

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЧОРНА ОЛЬГА АНАТОЛІЇВНА

УДК 004.891.3:621.313.34:519.718:537.531

ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ КОМПЛЕКСНОГО МОНІТОРИНГУ
СТАНУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НА ОСНОВІ ЗОВНІШНІХ ОЗНАК**

05.13.06 – інформаційні технології

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

_____ О. А. Чорна

Науковий керівник:

Бісікало Олег Володимирович
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2021

АНОТАЦІЯ

Чорна О. А. Інформаційна технологія комплексного моніторингу стану асинхронних двигунів на основі зовнішніх ознак. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 «Інформаційні технології». – Вінницький національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, Вінниця, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання розробки інформаційної технології комплексного моніторингу стану асинхронних двигунів безпосередньо під час виконання технологічного процесу на основі зовнішніх ознак їх роботи, що дозволить проводити попередню діагностику двигуна з визначенням його поточного стану та видачою рекомендацій про можливість і доцільність його подальшої експлуатації.

В роботі проаналізовані апаратні і програмні засоби моніторингу та запропоновано інформаційну технологію на основі зовнішніх ознак роботи двигуна. Створена класифікація зовнішніх ознак, до якої віднесені температура нагріву елементів двигуна, вібрація корпусу, звукові показники роботи, індукція магнітного поля, яку виміряно на поверхні статора АД.

Обґрунтовано, що на підставі виміряних зовнішніх ознак можливо визначити поточний стан двигуна. Отримала експериментальне підтвердження необхідність розгляду проблеми цінки ресурсу зношеного або такого, що піддавалося ремонту електромеханічного обладнання. Складені математичні моделі і проведене математичне моделювання несиметричних за параметрами асинхронних двигунів за допомогою програми FEMM. Моделювання показало нерівномірний розподіл індукції магнітного поля, що свідчить про наявність внутрішніх дефектів обмоток.

Отримані в результаті проведення експериментальних досліджень картини індукції магнітного поля навколо асинхронних двигунів якісно співпадають з результатами математичного моделювання і мають різко

виражену нерівномірність, що несе значиму інформацію про технічний стан двигуна. Наявність пошкоджень спотворює загальну картину розподілу індукції магнітного поля на поверхні статора АД – в зоні пошкоджень зменшуються її значення. Якісний характер спотворення зберігається при зміні частоти напруги живлення двигуна та напрямку його обертання.

На основі отриманих результатів розроблені основні принципи аналізу зовнішнього магнітного поля двигунів, інтерпретації отриманих результатів і судження про наявність в двигуні дефектів. Розроблено метод оцінки стану АД на основі визначення залишкового відносного терміну експлуатації ізоляції обмоток шляхом вимірювання індукції магнітного поля на поверхні статора двигуна. На основі Буземанової метрики розроблені критерії оцінювання ступеню несиметрії двигуна, перегріву обмоток статора та зниження тривалості життя їх ізоляції. Встановлена лінійна залежність між терміном життя ізоляції обмоток та відносним значенням Буземанової дистанції. Отримані результати дозволяють оцінити термін експлуатації асинхронного двигуна.

Розвинуто методи моніторингу стану АД, які дозволяють встановити момент зміни параметрів двигуна, і, відповідно, погіршення його стану, на основі контролю зміни статистичних характеристик вимірюної індукції магнітного поля. Представлений аналіз вимірюної індукції магнітного поля на поверхні статору АД, за даними моніторингу, відображає можливість виділення сигналу і реєстрацію міни параметрів двигуна для прогнозування його стану, терміну та доцільності подальшої експлуатації. Використані для аналізу функції Changepoint та CUSUM з різним ступенем точності та швидкодії дозволяють визначити точку зміни параметрів.

На основі проведеного аналізу систем діагностики електричних машин та з метою реалізації принципу «оцінки за станом», для попередньої діагностики стану АД прийнято концепцію моніторингу зовнішніх ознак режиму роботи електричних машин. Запропонована методика добору діагностичних параметрів, що ґрунтується на критерії максимальної індивідуальності, при цьому добір діагностичних параметрів, що дозволяють вирішити задачу

розпізнавання, здійснюється методом послідовних доповнень. Спочатку вибирається параметр, що доповнює, комбінаційна інформативність якого в сполученні з базовим виявляється максимальною. Потім до отриманої бази додається третій параметр і т.д. до повного розпізнавання.

Побудовано модульну структуру інформаційної технології комплексного моніторингу стану АД на основі зовнішніх ознак, проведено формалізацію інформаційних потоків функціональної діагностики та архітектури системи моніторингу. Внаслідок програмної реалізації інформаційної технології комплексного моніторингу побудовано діагностичну систему, що дозволяє самонавчатися на основі знань експертів та надає практичні рекомендації з ремонту електричних двигунів для обслуговуючого персоналу.

Визначено величину економічного ефекту з упровадженням інформаційної технології комплексного моніторингу стану асинхронних двигунів на основі зовнішніх ознак. Розрахунки виконані за умов впровадження інформаційної технології моніторингу і оцінки експлуатаційного ресурсу роботи електричних машин на підприємствах металургійної, гірничо-видобувної, нафтопереробної промисловості та транспорту для асинхронних двигунів середньої потужності. На підставі розрахунку, річний економічний ефект на 500 асинхронних двигунів середньої потужності – 160...250 кВт становить 1160 тис. грн з терміном окупності три роки. Економічний ефект запропонованої інформаційної технології формується за рахунок запобігання аварійності шляхом своєчасних технічних обстежень та профілактичних заходів.

Наукова новизна отриманих у роботі результатів:

1. Набула подальшого розвитку експериментальна модель несиметричних за параметрами асинхронних двигунів, яка враховує нерівномірність розподілу індукції магнітного поля на поверхні статора двигуна, що дозволяє отримати значиму інформацію про технічний стан асинхронного двигуна, зокрема про наявність внутрішніх дефектів обмоток.

2. Уперше отримано аналітичну модель стану асинхронного двигуна у вигляді лінійного рівняння відносного залишкового ресурсу ізоляції від коефіцієнту, розрахованого на основі Буземанової метрики, що дозволяє врахувати зміну розподілу індукції магнітного поля на поверхні статора асинхронного двигуна при виникненні параметричної несиметрії його обмоток.

3. Удосконалено метод моніторингу асинхронних двигунів, який відрізняється від існуючих тим, що добір діагностичних параметрів ґрунтується на критерії максимальної індивідуальності, причому параметр максимальної індивідуальності приймається в якості базового, а добір діагностичних параметрів здійснюється методом послідовних доповнень, що дозволяє вирішити задачу діагностування на основі зовнішніх ознак режиму роботи двигунів.

4. Уперше отримано інформаційну технологію комплексного моніторингу асинхронних двигунів, яка відрізняється від існуючих застосуванням моделі стану асинхронного двигуна на основі Буземанової метрики та методу моніторингу на основі зовнішніх ознак режиму роботи двигунів, що дозволяє за рахунок попередньої діагностики підвищити ефективність їх експлуатації на основі актуальної інформації про поточний стан і рекомендацій щодо доцільності подальшої експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено критерій оцінки відхилення розподілу магнітної індукції на основі Буземанової метрики, який дозволяє за вимірними значеннями індукції на поверхні статора асинхронного двигуна робити висновок про його поточний стан.

2. Отримано методику аналізу зовнішнього магнітного поля двигунів і інтерпретації отриманих результатів для судження про наявність в двигуні дефектів.

3. На основі Буземанової метрики розроблені критерії оцінювання ступеню несиметрії двигуна, перегріву обмоток статора та зниження тривалості життя їх ізоляції. Встановлена лінійна залежність між терміном життя ізоляції

обмоток та відносним значенням Буземанової дистанції. Отримані результати дозволяють оцінити термін експлуатації асинхронного двигуна.

4. Отримано алгоритмічне забезпечення діагностичної системи, що дозволяє автоматично інтерпретувати результати діагностики. Комплекс алгоритмів реалізовано у вигляді програмного забезпечення, що дозволяє використовувати результати дослідження на практиці.

5. Розроблено методику аналізу вимірних сигналів, яка забезпечує можливість виділення в сигналі зміни параметрів двигуна для прогнозування його стану, терміну та доцільності подальшої експлуатації. На основі функції Changepoint та методу кумулятивних сум CUSUM, методика дозволяє з різним ступенем точності та швидкодії визначити точку часу зміни параметрів.

Результати роботи впроваджено у навчальний процес Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського при підготовці фахівців, за першим та другим освітнім рівнем, спеціальностей 123 – Комп’ютерна інженерія, 141 – Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка, 151 – Автоматизація і комп’ютерно-інтегровані технології у вигляді методичного забезпечення для проведення лабораторних і практичних робіт; у проектні та організаційні рішення з обстеження потужних високовольтних асинхронних двигунів цеху виробництва окатишів ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат» (м. Горішні Плавні).

Ключові слова: інформаційна технологія, оцінювання стану, асинхронний двигун, комплексний моніторинг, діагностична система, зовнішні ознаки.

ABSTRACT

Chorna O. Information technology of complex monitoring of induction motor states on basis of indirect stories. – Qualification scientific work as a manuscript.

The dissertation is devoted to the decision of an actual scientific problem of development of information technology of complex monitoring of a condition of induction motors directly during performance of technological process on the basis of external signs of their work.

The dissertation for a scientific degree of the candidate of technical sciences on the specialty 05.13.06 "Information technologies". - Vinnytsia National Technical University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Vinnytsia, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific problem of development of information technology of complex monitoring of the condition of induction motors directly during the performance of technological process on the basis of external signs of their work. That will allow preliminary diagnostics of the engine with determination of its current condition and issuance of recommendations on the possibility and feasibility of its further operation.

The hardware and software of monitoring are analyzed in the work and the information technology on the basis of external signs of work of the engine is offered.

The classification of external signs including the heating temperature of elements of the engine, vibration of the case, sound indicators of work, induction of a magnetic field which is measured on a surface of a stator of BP is created.

It is substantiated that on the basis of the measured external signs it is possible to determine the current state of the engine.

The experimental confirmation of the need to consider the problem of valuation of worn-out or repaired electromechanical equipment is received.

Mathematical models are made and mathematical modeling of asymmetric asynchronous motors by means of the FEMM program has been carried out.

The simulation showed an uneven distribution of magnetic field induction, which indicates the presence of internal defects of the windings.

The patterns of magnetic field induction around induction motors has been obtained as a result of experimental research coincide qualitatively with the results of mathematical modeling and have a pronounced non-uniformity, which carries significant information about the technical condition of the motor. The presence of damage distorts the overall picture of the distribution of the induction of the magnetic field on the surface of the stator BP - in the area of damage its values decrease. The qualitative nature of the distortion is preserved by changing the frequency of the motor supply voltage and the direction of its rotation.

Based on the obtained results, the basic principles of analysis of the external magnetic field of motors, interpretation of the obtained results and judgments about the presence of defects in the engine have been elaborated. The method for estimating the state of the BP based on the determination of the residual relative service life of the winding insulation by measuring the induction of the magnetic field on the surface of the motor stator has been developed. Based on the Buzeman metric, criteria for estimating the degree of motor asymmetry, overheating of the stator windings and reducing the lifespan of their insulation have been worked out. A linear relationship between the lifetime of the winding insulation and the relative value of the Buzeman distance has been established. The obtained results allow to estimate the useful life of the induction motor.

Methods for monitoring the state of BP, which allow to establish the moment of change of engine parameters, and, accordingly, the deterioration of its state, based on the control of changes in the statistical characteristics of the measured magnetic field induction have been worked out. The presented analysis of the measured induction of the magnetic field on the surface of the stator of the BP, according to the monitoring data, reflects the possibility of signal extraction and registration of the motor parameters to predict its condition, term and feasibility of further operation. The presented analysis of the measured induction of the magnetic field on the surface of the stator of the BP, according to the monitoring data, reflects the possibility of

signal extraction and registration of the motor parameters to predict its condition, term and feasibility of further operation. The Changepoint and CUSUM functions used for analysis with different degrees of accuracy and speed allow to determine the point of change of parameters.

Based on the analysis of diagnostic systems of electric machines and in order to implement the principle of "assessment of the state" for the preliminary diagnosis of the state of hypertension the concept of monitoring the external signs of the electric machines has been adopted. The method of selection of diagnostic parameters, based on the criteria of maximum individuality, while the selection of diagnostic parameters that allow to solve the problem of recognition, is carried out by the method of successive additions has been proposed. First, a complementary parameter is selected, the combinational informativeness of which in combination with the basic is the maximum. Then the third parameter is added to the received base, etc. to full recognition.

The modular structure of information technology of complex monitoring of BP condition on the basis of external signs has been constructed, the formalization of information flows of functional diagnostics and architecture of the monitoring system has been carried out. As a result of software implementation of information technology of complex monitoring, a diagnostic system has been built, which allows self-study based on the knowledge of experts and provides practical recommendations for the repairing of electric motors for service personnel.

The magnitude of the economic effect with the introduction of information technology for integrated monitoring of asynchronous motors based on external features has been determined. The calculations have been performed under the conditions of introduction of information technology of monitoring and evaluation of the service life of electric machines at the enterprises of metallurgical, mining, oil refining and transport industries for medium power induction motors. Based on the calculation, the annual economic effect on 500 asynchronous motors of medium power - 160 ... 250 kW is 1160 thousand UAH with a payback period of three years.

The economic effect of the proposed information technology is formed by preventing accidents through timely technical inspections and preventive measures.

Scientific novelty of the results obtained in the work:

1. An experimental model of asymmetric induction motors has been further developed, which takes into account the uneven distribution of magnetic field induction on the motor stator surface, which allows to obtain significant information about the technical condition of the induction motor, in particular the presence of internal winding defects.
2. For the first time an analytical model of the state of an induction motor in the form of a linear equation of relative residual insulation resource from the coefficient calculated on the basis of Buzeman metric, which allows to take into account the change of magnetic field induction distribution on the stator surface of an induction motor has been got.
3. The method of monitoring induction motors has been improved, which differs from the existing ones in that the selection of diagnostic parameters is based on the criterion of maximum individuality, and the parameter of maximum individuality is taken as the base, and the selection of diagnostic parameters is carried out by engine operation.
4. For the first time the information technology of complex monitoring of induction motors has been obtained, which differs from the existing ones by using the state model of an induction motor based on Buzeman metric and the method of monitoring based on external signs of motor operation mode. and recommendations on the feasibility of further operation.

The practical significance of the results:

1. The criterion for estimating the deviation of the distribution of magnetic induction on the basis of the Buzeman metric has been developed, which allows to draw a conclusion about its current state from the measured values of induction on the stator surface of an induction motor.

2. The method of analysis of the external magnetic field of motors and interpretation of the obtained results to judge the presence of defects in the motor has been obtained.
3. Based on the Buzeman metric, criteria for estimating the degree of motor asymmetry, overheating of the stator windings and reducing the lifespan of their insulation have been developed. A linear relationship between the lifetime of the winding insulation and the relative value of the Buzeman distance has been established. The obtained results allow to estimate the service life of asynchronous motors.
4. The algorithmic support of the diagnostic system has been obtained, which allows to interpret automatically the diagnostic results. The set of algorithms is implemented in the form of software that allows to use the results of research in practice.

The technique of the analysis of the measured signals which provides an opportunity of allocation in a signal of change of parameters of the engine for forecasting of its condition, term and expediency of the further operation has been developed. Based on the Changepoint function and the CUSUM method of cumulative sums, the technique allows to determine the point of change of parameters with different degrees of accuracy and speed.

The results have been implemented in the educational process of Kremenchug Mykhailo Ostrogradsky National University in the training of specialists at the first and second educational level, specialties 123 - Computer Engineering, 141 - Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, 151 - Automation and computer-integrated technologies in the form of methodical support for carrying out laboratory and practical works; in design and organizational solutions for inspection of powerful high-voltage asynchronous motors of the pellet production plant of PJSC "Poltava Mining and Processing Plant" (Horishni Plavni).

Key words: information technology, evaluation of the state of the induction motor, monitoring, diagnostic system, indirect signs.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] O. Chorna, M. Guchenko, O. Bisikalo, O. Chorny, A. Artemenko, «Experimental Study of Information Technology of Integrated Induction Motors Condition Monitoring», *World Science*. 6(58), Vol.1. 2020 doi: 10.31435/rsglobal_ws/30062020/7098
- [2] О. А. Дурницкая, В. Ю. Ракитин, «Экспертная система определения неисправностей электрических машин», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2009, №. 4, с. 39-42.
- [3] О. А. Дурницкая, Е. А. Карпенко, В. А. Огарь, «Расширение функциональных свойств экспертной системы определения неисправностей электрических машин» *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика*, 2010, № 28, с. 546-548.
- [4] Б. М. Горкунов, О. А. Чорна, А. А. Тищенко, «Розробка алгоритмічного і програмного забезпечення діагностичної системи оцінки стану електродвигунів на основі зовнішніх діагностичних показників», *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПИ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Автоматика та приладобудування*, 2016, № 15(1187), с. 12-15.
- [5] Н. В. Зачепа, О. А. Чорна, Д. В. Резнік, К. Д. Ніколаєв, І. А. Луценко, «Дослідження поширення магнітного поля асинхронної машини в умовах навчально-виробничих лабораторій», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*, 2017, 3(39), с. 45-52.
- [6] M. Zagirnyak, V. Nykyforov, O. Sakun, O. Chorna, «The industrial electrical equipment screened magnetic fields effect on model organisms», *Proc. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 18323434, 2017, с. 380-383, doi: 10.1117/12.2229083.
- [7] 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, c. 316-321, doi: 10.1109/MEES.2017.8248938.
- [8] O. Chorna, O. Chorny, V. Tytiuk, «Identification of Changes in the Parameters of Induction Motors during Monitoring by Measuring the Induction of A Magnetic Field on the Stator Surface», *Proc. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*, (MEES), 2019, c. 150-153, doi: 10.1109/MEES.2019.8896554
- [9] N. Zachepa, O. Chorna, D. Rieznik, «Research Levels and Zones Spatial Propagation of the Magnetic Field of the Induction Motor», *Proc. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*, (MEES), 2019, c. 158-161, doi: 10.1109/MEES.2019.8896439
- [10] B. Gorkunov, S. Lvov, Y. Borysenko, V. Shamardina, Saliba Abdel Nour, O. Chorna, «Application of Electromagnetic Transducer for Noncontact Monitoring of Shaft Torque in Electromechanical Systems», *Proc. 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice*, (PAEP), 2020, 9240804, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240804
- [11] V. Nykyforov, O. Sakun, M. Yelizarov, O. Chorna, «Measurement of Magnetic Induction of an Induction Motor Magnetic Field on the Basis of Biological Express Systems», *Proc. 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice*, (PAEP), 2020, 9240902, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240902.
- [12] О. А. Дурницкая, В. Ю. Ракитин «Экспертная система определения неисправностей электрических машин по внешним признакам», *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації* : збірник наукових праць VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2010, с. 386-387.
- [13] О. А. Чорна, Н. Л. Сохін, «Комп'ютерна тестова програма з розширеними можливостями», *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних*

- системах. Наука, освіта і практика: наукове видання, №1/2011, с. 98–99, 2011.*
- [14] К. С. Панченко, О. А. Черная, О. А. Сакун, Бердай Абдельмажид, «Экспериментальные измерения магнитного поля электромеханических объектов», *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації* : збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2013, с. 114–115.
- [15] О. В. Бісікало, О. А. Чорна, О. П. Чорний, «Комп'ютерна тестова програма з розширеними можливостями», *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика* : наукове видання, №1/2017, с. 101–104.
- [16] О. А. Чорна, Д. В. Рєзнік, Н. В. Зачепа, О. Ю. Кісліцин, Д. О. Кулік, Д. О. Прошин, «Чисельне моделювання розподілу індукції зовнішнього магнітного поля асинхронного двигуна», *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації* : збірник наукових праць XVI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2018, с. 91-92.
- [17] О. А. Чорна, Д. В. Рєзнік, А. І. Реуцька, Н. В. Зачепа, «Експериментальні дослідження параметрів шуму при вимірюванні індукції магнітного поля», *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації* : збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2019, с. 131-134.
- [18] О. А. Чорна, К. С. Панченко, «Исследование распределения индукции магнитного поля переменного тока промышленной частоты снаружи асинхронных двигателей», свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 70361, 28.04.2015.
- [19] О. А. Чорна, В. Ю. Ракітін, А. О. Гладкий, Є. О. Карпенко, «Експертна система діагностики електричних двигунів за зовнішніми ознаками

режиму їх роботи», свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 36743, 31.01.2011.

- [20] О. А. Чорна, О. В. Бісікало, О. П. Чорний, «Оцінка ресурсу роботи асинхронного двигуна на основі вимірювань зовнішнього магнітного поля», свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 78794, 04.05.2018.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ	28
1.1 Огляд методів і засобів оперативної діагностики асинхронних двигунів	28
1.2 Промислові системи контролю стану асинхронних двигунів	38
1.3 Класифікація діагностичних ознак.....	49
1.4 Постановка задачі досліджень	57
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ІНДУКЦІЇ ЗМІННОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	58
2.1 Моделювання індукції магнітного поля на поверхні статора АД	58
2.2 Характеристики обладнання та умови проведення експериментів	72
2.3 Обґрунтування необхідної точності вимірювань	75
2.4 Експериментальні дослідження індукції магнітного поля симетричних і несиметричних двигунів.....	82
2.5 Висновки по розділу 2	98
РОЗДІЛ 3 ОЦІНКИ СТАНУ ТА ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	100
3.1 Модель оцінки стану та терміну експлуатації асинхронного двигуна на основі вимірювання зовнішнього магнітного поля	100
3.2 Виявлення зміни параметрів асинхронного двигуна при його моніторингу шляхом вимірювання індукції магнітного поля на поверхні статора	112
3.3 Висновки по розділу 3	129

РОЗДІЛ 4 ПОБУДОВА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОГО МОНІТОРИНГУ СТАНУ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ	131
4.1. Декомпозиція процесів моніторингу стану електричних двигунів на основі зовнішніх ознак	131
4.2 Модульна структура інформаційної технології	135
4.3 Формалізація інформаційних потоків функціональної діагностики	137
4.4 Формалізація архітектури системи моніторингу	143
4.5 Програмна реалізація інформаційної технології комплексного моніторингу	145
4.6 Висновки по розділу 4	150
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І ТЕХНІКО- ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОГО МОНІТОРИНГУ СТАНУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	152
5.1. Експериментальні дослідження інформаційної технології	152
5.2 Техніко-економічне оцінювання результатів впровадження інформаційної технології.....	161
5.3 Висновки по розділу 5	163
ВИСНОВКИ.....	165
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	168
ДОДАТКИ.....	183
Додаток А Алгоритм роботи діагностичної системи	184
Додаток Б Акти впровадження дисертаційної роботи	188
Додаток В Свідоцтва на авторські твори.....	191
Додаток Г Список опублікованих праць за темою дисертації	194

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АД	—	асинхронний двигун
АЦП	—	аналого-цифровий перетворювач
БД	—	база даних
БП	—	база правил
ДС	—	діагностична система
ЕМС	—	електромеханічна система
ЕМП	—	електромагнітне поле
ЕМ	—	електрична машина
ЕМС	—	електромеханічна система
ЕП	—	електропривод
ЗМП	—	зовнішнє магнітне поле
ІМП	—	індукція магнітного поля
МК	—	мікроконтролер
ПЧ	—	перетворювач частоти
СК	—	система керування
СМ	—	система моніторингу
ЧРЕП	—	частотно-регульований електропривод
B	—	індукція магнітного поля
k_b	—	коефіцієнт відхилення магнітної індукції за Буземановою метрикою
M_n	—	момент АД у номінальному режимі
$\omega = 2\pi f$	—	кутова частота напруги статора
f	—	частота напруги статора
ω_r	—	частота обертання ротора двигуна
z	—	відносний термін експлуатації ізоляції

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Відповідно до чинного законодавства, зокрема п. 6 статті 7 «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі» Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», від сучасних підприємств вимагається застосування нових підходів для впровадження і забезпечення виконання програм енергоресурсозбереження. Водночас актуальною є проблема високої аварійності електроустаткування і, особливо, електричних машин, що визначає одну зі складових витрат під час реалізації важливих енергетичних програм.

Електричні машини використовуються в приводах практично у всіх областях техніки і технологічного оснащення виробництва. Їх позапланова зупинка або раптова відмова супроводжуються значними економічними втратами. Особливо великі втрати на великих енергетичних установках і об'єктах, тому технічна діагностика в цій області досить розвинена і є обов'язковою для попередження відмов і своєчасного ремонту. Значно менша увага приділяється моніторингу енергетичних установок середньої та малої потужності, проте їх значимість, з огляду на розвиток автономних приводів і масовості останніх, постійно зростає. Відповідна діагностика, в основному, здійснюється тепловими, електричними та віброакустичними методами, які в певних ситуаціях, таких як низькі температури, віброакустичні перешкоди тощо, не застосовні або не забезпечують необхідної достовірності інформації [1]-[2].

Сучасні методи моделювання, моніторингу та діагностики електричних машин розглянуті в роботах: щодо процесів перетворення енергії в електричних двигунах: Кузнєцова В.Г., Шидловського А.К.; з діагностики і характеристик асинхронних двигунів: Бешти О.С., Биргера І.А., Кириленка О.В., Кучерука В.Ю.; з моніторингу, оцінки надійності і працездатності АД: Баркова А.В., Закладного О.О., Труфанова І.Д.; з аналізу магнітного поля:

Загірняка М.В., Кузнецова Б.І., Тонкіх В.Г., Хайрулліна І.Х.; з побудови діагностичних систем: Осіпова Г.С., Поспелова Д.А., Цейтіна Г.С.; питання розробки прикладних інформаційних технологій та експертних систем представлено у роботах Б.І. Мокіна, Р.Н. Кветного, В.М. Дубового, І.В. Кузьміна, С.Д. Штовби, О.В. Бісікала, В.Б. Мокіна та інших дослідників. Але широке впровадження енергоощадних технологій в промисловості України стримується через відсутність нових методів моделювання енергетичних об'єктів та відповідних програмно-інформаційних засобів, що і обумовлює **актуальність і значимість** досліджень у галузі інтелектуальної інформаційної підтримки комплексного моніторингу стану асинхронних двигунів.

Вирішення сучасних завдань моніторингу вимагає залучення принципово нових методів та засобів, до них можна віднести діагностування по картині зовнішнього магнітного поля (ЗМП), акустичні і, навіть, органолептичні методи моніторингу, які передбачають використання органів чуття людини (огляд, прослуховування). При цьому вимір діагностичних параметрів проводиться безконтактним методом і, що важливо, в робочому режимі. Використання ЗМП як основного, так і додаткового джерела інформації для моніторингу дозволяє більш достовірно оцінити технічний стан і прогнозувати відмови електричних машин. Зовнішні ознаки є множиною таких діагностичних ознак [3], які відображають взаємозв'язки внутрішніх і зовнішніх параметрів. Подібними ознаками можуть служити параметри сталого режиму, що змінюються по характерним законам, залежать від місця виникнення і типу первинних несправностей. Кожна конкретна несправність характеризується одним чи декількома зовнішніми ознаками. В одному випадку зовнішня ознака вказує безпосередньо на наявність конкретної несправності, в іншому випадку характеризує несправність тільки побічно. Отже, для моніторингу та прогнозування стану електричної машини і привода необхідно знати характер зміни параметрів при різних первинних несправностях і вибрати з них визначальні. Такий моніторинг забезпечить попередню діагностику двигуна з визначенням його поточного стану та видачою рекомендацій про можливість і

доцільність подальшої експлуатації цього двигуна. Вказана задача розв'язується шляхом побудови інформаційної технології комплексного моніторингу і, на його основі, розпізнавання поточного стану асинхронних двигунів безпосередньо під час виконання технологічного процесу, що потребує вирішення наступних завдань:

1. Розробка методики моніторингу, яка включає визначення якомога більшої кількості значимих діагностичних ознак. Наприклад, МП, яке є зовнішньою ознакою, може бути виявлено і виміряно в ході технологічного процесу або експлуатації.

3. Формування діагностичних критеріїв, тобто визначення чисельних значень параметрів МП та інших ознак, що утворюють комплекси, які відображають кореляційний зв'язок з наявністю того чи іншого дефекту, або зі ступенем його розвитку. У багатьох випадках різні дефекти, неполадки і відхилення в роботі ЕМП мають схожі ознаки. Тому виникає питання щодо диференціальної діагностики, тобто розробки способів достовірного поділу причин зміни параметрів.

4. На основі обраних критеріїв формування алгоритму діагностики із залученням відповідного математичного та логічного апарату, що сполучається з обраною методикою моніторингу та характеристиками об'єкта, що діагностується.

5. Створення інформаційної технології, яка узагальнює всі розроблені формальні засоби моніторингу та діагностики.

6. При розробці інформаційної технології необхідно пріоритетно підвищувати рівень методик роботи та кваліфікації персоналу, який має синтезувати і аналізувати найчастіше суперечливу інформацію, оцінювати ймовірність появи тієї чи іншої несправності, приймати адекватне рішення і робити висновки про правильність дій.

Тому *актуальним* науковим завданням є розробка інформаційної технології комплексного моніторингу стану асинхронних двигунів безпосередньо під час виконання технологічного процесу на основі зовнішніх

ознак їх роботи, що дозволить проводити попередню діагностику двигуна з визначенням його поточного стану та видачою рекомендацій про можливість і доцільність його подальшої експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Основний зміст роботи складають результати досліджень, що проводилися протягом 2009–2021 років.

Робота відповідає Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», зокрема п. 6 статті 7 «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі», та спрямованості тематики науково-дослідних робіт, що є базовими для дисертації: **«Теоретичні основи керування процесами перетворення енергії в електромеханічних комплексах для підвищення енергоефективності їх роботи»** (№ ДР 0114U002629, 2015 р.), **«Дослідження індукції магнітного поля змінного струму промислової частоти зовні асинхронних двигунів»** (№ ДР 0114U002173, 2015 р.), у яких авторка була виконавцем і показала можливість проведення діагностування АД за параметрами вимірної індукції магнітного поля на поверхні статора двигуна, зокрема визначила чинники, що впливають на розподіл магнітної індукції та провела експериментальні дослідження.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження полягає у забезпеченні процесів моніторингу та попередньої діагностики асинхронного двигуна з визначенням його поточного стану та формулюванні рекомендацій щодо можливості і доцільності подальшої експлуатації шляхом розробки інформаційної технології комплексного моніторингу стану асинхронних двигунів безпосередньо під час виконання технологічного процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Здійснити аналіз існуючих методів і засобів моніторингу та діагностики асинхронних електричних двигунів.
2. Розробити комплекс методів визначення поточного стану двигуна на основі зовнішніх ознак його роботи.

3. Розробити і дослідити методи визначення зміни параметрів асинхронного двигуна при поточному моніторингу з урахуванням зовнішнього шуму від працюючого електротехнічного та електромеханічного обладнання.

4. Розробити структуру інформаційної технології і, відповідно до неї, створити програмне забезпечення для реалізації запропонованих методів та засобів інформаційної технології.

5. Провести випробування розробленої інформаційної технології в реальних умовах виробництва та здійснити економічну оцінку її впровадження.

Об'єкт дослідження – процес моніторингу стану асинхронних двигунів безпосередньо під час реалізації відповідного технологічного процесу.

Предмет дослідження – методи та інформаційна технологія моніторингу асинхронних двигунів на основі комплексу зовнішніх ознак їх роботи.

Методи дослідження. У дослідженнях використовувались такі методи: під час моделювання розподілу індукції магнітного поля – теорія поля, методи опису магнітних полів, чисельні методи розрахунку магнітних полів, зокрема метод кінцевих елементів; під час оцінки стану та терміну експлуатації асинхронного двигуна – теорія електричних машин, теорія нагріву, теорія подібності і метрики відстані, зокрема Буземанова метрика; під час експериментальних досліджень – методи обробки даних, бібліотеки пакету програм Matlab, теорія вірогідності і математична статистика, методи коротко- та середньо-термінового прогнозування, зокрема метод кумулятивних сум; під час комплексного моніторингу – методи технічної діагностики, зокрема теорія графів і функції чутливості, об'єктно-орієнтоване моделювання на основі мови програмування C#.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Набула подальшого розвитку експериментальна модель несиметричних за параметрами асинхронних двигунів, яка враховує нерівномірність розподілу індукції магнітного поля на поверхні статора двигуна, що дозволяє отримати значиму інформацію про технічний стан асинхронного двигуна, зокрема про наявність внутрішніх дефектів обмоток.

2. Уперше отримано аналітичну модель стану асинхронного двигуна у вигляді лінійного рівняння відносного залишкового ресурсу ізоляції від коефіцієнту, розрахованого на основі Буземанової метрики, що дозволяє врахувати зміну розподілу індукції магнітного поля на поверхні статора асинхронного двигуна при виникненні параметричної несиметрії його обмоток.

3. Удосконалено метод моніторингу асинхронних двигунів, який відрізняється від існуючих тим, що добір діагностичних параметрів ґрунтується на критерії максимальної індивідуальності, причому параметр максимальної індивідуальності приймається в якості базового, а добір діагностичних параметрів здійснюється методом послідовних доповнень, що дозволяє вирішити задачу діагностування на основі зовнішніх ознак режиму роботи двигунів.

4. Уперше отримано інформаційну технологію комплексного моніторингу асинхронних двигунів, яка відрізняється від існуючих застосуванням моделі стану асинхронного двигуна на основі Буземанової метрики та методу моніторингу на основі зовнішніх ознак режиму роботи двигунів, що дозволяє за рахунок попередньої діагностики підвищити ефективність їх експлуатації на основі актуальної інформації про поточний стан і рекомендацій щодо доцільності подальшої експлуатації.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій забезпечується коректністю прийнятих у математичних моделях припущень і підтверджується збігом результатів аналітичних розрахунків з результатами математичного та фізичного моделювання.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Отримано методику аналізу зовнішнього магнітного поля двигунів та інтерпретації отриманих результатів для судження про наявність в двигуні дефектів. На основі аналізу вимірних сигналів отримана методика забезпечує можливість виділення в сигналі зміни параметрів двигуна для прогнозування його стану, терміну та доцільності подальшої експлуатації. На основі функції

Changepoint та методу кумулятивних сум CUSUM, методика дозволяє з різним ступенем точності та швидкодії визначити точку часу зміни параметрів.

2. На основі Буземанової метрики розроблена методика оцінювання ступеню несиметрії двигуна, перегріву обмоток статора та зниження тривалості життя їх ізоляції. В методиці застосовується встановлена лінійна залежність між терміном життя ізоляції обмоток та відносним значенням Буземанової дистанції та відповідний критерій оцінки відхилення розподілу магнітної індукції. Застосування методики дозволяє оцінити термін експлуатації асинхронного двигуна за виміряними значеннями індукції на поверхні його статора, а також робити висновок про поточний стан АД.

3. Отримано алгоритмічне забезпечення діагностичної системи, що дозволяє автоматично інтерпретувати результати діагностики. Комплекс алгоритмів реалізовано у вигляді програмного забезпечення, що дозволяє використовувати результати дослідження на практиці.

Результати роботи впроваджено:

- у проектні та організаційні рішення з обстеження потужних високовольтних асинхронних двигунів цеху виробництва окатишів ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат» (м. Горішні Плавні);

- у навчальний процес Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського при підготовці фахівців, за першим та другим освітнім рівнем, спеціальностей 123 – Комп'ютерна інженерія, 141 – Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка, 151 – Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології у вигляді методичного забезпечення для проведення лабораторних і практичних робіт.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані авторкою самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать: [2] – ідея визначення несправностей електричних машин за зовнішніми ознаками; [3] – розробка архітектури побудови експертної системи визначення несправностей електричних машин з розширеними функціональними властивостями, [12] – реалізація алгоритмів діагностичної

системи, [13] – програмне забезпечення комп’ютерної програми визначення несправностей електричних двигунів на основі зовнішніх ознак їх роботи; [4] – алгоритми діагностичної системи оцінки стану асинхронних двигунів на основі зовнішніх ознак їх роботи, [10] – алгоритми функціонування і принципи побудови діагностичної системи, програмна реалізація діагностичної системи, [15] – алгоритми функціонування і принципи побудови діагностичної системи, програмна реалізація діагностичної системи, [19] – алгоритми функціонування і принципи побудови діагностичної системи, програмна реалізація діагностичної системи; [1] – експериментальні дослідження на основі розробленої інформаційної технології проведені на підприємстві, [14] – експериментальні дослідження індукції магнітного поля на поверхні статора асинхронного двигуна, [18] – експериментальні дослідження індукції магнітного поля на поверхні статора асинхронного двигуна; [5] – експериментальні дослідження в умовах навчально-виробничих лабораторій, [11] – експериментальні дослідження поширення магнітного поля асинхронних двигунів в умовах навчальних лабораторій; [6] – всі теоретичні та практичні результати, окрім постановки задачі, [9] – аналіз методів екранування магнітного поля електромеханічних перетворювачів енергії змінного струму; [16] – чисельне моделювання і аналіз розподілу індукції магнітного поля назовні асинхронних двигунів; [17] – експериментальні дослідження і аналіз впливу завад від зовнішніх електротехнічних об’єктів при вимірюванні індукції магнітного поля; [7] – розробка моделі діагностування і визначення стану асинхронного двигуна; [8] – модель ідентифікації асинхронних двигунів в динамічних режимах безпосередньо під час технологічного процесу, [20] – розробка принципів визначення поточного стану асинхронного двигуна за даними вимірювання індукції магнітного поля.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення і результати виконаних у дисертаційній роботі досліджень докладалися та обговорювалися на : International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). – IEEE, 2017, 2019; 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power

Systems (IEPS). – IEEE, 2018; 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice (PAEP). – IEEE, 2020; XI, XVII Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (Кременчук, 2011–2017); VIII–IX, XVI– XVII Міжнародних науково-технічних конференціях молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації», (Кременчук, 2009–2019).

Робота обговорювалася та була схвалена на засіданнях науково-технічного семінару «Електромагнітні та електромеханічні процеси в електричних машинах і апаратах» наукової ради НАН України з комплексної проблеми «Наукові проблеми електроенергетики», 2017-2018 рр.

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані в 20 друкованих працях, з них 1 – стаття у закордонному періодичному виданні, 4 – статті у фахових виданнях України [2-5], 12 – матеріалів Всеукраїнських і міжнародних наукових конференцій [6-17], зокрема 2 з яких увійшли до збірників, зареєстрованих у міжнародній наукометричній базі Scopus [6, 11], 3 – свідоцтва на авторський твір [18-20].

