \pi\sqrt{2}fk_i\mu \frac{h}{b} \left(\frac{b^2x^2}{4} - \frac{x^2}{8} \right), \quad (4.8)$$

$$H_{2x} = \int_0^x j_{2x}dx = k_i^2\mu \left(\frac{b^2x^2}{8} - \frac{x^4}{32} \right) + C, \quad (4.9)$$

Сумарна індукція

$$B_\Sigma = B_0 - k_i^2\mu^2 \left(\frac{3b^4}{32} - \frac{b^2x^2}{8} - \frac{x^2}{32} \right), \quad (4.10)$$

Загальний вираз вихідного поля можна показати у вигляді гармонічного ряду

$$H = \sum_{k=1} H_{km} \sin(k\omega t + \psi), \quad (4.11)$$

Приведення рішення до гармонічного ряду.

Комутація струму в обмотці збудження вважається миттєвою. Магнітна проникність вважається постійною.

$$\text{rot rot} B = -\mu\gamma \frac{dB}{dt}, \quad (4.12)$$

Для прямокутного перерізу

$$\frac{d^2B}{dt^2} + \frac{d^2B}{dy^2} = \mu\gamma \frac{dB}{dt}, \quad (4.13)$$

При відключенні від джерела виникає перехідний процес. Так як по міркуванню симетрії залежність магнітної індукції в напрямку осей x і y повинні бути чіткою функцією, можна припустити, що розв'язок має вид:

$$B = B_0 \cos \alpha x \cos \beta y \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (4.14)$$

де T – постійна часу.

Після підстановки (12) в (11) отримаємо умову, якою зв'язані до цих пір незалежні величини α , β і T

$$\alpha^2 + \beta^2 = \frac{\mu\gamma}{\tau}, \quad (4.15)$$

Після відключення кола магнітна індукція на межі перерізу сердечника миттєво зменшується до 0. Тому для $t = 0$, $x = \pm \frac{a}{2}$, $y = \frac{b}{2}$ отримаємо

$$B_0 \cos \alpha \frac{a}{2} \cos \beta \frac{b}{2} = 0, \quad (4.16)$$

Тоді з (13) для постійної часу отримаємо вираз

$$t_{n,m} = \frac{\mu\gamma}{\left(\frac{2n+1}{a}\pi\right)^2 \left(\frac{2m+1}{b}\pi\right)^2}, \quad (4.17)$$

Повний розв'язок визначається бігармонічним рядом

$$B = \sum_n \sum_m B_{n,m} \cos(2n+1) \frac{\pi x}{a} \cos(2m+1) \frac{\pi y}{b} e^{-\frac{t}{t_{n,m}}}, \quad (4.18)$$

При цьому кожна гармоніка має свою власну амплітуду $B_{n,m}$. Амплітуди можна визначити з початкових умов до комутації.

Це був усталений режим, що відповідає функції яка має одиничне значення в інтервалі $|x| < a$, $|y| < b$ з відомим розташуванням в ряді Фур'є.

Дані для розрахунку магнітопрвід 4A100L6Y3 і 4A71B4Y3 – поперечний переріз 1320 мм² і 825 мм², довжина середньої магнітної лінії 493,2 мм і 329,8 мм, сталь 2013.

$$\begin{aligned}
f(x, y) &= \frac{16}{\pi^2} \left(\cos \frac{\pi}{2a} x - \frac{1}{3} \cos \frac{3\pi}{2a} x + \frac{1}{5} \cos \frac{5\pi}{2a} x - \dots \right) \\
&\quad \times \left(\cos \frac{\pi}{2b} y - \frac{1}{3} \cos \frac{3\pi}{2b} y + \frac{1}{5} \cos \frac{5\pi}{2b} y - \dots \right) = \\
&= \frac{16}{\pi^2} \sum_{p,r} \left(\frac{(-1)^p}{2p-1} \frac{(-1)^r}{2r-1} \cos \frac{(2p-1)\pi}{2a} x \cos \frac{(2r-1)\pi}{2b} y \right) = 1.
\end{aligned} \tag{4.19}$$

Переходимо до закону затухання магнітного потоку в магнітопроводі.

Значення потоку визначається як інтеграл магнітної індукції по всьому перерізу стержня

$$\Phi = 4\mu \mu_0 \int_0^a \int_0^b H dx dy, \tag{4.20}$$

В даній задачі цікавить відношення магнітного потоку до потоку в усталеному режимі (Φ_0), очевидно, що останній

$$\Phi_0 = 4\mu \mu_0 a b H_0, \tag{4.21}$$

Підставляючи знайдені значення H в (4.14) і виконавши інтегрування отримаємо:

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{64}{\pi^4} \sum_{p,r} \frac{1}{(2p-1)^2 (2r-1)^2} \exp \left[-\pi^2 \frac{(2p-1)^2/a^2 + (2r-1)^2/b^2}{4\mu \mu_0 \gamma} t \right] \tag{4.22}$$

В останній рівності знак подвійної суми показує, що сумування відбувається по всім значенням $p = 1, 2, 3 \dots$ для $r = 1$, потім для $r = 2, r = 3$ і так далі. p і r – члени ряду Фур'є.

При $t=0$ показникова функція перетворюється в одиницю. При цьому

$$\sum_{p,r} \frac{1}{(2p-1)^2 (2r-1)^2} = \frac{\pi^4}{64}, \tag{4.23}$$

відповідно $\frac{\Phi}{\Phi_0} = 1$ при $t=0$.

Вводимо нові величини

$$k = \frac{b}{a}, \quad \theta = \frac{\pi^2 t}{4b^2 \sigma \mu \mu_0}, \tag{4.24}$$

Закон зменшення магнітного потоку

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{64}{\pi^4} \sum_{p,r} \frac{\exp\{ -[(-2p-1)^2 k^2 + (2r-1)^2] \theta \}}{(2p-1)^2 (2r-1)^2}, \quad (4.25)$$

Таблиці 6.1 – Результати обчислення.

Магнітопровід	Усталений магнітний потік (відносне значення)	Максимальна ЕРС (відносне значення)	Усереднена постійна часу загасання потоку, мкс	Усереднена постійна часу загасання ЕРС, мкс
4A100L6У3	1,0	1,0	130	44
4A71В4У3	1,0	1,0	180	73

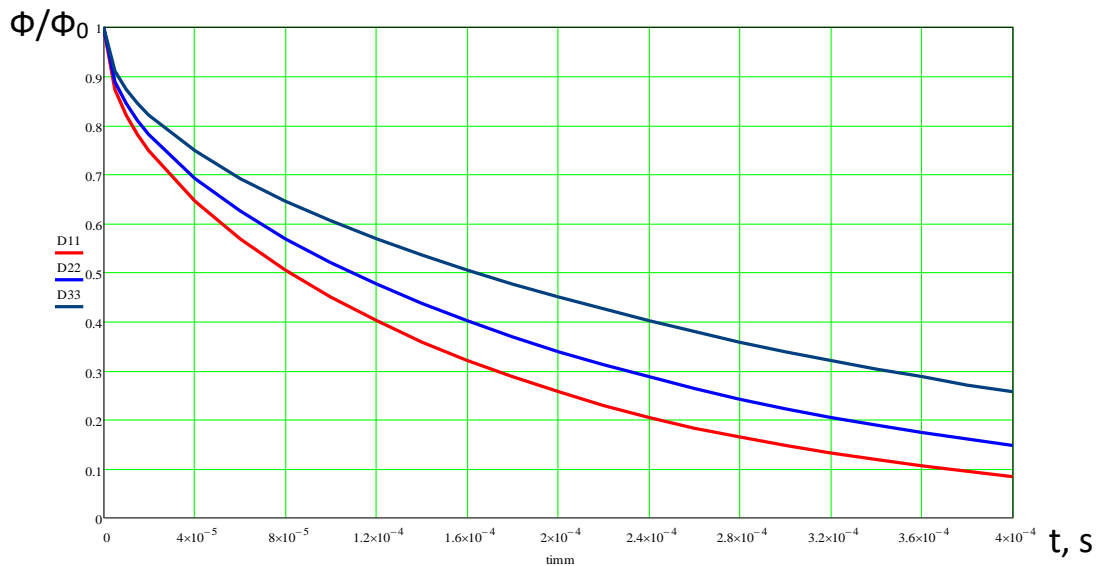


Рисунок 4.14 – Розраховані криві згасання магнітного потоку для осердь: червона крива – нормальний магнітопровід, синя – дефектний, чорна – аварійний

В програмному пакеті COMSOL Multiphysics було проведено розрахунок для визначення розподілу електромагнітної індукції (рис. 4.15) і вихрових струмів (рис. 4.16) в спинці магнітопроводу статора асинхронної машини при використанні методу знаходження питомих втрат в осерді.

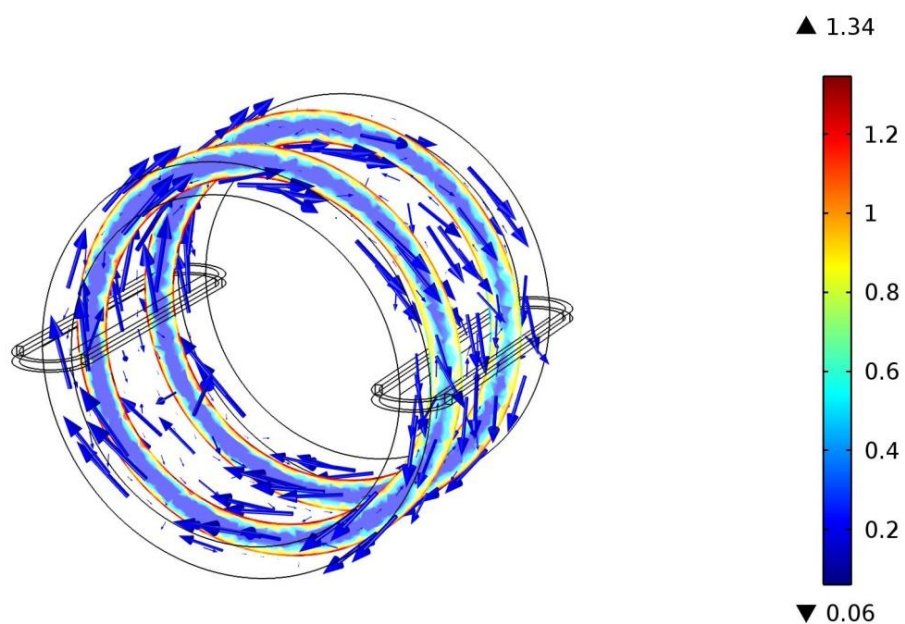


Рисунок 4.15 – Розподіл магнітної індукції в спинці

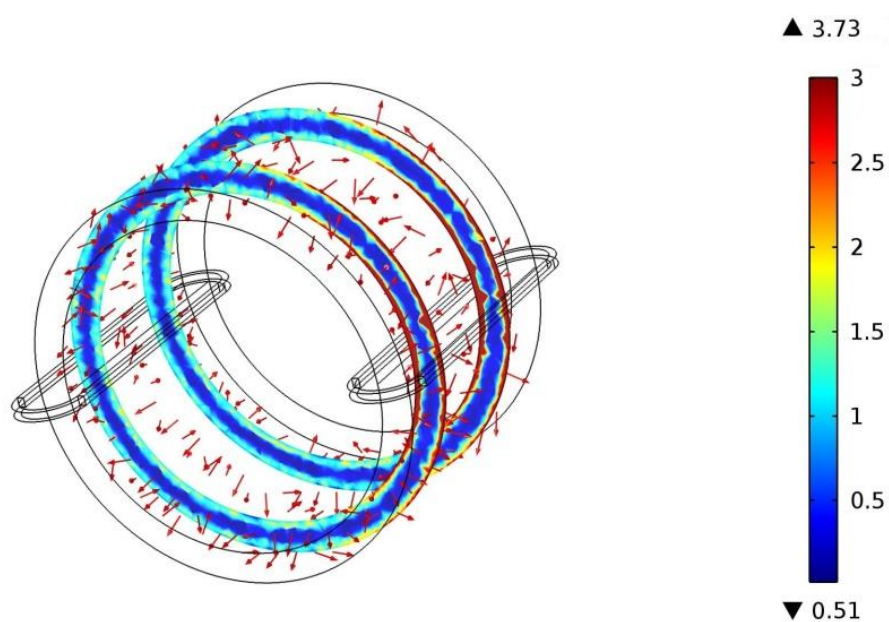


Рисунок 4.16 – Розподіл вихрових струмів в спинці

Для моделі магнітопровід задавався масивним. З рисунку видно вплив ефекту витіснення на вихрові струми.

Було знято спектрограми вібрацій та осцилограми затухання ЕРС для якісного і не якісного магнітопроводу.

4.8 Експериментальні дані

Дані зняті за допомогою ІВС УД та електронного осцилографа.

Нижче приведені експериментальні криві затухання ЕРС у вимірювальній обмотці та спектрограми вібрацій для таких магнітопроводів: **1**- з хорошою міжлистовою ізоляцією та хорошим пресуванням з ударним та без ударного впливу; **2**- з пошкодженою міжлистовою ізоляцією та поганим пресуванням без ударного впливу; **3** - з пошкодженою міжлистовою ізоляцією та поганим пресуванням з ударним впливом; **4** - з пошкодженою міжлистовою ізоляцією та хорошим пресуванням без ударного впливу; **5** - з пошкодженою міжлистовою ізоляцією та хорошим пресуванням з ударним впливом; **6** - з погіршеною міжлистовою ізоляцією та погіршеним пресуванням без ударного впливу; **7** - з погіршеною міжлистовою ізоляцією та погіршеним пресуванням з ударним впливом.

1) Для магнітопроводу з хорошою міжлистовою ізоляцією та хорошим пресуванням з ударним та без ударного впливу.

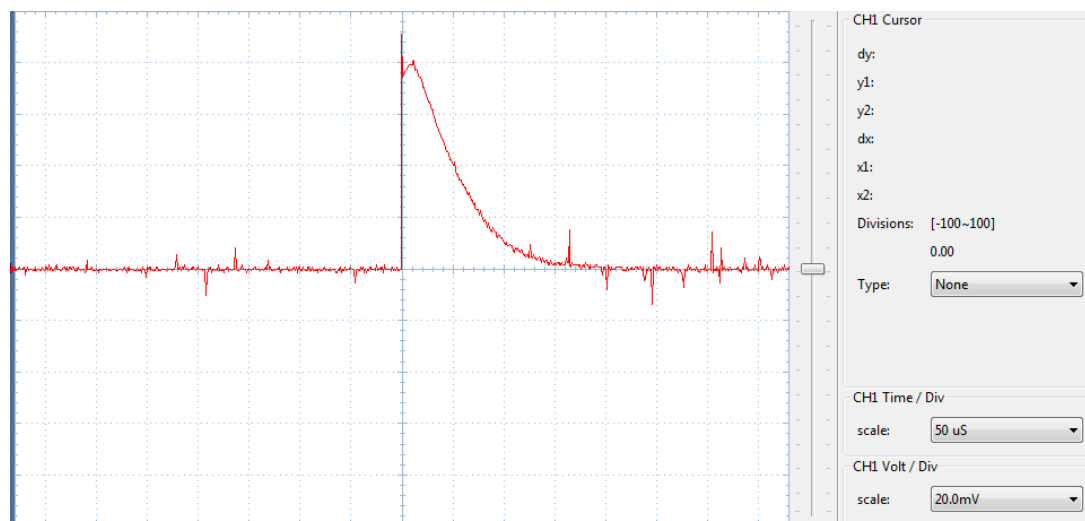


Рисунок 4.17 – Експериментальна крива затухання ЕРС у вимірювальній обмотці

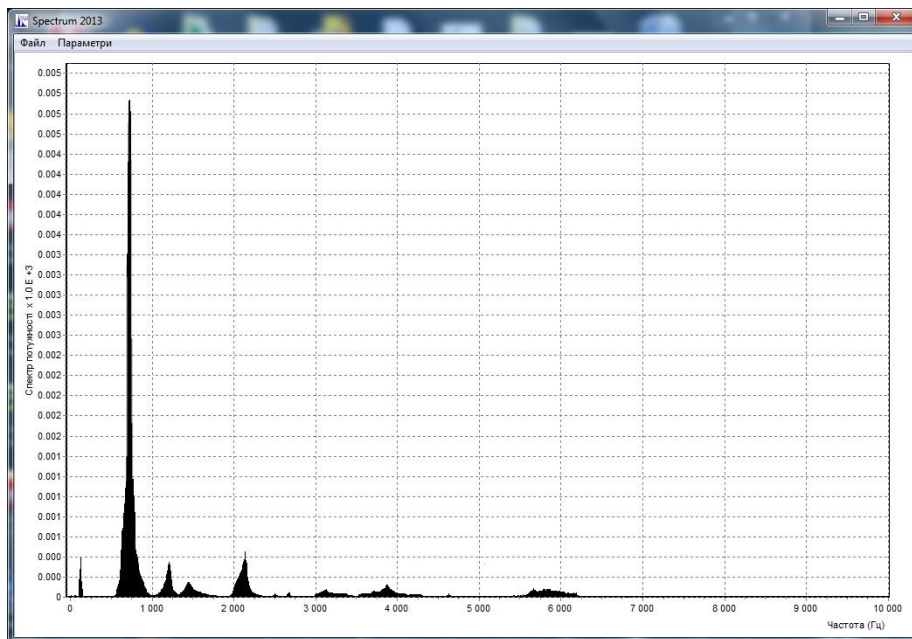


Рисунок 4.18 – Спектрограма вібрацій виміряна на магнітопроводі

З рисунку 4.17 і 4.18 видно, що в даному магнітопроводі при ударному і комутаційному впливі не виявлено порушення ізоляції та послаблення пресування пакету.

2) Для магнітопроводу з пошкодженою міжлистовою ізоляцією та поганим пресуванням без ударного впливу.