Структура та обсяг дисертації. Повний обсяг дисертації становить 197 сторінок друкованого тексту й містить анотацію, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і чотири додатки. Основна частина викладена на 119 сторінках. Список використаних джерел складається зі 145 найменувань на 17 сторінках. Дисертація містить 74 рисунків і 41 таблиць, з яких 9 рисунків і 21 таблиця на окремих 29 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

1.1 Огляд методів і засобів оперативної діагностики асинхронних двигунів

1.1.1 Методи і засоби оперативної діагностики асинхронних двигунів.

Оперативна діагностика електромеханічних перетворювачів енергії (ЕМПЕ) – асинхронних двигунів, проводиться для забезпечення безперебійної роботи ЕМПЕ, виявлення дефектів і їх координат, оцінки ступеня розвитку дефектів.

При оперативних діагностичних дослідженнях ЕМПЕ основними методами є: тепловий, електричний, віброакустичний, хроматографічний і магнітний (по зовнішньому магнітному полю) [4].

Тепловим методом визначаються параметри теплових процесів, які супроводжують електромагнітні процеси при порушеннях нормальних режимів і старінні конструкційних матеріалів, зокрема, температури в пазах статора, стрижнях ротора, щітково-контактного апарату, охолоджуючих рідин тощо. Метод реалізується за допомогою засобів [5]: терморезисторів, термопар, тепловізорів (VARIO CAM німецької компанії JENOPTIK, LASER, OPTIK, Systems GmbH; FLEXCAM фірми ISI - США; Therma CAM, Therma Vision фірми FLIR Systems; TH9100, TH6100 Thermo View Ti30 фірми Raytek - США), пірометрів і термометрів (MiniTemp ST, ST Pro Plus фірми Raytek - США і т. д.), інфрачервоних тепловізійних камер і систем (Therma CAM фірми FLIR Systems), термографів (IRTIS-200, IRTIS-2000 - Росія) і т. д.

Електричним методом [6, 7] визначаються електричні параметри ЕМПЕ: відхилення струмів і напруг від номінальних значень за амплітудою, частоті, фазі; фіксується наявність вищих гармонік і проводиться спектральний аналіз гармонік струму і напруги.

Метод дозволяє виявляти наявність міжвиткових замикань в обмотках статора і пошкодження ротора – на частоті живильної мережі (обрив стрижнів, ослаблення кріплення стрижнів до контактних кілець, приховані дефекти лиття); несоосність валів двигуна і механічного навантаження на частотах, кратних частоті обертання електродвигуна; дефекти пасовоих передач на частотах, кратних частоті биття ремня; ушкодження підшипників на частотах, кратних частоті обертання ротора; ексцентриситет ротора (статичний і/або динамічний); ослаблення елементів кріплення електродвигуна, тощо.

Метод дозволяє проводити моніторинг прикладеної до клем ЕМПЕ напруги, з метою визначення несиметрії, наявності вищих гармонійних складових і імпульсів перенапруг [7] на основі діагностики спектрів модуля векторів Парку струмів і напруги.

При збігу всіх ліній в спектрах модуля вектора Парку струму і напруги робиться висновок про те, що спектр споживаного струму соответствует живлячої напруги в електричному колі електродвигуна. При виявленні ліній, присутніх в спектрі струму і відсутніх в спектрі напруги, робиться висновок про невідповідність спектра споживаного струму живлячої напруги в електричному ланцюзі ЕМПЕ, обумовленому несправністю. В роботі [8] аналізується спектр електричних сигналів в статичному режимі або в частотно-часових координатах за допомогою перетворень Wigner-Ville, при роботі в перехідному режимі.

В [9] діагностика здійснюється шляхом контролю крутного моменту M_{em} , причому M_{em} вимірюється в d, q системах відліку, встановлених щодо статора.

Електричний метод реалізується за допомогою струмових кліщів (АТК-2200 та інш., фірми «ЕЛІКС»), вимірювачів опорів, аналізаторів якості електричної енергії (ЗАТ «ПРІСТ»; ПРОСОФТ-СИСТЕМС; ANA-LYST 3Q - ТОВ НВФ УНІВЕРСАЛПРІБОР і інш), струмових датчиків тощо.

В роботі [10] в якості діагностичної ознаки використовується інтенсивність часткових розрядів в ізоляції електротехнічного обладнання, а саме параметри, що враховують всі імпульси часткових розрядів, такі, як струм

і потужність часткових розрядів, амплітудно-частотні та амплітудно-фазові характеристики, максимальний здається заряд. Встановлено залежність зміни інтенсивності часткових розрядів від стадії старіння ізоляції електротехнічного обладнання. Засоби реалізації методу: цифрові осцилографи PCS-64 виробництва фірми «Velleman», Yokogama DL 540L - фірми Cutler- Hammer - США; системи для постійного моніторингу ЧР в ЕМПЕ (HydroTrac, BusTrac, PDTrac компанії IRIS) і ін.

Віброакустичними методом діагностики визначаються вібраційні параметри ЕМПЕ. Як еталон використовуються характеристики самого об'єкта діагностування, виміряні на початковому етапі його експлуатації. В [11] розглядається методика виявлення викривлення корпусних деталей, дисбалансу, розцентровки, роторів і т. Д. На основі аналізу низькочастотних спектрів і функції когерентності, пов'язаних з частотою обертання ротора і порівняння їх з еталонними спектрами.

В [12] розглядається метод вібродіагностики механізмів зі зміни інтенсивності основних віброакустичних джерел шляхом порівняння поточних вібраційних характеристик і основних показників режимів роботи з базовими. Методом оцінюються зміни не тільки окремих складових спектра і загальних рівнів параметрів вібрації в певному частотному діапазоні, а й зміна інтенсивності конкретних віброакустических джерел і інформативних складових вузькосмугового спектру. Засоби реалізації методу: діагностичні віброаналізatori, мультиметри, датчики вібрації (Vibrotip / VibCode, Vibxpert фірми PRÜFTECHNIK, СД-12М систем ВАСТ і ін.).

Складність реалізації вібраційного методу пов'язана з жорсткими вимогами до кріплення вібродатчиків і забезпеченням зв'язку з пристроєм обробки інформації.

Хроматографічним методом, на основі аналізу хімічного складу рідин і газів, виявляють перегріву струмоведучих з'єднань і елементів конструкції ЕМПЕ, електричні розряди в маслі трансформатора, контролюють стан

ізоляційної системи, магнітної системи, контактних з'єднань, геометричне стан обмоток, систем охолодження, перемикаючих пристроїв та інш.

В [13] метод ділиться на групи: газову і рідинну, вибір яких визначається фізико-хімічними властивостями досліджуваних ЕМПЕ, і підгрупи: газо-адсорбційну, рідинно-адсорбційну, газорідинну та інш. Засоби: цифрові мікроскопи фірм Struers, Olympus, EMCO-TEST; флюориметри фірм ALA-1/4, ТОВ «ЕКАР»; УФ-та ІЧ-спектрометри, спектро- і ІФА-фотометри, рефрактометри, флюориметри, іонометричні прилади, електроди фірми Shimadzu.

Хроматографічний метод в основному застосовується для діагностики трансформаторного обладнання і в автомобілебудуванні і непридатний для електричних машин середньої та малої потужності.

Слід зазначити простоту реалізації, відносно низьку вартість, високу продуктивність, широкі можливості автоматизації діагностування теплового і електричного методів. Проте, в певних ситуаціях (низькі температури, складність установки датчиків та ін.) растосування даних методів утруднено.

В [14] запропоновано використовувати в діагностичних комплексах, в якості основного або додаткового, метод діагностики ЕМПЕ по зовнішньому магнітному полю. При цьому контроль діагностичних параметрів проводиться безконтактним методом, наведені оригінальні конструкції датчиків для підвищення ефективності діагностики [15, 16]. До недоліків роботи слід віднести дослідження неекраниваних безкорпусних ЕМПЕ, так як наявність корпусу значно впливає на достовірність результатів діагностики по ЗМП.

В [17] наведено метод діагностики асинхронних двигунів (АД) з феромагнітним і алюмінієвим корпусом, за допомогою точкових індукційних перетворювачів; з багатополюсного ЗМП двигунів виділяють магнітне поле з однією парою полюсів, потім методом дзеркальних відображень з корекцією струмів розраховують радіальну і аксіальну складові індукції магнітного поля цілого і пошкодженого ротора вздовж розгортки.

Метод призначений тільки для діагностики ушкоджень короткозамкнутого ротора асинхронних двигунів. Засоби реалізації: тесламетри (ТПУ), веберметри (Ф-191, Ф-199), аналізатори спектра (GSP-827, LSA-132D, NS-30A + РА, АКС-1301, HandyProbe); датчики: індукційні, катушки Роговского, феррозонди, Холла; вимірювачі магнітних полів (ІМП-05) і т. д.

Для отримання найбільш достовірної інформації при оцінці технічного стану ЕМПЕ необхідно вищевикладені методи застосовувати в сукупності, що може бути реалізовано в діагностичних комплексах.

1.1.2 Діагностичні комплекси електромеханічних перетворювачів енергії

В роботі [6] діагностичний комплекс (ДК) дозволяє виявляти: пошкодження ротора ЕМПЕ; обрив стрижнів; ослаблення кріплення стрижнів до контактних кілець; приховані дефекти лиття; несоосность валів двигуна і механічної навантаження; дефекти пасової передачі вентилятора; міжвиткові замикання обмоток статора; ушкодження підшипників; підвищений ексцентриситет (статичний і / або динамічний); ослаблення елементів кріплення; дефекти механічної частини пов'язаних з ЕМПЕ пристроїв; несиметрію прикладеного до ЕМПЕ напруги; наявність вищих гармонійних складових і імпульсів перенапруг. Особливостями ДК є те, що при виявленні наявності пошкоджень електричної та / або механічної частини ЕМПЕ і пов'язаного з ним механічного пристрою враховуються характерні частоти певної величини в спектрі струму ЕМПЕ; при проведенні повторних вимірів формується база даних, що дозволяє відстежувати динаміку розвитку ушкоджень у часі, що дає можливість завчасно планувати виведення устаткування в ремонт.

ДК «КРОНА-517» [18] дозволяє: контролювати стан ЕМПЕ на основі порівняння значень вимірюваних електричних і механічних ДП зі значеннями параметрів діагностичної моделі; визначати місце і причину відмови або несправності шляхом аналізу зареєстрованих значень діагностичних параметрів; відслідковувати зміни значень цих параметрів в процесі

експлуатації; прогнозувати розвиток несправностей. Комплекс оснащений програмним забезпеченням (ПЗ), яке забезпечує: повний цикл збору і обробки даних; запис сигналів з відображенням на екрані в реальному часі графіків вихідних сигналів; автоматизований експрес-аналіз; ручну обробку отриманих даних.

ДК «РЕКОН» дозволяє [19] осцилографувати і обробляти параметри технологічних процесів; спрощує пусконаладжувальні та ремонтні роботи; виявляє рідкісні «випадкові» відмови електрообладнання та інш.

ДК відрізняється простотою підключення до різних електричних кіл об'єктів діагностування; заводо захищеністю і експлуатаційною стійкістю в промислових умовах; точністю реєстрації та вимірювань; автоматичною передачею даних на значні відстані. В конструкції і функціях ДК досить повно врахована специфіка швидкої зміни об'єктів спостереження і забезпечена оперативна, без застосування ПК, налагоджування, спостереження об'єкта, що цікавить і обробка інформації безпосередньо на цьому об'єкті.

ДК для діагностики асинхронних електродвигунів [20] обробляє вхідну інформацію і визначає вид ушкодження в електромеханічній частині працюючого ЕМПЕ або робить висновок про його справності. ДК дозволяє зберігати великі бази даних з інформацією ушкоджень ЕД, що відслідковується в динаміці з подальшим прогнозуванням виходу його з ладу.

ДК EXPLORER Series II [21] визначає стан підвищеної і зниженої напруги, а також рівень несиметрії напруг (у відсотках); виявляє нелінійні спотворення по напрузі (напруги фаза-нейтраль); стану стрижнів обмотки ротора для ідентифікації частотних складових, які виникають в спектрі струму внаслідок руйнування клітини ротора; виявляє перевантаження по струму: максимальний фазний струм порівнюється з номінальною величиною, зазначеної на паспортній табличці; визначає ККД, коливання навантаження, що прикладається до ЕМПЕ; проводить аналіз миттєвої форми сигналу для моніторингу часової залежності навантаження або миттєвих коливань

навантаження для визначення областей перевищення паспортних характеристик.

Особливості ДК EXPLORER Series II: безпечний, мобільний, призначений для роботи в найважчих умовах; дає можливість глибоко заглянути в систему двигун-механізм. ПО працює з базою даних по ЕМ-ПЕ багатьох виробників, дозволяючи порівнювати характеристики і ефективність роботи.

ДК TDM (Transformer Diagnostics Monitor) [22] проводить контроль: технічного стану маслонаповнених вводів трансформаторів; зміни геометрії обмоток трансформатора; температурних режимів роботи трансформатора; системи охолодження трансформатора; роботи захисних реле трансформатора. Оцінює технічний стан маслонасосів і вентиляторів системи охолодження. Реєструє перенапруги й імпульсні струмові впливу на обмотки трансформатора. На підставі ряду часткових діагнозів є можливість інтегральної оцінки стану трансформаторів, прогнозування розвитку стану і дефектів. Важливою перевагою системи є можливість аналізу трендів розвитку дефектів і визначення залишкового ресурсу.

ДК «MDR» (Motor and Generator Diagnostics Relay) [23] проводить контроль технічного стану ізоляції обмотки статора за рівнем часткових розрядів; вимірює та аналізує вібрації пакета сталі статора, виявляє передумови для порушення ізоляції обмотки і пакета статора на самих ранніх стадіях розвитку; оцінює стану ізоляції обмотки ротора по радіальної складової магнітного поля в зазорі ЕМПЕ; визначає динамічні положення і вібрації ротора в зазорі, відносно статора, в процесі роботи ЕМПЕ; контролює електромагнітну асиметрію статора ЕМПЕ по спектру споживаного струму і потужності; вимірює величину поздовжньої електрорушійної сили вала турбоагрегату і інтенсивності ерозійних процесів в опорних підшипниках, зумовлених цією електрорушійною силою; проводить моніторинг стану колекторного вузла турбогенератора, включаючи прямий контроль за роботою кожної щітки.

В системі «MDR» реалізований комплексний підхід до оцінки стану ЕМПЕ, коли його поточний стан оцінюється декількома методами. Дозволяє проводити діагностику ЕМПЕ, що працюють в умовах небезпечних виробництв (на підприємствах нафтохімічної промисловості).

ДК REMM (Rotation Electrical Motor Monitor) [24] дозволяє виявляти: електромагнітну несиметрію статора; дефекти обмотки ротора; здійснювати контроль: стану ізоляції статора за рівнем часткових розрядів; вібраційного стану пакета статора ЕМ; електричних параметрів статора; температурних режимів статора. ДК відрізняється можливістю розширення його властивостей за рахунок поставки додаткових модулів, що складають його конструкцію.

ДК AMTest-2 [25] дозволяє: виявляти дефекти підшипників; небаланс ротора; розцентровки з приводним механізмом; неправильний монтаж ротора щодо статора; наявність проблемних стрижнів в клітці ротора; контролювати якість пайки провідників обмотки ротора; нерівномірність процесу комутації по колу колектора. ДК відрізняється тим, що дозволяє досліджувати струми трифазної напруги живлення, які споживаються в фазах контрольованого ЕМПЕ, при цьому контролюється не тільки рівень, а й несиметрія трифазних параметрів, рівень гармонік в напрузі і струмах, споживана ЕМПЕ потужність.

ДК для об'єктивного і достовірного контролю стану якості роботи колекторно-щіткового вузла (КЩУ) тягових електродвигунів [26] формує інформаційний масив даних про розподіл іскріння по колектору та стан його робочої поверхні; розраховує значення діагностичних параметрів; виробляє контроль технічного стану КЩУ.

ПЗ цього ДК дозволяє реєструвати розподіл імпульсів іскріння по колектору, виводити зображення на екран, роздруковувати протокол дослідження, видавати результат за технічним станом об'єкта діагностування, створювати базу даних; підвищити: достовірність і об'єктивність контролю стану комутації в процесі випробування електричної машини, комутаційну стійкість, термін служби, а також знизити кількість відмов і число непланових ремонтів.

ДК для експрес-діагностики транспортних дизелів [27] дозволяє проводити моніторинг робочого процесу без попередньої підготовки двигуна; визначає фази подачі палива і газорозподілу без безпосереднього впровадження в паливну апаратуру; контролює температуру виділяються газів без додаткових датчиків температури; автоматично налаштовується на тип двигуна; перевіряє якість ремонту після будь-якого виду ремонту; видає однозначний діагноз «придатний» - «брак»; накопичує електронну базу даних (БД) для переходу до ремонту по фактичному стану; визначає залишковий ресурс; знижує число відмов елементів паливної апаратури і механізму газорозподілу; збільшує міжремонтні періоди і скорочує витрати на технічне обслуговування.

ДК для діагностики ЕМПЕ [28] дозволяє виявляти: несиметрію обмоток, несиметрію магнітної системи, несиметрію основного повітряного зазору, дефекти статора, дефекти підшипникового вузла, ексцентриситет, міжвиткові і міжфазні замикання обмоток, дефекти ізоляції. ДК дозволяє визначати характер пошкодження за результатами діагностики за принципом залежності зміни індукції ВМП електродвигуна від розвитку в ньому дефектів.

ДК для контролю стану підшипників електричної машини [29] вимірює основні механічні та/або електромеханічні характеристики; задає певний режим роботи; моделює несправні стани; вимірює ЗМП в навколишньому просторі в заданих координатах і робочих режимах роботи ЕМПЕ; виробляє математичну обробку даних вимірів, спектральний аналіз, записує і видає результат на екран персонального комп'ютера. Датчик зовнішнього магнітного поля встановлюється на поверхні машини, що не вимагає її зупинки і розбирання.

- ДК HYDROSCAN [30], розроблений фірмою MCM Enterprise Ltd (США), містить скануючий пристрій для діагностики стану статора і ротора гідрогенератора і дозволяє виявляти розвиток пошкоджень стрижнів обмотки статора гідрогенератора, які супроводжуються частковими розрядами в ізоляції. Для отримання більшої чутливості і точності фіксації місця розряду ці датчики встановлюються на осі полюса. Крім того, контроль часткових розрядів ведеться за допомогою ємнісних датчиків, вбудованих в пази статора.

Діагностичний комплекс виробляє контроль величини повітряного зазору, який здійснюється двома індуктивно пов'язаними котушками, закріпленими в повітряному зазорі. У зазорі по трьох осях вимірюється датчиками Холла також обертається складова магнітного поля, що дозволяє виявити виткові замикання в котушках статора.

- Виявлення ослаблення пазових клинів, кріплення лобових частин і вібрації сердечника статора здійснюється шляхом аналізу шуму за допомогою трьох мікрофонів, встановлених в блоці датчиків. Вібрація ротора вимірюється акселерометром, встановленим в блоці датчиків.
- У блоці розміщено також пристрій живлення і оптоволоконний пристрій передачі даних на приймач. Комплекс контролює температуру повітря в повітряному проміжку, стан підшипників і щітково-контактного апарату.
- ДК SUPER [30] фіксує кожну хвилину 52 механічних і 10 електричних параметрів і містить 50 уставок на сигнал. В основний процесор дані передаються 1 раз на годину. При спрацьовуванні будь-якої з уставок (сигнал тривоги означає вихід контрольованого параметра за допустимі межі) в процесор передаються дані за попередній годину роботи. Математичне забезпечення дозволяє обробляти і передавати сигнали датчиків, здійснювати постійний контроль та аналіз в режимі on-line і проводити спеціальні тести.
- Наведені ДК, незважаючи на свою багатофункціональність, все-таки мають ряд недоліків:
 - обмеженість набору методів, що характеризують ДК;
 - не дозволяють діагностувати екрановані ЕМПЕ;
 - не видають однозначні результати: «придатний» - «брак»;
 - оцінюють не функціональний стан ЕМПЕ, а виявляють лише наслідки несправностей.

Таким чином, з огляду на вищевикладене, для підвищення достовірності оперативної діагностики технічного стану ЕМПЕ виявлена необхідність вдосконалення існуючих та розробки нових методів і засобів оперативної діагностики ЕМПЕ; розробки засобів комплексної діагностики ЕМПЕ середньої

і малої потужності, на основі зовнішніх ознак роботи двигунів: по зовнішньому магнітному полю, тепловому, акустичному та вібраційному стану.

1.2 Промислові системи контролю стану асинхронних двигунів

Розробка систем оцінки технічного стану електричних машин (різного виконання) є одним з пріоритетних напрямків в роботі фірми «Вібро-Центр». В даний час нами розроблено і проводиться 4 типи таких систем, що відрізняються своїм призначенням, кількістю і глибиною реалізованих діагностичних функцій, а також рівнем ціни. Це системи AMTest, MDR-M, MDR і REMM [22-25].

Всі ці пристрої є системами діагностичного моніторингу обертових електричних машин. У режимі реального часу ці системи моніторингу дозволяють:

- оперативно оцінювати поточний технічний стан електричної машини;
- вирішувати питання про можливість і, в ідеалі терміни, експлуатації генератора або електродвигуна;
- виявляти, і постійно контролювати ступінь розвитку дефектів в ізоляції електричної машини;
- для того, щоб надати допомогу нашим потенційним користувачам діагностичного обладнання в коректному виборі, в даному огляді зроблено спробу підкреслити основні відмінності цих 4 систем моніторингу. Крім того, тут надається додаткова порівняльна інформація, яка дозволить фахівцям більш оперативно приймати обґрунтовані рішення.

Огляд сфер застосування різних систем, призначених для моніторингу електричних машин, коротко представлений в табл.1.1.

Технічна ефективність роботи систем моніторингу залежить від набору діагностичних функцій, реалізованих в ній. Чим більше цих функцій, тим вище

ймовірність коректної оцінки технічного стану контролюваного електротехнічного обладнання.

Таблиця 1.1 - Типи систем моніторингу

Марка системи	Типи контрольованих машин	Діапазон напруги і потужності	Технологічна важливість контрольованих машин
AMTest	Асинхронні двигуни 0,4 кВ	$U_{\text{РОБ}} > 0,4 \text{ кВ}$ $P_{\text{ДВ}} > 1 \text{ кВт}$	- Контроль і управління електродвигунами з робочою напругою 0,4 кВ - Допоміжна система для високовольтних електродвигунів

Продовження табл. 1.1.

MDR-M	Високовольтні асинхронні і синхронні двигуни	$U_{\text{РОБ}} > 6,0 \text{ кВ}$ $P_{\text{ДВ}} > 200 \text{ кВт}$	- Контроль стану ізоляції статорів електродвигунів і генераторів - Контроль електромагнітної асиметрії статора
MDR	Високовольтні синхронні двигуни і генератори	$U_{\text{РОБ}} > 6,0 \text{ кВ}$ $P_{\text{ДВ}} > 500 \text{ кВт}$	- Контроль стану ізоляції статора - Контроль ізоляції обмотки збудження - Контроль електромагнітної асиметрії електричної машини
REMM	Турбо і гідрогенератори	$U_{\text{РАБ}} > 6,0 \text{ кВ}$ $P_{\text{ДВ}} > 50 \text{ МВт}$	- Контроль стану ізоляції статора - Контроль ізоляції обмотки збудження - Контроль електромагнітної асиметрії електричної машини - Контроль технологічних параметрів генератора - Реєстрація перехідних і аномальних режимів роботи

Перелік діагностичних алгоритмів, реалізованих в різних системах моніторингу, наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Перелік діагностичних алгоритмів систем моніторингу

Марка системи	Призначення	Реалізовані методи діагностики
AMTest	Контроль асинхронних двигунів від 0,4 кВ	1. Контроль електромагнітної асиметрії статора і стану КЗ клітини ротора за спектрами струму і потужності (6 датчиків) 2. Контроль і захист електродвигуна від тривалих перевантажень 3. Контроль вібрації підшипників електродвигуна (2 датчика)
MDR-M	Контроль високовольтних асинхронних і синхронних двигунів	1. Контроль стану ізоляції обмотки статора по частковим розрядам (4 датчика) 2. Контроль електромагнітної асиметрії статора за спектрами струму і потужності (2 датчика) 3. Контроль вібрації пакета статора для визначення ослаблення кріплення обмотки (1 датчик) 4. Контроль вібрації підшипників двигуна (2 датчика)
MDR	Контроль високовольтних синхронних двигунів і генераторів	1. Контроль стану ізоляції обмотки статора по частковим розрядам (до 13 датчиків) 2. Контроль стану ізоляції обмотки збудження за величиною магнітного потоку в зазорі (1 датчик) 3. Контроль електромагнітної асиметрії статора за спектрами струму і потужності (6 датчиків) 4. Контроль вібрації пакета статора для визначення ослаблення кріплення обмотки (2 датчика) 5. Контроль повітряного зазору між ротором і статором (2 датчика)
REMM	Контроль високовольтних синхронних двигунів і генераторів	1. Контроль стану ізоляції обмотки статора по частковим розрядам (до 16 датчиків) 2. Контроль стану ізоляції обмотки збудження за величиною магнітного потоку в зазорі (1 датчик) 3. Контроль електромагнітної асиметрії статора за спектрами струму і потужності (6 датчиків) 4. Контроль вібрації пакета статора для визначення ослаблення кріплення обмотки (2 датчика) 5. Контроль повітряного зазору між ротором і статором (2 датчика) 6. Контроль вібрації підшипників і осьового зсуву

		ротора (до 8 датчиків) 7. Контроль технологічних параметрів роботи генератора, до 8 параметрів 8. Реєстратор перехідних і усталених режимів роботи генератора
--	--	---

Огляд витрат на покупку і впровадження різних систем, призначених для моніторингу електричних машин, коротко представлений в таблиці 1.3. У ній наведено усереднений рівень цін, який залежить від багатьох параметрів і економічної ситуації в країні. Основне призначення цієї таблиці - порівняти витрати на різні системи моніторингу між собою.

Таблиця 1.3 – Затрати на відомі системи моніторингу

Марка системи	Вартість мінімальної поставки	Вартість максимальної поставки	Затрати на монтаж і впровадження	Ітого
AMTest	600 дол. США.	900 дол. США.	100 дол. США.	700 – 1000 дол. США.
MDR-M	3800 дол. США	4700 дол. США	900 дол. США.	4700 – 5600 дол. США.
MDR	4700 дол. США	7800 дол. США	1500 дол. США	6200 – 9300 дол. США.
REMM	9300 дол. США	21800 дол. США	4700 дол. США	14000 – 26500 дол. США.

1.2.1. Характеристика промислових пристроїв

AMTest - прилад захисту, управління і діагностики електродвигунів і механізмів

- Управління асинхронними електродвигунами, захист, діагностика дефектів двигунів і насосів, планування ремонтних робіт - всі функції реалізовані в одному компактному стаціонарному приладі марки AMTest. Прилад відповідає всім сучасним вимогам до систем керування

асинхронними електроприводами.

- Прилад АМТест може застосовуватися для роботи з електродвигунами практично будь-якої потужності з робочою напругою 0,4 - 10,0 кВ. Для контролю загальної ефективності роботи електроприводу в прилад вбудований мікропроцесорний трифазний лічильник, який контролює споживану електроенергію.

- Все вирішуються приладом АМТест завдання можуть бути розділені на три групи. Це - функції управління електродвигуном, функції захисту та функції діагностики стану електродвигуна і приводного механізму.

1. Функції місцевого та дистанційного керування електродвигуном:

- • Включення і відключення електродвигуна за спеціальним алгоритмом, заснованому на тимчасові затримки до 24 годин;
- • Відключення електродвигуна за технологічними параметрами, наприклад, після повного відкачування (закачування) рідини, наявності кавітації, і ін.;
- • Можливість дистанційного включення і відключення електродвигуна системою більш високого рівня по протоколу зв'язку RS-485.

2. Функції захисту і забезпечення безпеки роботи обладнання:

- • Реєстрація спожитої електроенергії;
- • Захист електродвигуна від перевантаження;
- • Захист від зниження напруги живлення;
- • Захист від однофазного включення електродвигуна;
- • Захист від виходу контрольованого обладнання (насосів) в "Аномальні" режими (захист від сильної кавітації і від відсутності робочої рідини в насосі);
- • Контроль стану ізоляції з'єднувального кабелю і електродвигуна;
- • Контроль температури підшипників;
- • Контроль вібрації підшипників;
- • Контроль часу вільного вибігу агрегату після відключення від мережі.

3. Функції діагностики дефектів електродвигуна і насоса:

- • Діагностика дефектів стану електродвигуна - контроль наявності дефектних стрижнів на роторі, визначення стану підшипників, якості центрування і балансування;
- • Оцінка режиму роботи насосів, виявлення кавітації;
- • Збір інформації від додаткових датчиків, які підключаються до приладу по цифровому інтерфейсу (витрата, тиск, параметри рідини);
- • Визначення залишкового ресурсу обладнання і визначення оптимального часу проведення ремонту;
- • Передача інформації про стан обладнання по каналу зв'язку RS-485 в інформаційні системи більш високого рівня.

Прилад реалізований в окремому корпусі. Для практичної настройки установок захисту і параметрів діагностики в програмі приладу може застосовуватися внутрішня клавіатура з екраном. Другим варіантом режиму настройки приладу є використання інформаційного каналу зв'язку RS-485, до якого також підключається пульт настройки з екраном і клавіатурою.

Зовнішні комунікації приладу AMTest в максимальній комплектації показані на рис.1.1. Для пояснення призначення клем приладу вони позначені цифрами.



Рисунок 1.1 – Прилад AMTest

- 1 - Контакти реле включення аварійної сигналізації.
- 2 - Контакти реле включення / відключення контрольованого електродвигуна.

3 - Сигнали з зовнішніх вимірювальних трансформаторів струму. Використовуються для реєстрації споживаної потужності і захисту від перевантаження.

4 - Сигнали трьох фаз живлячої напруги 0,4 kV (для високовольтих двигунів це сигнали з трансформаторів напруги 100 V). Використовуються для реєстрації потужності, контролю зниження напруги і перекосу трифазних напруг.

5 - Клеми для підключення напруги живлення 220 V.

6 - Два аналогових входи для підключення датчиків вібрації. Один вихід 5 V призначений для підключення напруги живлення датчиків.

7 - Два входи для підключення датчиків температури типу Pt100.

8 - вхід для підключення диференціального трансформатора контролю струму витoku в живильному кабелі і статорі контрольованого електродвигуна.

9 - Клеми для підключення додаткових датчиків технологічних параметрів, які працюють по інтерфейсу зв'язку CAN.

10 - Клеми для підключення лінії зв'язку від приладу до системи АСУ-ТП для організації управління і передачі інформації про стан контрольованого обладнання. Дана лінія організована за допомогою гальванічно ізолюваного інтерфейсу зв'язку RS-485.

AMTest-2 - прилад діагностики стану електричних машин змінного і постійного струму



Рисунок 1.2 – Прилад AMTest-2

Прилад марки AMTest-2 є другою розробкою для комплексного контролю стану електричних машин. Перша розробка має марку AMTest (Asynchronous Motor Test) і призначена для стаціонарного контролю та діагностики стану

електричних машин змінного струму. За допомогою даного приладу в режимі моніторингу контролюється вібраційний стан, параметри енергоспоживання, проводиться діагностика стану електродвигуна.

Переносна версія приладу, що має марку АМТест-2, призначена для оперативного контролю технічного стану електричних машин різного виконання. З метою розширення можливостей в АМТест-2 додані нові функції контролю електричних машин постійного струму, що стосуються діагностики стану обмотки ротора (якоря) і колекторного апарату.

Важливою функцією приладу є можливість дослідження трифазного напруги живлення, струмів, які споживаються в фазах контрольованого електродвигуна. При цьому контролюється не тільки рівень, а й несиметрія трифазних параметрів, рівень гармонік в напрузі і струмах, споживана електродвигуном потужність.

В результаті, за допомогою одного приладу марки АМТест-2 можна контролювати технічний стан:

- синхронних генераторів і електродвигунів;
- асинхронних електродвигунів;
- генераторів і двигунів постійного струму.

Як джерела первинної інформації про стан електричної машини в приладі АМТест-2 використовуються наступні датчики:

Таблиця 1.4 – Датчики в приладі АМТест-2

N	Тип датчика	Кіл.	Параметри
1	Датчик контролю вібраційного стану - акселерометр.	2	Робочий діапазон частот: 3-2000Гц, Діапазон вимірів: Віброприскорення - 2-100 м/с ² , Віброшвидкість - 2-100 мм/с ² , Вібропереміщення - 30-500 мкм,
2	Лазерний лічильник частоти обертання і положення ротора електричної машини.	1	Діапазон частот обертання ротора - до 15000 об/хв.

Продовження табл. 1.4.

3	Датчик споживаного (змінного або імпульсного) струму.	3	До 600 ампер
4	Датчик контролю фазної напруги статора.	3	До 600 В
5	Датчик інтенсивності іскрових розрядів на колекторі машини постійного струму.	1	Не нормується

За допомогою приладу контролюються параметри мережі трифазної мережі, наявність гармонік, завантаження електродвигуна.

На основі аналізу первинних сигналів всередині приладу, роботи вбудованих елементів експертної діагностичної системи, а також власного досвіду експерта-діагноста, можна ідентифікувати наступні дефекти електричних машин:

Таблиця 1.5 – Дефекти електричних машин, що діагностуються

Тип машини	Контрольовані параметри	Діагностовані дефекти	Додаткові можливості
Синхронні двигуни і генератори	- Вібрації підшипників і статора - Струм і потужність двигуна.	- Дефекти підшипників кочення і ковзання - небаланс ротора - розцентровки з приводним механізмом (з турбіною для генераторів) - Неправильний монтаж ротора щодо статора - Наявність люфтів, послаблень, проблем з фундаментом - Дефекти опорних підшипників - Наявність	Балансування ротора у власних підшипниках

		проблемних стрижнів в клітці ротора - небаланс ротора - розцентровки з приводним механізмом - Неправильний монтаж ротора щодо статора - Наявність люфтів, послаблень, проблем з фундаментом	
Асинхронні двигуни	- Вібрації підшипників і статора - Струм і потужність двигуна	- Дефекти опорних підшипників - Наявність проблемних стрижнів в клітці ротора - небаланс ротора - розцентровки з приводним механізмом - Неправильний монтаж ротора щодо статора - Наявність люфтів, послаблень, проблем з фундаментом	Балансировка ротора у власних підшипниках
Генераторы и двигатели постоянного тока	- Вибрации подшипников - Ток ротора двигателя - Контроль процессов коммутации на коллекторе	- Дефекты опорных подшипников - небаланс ротора - розцентровки з приводним механізмом - Наявність люфтів, послаблень, проблем з фундаментом	Балансировка ротора у власних підшипниках

		- Контроль якості пайки провідників обмотки ротора - Контроль нерівномірності процесу комутації по колу колектора	
--	--	--	--

РЕММ - система моніторингу стану генераторів і потужних електродвигунів



Рисунок 1.3 – Прилад REMM

Стационарна система марки REMM (Rotation Electrical Motor Monitor) призначена для оперативного контролю технічного стану великих електричних машин.

Основні властивості системи REMM в базовому варіанті:

- • Контроль стану ізоляції статора за рівнем часткових розрядів
- • Контроль вібраційного стану пакета статора електричної машини
- • Контроль електромагнітної несиметрії статора
- • Контроль наявності дефектів обмотки ротора
- • Контроль електричних параметрів статора
- • Контроль температурних режимів статора

При необхідності властивості системи REMM можуть бути розширені за рахунок поставки додаткових модулів. Таких модулів може бути встановлено два.

- • Модуль контролю вібраційних параметрів підшипників електричної машини
- • Модуль реєстрації аварійних і перехідних процесів в електричній

машині

Система REMM, конструктивно, виконана у вигляді набору модулів, склад яких може бути легко змінений.

1. Модуль універсального блоку живлення системи
2. Головний модуль системи моніторингу
3. Модуль реєстратора аварійних і перехідних режимів
4. Модуль реєстрації та аналізу часткових розрядів
5. Модуль вібраційного контролю підшипників електричної машини

1.3 Класифікація діагностичних ознак

Питання діагностування електричних машин за ознаками їх роботи, виникли з моменту їх створення і вирішувались різними методами. Класичною працею з питань діагностики за ознаками, встановлення причин виникнення і надання рекомендацій по усуненню, є праця Р.Г. Гемке [31]. Саме в [31], перше видання вийшло у 1937 р., вперше класифіковані ознаки роботи електричних двигунів. Розвиток методів діагностики суттєво розширив перелік діагностичних ознак, але їх можна поділити на два класи: прямі ознаки режиму роботи, зовнішні ознаки режиму роботи. Детальна класифікація показана у табл. 1.6.

Найбільш складним при ремонті електрообладнання є процес пошуку несправностей, так як сучасні електричні схеми являють собою складну взаємопов'язану мережу електричних та електронних кіл. Тому досить важко виявити несправну деталь або коло серед безлічі інших деталей і кіл, що впливають одна на іншу. Завдання ускладнюється ще тим, що більшість несправностей носять прихований характер і не можуть бути виявлені зовнішнім оглядом. Процес пошуку несправності є послідовність тестових експериментів над електроприводом і прийняття діагностичного проміжного або кінцевого рішення.

Таблиця 1.6 – Класифікація діагностичних ознак режиму роботи електричної машини.

Характеристика ознаки	Переваги	Недоліки
1	2	3
Прямі ознаки Переваги: висока точність вимірювання, відсутність впливу завад при екрануванні ліній передачі даних Недоліки: сенсори потребують механічного або електричного зв'язку з двигуном; під'єднання або відключення сенсорів можливе лише при непрацюючому двигуні, тобто потребує зупинки технологічного процесу; стаціонарна установка сенсорів, за показником вартості, доцільна лише на потужних та відповідальних механізмах.		
<i>За швидкістю обертання ротора</i>		
Використовують відомий різницевий метод діагностування [33 – 35], за формою кривої швидкості обертання ротора електродвигуна порівнюючи її з формою швидкості обертання отриманої на моделі.	простота вимірювання швидкості обертання механічними засобами.	точність діагностування залежить від точності моделі; для кожного окремого об'єкту діагностування необхідно створювати окрему модель.
<i>За спектром струму</i>		
Використовується розкладання струму на періоді у спектр і здійснюється співставлення виділених частот з відомими дефектами [36 – 46].	простота вимірювання струму статора; висока точність вимірювання.	наявність перетворювачів енергії створює додаткові частоти, наприклад пропорційні комутаційним частотам, які можуть накладатися на ознакові частоти; потребує високої точності визначення періоду розкладання. Через нестаціонарність режиму роботи двигуна можуть виникнути частоти пов'язані з ефектом розтікання спектру; на частоти струму впливає гармонійний склад напруги

1	2	3
		живлення.
<i>За активною та реактивною потужністю</i>		
У робочому режимі паралельно обмоток статора АД підключається батарея конденсаторів (БК), яка здійснює компенсацію реактивної потужності. Безперервно вимірюється швидкість зміни напруги на БК. За зміною швидкості значень напруги визначають міжфазне, одно-, дво-, трифазне коротке замикання в мережі, неповнофазні режими роботи АД, з подальшою сигналізацією і відключенням двигуна від мережі[47 – 52]. Записується сигнал повної споживаної потужності і на періоді розкладається в спектр. Спектр миттєвої потужності є надійним діагностичним критерієм стану електромеханічних систем. Для аналізу слід отримати масив суми миттєвих потужностей по трьох фазах. Гармоніки оборотної частоти і кратні їм відображають стан механічної системи приводу, гармоніки, кратні частоті напруги живлення - стан електродвигуна [53].	Простота вимірювання потужності; висока точність вимірювання.	Перерозподіл активної і реактивної потужності залежить від режиму роботи, навантаження; наявність перетворювачів енергії створює додаткові частоти, наприклад пропорційні комутаційним частотам, які можуть накладатися на ознакові частоти; потребує високої точності визначення періоду розкладання. Через нестаціонарність режиму роботи двигуна можуть виникнути частоти пов'язані з ефектом розтікання спектру; на частоти потужності впливає гармонійний склад напруги живлення.
Зовнішні ознаки		
Переваги: сенсори не потребують механічного або електричного зв'язку з двигуном; під'єднання або відключення		

1	2	3
сенсорів може здійснене на працюючому двигуні і не потребує зупинки технологічного процесу		
Недоліки: Вимірюваний сигнал може містити шуми та завади від зовнішнього електротехнічного обладнання розміщеного поряд.		
<i>За вібрацією (вібродіагностика)</i>		
При вібраційній діагностиці як правило досліджуються часовий сигнал або спектр вібрації обладнання. Також застосовується кепстральний. При вібраційній діагностиці аналізуються віброшвидкість, вібропереміщення, віброприскорення. Виконується розкладання вібросигналу на періоді у спектр і здійснюється співставлення виділених частот з відомими дефектами [54 – 70].	метод дозволяє знаходити приховані дефекти; як правило, не вимагає збирання-розбирання обладнання; малий час діагностування; можливість виявлення несправностей на етапі їх зародження; зниження очікуваного ризику виникнення аварійної ситуації під час експлуатації устаткування.	особливі вимоги до способу кріплення датчика вібрації; залежність параметрів вібрації від великої кількості факторів і складність виділення вібраційного сигналу обумовленого наявністю несправності, що вимагає глибокого застосування методів кореляційного і регресійного аналізу; точність діагностування в більшості випадків залежить від числа згладжених (осереднених) параметрів, наприклад числа оцінок SPM.
<i>За магнітним полем</i>		
Встановлено, що зовнішнє магнітне поле електричних машин в значній мірі визначається різного роду несиметрією обмоток статора і магнітної системи. Несиметрія, обумовлена виниклими дефектами, змінює характер зовнішнього магнітного поля, викликаючи спектр просторових гармонік індукції. Це дає можливість використовувати аналіз індукції	вимірювання діагностичних параметрів, наприклад, індукції магнітного поля, проводиться безконтактним методом в робочому режимі без відключення двигуна і без зупинки технологічного процесу. Зовнішнє МП може виступати в якості як основного, так і додаткового джерела діагностичної інформації, що дозволяє достовірно оцінити	різні дефекти, неполадки і відхилення в роботі АД мають схожі ознаки. Тому виникає питання про диференціальну діагностику. Потребують математичних моделей розподілу магнітної поля для порівняння з вимірюною.

1	2	3
зовнішнього магнітного поля для діагностування асинхронного двигуна. Вимірюються числові параметрів і характеристики магнітного поля зовні двигуна, наприклад, магнітної індукції безпосередньо на статорі. Порівнянням з картиною поля отриманою на математичній моделі встановлюється кореляційний зв'язок з наявністю у двигуні дефектів або несправностей, а також ступінню їх розвитку [71 – 81].	технічний стан і прогнозувати відмови електричних машин.	
<i>За шумом, який створює об'єкт(акустична діагностика)</i>		
Акустична діагностика заснована на тому, що кожному стану системи відповідають цілком певні акустичні сигнали. Визначення інформативних параметрів і ознак сигналів є однією з найбільш складних проблем акустичної діагностики. Складність її пов'язана з взаємною обумовленістю сигналів, які можуть відповідати різним причинам їх виникнення. Сигнали різних дефектів можуть бути в тій чи іншій мірі картельованими, і виділення ознаки, що характеризує окремі несправності є складною задачею. Але при цьому різні несправності будуть створювати різні енергетичні і статистичні	висока чутливість, інформативність, достовірність, оперативність діагностичних операцій.	складність розшифровки результатів контролю, на хвильовий процес акустичної накладаються паразитні акустичні параметри багаторазово відбитих хвиль, шумів від роботи машин і навколишнього середовища. Застосування фільтрів і систем захисту тільки частково знижує цей вплив.

1	2	3
характеристики шуму. Практично використовують дві характеристики: середню потужність шуму і кореляційну функцію [82 – 85].		
<i>За іскрінням щіток</i>		
Основне застосування методу, це визначення стану колекторного апарату машин постійного струму і визначення параметрів комутації. В основі методу – контроль струму, що протікає через щітковий вузол та аналіз його форми і спектру. Окремим методом діагностування є відеоконтроль іскріння. В якості діагностичних показників встановлені колір, величина та сталість іскріння [86 – 88].	простота реалізації методу	при вимірюванні струму з наступним його аналізом на точність і достовірність отриманого результату можуть впливати пульсність перетворювачів енергії, високочастотні завади, тощо; при відеоконтролі комутації основним недоліком є застосування для машин малої потужності з щітками, що встановлені чітко на одну ламель, при перекритті ламелей, або наявності декількох паралельно встановлених щіток діагностування окремої секції чи ламелі колекторного апарату неможливе. Отримай результат буде відноситись до загального стану.
<i>За температурою</i>		
Контроль температури здійснюється за допомогою пірметрів і тепловізорів. Пірметр дозволяє вимірювати температуру з великою точністю в локальній зоні. Тепловізор надає картину температурного поля в	об'єктивність, повнота і точність одержуваних результатів; висока швидкість проведення робіт (немає необхідності в підготовці місця для проведення діагностики та відключення обладнання); небезпека	низька точність; на отримані результати чинить вплив температура навколишнього середовища; висновок за результатами діагностування занадто загальний і характеризує не стільки дефект скільки його

1	2	3
кольоровому градієнті із зіз зазначенням температури переходів. При контролі температури складних процесів, що характеризуються нерівномірним нагріванням, нестационарність і неоднорідністю коефіцієнта теплового випромінювання, тепловізори ефективніше пірометрів, оскільки аналіз одержуваної термограми або температурного поля здійснюється людиною візуально в цілому. [89 – 93].	проведення дослідження зведена до мінімуму; діагностика дозволяє виявити дефект на ранній його стадії.	наявність.

Одним із шляхів зменшення часу пошуку несправностей і вимог до кваліфікації обслуговуючого персоналу є застосування автоматичного пошуку несправностей, заснованого на алгоритмізації процедур пошуку. Для пошуку несправностей в системі електроустаткування, як показує досвід експлуатації, можливе застосування таких методів [32]:

- органолептичні методи, які засновані на використанні органів чуття людини (огляд, прослуховування);
- метод заміни;
- метод вносимої несправності;
- метод половинного розбиття;
- метод контрольного сигналу;
- метод проміжних вимірювань;
- метод порівняння з несправним об'єктом.

Незважаючи на велику кількість методів діагностики електродвигунів, питання продовжує залишатися актуальним по ряду причин. Серед них відсутність надійних критеріїв оцінки технічного стану, динаміки розвитку дефектів, відсутність методів прогнозування залишкового ресурсу, недостатня дослідженість окремих несправностей двигунів, а також те, що не визначені спеціальні діагностичні параметри, що характеризують зміну процесів функціонування при виникненні відповідних несправностей. Наявні критерії враховують тільки граничні або допустимі стани параметрів, що не дозволяє оцінювати дефекти на ранній стадії їх розвитку.

Таким чином, проблема діагностики асинхронних двигунів складається в необхідності створення універсального, простого методу визначення технічного стану електродвигунів. Це дозволить до мінімуму знизити збиток від пошкоджень асинхронних двигунів за рахунок раннього виявлення виникаючих дефектів.

Бажаною умовою є вимір діагностичних параметрів функціонуючого приводу без виведення двигуна з процесу виробництва і транспортування його на спеціалізовані стенди.

1.4 Постановка завдань досліджень

Грунтуючись на аналізі існуючих моделей та методів оцінки стану електромеханічних перетворювачів, виходячи з оцінки інформаційних технологій, які можуть бути використані для вирішення задач моніторингу, та з урахуванням методів та підходів до використання зовнішніх зовнішніх ознак роботи асинхронних двигунів для прийняття управлінського рішення щодо своєчасного виводу двигунів в ремонт та оцінки терміну та доцільності їх подальшої експлуатації, можна зробити висновок про актуальність наступного наукового завдання, яке полягає *в розробці інформаційної технології комплексного моніторингу стану асинхронних двигунів безпосередньо під час виконання технологічного процесу на основі зовнішніх ознак їх роботи.*

Отже для вирішення наукового завдання та досягнення поставленої в дисертаційній роботі мети, необхідно розв'язати такі задачі:

- розробити комплекс методів для визначення поточного стану двигунів на основі зовнішніх ознак їх роботи;
- розробити і дослідити методи визначення зміни параметрів асинхронного двигуна при поточному моніторингу з урахуванням зовнішнього шуму від працюючого електротехнічного та електромеханічного обладнання;
- розробити структуру запропонованої інформаційної технології і створити типове програмно-інформаційне забезпечення для реалізації запропонованих методів та складових інформаційної технології;
- провести випробування розробленої інформаційної технології в реальних умовах виробництва та здійснити економічну оцінку її впровадження.

РОЗДІЛ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ІНДУКЦІЇ ЗМІННОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Основне завдання експериментальних досліджень полягає у доведенні гіпотези – зміна індукції магнітного поля на поверхні статора АД є ознакою, яка може свідчити про зміну стану двигуна. Безумовно, чітку ідентифікацію причини яка привела до зміни індукції магнітного поля визначити практично неможливо через багато чинників: зміна опорів статора через виткові замикання чи обриви витків, виникнення локальних точок замикання пластин пакету сталі, та навіть зміна опорів статора і ротора через перегрів, викликаний перевантаженням. Але все це веде до погіршення стану і зниження ресурсу роботи двигуна. Безпосередня причина може бути встановлена під час огляду або ремонту, рішення на проведення якого буде прийнято за фактом зміни індукції магнітного поля та й інших зовнішніх ознак роботи двигуна.

2.1 Моделювання індукції магнітного поля на поверхні статору АД

Розрахунок електромагнітного поля, утвореного струмами обмоток, являє собою одну з найбільш важливих завдань теорії електромеханіки. Це завдання в найпростішому випадку складається в знаходженні в поперечному перерізі машини розподілу індукції магнітного поля за заданими щільностями струмів обмоток. У загальному вигляді ця задача може бути вирішена на основі рівнянь Максвелла.

У більшості випадків аналітичне рішення цієї системи рівнянь виявляється неможливим. Це пов'язано головним чином зі складною формою кордонів області розрахунку і з нелінійністю властивостей магнітних матеріалів в залежності від індукції або напруженості магнітного поля.

Чисельне рішення рівнянь поля, тобто розрахунок поля на ЕОМ за допомогою різних обчислювальних програм, заснованих, наприклад, на методах скінченних різниць (МКР), скінченних елементів (МСЕ) та інших, дозволяє практично без будь-яких спрощуючих припущень з високою точністю розрахувати розподіл поля в будь-якому електромеханічному пристрої [94].

2.1.1 Основні відмінності кінцево-елементних пакетів

Серед існуючого різноманіття програмних продуктів, призначених для вирішення польових задач, можна виділити три універсальних пакета такого роду. По-перше, це ANSYS - один з перших пакетів кінцево-елементного аналізу, по-друге, Femlab - інтегрований в Matlab новітній пакет для вирішення польових задач, і по-третє, Elcut - практично єдиний пакет, придатний для моделювання електротехнологічних установок. Всі три пакети є універсальними (вони призначені для вирішення різних типів польових задач), дозволяють вирішувати лінійні і нелінійні задачі і мають приблизно однаковою точністю і можливостями. Основні відмінності пакетів представлені в табл. 2.1.

Серед розглянутих програм Elcut на перший погляд має обмеженими можливостями в порівнянні з іншими програмами. Однак деякі обмеження досить легко долаються. Наприклад, Elcut не дозволяє моделювати тривимірні об'єкти, але існує безліч об'єктів, які є, з точки зору геометрії, тілами обертання, а осесиметричні завдання за допомогою Elcut вирішуються і дають ті ж результати, що і в тривимірній постановці. Найбільш серйозним недоліком Elcut є те, що в цій програмі на сьогоднішній день відсутня можливість одночасного вирішення польових задач (наприклад, електромагнітної і теплової). Це не дозволяє автоматично враховувати зміна властивостей матеріалів в процесі розрахунку. Наприклад, не можна врахувати зміна магнітної проникності металу при зміні його температури.

Даний недолік можна частково подолати, розбивши часовий відрізок, на якому проводиться тепловий розрахунок, на кілька окремих ділянок. На

кожному з таких ділянок необхідно попередньо вирішувати електромагнітну завдання з новими значеннями властивостей матеріалів.

Перевагами ж Elcut, безумовно, є наявність російськомовної версії з документацією російською мовою, велика кількість прикладів, що поставляються з програмою, а також розвинені можливості по обробці результатів розрахунку (розрахунок індуктивностей, ємностей, зусиль і т. п.).

Таблица 2.1 – Основні відмінності кінцево-елементних пакетів

№, п/п	Можливості пакету	ANSYS	FEMM	ELCUT
1	Вид аналізу			
	Електромагнітний	Так	Так	Так
	Тепловий	Так	Так	Так
	Гідрогазодинамічний	Так	Так	Ні
	Механічний	Так	Так	Так
	Змішаний (мультифізичний)	Так	Так	Тільки послідовний
2	Тип розрахунку			
	Статичний	Так	Так	Так
	Динамічний	Так	Так	Тільки для теплових задач
3	Геометрична модель			
	Двовірна	Так	Так	Так
	Вісьосемитрична	Так	Так	Так
	Тримірна	Так	Так	Ні
4	Вибір типу кінцевого елемента	Так	Так	Ні
5	Можливість задавати ентальпію як параметр матеріалу	Так	Ні-	Ні
	Можливість моделювання зовнішніх електричних кіл	Так	Так (експорт в Simulink)	Ні

Пакет ANSYS має найбільшу кількість переваг. Це єдиний пакет серед

перерахованих, що дозволяє моделювати перехід матеріалу з твердого стану в рідке і навпаки (фазовий перехід). Однак складність інтерфейсу програми, велике число параметрів її налаштування і майже повна відсутність підручників за програмою російською мовою ускладнюють її використання.

Пакет Femlab поєднує в собі переваги двох інших пакетів. Він обладнаний простим і зрозумілим інтерфейсом, як Elcut, і має практично ті ж розрахункові можливості, що і ANSYS. Крім цього, Femlab по суті є інструментом (toolbox) пакета Matlab і працює під його керуванням.

Це означає, що всі можливості програмування, доступні в Matlab, можуть бути використані і в Femlab (наприклад, при обробці результатів розрахунку). Ще одним величезним достоїнством Femlab є можливість експорту кінцево-елементної моделі в Simulink (інструмент моделювання динамічних систем, вбудований в Matlab). Це дозволяє моделювати не тільки найпростіші зовнішні електричні ланцюги, але і роботу установки, спільно з перетворювачами електричної енергії, системами управління, досліджувати частотні характеристики і стійкість електротехнологічеський установки і т. п.

Таким чином, в залежності від складності розв'язуваної задачі і вимог по точності представлення реального об'єкта в моделі, користувач може вибрати потрібну програму для проведення розрахунків. Elcut дозволяє вирішувати двовимірні крайові задачі математичної фізики, описувані еліптичними диференціальними рівняннями в приватних похідних щодо скалярною або однокомпонентної векторної функції (потенціалу), а також завдання розрахунку напруженодеформованого стану твердого тіла (плоскі напруги, плоскі деформації, осесиметричні навантаження).

2.1.2 Магнітне поле електричної машини. Основні рівняння.

Основні закони класичної електродинаміки (система рівнянь Максвелла) є результатом узагальнення експериментальних даних і стала квінтесенцією електродинаміки нерухомою середовища. Рівняння Максвелла ділять на структурні і матеріальні. Структурні рівняння записують у два види: в

інтегральному і диференціальному виді. Запишемо Максвелла в диференціальному вигляді (система СІ) [95]:

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

де $\bar{E}$ - вектор напруженості електричного поля; $\bar{B}$ - вектор магнітної індукції.

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{j} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

де $\bar{H}$ - вектор напруженості магнітного поля; $\bar{D}$ - вектор діелектричного зсуву; $\bar{j}$ - вектор щільності струму.

$$\operatorname{div} \bar{D} = \rho \quad (2.3)$$

де ρ - щільність розподілу електричного заряду.

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0 \quad (2.4)$$

Структурні рівняння Максвелла в диференціальній формі характеризують електромагнітне поле в кожній точці простору. Якщо заряди і струми розподілені в просторі безперервно, то інтегральна й диференціальна форми рівнянь Максвелла еквівалентні. Однак, якщо є поверхні розриву, те інтегральна форма запису рівнянь Максвелла є більш загальною. (Інтегральну форму записи рівнянь Максвелла можна подивитися в розділі «Електродинаміка»). Для досягнення математичної еквівалентності інтегральної і диференціальної форм рівнянь Максвелла диференціальну запис доповнюють граничними умовами.

З рівнянь Максвелла випливає, що змінне магнітне поле породжує змінне електричне поле і навпаки, тобто ці поля нерозривні і утворюють єдине електромагнітне поле. Джерелами електричного поля можуть бути або електричні заряди, або змінне в часі магнітне поле. Магнітні поля збуджуються рухомими електричними зарядами (струмами) або змінними електричними полями. Рівняння Максвелла не є симетричними щодо електричного і

магнітного полів. Це відбувається через те, що електричні заряди існують, а магнітних нема.

Систему структурних рівнянь Максвелла доповнюють матеріальними рівняннями, які відображають зв'язок векторів $\vec{E}$, $\vec{D}$, $\vec{B}$, $\vec{H}$, з параметрами, котрі характеризують електричні і магнітні властивості речовини.

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H} \quad (2.6)$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} \quad (2.7)$$

де ε - відносна діелектрична проникність, μ - відносна магнітна проникність, γ - питома електропровідність, ε_0 - електрична постійна, μ_0 - магнітна постійна. Середовище в такому разі вважається ізотропним, неферомагнітним, несегнетоелектричним.

Таблиця 2.2 – Рівняння електродинаміки [96]

	Диференційні рівняння	Інтегральні рівняння	Назва	Явище, котре описує рівняння
1	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$	Закон Фарадея	Змінне у часі магнітне поле викликає електричне поле
2	$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \frac{d\Phi_D}{dt}$	Закон Ампера розширений Максвелом	Електричний струм і змінне електричне поле створюють магнітне поле
3	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$	$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_V \rho \cdot dV$	Закон Гауса для електрики	Джерело електричного поля – заряди
4	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$	Закон Гауса для магнітного поля	Не існує заряду магнітного поля, силові лінії магнітного поля замкнені

де D - електромагнітна індукція, Кл/м², B - магнітна індукція, Т, E - напруженість електричного поля, В/м, H напруженість магнітного поля, А/м, Φ_D - потік електричної індукції, Кл, Φ_B - магнітний потік, Вб, j - густина струму, А/м², ρ - густина заряду, Кл/м³, $\nabla \cdot$ - оператор дивергенції, 1/м, $\nabla \times$ - оператор ротора, 1/м.

2.1.3 Метод кінцевих різниць

Метод кінцевих різниць [97] використовує заміну диференціальних рівнянь кінцево-різницевиими рівняннями, [98]. Основний недолік цього методу – складність точного опису границь і оптимального накладення на область розрахунку кінцево-різницевої сітки. Метод кінцевих різниць передбачає заміну безперервного розподілу скалярного або векторного магнітного потенціалу дискретним. З цією метою область, де розраховується магнітне поле, покривається сіткою. Тому метод ще називають методом сіток.

2.1.4 Метод кінцевих елементів

Основна ідея МКЕ полягає в тому, що будь-яку безперервну функцію, таку, як векторний або скалярний магнітний потенціал, індукцію, температуру і т.п., можна апроксимувати дискретною моделлю, яка будується на множині кусково-неперервних функцій, визначених на кінцевому числі підобластей. Розв'язання рівнянь поля в МКЕ визначається, виходячи з умови мінімуму енергетичного функціоналу або ортогональності нев'язких рівнянь поля і інтерполяційних функцій кінцевих елементів [99, 100].

2.1.5 Моделювання магнітного поля симетричного і несиметричного асинхронних двигунів

Розглянемо детально моделювання несиметричних режимів в FEMM [101].

Для дослідження несиметричних режимів роботи АД був обраний двигун 4AM71A4.

Таблиця 2.3 - Паспортні дані 4AM71A4

P_n , кВт	n_n , об/хв	U_n , В	f , Гц	$\frac{I_{II}}{I_H}$	$\frac{M_{II}}{M_H}$	$\frac{M_{max}}{M_H}$	$\frac{M_{min}}{M_H}$	ККД, %	$\cos \varphi$, %
0,55	1369	380	50	4.5	2	2.2	1.6	87.5	0.88

Для розрахунку магнітного поля АД було побудовано графічну модель магнітопроводу статора за реальними габаритам з невеликим спрощенням геометрії пазів (істотно на достовірність результату не вплинуло, однак, зменшило час розрахунку).

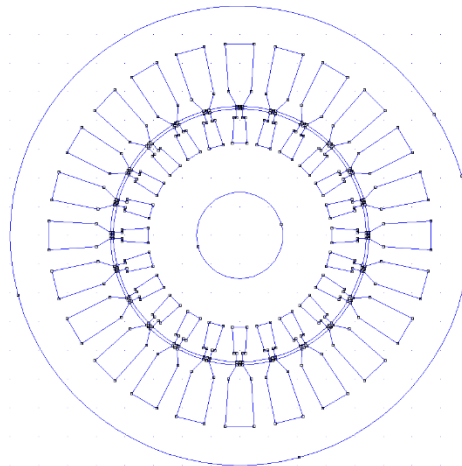


Рисунок 2.1 – Геометрична модель двигуна 4AM71A4.

Графічна модель має такі властивості: кількість пазів статора 24, кількість пазів ротора 24, зовнішній діаметр пластин статора 150 мм, внутрішній діаметр пластин статора 90 мм, діаметр пластин ротора 88 мм, обмотка статора виконується за схемою концентричної двопетльовий одношарової обмотки з ефективним числом провідників на паз рівним 226, перетин провідників 0,5 мм.

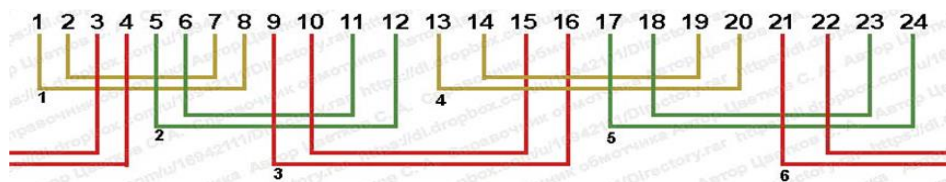


Рисунок 2.2 – Схема укладання обмоток

Для елементів АД обрано такі матеріали:

- Обмотки статора виконана з матеріалу AWG20 з наступними параметрами виконані з: відносна магнітна проникність електропровідність $g = 0 \text{ См / м}$. Позитивний напрямок струму відповідає початку обмотки а негативне в кінці обмотки, або $+180$ град.
- Магнітопровід статора і ротора зі сталі M19, відносна магнітна проникність $\mu_x = \mu_y = 441.6$. Електропровідність $g = 1.9 \text{ МСм/м}$; тип шихтовки задається вибором параметра Laminated in-plane в групі властивостей Special Attributes: Lamination & WireType, товщина листа 0,635 мм і коефіцієнт заповнення стали 0,98.
- Повітря та ізоляція Air: відносна магнітна проникність $\mu_x = \mu_y = 1$, електропровідність $g = 0 \text{ См / м}$.

Розрахунок розподілу магнітного поля обмежувався поверхнею більшого кола, властивості якого аналогічні повітрю.

Джерелом поля служить струм в фазах. Дані значення струмів були отримані з синтезованої моделі АД.

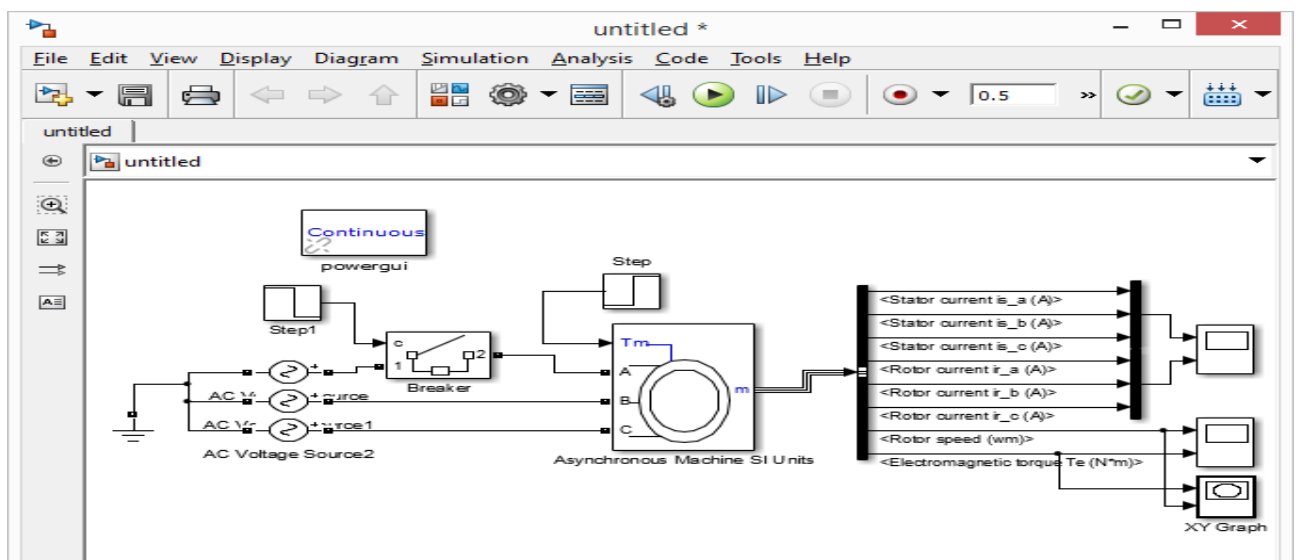


Рисунок 2.3 – Структурна схема моделі АД в Matlab для підготовки початкових даних

Для встановлення рівня інформативності індукції магнітного поля як зовнішнього показника зміни стану АД змодельємо, наприклад, відключення однієї фази від мережі живлення. Результати моделювання наведені на рисунках 2.4 – 2.5.

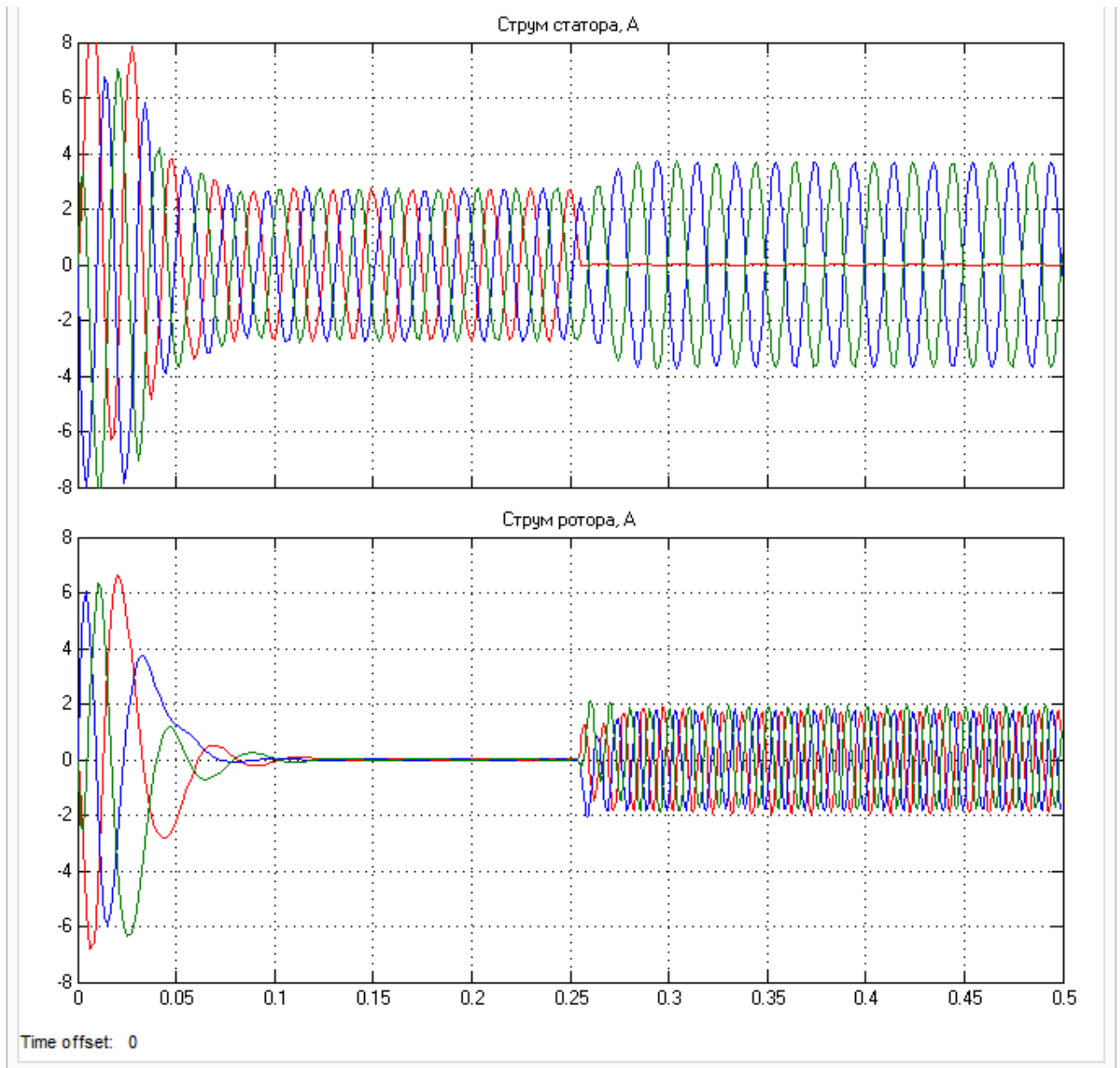


Рисунок 2.4 – Струми статора і ротора при пуску і відключення фази АД

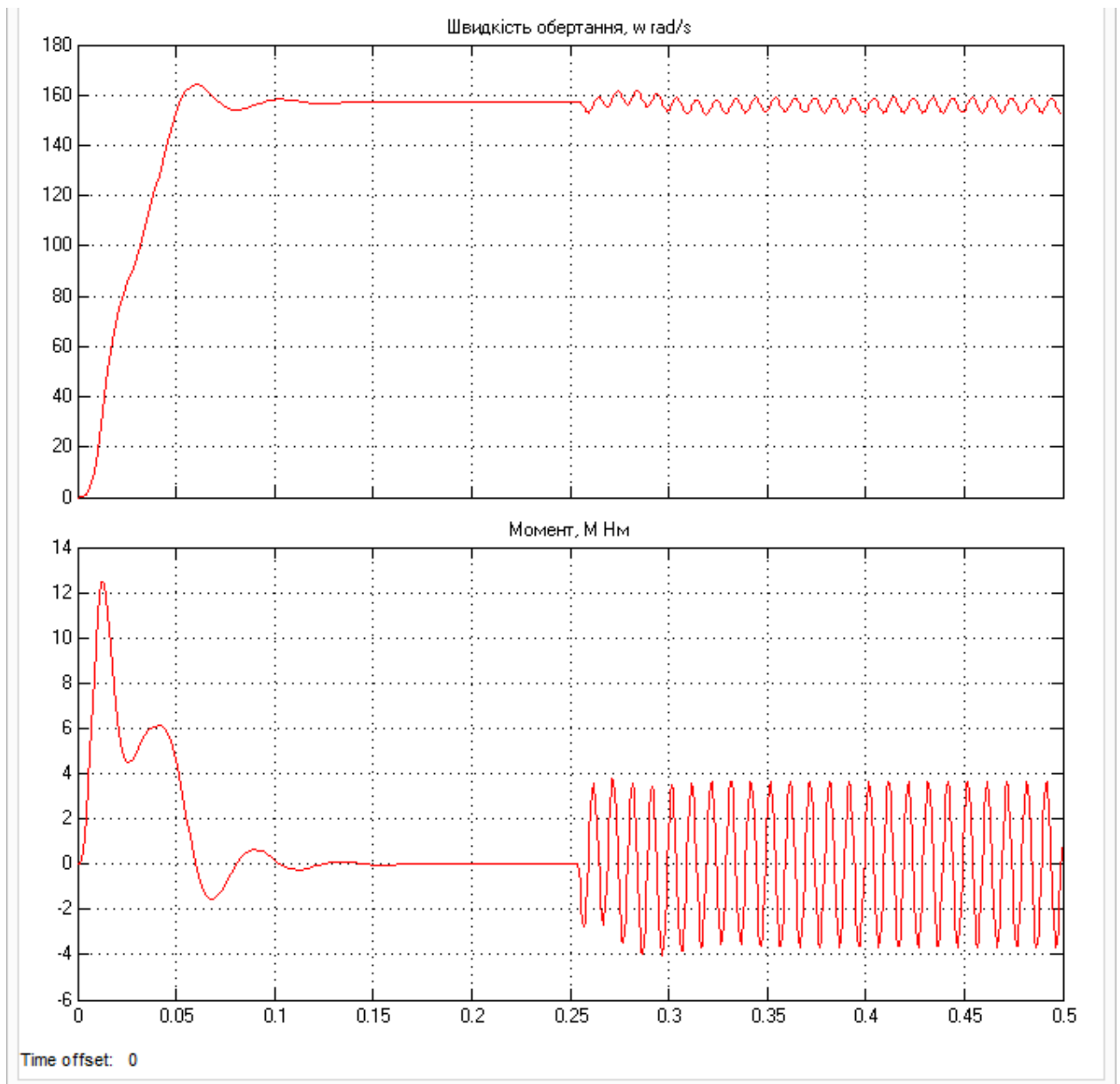


Рисунок 2.5 – Швидкість і момент при пуску і відключення фази АД

Отримані результати експортуємо в програму FEMM. Задамо комплексні значення струмів: $I_A = 1,9 \text{ A}$, $I_B = -0,95 - j1,645 \text{ A}$, $I_C = -0,95 + j1,645 \text{ A}$.
Результати візуального моделювання представлено на рисунках 2.6 – 2.11.