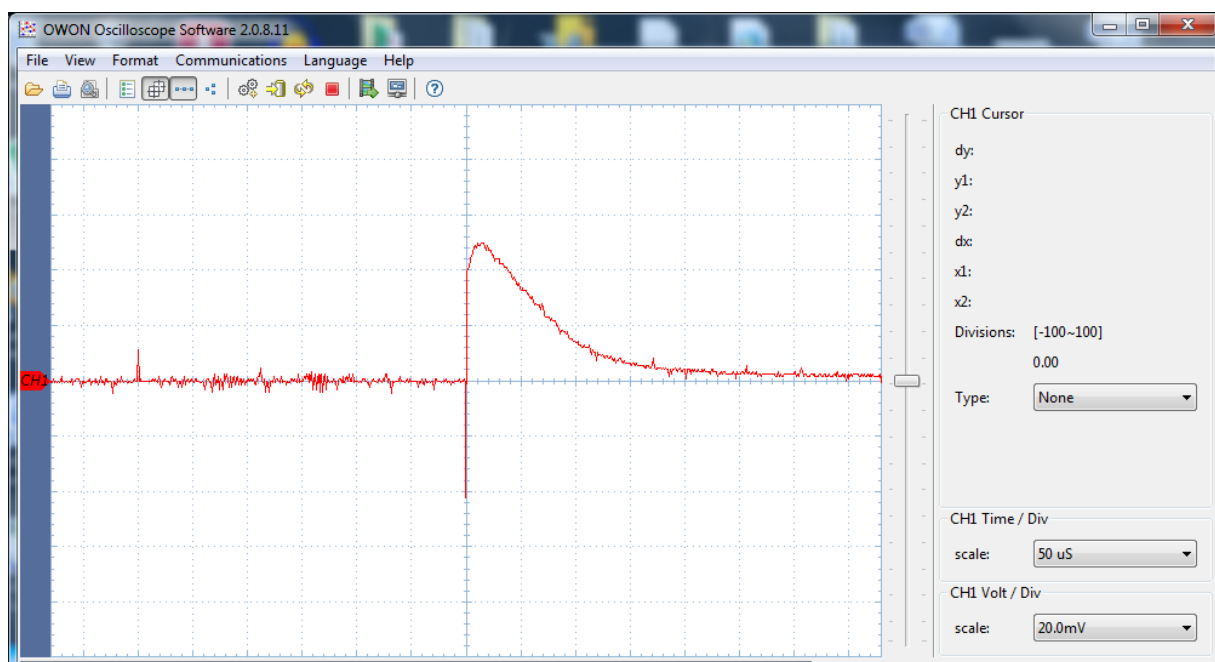


Рисунок 4.19 – Експериментальна крива затухання ЕРС у вимірювальній обмотці

3) Для магнітопроводу з пошкодженою міжлистовою ізоляцією та поганим пресуванням з ударним впливом.

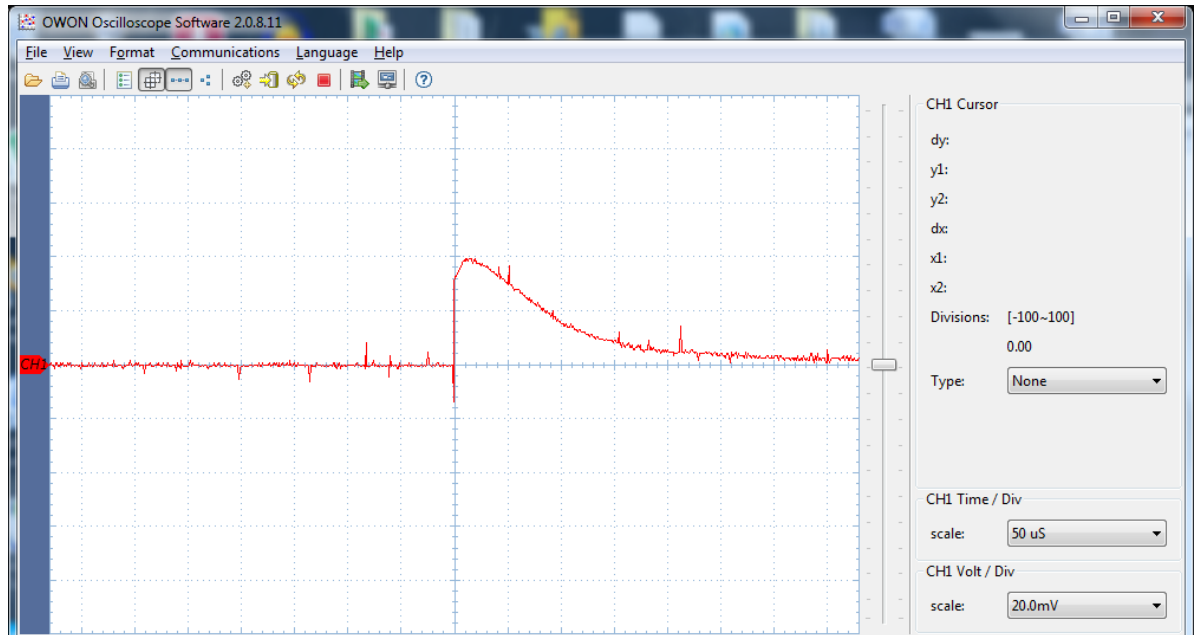


Рисунок 4.20 – Експериментальна крива затухання ЕРС у вимірювальній обмотці

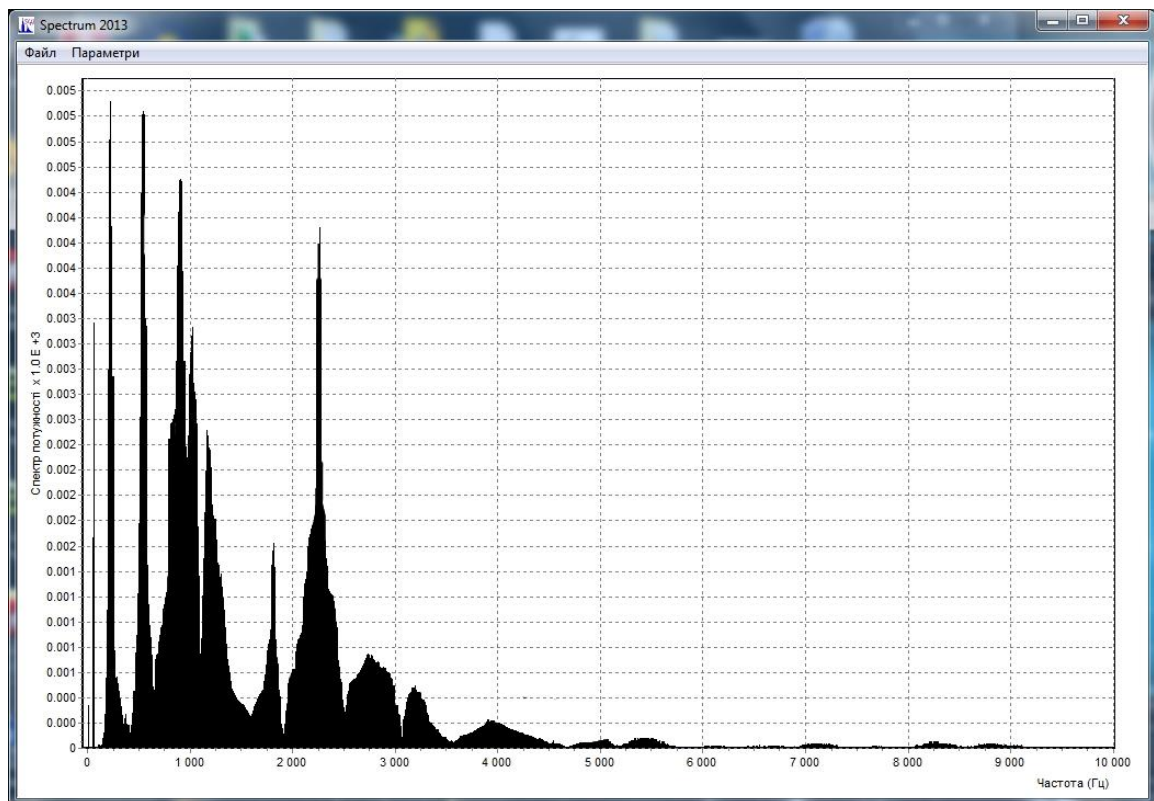


Рисунок 4.21 – Спектрограма вібрацій виміряна на магнітопроводі

Проаналізувавши рисунки 4.20 і 4.21 можна сказати, що в даному магнітопроводі при ударному і комутаційному впливі виявлено порушення ізоляції

(збільшився час затухання) та послаблення пресування пакету (наявність великої кількості максимумів спектральної густини потужності).

4) Для магнітопроводу з пошкодженою міжлистовою ізоляцією та хорошим пресуванням без ударного впливу.

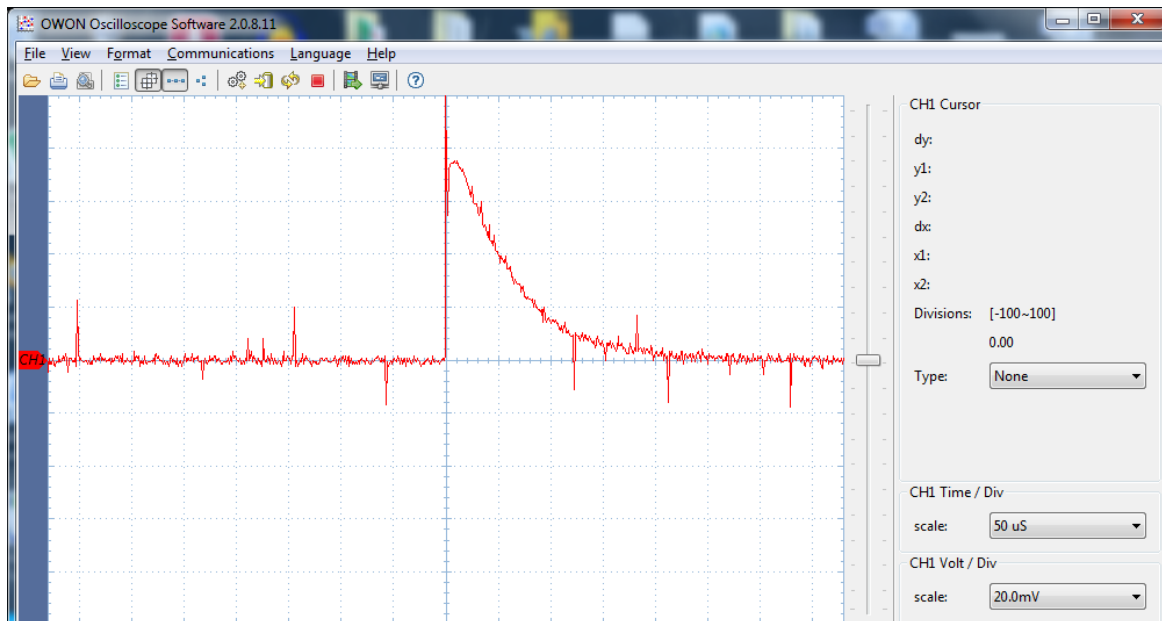


Рисунок 4.22 – Експериментальна крива затухання ЕРС у вимірювальній обмотці

5) Для магнітопроводу з пошкодженою міжлистовою ізоляцією та хорошим пресування з ударним впливом.

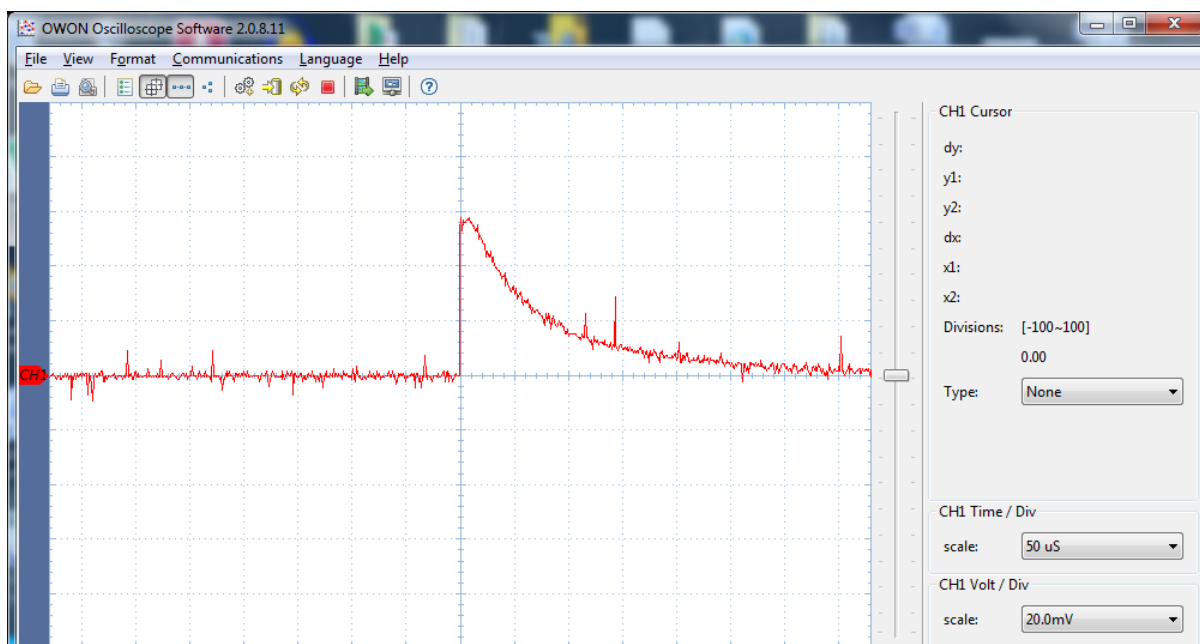


Рисунок 4.23 – Експериментальна крива затухання ЕРС у вимірювальній обмотці

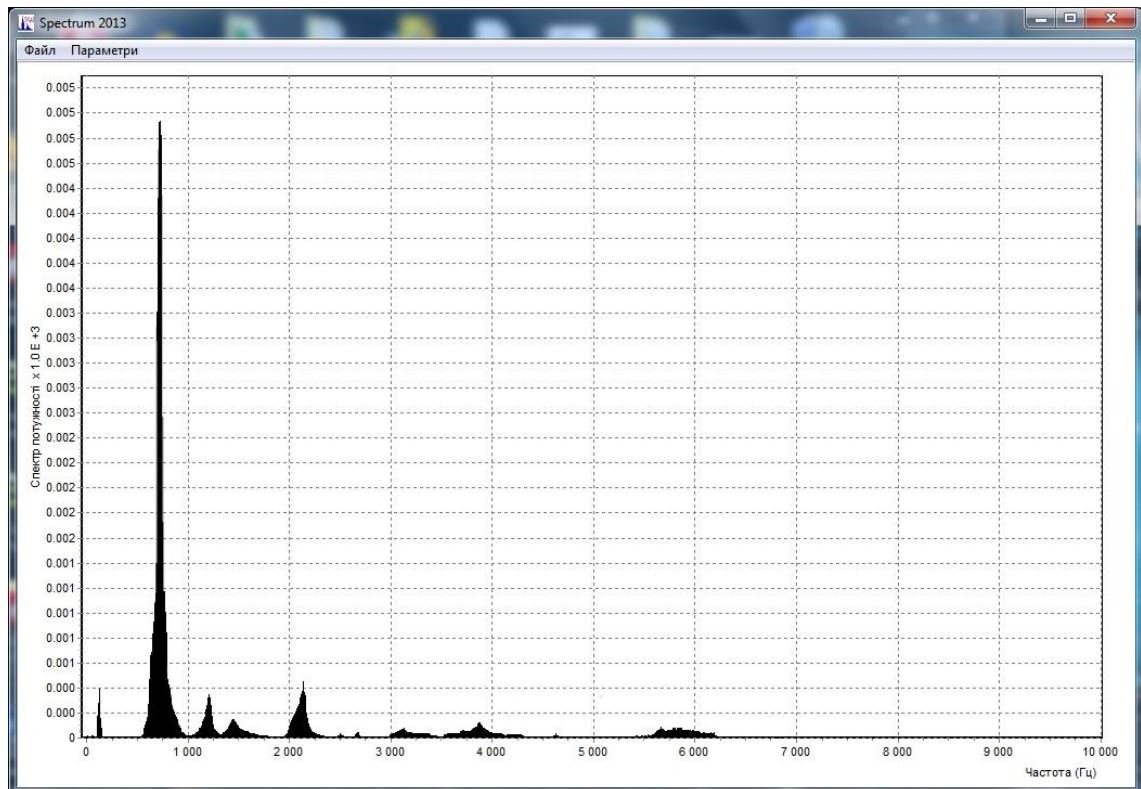


Рисунок 4.24 – Спектрограма вібрацій виміряна на магнітопроводі

б) Для магнітопроводу з погіршеною міжлистовою ізоляцією та погіршеним пресуванням без ударного впливу.

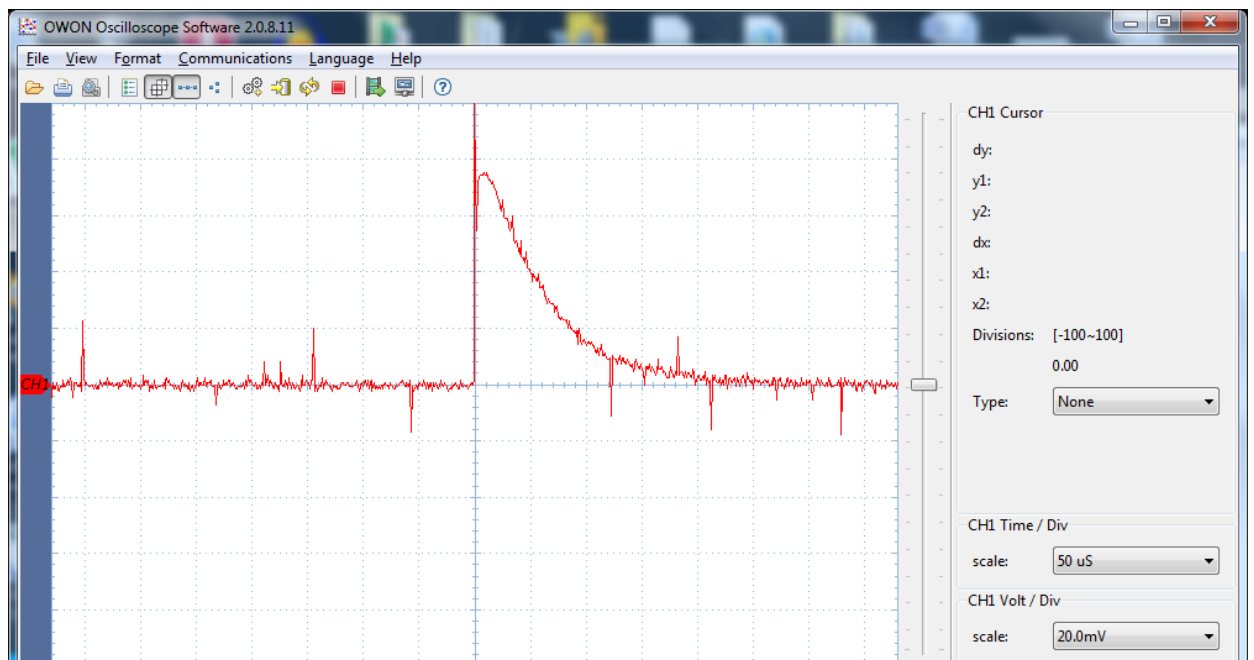


Рисунок 4.25 – Експериментальна крива затухання ЕРС у вимірювальній обмотці

7) Для магнітопроводу з погіршеною міжлистовою ізоляцією та погіршеним пресуванням з ударним впливом.

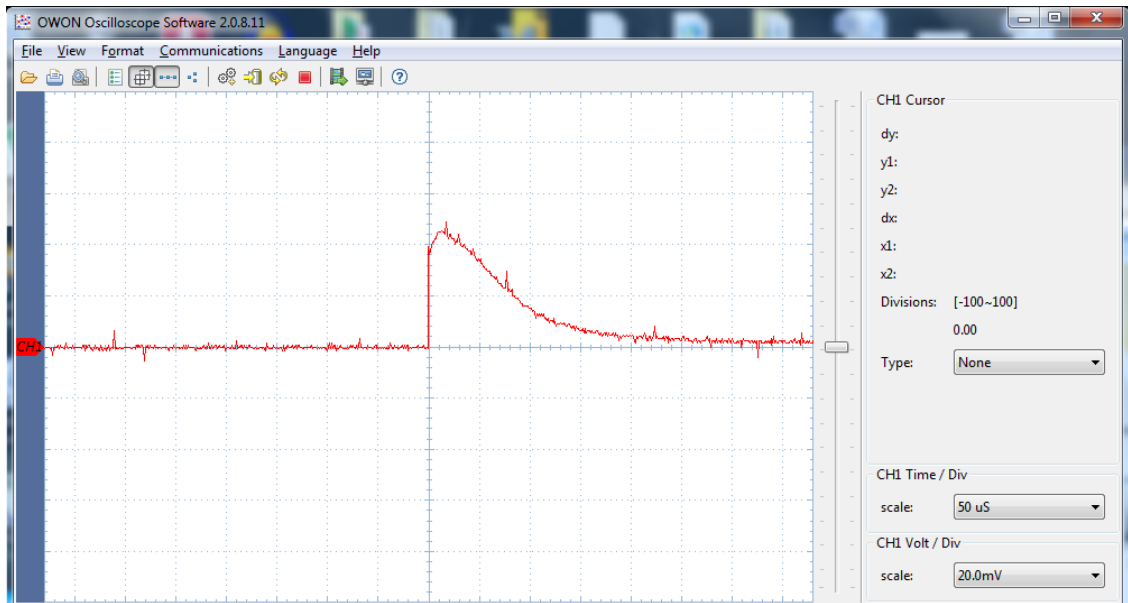


Рисунок 4.26 – Експериментальна крива затухання ЕРС у вимірювальній обмотці

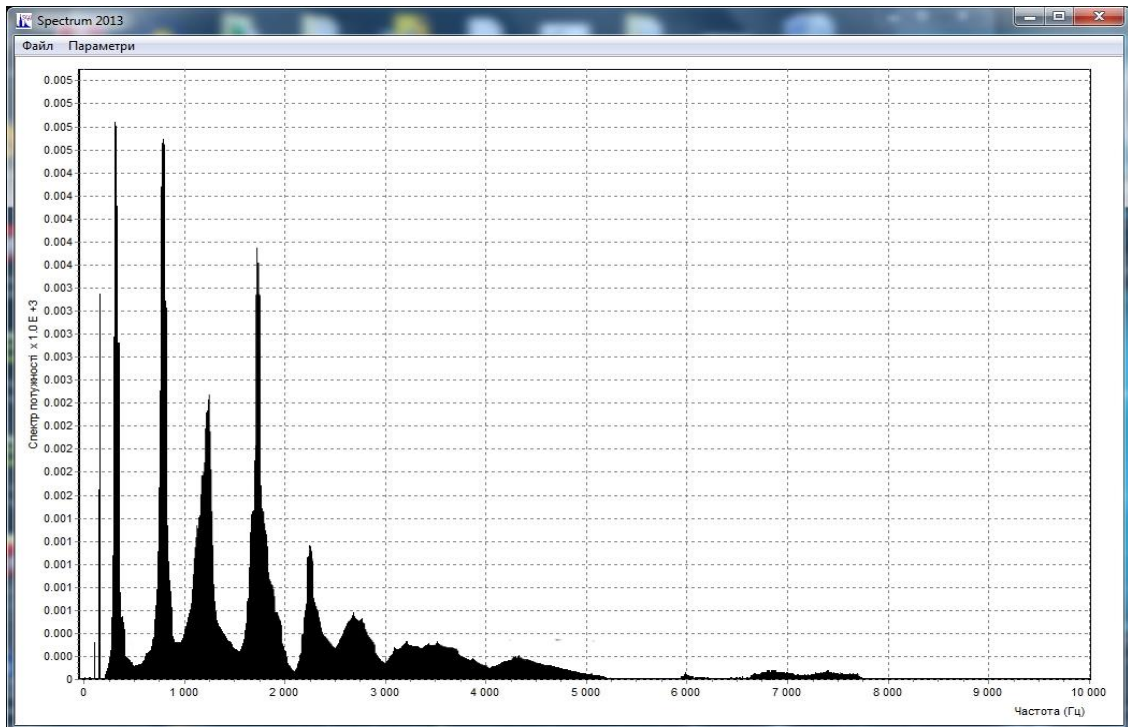


Рисунок 4.27 – Спектрограма вібрацій виміряна на магнітопроводі

Висновки до Розділу 4

В даному розділі було розглянуто лабораторні зразки ІВС діагностики, які були експериментально перевірені при виконанні наукових досліджень по темі дисертаційної роботи. Наведено структурні схеми, описано алгоритми роботи, структуру та основні функції програмного забезпечення, що входить до складу розроблених ІВС.

В результаті аналізу розглянутих спектрограм вібрацій дослідженого ЕО та його окремих елементів доведено, що вібрації містять сукупність частотних компонентів, причому на деяких частотах спостерігаються характерні максимуми спектральної густини потужності.

Реалізація комплексного методу оцінки якості шихтованих магнітопроводів по стану міжлистової ізоляції та рівня розпушеності листів магнітопроводу дозволила обґрунтувати рекомендації по подальшому використанню осердя. При одночасному використанні швидкоплинних індукційних впливів та ударного вібраційного впливу при співвідношенні дефектів магнітопроводу різного походження надані наступні рекомендації:

1) У випадку якісної міжлистової ізоляції і якісного пресування постійна часу загасання вихрових струмів залишається незмінною, 45-55 мкс, що відповідає нормальним питомим втратам 2,8-4 Вт/кг при $B_{1,0/50}$. Магнітопровід придатний до використання.

2) У разі якісної ізоляції та при ослабленому пресуванні постійна часу згасання вихрових струмів залишається відносно постійною не більше 60 мкс, що відповідає питомим втратам 2,8-4 Вт/кг. Кількість максимумів спектральної густини потужності зростає до трьох та більше. Магнітопровід вимагає технологічних операцій з усунення надмірного розпушування.

3) У разі істотно порушеної ізоляції та одночасному розпушуванні магнітопроводу, постійна часу згасання вихрових струмів становить 130-200 мкс, що відповідає питомим втрат 8-15 Вт/кг. За відсутності механічного ударного впливу постійна часу згасання вихрових струмів становить 90 мкс. В такому стані магнітопровід не придатний для експлуатації. У випадку коли постійна часу

загасання менше 90 мкс необхідно прийняти міри по усуненню послаблення пресування та змінити паспорт зібраної машини згідно рекомендаціям, що надано в Розділі 3.

РОЗДІЛ 5

АПАРАТНІ ЗАСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ ЗАПРОПОНОВАНИМ МЕТОДОМ

5.1 Макетний зразок апаратури для діагностики ламінованих осердь

Функціональна схема пристрою для визначення стану міжлистової ізоляції шихтованого магнітопроводу показана на рис. 5.1. Пристрій складається з:

- Генератора синусоїдальних коливань високої частоти (1000 та 10000 Гц);
- Блок силових ключів на основі польових транзисторів з драйверами;
- Блок живлення, що живить генератор, силовий ключ та блок обробки сигналу;
- Блок аналізу та обробки отриманого сигналу;
- Досліджуваний об'єкт.

Пристрій умовно можна поділити на три основні частини: силову, вимірювальну та об'єкт контролю, які пов'язані індукційним шляхом через об'єкт контролю, на який намотано обмотку збудження та вимірювальну обмотку.

Такий пристрій дозволяє виконувати перевірку якості міжлистової ізоляції осердя електричних машин малої та середньої потужності (об'єктів) без застосування додаткових вимірювальних приладів.

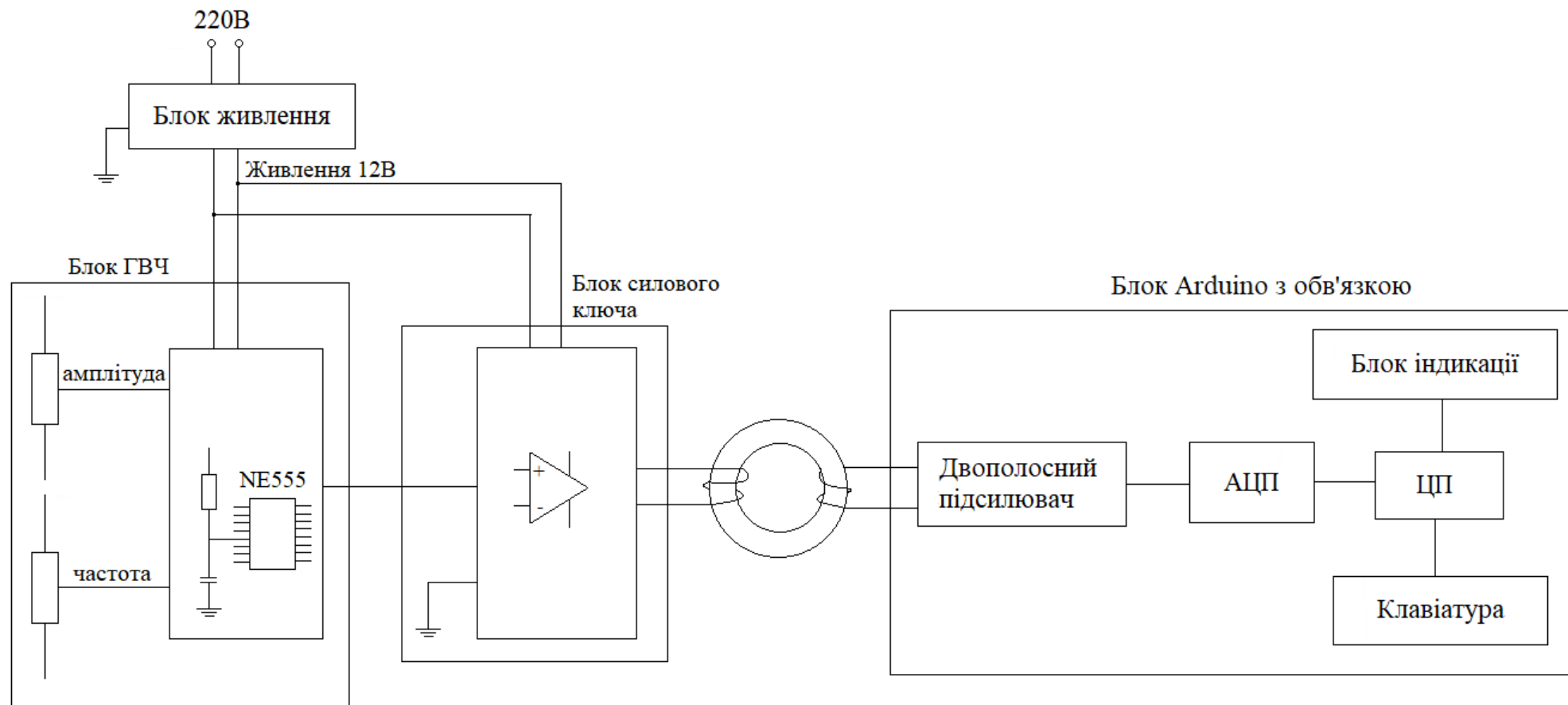


Рисунок 5.1 – Блок-схема макетного зразка діагностичного пристрою якості ламінованих осердь

5.2 Система блоку генератора високої частоти

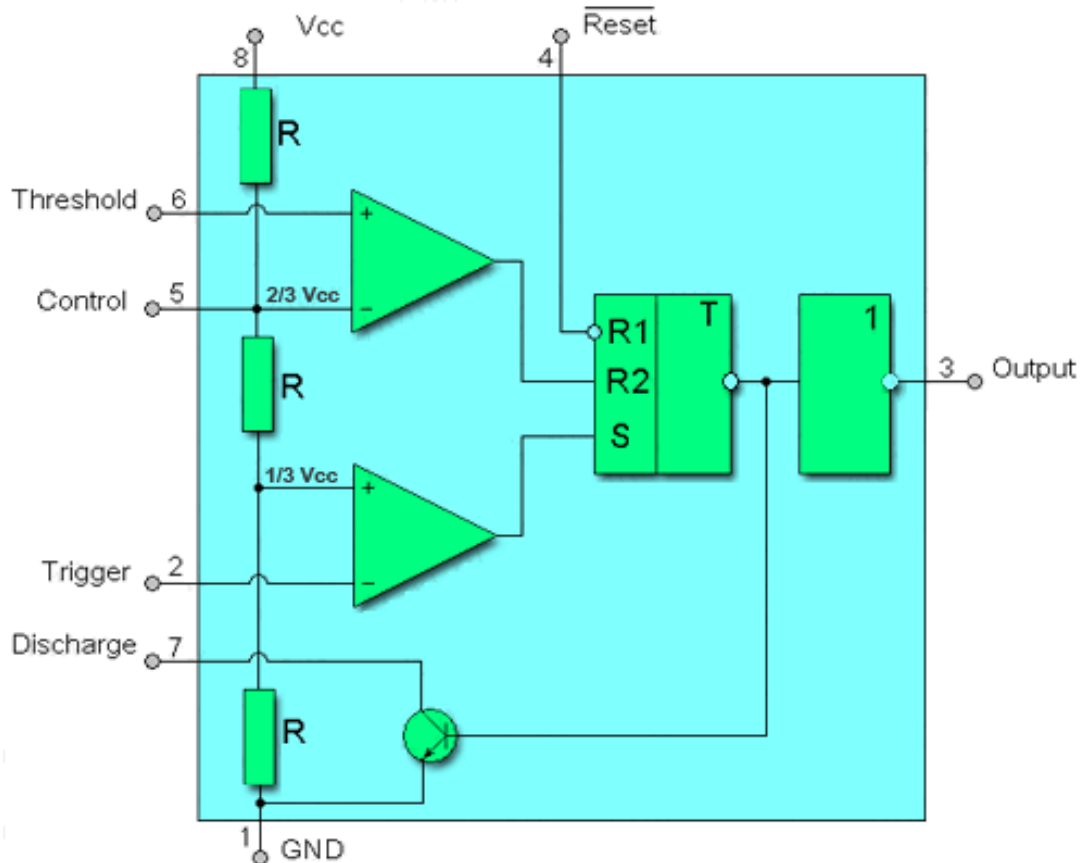


Рисунок 5.2 – Структурна схема NE555

Основу блоку генератора високої частоти становить популярний таймер NE555 (він же – LM555, LC555, SE555, HA555, а також багато інших). Таку популярність цій мікросхемі забезпечили:

- простота;
- дешевизна;
- широкий діапазон напруг живлення (4,5-18 В);
- висока точність та стабільність (температурний дрейф 0,005 %/°C, дрейф від напруги живлення – менше 0,1 %/Вольт).

Також перевагою даної схеми є найширші можливості застосування.

Структурна схема таймера показана на рисунку 5.2. На схемі зображено:

1. GND – контакт заземлення.
2. Trigger – інвертуючий вхід компаратора, відповідального за встановлення тригера. Коли напруга на цій нозі стає менше $\frac{1}{3} V_{CC}$ (тобто

менше, ніж напруга на вході компаратора, що не інвертує) – на вхід SET тригера надходить логічна 1. Якщо при цьому відсутні сигнали скидання на входах Reset, то тригер встановиться (на його виході з'явиться логічний 0, тому що вихід інвертований).

3. Output – вихід таймера. На цьому виводі є інвертований сигнал з виходу тригера, тобто коли тригер зведений (на його виході нуль) – на виводі Output високий рівень, коли тригер скинутий – на цьому виводі низький рівень.

4. Reset – скидання. Якщо цей вхід підтягнути до низького рівня, тригер скидається (на його виході встановлюється 1, але в виході таймера низький рівень).

5. Control – контроль / управління. Цей вхід дозволяє змінювати поріг спрацьовування компаратора, керуючого скиданням тригера. Якщо вхід 5 не задіяний, цей поріг визначається внутрішнім дільником напруги на резисторах і дорівнює $2/3 V_{CC}$. Вивід Control можна використовувати, наприклад, для організації зворотного зв'язку за струмом або напругою.

6. Threshold – поріг. Коли напруга на цьому виводі стає вищою за порогову (яка при незадіяному виводі 5, дорівнює $2/3 V_{CC}$) – відбувається скидання тригера і на виході таймера встановлюється низький рівень.