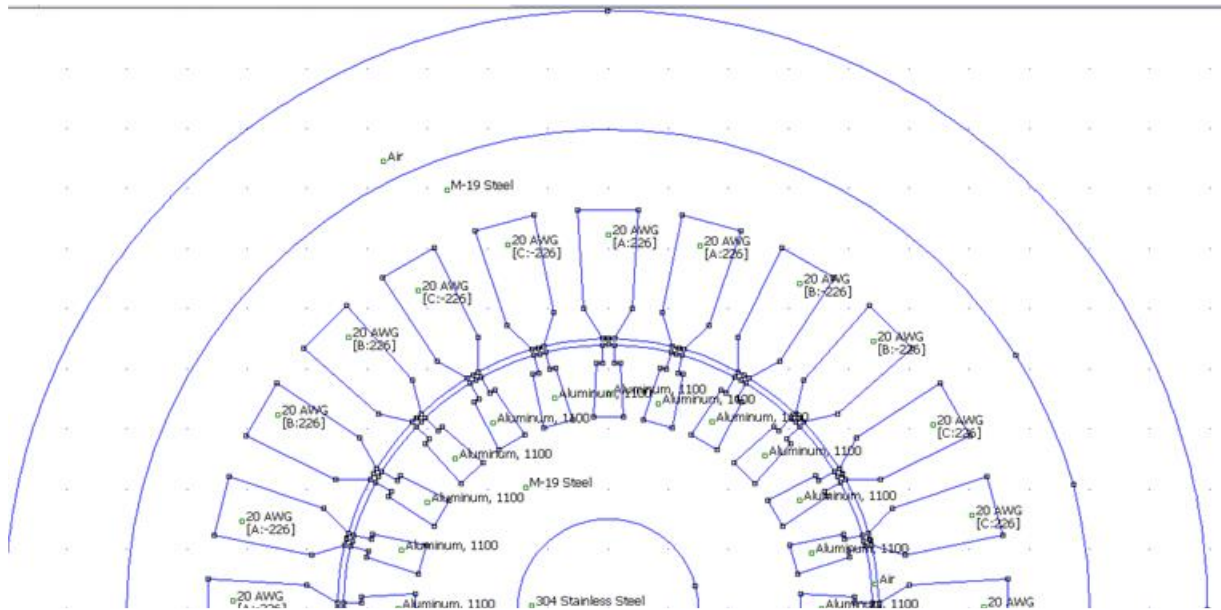


Рисунок 2.6 – Завдання геометрії

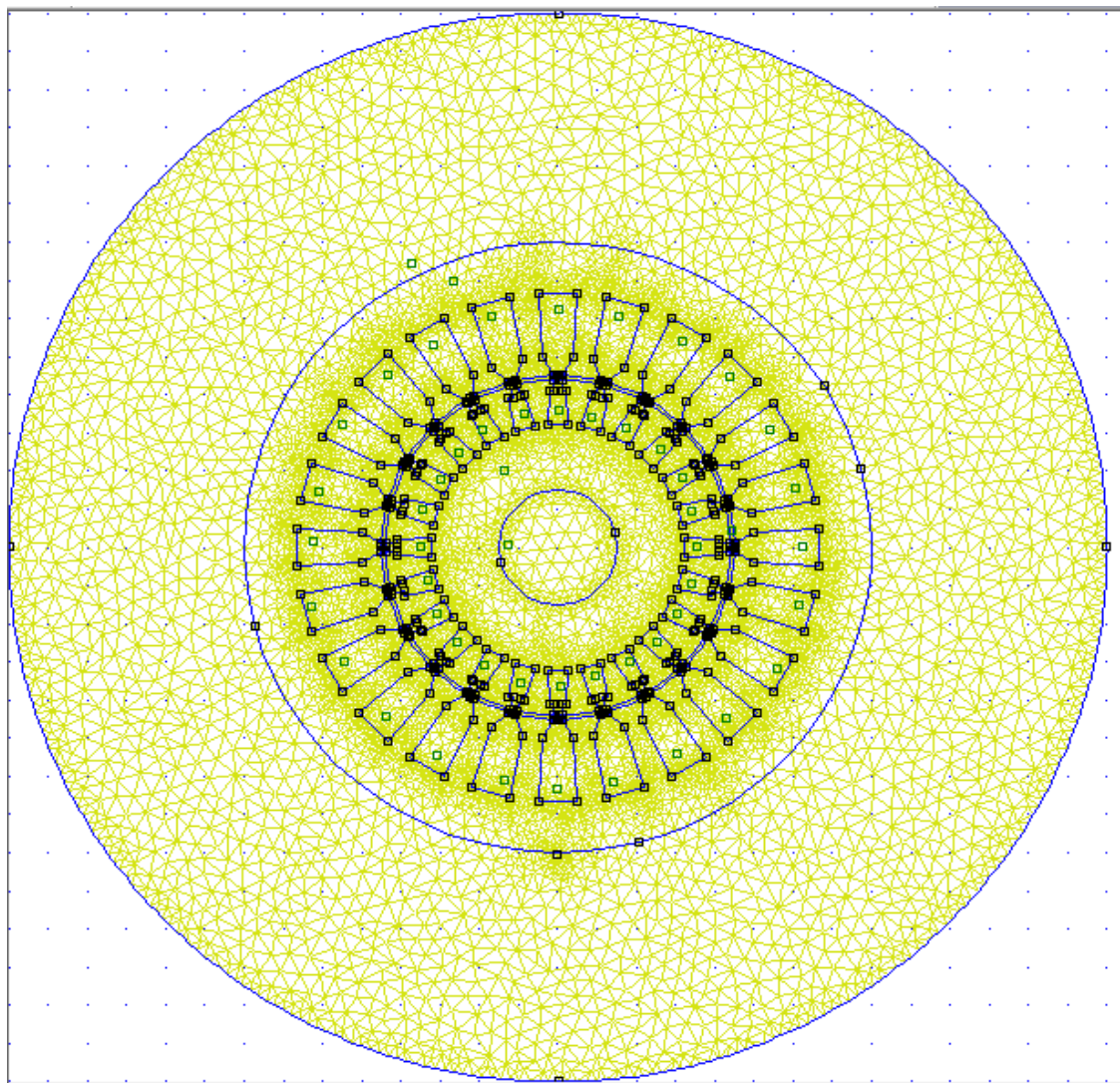


Рисунок 2.7 – Розбиття об'єкта на кінцеві елементи

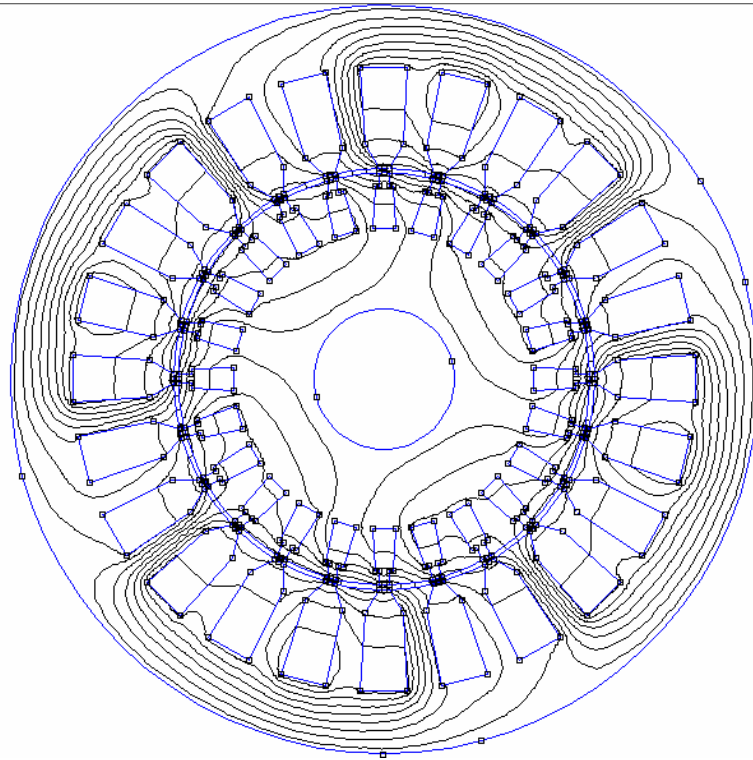


Рисунок 2.8 – Картина силових ліній для симетричного АД

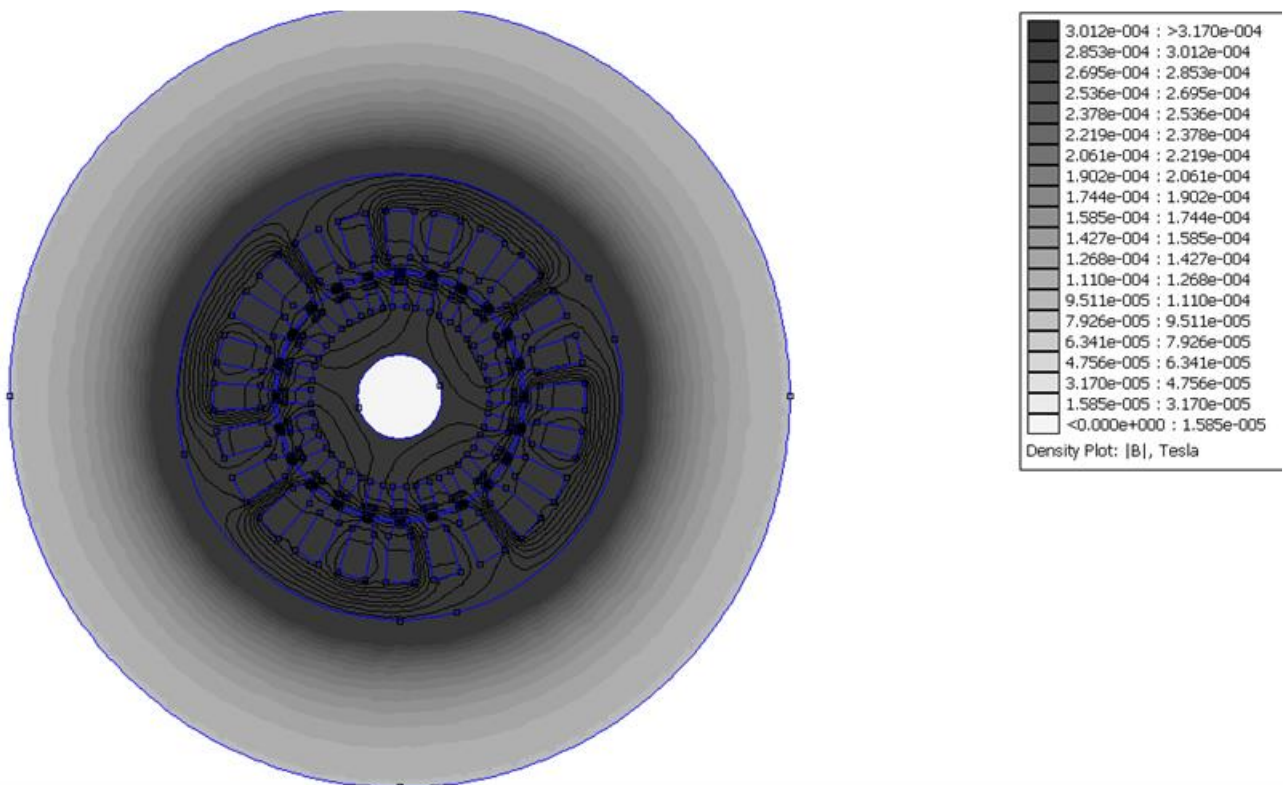


Рисунок 2.9 – Розподіл магнітної індукції і її значення всередині і навколо статора симетричного АД

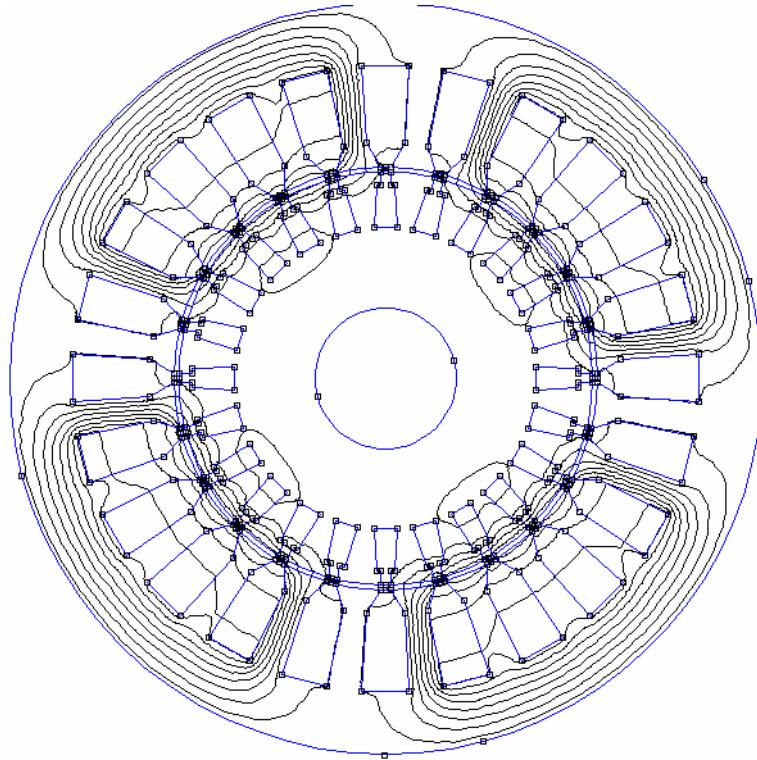


Рисунок 2.10 – Картина силових ліній для несиметричного АД

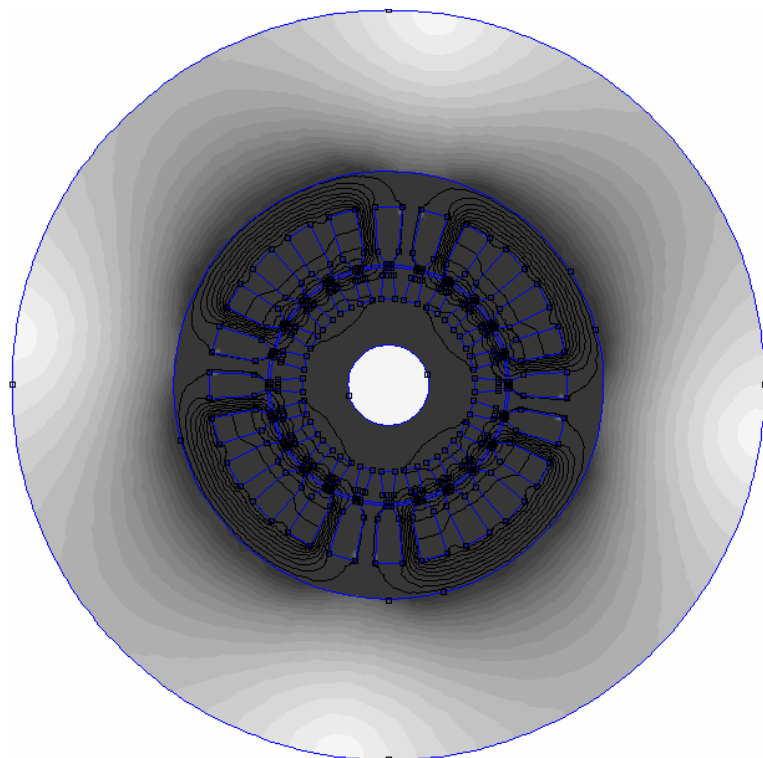


Рисунок 2.11 – Розподіл магнітної індукції і її значення всередині і навколо статора несиметричного АД

2.2 Характеристики обладнання та умови проведення експериментів

Стрімкі прориви в напівпровідниковій промисловості спричинили розвиток різноманітних вимірювальних приладів. Зокрема вимір магнітної індукції став набагато простіший і точніший.

З'явився широкий спектр приладів в області виміру електромагнетизму, принцип їх роботи заснований на перетворенні магнітних величин в електричні. Найбільше застосування отримали перетворювачі, що використовують :

- явища електромагнітної індукції;
- гальваномагнітний ефект (ефект Холу);
- вимір магнітних властивостей матеріалів при одночасній дії на них змінного і постійного магнітних полів;
- внутрішньоатомні взаємодії.

Широкого поширення отримали автономні, переносні тесламетри, із-за своєї мобільності, компактності і простоти використання. До одних з таких приладів відноситься тестер електромагнітного поля TES 1394 (рис. 2.12). Цей прилад був використаний для проведення експериментів по виміру несиметрії магнітного поля в лабораторних умовах.

До основних особливостей цього приладу можна віднести:

- можливість надання користувачеві швидкого, надійного і простого способу виміру рівня електромагнітного поля радіації навколо ліній електропередач, побутової техніки і промислового устаткування;
- економічно ефективний, ручний інструмент, який призначений і відкалібрований для виміру електромагнітного поля випромінювань в різних смугах частот;
- можливість відображення величин мікро-тесла і мілі Гаус в одному тестері;
- можливість збереження даних, функція збереження пікового значення індукції.



Рисунок 2.12 – Вимірник електромагнітного поля TES 1394

Паспортні ці пристрої відображені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики тесламетра TES 1394

Найменування	Значення величини
Дисплей	Максимальна індикація 1999, 3-1/2 чисел
Діапазон	20/200/2000 мілі Гаус 2/20/200 мікро Тесла
Дозвіл	0,01 / 0,1 / 1 мілі Гаус 0,001 / 0.01 / 0.1 мікро Тесла
Кількість осей	Три
Пропускна спроможність	30 Гц 2000 Гц
Точність	+ / - (3% + 3d) при 50 Гц / 60 Гц ± (3% + 3D) в 50 Гц або 60 Гц, ± (5% + 3D) в 40 Гц 200 Гц, -3dB на 30 Гц 2000 Гц
Час вибірки	Приблизно 0.4 секунд
Температура і вологість	Від 0..40 C ⁰ , нижче 80%
Розмір	111 (Д) x 64 (Ш) x 34 (В) мм

В якості об'єкту дослідження магнітної індукції був використаний асинхронний електродвигун з короткозамкнутим ротором АІР 80В4 (рис.2.13), паспортні дані якого відображені в таблиці 2.5 [74].



Рисунок 2.5 – Асинхронний електродвигун АІР 80В4, зовнішній вигляд

Таблиця 2.5 – Паспортні дані електродвигуна АІР 80В4

Потужність кВт	Об/хв.	Струм	ККД, %	Коэф. потужн.	Іп/ Ін	Мп/Мн	Мmax/Мн	Момент інерції, кгм ²
1,5	1390	6,1/3,52	78	0,83	5,3	2,2	2,4	0,0042

В ході проведення експерименту випробовуваний АД було підключене до лабораторного стенду (рис. 2.14) побудованому на основі частотно регульованого перетворювача ASC 300 і додаткової навантажуваної машини постійного струму ДПС.

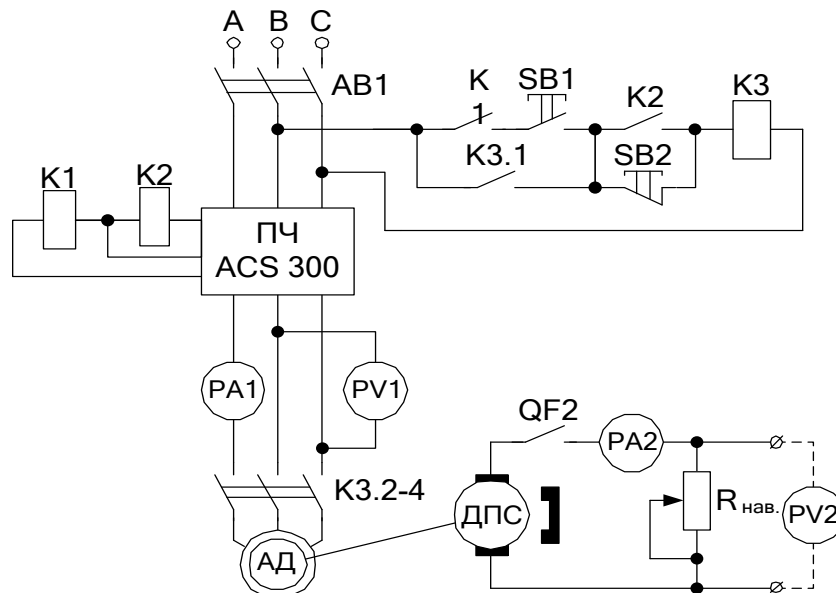


Рисунок 2.14 – Схема електрична принципова лабораторної установки

Основні технічні характеристики перетворювача частоти ACS 300 приведені в таблиці 2.6

Таблиця 2.6 – Основні технічні характеристики перетворювача частоти ACS 300

Номінальна напруга живлення при частоті мережі $f_c = 50$ Гц	208 ... 240 В
Номінальний вихідний струм	5.5 А
Струм короткочасного перевантаження	8.3 А
Частота живлячої мережі	48...63 Гц
Коефіцієнт потужності	0.98
Вихідна частота	0...500 Гц
Номінальна напруга виходу	200...240 В

У схемі стенду передбачена можливість підключення випробовуваного двигуна як від перетворювача частоти, так і безпосередньо від мережі. Двигун постійного струму зі збудженням від постійних магнітів працює в режимі динамічного навантаження, інтенсивність якого регулюється опором R.

2.3 Обґрунтування необхідної точності вимірювань

С метою підвищення точності отриманих вимірів були розглянуті два принципи проведення експериментів, за часом і по пересуванню.

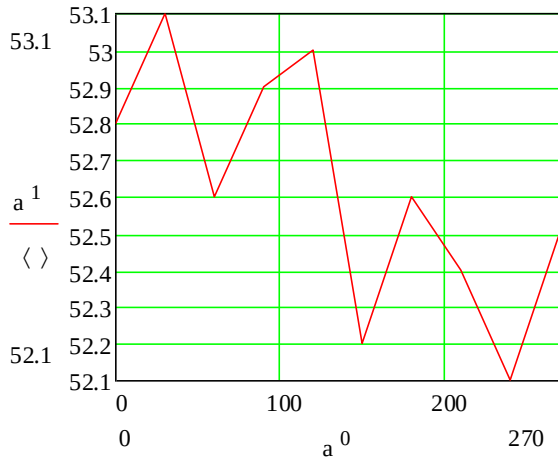
Принцип виміру за часом, полягав в наступному. У кожній конкретній точці виміру проводилося десять вимірів з інтервалом в 30 секунд. Це дозволило врахувати зміни показань приладу, із-за таких чинників як коливання і перепади напруги в електричній мережі. Результати виміру занесено в таблицю 2.7 та проілюстровано на рис. 2.15.

Експеримент з вимірами по пересуванню будувався таким чином. Прилад точно розташовувався в необхідній точці виміру, потім робилося його зміщення в довільному напрямі і знову точне позиціонування в цій точці. Таких пересувань вибрано десять для кожної точки. З десяти вимірів знаходилося середнє квадратичне значення. Цей принцип дозволяє звести до мінімуму

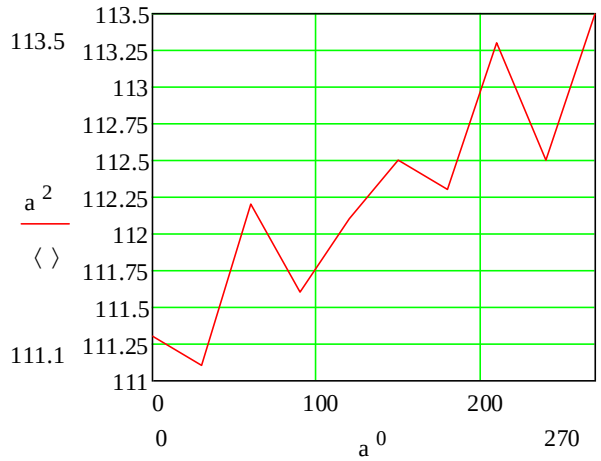
погрішність вимірів заснованих на людському чиннику. Результати виміру занесено в таблицю 2.8 та проілюстровано на рис. 2.16.

Таблиця 2.7 – Значення магнітної індукції при часовому принципу виміру

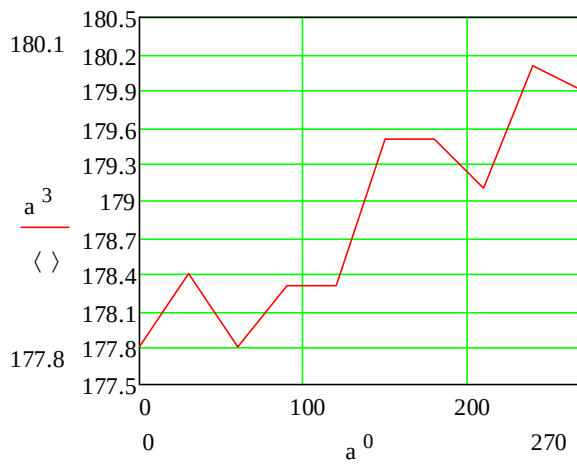
Відстань	5см	10см	15см	20см	25см	30см
час, сек						
0	52,8	111,3	177,8	187,4	120,9	65,3
30	53,1	111,1	178,4	187	120,6	65,9
60	52,6	112,2	177,8	187,2	121,9	65,6
90	52,9	111,6	178,3	188,3	122,4	65,5
120	53	112,1	178,3	187,5	123,6	65,4
150	52,2	112,5	179,5	187,8	122,9	65,9
180	52,6	112,3	179,5	188,4	123,5	65,9
210	52,4	113,3	179,1	189,2	123,5	66,1
240	52,1	112,5	180,1	187,3	122,8	65,9
270	52,5	113,5	179,9	188,1	123,9	65,3



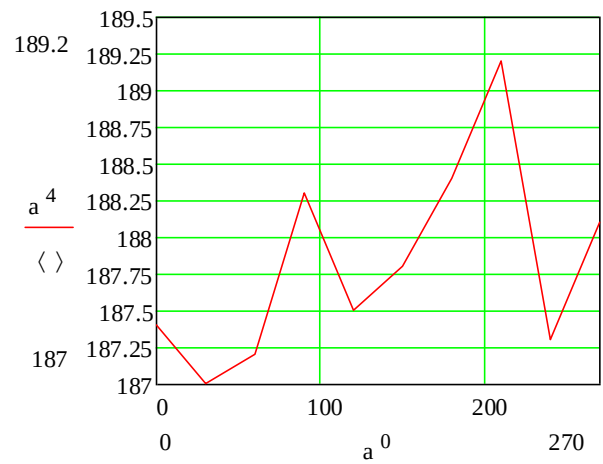
а)



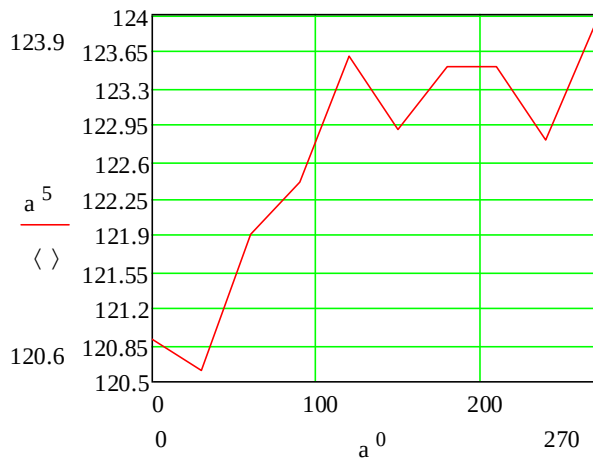
б)



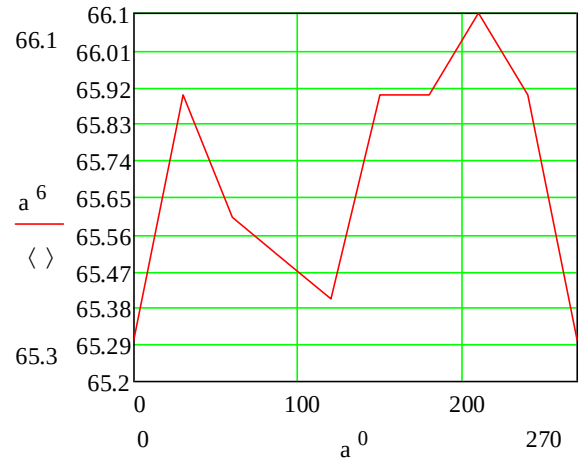
в)



г)



д)



е)

Рисунок 2.15 – Залежність індукції магнітного поля (мкТ) від часу виміру (секунд) на відстані:

5 см (а), 10 см (б), 15 см (в), 20 см (г), 25 см (д), 30 см (е)

Таблиця 2.8 – Значення магнітної індукції при вимірюванні по пересуванню

Відстань	5см	10см	15см	20см	25см	30см
Кільк.пересув.						
1	78,8	143,5	226,5	214,6	155,7	84,4
2	88	153,7	143,3	222,3	157,1	83,7
3	84,1	159,5	251,7	238,5	150,5	86,9
4	88,2	156,6	248,9	239,3	160,2	87,7
5	87,3	154,8	255,3	249,1	166,5	90,3
6	89,6	160,7	254,1	249,3	155,1	87,1
7	87,7	161,7	245,9	244,6	158,2	90,6
8	88,8	151,2	253,8	239	156,7	89,5
9	89,4	158,1	260,5	253,2	160,5	92,4
10	87,5	156,2	261,4	249,9	167,1	89,7

Знайдемо середнє значення (2.1) і середньоквадратичне відхилення (2.2) вимірюної індукції по наступних формулах:

$$A = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=0}^n a_i \quad (2.1)$$

$$C = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=0}^n (a_i - A)^2} \quad (2.2)$$

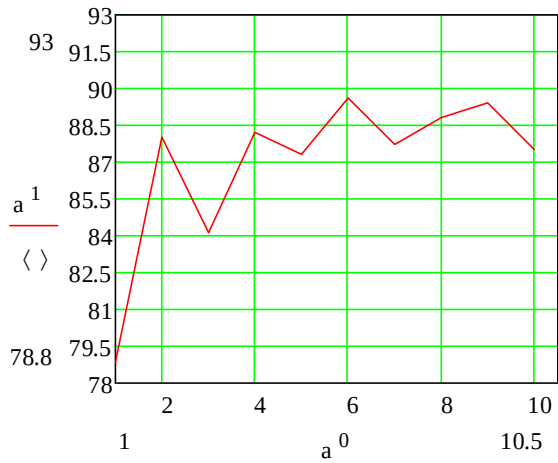
де А - середнє значення магнітної індукції;

С - середньоквадратичне відхилення значення магнітної індукції;

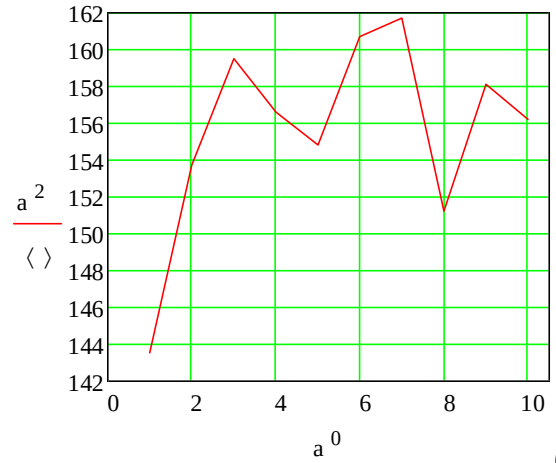
п - кількість вимірів;

a_i - виміряні значення магнітної індукції.

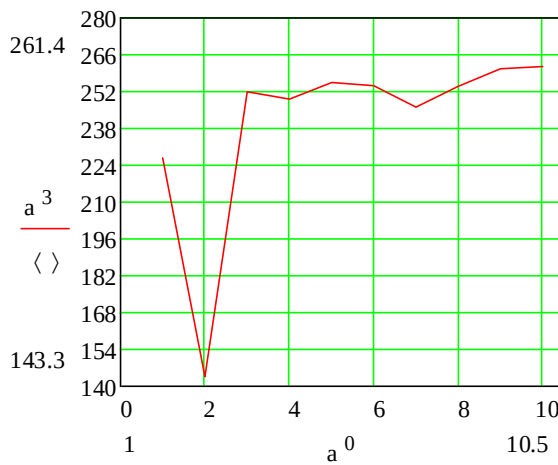
Результати розрахунків занесені в таблиці 2.9 і 2.10.



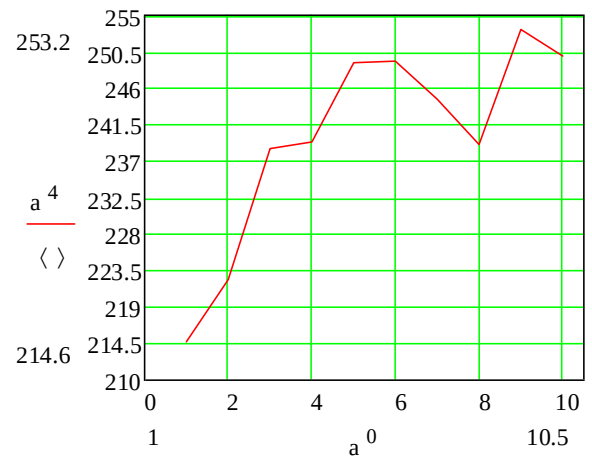
а)



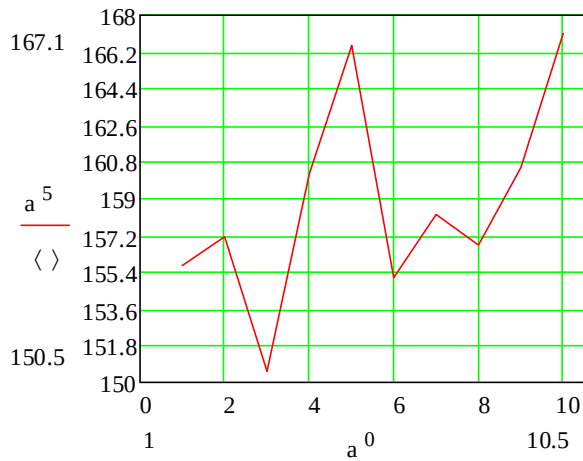
б)



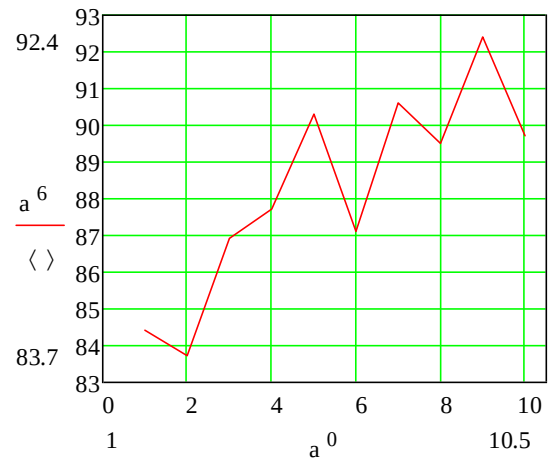
в)



г)



д)



е)

Рисунок 2.16 – Залежність індукції магнітного поля (мкТ) від кількості переміщень приладу на відстань:
5 см (а), 10 см (б), 15 см (в), 20 см (г), 25 см (д), 30 см (е)

Таблиця 2.9 - Розрахункові дані середнього і середньоквадратичного значення магнітної індукції, експеримент за часом

Відстань	5см	10см	15см	20см	25см	30см
Середнє значення	52,62	112,24	178,87	187,82	122,6	65,68
Середньо квадратичне значення	0,333	0,779	0,855	0,68	1,148	0,294

Таблиця 2.10 – Розрахункові дані середнього і середньоквадратичного значення магнітної індукції, експеримент по пересуванню

Відстань	5см	10см	15см	20см	25см	30см
Середнє значення	86,94	155,6	250,14	239,98	158,76	88,23
Середньо квадратичне значення	3,243	5,334	10,096	12,583	5,087	2,781

Знайдемо довірчий інтервал для оцінки математичного очікування нормального розподілу величини магнітної індукції з формули точності оцінки

$$\delta = \frac{t \cdot C}{\sqrt{n}}, \quad (2.3)$$

де $t = 1,96$ - аргумент по таблиці функції Лапласа при надійності оцінки 0,95;

n - кількість вибірок, кількість вимірів.

Результати розрахунків точності оцінки занесені в таблиці 2.11, 2.12.

Таблиця 2.11 – Розрахункова точність оцінки, експеримент за часом

Відстань	5см	10см	15см	20см	25см	30см
Точність оцінки	0,206	0,483	0,53	0,421	0,712	0,182

Таблиця 2.12 – Розрахункова точність оцінки, експеримент по пересуванню

Відстань	5см	10см	15см	20см	25см	30см
Точність оцінки	2,01	3,306	6,258	7,799	3,153	1,723

Довірчий інтервал знаходиться з формули (2.4)

$$(\bar{x} - \delta; \bar{x} + \delta). \quad (2.4)$$

В нашому випадку $(A - \delta; A + \delta)$.

Розрахункові значення довірчого інтервалу занесемо в таблиці 2.13, 2.14.

Таблиця 2.13 - Розрахункові дані довірчого інтервалу, експеримент за часом

Відстань	5см	10см	15см	20см	25см	30см
Межі довірчого інтервалу	від 52,414 до 52,826	від 111,757 до 112,723	від 178,34 до 179,4	від 187,399 до 188,241	від 121,888 до 123,312	від 65,498 до 65,862

Таблиця 2.14 – Розрахункова точність оцінки, експеримент по пересуванню

Відстань	5см	10см	15см	20см	25см	30см
Межі довірчого інтервалу	від 84,93 до 88,95	від 152,294 до 158,906	від 243,882 до 256,398	від 232,181 до 247,779	від 155,607 до 161,913	від 86,507 до 89,953

З формули (2.3), що визначає точність класичної оцінки, можна зробити наступні висновки:

– при зростанні об'єму вибірок (кількості вимірів) n число δ зменшується, а точність оцінки збільшується;

– збільшення надійності оцінки, призводить до зростання δ , тобто, збільшення надійності класичної оцінки спричиняє за собою зменшення її точності.

Також варто відмітити, що надійність 0,95 з формули (2.3) вказує – якщо зроблена достатня велика кількість вибірок, то 95% з них визначає такі довірчі інтервали, в яких параметр магнітної індукції дійсно знаходиться; лише у 5% випадків він може вийти за межі довірчого інтервалу.

2.4 Експериментальні дослідження індукції магнітного поля симетричних і несиметричних двигунів

Експериментальні дослідження індукції магнітного поля асинхронного двигуна були побудовані на підставі наступних експериментів:

- симетричний двигун працює на холостому ході;
- несиметричний двигун працює на холостому ході;
- симетричний двигун працює під навантаженням;
- несиметричний двигун працює під навантаженням.

Несиметрія електродвигуна створювалася шляхом включення додаткового опору в його обмотку (рис. 2.17).

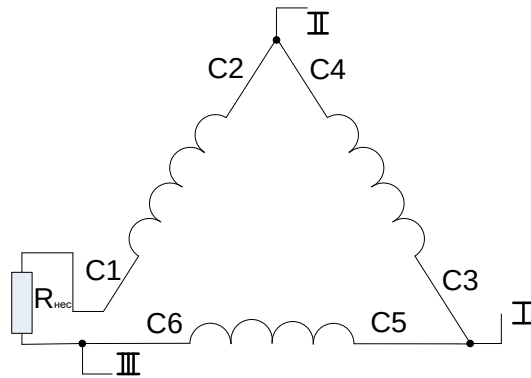


Рисунок 2.17 – Схема включення опору несиметрії в обмотку двигуна

Вимір електромагнітної індукції проводився за допомогою розташування тесламетра навколо двигуна і над ним. Для підвищення точності виміру була створена карта з проєктованим на не контуром двигуна (рис. 2.18). Ця карта має чотири градуйовані кругові контури, розташованих один від одного на відстані 50мм. Прилад розташовувався в точках перетину ліній.

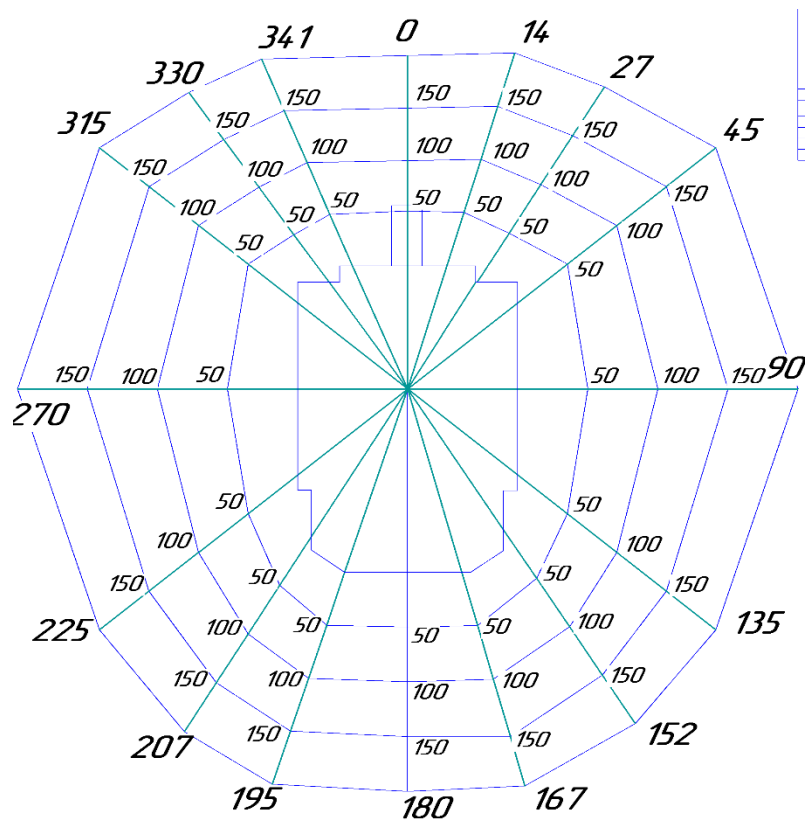


Рисунок 2.18 – Карта виміру магнітної індукції електродвигуна

Виконаємо вимір магнітної індукції навколо двигуна.

2.4.1 Симетричний двигун працюючий на холостому ході.

Асинхронний двигун, обмотки якого з'єднані в трикутник, підключений до мережі з лінійною напругою 220В, напрямок обертання ротора за годинниковою стрілкою. Значення індукції, зняті в точках перетину ліній карти вимірів, занесені в таблицю 2.15.