7. Discharge – розряд. На цьому виході NE555 таймер має транзистор з відкритим колектором. Коли тригер скинутий – цей транзистор відкритий і на виході 7 є низький рівень, коли тригер встановлений – транзистор закритий і вивід 7 знаходиться в Z-стані.

8. V_{CC} – напруга живлення.

На рисунку 5.3 показано модифіковано схему з додаванням резистора та конденсатора.

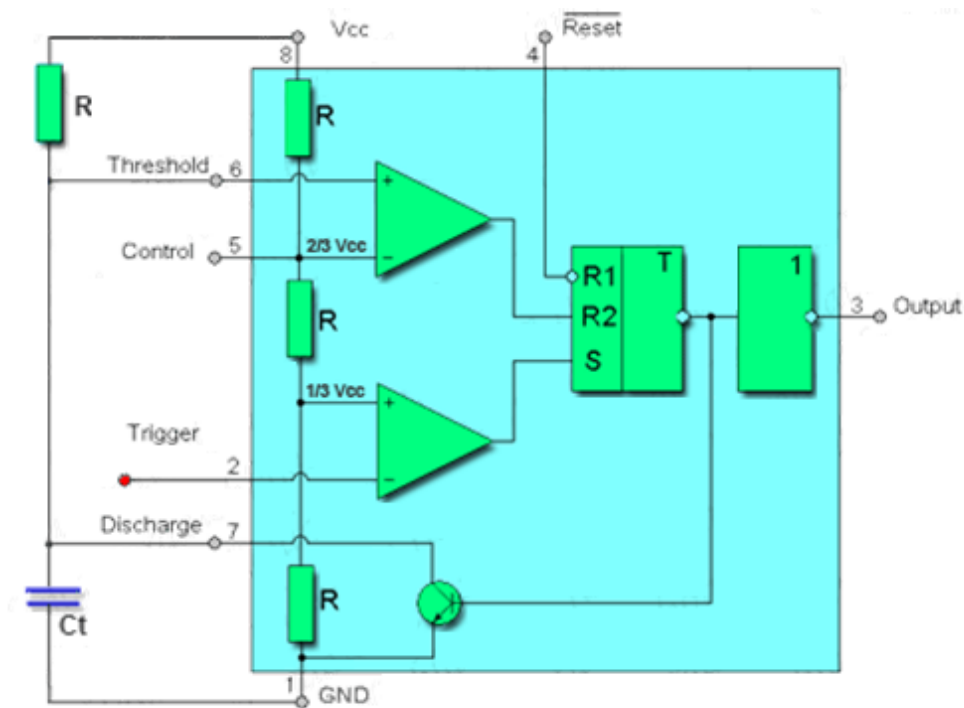


Рисунок 5.3 – Модифікована структурна схема NE555

Спочатку на другій нозі є високий рівень. Після включення тригер скинутий, на виході тригера високий рівень, на виході таймера низький рівень, на 7-й нозі теж низький рівень (транзистор всередині відкрито).

Щоб відбулося перемикання тригера – необхідно подати на другу ногу рівень нижче $1/3 V_{CC}$ (тоді перемкнеться компаратор і сформує високий рівень на вході Set тригера). Поки рівень на 2-й нозі залишається вищим за $1/3 V_{CC}$ – таймер перебуває в стабільному стані і ніяких перемикань не відбувається.

Як тільки рівень на 2-й нозі впаде нижче $1/3 V_{CC}$ – спрацює компаратор, підключений до входу тригера (S), що, відповідно, викличе встановлення тригера.

На виході тригера з'явиться нуль (оскільки вихід тригера інвертовано), при цьому на виході таймера (3 нога) встановиться високий рівень. Крім цього, транзистор на 7-й нозі закриється і 7-а нога перейде в Z-стан.

При цьому через резистор R_t почне заряджатися конденсатор C_t (оскільки він більше не замкнений на землю через 7 ногу мікроконтролера).

Як тільки рівень на 6-й нозі підніметься вище $2/3 V_{CC}$ – спрацює компаратор, підключений до входу R2 тригера, що призведе до скидання тригера та повернення схеми до початкового стану.

Так працює схема, яка називається одновібратором або моностабільним мультівібратором, тобто пристрій, що формує одиничний імпульс.

Щоб визначити тривалість цього імпульсу достатньо порахувати, за який час конденсатор C_t зарядиться від 0 до $2/3 V_{CC}$ через резистор R_t від постійної напруги V_{CC} .

Нехай конденсатор заряджається через резистор R напругою V_{Π} від початкового рівня U_0 .

Як відомо з теорії струм та напруга на конденсаторі:

$$I = C \frac{dU}{dt}, \quad (5.1)$$

Струм через резистор: $I = \frac{(V_{\Pi} - U)}{R}$. Оскільки це той самий струм, який тече через резистор і заряджає конденсатор, можна скласти просте диференціальне рівняння, що описує процес заряду конденсатора:

$$C \frac{dU}{dt} = \frac{(V_{\Pi} - U)}{R}, \quad (5.2)$$

Перетворимо рівняння до виду:

$$V_{\Pi} = RC \frac{dU}{dt}, \quad (5.3)$$

Це диференціальне рівняння має розв'язок, виду:

$$U = U_0 + (V_{\Pi} - U_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right), \quad (5.4)$$

Знаючи, що $U_0 = 0$, напруга живлення дорівнює V_{CC} , а кінцева напруга дорівнює $2/3 V_{CC}$.

Звідси отримуємо тривалість імпульсу одновібратора.

Додамо до схеми ще один резистор, і змінимо підключення ніг (рис 5.4).

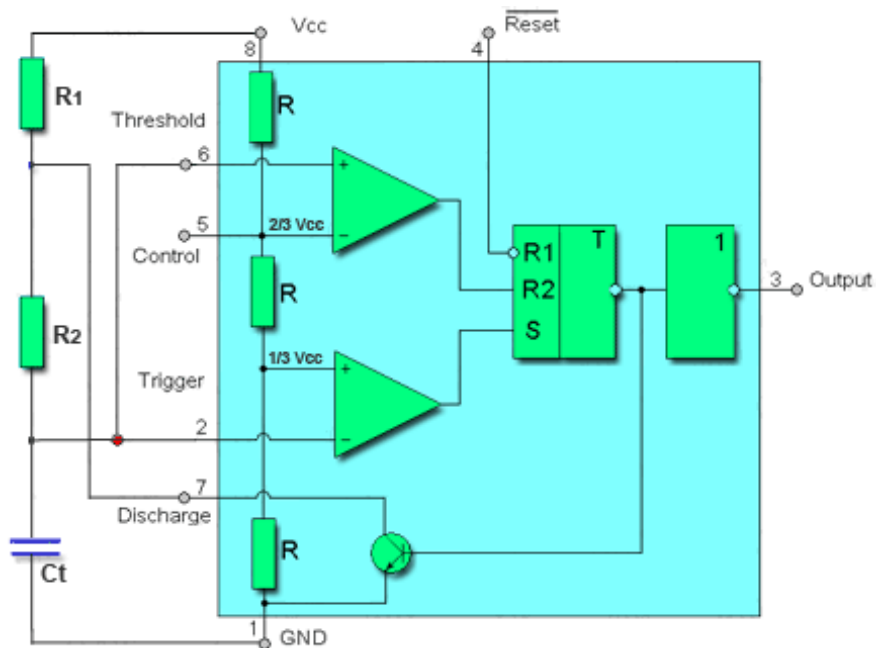


Рисунок 5.4 – Модифікована структурна схема одновібратора

На початку конденсатор C_t розряджений (напруга на ньому менше $1/3 V_{CC}$), отже, спрацює компаратор запуску і сформує високий рівень на вході S тригера. Напруга на 6-й нозі менше $2/3 V_{CC}$, отже компаратор, що формує сигнал на вході R2, вимкнений (на його виході низький рівень, тобто сигналу Reset немає).

Отже, відразу після включення тригер встановиться, на його виході з'явиться логічний 0, на виході таймера встановиться високий рівень, транзистор на 7-й нозі закриється і конденсатор C_t почне заряджатися через резистори R1, R2. При цьому напруга на 2-й та 6-й ногах почне рости.

Коли ця напруга виросте до $1/3 V_{CC}$ – пропаде сигнал Set (відключиться компаратор установки тригера).

Сигнал Reset сформується верхнім на нашому малюнку компаратором, коли напруга на конденсаторі, а разом з ним на 2-й і 6-й ногах досягне значення $2/3 V_{CC}$ (тобто як тільки напруга на конденсаторі стане трохи більше – відразу сформується Reset) .

Цей сигнал (Reset) скине тригер і його виході встановиться високий рівень. При цьому на виході таймера встановиться низький рівень, транзистор на 7 нозі відкриється і конденсатор C_t почне розряджатися через резистор R2.

Напруга на 2-й та 6-й ногах почне падати. Як тільки напруга стане трохи менше $2/3 V_{CC}$ – верхній компаратор знову перемкнеться і сигнал Reset пропаде, але встановити тригер тепер можна тільки сигналом Set, тому він так і залишиться в скинутому стані.

Як тільки напруга на C_t знизиться до $1/3 V_{CC}$ (стане трохи нижче) – знову спрацює нижній компаратор, який формує сигнал Set, і тригер знову встановиться, на його виході знову з'явиться нуль, на виході таймера – одиниця, транзистор на 7-й нозі закриється і знову розпочнеться заряд конденсатора.

Далі цей процес так і продовжуватиметься до нескінченності – заряд конденсатора через R_1, R_2 від $1/3 V_{CC}$ до $2/3 V_{CC}$ (на виході таймера високий рівень), потім розряд конденсатора від $2/3 V_{CC}$ до $1/3 V_{CC}$ через резистор R_2 (на виході таймера низький рівень).

Таким чином, схема тепер працює як генератор прямокутних імпульсів, тобто мултивібратор в автоколивальному режимі (коли імпульси самі виникають, без будь-яких зовнішніх впливів).

При заряді конденсатора напругою V_{CC} через R_1, R_2 від $1/3 V_{CC}$ до $2/3 V_{CC}$ маємо:

$$\frac{2}{3}V_{CC} = \frac{1}{3}V_{CC} + \left(V_{CC} - \frac{1}{3}V_{CC}\right)\left(1 - \frac{e^{-t}}{(R_1 + R_2)C}\right), \quad (5.5)$$

Звідси отримуємо тривалість імпульсу нашого мултивібратора.

Аналогічно знаходимо тривалість паузи, тільки тепер початковий рівень $2/3 V_{CC}$, не заряджаємо конденсатор від V_{CC} , а розряджаємо на землю (тобто замість $V_{п}$ у формулу потрібно підставити нуль, а не V_{CC}) і розряд йде тільки через резистор R_2 :

$$\frac{1}{3}V_{CC} = \frac{2}{3}V_{CC} + \left(0 - \frac{2}{3}V_{CC}\right)\left(1 - \frac{e^{-t}}{R_2C}\right), \quad (5.6)$$

Звідси отримуємо тривалість паузи мултивібратора.

Період імпульсу та частота мултивібратора:

$$T = t_i + t_{п} = -\ln\left(\frac{1}{2}\right) * (R_1 + 2 * R_2) * C \approx 0,693 * (R_1 + 2 * R_2) * C, \quad (5.7)$$

V_{CC} – це живлення нижнього рівня, що має бути між 10 В і 20 В. V_{DD} – це логічне живлення для IR2110, воно має бути між +3 В і +20 В (стосовно V_{SS}). Фактичне напруження, яке обирається для використання, залежить від рівня напруги вхідних сигналів відповідно до графіку рис. 5.7.

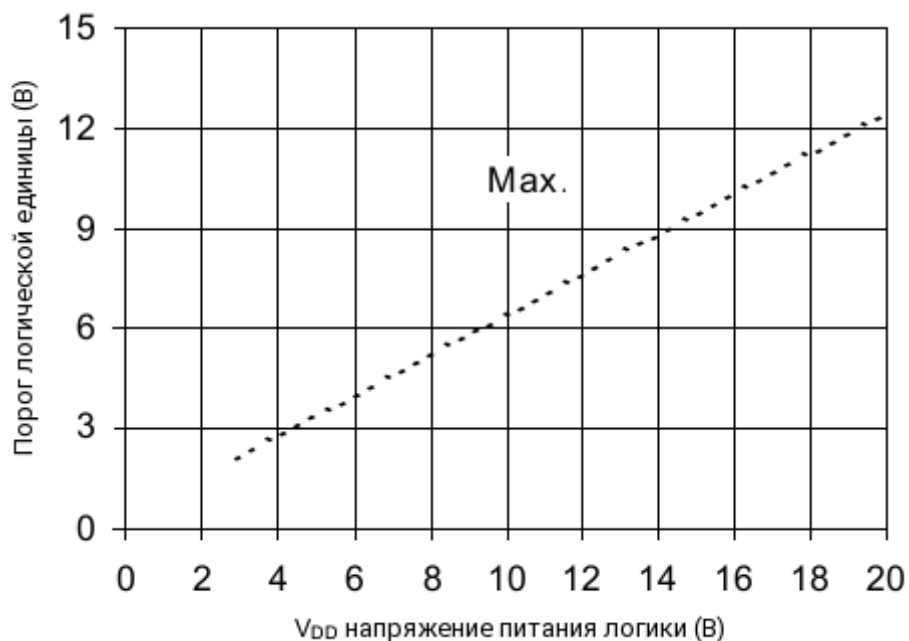


Рисунок 5.7 – Залежність логічної 1 від живлення

Призначення контактів мікросхеми IR2110 вказано в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Призначення виходів мікросхеми IR2110

Символ	Опис
V_{DD}	Живлення для логіки
HIN	Логічний вхід для верхнього рівня, в фазі
SD	Логічний вхід для зупинки
LIN	Логічний вхід для нижнього рівня, в фазі
V_{SS}	Логічна земля
V_B	Плаваюче живлення верхнього рівня
HO	Вихід управління затвору верхнього рівня
V_S	Повернення плаваючого живлення верхнього рівня
V_{CC}	Живлення нижнього рівня
LO	Вихід керування затвором нижнього рівня
COM	Повернення живлення нижнього рівня

Зазвичай використовується V_{DD} , що дорівнює +5 В. При $V_{DD} = +5$ В вхідний поріг логічної 1 трохи вище, ніж 3 В. Таким чином, коли напруга $V_{DD} = +5$ В, IR2110 може бути використана для управління навантаженням, коли вхід «1» вище, ніж 3 В. Це означає, що IR2110 може бути використаний майже для всіх схем, так як більшість схем зазвичай мають живлення приблизно 5 В. Коли використовується мікроконтролер, вихідна напруга буде вищою, ніж 4 В (адже мікроконтролер часто має $V_{DD} = +5$ В). Коли використовується SG3525 або TL494 або інший ШІМ-контролер, то, ймовірно, доведеться їх живити напругою більшою, ніж 10 В, отже, на виходах буде більше, ніж 8 В, при логічній одиниці. Таким чином, IR2110 може бути використаний практично скрізь.

Також можна знизити V_{DD} приблизно до +4 В, якщо використовується мікроконтролер чи будь-який чіп, який дає на виході 3,3 В (наприклад, dsPIC33). Дослід проектування схем з IR2110 показав, що іноді схема не працює належним чином, коли V_{DD} у IR2110 була обрана менше + 4 В. Тому не рекомендується використовувати V_{DD} нижче +4 В. У більшості схем рівні сигналу не мають напруги менше, ніж 4 В як «1», і тому найчастіше використовується напруга $V_{DD} = +5$ В.

Якщо з будь-яких причин у схемі рівень сигналу логічної «1» має напругу менше, ніж 3 В, то потрібно використовувати перетворювач рівнів або транслятор рівнів, щоб підняти напругу до прийнятних меж. У таких ситуаціях рекомендується підвищення до 4 В або 5 В та використання у IR2110 $V_{DD} = +5$ В.

V_{SS} це земля для логіки. COM – це «повернення низького рівня», в основному заземлення низького рівня драйвера. IR2110 є неізольованим драйвером, і це означає, що V_{SS} і COM повинні бути обидва підключені до землі.

HIN та LIN – це логічні входи. Високий сигнал на HIN означає керування верхнім ключем, тобто на НО здійснюється вивід високого рівня. Низький сигнал HIN означає відключення MOSFET верхнього рівня, тобто на НО

Високий сигнал LIN означає керування нижнім ключем, тобто на LO здійснюється вивід високого рівня. Низький сигнал LIN означає відключення MOSFET нижнього рівня, тобто LO здійснюється виведення низького рівня. Вихід у LO вважається щодо землі. Коли сигнал високий, рівень LO такий самий як і V_{CC} , щодо V_{SS} , фактично земля. Коли сигнал низький, рівень LO такий же як і V_{SS} , відносно V_{SS} , фактично нуль.

Одна з найчастіших схем використання IR2110 для управління MOSFET це напівмостові схеми.



D1, C1 та C2 спільно з IR2110 формують підсилювальний ланцюг. Коли $LIN = 1$ і Q2 включений, то C1 і C2 заряджаються рівня V_B , оскільки один діод розташований нижче $+V_{CC}$. Коли $LIN = 0$ і $HIN = 1$, заряд C1 і C2 використовується для додавання додаткової напруги, V_B в даному випадку, вище рівня джерела Q1 для управління Q1 в конфігурації верхнього ключа. Достатньо велика ємність повинна бути обрана у C1 для того, щоб її вистачило для забезпечення необхідного заряду для Q1, щоб Q1 був включений весь цей час. C1 також не повинен мати занадто велику ємність, так як процес заряду буде проходити довго і рівень напруги не буде збільшуватися достатньою мірою щоб зберегти MOSFET включеним. Чим більше часу потрібно у включеному стані, тим більша потрібна ємність. Таким чином, менша частота вимагає більшої ємності C1. Більший коефіцієнт заповнення потребує більшої ємності C1.

Для низьких частот, таких як 50 Гц, застосовується ємність від 47 мкФ до 68 мкФ. Для високих частот, таких як 30-50 кГц, використовують ємність від 4.7 мкФ до 22 мкФ. Коли використовується електролітичний конденсатор, то керамічний конденсатор має бути використаний паралельно з цим конденсатором. Керамічний конденсатор не є обов'язковим, якщо підсилювальний конденсатор – танталовий.