Таблиця 2.15 – Значення індукції, симетричний двигун, живлення від мережі, обертання за годинниковою стрілкою

Відстань (см)	0	5	10	15	20	30	40	50
градуси								
0/360	18.6	13	0.94	0.53	0.29	0.14	0.04	0.02
14	25.4	8.85	3.29	1.51	0.77	0.22	0.1	0.03
27	39.6	15.76	5.29	2.42	1.22	0.38	0.14	0.05
45	127	28.3	9.21	3.8	1.92	0.61	0.25	0.11
90	37.9	14.42	2.26	0.99	0.46	0.08	0.19	0.02
135	76.8	26.6	8.09	3.29	1.49	0.44	0.11	0.02
152	42.6	13.8	4.82	2.04	1.02	0.31	0.09	0.02
167	6.73	3.09	1.28	0.63	0.32	0.09	0.03	0
180	1.2	0.58	0.34	0.2	0.13	0.06	0.02	0.01
195	5.56	2.94	1.4	0.73	0.48	0.16	0.07	0.03
207	43.1	8.66	3.36	1.64	0.9	0.34	0.13	0.05
225	122.9	32.3	9.51	3.88	1.93	0.65	0.25	0.1
270	26.3	9.23	3.6	0.89	0.44	0.12	0.03	0.01
315	90.4	22	7.54	3.22	1.59	0.52	0.19	0.08
330	63.7	15.01	5.31	2.44	1.27	0.42	0.14	0.05
341	30.1	16.03	4.14	1.93	0.95	0.3	0.1	0.04

На підставі даних табл. 2.15 була побудована епюра магнітної індукції навколо двигуна (рис. 2.19).

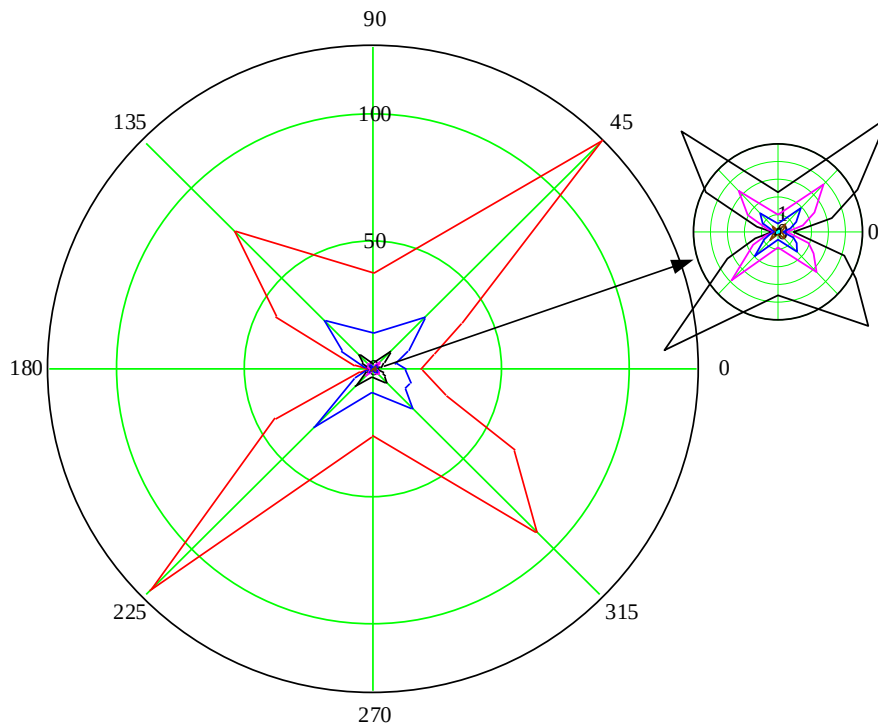


Рисунок 2.19 – Епюра магнітної індукції навколо симетричного двигуна того, що живиться від мережі, обертання за годинниковою стрілкою

Аналізуючи отриманий результат побудови, можна зробити висновок, що причина несиметрії у вигляді пікових значень в області 45 і 225 градусів полягає в концентрації магнітного поля через напрямок обертання ротора.

2.4.2 Симетричний двигун працює на холостому ході з живленням від перетворювача частоти.

Даний експеримент проводився при живленні двигуна від перетворювача частоти (ПЧ), значення частоти задавалося 50 Гц, 30Гц, 20Гц, обертання ротора за годинниковою стрілкою.

Результати вимірювань занесені в таблиці 2.16, 2.17, 2.18.

Таблиця 2.16 – Значення індукції, симетричний двигун, живлення від ПЧ
50Гц, обертання за годинниковою стрілкою

Відстань (см)	0	5	10	15	20	30	40	50
градуси								
0/360	3.01	0.22	0.29	0.12	0.03	0.01	0	0
14	3.66	1.5	0.51	0.21	0.1	0.03	0	0
27	8.82	2.01	0.72	0.3	0.15	0.05	0.02	0
45	15.13	3.98	1.22	0.51	0.26	0.08	0.02	0
90	2.69	1.27	0.56	0.24	0.11	0.02	0.01	0
135	8.1	3.15	0.97	0.44	0.17	0.03	0.01	0
152	4.46	2.36	0.75	0.32	0.16	0.04	0.01	0
167	1.42	0.59	0.23	0.1	0.05	0	0	0
180	0.28	0.1	0.05	0.01	0	0	0	0
195	0.96	0.4	0.14	0.05	0.01	0	0	0
207	5.81	1.26	0.44	0.17	0.07	0.01	0	0
225	5.59	3.38	1.08	0.44	0.21	0.04	0.01	0
270	3.81	0.68	0.35	0.12	0.04	0.03	0.01	0
315	11.32	2.89	0.9	0.42	0.21	0.06	0.01	0
330	12.31	2.18	0.76	0.35	0.19	0.08	0.02	0
341	2.07	1.25	0.56	0.26	0.1	0.03	0	0

Таблиця 2.17 – Значення індукції, симетричний двигун, живлення від ПЧ 30Гц, обертання за годинниковою стрілкою

Відстань (см)	0	5	10	15	20	30	40	50
градуси								
0/360	2.29	0.32	0.26	0.11	0.05	0.01	0	0
14	4.98	1.82	0.59	0.22	0.1	0.02	0	0
27	8.74	2.23	0.77	0.32	0.14	0.03	0.01	0
45	13.23	3.88	1.19	0.47	0.23	0.06	0.01	0
90	3.79	1.57	0.5	0.22	0.1	0.03	0.01	0
135	6.83	2.8	0.86	0.37	0.17	0.04	0.01	0
152	3.84	2.32	0.74	0.31	0.14	0.03	0	0
167	1.34	0.59	0.22	0.1	0.04	0.01	0	0
180	0.41	0.13	0.03	0.02	0.01	0	0	0
195	1	0.4	0.15	0.06	0.02	0	0	0
207	5.16	1.23	0.45	0.18	0.08	0.01	0	0
225	1.18	3.36	1.04	0.43	0.2	0.05	0.01	0
270	3.06	0.9	0.29	0.09	0.04	0.01	0	0
315	11.16	2.89	0.96	0.43	0.2	0.05	0.01	0
330	10.99	2.23	0.77	0.33	0.16	0.04	0.01	0
341	2.9	1.59	0.58	0.25	0.12	0.03	0.01	0

Таблиця 2.18 – Значення індукції, симетричний двигун, живлення від ПЧ 20Гц, обертання за годинниковою стрілкою

Відстань (см)	0	5	10	15	20	30	40	50
градуси								
0/360	1.63	0.24	0.2	0.09	0.03	0	0	0
14	3.22	1.62	0.52	0.19	0.08	0.01	0	0
27	6.48	1.88	0.63	0.25	0.12	0.02	0	0
45	11.55	3.21	1.02	0.41	0.19	0.05	0.02	0.01
90	2.82	1.15	0.55	0.21	0.11	0.03	0.01	0
135	5.76	2.07	0.7	0.28	0.14	0.04	0.01	0
152	3.23	1.75	0.58	0.23	0.1	0.02	0.01	0
167	1.19	0.45	0.17	0.07	0.03	0.01	0	0
180	0.36	0.14	0.04	0.02	0.01	0	0	0
195	0.87	0.33	0.12	0.05	0.02	0	0	0
207	5.02	0.94	0.35	0.15	0.06	0.01	0	0
225	5.97	2.88	0.83	0.36	0.17	0.03	0	0
270	2.42	0.39	0.15	0.05	0.03	0.02	0.01	0
315	8.31	2.52	0.89	0.38	0.18	0.05	0.02	0.01
330	9.75	1.9	0.67	0.29	0.14	0.04	0.02	0.01
341	2.58	1.49	0.52	0.21	0.1	0.02	0.01	0

2.4.3 Несиметричний двигун працює на холостому ході з живленням від мережі.

Експеримент проводився при живленні двигуна від мережі трифазної напруги 220В, з несиметрією у вигляді опору 2,45 Ом вводилася в обмотку двигуна, за схемою (рис. 2.17), обертання ротора за годинниковою стрілкою.

Результати вимірювань занесені в таблицю 2.19.

Таблиця 2.19 - Значення індукції, несиметричного двигуна (2,45 Ом), з живленням від мережі, обертання за годинниковою стрілкою

Відстань (см)	0	5	10	15	20	30	40	50
градуси								
0/360	10.56	8.63	1.02	0.56	0.3	0.11	0.03	0.01
14	11.77	6.46	2.5	1.26	0.63	0.17	0.05	0.03
27	43.3	11.51	4.13	1.86	0.92	0.31	0.12	0.04
45	82.2	23.1	6.73	2.97	1.53	0.53	0.21	0.1
90	19.23	6.47	2.34	0.58	0.24	0.06	0.01	0.01
135	57.7	20.6	6.39	2.46	1.27	0.38	0.11	0.03
152	39.1	10.82	3.85	1.74	0.88	0.26	0.07	0.01
167	6.06	2.68	1.16	0.54	0.28	0.08	0.01	0
180	1.26	0.53	0.32	0.18	0.013	0.04	0.02	0.01
195	4.67	2.22	1.1	0.59	0.36	0.13	0.05	0.02
207	40.7	6.45	2.73	1.33	0.69	0.24	0.09	0.04
225	61.3	24.4	7.27	3.03	1.54	0.49	0.19	0.09
270	36.9	5.71	2.48	0.7	0.18	0.04	0.01	0
315	89.1	21.4	6.6	2.83	1.37	0.44	0.17	0.05
330	52.9	12.8	4.66	2.08	1.06	0.36	0.13	0.05
341	14.59	9.44	3.76	1.73	0.89	0.29	0.11	0.03

На підставі (табл.2.19) побудована епюра магнітної індукції навколо двигуна (рис. 2.20).

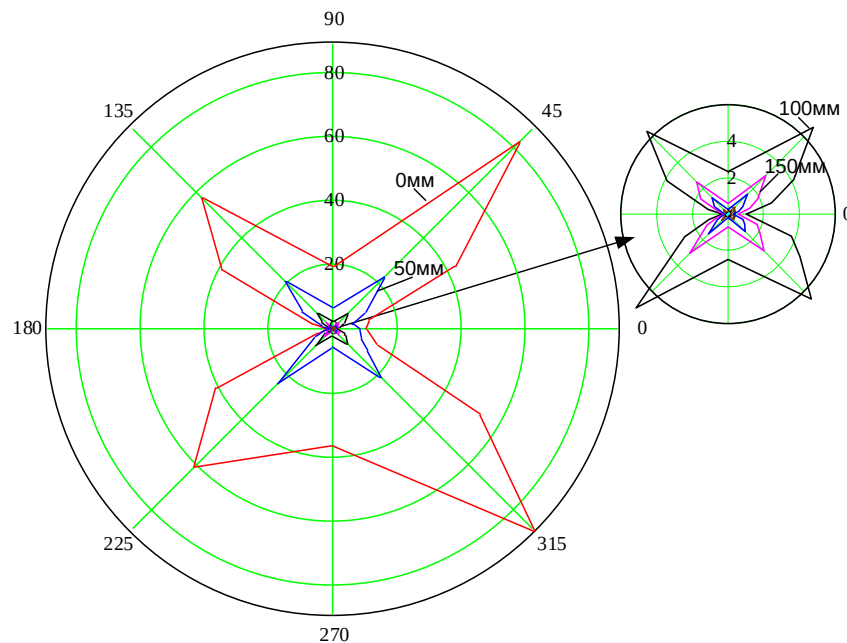


Рисунок 2.20 – Епюра магнітної індукції несиметричного двигуна, що живиться від мережі, обертання за годинниковою стрілкою

Аналіз рисунка 2.20 показує, що несиметрія в 2,45 Ом призводить до значних спотворень магнітної індукції в області 45-315 градусів, що, в свою чергу, негативно позначається на роботі електричної машини.

2.4.4 Несиметричний двигун працює на холостому ході з живленням від перетворювача частоти.

Живлення асинхронного двигуна здійснювалося від перетворювача частоти, несиметрія величиною 2,45 Ом вводилася в обмотку двигуна за схемою (рис. 2.17).

Вимірювання магнітної індукції двигуна проводилися під час роботи від частоти 50, 30, 20 Гц, результати вимірювань занесені в таблиці 2.20, 2.21, 2.22 відповідно.

Таблиця 2.20 – Значення індукції несиметричного двигуна (2,45 Ом), живлення від ПЧ 50Гц, обертання за годинниковою стрілкою

Відстань (см)	0	5	10	15	20	30	40	50
градуси								
0/360	3.01	0.35	0.3	0.1	0.04	0.01	0	0
14	4.69	1.63	0.55	0.21	0.08	0.01	0	0
27	8.03	2.27	0.74	0.32	0.15	0.04	0	0
45	16.73	4.36	1.22	0.47	0.22	0.09	0.03	0.01
90	4.88	1.21	0.43	0.17	0.05	0.01	0	0
135	6.75	3.48	1.07	0.47	0.21	0.06	0.01	0
152	4.08	2.51	0.83	0.34	0.16	0.03	0	0
167	1.61	0.64	0.25	0.11	0.04	0.01	0	0
180	0.49	0.2	0.07	0.03	0.01	0	0	0
195	0.99	0.4	0.16	0.06	0.02	0	0	0
207	4.85	1.26	0.45	0.21	0.09	0.01	0	0
225	4.88	3.54	1.18	0.47	0.23	0.06	0.01	0
270	3.78	1.15	0.24	0.14	0.07	0.02	0	0
315	12.62	3.23	0.93	0.41	0.17	0.05	0.02	0
330	11.12	2.19	0.72	0.3	0.13	0.02	0.01	0
341	1.51	1.32	0.54	0.24	0.11	0.02	0	0

Таблиця 2.21 – Значення індукції несиметричного двигуна (2,45 Ом), живлення від ПЧ 30Гц, обертання за годинниковою стрілкою

Відстань (см)	0	5	10	15	20	30	40	50
градуси								
0/360	2.51	0.31	0.28	0.13	0.05	0.01	0	0
14	4.87	1.91	0.61	0.23	0.11	0.02	0.01	0
27	13.69	3.86	1.18	0.48	0.23	0.07	0.03	0.01
45	4.22	1.44	0.6	0.22	0.09	0.02	0.01	0
90	6.32	3.36	1	0.43	0.2	0.05	0.01	0
135	7.15	3.01	1.02	0.43	0.2	0.05	0.01	0
152	2.89	0.8	0.33	0.15	0.03	0.01	0	0
167	1.52	0.57	0.23	0.09	0.04	0.01	0	0
180	0.45	0.2	0.07	0.02	0.01	0	0	0
195	0.99	0.41	0.16	0.07	0.03	0.01	0	0
207	4.93	1.27	0.48	0.2	0.09	0.02	0	0
225	6.01	3.77	1.19	0.46	0.22	0.05	0.01	0
270	3.48	0.86	0.32	0.1	0.05	0.01	0	0
315	11.1	3025	1.02	0.43	0.19	0.05	0.01	0
330	10.52	2.25	0.75	0.31	0.14	0.03	0.01	0
341	2.33	1.59	0.6	0.24	0.11	0.02	0.01	0

Таблиця 2.22 – Значення індукції несиметричного двигуна (2,45 Ом), живлення від ПЧ 20Гц, обертання за годинниковою стрілкою

Відстань (см)	0	5	10	15	20	30	40	50
градуси								
0/360	1.87	0.25	0.23	0.1	0.04	0	0	0
14	4.62	1.97	0.57	0.22	0.9	0.02	0	0
27	7.34	2.07	0.68	0.29	0.14	0.03	0.01	0
45	9.97	3.53	1.05	0.42	0.21	0.07	0.02	0.01
90	4.52	1.56	0.58	0.25	0.12	0.03	0.01	0
135	6.33	2.44	0.83	0.35	0.17	0.04	0.01	0
152	2.39	1.91	0.63	0.26	0.12	0.03	0.01	0
167	1.14	0.46	0.17	0.07	0.03	0	0	0
180	0.19	0.09	0.03	0.02	0.01	0	0	0
195	0.85	0.35	0.14	0.06	0.03	0.01	0	0
207	3.87	1.03	0.39	0.16	0.07	0.01	0	0
225	5.44	3.04	0.93	0.38	0.17	0.04	0.01	0
270	3.01	0.68	0.27	0.1	0.04	0.01	0	0
315	10.82	2.78	0.95	0.39	0.18	0.05	0.01	0.01
330	9.91	2.02	0.69	0.28	0.13	0.03	0.01	0
341	2.36	1.58	0.55	0.22	0.1	0.02	0	0

На підставі даних таблиць 2.20–2.22 побудована епюра магнітних індукції (рис. 2.21) навкруги несиметричного двигуна, що живиться ПЧ, обертання за годинниковою стрілкою. Вимірювальний прилад розташовувався впритул до двигуна, тобто відстань 0 см з таблиць.

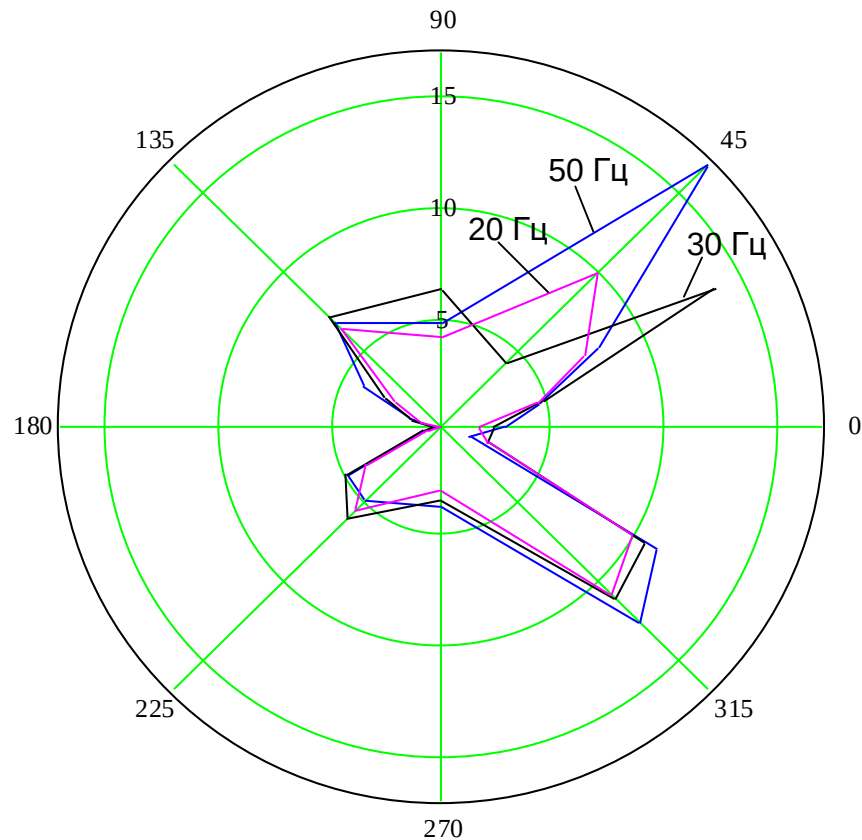


Рисунок 2.21 – Епюра магнітної індукції навколо несиметричного двигуна (2,45 Ом), що живиться ПЧ, обертання за годинниковою стрілкою

Провевши аналіз даного рисунка можна помітити, що зменшення частоти напруги живлення призводить до зменшення значень магнітної індукції. Несиметрія величиною 2,45 Ом призводить до значних спотворень в області 45-315 градусів.

2.4.5 Симетричний двигун працює на холостому ході з живленням від перетворювача частоти 50 Гц, обертання за годинниковою стрілкою.

Вимірювання магнітної індукції над двигуном проводилося за допомогою спеціального штатива, що дає можливість точно і надійно розташовувати Тесламетр в необхідних точках. Точки вимірювання зображені на схематичному рис. 2.22.

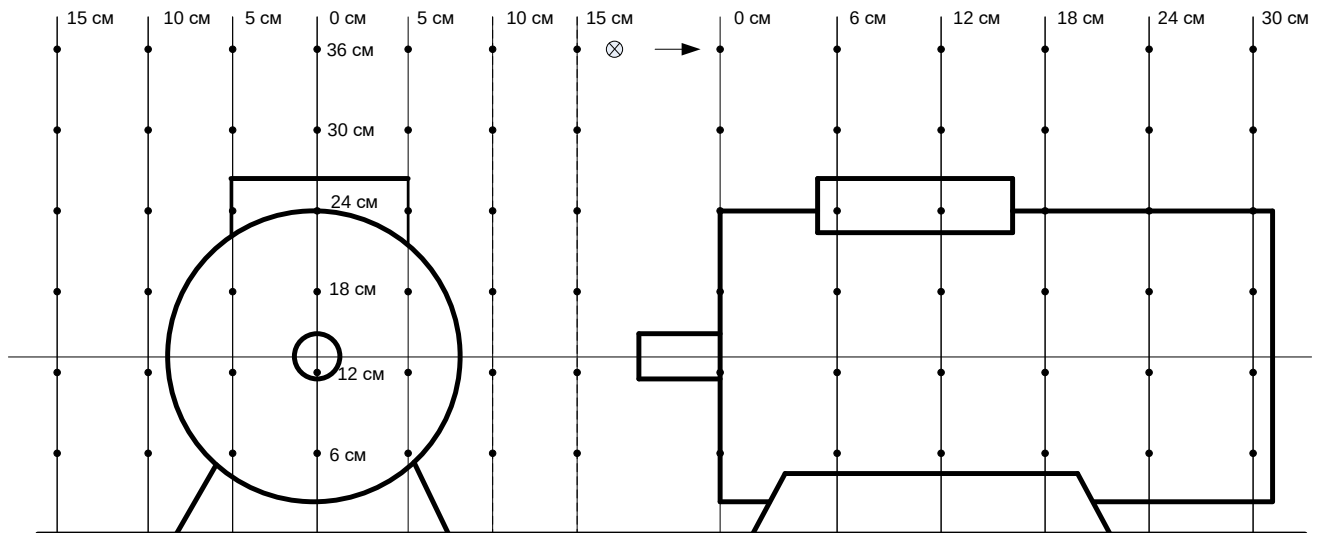


Рисунок 2.22 – Схема вимірів магнітної індукції

Даний спосіб побудови експерименту дозволяє розбити досліджуваний об'єкт на площині в яких відбувається вимір магнітної індукції. Одна площина включає в себе 54 точки, а саме 9 точок по горизонталі і 6 по вертикалі утворюють собою матрицю 9х6. Всього шість площин, відстань між ними складає 6 см.

На підставі результатів вимірювання в першій площині (0см) побудована матриця 9х6 S_{sim_g} .

$$S_{sim_g} := \begin{pmatrix} 3.16 & 4.29 & 5.25 & 6.22 & 7.21 & 7.09 & 7.27 & 5.67 & 4.56 \\ 5.11 & 7.47 & 9.72 & 11.82 & 16.42 & 14.43 & 14.78 & 10.66 & 7.4 \\ 7.38 & 13.3 & 18.58 & 19.96 & 33.7 & 29.7 & 30.8 & 20.03 & 11.52 \\ 10.11 & 18.79 & 29.4 & 32.4 & 47.7 & 54.9 & 51.8 & 32.2 & 15.22 \\ 9.95 & 17.68 & 27.8 & 24.6 & 17.16 & 16.8 & 59.6 & 33.8 & 15.29 \\ 11.15 & 21.3 & 33.4 & 35 & 32.6 & 32.9 & 54.1 & 32.4 & 15 \end{pmatrix}$$

Графічне відображення матриці S_{sim_g} представлено у вигляді діаграми на рис. 2.23.

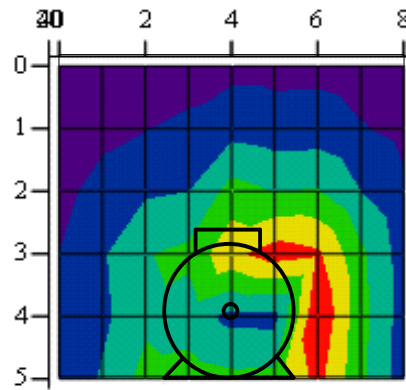


Рисунок 2.23 – Діаграма магнітної індукції навколо симетричного двигуна, що живиться від ПЧ 50Гц, обертання за годинниковою стрілкою

2.4.6 Несиметричний двигун, що працює на холостому ході з живленням від перетворювача частоти 50 Гц, обертання за годинниковою стрілкою.

Результати вимірів магнітної індукції занесені в матрицю Snesim_g і, на підставі цієї матриці, побудована діаграма, що зображена на рисунку 2.24.

$$\text{Snesim_g} := \begin{pmatrix} 3.57 & 4.37 & 5.26 & 5.92 & 6.85 & 7.33 & 6.48 & 5.17 & 4.25 \\ 6.03 & 7.78 & 9.59 & 10.67 & 12.41 & 13.56 & 11.83 & 8.18 & 6.62 \\ 9.18 & 12.68 & 17.92 & 19.04 & 23.9 & 26.2 & 20.81 & 13.67 & 9.66 \\ 11.94 & 17.76 & 26.6 & 30.02 & 28.4 & 42.6 & 32.2 & 19.02 & 12.39 \\ 11.78 & 18.39 & 25.4 & 23.87 & 13.48 & 25.6 & 34.8 & 20.63 & 13.07 \\ 12.51 & 20.41 & 28.8 & 29.7 & 28.6 & 30.3 & 34.2 & 20.31 & 12.36 \end{pmatrix}$$

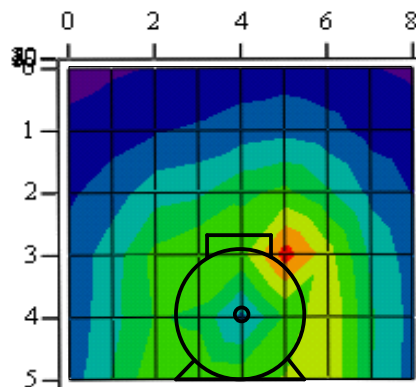


Рисунок 2.24 – Діаграма магнітної індукції навколо несиметричного двигуна того, що живиться від ПЧ 50Гц, обертання за годинниковою стрілкою

2.4.7 Симетричний двигун, що працює під навантаженням, з живленням від перетворювача частоти 50 Гц, обертання проти годинникової стрілки.

Випробовувана машина навантажувалася за допомогою приєднання до її валу машини постійного струму, працюючої в режимі динамічного гальмування. Навантаження асинхронного двигуна складало 85% від номінальної. Струми по фазах розподілилися таким чином і складали $I_1=5,18\text{A}$, $I_2=5,19\text{A}$, $I_3=5,21\text{A}$. Значення магнітної індукції цього експерименту записані у вигляді матриці $S_{\text{sim_g_n}}$.

$$S_{\text{sim_g_n}} := \begin{pmatrix} 5.38 & 7.98 & 12.32 & 13.52 & 14.37 & 12.71 & 10.18 & 7.64 & 6.25 \\ 8.66 & 14.1 & 21.4 & 34.7 & 30.5 & 25.2 & 19.73 & 13.81 & 10.25 \\ 13.61 & 25.8 & 44.1 & 76.4 & 75.6 & 68.2 & 47.2 & 26.4 & 15.95 \\ 19.66 & 38.3 & 102.7 & 217.3 & 182.3 & 167.3 & 98.2 & 44.5 & 23.1 \\ 21.2 & 48.9 & 158.3 & 0 & 0 & 0 & 139 & 59.4 & 25.5 \\ 19.66 & 42.9 & 156 & 0 & 0 & 0 & 165.4 & 49.5 & 22.4 \\ 14.62 & 28.1 & 83.2 & 0 & 0 & 0 & 79.5 & 35.1 & 14.6 \end{pmatrix}$$

Область нулів в матриці $S_{\text{sim_g_n}}$ доводиться на фізичне розташування випробовуваного електродвигуна.

На підставі цієї матриці побудована діаграма магнітної індукції (рис. 2.25).

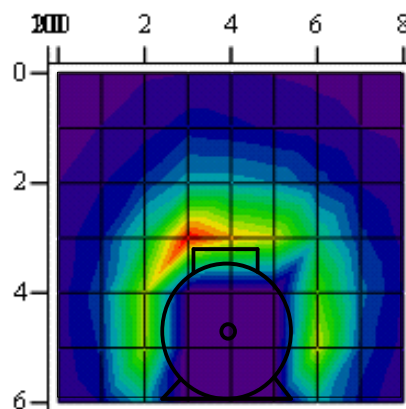


Рисунок 2.25 – Діаграма магнітної індукції навколо симетричного двигуна, працюючого під навантаженням з живленням від ПЧ 50Гц, обертання проти годинникової стрілки

2.4.8 Несиметричний двигун, що працює під навантаженням, з живленням від перетворювача частоти 50 Гц, обертання проти годинникової стрілки.

У цьому експерименті струми по фазах склали $I_1=5,18\text{A}$ $I_2=5,19\text{A}$ $I_3=5,21\text{A}$. Значення магнітної індукції записані у вигляді матриці $S_{\text{nesim_g_n}}$.

$$S_{\text{nesim_g_n}} := \begin{pmatrix} 6.3 & 9.76 & 13.85 & 17.62 & 16.42 & 11.9 & 10.84 & 8.56 & 5.97 \\ 9.06 & 14.84 & 21.5 & 28.1 & 31.6 & 26.4 & 21.1 & 17.31 & 10.38 \\ 13.52 & 25.5 & 44.8 & 68.1 & 83.1 & 80.5 & 48.2 & 30.8 & 15.98 \\ 19 & 41.5 & 93.2 & 171.1 & 191.2 & 183.8 & 107.7 & 55.7 & 22.7 \\ 21.25 & 52.7 & 151.9 & 0 & 0 & 0 & 141.7 & 67.2 & 26.2 \\ 20.46 & 48.2 & 155.4 & 0 & 0 & 0 & 149.5 & 53.9 & 22.27 \\ 15.33 & 31.8 & 82.7 & 0 & 0 & 0 & 72.5 & 29.9 & 14.48 \end{pmatrix}$$

На підставі цієї матриці побудована діаграма магнітної індукції (рис. 2.26).

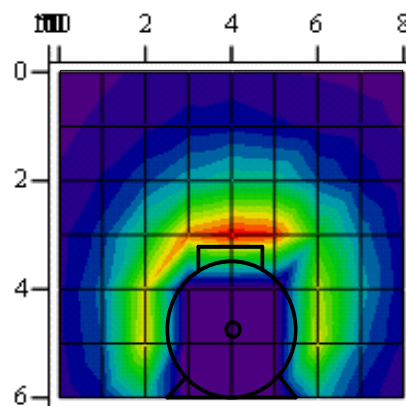


Рисунок 2.26 – Діаграма магнітної індукції навколо не симетричного двигуна, працюючого під навантаженням з живленням від ПЧ 50Гц, обертання проти годинникової стрілки

2.5 Висновки по розділу 2

1. Необхідність в розгляді поставленої проблеми оцінки ресурсу зношеного або такого, що піддавалося ремонту електромеханічного обладнання

отримало експериментальне підтвердження.

2. Математичне моделювання несиметричних за параметрами асинхронних двигунів, при використанні програми FEMM, показало нерівномірний розподіл індукції магнітного поля, що свідчить про наявність внутрішніх дефектів обмоток.
3. Отримані в результаті проведення експериментальних досліджень картини індукції магнітного поля навколо асинхронних двигунів якісно співпадають з результатами математичного моделювання і мають різко виражену нерівномірність, що несе значиму інформацію про технічний стан двигуна.
4. Наявність пошкоджень спотворює загальну картину розподілу індукції магнітного поля на поверхні статора АД – в зоні пошкоджень зменшуються її значення. якісний характер спотворення зберігається при зміні частоти напруги живлення двигуна та напрямку його обертання.
5. Набула подальшого розвитку експериментальна модель несиметричних за параметрами асинхронних двигунів, яка враховує нерівномірність розподілу індукції магнітного поля на поверхні статора двигуна, що дозволяє отримати значиму інформацію про технічний стан асинхронного двигуна, зокрема про наявність внутрішніх дефектів обмоток.

Основні результати даного розділу опубліковані в роботах [5], [10], [14], [17]-[18].

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКИ СТАНУ ТА ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

3.1. Модель оцінки стану та терміну експлуатації асинхронного двигуна на основі вимірювання зовнішнього магнітного поля

В умовах сучасного виробництва в основному експлуатують асинхронні двигуни, які довгий час знаходяться в експлуатації, пройшли стадії ремонту і мають придбану параметричну електричну і магнітну несиметрію. Таким двигунам притаманні дещо інші характеристики. Розподіл індукції магнітного поля, виміряної на поверхні корпусу, в процесі експлуатації починає змінюватися. Отримані в результаті вимірів картини індукції магнітного поля [102–104] характеризуються вираженою нерівномірністю у порівнянні з картиною індукції для нового і симетричного двигуна. Це несе інформацію про технічний стан двигуна, а зміна картини індукції у часі відображає динаміку його погіршення та дозволяє встановити доцільність ремонту або подальшої експлуатації. Тому виконаємо синтез моделі для визначення показників, та моделі на їх основі, для оцінки динаміки погіршення стану асинхронного двигуна та визначення терміну його експлуатації.

Розглянемо вирішення цієї задачі на основі ідентифікації подібності виміряного розподілу індукції B_k магнітного поля на поверхні асинхронного двигуна до тестового розподілу індукції B_{ts} магнітного поля, виміряного для симетричного двигуна. Кожен з розподілів являє собою вектор значень $B_{k(i)}$, де k – кількість вимірювань у часі, згідно з термінами планового огляду асинхронного двигуна ($k = \overline{1..n}$), відповідно до схеми вимірювань, n – кількість планових оглядів, $i = \overline{1..N}$ – послідовність вимірювань індукції для кожного k -го розподілу, N – кількість точок вимірювань навколо асинхронного двигуна.

Визначення подібності сформулюємо відповідно до [105]. Якщо у просторі $\mathfrak{R}$, X – довільна множина, то функція $s: X \times X \rightarrow \mathfrak{R}$ є подібністю на X якщо s є позитивно визначеною, симетричною і для любых $x, y \in X$ має місце нерівність $s(x, y) \leq s(x, x)$, яка перетворюється в рівність тоді і лише тоді, коли $x = y$. Основними перетвореннями, які дають відстань (несхожість) d з подібності s є

$$d = 1 - s, \quad d = (1 - s) / s, \quad d = \sqrt{1 - s}, \quad d = \sqrt{2(1 - s^2)}, \quad d = \arccos(s), \quad d = -\ln(s).$$

Для синтезу критеріїв подібності при оцінювання стану асинхронного двигуна застосуємо теорію відстаней і відповідно ряд метрик [105].

Вибір відповідної метрики обґрунтований топологією розподілу індукції магнітного поля на поверхні АД, яка для симетричного двигуна має у тримірному просторі вид наближений до витягнутого еліпсоїду, а у горизонтальному перерізі – вид подібний до еліпсу. Тому, у нашому випадку, застосуємо теорію геодезичних [106] і Буземанову метрику, яка на дійсному n -мірному проєктивному просторі $\mathfrak{RP}^n$, задана виразом [105]:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^{n+1} \left| \frac{x_i}{\|x\|} - \frac{y_i}{\|y\|} \right|, \sum_{i=1}^{n+1} \left| \frac{x_i}{\|x\|} + \frac{y_i}{\|y\|} \right| \right\}, \quad (3.1)$$

для любых $x = (x_1; \dots; x_{n+1})$, $y = (y_1; \dots; y_{n+1}) \in \mathfrak{RP}^n$, де $\|x\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} x_i^2}$, $\|y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} y_i^2}$, а

$\min \{ \cdot \}$ – визначає нижню межу відстаней.

Пронормуємо показники оцінювання відхилення розподілу індукції B_k магнітного поля досліджуваного АД до тестового розподілу індукції B_{tst} магнітного поля, виміряного для симетричного двигуна:

$$k_{b(k)} = \frac{db_{(k)}}{db_0}, \quad (3.2)$$

де $db_0 = 2 \sum_{i=1}^N \left| \frac{B_{tst}}{\|B_{tst}\|} \right|$ – дистанція, розрахована для симетричного двигуна, $db_{(k)}$ – вектор дистанцій розрахований за (3.1) для k -го виміряного розподілу індукції.

Для множини розрахованих значень $k_{b(k)}$ шляхом апроксимації може бути отримана аналітична залежність. При досягненні та перевищенні максимально допустимого значення $k_{b(k)} \geq k_{mpv}$, експлуатація АД стає недоцільною.

Дослідження з оцінки стану асинхронного двигуна були виконані експериментальним шляхом для штучно створюваної параметричної несиметрії статорних обмоток [107, 108]. Згідно [109] до експлуатації допускається двигун, коефіцієнт несиметрії обмоток якого $k_{ns.m} \leq 2.5\%$ для кожної з фаз:

$$k_{ns.m} = \frac{R_m - R_e}{R_m} 100\%,$$

де $R_e = \frac{1}{3} \sum_m^{ABC} R_m$ – середнє значення активного опору фаз статора, R_m – активний опір відповідної фази статора, $m \in \{A, B, C\}$.

При проведенні дослідження був використаний асинхронний двигун з каталожними даними, наведеними у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Каталогні дані АОЛС2-21-4

Параметр	Значення
Номінальна потужність, кВт	1.3
Номінальна напруга, В	220
Номінальний струм статора, А	3.3
Номінальна швидкість, об/хв	1300
ККД, %	70
Перевантажувальна здатність	2
Номінальний коефіцієнт потужності	0.8

Вимірювання індукції магнітного поля проводилось у 16 точках навколо двигуна на відстані 0,1 м від корпусу та в горизонтальній площині на рівні валу. Схема вимірювань показана на рис.1. Всього було проведено п'ять серій вимірювань ($k = \overline{1..5}$). Кожна наступна серія вимірювань відповідала поступовому погіршенню стану двигуна, що відображається у збільшенні

коефіцієнту $k_{ns.(k)}$ несиметрії опорів обмоток статора двигуна і приведена у табл. 3.2.