D2 і D3 розряджають затвор MOSFET швидко, минаючи затворні резистори і зменшуючи час відключення. R1 і R2 – це струмообмежуючі резистори затвора.

+MOSV може бути максимум 500 В.

$+V_{CC}$ має йти з джерела без перешкод. Необхідно встановити фільтруючі та розв'язувальні конденсатори від $+V_{CC}$ до землі для фільтрації.

Польові транзистори і діоди вихідного ключа встановлюються на тепловідвід. Такий ключ можна використовувати для випробувань магнітопроводу невеликих машин.

5.4 Блок індикації на платформі Arduino

Блок індикації розроблений на платформі Arduino Nano керується програмою написаною відповідно до вимог. Блок індикації складається з наступних підблоків:

- Вхідного підсилювача;
- Аналогово-цифрового перетворювача з цифровою обробкою даних;
- Цифрова панель та клавіатура.

5.4.1 Вхідний підсилювач

Вхідний підсилювач виконаний на мікросхемі LM386. Мікросхема LM386 є підсилювачем потужності, який можна використовувати в пристроях з низькою напругою живлення. Наприклад, при живленні від батареї. За замовчуванням її внутрішня схема обмежує посилення за напругою в районі 20. Але включаючи зовнішні резистор і конденсатор можна змінювати посилення від 20 до 200, а вихідна напруга автоматично встановлюється рівною половині напруги живлення. Споживання електроенергії в холостому режимі становить всього 24 мА, при живленні від 6 В.

Особливості:

- Мінімум зовнішніх компонентів, що підключаються;
- Широкий діапазон живлення: від 4 до 12 В або від 5 до 18 В;
- Низький споживаний струм: 4 мА;
- Посилення за напругою від 20 до 200;
- Вхід відносно землі;
- Встановлюється вихідна напруга;
- Низький коефіцієнт спотворень: 0,2% (при $AV = 20$, $V_s = 6$, $R_L = 8 \text{ Ом}$, $P_O = 125 \text{ мВт}$, $f = 1 \text{ кГц}$).

На рисунку 5.9 показано внутрішня принципова схема LM386.

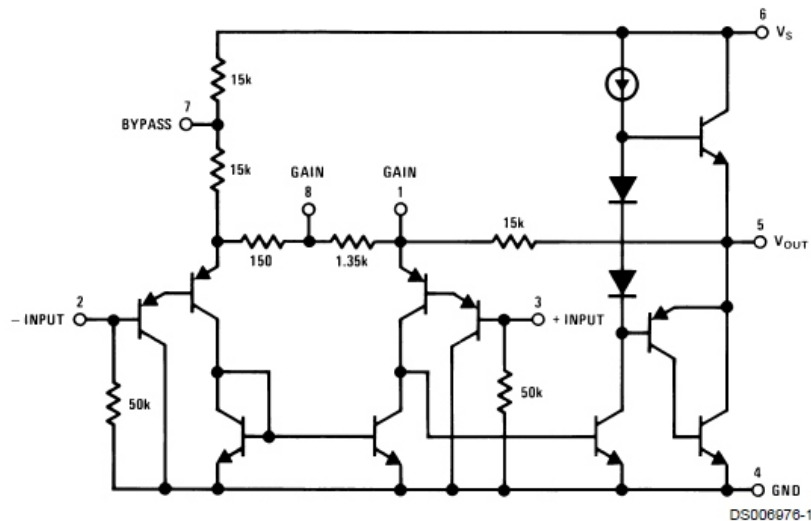


Рисунок 5.9 – Внутрішня схема LM386

Транзистори Q1 та Q2 утворюють диференціальний підсилювач. У ньому обидва виходи з'єднані із загальним проводом резисторами R1 та R2 номіналом 50 кОм. Вихід диференціального підсилювача (транзистор Q3) підключений до входу підсилювача із загальним емітером (транзистор Q7). Сигнал з колектора транзистора Q7 безпосередньо подається на вихід ІС через підсилювач потужності класу АБ, що має одиничне посилення та виконаний на транзисторах Q8-Q9-Q10 які для мінімізації внутрішнього падіння напруги та для отримання максимальної вихідної потужності не забезпечені схемою захисту від навантаження.

Основні технічні характеристики мікросхеми LM386:

- Вихідна потужність, $P_{\text{вих}} = 250 \dots 500 \text{ мВт}$;
- Опір навантаження, $R_{\text{н}} = 8 \text{ Ом}$;
- Коефіцієнт посилення, $K_{\text{u}} = 26 \dots 46 \text{ дБ}$;
- Смуга частот $B = 20 \text{ Гц} \dots 60 \text{ кГц}$;
- Вхідний опір, $R_{\text{вх}} = 50 \text{ кОм}$;
- Коефіцієнт гармонік, $K_{\text{г}} = 0,2\%$;
- Напруга живлення, $U_{\text{п}} = 4 \dots 12$;
- Струм спокою, $I_0 = 4 \text{ мА}$.

Принципова схема підсилювача з коефіцієнтом посилення $K_{\text{u}} = 200$ (46 дБ), зображена на рис. 5.10.

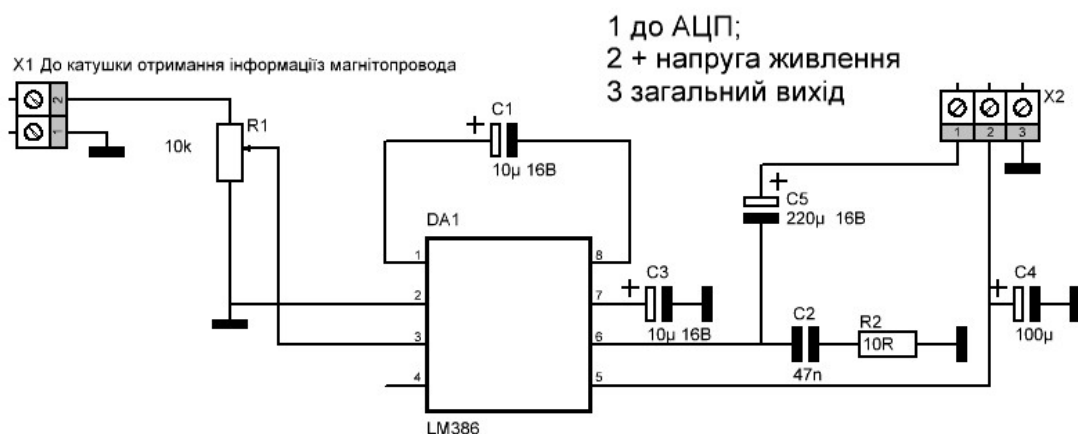


Рисунок 5.10 – Принципова схема підсилювача

Резистор R1 служить регулятором рівня вхідного сигналу, конденсатор C3 є фільтруючим. Конденсатор C1 шунтує висновки 1 та 8 мікросхеми DA1 по змінному струму, завдяки чому досягається максимальний коефіцієнт посилення; конденсатор C4 служить для розв'язки живлення.

Ланцюжок C2, R2 призначений для підвищення стабільності під час роботи підсилювача на ємнісне навантаження. Вихідний сигнал з виходу ІС через розділовий конденсатор C5 подається на вхід АЦП.

5.4.2 Аналогово-цифровий перетворювач з цифровою обробкою даних

Для отримання та обробки даних використовується Arduino Nano. Зовнішній вигляд її зображено на рис. 5.11.



Рисунок 5.11 – Зовнішній вигляд Arduino Nano

Загальні відомості:

Платформа Nano, побудована на мікроконтролері ATmega328 (Arduino Nano 3.0) або ATmega168 (Arduino Nano 2.x), має невеликі розміри і може використовуватися в різних приладах.

Короткі характеристики:

- Мікроконтролер Atmel ATmega168 або ATmega328
- Робоча напруга (логічний рівень) 5 В
- Вхідна напруга (рекомендована) 7-12 В
- Вхідна напруга (гранична) 6-20 В
- Цифрові входи/виходи 14 (6 з яких можуть використовуватися як виходи

ШІМ)

- Аналогові входи 8
- Постійний струм через вхід/вихід 40 мА
- Флеш пам'ять 16 Кб (ATmega168) або 32 Кб (ATmega328) при цьому 2 Кб використовуються для завантажувача ОЗУ 1 Кб (ATmega168) або 2 Кб (ATmega328) EEPROM 512 байт (ATmega168) або 1 Кб (ATmega328)
- Тактова частота 16 МГц
- Розміри 1.85 см x 4.2 см

Arduino Nano може отримувати живлення через підключення Mini-USB, або від нерегульованого 6-20 В (вивід 30), або регульованого 5 В (вивід 27) зовнішнього джерела живлення. Автоматично вибирається джерело з найвищою напругою.

Мікросхема FTDI FT232RL отримує живлення тільки якщо сама платформа живиться від USB. Таким чином, при роботі від зовнішнього джерела (не USB), буде відсутня напруга 3.3 В, що генерується мікросхемою FTDI, при цьому світлодіоди RX і TX блимають тільки при наявності сигналу високого рівня на виходах 0 і 1.

Мікроконтролер ATmega168 має 16 кБ флеш-пам'яті для зберігання коду програми, а мікроконтролер ATmega328, у свою чергу, має 32 кБ (в обох випадках 2 кБ використовується для зберігання завантажувача). ATmega168 має

1 кБ ОЗУ та 512 байт EEPROM (яка читається та записується за допомогою бібліотеки EEPROM), а ATmega328 – 2 кБ ОЗУ та 1 Кб EEPROM.

Кожен із 14 цифрових виводів Nano, використовуючи функції `pinMode()`, `digitalWrite()`, та `digitalRead()`, може налаштовуватися як вхід чи вихід. Виводи працюють при напрузі 5 В. Кожен вивід має резистор навантаження (стандартно відключений) 20-50 кОм і може пропускати до 40 мА. Деякі виходи мають особливі функції:

Послідовна шина: 0 (RX) та 1 (TX). Виводи використовуються для отримання (RX) та передачі (TX) даних TTL. Ці виводи підключені до відповідних виводів мікросхеми послідовної шини FTDI USB-to-TTL.

Зовнішнє переривання: 2 і 3. Дані виходи можуть бути налаштовані на виклик переривання на молодшому значенні, на передньому чи задньому фронті, або при зміні значення. Детальна інформація міститься в описі функції `attachInterrupt()`.

ШІМ: 3, 5, 6, 9, 10 і 11. Будь-який з виходів забезпечує ШІМ з роздільною здатністю 8 біт за допомогою функції `analogWrite()`.

SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). За допомогою даних виходів здійснюється зв'язок SPI, який, хоч і підтримується апаратною частиною, не включений у мову Arduino.

LED: 13. Вбудований світлодіод, підключений до цифрового виводу 13. Якщо значення виводу має високий потенціал, то світлодіод горить.

На платформі Nano встановлено 8 аналогових входів, кожен роздільною здатністю 10 біт (тобто може набувати 1024 різних значення). Стандартно входи мають діапазон виміру до 5 В щодо землі, проте є можливість змінити верхню межу за допомогою функції `analogReference()`. Деякі виходи мають додаткові функції:

I2C: A4 (SDA) та A5 (SCL). За допомогою виходів здійснюється зв'язок I2C (TWI). Для створення використовується бібліотека `Wire` (інформація на веб-сайті `Wiring`).

Додаткова пара виходів платформи:

AREF. Опорна напруга для аналогових входів. Використовується з функцією `analogReference()`.

Reset. Низький рівень сигналу на виводі перезавантажує мікроконтролер. Зазвичай використовується для підключення кнопки перезавантаження на платі розширення, що закриває доступ до кнопки на платі Arduino.

На платформі Arduino Nano встановлено кілька пристроїв для зв'язку з комп'ютером, іншими пристроями Arduino або мікроконтролерами. ATmega168 і ATmega328 підтримують послідовний інтерфейс UART TTL (5), що здійснюється виходами 0 (RX) і 1 (TX). Встановлена на платі мікросхема FTDI FT232RL спрямовує даний інтерфейс через USB, а драйвери FTDI (включені до Arduino) надають віртуальний COM порт програмі на комп'ютері. Моніторинг послідовної шини (Serial Monitor) програми Arduino дозволяє надсилати та отримувати текстові дані при підключенні до платформи. Світлодіоди RX і TX на платформі блимають під час передачі даних через мікросхему FTDI або USB підключення (але не при використанні послідовної передачі через виходи 0 і 1).

Бібліотекою `SoftwareSerial` можна створити послідовну передачу даних через будь-який із цифрових виходів Nano.

ATmega168 та ATmega328 підтримують інтерфейси I2C (TWI) та SPI. В Arduino включено бібліотеку `Wire` для зручності використання шини I2C. Докладніша інформація знаходиться в документації.

Платформа програмується за допомогою Arduino. З меню `Tools > Board` вибирається «Arduino Diecimila, Duemilanove або Nano w/ ATmega168» або «Arduino Duemilanove або Nano w/ ATmega328» (відповідно до встановленого мікроконтролера). Детальна інформація знаходиться у довіднику та інструкціях.

Мікроконтролери ATmega168 і ATmega328 поставляються із записаним завантажувачем, що полегшує запис нових програм без використання зовнішніх програматорів. Зв'язок здійснюється оригінальним протоколом STK500.

Є можливість не використовувати завантажувач та запрограмувати мікроконтролер через виводи блоку ICSP (внутрішньосхемне програмування).

Nano розроблено таким чином, щоб перед записом нового коду перезавантаження здійснювалося самою програмою, а не натисканням кнопки на платформі. Одна з ліній FT232RL, що керує потоком даних (DTR), підключена до виведення перезавантаження мікроконтролерів ATmega168 або ATmega328 через конденсатор 100 нФ. Активація цієї лінії, тобто. подача сигналу низького рівня, що перезавантажує мікроконтролер. Програма Arduino, використовуючи цю функцію, завантажує код одним натисканням кнопки Upload у середовищі програмування. Подача сигналу низького рівня по лінії DTR скоординована з початком запису коду, що скорочує тайм завантажувача.

Функція має ще одне застосування. Перезавантаження Nano відбувається щоразу при підключенні до програми Arduino на комп'ютері з ОС Mac X або Linux (через USB). Наступні півсекунди після перезавантаження працює завантажувач. Під час програмування відбувається затримка кількох перших байтів коду щоб уникнути отримання платформою некоректних даних (всіх, крім коду нової програми).

5.4.3 Клавіатура до Arduino

Матричні клавіатури це найпростіший, найдешевший і найпопулярніший вид клавіатур. Він відносно простий у виготовленні та заповнює собою більшу частину ринку модулів Arduino. Вигляд її показано на рис 5.12.



Рисунок 5.12 – Зовнішній вигляд матричної клавіатури

Схема підключення клавіатури до Arduino показано на рис. 5.13.

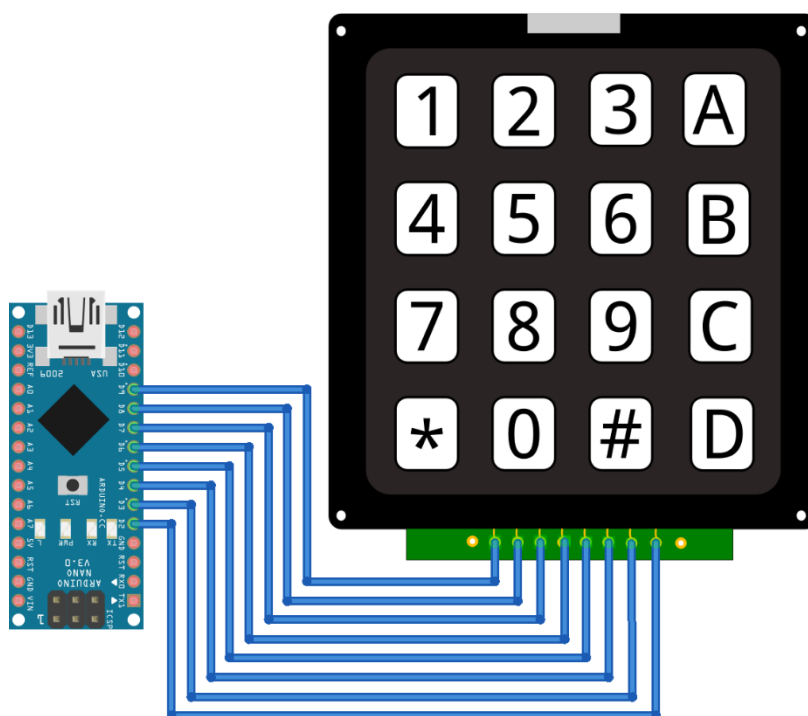


Рисунок 5.13 – Схема підключення клавіатури до Arduino

5.4.4 Рідкокристалічні індикатори

Для виведення текстової інформації або чисел розміром більше 4 розряду використовується рідкокристалічні індикатори (дисплеї). До їх переваг слід віднести:

- зручний для підключення до мікроконтролерів інтерфейс;
- мала споживана потужність;
- низька напруга живлення;
- довговічність.

На ринку існує велика кількість різноманітних рідкокристалічних (LCD) індикаторів різних виробників. Практично всі вони аналогічні за параметрами, сигналами інтерфейсів, командами управління. На даний момент найбільш поширеними ЖК індикаторами є пристрої виробництва компанії Winstar, Тайвань. Але інформація цілком застосовна і для символьних дисплеїв LCD інших виробників.

Загальні відомості:

Знакосинтезуючі або символні індикатори відображають інформацію у вигляді знаків певної розрядності. Одне знакове місце відображає один символ. Кількість знаків визначає розрядність індикатора. Інформація на індикаторах може виводитися на кількох рядках, тому для індикаторів такого типу завжди вказується кількість символів у рядку та кількість рядків.

Відображення інформації відбувається на рідкокристалічній матриці зі світлодіодним підсвічуванням. Підсвічування буває різних кольорів, що значно поживляє монохромну текстову інформацію.

Для керування рідкокристалічною матрицею та організації інтерфейсу індикатора використовується вбудований контролер HD44780 або його повні аналоги. Цей контролер визначає сигнали інтерфейсу індикатора та команди керування.

Символьні РК-дисплеї підтримують два варіанти підключення до мікроконтролера:

З використанням 8-ми бітної шини даних. Підключаються всі сигнали шини DB0-DB7. За цикл обміну передається байт інформації.

Із застосуванням 4х бітної шини даних. Підключаються лише 4 старші розряди DB4-DB7. Інформація передається по чотири біти за один такт шини.

Перший варіант забезпечує передачу даних на екран з більшою швидкістю. Другий – вимагає для підключення індикатора на 4 виводи менше. Безперечно, важливіше скоротити кількість виводів для підключення, ніж збільшити швидкість обміну. Тим більше, що LCD індикатори досить повільні пристрої з часом регенерації циклу 10-20 мс.

Схема підключення індикатора показано на рис. 5.14.

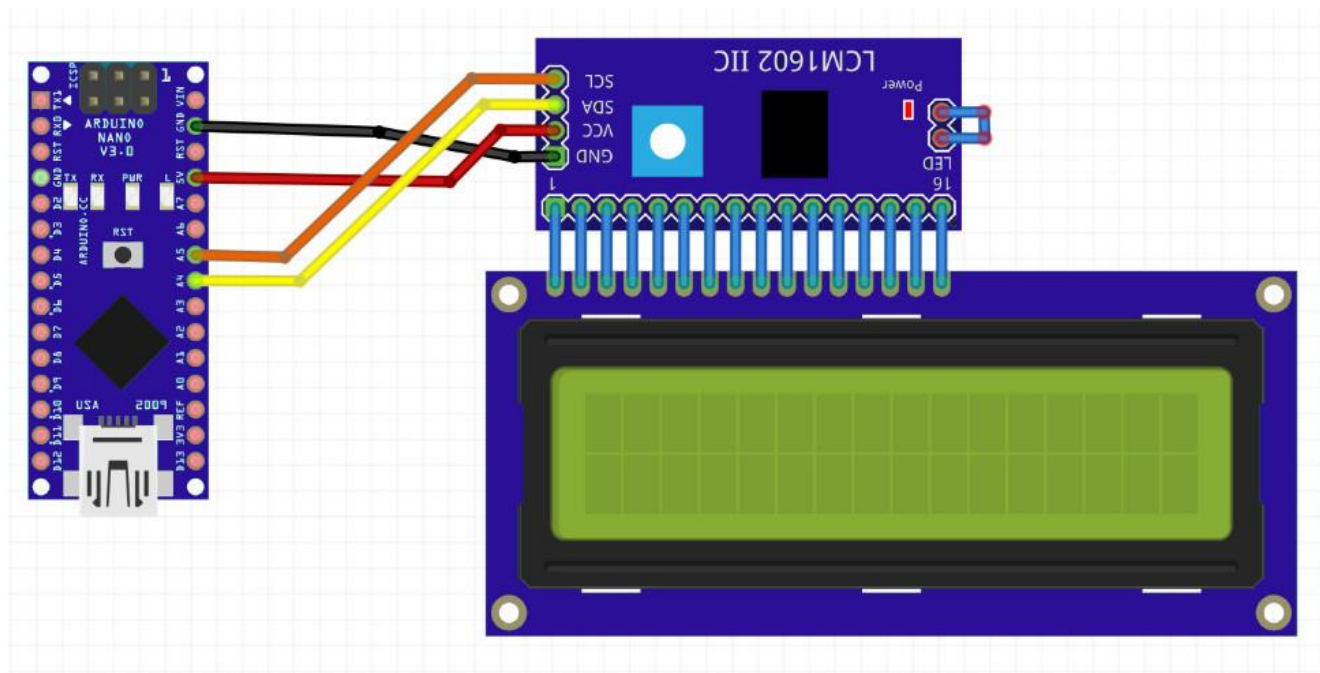


Рисунок 5.14 – Схема підключення індикатора

5.4.5 Загальна схема блоку вимірювання

Загальна схема блоку вимірювання зображена на рис. 5.15.

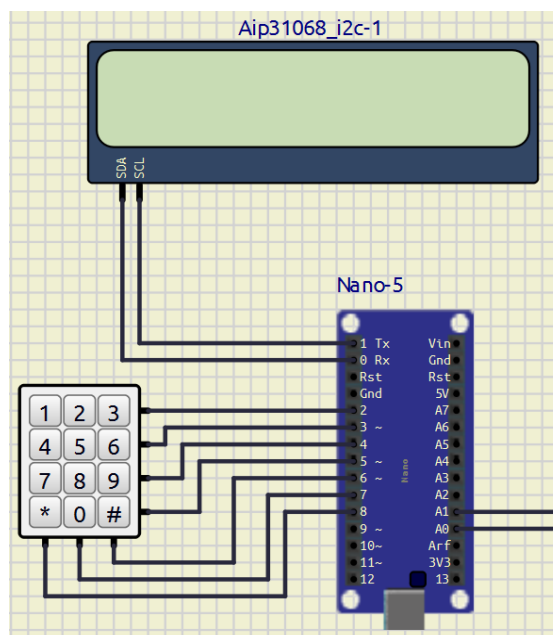


Рисунок 5.15 – Загальна схема блоку вимірювання

Блок вимірювання складається з центрального процесора в якості якого використано Arduino nano. Двух підсилювачів що перетворюють напругу і

струм у напругу від 0 до 5 В. Блоку індикації для зображення результатів вимірювання та клавіатури для подачі команд керування.

5.4.6 Методика визначення рівня дефектності

Для початку треба ввімкнути генератор з перемичкою 1000 Гц. Далі натиснути кнопку * та кнопку 1. Після цього макет пристрою зафіксує значення струму та напруги при подачі збудження на частоті 1000 Гц. Результати першого вимірювання відобразить індикатор. Далі ввімкнути генератор з перемичкою 10000 Гц. Після цього натиснути кнопку * та кнопку 2 при цьому прибор зафіксує значення струму та напруги при подачі збудження на частоті 10000 Гц. Результати другого вимірювання відобразить індикатор. Для отримання результату співвідношення 1 та 2 вимірювання натиснути кнопку * та кнопку 3. Індикатор відобразить результат розрахунку, який є діагностичним коефіцієнтом K_d . Для видалення даних треба натиснути кнопку # та відповідно 1 або 2. А для видалення усіх даних натиснути # натиснути *.

Приклади результатів вимірювання показано нижче.

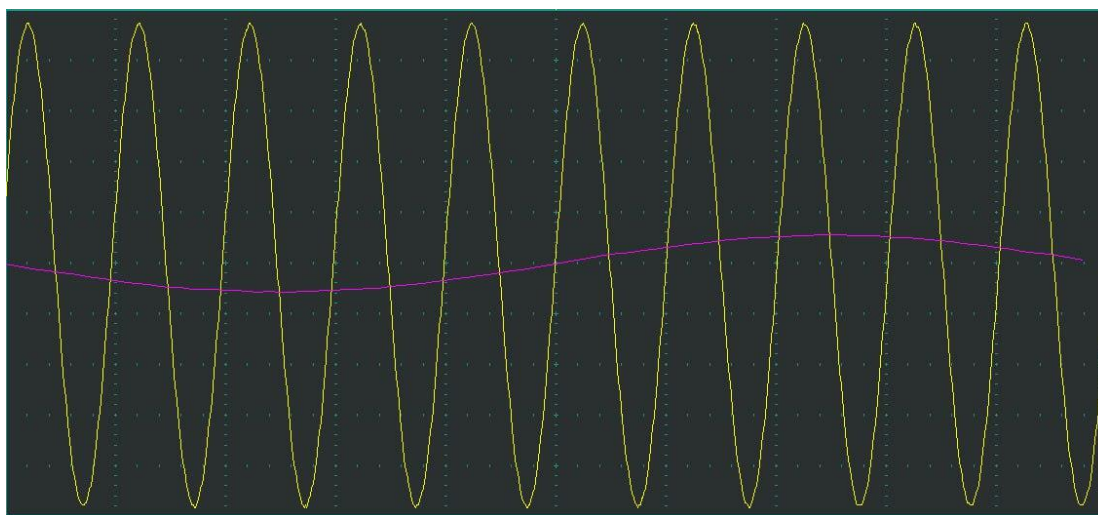


Рисунок 5.16 – Осцилограма дослідження якісного магнітопроводу

$$K_d = \frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 6,8, \quad (5.8)$$

Діагностичний коефіцієнт K_d більше 6, що відповідає якісному магнітопроводу з питомими втратами $P_{1,0/50}=2,5-4$ Вт/кг. Магнітопровід придатний до подальшого використання без зміни паспорту машини.

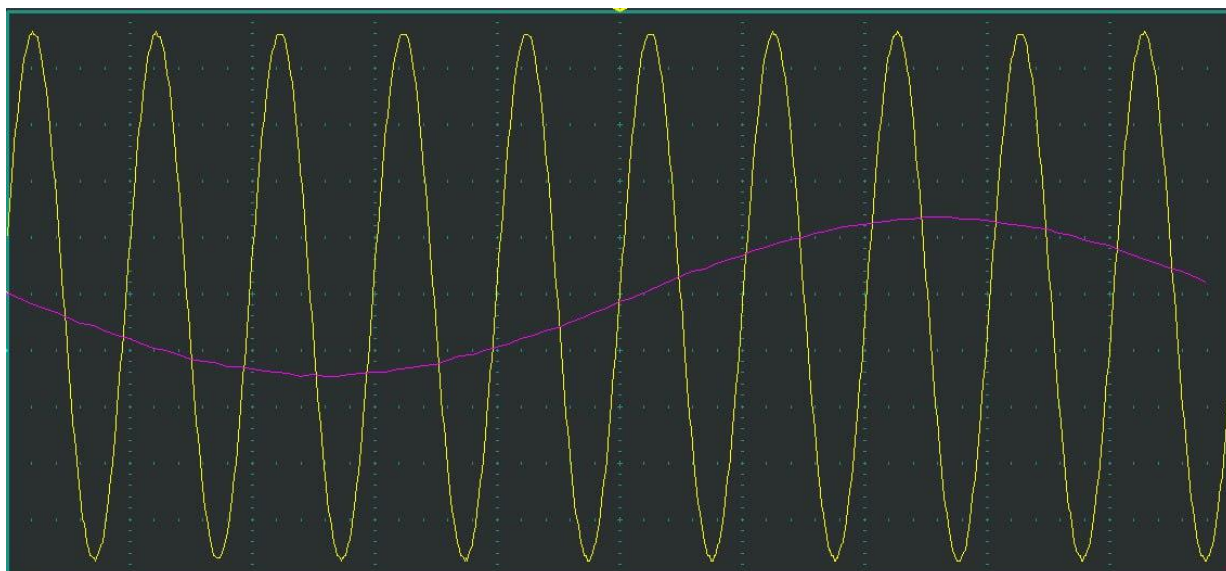


Рисунок 5.17 – Осцилограма дослідження магнітопроводу першого ступеню браку

$$K_d = \frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 5,75, \quad (5.9)$$

Діагностичний коефіцієнт $K_d=5,75$, що відповідає магнітопроводу першого ступеню браку з питомими втратами $P_{1,0/50}=4-8$ Вт/кг. Магнітопровід придатний до подальшого використання, рекомендується змінити паспортну номінальну потужність на 10-15%.

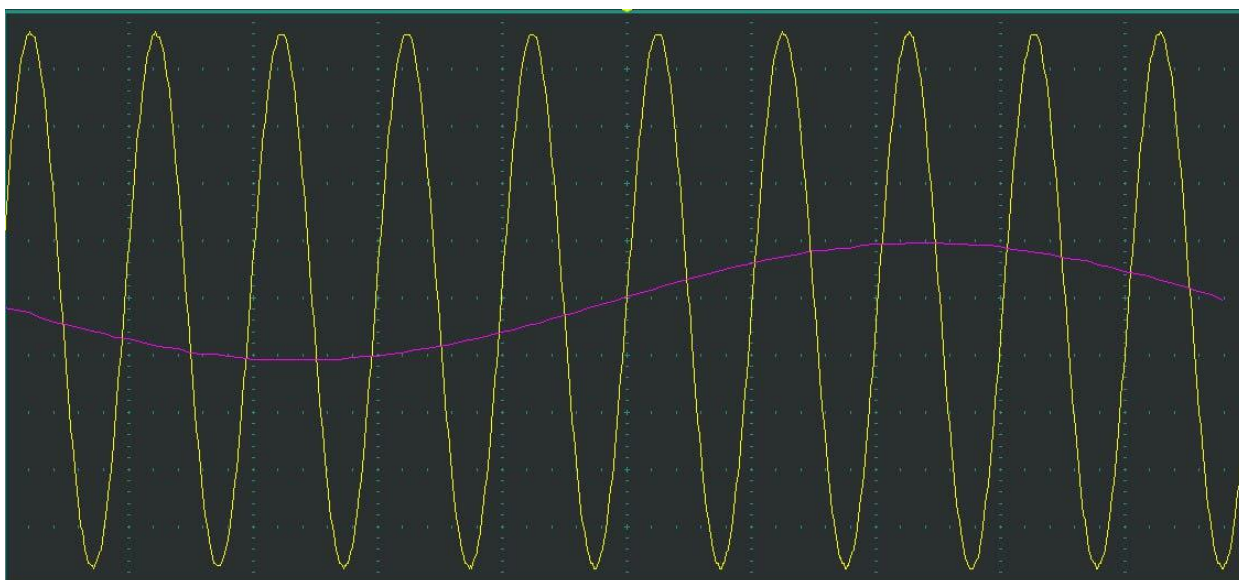


Рисунок 5.18 – Осцилограма дослідження магнітопроводу другого ступеню браку

$$K_d = \frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 4,6, \quad (5.10)$$

Діагностичний коефіцієнт $K_d=4,6$, що відповідає магнітопроводу другого ступеню браку з питомими втратами $P_{1,0/50}=8-12$ Вт/кг. Магнітопровід придатний до подальшого використання, рекомендується змінити паспортну номінальну потужність на 15-25% та переглянути режим роботи на полегшений.

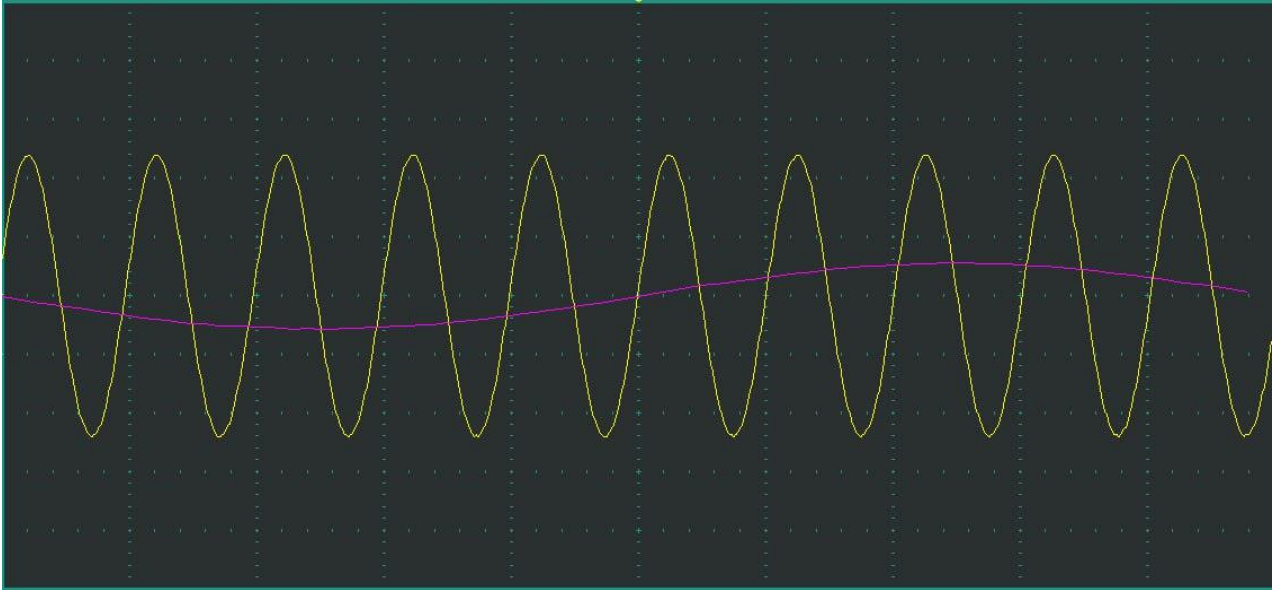


Рисунок 5.19 – Осцилограма дослідження аварійного магнітопроводу

$$K_d = \frac{U_{f10000}}{U_{f1000}} = 3,89, \quad (5.11)$$

Діагностичний коефіцієнт K_d менше 4, що відповідає аварійному магнітопроводу з питомими втратами $P_{1,0/50}$ більше 12 Вт/кг. Магнітопровід не придатний до використання, рекомендується відбраківка.

Висновки до Розділу 5

У даному розділі описано принцип роботи, будову та схеми, по яких зібрано макет для контролю стану міжлистової ізоляції магнітопроводу з використанням ГВЧ з підсилювачем, який побудовано на платформі Arduino Nano.

Проведено опис роботи макету та вказівок по використанню лабораторного стенду дослідження магнітопроводу з використанням цифрового осцилографу INSTRUSTAR isds205a.

Показані осцилограми бездефектних та дефектних магнітопроводів, що були отримані дослідним шляхом при вибраних тестових частотах 10 кГц і 1 кГц, та відповідні їм амплітуди напруг на контрольній обмотці, відношення яких дозволяють визначити діагностичний коефіцієнт K_d , який показує межі питомих втрат при $B_{1,0/50}$.

Вимірювання діагностичного коефіцієнту K_d за допомогою створеного макету дозволяє оцінити втрати в магнітопроводі різного рівня дефектності для чотирьох випадків:

1) Зелений колір – питомі втрати в магнітопроводі не перевищують 4 Вт/кг. Відповідає якісному магнітопроводу.

2) Жовтий колір – питомі втрати в магнітопроводі становлять від 4 до 8 Вт/кг. Магнітопровід першого ступеню дефектності. При його використанні потребується корекція паспортних даних зібраного на його основі двигуна.

3) Оранжевий колір – питомі втрати в магнітопроводі становлять від 8 до 12 Вт/кг. Відповідає магнітопроводу другого ступеню дефектності. При його використанні потребується суттєва зміна паспорту та перегляд режиму роботи.