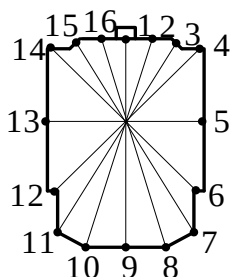


Рисунок 3.1 – Схема вимірювань магнітної індукції на поверхні корпусу асинхронного двигуна

По отриманим значенням побудована діаграма розподілу індукції зовні асинхронного двигуна (рис. 3.2).

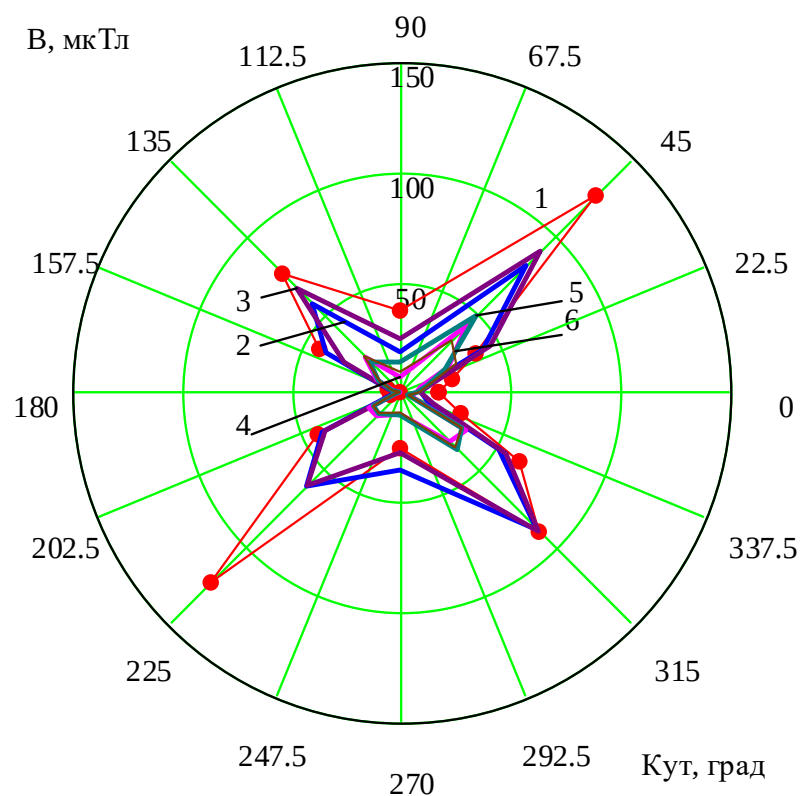


Рисунок 3.2 – Діаграма розподілу індукції на поверхні корпусу двигуна:

1 – для симетричного асинхронного двигуна, 2 – для несиметрії 3.27%,

3 – для несиметрії 6.54%, 4 – для несиметрії 9.8%,

5 – для несиметрії 13.07%, 6 – для несиметрії 16.34%

Таблиці 3.2 – Значення індукції магнітного поля на поверхні асинхронного двигуна

Значення		Індукція, мкТ																
Точка, i		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Кут, град		0	14	27	45	90	135	152	167	180	195	207	225	270	315	330	341	360
$k_{ns.(k)}$	0	18.6	25.4	39.6	127	37.9	76.8	42.6	6.73	1.2	5.56	43.1	122.9	26.3	90.4	63.7	30.1	18.6
	3.27	10.25	15.41	47.1	91.2	25.2	67.4	30	5.59	1.11	2.22	39.2	60.7	28.5	90.2	56.6	17.15	10.25
	6.54	10.56	11.77	43.8	82.2	19.23	57.7	39.1	6.06	1.26	4.67	40.7	61.3	36.3	89.1	52.9	14.59	10.56
	9.8	8.73	10.61	25.58	43.88	7.8	23.49	12.93	4.12	0.81	2.78	16.85	16.21	11.05	32.83	35.7	6.0	8.73
	13.07	9.03	14.07	24.09	50.19	14.64	20.25	12.24	4.83	1.47	2.97	14.55	14.64	11.34	37.86	33.36	4.53	9.03
	16.34	9.81	14.37	29.67	34.17	10.26	24.21	11.19	4.65	1.17	3.06	14.73	14.37	10.14	36.42	33.36	5.13	9.81

За даними табл. 3.2 розрахуємо відхилення розподілу магнітної індукції у відносних одиницях. Тоді за Буземановою метрикою (3.1)

$$k_{b(k)} = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{B_{tst.i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} B_{tst.i}^2}} - \frac{B_{(k)i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} B_{(k)i}^2}} \right| \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{B_{tst.i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} B_{tst.i}^2}} + \frac{B_{(k)i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} B_{(k)i}^2}} \right|}{2 \sum_{i=1}^N \left| \frac{B_{tst.i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} B_{tst.i}^2}} \right|}, \quad (3.3)$$

Побудуємо залежності відхилень за (3.3) від коефіцієнту несиметрії двигуна (рис. 3.3).

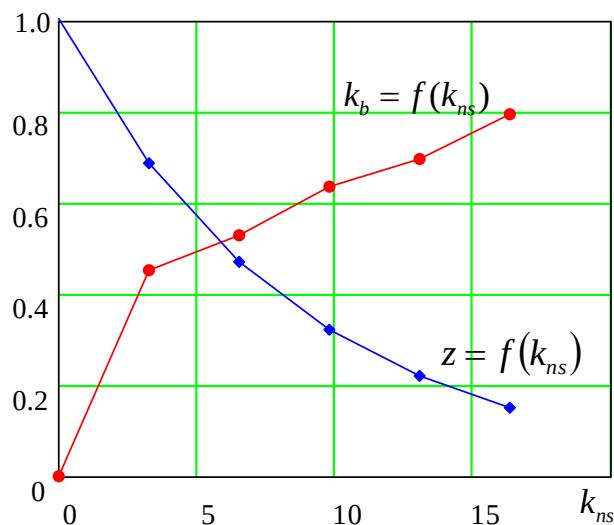


Рисунок 3.3 – Залежності відхилень розподілу магнітної індукції k_b та відносної тривалості життя ізоляції z від коефіцієнту несиметрії обмоток асинхронного двигуна k_{ns}

Як видно з рис. 3.3, залежність $k_b = f(k_{ns})$ має експоненційний характер, тому аналітичний вираз відхилення розподілу магнітної індукції від коефіцієнту несиметрії обмоток асинхронного двигуна, знайдемо у вигляді регресійної моделі «Exponential Association»:

$$k_b = a_b (1 - e^{-b_b k_{ns}}), \quad (3.4)$$

використовуючи метод найменших квадратів. Тут a_b, b_b – коефіцієнти регресійної моделі для k_b . Коефіцієнти моделей приведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Коефіцієнти регресійної моделі залежності відхилення розподілу магнітної індукції від коефіцієнту несиметрії обмоток асинхронного двигуна

Вектор відхилення	Коефіцієнти моделі	
	a_b	b_b
k_b	0,7644	0,2156

Для встановлення зв'язку між параметричною несиметрією обмоток статора АД з коефіцієнтом k_{ns} , розподілом магнітної індукції та тривалістю життя ізоляції обмоток двигуна, виконаємо його математичне моделювання. Модель АД запишемо у трифазних координатах [110]. Структура математичної моделі асинхронного двигуна у трифазних координатах показана на рис. 3.4. В моделі здійснюється чисельне інтегрування диференціальних рівнянь при симетричній і синусоїдальній напрузі живлення. Момент опору на валу двигуна має реактивний характер. Пуск АД здійснюється без навантаження, але на першій секунді здійснюється накид номінального навантаження.

Система диференціальних рівнянь електричної рівноваги кіл статора і ротора у трифазних координатах моделі асинхронного двигуна, для миттєвих значень напруг, струмів і потокозчеплення, записана в матричній формі, має вигляд:

$$\begin{cases} u_s = r_s i_s + \frac{\Psi_s}{dt}; \\ u_r = r_r i_r + \frac{\Psi_r}{dt}. \end{cases}$$

де $u_s = [u_A, u_B, u_C]^T, u_r = [u_a, u_b, u_c]^T$ – матриці миттєвих значень фазної напруги статора і ротора відповідно, $i_s = [i_A, i_B, i_C]^T, i_r = [i_a, i_b, i_c]^T$ – матриці

миттєвих значень струмів в фазах статора і ротора відповідно, $\Psi_s = [\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C]^T$, $\Psi_r = [\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c]^T$ – матриці повних потокозчеплень фазних обмоток статора і ротора відповідно; R_s, R_r – активні опори обмоток статора і ротора відповідно.

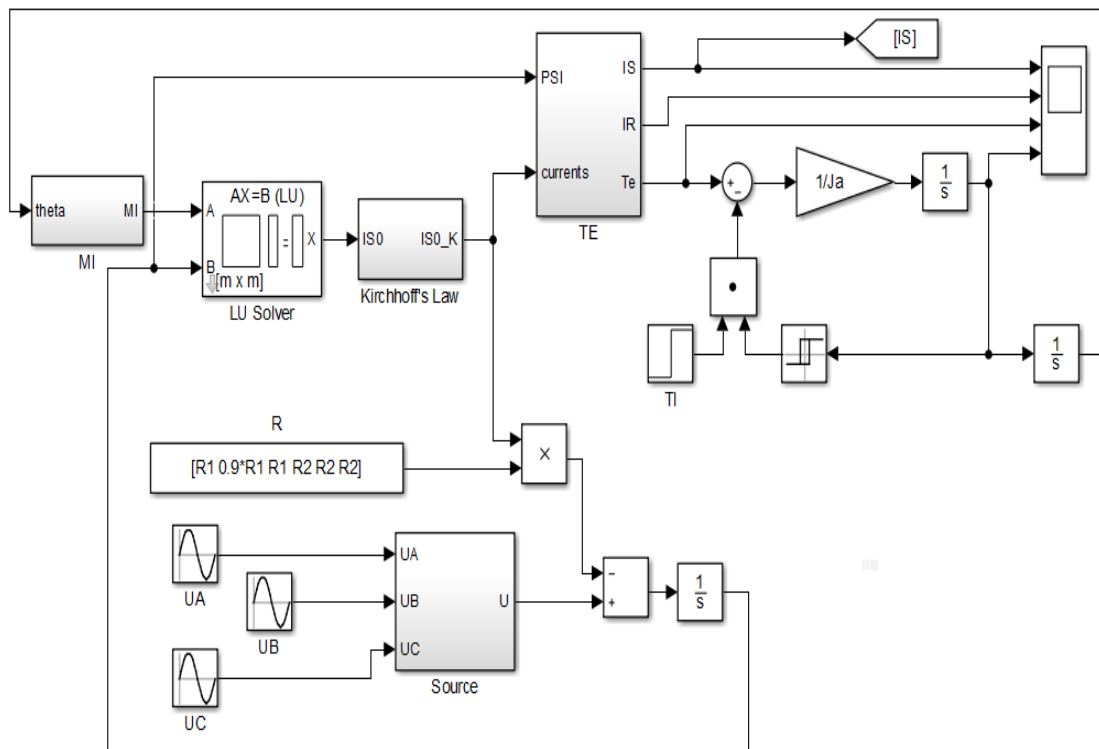


Рисунок 3.4 – Структура математичної моделі асинхронного двигуна у трифазних координатах

Розробка такої моделі є добре вивченим процесом, який виконаний багатьма дослідниками. Основна мета, яку ми переслідували при використанні такої моделі – дослідження роботи асинхронного двигуна при параметричній несиметрії статорних і роторних обмоток [110]. Тому до моделі введено блок «R» у якому здійснюється завдання опорів обмоток статора по кожній фазі окремо.

Розрахуємо режими роботи асинхронного двигуна з номінальним навантаженням при зміні опору фази А двигуна. Динамічні процеси пуску і накиду навантаження показані на рис. 3.5–3.6.

Значення створюваної несиметрії, та струмового навантаження приведені в табл 3.4.

Таблиця 3.4 – Значення струмового навантаження фаз статора асинхронного двигуна при параметричній несиметрії обмоток статора

	Значення струму фази статора, А				
k -й вимір	1	2	3	4	5
Коефіцієнт несиметрії $k_{ns.(k)}$	3.27	6.54	9.8	13.07	16.34
A	3.265	3.192	3.0121	3.051	2.984
B	3.375	3.408	3.44	3.471	3.501
C	3.406	3.473	3.542	3.613	3.685

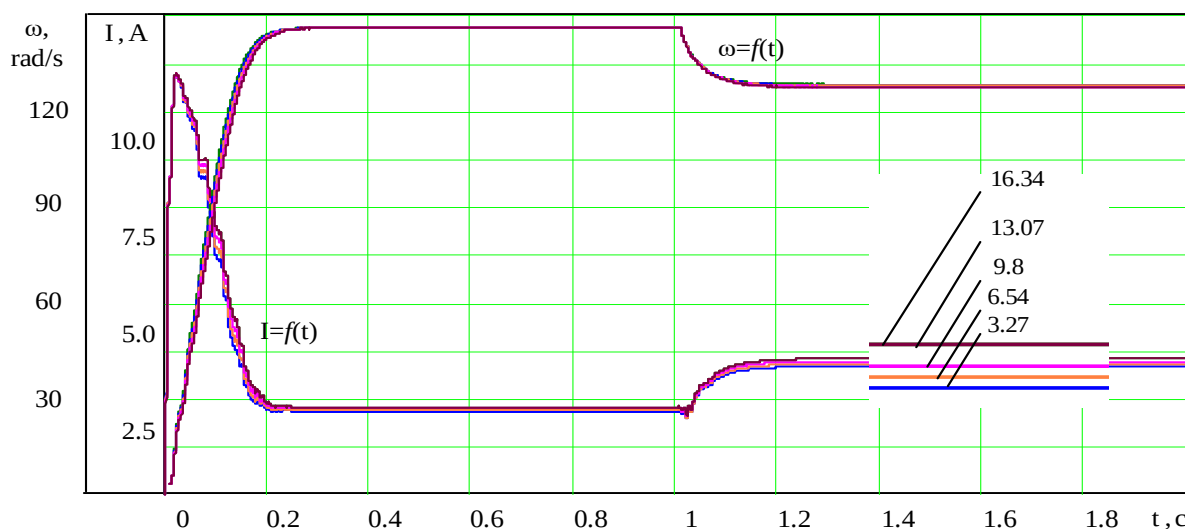


Рисунок 3.5 – Зміна у часі частоти обертання ротора і ефективного значення струму найбільш перевантаженої фази в залежності від несиметрії обмотки статора асинхронного двигуна

При параметричній несиметрії всі фази статора працюють з різним струмовим навантаженням, яке перевищує номінальне [111]. Перевищення номінального струму призводить до додаткового перегріву та зниження терміну експлуатації ізоляції двигуна. Відносний термін експлуатації ізоляції при температурі ϑ :

$$z = e^{-\delta \Delta \tau}, \quad (3.5)$$

де $\Delta \tau = \vartheta - \vartheta_n$ – перевищення температури над номінальною ϑ_n , δ – сталий коефіцієнт для відповідного класу ізоляції.

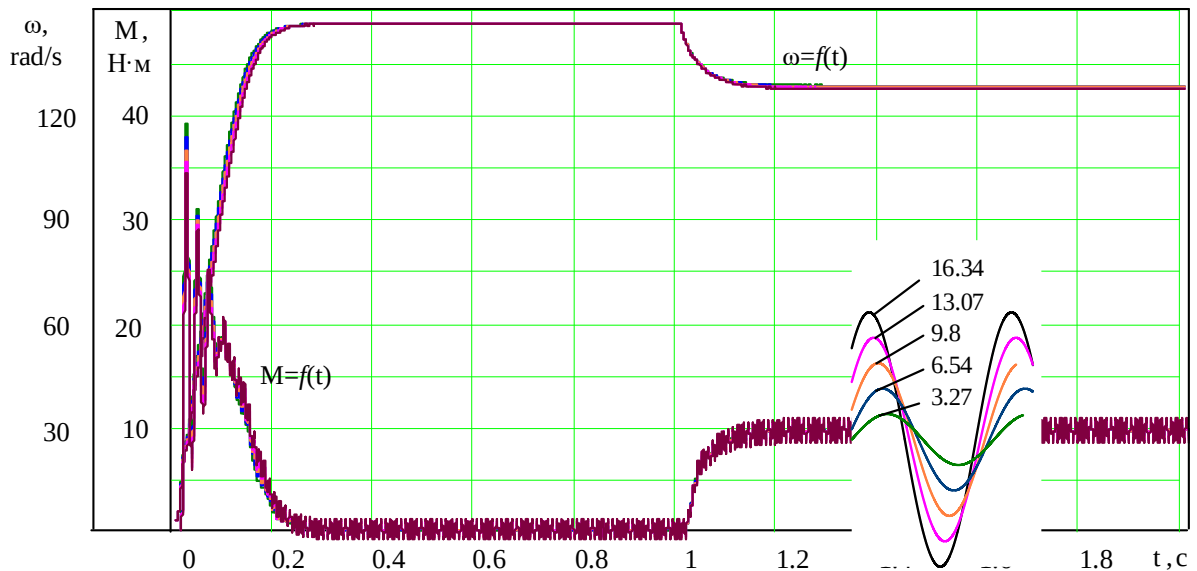


Рисунок 3.6 – Зміна у часі частоти обертання ротора і електромагнітного моменту АД в залежності від несиметрії обмотки статора

На прикладі найбільш перевантаженої фази С розрахуємо відносну тривалість життя ізоляції на основі даних табл. 3.4 в залежності від коефіцієнту несиметрії $k_{ns,j}$ (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Відносна тривалість життя ізоляції фази С при різних значеннях коефіцієнту несиметрії

Параметр	Відносний термін експлуатації ізоляції, z				
k -й вимір	1	2	3	4	5
Коефіцієнт несиметрії $k_{ns,(k)}$	3.27	6.54	9.8	13.07	16.34
Фаза С	0.696	0.481	0.322	0.215	0.139

Рівняння $z = f(k_{ns,j})$ знайдемо шляхом апроксимації залежністю $z = a_z e^{-b_z k_{ns,j}}$, де коефіцієнти апроксимації $a_z = 1,0065$, $b_z = 1,16123$.

Результати розрахунку об'єднаємо з залежністю $k_b = f(k_{ns})$ і покажемо на рис.3.

Враховуючи, що вирази (3.4) і (3.5) є експоненційними функціями, то вирішимо систему рівнянь на їх основі виключаючи k_{ns} :

$$\begin{cases} k_b = a_b (1 - e^{-b_b k_{ns}}); \\ z = a_z e^{-b_z k_{ns}}. \end{cases} \quad (3.6)$$

Вирішимо кожне з рівнянь відповідно експоненційної складової

$$\begin{cases} e^{-b_b k_{ns}} = 1 - \frac{k_b}{a_b}; \\ e^{-b_z k_{ns}} = \frac{z}{a_z}. \end{cases}$$

Прологарифмуємо кожне рівняння

$$\begin{cases} -b_b k_{ns} = \ln \left(1 - \frac{k_b}{a_b} \right); \\ -b_z k_{ns} = \ln \left(\frac{z}{a_z} \right). \end{cases}$$

Вирішимо отриману систему відносно k_{ns} та прирівняємо праві частини

$$-\frac{1}{b_z} \ln \left(\frac{z}{a_z} \right) = -\frac{1}{b_b} \ln \left(1 - \frac{k_b}{a_b} \right).$$

Проводячи потенціювання

$$\left(\frac{z}{a_z} \right)^{\frac{b_b}{b_z}} = 1 - \frac{k_b}{a_b},$$

остаточно отримаємо

$$z = a_z \left(1 - \frac{k_b}{a_b} \right)^{\frac{b_z}{b_b}}, \quad (3.7)$$

Рівняння (3.7) пов'язує відносну тривалість життя ізоляції асинхронного двигуна та відхилення розподілу магнітної індукції зовні двигуна (рис. 3.6).

Враховуючи експоненційний характер рівнянь в системі (3.6) та показник $\frac{b_z}{b_b} \approx 1$, припустимо, що зв'язок z від k_b має лінійний характер. Апроксимуємо розраховану за експериментальними даними $z = f(k_b)$ лінійною функцією. Отримаємо рівняння виду:

$$z = 1,0575 - 1,1214 k_b. \quad (3.8)$$

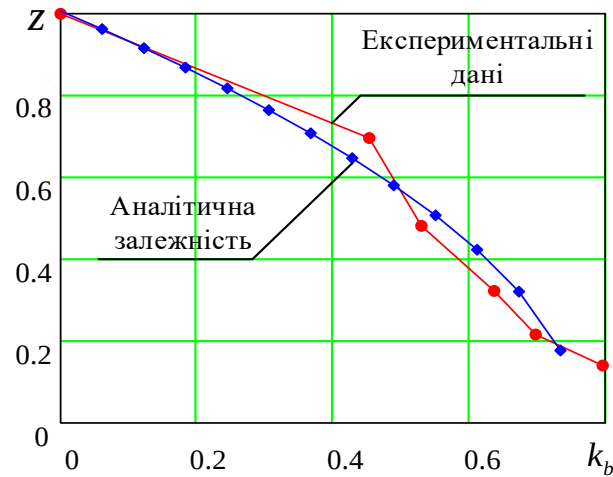


Рисунок 3.6 – Характер зміни відносної тривалості життя ізоляції асинхронного двигуна від відхилення розподілу магнітної індукції зовні двигуна

З огляду, що коефіцієнти лінійного рівняння (3.8) близькі до одиниці, то запишемо:

$$z = 1 - k_b. \quad (3.9)$$

Відповідні рафічні зображення представлені на рис. 3.7.

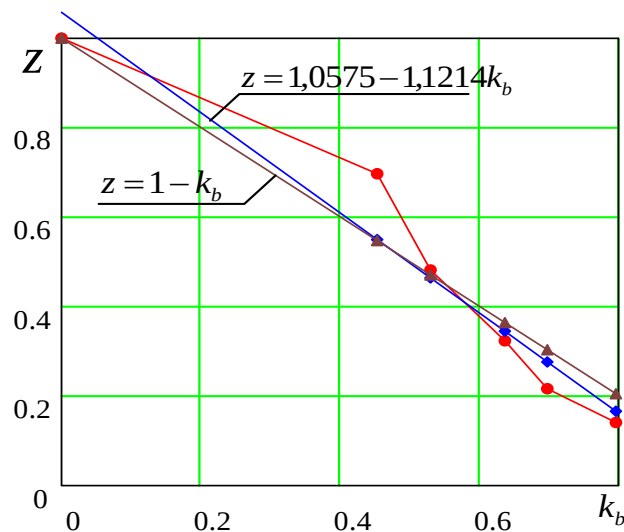


Рисунок 3.7 – Залежність зміни відносної тривалості життя ізоляції асинхронного двигуна від відхилення розподілу магнітної індукції зовні двигуна при апроксимації лінійними залежностями

Оцінимо похибку розрахунку тривалості z життя ізоляції АД за рівнянням (3.9). Визначимо коефіцієнт детермінації для випадку лінійної регресії з константою [112]:

$$R^2 = \frac{ESS}{RSS + ESS},$$

де $RSS = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$ – сума квадратів регресійних залишків, $ESS = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2$

– пояснена сума квадратів, $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ – вибіркове середнє, y_i , $\hat{y}_i$ – відповідно

фактичне (за табл. 4) та розрахункове (за формулою (3.9) значення тривалості життя ізоляції АД z .

Розраховане значення коефіцієнту детермінації $R^2 = 0,92$, тобто варіація значення тривалості життя ізоляції АД на 92% обумовлена відхиленням розподілу індукції магнітного поля. Таке значення R^2 , за співвідношенням Чеддока, означає що зв'язок досить тісний.

3.2. Виявлення зміни параметрів асинхронного двигуна при його моніторингу шляхом вимірювання індукції магнітного поля на поверхні статора

До загального підходу визначення точки (моменту часу), коли відбувається зміна параметрів вимірюваного сигналу, є такий при якому різко змінюються деякі його статистичні властивості. До них можуть бути віднесені середнє значення сигналу, його дисперсії або спектральної характеристики, тощо. Необхідність встановлення точки зміни вимірюваного сигналу, як окрема наукова задача, знаходить у галузях, що займаються передачею та отриманням інформації в радіотехніці, розвідці корисних копалин, вивченні атмосферних явищ, тощо [113–115]. В системах моніторингу електротехнічного обладнання як правило, основні параметри якого: електричний струм, напруга, активна або реактивна потужність, частота обертання ротора електричних машин, вібрація тощо, є електрично вимірюваними, передаються екранованими лініями зв'язку і тому вважаються детермінованими і такими які практично не містять завад, або завадами нехтують. При вимірюванні індукції магнітного поля впливом завад

нехтувати не можна, адже на параметри вимірюваного поля впливають електромеханічне обладнання, яке знаходиться поряд: пуск, зміна навантаження або частоти обертання електричних двигунів; перетворювачі енергії: зміна вихідної частоти або частоти модуляції комутації силових ключів; комутуючі апарати: автоматичні вимикачі, контактори, реле; лінії електропостачання: повітряні або кабельні, відстань або геометрія прокладення і таке інше [116–118]. У меншій мірі, але можуть впливати навіть флуктуації магнітного поля планети чи сонячні викиди та магнітні бурі [119–120].

В промислових умовах вимірювання індукції магнітного поля вбудованими сенсорами здійснюється неперервно лише для відповідального обладнання, наприклад, потужних турбогенераторів на ГЕС, АЕС тощо. Для обладнання підприємств металургійної, гірничовидобувної галузей, транспорту, об'єктів комунального підпорядкування, такі вимірювання будуть проводитись уже періодично та в ручному режимі. Сказане означає, що дані вимірювання будуть містити завади у вигляді шуму. В такому випадку виділення сигналу з вимірюваного сигналу, що містить шум є актуальною задачею.

Здійснено аналіз вимірюваної індукції магнітного поля на поверхні статора АД, за даними моніторингу, зокрема виділимо сигнал, який відображає зміну параметрів двигуна для прогнозування його стану, терміну та доцільності подальшої експлуатації.

Раніше була показана можливість аналітичного обчислення зниження терміну служби ізоляції за даними вимірюваної індукції магнітного поля на поверхні статора асинхронного двигуна. Залежності для розрахунку були отримані на основі експериментальних досліджень [121]. Вимірювання індукції проводилось у заздалегідь визначених 16 точках спеціальним вимірювачем індукції магнітного поля TES-1394 на відстані 0,1 м від корпусу та в горизонтальній площині на рівні валу (рис. 3.8).

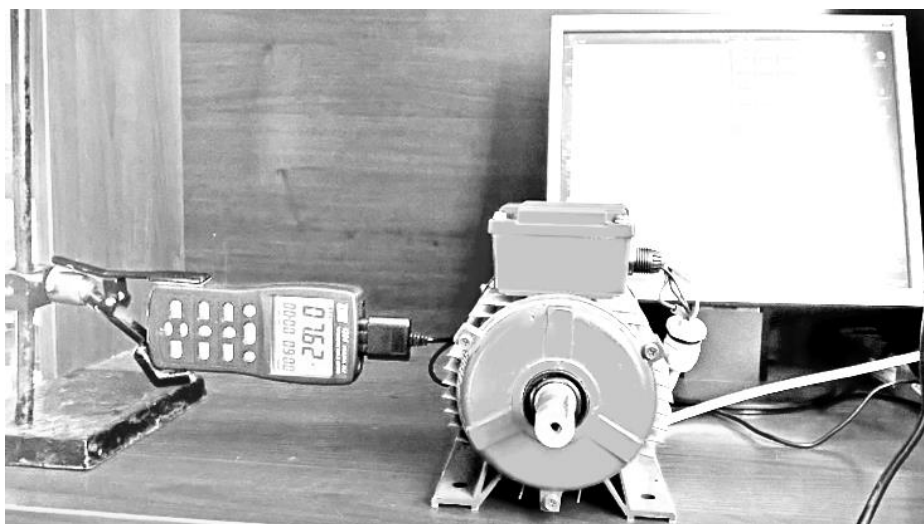


Рисунок 3.8 – Лабораторний стенд з вимірювання індукції магнітного поля

Вимірювач TES-1394 має пропускну здатність 30 Гц/2000 Гц та похибку вимірювання $\pm(3\% + 3d)$ на частоті вимірювання 50 Гц/60 Гц. Вимірювач TES-1394 через інтерфейс RS-235 був під'єднаний до комп'ютера і запис точок індукції магнітного поля здійснювався автоматично з дискретністю 0,25 с. Кожна точка вимірювалась протягом 1 хвилини, після чого отримані 240 значень усереднювались без застосування спеціальних алгоритмів шумозниження. Всього було проведено п'ять серій вимірювань. Кожна наступна серія вимірювань відповідала поступовому погіршенню стану двигуна, що відображалось у несиметрії опорів обмоток статора. Але безпосередньо момент зміни опору обмотки статора, тобто перехід від однієї серії вимірювань до іншої не реєструвався. Враховуючи, що для процесу моніторингу головним є виділення сигналу з шуму і визначенню саме моменту зміни параметрів двигуна, то викладені нижче дослідження присвячені розв'язанню саме цієї задачі.

Вплив зовнішніх споживачів на результати вимірювання відображений на рис. 3.9.

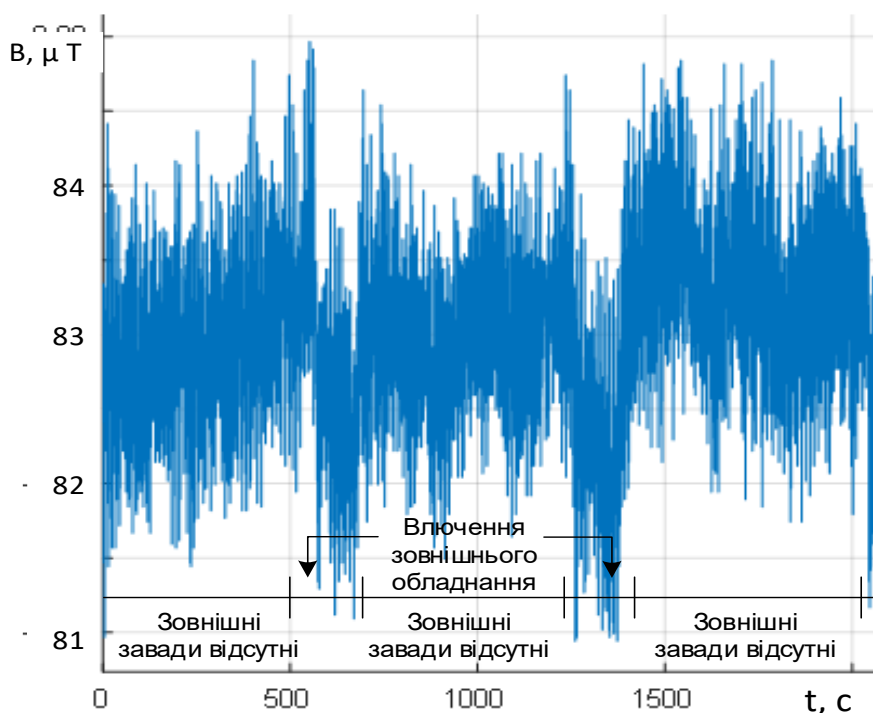


Рисунок 3.9 – Шум при вимірюванні індукції магнітного поля

Вимірювання здійснювались в лабораторії під час виконання лабораторних робіт. В приміщенні працювала група студентів. В цей час включались електричні двигуни та змінювалось їх навантаження. Це позначено на рис. 3.9 як «Включення зовнішнього обладнання».

3.2.1 Експериментальні дослідження параметрів шуму

Безпосередні вимірювання, для яких був проведений запис і аналіз індукції магнітного поля, відповідали умовам відсутності працівників в лабораторії, відключене електротехнічне обладнання в зоні 20 м навколо дослідного об'єкту. Запис був проведений автоматично протягом 15 хв і записані 900 точок протягом з інтервалом дискретизації 1с. Загальний сигнал показаний на рис.3.10.

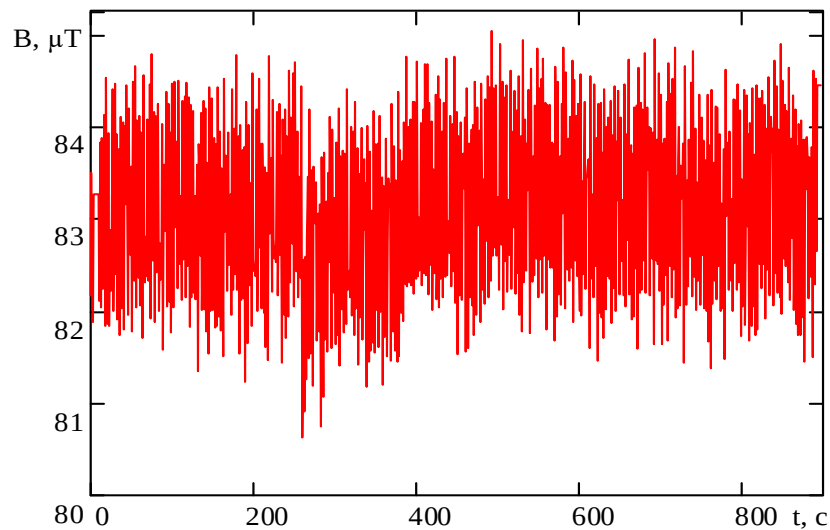


Рисунок 3.10 – Сигнал індукції магнітного поля виміряний на поверхні статора асинхронного двигуна

Виконаємо аналіз даних і оцінимо характер випадкового процесу і його числові характеристики.

На рис. 3.11 приведена частотна гістограма, з якої видно двумодальний характер процесу, що свідчить або про негомогенність вибірових даних при можливому випадковому характеру процесу, або про наявність періодичної складової низької частоти. При цьому оцінки асиметрії (0,05) і ексцесу (1,9) знаходяться в межах, які в першому наближенні дозволяють апроксимувати розподіл вибірки кривою нормального розподілу.

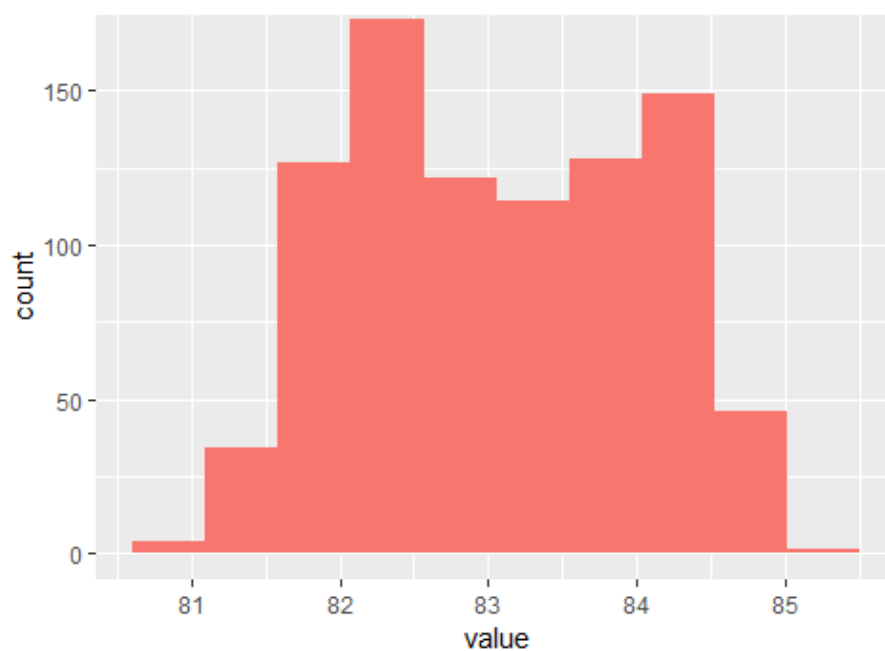


Рисунок 3.11 – Частотна гістограма

На рис. 3. 12 показана реалізація шуму і тренд, отриманий шляхом згладжування ковзним середнім. Візуальний аналіз підтверджує припущення про те, що даний процес не є випадковим.

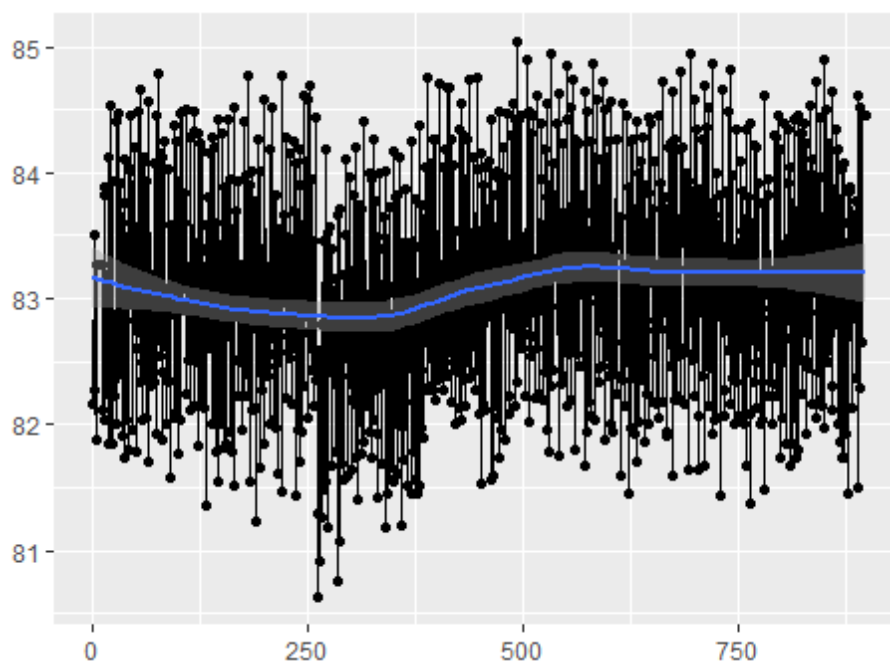


Рисунок 3.12 – Реалізація шуму і тренд, отриманий шляхом згладжування ковзним середнім

Побудуємо АКФ і ЧАКФ для перевірки автокореляції. Оцінки автокореляційної функції і часткової авто-кореляційної функції так само говорять про те, що процес не є випадковим і, з урахуванням подібного характеру АКФ і ЧАКФ, його можна визначити як змішаний.