4) Червоний колір – питомі втрати в магнітопроводі становлять більше 12 Вт/кг. Відповідає магнітопроводу аварійного стану. Рекомендується відбракувати магнітопровід.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертації вирішена актуальна наукова задача, спрямована на досягнення основної мети роботи – наукового обґрунтування та розробки науково-технічних заходів по підвищенню надійності електричних машин шляхом вдосконалення методів комплексної діагностики шихтованих магнітопроводів електричних машин.

Основним результатом роботи є створення методології та відповідної контрольно-вимірювальної апаратури діагностики та контролю якості шихтованих магнітопроводів, яка може використовуватись у виробничих та ремонтних підприємствах і не потребує особливих навичок обслуговуючого персоналу при її експлуатації.

Результати роботи дозволили зробити наступні висновки:

1. В результаті аналізу погіршення якості шихтованих магнітопроводів електричних машин та виникнення дефектів міжлистової ізоляції та послаблення пресування в процесі виробництва, експлуатації та ремонту доведено, що найбільш перспективним є напрям розробки комплексних діагностичних методів, що ґрунтуються на використанні мультифізичних процесів поєднання височастотних індукційних методів та одночасного ударного вібраційного впливу на пакет з подальшим аналізом отриманих діагностичних даних за допомогою інтелектуальних методів обробки інформації.

2. Показано, що розробка та впровадження ефективних методів контролю і діагностики шихтованих осердь ЕМ є важливим фактором при обґрунтуванні доцільності подальшого використання відремонтованих машин при економічній оцінці системи сервісного обслуговування в цілому на конкретних підприємствах.

3. Запропоновані та обґрунтовані індукційні методи діагностики шихтованих магнітопроводів ЕМ, що використовують оцінку параметрів швидкоплинних електромагнітних процесів для визначення інтенсивності вихрових струмів обумовлених порушенням міжлистової ізоляції осердь та

проаналізовано швидкоплинні процеси в контурах з феромагнетиками. Показано, що при наявності інтегральних дефектів існує суттєва пряма залежність між питомими втратами в сталі і параметрами височастотних процесів, які можуть служити діагностичними ознаками. Обґрунтована необхідність разом з оцінкою інтегральної якості міжлистової ізоляції оцінювати розвинутість та небезпеку локальних дефектів.

4. Проведено статистичний аналіз по результатам експериментів на реальних зразках який підтверджує теоретичні висновки про можливість оцінки питомих втрат в магнітопроводі по параметрам швидкоплинних процесів. Встановлено значну кореляцію між питомими втратами в пакеті з усередненою постійною часу загасання вихрових струмів та відношенням наведених ЕРС на частотах 1кГц і 10кГц.

5. В результаті статистичного аналізу встановлено значну кореляцію між питомими втратами в магнітопроводі $P_{1,0/50}$ та загальними магнітними втратами та температурами в обмотках в зібраних і працюючих машинах різної потужності та геометрії магнітопроводу. Показано, що в результаті визначення та аналізу діагностичних параметрів і пов'язаних з ними питомих втрат в осердях необхідно проводити післяремонтну паспортизацію з обґрунтованим зменшенням навантаження, зміни режиму роботи для забезпечення розрахункового ресурсу машини.

6. Статистично встановлена регресійна залежність та приведені довірчі інтервали для оцінки точності визначення діагностичних параметрів, що вимірюються. Це дало можливість визначення чотирьох ступенів дефектності магнітопроводів достатніх для прийняття рішення до подальшої їх експлуатації: бездефектний магнітопровід, магнітопровід першого і другого рівня дефектності та аварійний. Окремо доведено, що магнітопроводи з аварійним рівнем дефектності визначені як четвертий рівень повинні відбраковуватись і взагалі не підлягати ремонту.

7. В результаті математичного моделювання височастотних впливів на умовний магнітопровід перерізом 5х5 мм були розраховані і представлені

картини розподілу магнітних індукцій та вихрових струмів при напруженості магнітного поля 4000 А/м і частотах перемагнічування 50, 1000 і 10000 Гц. Були прораховані втрати на вихрові струми в магнітопроводах і співвідношення наведених ЕРС при вказаних частотах в дефектних і бездефектних магнітопроводах.

8. Визначена небезпека локальних дефектів міжлистової ізоляції, які не значно проявляються при інтегральній оцінці якості магнітопроводу, але можуть служити причиною суттєвих місцевих перегрівів окремих частин магнітопроводу з обмоткою при роботі машини. Запропоновано для виявлення локальних дефектів використання тепловізійного методу оцінки часової динаміки зміни градієнта температур в дефектній зоні в порівнянні з бездефектною.

9. Запропоновані та обґрунтовані наступні діагностичні ознаки якості шихтованих магнітопроводів:

1) Питомі втрати (Вт/кг) в магнітопроводі при фіксованому значенню індукції і частоті перемагнічування;

2) Відношення напруг в контрольній обмотці при перемагнічуванні дефектного та бездефектного магнітопроводу струмами частотного діапазону (від 1кГц до 100кГц);

3) Постійна часу загасання вихрових струмів (мс) в дефектних і бездефектних магнітопроводах при швидкоплинних процесах;

4) Динаміка нагріву локальних зон магнітопроводу при перемагнічуванні магнітопроводу промисловою частотою при високій індукції $B = 1.5-1.8 \text{ Тл } [^{\circ}\text{C}/_{\text{хв}}]$;

5) Кількість максимумів спектральної густини потужності при тестовому вібраційному ударному впливі. W^*_{sec} на інтервал частоти для магнітопроводу з достатнім та не достатнім рівнем пресування;

6) Амплітуда і частота максимумів спектральної густини потужності. W^*_{sec} і Hz;

7) Відношення постійної часу загасання вихрових струмів до амплітуди максимальної спектральної потужності [sec/W];

8) Кількість максимумів на кривій загасання вихрових струмів n ;

9) Постійна часу загасання вихрових струмів по відношенню до кількості максимумів спектральної густини потужності sec/ n .

10. Доведено, що рівень дефектності магнітопроводів, пов'язаний з питомими втратами на вихрові струми можливо моделювати шляхом збільшення електричної провідності матеріалу сталі, збільшенням товщини листів магнітопроводу та утворенням паразитних контурів вихрових струмів, що відповідають локальним і інтегральним дефектам.

11. Визначено найбільш інформативний показник, що свідчить про збільшення дефектності магнітопроводу а саме співвідношення наведеної напруги при частоті 10кГц до напруги при частоті 1кГц. Цей коефіцієнт чітко корелюється з втратами в магнітопроводі при перемагнічуванні з частотою 50Гц.

12. Результатом дослідження є доказ можливості створення простого і достатньо точного методу оцінки питомих втрат [Вт/кг] в магнітопроводі при $B_{1,0/50}$ шляхом вимірювання наведених ЕРС при встановлених частотах 10 і 1 кГц за допомогою контрольної обмотки в реальному зразку з визначенням їх співвідношення та відповідного рівня дефектності магнітопроводу. Ця методика дозволяє однозначно відбраковувати магнітопроводи з критичним рівнем інтегральних дефектів та магнітопроводи з розвинутими локальними дефектами, зони яких перевищують 15-20% від всього об'єму магнітопроводу.

13. Реалізація комплексного методу оцінки якості шихтованих магнітопроводів по стану міжлистової ізоляції та рівня розпушеності листів магнітопроводу дозволила обґрунтувати рекомендації по подальшому використанню осердя. При одночасному використанні швидкоплинних індукційних впливів та ударного вібраційного впливу при співвідношенні дефектів магнітопроводу різного походження надані наступні рекомендації:

- У випадку якісної міжлистової ізоляції і якісного пресування постійна часу загасання вихрових струмів залишається незмінною, 45-55 мкс, що відповідає нормальним питомим втратам 2,8-4 Вт/кг при $B_{1,0/50}$. Магнітопровід придатний до використання.

- У разі якісної ізоляції та при ослабленому пресуванні постійна часу згасання вихрових струмів залишається відносно постійною не більше 60 мкс, що відповідає питомим втратам 2,8-4 Вт/кг. Кількість максимумів спектральної густини потужності зростає до трьох та більше. Магнітопровід вимагає технологічних операцій з усунення надмірного розпушування.

- У разі істотно порушеної ізоляції та одночасному розпушуванні магнітопроводу, постійна часу згасання вихрових струмів становить 130-200 мкс, що відповідає питомим втратам 8-15 Вт/кг. За відсутності механічного ударного впливу постійна часу згасання вихрових струмів становить 90 мкс. В такому стані магнітопровід не придатний для експлуатації. У випадку коли постійна часу загасання менше 90 мкс необхідно прийняти міри по усуненню послаблення пресування та змінити паспорт зібраної машини згідно рекомендаціям, що надано в розділі 3.

14. Розроблено та виготовлено макетний зразок пристрою контролю стану міжлистової ізоляції шихтованих магнітопроводів, який дозволяє оцінювати діагностичний коефіцієнт Кд, пов'язаний з втратами в магнітопроводах різного рівня дефектності для чотирьох варіантів:

5) Зелений колір – питомі втрати в магнітопроводі не перевищують 4 Вт/кг. Відповідає якісному магнітопроводу.

6) Жовтий колір – питомі втрати в магнітопроводі становлять від 4 до 8 Вт/кг. Магнітопровід першого ступеню дефектності. При його використанні потребується корекція паспортних даних зібраного на його основі двигуна.

7) Оранжевий колір – питомі втрати в магнітопроводі становлять від 8 до 12 Вт/кг. Відповідає магнітопроводу другого ступеню дефектності. При його використанні потребується суттєва зміна паспорту та перегляд режиму роботи.

8) Червоний колір – питомі втрати в магнітопроводі становлять більше 12 Вт/кг. Відповідає магнітопроводу аварійного стану. Рекомендується відбракувати магнітопровід.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lammeraner Jiří, Stafel Miloš, “Vírivé proudy”, Státní nakladatelství technické literatury, Praha, pp. 1–27, 1968.
2. Таран В.П. Діагностування електроустаткування. – Київ: Техніка, 1983.
3. C. Steinmetz, “On the law of hysteresis (originally published in 1892),” Proceedings of the IEEE, vol. 72, no. 2, pp. 197–221, 1984..
4. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing and repair. IEEE Press: John Wiley & Sons, 2004. 389 p. DOI:10.1002/047168290X.
5. Титко А.И., Васьковский Ю.Н. Научные основы, методы и средства диагностики асинхронных двигателей. Київ, Ін-т електродинаміки НАН України, 2015. 300 с.
6. D. R. Turner, K. J. Binns, B. N. Shamsadeen, and D. F. Warne, “Accurate measurement of induction motor losses using balance calorimeter,” IEE Proceedings
7. Baranski M., Decner A., Polak A. Selected diagnostic methods of electrical machines insulation operating in industrial 122 conditions. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2014. No 5. Pp. 2047 -2054. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2014.004602>
8. Juvinal R. C., Marshek K. M. Fundamentals of machine component design. IEEE Press: John Wiley & Sons, 2006. vol. 8
9. Grubenik W., Robert J., Korbler B. A new approach in insulation systems for rotating machines. EIC EME Conference. Werndorf. Austria. 2006.
10. .Таран В. П. Диагностирование электрооборудования, Киев, Техніка, 1983.
11. T. Nakata, M. Nakano, and K. Kawahara, “Effects of stress due to cutting on magnetic characteristics of silicon steel,” IEEE Translation Journal on Magnetism in Japan, vol. 7, no. 6, pp. 453 –457, 1992.
12. A. J. Moses, N. Derebasi, G. Loisos, and A. Schoppa, “Aspects of the cut-edge effect stress on the power loss and flux density distribution in electrical steel sheets,” Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 215-216, pp. 690 – 692, 2000.
13. A. Kedous-Lebouc, B. Cornut, J. C. Perrier, P. ManfA~c , and T. Chevalier, “Punching influence on magnetic properties of the stator teeth of an induction motor,” Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 254-255, pp. 124 – 126, 2003.

14. A. Bousbaine, W. F. Low, and M. McCormick, "Novel approach to the measurement of iron and stray load losses in induction motors," IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 143, no. 1, pp. 78–86, 1996. ID, 1.

15. W. Arshad, T. Ryckebusch, F. Magnussen, H. Lendenmann, B. Eriksson, J. Soulard, and B. Malmros, "Incorporating lamination processing and component manufacturing in electrical machine design tools," in Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE, pp. 94 –102, 2007

16. D. R. Turner, K. J. Binns, B. N. Shamsadeen, and D. F. Warne, "Accurate measurement of induction motor losses using balance calorimeter," IEE Proceedings B Electric Power Applications, vol. 138, no. 5, pp. 233–242, 1991. ID: 1.

17. A. Schoppa, J. Schneider, C. D. Wuppermann, and T. Bakon, "Influence of welding and sticking of laminations on the magnetic properties of non-oriented electrical steels," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 254-255, pp. 367 – 369, 2003.

18. Jose Luis Oslinger, Luis Carlos Castro, "Correlation between capacitance and dissipation factor used for assessment of stator insulation", Intern'l Journal of Electrical Engg., vol. -6, no. 3, 2012.

19. A. Boglietti; Cavagnino A.; M. Lazzari (2007). Experimental High-Frequency Parameter Identification of AC Electrical Motors. Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Elettrica Industriale, C.so Duca degli Abruzzi, 24 10129 Torino, Italy.

20. J. Tang, Y. Yang, F. Blaabjerg, J. Chen, L. Diao, and Z Liu, "Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors: A Review", Energies, Vol.11, Art.No 2194, 2018.

21. Л. Г. Сидельников, и Д. О. Афанасьев, "Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации", Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело, No 7, pp. 127-137, 2013.

22. P. S. Bhowmik, S. Pradhan, and M. Prakash, "Fault Diagnostic and Monitoring Methods of Induction Motor: A Review," Int. J. Appl. Control., vol. 1, no. 1, pp. 1-18, 2013

23. Оборонов Т.Ю. Діагностування енергоефективності синхронного електропривода промислових установок протягом життєвого циклу / Т.Ю. Оборонов, О.М. Закладний, О.О. Закладний, В.О. Броницький // Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – No 36(1009). – С. 480-481.

24. Оборонов Т.Ю. Визначення технічного стану синхронного електропривода // ВІСНИК Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ», – 2014 – Вип. 25. – С.120-12

25. СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-104: 2014 "Методики оцінки технічного стану силових трансформаторів напругою від 35 кВ до 750 кВ" [Чинний від 2013-01-09]. Львів: ЛьвівКБ, 2014. 52 с.

26. Костерев М. В., Бардик Є. І., Літвінов В. В. Нечітко-статистичний підхід оцінювання експлуатаційної та режимної надійності об'єктів підсистем електроенергетичної системи. Наукові праці ДНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика», Донецьк. 2013, No1(14). С. 122–128

27. Kosterev M., Litvinov V. Development of fuzzy statistical method of optimal resource allocation among technical departments of an electric utility company. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016. Vol. 3/4 (81), P. 20–27.

28. Sherif S., Ghoneim M., Ward A. Sayed. Dissolved Gas Analysis as a Diagnostic Tools for Early Detection of Transformer Faults. Advances in Electrical Engineering Systems, 2012. Vol. 1, No 3. P. 152–156.

29. Левин В. М. Статистический метод распознавания дефектов в силовых трансформаторах при их техническом обслуживании по состоянию. Промышленная энергетика, 2013. No 8. С. 37–42.

30. Беспрозванных А. В., Кессаев А. Г., Мирчук И. А., Рогинский А. В. Выявление технологических дефектов в высоковольтной твердой изоляции электроизоляционных конструкций по характеристикам частичных разрядов. Електротехніка і електромеханіка. 2019. No 4. С. 53- 58. DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.08>.

31. V. J. Thottuvelil T.G. Wilson, and HA Owen Jr, "High-frequency measurement techniques for magnetic cores," Power Electron. IEEE Trans., vol. 5, no. 1, pp. 41–53, 1990.

32. B. Carsten, "Why the Magnetics Designer Should Measure Core Loss; with a Survey of Loss Measurement Techniques and a Low Cost, High Accuracy Alternative," in Proc. Power Convers. Intell. Motion, pp. 163–179, 1995.

33. M. Ibrahim and P. Pillay, "Novel equipment for the measurement of core losses in laminations for advanced machines," 2011 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2011, pp. 1231–1236, 2011.

34. Беспрозванных А.В., Бойко А.Н., Рогинский А.В. Влияние диэлектрического барьера на распределение электрического поля в высоковольтной изоляции электрических машин. Електротехніка і електромеханіка. 2018. No 6. С. 63-65. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.09>.

35. Sun H.-C., Huang Y.-C., Huang C.-M. Fault Diagnosis of Power Transformers Using Computational Intelligence: A Review. Energy Procedia, 2012. Vol. 14. P. 1226–1231

36. В. С. Петухов, «Диагностика состояния электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка напряжения и тока», Новости электротехники, No 49, с. 50-52, 2008.

37. В. С. Петухов, «Способ диагностики электродвигателя переменного тока и связанных с ним механических устройств»: патент RU, No 2339049 G 01R31/34, 2008.

38. J. Jianguo [et al], «Time frequency spectrum of line current during starting process - a tool for diagnosing failures in induction motor», Proc. ICEM, pp. 1261-1265, 1992.

39. Pollak A. The use of DC current to testing condition of the insulation of electrical machines. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. 2013. Vol. 1. P. 123-131.

40. «Діагностика несправностей бортового електрообладнання».[Електронний ресурс]. Доступ: https://v-tochku.com.ua/ua/manual/chery_tiggo_rukovodstvo_po_ekspluatacii_tehnicheskomu_obs_luzhivaniyu_i_remontu/diagnostika-bortovogo-elektrooborudovaniya-t11/.

41. Baranski M., Decner A., Polak A. Selected diagnostic methods of electrical machines insulation operating in industrial conditions. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical. 2014. Vol. 5. P. 2047 -2054. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004602.

42. IEEE Standards 1434. Guide for the measurement of partial discharges in AC electric machinery. IEEE: Park Avenue, New York, USA. 2014. 89 p.