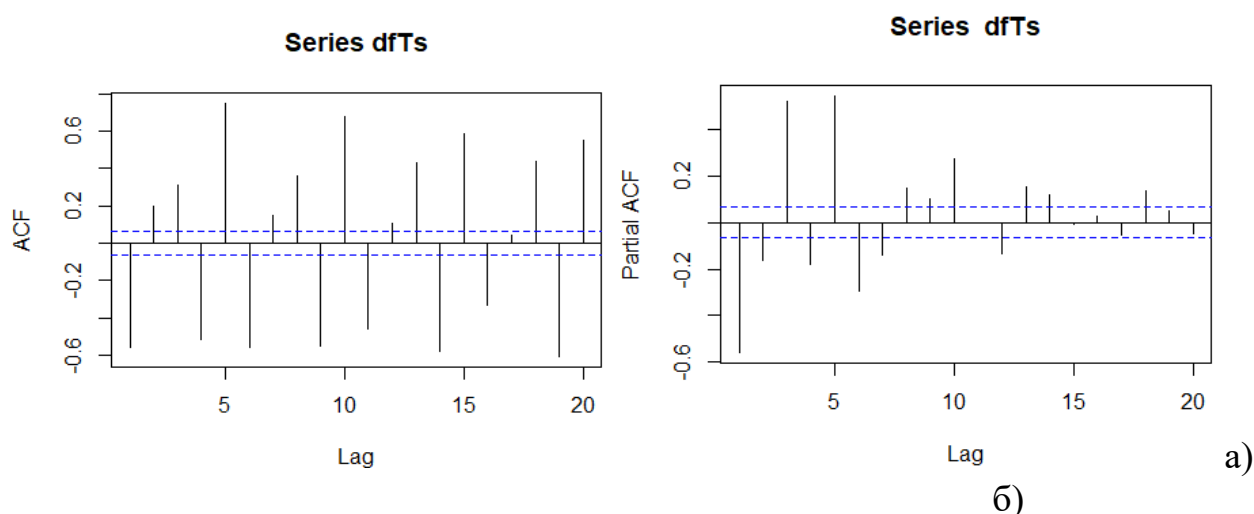


Рисунок 3.13 – Реалізація характеристик перевірки автокореляції: а) – автокореляційна функція; б) – часткова авто-кореляційна функція

Періодограма (спектрограма) і кумулятивна періодограма (рис.3.14) так само спростовують гіпотезу, що дана реалізація є білим шумом: на частотах, близьких до нуля 0,25 і 0,4 є значні коливання.

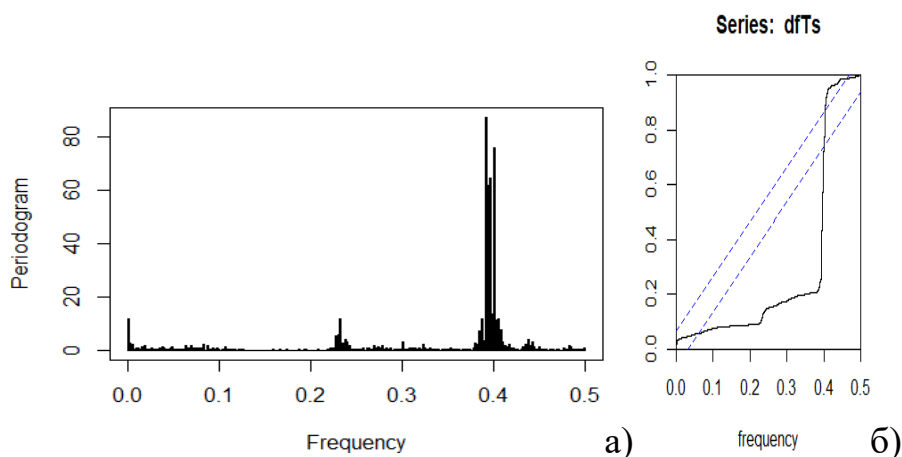


Рисунок 3.14 – (а) і кумулятивна періодограма (б)

Підводячи підсумок, можна зазначити, що процес не є білим шумом, в ньому присутні високочастотні і низькочастотні компоненти. Тобто, це кольоровий шум. Процес можна ідентифікувати як процес авторегресії і змінного середнього (змішаний). У першому наближенні можна вважати ARIMA (1, 0, 1).

3.2.2 Визначення точності і чутливості виявлення зміни даних

Для розв'язання задачі виділення сигналу зміни параметрів двигуна з вимірної індукції магнітного поля застосуємо методи для аналізу сигналів з високим рівнем шумів та завад. Це методи, які зазвичай використовуються в атмосферних, фізичних і біологічних дослідженнях. Існує чотири основні групи методів які розподіляються за характером зміни сигналу, так званого стрибка або зсуву [113, 122]. Більшість методів першої групи має спрямування виділення сигналу з невеликого проміжку часу – «методи виявлення в середньому». Виділяють наступні групи методів:

- параметричні методи, такі як класичний Т-тест. Такі методи потребують прийняття припущень про розподіл ймовірностей даних;

- непараметричні методи, такі як U-тест Манна-Уїтні, сума рангу Вілкоксона або тест Манна-Кендалла. Ніяких припущень щодо розподілу ймовірностей не потрібно;
- методи підгонки кривих;
- Байєсовський аналіз та його варіації, такі як ланцюг Маркова, метод Монте-Карло;
- методи на основі регресійного аналізу;
- методи кумулятивних сум (CUSUM);
- послідовні (Sequential) методи.

Методи другої та третьої групи дозволяють виявляти зміни режимів у статистиці другого порядку, такі як дисперсія і спектр потужності. Четвертою групою методів є багатоваріантні методи, які призначені для виявлення змін у всій структурі складної системи.

Однак існуючі засоби автоматичної обробки даних, наприклад Statistica, Statgraphiks, водоліючи певною кількістю методів, не пристосовані для інженерних розрахунків, а математичні пакети прикладних програм для чисельного аналізу, пакети машинного моделювання, наприклад Matlab, Mathcad, Maple тощо, мають обмежену кількість методів. Серед них найбільш застосовуваними є функції Changepoint та CUSUM, які прийняті для аналізу вимірюного сигналу індукції магнітного поля.

Для дослідження процесу виділення сигналу з шуму, штучно сформуємо його зміну. Прийнемо, що коефіцієнт k_b за Буземановою метрикою, у точці $k = 500$ змінився від початкового значення $k_b = 0,453$ до значення $k_b = 0,53$ відповідно до розрахунків проведених у [120]. Програмна реалізація формування сигналу у Matlab показана у алгоритмі 3.1.

Алгоритм 3.1 – Формування сигналу для дослідження

- 1: Задаємо основні параметри вхідних даних;
 - 2: clear;
 - 3: load('E:\Noise\noise.mat'); % Завантажуємо шум
-

```

4: N = length(noise); % Визначаємо довжину шуму
5: K = 500 % Задаємо момент стрибка
6: if (K>N)
7:     K = round(0.9*N);
8: end
9: b1 = 0.453; % Задаємо початковий рівень
10: b2 = 0.53; % Задаємо кінцевий рівень
11: Створюємо вхідні дані:
12: X = zeros(N, 1);
13: for i = 1:N % Формуємо сходинку
14:     if (i <= K)
15:         X(i) = b1;
16:     else
17:         X(i) = b2;
18:     end
19: end
20: for m = 1:length(X)
21:     meas(m) = m;
22: end
23: Xnoised = zeros(length(X), 1); % Додаємо шум к вхідним даним
24: for j = 1:length(X)
25:     Xnoised(j) = X(j) + noise(j);
26: End

```

3.2.2.1. Застосування функції Changepoint. Функція Changepoint знаходить точку зміни сигналу у відповідний момент часу, коли деякі статистичні показники сигналу різко змінюються. Це можуть бути середні значення сигналу, його дисперсія або спектральна характеристика. Щоб знайти точку зміни сигналу, findchangepts використовує параметричний глобальний метод. Алгоритм роботи функції полягає у наступному:

1. обирається точка, що ділить сигнал на два розділи;
2. обчислюється емпірична оцінка обраного статистичного показника для кожного розділу;

3. у кожній точці розділу вимірюється, наскільки показник відхиляється від емпіричної оцінки і додається відхилення для всіх точок;
4. знаходиться загальна залишкова помилка на основі відхилення між розділами;
5. змінюється розташування точки поділу до досягнення мінімальної загальної залишкової помилки.

Пошук точки зміни сигналу є виразнішим, коли аналізується саме середнє значення.

В загальному випадку, наприклад, для сигналу $x_1, x_2, \dots, x_N$, функція знаходить точку k такою, що

$$J(k) = \sum_{i=1}^{k-1} \Delta(x_i; \chi([x_1 \dots x_{k-1}])) + \sum_{i=k}^N \Delta(x_i; \chi([x_k \dots x_N])),$$

є найменшим, для N незалежних спостережень, враховуючи розділ емпіричної оцінки χ і виміру відхилення Δ . Зведення до мінімуму залишкової помилки еквівалентно максимізації логарифмічної правдоподібності з огляду на нормальний розподіл із середнім μ і дисперсією σ^2 [123, 124]. Розв'язання задачі суттєво спрощується, адже нам не потрібно знаходити всі можливі зміни. Ми повинні знайти перший поточний скачок параметрів. Програмна реалізація використання функції `findchangepts` у Matlab показана у алгоритмі 3.2.

Алгоритм 3.2 – Визначення точки зміни даних

```
findchangepts(Xnoised(1:k,1),'Statistic','mean','MinThreshold',beta)
% beta - чутливість
```

На визначення точки зміни сигналу впливає два фактори: довжина часового інтервалу на якому знаходиться скачок зміни параметрів та параметр чутливості «beta» – β . Припустимо, що поріг чутливості залежить як від середнього значення сигналу так і від його статистичних характеристик. Будемо розраховувати β як відношення СКО сигналу шуму σ_{noise} до середнього значення сигналу $\bar{x}$: $\beta = \frac{\sigma_{noise}}{\bar{x}}$. Для сигналу, що зображений на рис.1, та

корисного сигналу з початковим значенням $k_b = 0,453$ параметр чутливості приймає значення $\beta = 0,194$.

Розглянемо процес знаходження точки зміни параметрів в залежності від моменту вимірювання у часі. Тобто відтворимо процес моніторингу – регулярних вимірювань з контролем змінювання сигналу.

Очевидно, що на початку вимірювань функція не знаходить точки зміни сигналу і лише після 500-го вимірювання це стає можливим. Однак, враховуючи характер статистичних характеристик сигналу знайдена точка можливо буде не точно відповідати 500-у вимірюванню, а також буде знайдена з деяким запізненням. Результати дослідження показані у табл. 3.6 та на рис. 3.15.

Очевидно, що чим більша дисперсія сигналу шуму, тим більш «грубими» повинні бути значення β і тим грубішими результати знаходження точки змінювання сигналу. Для підвищення точності знаходження точки змінювання сигналу застосуємо алгоритм фільтрації сигналу, наприклад, на основі ковзного середнього з різними вагами [125]:

$$x_i^{filter} = \frac{1}{4}x_{i-1} + \frac{1}{2}x_i + \frac{1}{4}x_{i+1}.$$

Програмна реалізація фільтрації на основі ковзного середнього з різними вагами у Matlab показана у алгоритмі 3.3.

Алгоритм 3.3 – Фільтрація сигналу

```

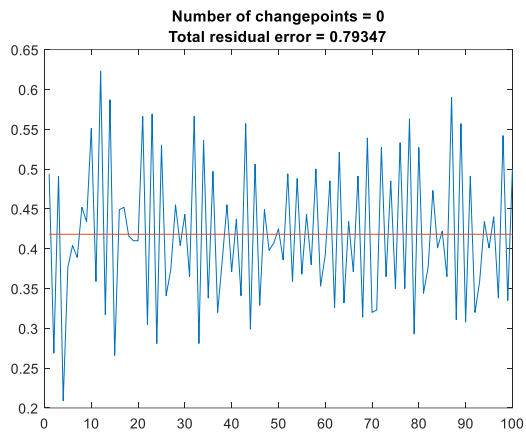
1:  Xnoised = zeros(length(X), 1);
2:  for j = 2:length(X)-1
3:    Xnoised(j) = X(j)+1/4*noise(j-1)+1/2*noise(j)+1/4*noise(j+1);
4:  end

```

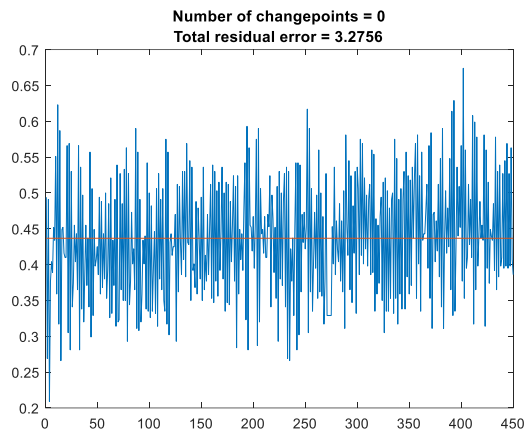
Зміна статистичних характеристик шуму призводить до підвищення параметру чутливості, який приймає значення $\beta = 0,081$. З урахуванням фільтрації дослідимо процес знаходження точки змінювання сигналу при його послідовному вимірюванні.

Таблиця 3.6 – Результати знаходження точки змінювання сигналу при його послідовному вимірюванні.

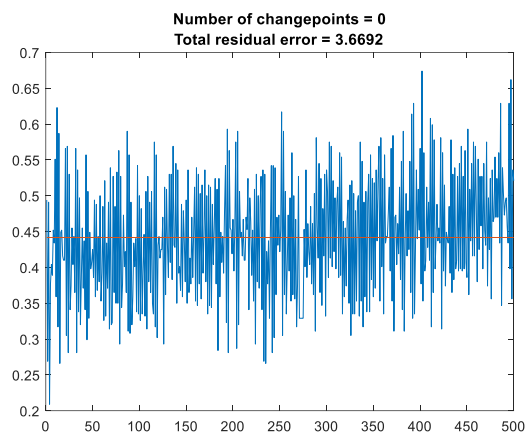
Точка виміру	Точка знаходження змінювання сигналу	Середнє значення сигналу	
		початковий рівень	кінцевий рівень
50	-	0,4178	-
100	-	0,4181	-
150	-	0,4218	-
200	-	0,4257	-
250	-	0,4269	-
300	-	0,4274	-
350	-	0,4298	-
400	-	0,434	-
450	-	0,4368	-
500	-	0,4418	-
505	-	0,4428	-
506	343,5	0,4293	0,4728
510	352,5	0,4299	0,4758
520	352,5	0,4299	0,4795
521	476,5	0,4389	0,5238
530	476,5	0,4389	0,5285
540	494,5	0,4408	0,5541
550	494,5	0,4408	0,5654
560	494,5	0,4408	0,5698
570	494,5	0,4408	0,571



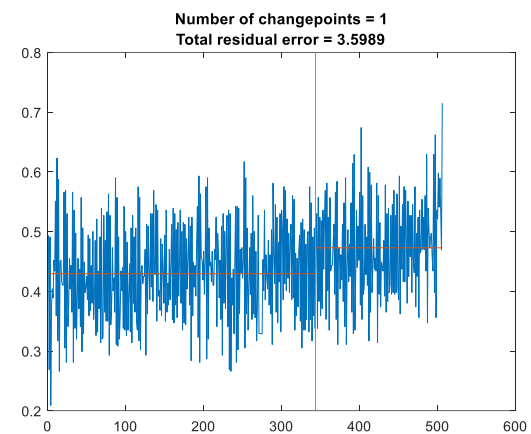
а)



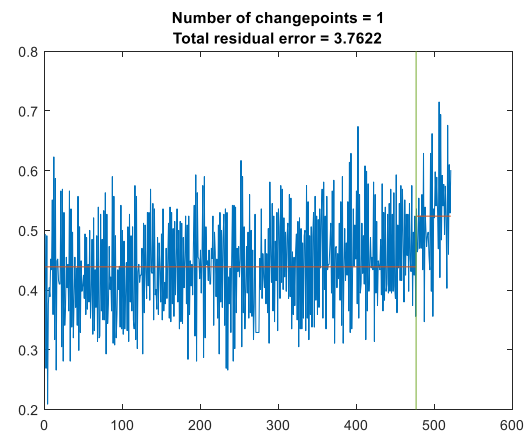
б)



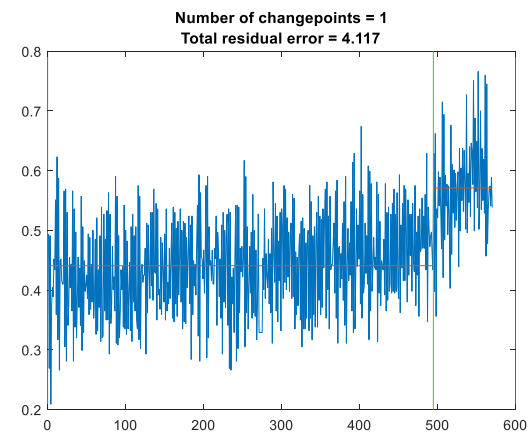
в)



г)



д)



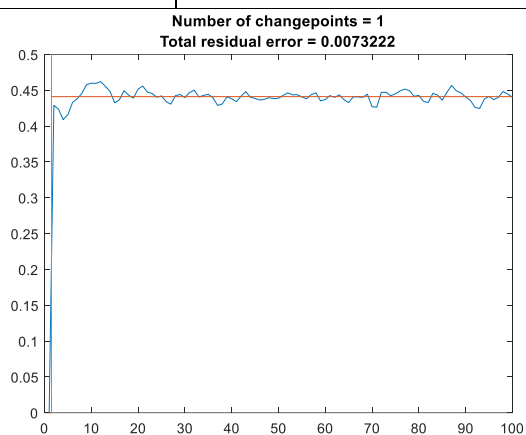
е)

Рисунок 3.15 – Результати знаходження точки змінювання сигналу при його послідовному вимірюванні:

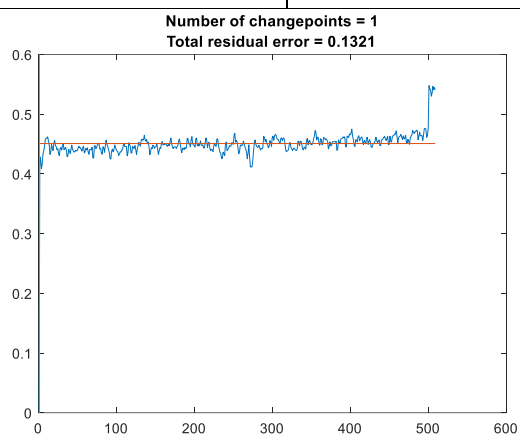
а) – 100 вимірювання, б) – 450 вимірювання, в) – 500 вимірювання,
г) – 506 вимірювання, д) – 521 вимірювання, е) – 570 вимірювання

Таблиця 3.7 – Результати знаходження точки змінювання сигналу при його послідовному вимірюванні з фільтрацією ковзним середнім.

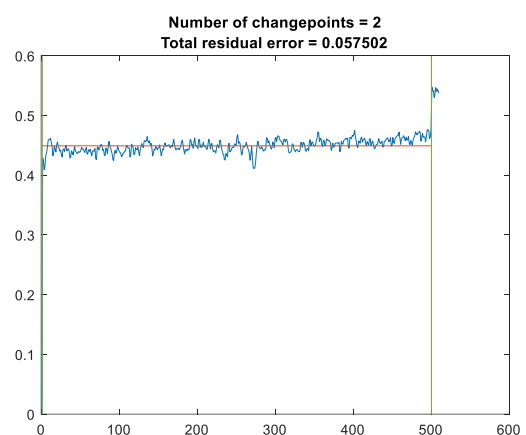
Точка виміру	Точка знаходження змінювання сигналу	Середнє значення сигналу	
		початковий рівень	кінцевий рівень
50	-	0,4411	-
100	-	0,4412	-
200	-	0,4438	-
300	-	0,4445	-
400	-	0,4466	-
500	-	0,4493	-
510	500,5	0,4493	0,5408
530	500,5	0,4493	0,5375
550	500,5	0,4493	0,5435
570	500,5	0,4493	0,5452



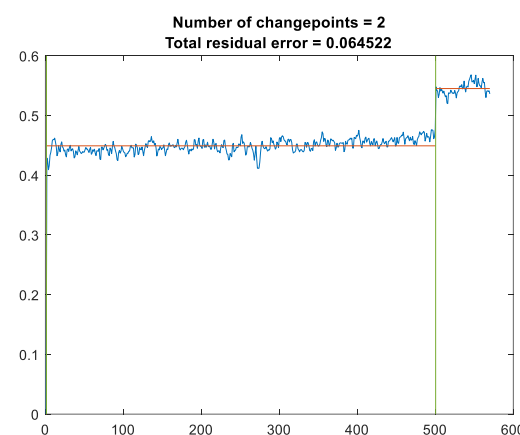
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.16 – Результати знаходження точки змінювання сигналу при його послідовному вимірюванні:

а) – 100 вимірювання, б) – 509 вимірювання,

в) – 510 вимірювання, г) – 570 вимірювання,

Узагальнюючи отримані результати можна стверджувати, що застосування алгоритмів «step-detection» дозволяє виділити точку зміни сигналу, який характеризує зміну внутрішніх параметрів АД, що відображається у індукції магнітного поля виміряної на поверхні статора. При чому виміряний сигнал містить шум. Виділення такого сигналу дає стійкий результат з запізненням понад 20 вимірювань та з похибкою у 5 вимірювань; крім того при цьому можуть виникати помилкові знаходження точок зміни сигналу. Відносна похибка точності значення початкового рівня складає 2,7%, а кінцевого рівня -7,7%. Попередня фільтрація шуму забезпечує впевнене і точне виділення точки зміни сигналу з запізненням у двічі меншим, – у 9 вимірювань. Майже у тричі зменшуються похибки визначення рівнів: початкового до 0,8%, кінцевого до -2,9%. Від’ємне значення похибки означає, що функція Changepoint дещо перебільшує погіршення стану двигуна.

3.2.2.2. Застосування функції CUSUM. Метод кумулятивних сум служить візуальним засобом виявлення зміни показника якості та подальшого встановлення причин цієї зміни. При моніторингу та управлінні процесом процедура кумулятивних сум допомагає вирішувати два завдання:

- виявлення значимих зрушень (змін) процесу від цільового рівня;
- визначення точок їх виникнення.

Застосування функції CUSUM дозволяє виявити невеликі зміни в середньому на основі методу кумулятивних сум, що забезпечує зниження зашумленості при виділенні сигналу [126]. Програмна реалізація функції CUSUM у Matlab показана у алгоритмі 3.4.

Алгоритм 3.4 – Метод кумулятивних сум

1: cusum(Xnoised(1:k), climit);
 2: %k – довжина інтервалу вимірювань
 3: %climit – межа управління, виражена в стандартних відхиленнях

В загальному випадку, наприклад, для сигналу $x_1, x_2, \dots, x_N$, з розрахунковим середнім m_x та розрахунковим стандартним відхиленням σ_x , визначається верхня та нижня кумулятивні суми:

верхня кумулятивна сума

$$U_i = \begin{cases} 0, & i = 1 \\ \max\left(0, U_{i-1} + x_i - m_x - \frac{1}{2}n\sigma_x\right), & i > 1; \end{cases}$$

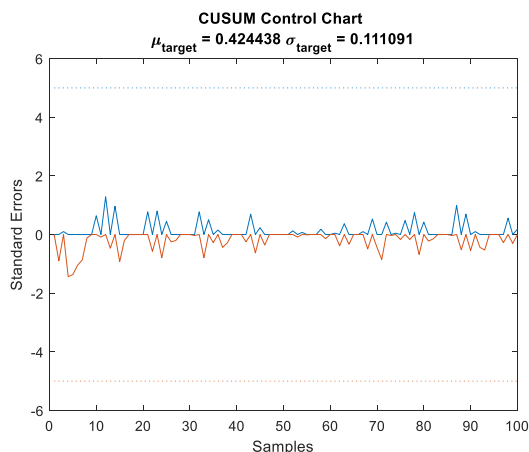
нижня кумулятивна сума

$$L_i = \begin{cases} 0, & i = 1 \\ \min\left(0, L_{i-1} + x_i - m_x + \frac{1}{2}n\sigma_x\right), & i > 1; \end{cases}$$

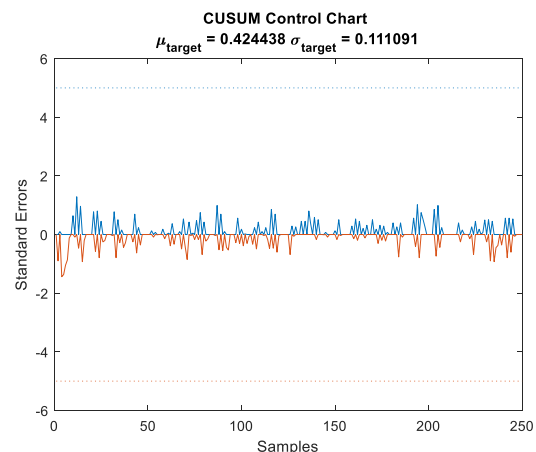
n - число розрахункових стандартних відхилень σ_x , на основі якого приймається рішення про наявність змінювання сигналу: $limit = n$.

Розглянемо процес знаходження точки зміни параметрів в залежності від моменту вимірювання у часі. Приймаючи стандартну установку $n=5$, отримуємо стійкий результат з запізненням лише на 2 точки після зміни сигналу. Необхідно зазначити, що зменшення до $n=2$, для даного сигналу не змінює результату знаходження його зміни. Результати дослідження показані на рис. 3.17.

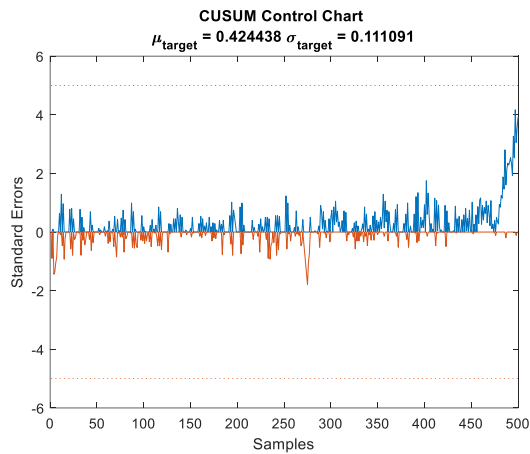
Дослідимо процес знаходження точки змінювання сигналу при його послідовному вимірюванні з урахуванням фільтрації, використовуючи алгоритм 3.3. Результати показані на рис.3.18



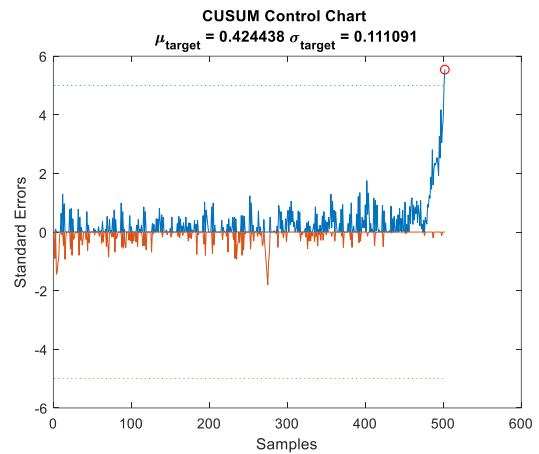
а)



б)



в)

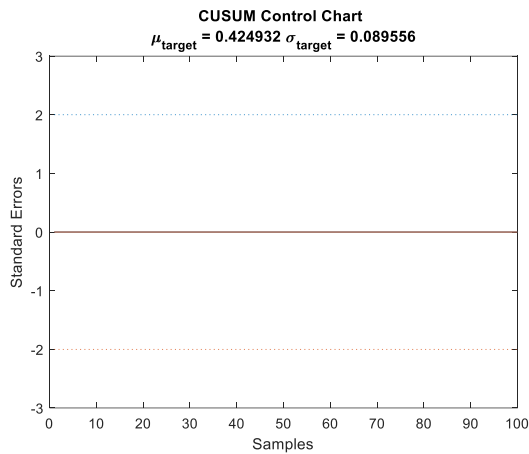


г)

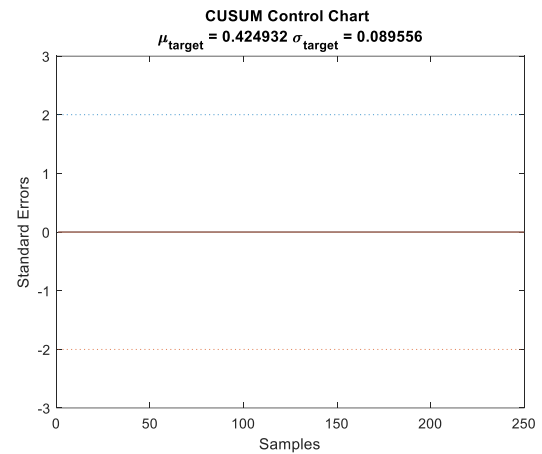
Рисунок 3.17 – Результати знаходження точки змінювання сигналу при його послідовному вимірюванні:

а) – 100 вимірювання, б) – 250 вимірювання,

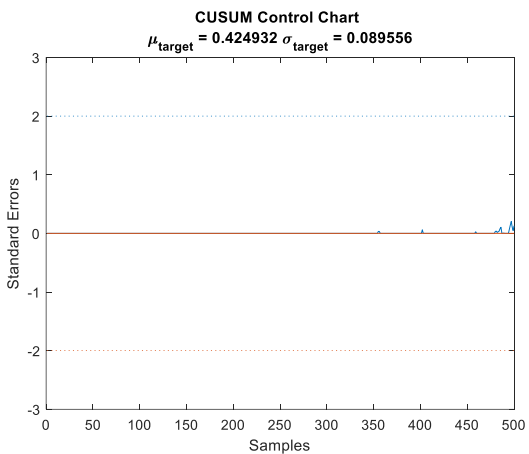
в) – 500 вимірювання, г) – 502 вимірювання



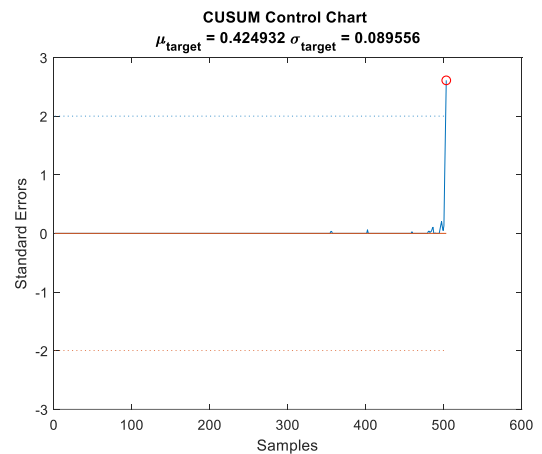
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.18 – Результати знаходження точки змінювання сигналу після фільтрації при його послідовному вимірюванні (при $n = 2$)

а) – 100 вимірювання, б) – 250 вимірювання,

в) – 500 вимірювання, г) – 503 вимірювання

Узагальнюючи отримані результати можна стверджувати, що застосування алгоритмів «кумулятивних сум» дозволяє чітко виділити точку зміни сигналу, який характеризує зміну внутрішніх параметрів АД, що відображається у індукції магнітного поля вимірюної на поверхні статора. При цьому процес виділення точки зміни практично не залежить від наявності шуму. Також на виділення сигналу практично не впливає число розрахункових стандартних відхилень, на основі якого приймається рішення про наявність змінювання сигналу. Виділення такого сигналу дає стійкий результат з запізненням, що не перевищує 3 вимірювання. На результат не впливає і зміна числа стандартних відхилень від двох до п'яти.

3.3 Висновки по розділу 3.

1. Необхідність в розгляді поставленої проблеми оцінки індукції магнітного поля на поверхні зношеного або ремонтного електромеханічного обладнання отримала експериментальне підтвердження. Отримані в результаті вимірів значення індукції магнітного поля навколо асинхронних двигунів мають різко виражену нерівномірність, що несе інформацію про технічний стан двигуна.

2. На основі отриманих результатів розроблені основні принципи аналізу зовнішнього магнітного поля двигунів, інтерпретації отриманих результатів і судження про наявність в двигуні дефектів. Зокрема на основі Буземанової метрики розроблені критерії оцінювання ступеню несиметрії двигуна, перегріву обмоток статора та зниження тривалості життя їх ізоляції. Встановлена лінійна залежність між терміном життя ізоляції обмоток та відносним значенням Буземанової дистанції. Отримані результати дозволяють оцінити термін експлуатації асинхронного двигуна.

3. Представлений аналіз вимірюної індукції магнітного поля на поверхні статору АД, за даними моніторингу, відображає можливість виділення сигналу

і реєстрацію міні параметрів двигуна для прогнозування його стану, терміну та доцільності подальшої експлуатації. Використані для аналізу функції Changepoint та CUSUM з різним ступенем точності та швидкодії дозволяють визначити точку зміни параметрів.

4. На процес аналізу сигналу практично не впливає шум, що викликаний наявністю працюючого електричного обладнання та його включенням-виключенням. Проведення фільтрації сигналу ковзним середнім з різними вагами дозволяє удвічі підвищити точність отримання результату. Слід зазначити, що поєднання методів визначення точки зміни сигналу дозволяє суттєво підвищити точність, а також розрахунку значень початкового та кінцевого рівня сигналу. Для цього точка зміни сигналу локалізується на основі методу кумулятивних сум функцією CUSUM а потім уточнюється при застосуванні функції Changepoint.

5. Уперше отримано аналітичну модель стану асинхронного двигуна у вигляді лінійного рівняння відносного залишкового ресурсу ізоляції від коефіцієнту, розрахованого на основі Буземанової метрики, що дозволяє врахувати зміну розподілу індукції магнітного поля на поверхні статора асинхронного двигуна при виникненні параметричної несиметрії його обмоток.

6. Удосконалено метод моніторингу асинхронних двигунів, який відрізняється від існуючих тим, що добір діагностичних параметрів ґрунтується на критерії максимальної індивідуальності, причому параметр максимальної індивідуальності приймається в якості базового, а добір діагностичних параметрів здійснюється методом послідовних доповнень, що дозволяє вирішити задачу діагностування на основі зовнішніх ознак режиму роботи двигунів.

Основні результати даного розділу опубліковані в роботах [6]-[9], [11], [18], [20].

РОЗДІЛ 4

ПОБУДОВА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОГО МОНІТОРИНГУ СТАНУ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ

4.1. Декомпозиція процесів моніторингу стану електричних двигунів на основі зовнішніх ознак

На основі аналізу предметної області та, відповідно до вимог стандарту IDEE0, засобами пакету AllFusion Process Modeler BPWin, створена контекстна діаграма, яка описує аналіз даних в інформаційній технології моніторингу стану електричних двигунів на основі зовнішніх ознак. Дана діаграма відображена на рисунку 4.1:



Рисунок 4.1 – контекстна діаграма процесу моніторингу стану електричних двигунів на основі зовнішніх ознак

У таблиці 4.1 наведено опис стрілок, які містить контекстна діаграма

Таблиця 4.1 – Список стрілок контекстної діаграми

Назва стрілки	Опис стрілки
Значення магнітної індукції електричного двигуна	Стрілка входу. Значення індукції магнітного поля, які вимірюються в 16 точках на статорі асинхронного двигуна
Акустичний сигнал роботи електричного двигуна	Стрілка входу. аудіопотік сигналу, який відображає роботу електричного двигуна,
Словесний опис стану електричного двигуна	Стрілка входу. Вибір ознак несправностей з заданого переліку
Вимоги до інформаційних технологій	Стрілка управління. Вимоги інформаційного впливу. Стандарти та методики створення та використання інформаційних технологій.
Програмно–апаратні засоби	Стрілка механізму. Програмно – апаратні засоби для розробки і супроводження проекту
Користувач	Стрілка механізму. Розробник або аналітик
Інформація про ресурс ізоляції електричного двигуна	Стрілка виходу. Значення відносного терміну строку служби ізоляції електричного двигуна в %
Частота коливань та амплітуда акустичного сигналу електричного двигуна	Стрілка виходу. Значення частоти коливань (Гц) та амплітуди акустичного сигналу (ДБ) електричного двигуна

Продовження таблиці 4.1

Рекомендації щодо ремонту чи експлуатації електричного двигуна	Текстовий та графічний описи рекомендацій, щодо ремонту чи режимів експлуатації електричного двигуна.
--	---

В результаті функціонального аналізу головної роботи отримано діаграму декомпозиції представлену на рисунку 4.2. Діаграма декомпозиції деталізує основну функцію системи

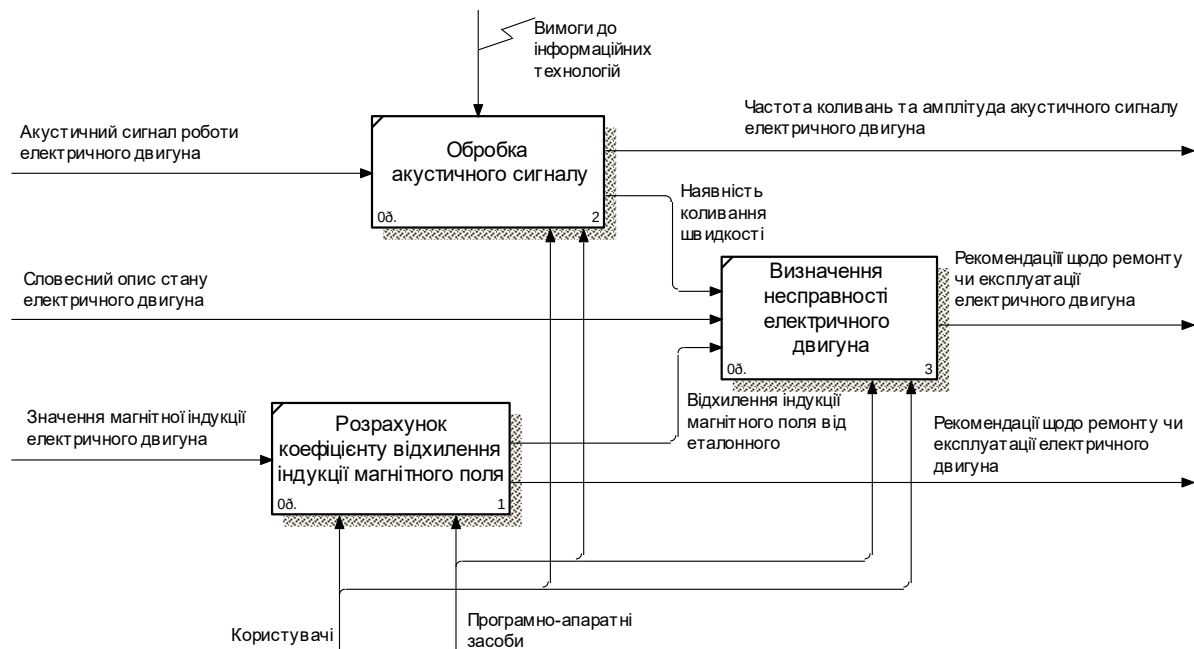


Рисунок 4.2 – Діаграма декомпозиції процесу моніторингу стану електричних двигунів на основі зовнішніх ознак

Таблиця 4.2 – Список робіт

Назва роботи	Опис роботи
Обробка акустичного сигналу	Запис і фільтрація звукового сигналу. Розрахунок частоти та амплітуди коливань акустичного сигналу

Продовження таблиці 4.2

Назва роботи	Опис роботи
Розрахунок коефіцієнту відхилення індукції магнітного поля	Побудова графіку розподілу індукції магнітного поля. Розрахунок коефіцієнту відхилення індукції магнітного поля та визначення ресурсу експлуатації ізоляції електричного двигуна
Визначення несправності електричного двигуна	Формування файлу з рекомендаціями про ремонт або режими експлуатації електричного двигуна

Декомпонуємо послідовно всі блоки отриманої діаграми. Послідовність використання підсистем довільна. До процедури «Визначення несправності електричного двигуна» можна отримати доступ через процедури «Розрахунок коефіцієнту відхилення індукції магнітного поля» або «Обробка акустичного сигналу» але цю функцію можна використовувати незалежно від інших.