43. Rotating electrical machines - Part 18 -31: Functional evaluation of insulation systems: Test procedures for form -wound windings. Thermal evaluation and classification of insulation systems used in rotating machines. Std. IEC 60 034 - 18 -31, 2012.

44. Jawad Faiz, Bashur Mahdi Ebrahimi, Bilal Akin, Hamid A. Toliyat, «Comprehensive eccentricity fault diagnosis in induction motors using finite element method», Proc. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, No. 3, 2009.

45. Bashir Mahdi Ebrahimi, Mehrrsan Javan Roshtkhari, «Advanced eccentricity fault recognition in permanent magnet synchronous motors using stator current signature analysis», IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, pp. 2041–2052, 2013.

46. О. О. Закладний, «Оцінка залишкового ресурсу асинхронного електроприводу», Вісник НТУУ «КПІ», серія Гірництво, вип. 19, с. 140– 148, 2010.

47. Беспрозванных А. В., Костюков И.А., Рогинский А.В. Характеристики корпусной электроизоляционной системы асинхронных электрических машин на резонансной частоте. Технічна електродинаміка. 2019. No 4. С. 48-55. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.048>.

48. «Диагностика технического состояния электромеханических систем».n [Электронный ресурс]. Доступ: http://elprivod.nmu.org.ua/ru/science/condition_diagnostics_ru.pdf.
49. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций: Навчальний посібник. Харків: НТУ "ХПІ", 2012. 108 с.
50. M. Zagirnyak, O. Bisikalo, O. Chorna, O. Chorny, «A Model of the Assessment of an Induction Motor Condition and Operation Life, Based on the Measurement of the External Magnetic Field», Proc. 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 17472097, 2018, с. 316-321, doi: 10.1109/MEES.2017.8248938.
51. Riera-Guasp, M.; Antonino-Daviu, J.A.; Capolino, G.-A. Advances in electrical machine, power electronic and drive condition monitoring and fault detection: State of the art. IEEE Trans. Ind. Electron. 2015, 62, 1746–1759
52. Riera-Guasp, M.; Antonino-Daviu, J.A.; Capolino, G.-A. Advances in electrical machine, power electronic and drive condition monitoring and fault detection: State of the art. IEEE Trans. Ind. Electron. 2015, 62, 1746–1759.
53. Frosini, L. Monitoring and diagnostics of electrical machines and drives: A state of the art. In Proceedings of the 2019 IEEE WEMDCD, Athens, Greece, 22–23 April 2019.
54. Zarri, L.; Gritli, Y.; Rossi, C.; Bellini, A.; Filippetti, F. Fault detection based on closed-loop signals for induction machines. In Proceedings of the 2015 IEEE WEMDCD, Torino, Italy, 26–27 March 2015.
55. A. Siddique, G. S. Yadava, B. Singh, «A review of stator fault monitoring techniques of induction motors», IEEE transactions on energy conversion, т. 20, No. 1, с. 106-114, 2005.
56. О. П. Чорний, В. К. Титюк, Н. М. Істоміна, В. А. Власенко, Математичні методи моделювання. Навчальний посібник, Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2016.
57. Wolkiewicz, M.; Tarchala, G.; Orłowska-Kowalska, T. Diagnosis of stator and rotor faults of an induction motor in closed-loop control structure. In Proceedings of the 2018 SPEEDAM, Amalfi, Italy, 20–22 June 2018.
58. M Zagirnyak et al., «A Model of the Assessment of an Induction Motor Condition and Operation Life, Based on the Measurement of the External Magnetic Field», Proc. 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), с. 316-321, 2018.
59. Wolkiewicz, M.; Tarchała, G.; Orłowska-Kowalska, T.; Kowalski, C.T. Online stator interturn short circuits monitoring in the DFOC induction-motor drive. IEEE Trans. Ind. Electron. 2016, 63, 2517–2528.
60. IEC 60034-18-42. Rotating Electrical Machines—Part 18-42: Partial Discharge Resistant Electrical Insulation Systems (Type II) Used in Rotating

Electrical Machines Fed from Voltage Converters—Qualification Tests; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2017.

61. Вайда І. Дослідження пошкоджень ізоляції / І. Вайда. Пер. з нім. під ред. І. В. Газевіта. – М.: Енергія, 1968. – 400 с.: іл.

62. Коллакот Р. Диагностика повреждений / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989

63. Загирняк М.В., Прус В.В., Невзлин Б.И. Оценка электрических машин и их серий с использованием функциональных зависимостей параметров от обобщенного линейного размера. Технічна електродинаміка. – 2013. – № 5. – С. 32–39. (Категорія «А», Scopus)

64. Марченко Б.Г. Линейные случайные процессы и их приложения/ Б. Г. Марченко, Л. Н. Щербак . – К. : Наук. думка, 1975. – 143 с.

65. Zagirnyak M., Prus V., Miroshnykova A. Ways of efficiency improvement of local diagnostic of the cores of induction motor stators. Przegląd Elektrotechniczny, 2015, R. 91 № 1. pp. 217–220. (Scopus)

66. Zagirnyak M., Prus V., Somka O., Dolezel I. Models of Reliability Prediction of Electric Machine Taking into Account the State of Major Structural Units. Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2015, Vol. 13 № 5. pp. 447–452. (Scopus).

67. Zagirnyak M., Prus V., Kushch I. Calculation of electromagnetic component vibration of brushed direct current machines with structural units defects. Przegląd Elektrotechniczny, 2017, R. 93. № 1. pp. 191–194. (Scopus)

68. Prus V., Nikitina A. The ways for the improvement of the information value of the methods for the assessment of the quality of electric energy as a part of its technical accounting systems. Przegląd Elektrotechniczny, 2019, R. 95. № 5. pp. 71–74. (Scopus, Web of Science)

69. Zagirnyak M., Prus V., Rodkin D., Zachepa Yu., Chenchevoi V. A refined method for the calculation of steel losses at alternating current. Archives of electrical engineering, 2019, vol. 68(2), pp.295–308. (Scopus, Web of Science)

70. Васьковський Ю.М., Гераскін О.А. Математичне моделювання та експериментальні дослідження вібрацій асинхронних двигунів. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – Вип 30. – С. 68–75

71. Васьковський Ю.М. Полевой анализ электрических машин – Киев: НТУУ «КПІ», 2007. – 190 с.

72. Шинкаренко В.Ф., Чумак В.В. Концепция теории генетической надежности электромеханических объектов. Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах», м. Севастополь, 17–20 вересня 2012. – Севастополь, 2012. – С. 3–7.

73. Zagirnyak M., Prus V., Shynkarenko V. The substantiation of the principles of taking into account the processes of electric machines aging. Materialy XXVIII

Symposium Srodowiskowe PTZE “Zastosowania elektromagnetyzmu w Nowoczesnych Technikach i Technologiach”. – Racławice, Poland, 2018. – pp. 363–365.

74. Julius S. Bendat, Allan G. Piersol, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, Wiley, Hoboken, N.J., 2010

75. 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. August 2023 Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 4, 6-15.

76. 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. June 2023 Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 3, 54-63.

77. Mykola Ostroverkhov, Vadim Chumack, Oksana Tymoshchuk, Mykhailo Kovalenko, Yevhen Ihnatiuk, Designing a voltage control system of the magnetoelectric generator with magnetic flux shunting for electric power systems, October 2022 Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 5(5 (119)):16-25

78. В.В. Чумак, О.Л. Тимошук, А.С. Стулішенко, Є.С. Ігнатюк «Оцінка рівня дефектності шихтованих магнітопроводів електричних машин високочастотними методами», Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету, №1, Том 9, 2019, Мелітополь

79. V.V. Chumack, O.V. Vyshnevskiy, A.S. Stulishenko, Y.S. Ihnatiuk, IMPROVED HIGH-FREQUENCY MODEL OF ASYNCHRON MOTOR, April 2019, No. 3 (2018): Power engineering: economics, technique, ecology, p.151-156

80. В.В. Чумак, М.А. Коваленко, Ю.О. Троценко. Є.С. Ігнатюк, А.С. Стулішенко, «RESEARCH OF PHYSICAL PROCESSES IN LAMINATED MAGNETIC CORES OF ELECTRIC MACHINES», Журнал –«Енергетика: економіка, технології, екологія», №4, 2021, Київ, с. 37-43,

81. В.В. Чумак, О.Л. Тимошук, А.С. Стулішенко, Є.С. Ігнатюк, АНАЛІЗ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ З ВСИПНИМИ ОБМОТКАМИ НА ОСНОВІ ЛАНЦЮГОВИХ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ, No. 4 (2018): Енергетика: економіка, технології, екологія, Київ, с.92-97

82. Kovalenko, M., Chumack, V., Kovalenko, I., Tkachuk, I., & Harford, A. (2023). Evaluation of magnetic gear parameters for autonomous wind installation with changing wind speed. Electrical Engineering and Power Engineering, (2), 32–42. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2023-2-4>

83. Chumack, Vadim and Bazenov, Volodymyr and Tymoshchuk, Oksana and Kovalenko, Mykhailo and Tsyvinskyi, Serhii and Kovalenko, Iryna and Tkachuk, Ihor, Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation (December 21, 2021). Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(5 (114), 56–62. doi:10.15587/1729-4061.2021.246601 , Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3993765>

84. Борисенко А. И. Охлаждение промышленных электрических машин / А. И. Борисенко, А. И. Костиков, А. И. Яковлев. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 296 с.

85. Trigeassou J.-C. Electrical Machines Diagnosis / J.-C. Trigeassou. — John Wiley & Sons, 2013. — 352 p.

86. Копылов И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. — М. : Высшая школа, 2000. — 607 с.

87. Rudenberg, R. (1950). Transient performance of electric power systems. McGraw-Hill.

88. Boubaker, N., Matt, D., Enrici, P., Nierlich, F., Durand, G. (2019). Measurements of Iron Loss in PMSM Stator Cores Based on CoFe and SiFe Lamination Sheets and Stemmed From Different Manufacturing Processes. IEEE Transactions on Magnetics, 55 (1), 1–9. doi: <https://doi.org/10.1109/tmag.2018.2877995>

89. Zhang, S., Ducharme, B., Takeda, S., Sebald, G., Uchimoto, T. (2021). Low-frequency behavior of laminated electric steel sheet: Investigation of ferromagnetic hysteresis loops and incremental permeability. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 538, 168278. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168278>

90. Aydin, U., Martin, F., Rasilo, P., Belahcen, A., Haavisto, A., Singh, D. et al. (2019). Rotational Single Sheet Tester for Multiaxial Magneto-Mechanical Effects in Steel Sheets. IEEE Transactions on Magnetics, 55 (3), 1–10. doi: <https://doi.org/10.1109/tmag.2018.2889238>

91. Zhao, H., Eldeeb, H. H., Zhang, Y., Zhang, D., Zhan, Y., Xu, G., Mohammed, O. A. (2021). An Improved Core Loss Model of Ferromagnetic Materials Considering High-Frequency and Nonsinusoidal Supply. IEEE Transactions on Industry Applications, 57 (4), 4336–4346. doi: <https://doi.org/10.1109/tia.2021.3072930>

92. Kulan, M. C., Baker, N. J., Liogas, K. A., Davis, O., Taylor, J., Korsunsky, A. M. (2022). Empirical Implementation of the Steinmetz Equation to Compute Eddy Current Loss in Soft Magnetic Composite Components. IEEE Access, 10, 14610–14623. doi: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3148593>

93. C. Steinmetz, “On the law of hysteresis (originally published in 1892),” Proceedings of the IEEE, vol. 72, no. 2, pp. 197–221, 1984.

94. Ostroverkhov, M., Chumack, V., Falchenko, M., Kovalenko, M. (2022). Development of control algorithms for magnetoelectric generator with axial magnetic

flux and double stator based on mathematical modeling. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (5 (120)), 6–17. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.267265>

95. V.M. Golovko, M.Ya. Ostroverkhov, M.A. Kovalenko, I.Ya. Kovalenko, D.V. Tsyplenkov Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Univer-sytetu. 2022, (5): 074 – 079. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074>.

96. Babak, V.P., Babak, S.V., Myslovych, M.V., Zaporozhets, A.O., Zvaritch, V.M. (2020). Methods and Models for Information Data Analysis. In: Diagnostic Systems For Energy Equipments. Studies in Systems, Decision and Control, vol 281. Springer, Cham.

97. Babak, V.P., Babak, S.V., Myslovych, M.V., Zaporozhets, A.O., Zvaritch, V.M. (2020). Technical Provision of Diagnostic Systems. In: Diagnostic Systems For Energy Equipments. Studies in Systems, Decision and Control, vol 281. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_4

98. Babak, V.P., Babak, S.V., Myslovych, M.V., Zaporozhets, A.O., Zvaritch, V.M. (2020). Principles of Construction of Systems for Diagnosing the Energy Equipment. In: Diagnostic Systems For Energy Equipments. Studies in Systems, Decision and Control, vol 281. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_1

99. Babak, V.P., Babak, S.V., Myslovych, M.V., Zaporozhets, A.O., Zvaritch, V.M. (2020). Simulation and Software for Diagnostic Systems. In: Diagnostic Systems For Energy Equipments. Studies in Systems, Decision and Control, vol 281. Springer, Cham.

100. Мислович М.В. Про деякі особливості побудови інтелектуальних багаторівневих систем технічної діагностики електроенергетичних об'єктів / М.В. Мислович, Р.К. Сисак // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 1. – С. 78-85.

101. Babak, V.P. et al. (2021). Models and Measures for the Diagnosis of Electric Power Equipment. In: Models and Measures in Measurements and Monitoring. Studies in Systems, Decision and Control, vol 360. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5_4

102. Гижко Ю. І. Елементи теорії та питання практичного застосування систем вібродіагностування рухомих вузлів електричних машин / Ю. І. Гижко, М. В. Мислович // Технічна електродинаміка. - 2015. - № 2. - С. 45-56. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/TED_2015_2_8.

103. N. Zablosky, S. Kovalchuk, A. Bereziuk, A. Zhylytsov and V. Gritsyuk, "The Numerical Analysis of Vibration Parameters in the Working Element of Twin-Screw ElectromechanicalHydrolyser for Poultry by-Products Processing," 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems

(MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598565.

104. Zablodskiy, M., Gritsyuk, V., Pliuhin, V., Biletskyi, I.: The surface characteristics features of the electromagnetic field of the rotor of a polyfunctional electromechanical converter. In: 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), pp. 1–5. IEEE, Mauritius (2021). <https://doi.org/10.1109/ICECCME52200.2021.9590872>

105. V. Gritsyuk, I. Nevliudov, M. Zablodskiy and N. Demska, "Numerical Calculation of the Electromagnetic Torque of an Induction Motor with a Hollow Rotor," 2021 IEEE XVIIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Polyana (Zakarpatty), Ukraine, 2021, pp. 124-129, doi: 10.1109/MEMSTECH53091.2021.9468106.

106. M. Zablodskiy, V. Gritsyuk, Y. Rudnev, R. Brozhko and O. Tymofieieva, "Analysis of 3D eddy current distribution in a hollow rotor of an electromechanical converter", IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology, pp. 561-564, April 2020.

107. Основи мікроелектроніки ВЕБ-ресурс: <https://arduino-school.blogspot.com/2012/08/arduino-duemilanove.html?view=mosaic>

108. Arduino Nano ВЕБ-ресурс: <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Nano>

109. Мыслович М., Чумак В., Укотич Е. Методика оценки качества шихтованных магнитопроводов электрических машин по фактическому состоянию // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – 2015. Vol. 17. No. 2. 63-69.;

Додаток А Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Головний інженер КП
«Міськводоканал» СМР м. Суми
Жуков О.М.
«...» вересня 2023 р.



АКТ

Впровадження результатів дисертаційної роботи

Асистента кафедри електромеханіки

КПІ ім. Ігоря Сікорського

Ігнатюка Євгена Станіславовича

Даним актом підтверджується, що розроблені Ігнатюком Євгеном Станіславовичем асистентом кафедри електромеханіки КПІ ім. Ігоря Сікорського системи контролю якості шихтованих статорних магнітопроводів електродвигунів свердловинних насосів при оцінці ступеню дефектності міжлистової ізоляції ламінованих осердь та визначенню рівня вібрації при ослабленні пресовки пакету реалізовано в ремонтному цеху нашого підприємства.

Представлена метрологічна база та вироблена на її основі апаратура високочастотного контролю міжлистової ізоляції, яка поєднується з одночасним впливом вібраційних сил дозволяє зробити висновки про можливість подальшого використання магнітопроводів в процесі капітального ремонту з заміною обмотки. Розроблена система контролю та створена на її основі апаратура виконана в рамках дисертаційної роботи Ігнатюка Євгена Станіславовича на здобуття ступеня доктора філософії дозволила суттєво зменшити збитки підприємства за рахунок обґрунтованої та малозатратної процедури відбраковки магнітопроводів аварійного стану та надання рекомендацій по подальшій експлуатації осердь статорів меншого у порівнянні з відбракованими рівнем дефектності.

Начальник

ремонтно-експлуатаційного управління



Кулик А.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ



Директор ТОВ «ЕНЕРСІС УКРАЇНА»

Андрій САХАНЕНКОВ

«7» серпня 2023 р.

АКТ

Впровадження результатів дисертаційної роботи

Асистента кафедри електромеханіки

КПІ ім. Ігоря Сікорського

Ігнатюка Євгена Станіславовича

Даний акт підтверджує, що методика оцінки стану якості шихтованих магнітопроводів електричних машин загального призначення, що розроблена в дисертаційній роботі Ігнатюка Євгена Станіславовича асистента кафедри електромеханіки «КПІ ім. Ігоря Сікорського» впроваджена у виробництві підприємства при пусконаладжувальних і електромонтажних роботах при вхідному та вихідному контролі електроприводів.

Методична база, що була представлена, та прилади для високочастотного контролю міжлистової ізоляції осердь, дозволяють зробити висновки про можливість подальшого використання магнітопроводів асинхронних двигунів. Створена засоби контролю та відповідні пристрої були розроблені в межах дисертаційної роботи автора для отримання ступеня доктора філософії. Це дозволило значно зменшити час та витрати на перевірку та налаштування електропривідних систем через обґрунтований та малозатратний процес виявлення та відбракування бракованих магнітопроводів.

Начальник виробничого відділу

Клименко О.І