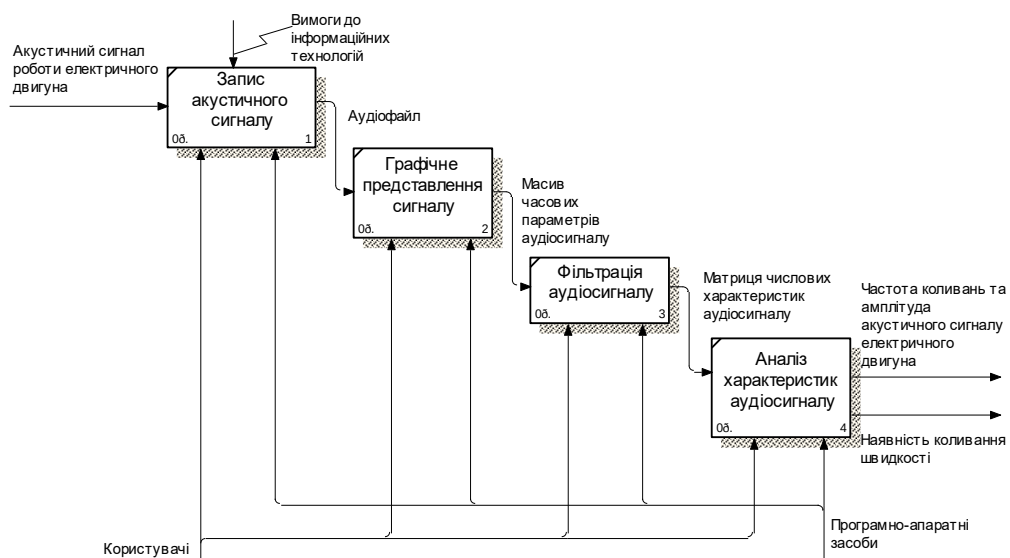


Рисунок 4.3 – Декомпозиція роботи «Обробка акустичного сигналу»

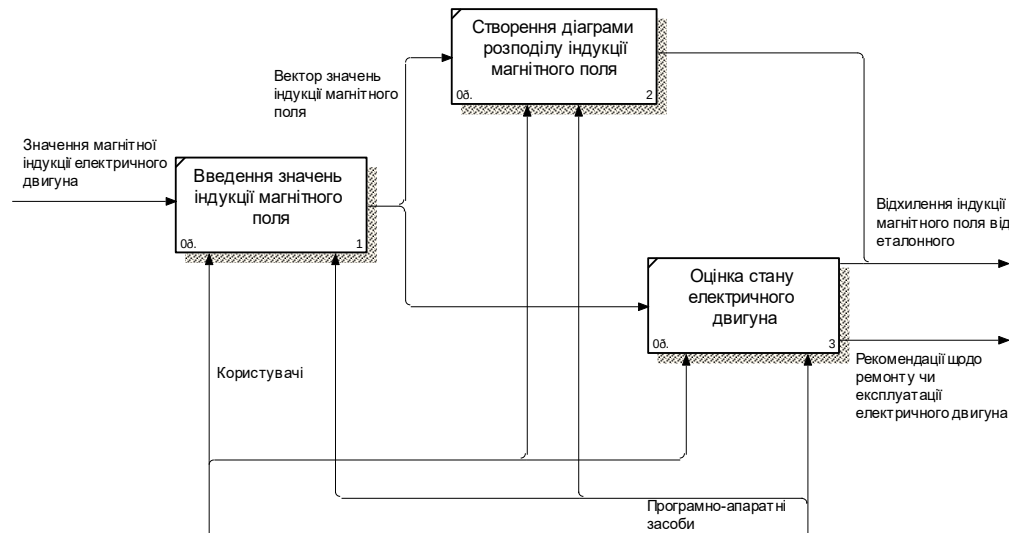


Рисунок 4.4 – Декомпозиція роботи «Розрахунок коефіцієнту відхилення індукції магнітного поля»

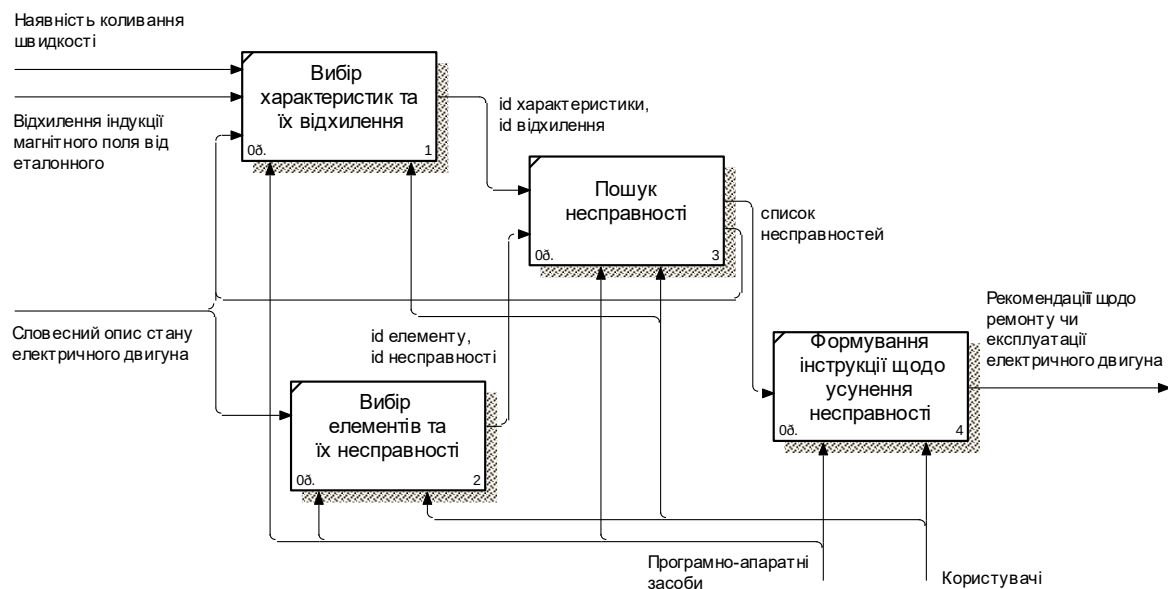


Рисунок 4.5 – Декомпозиція роботи «Визначення несправності електричного двигуна»

4.2 Модульна структура інформаційної технології

Узагальнену структуру інформаційної технології можна представити у вигляді програмних модулів, які реалізують процеси обробки інформаційних потоків та здійснення розрахунків.

Згідно з процесною моделлю модульна структура інформаційної технології має наступну архітектуру (рис. 4.6). Підсистеми програмних процедур, що забезпечують основний функціонал кожного з модулів, реалізуються на мові SQL з використанням відповідних її бібліотек.

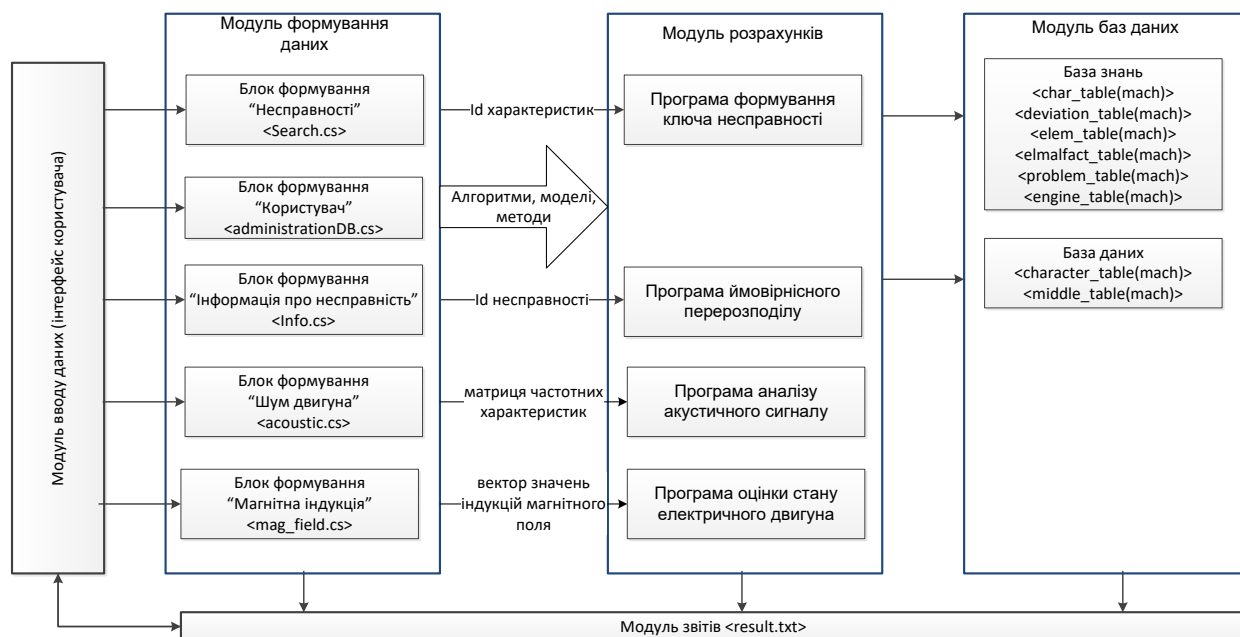


Рисунок 4.6 – Структурно-функціональна схема інформаційної технології

Модульна структура представлена такими основними блоками:

1. Модуль вводу та обробки вхідних даних. Призначений для безпосереднього введення даних, які необхідні для формування даних та реалізації розрахунків.
2. Модуль формування даних. Формує масиви, вектори та списки даних, які підлягають обробці та над якими виконуються розрахунки.
3. Модуль розрахунку. Виконує перетворення даних та розрахунки, використовуючи відповідні алгоритми та методи в залежності від поставленої задачі.
4. Модуль баз даних. До цього модулю входять бази знань та довідкові бази даних.

5. Модуль звітів. Візуалізує отримані результати та формує звіти відповідно до потреб користувачів.

4.3 Формалізація інформаційних потоків функціональної діагностики

Блок функціональної діагностики є однією зі складових частин системи моніторингу й обстеження електричних машин.

Основна задача блока функціональної діагностики – розпізнавання поточного стану об'єкта, що описується множиною діагностичних ознак [133], які відображають взаємозв'язки внутрішніх і зовнішніх параметрів. Такими діагностичними ознаками можуть служити параметри сталого режиму, що змінюються по характерним законам, що залежать від місця виникнення і типу первинних несправностей. Кожна конкретна несправність характеризується одним чи декількома зовнішніми ознаками. В одному випадку зовнішня ознака вказує безпосередньо на наявність конкретної несправності, в іншому випадку характеризує несправність тільки побічно. Таким чином, для діагностики і прогнозування стану електричної машини і привода необхідно знати характер зміни параметрів при різних первинних несправностях і вибрати з них визначальні.

У практиці математичного аналізу і моделювання реакцію привода, тобто зміни параметрів привода, при різних аварійних ситуаціях, можна визначити рішенням диференціальних рівнянь, що описують функціонування привода при наявності первинних несправностей. При цьому приймається припущення про те, що кожному стану привода відповідає цілком визначений зовнішній прояв у виді визначеного характеру зміни параметрів.

У загальному виді система рівнянь, що представляють математичну модель привода має вид:

$$\sum^n Y_{il} \left(t, \tau, \frac{d}{dt} A \right) = F_l(t, \tau, Z, x), \quad (4.1)$$

де $Y(\cdot)$ - вектор функцій часу, що характеризує параметри привода; Z - вектор функцій часу, що характеризує зовнішні і внутрішні впливи і первинні несправності; $F(\cdot)$ - нелінійна функція, що зв'язує параметри привода з первинними несправностями; Y_{il} – багаточлен щодо операторів диференціювання векторів коефіцієнтів параметрів.

Задаючись типовими функціями первинних несправностей Z і вирішуючи систему рівнянь (4.1) визначають реалізацію параметрів $L(T, X, S) = Y$, що відповідають кожному аварійному стану.

Ефективним методом опису математичних моделей об'єкта діагностування є представлення його у виді абстрактної динамічної системи, процес функціонування якої складається в зміні стану під дією зовнішніх і внутрішніх збурювань. Математична модель подібної системи визначається як функціонал змінних [134]:

$$y = F(T, X, Z, S, S_0, C^*, C, L^*, L), \quad (4.2)$$

де T - множина моментів часу t ; X, Y - множина вхідних x і вихідних y сигналів системи; S - множина станів s системи; S_0 - замкнута область станів системи, що обмежує можливі переміщення s в процесі функціонування; $C^*(T, X, S) = P^*$, $C(T, X, S) = P$ - оператори переходів, що відбивають зміни стану системи під дією зовнішніх і внутрішніх збурювань; $L^*(T, X, S) = Y^*$, $L(T, X, S) = Y$ - оператори виходів, що описують формування вихідного сигналу під дією внутрішніх і зовнішніх збурювань.

Вхідні і вихідні сигнали об'єкта представимо у виді орієнтованого графа, вершини якого представляють події – наявність чи відсутність конкретної несправності, а дуги – причинно-наслідкові зв'язки між подіями.

Покажемо застосування апарата технічної діагностики для визначення несправностей в електричних машинах.

На рис. 4.7 приведені первинні несправності і діагностичні ознаки перегріву асинхронного двигуна [135]. Несправності дані жирним шрифтом,

їхні ознаки – курсивом, а причини несправностей – звичайним шрифтом.

Розглянемо один із фрагментів рис. 4.7 який відповідає перегріву обмотки статора. Орієнтований граф представлений на рис. 4.8.

Вхідний сигнал x - відповідає ознаці перегрів обмотки статора, вершини графа e_i – подія: “Загальний рівномірний перегрів всієї обмотки”, “Обмотка місцями сильно перегріта” і ін., дуги графа z_i – первинні несправності. Зв'язок між подіями і первинними несправностями опишемо системою логічних рівнянь, що враховує стан об'єкта діагностування:

$$\begin{aligned}
 z_1 &= e_1 \wedge x; \\
 z_2 &= e_2 \wedge x; \\
 z_3 &= e_3 \wedge x; \\
 z_4 &= e_4 \wedge x; \\
 z_5 &= e_5 \wedge z_1; \\
 z_6 &= e_6 \wedge z_6; \\
 z_7 &= e_7 \wedge z_2 \wedge z_3 \wedge z_4; \\
 z_8 &= e_8 \wedge z_2 \wedge z_3 \wedge z_4; \\
 z_9 &= e_9 \wedge z_2 \wedge z_3 \wedge z_4.
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Множина подій $e_i (i=1..N)$ і первинних несправностей $z_j (j=1..s)$ утворюють таблицю функцій несправностей (ТФН) (таблиця 4.1), на перетинанні рядків і стовпців якої знаходяться результати перевірок R_{ij} . Сформована ТФН має відомі властивості [134], що дозволяє використовувати її при побудові алгоритмів діагностування.

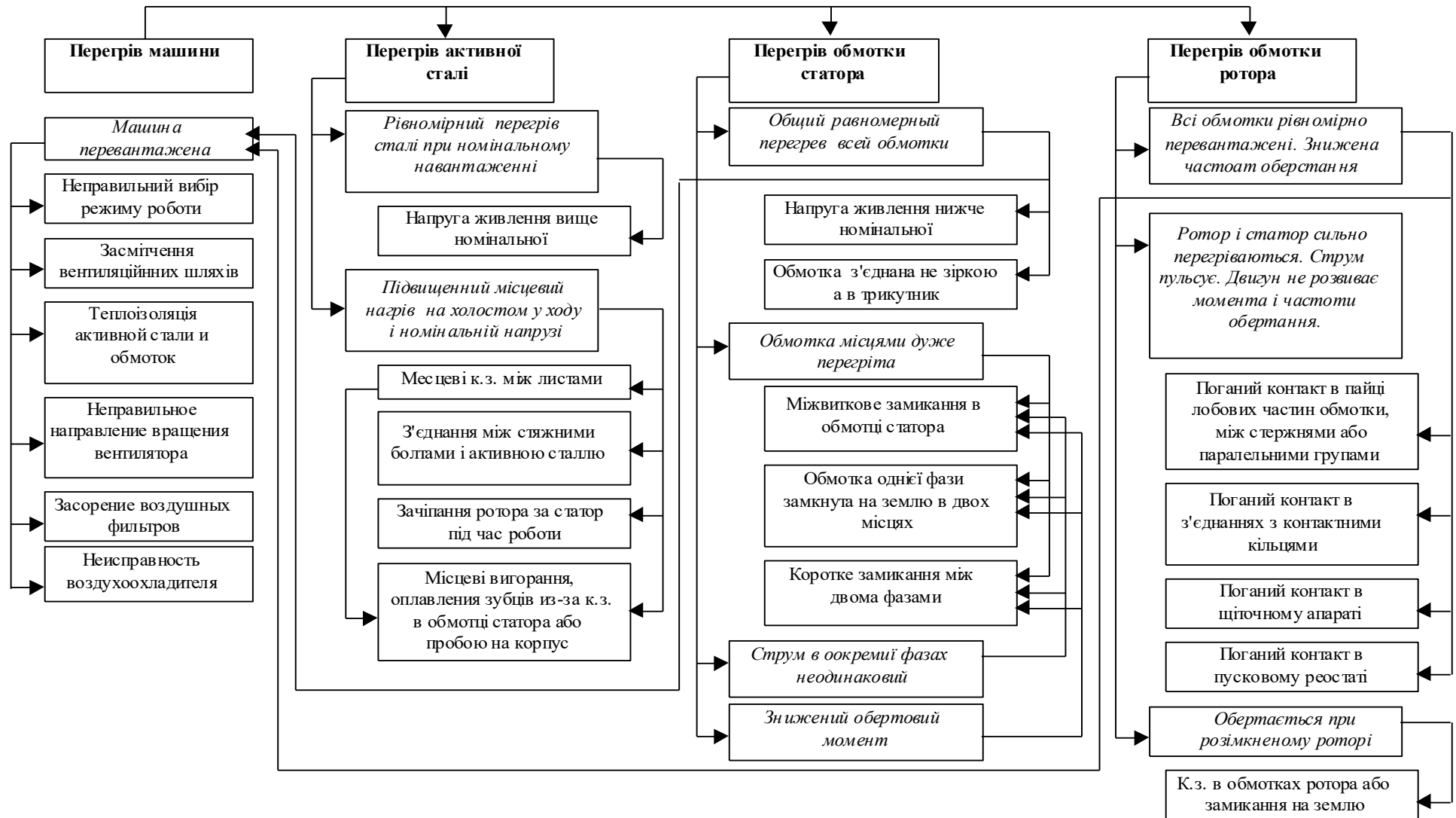


Рисунок 4.7 – Первинні несправності і діагностичні ознаки перегріву асинхронного двигуна

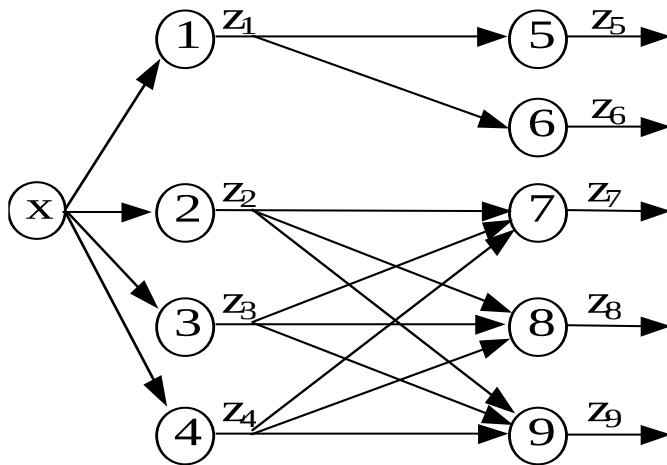


Рисунок 4.8 – Орієнтований граф несправностей АД по ознаці “Перегрів обмотки статора”

Таблиця 4.3 - Таблиця функцій несправностей

	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅	e ₆	e ₇	e ₈	e ₉
z ₁	0	1	1	1	1	1	1	1	1
z ₂	1	0	1	1	1	1	0	0	0
z ₃	1	1	0	1	1	1	0	0	0
z ₄	1	1	1	0	1	1	1	1	1
z ₅	0	1	1	1	0	1	1	1	1
z ₆	0	1	1	1	1	0	1	1	1
z ₇	1	0	0	0	1	0	0	1	1
z ₈	1	0	0	0	1	0	1	0	1
z ₉	1	0	0	0	1	0	1	0	0

Проаналізувавши таблицю видно, що в ній можуть існувати неоднозначності викликані тим, що апіорі вважають наявність тільки однієї несправності.

У цьому випадку вибір визначальних параметрів можна робити за критерієм чутливості ознаки до змін, що відбуваються у приводі, викликаних первинною несправністю [136].

Коефіцієнт чутливості визначається залежністю:

$$k_i = \frac{\partial y}{\partial z_j} \frac{z_j^*}{y}, \quad (4.4)$$

якщо в процесі моделювання отриманий аналітичний (чи інший) зв'язок

параметра з характеристикою первинної несправності $y = f(z_j^*)$, де z_j^* - характеристика первинної несправності.

Застосування даного методу ускладнюється, якщо допустити можливу появу декількох первинних несправностей чи одночасно коефіцієнти чутливості зовнішніх ознак однакові.

Спільний вплив факторів приводить до невизначеності, тобто нерозрізненості окремих модифікацій за значеннями досліджуваного діагностичного параметра. Приведені показники відображають, що діагностичні параметри мають комбінаційну інформативність, унаслідок чого використання комбінацій діагностичних параметрів за іншими показниками: вібрація, швидкість обертання, що розвивається момент, споживана потужність таїї складові тощо, дає можливість розкрити всі невизначеності і збільшити кількість розпізнаваних станів. Це досягається при перетворенні безперервного діагностичного параметра в багатозначну логічну величину

$$G_{i+a-i}(Z) = \{n_{i+a-i}(Z)\}, \quad (4.5)$$

де $G_{i+a-i}(Z)$ - значення діагностичного параметра; $n_{i+a-i}(Z)$ - багатозначна логічна величина; Z - модифікація.

На основі цього можна розробити багатозначну логічну діагностичну модель зручну для застосування при побудові технічних засобів діагностування.

Методика добору діагностичних параметрів ґрунтується на критерії максимальної індивідуальності. Параметр максимальної індивідуальності приймається в якості базового. Добір діагностичних параметрів, що дозволяють вирішити задачу розпізнавання, здійснюється методом послідовних доповнень. При цьому спочатку вибирається параметр, що доповнює, комбінаційна інформативність якого в сполученні з базовим виявляється максимальною. Потім до отриманої бази додається третій параметр і т.д. до повного розпізнавання [137].

Отримана багатозначна логічна модель може бути представлена у виді

матриці, причому стовпцями матриці є номери значень кожного діагностичного параметра станів, а рядками номери всіх діагностичних параметрів набору. Логічна модель легко перетворюється в двійкову. При цьому ознакою несправності є логічний добуток логічних функцій значень діагностичних параметрів:

$$\{Z\} = \{a_{it}\} \wedge \{b_{it}\} \wedge \{c_{it}\}, \quad (4.6)$$

де a_{it}, b_{it}, c_{it} - двійкові змінні, що визначають влучення параметрів A, B, C у зони значень, у яких визначена несправність Z у момент часу t .

4.4 Формалізація архітектури системи моніторингу

Невід'ємною частиною експлуатації електричних машин (ЕМ) є оцінка їхнього стану і ремонту [134, 136]. Існуючі методи оцінки стану і діагностики в більшості своїй вимагають зупинки ЕМ і виведення її з технологічного процесу: під час технічних оглядів, планово-запобіжних або капітальних ремонтів [138 – 141]. Останніми роками з'являються теоретичні роботи із створення систем моніторингу ЕМ, у тому числі в процесі їхньої роботи по зміряних сигналах струму і напруги [142], проте такі системи вимагають наявності системи вимірювання електричних параметрів, і як правило, перетворювача енергії для створення спеціальних режимів живлення, необхідних для оцінки стану ЕМ. Задача оцінки стану ЕМ як складної електромеханічної системи з нелінійними характеристиками у багатьох випадках має неоднозначне і неєдине розв'язання. Це, з одного боку, не дозволяє повною мірою автоматизувати процес діагностики, а з іншого боку, вимагає ухвалення розв'язання від людини-оператора. При цьому людина-оператор повинен володіти необхідними теоретичними знаннями і досвідом.

З розвитком і вдосконаленням обчислювальних комплексів і інформаційних технологій розвивається новий напрям – комп'ютерний моніторинг та діагностика, який тісно пов'язаний з розробкою систем моніторингу (СМ), здатних обробляти не тільки кількісні дані, але і різного

роду знання, проводячи аналіз поведінки технічних систем і ухвалюючи експертні рішення. Ураховуючи такий підхід до побудови СМ, визначення несправностей електричних машин на основі аналізу зовнішніх ознак, що характеризують режим роботи, є актуальною задачею.

Методологічно архітектура СМ может бути представлена наступним чином: {(експертна система), (динамічна підсистема) → динамічні властивості → логичні правила → властивості (ідентифікація стану) → (динамічна підсистема) → логичні правила → властивості (модулі експертної системи) → (експертна система)}.

Математичний опис архітектури експертної системи має вигляд:

$$ES = \left\{ \left(D \left(P(t) \left(x_0(t), x_1(t), x_2(t), z(t), k(t), y(t), d(t) \right) \right) \right), \right. \\ \left. R(t), \left(P_i(t) \left(x_i(t), z_i(t), k_i(t), y_i(t) \right) \right) \right\}, \quad (4.7)$$

де ES – експертна система; D – динамічна підсистема; P – властивості елементів експертної системи; R – логичні R відносини; x – впливи; z – параметри, що діагностуються; k – коефіцієнти; y – вихідні параметри; d – динамічні параметри; t – час; індекси: 0, 1, 2 — початковий стаціонарний режим, зовнішній, внутрішній характер дій; i – число елементів експертної системи.

Описана архітектура експертної системи реалізована в системі визначення несправностей ЕМ по зовнішніх ознаках, що характеризують режим роботи. На рис. 4.9 показані основні потоки інформації і взаємозв'язку між ними. Необхідність накопичення, зберігання і обробки великих об'ємів інформації вимагає створення програмного забезпечення, що відповідає за введення, витягання інформації і подальшої її обробки.

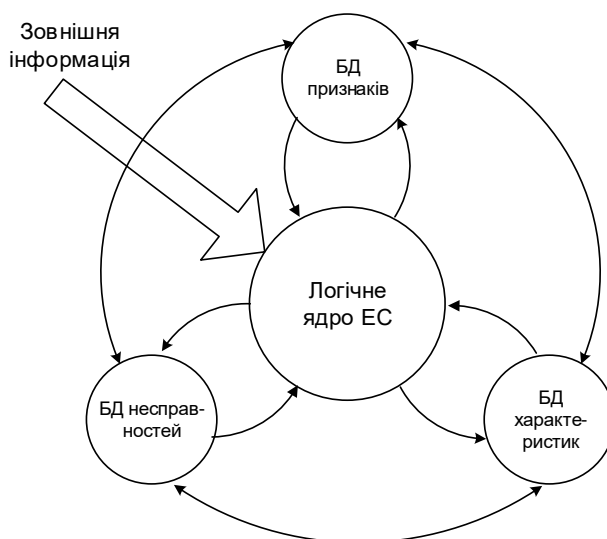


Рисунок 4.9 – Структура потоків інформації в системі визначення несправностей

На основі виконаного аналізу, з урахуванням запропонованої архітектури СМ, розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення інформаційної технології визначення несправностей ЕМ по зовнішніх ознаках.

4.5 Програмна реалізація інформаційної технології комплексного моніторингу

4.5.1 Алгоритмічна структура програмного забезпечення

Розроблене ПЗ складається з набору програмних файлів в яких організовується робота наступних модулів:

- модуль пошуку інформації в БЗ;
- модуль редагування БЗ;

Алгоритм роботи експертної системи наведений на рис. А.1. Основний алгоритм розробленої системи базується на використанні ймовірнісного аналізу.

Після виконання входу до бази даних пропонується або редагування бази даних, що притаманно оператору програми або безпосередній пошук пошкодження.

Модуль пошуку несправності має чотири поля: елемент двигуна, який аналізується на несправність та відповідно характеристика елемента, що демонструє несправність, характеристика, що неpritаманна правильній роботі двигуна та її відхилення відповідно. Після того як буде змінено один з чотирьох полів програма відшукає всі релевантні записи та відсортує їх за відсотковим показником.

Пошук записів виконується за компонованим ім'ям. Компоноване ім'я має вигляд id двигуна, id елемента двигуна та id характеристики цього елемента, далі записується роздільний знак '-' і id характеристики двигуна та id її відхилення. Для більш гнучкого пошуку не обрані характеристики замінюються нижнім підкреслюванням, щоб потім замінити його на відповідний знак під час пошуку за БД, що дозволяє знайти часткове входження характеристик у відношенні до певної несправності.

Якщо відповідна несправність не була у створеному списку, то користувач може сам додати новий запис з несправністю. Після натискання відповідної кнопки та заповнення полів, створюється новий запис несправності у відповідності до обраного характеру.

Якщо ж відповідний запис було знайдено серед запропонованого списку, то користувач може переглянути інформацію, щодо кроків для вирішення проблеми та обрати, чи дійсно допомогла ця порада. Якщо запропонована проблематика була правильною, то користувач, натискаючи кнопку 'підтвердити', виконує збільшення кількості випадків саме цієї несправності, саме за цими характеристиками на одиницю та в той же час виконується ймовірнісний перерозподіл..

4.5.2 Програмна реалізація експертної системи моніторингу

Експертна система моніторингу призначена для фахівців, які займаються ремонтом та обслуговуванням електричних двигунів. Основне призначення експертної системи – видача рекомендацій обслуговуючому персоналу в разі виявлення відхилень в роботі електричних двигунів.

Для відкриття експертної системи необхідно запустити файл *expsys(engine).exe*, після чого з'явиться заставка програми, зовнішній вигляд якого наведено на рис. 4.10.

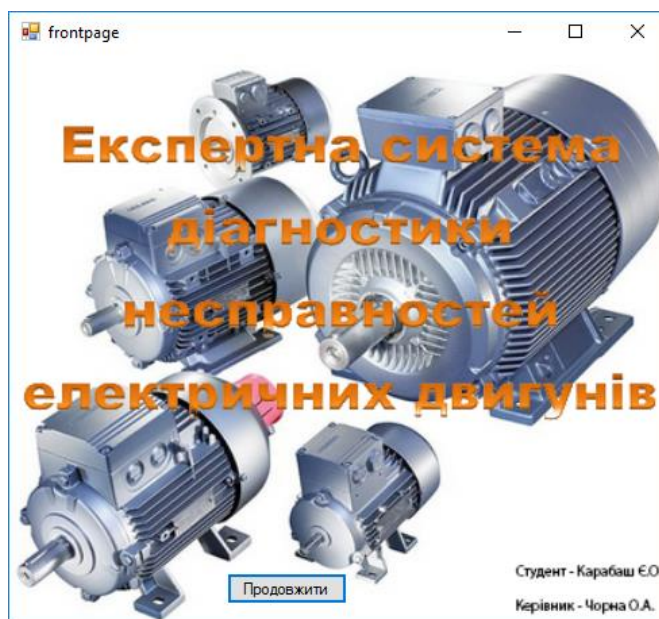


Рисунок 4.10 – Вікно-заставка експертної системи

Після натискання на кнопку «Продовжити» активізується вікно доступу до системи діагностування (рис.4.11):

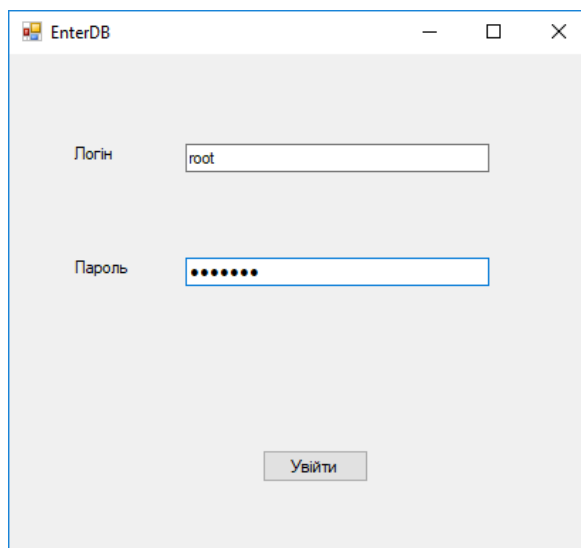


Рисунок 4.11 – Вікно запити паролю

Якщо користувач не зареєстрований у системі, або ввів хибний пароль, то після натискання кнопки «Увійти» з'явиться вікно відмови у доступі (рис.4.12):

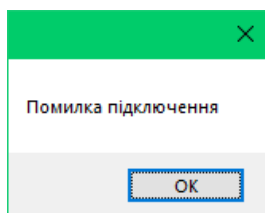


Рисунок 4.12 – Вікно-повідомлення при помилковому підключенні

Після ідентифікації користувача відкривається вікно, що надає доступ до функцій користування та редагування бази знань (рис. 4.13):

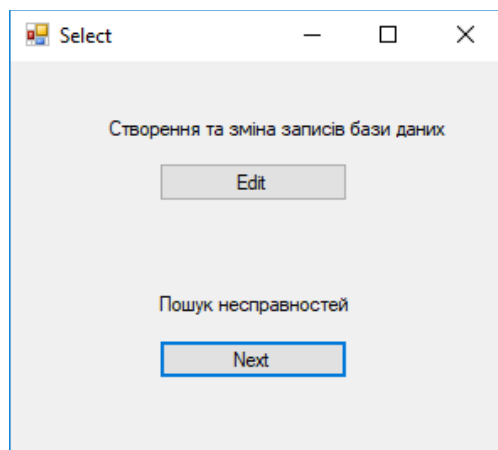


Рисунок 4.13 – Вікно вибору режимів роботи ЕС

В режимі «Edit» надається можливість поповнювати, змінювати та редагувати базу знань (рис.4.14):

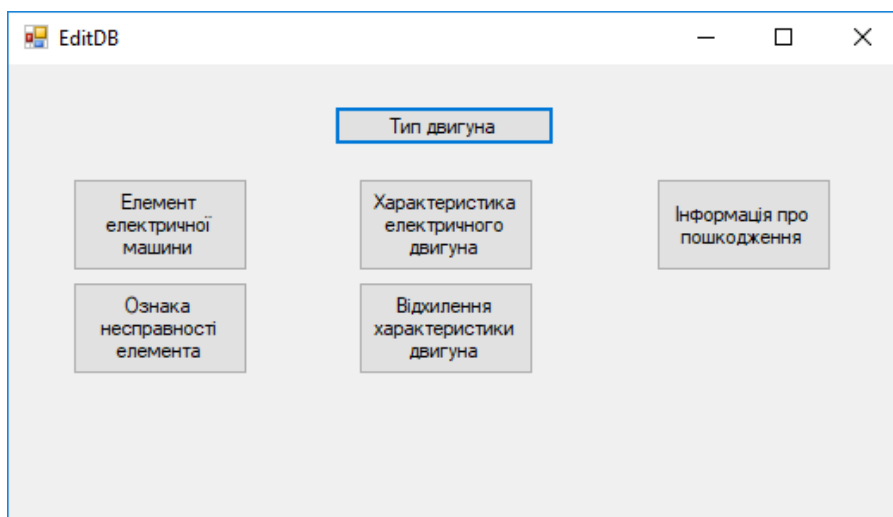


Рисунок 4.14 – Вікно доступу до редагування бази знань

В результаті обрання одного з елементів вікна редагування відкривається доступ до зазначеного довідника бази знань (рис.4.15)

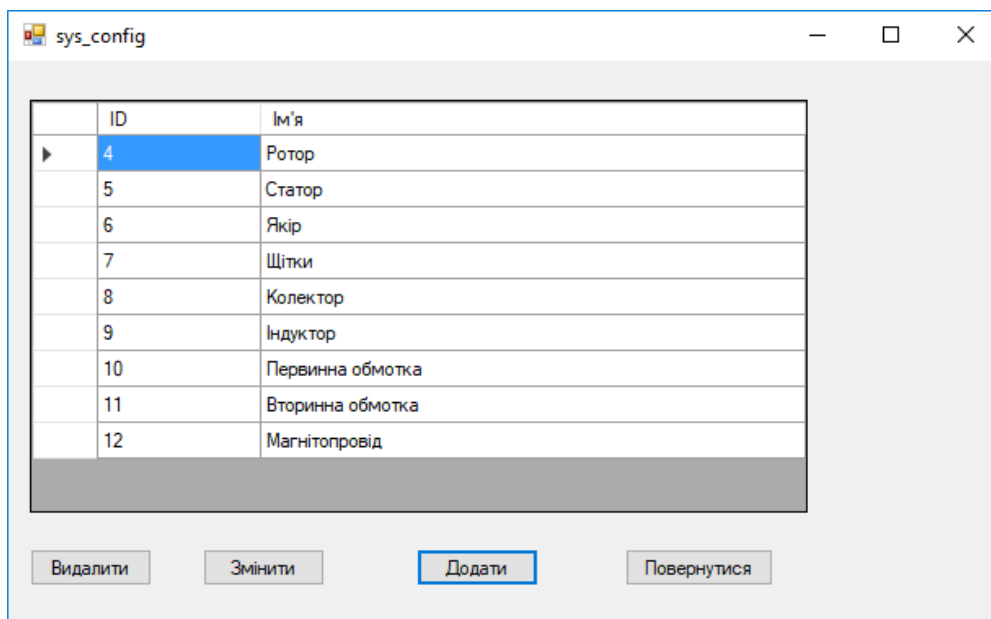


Рисунок 4.15 – Вікно довідника елементів електричних двигунів

В режимі діагностування користувач по заданим відхиленням в характеристиках чи роботі елементів електродвигуна може отримати список можливих несправностей з більш детальним описом (рис.4.16):

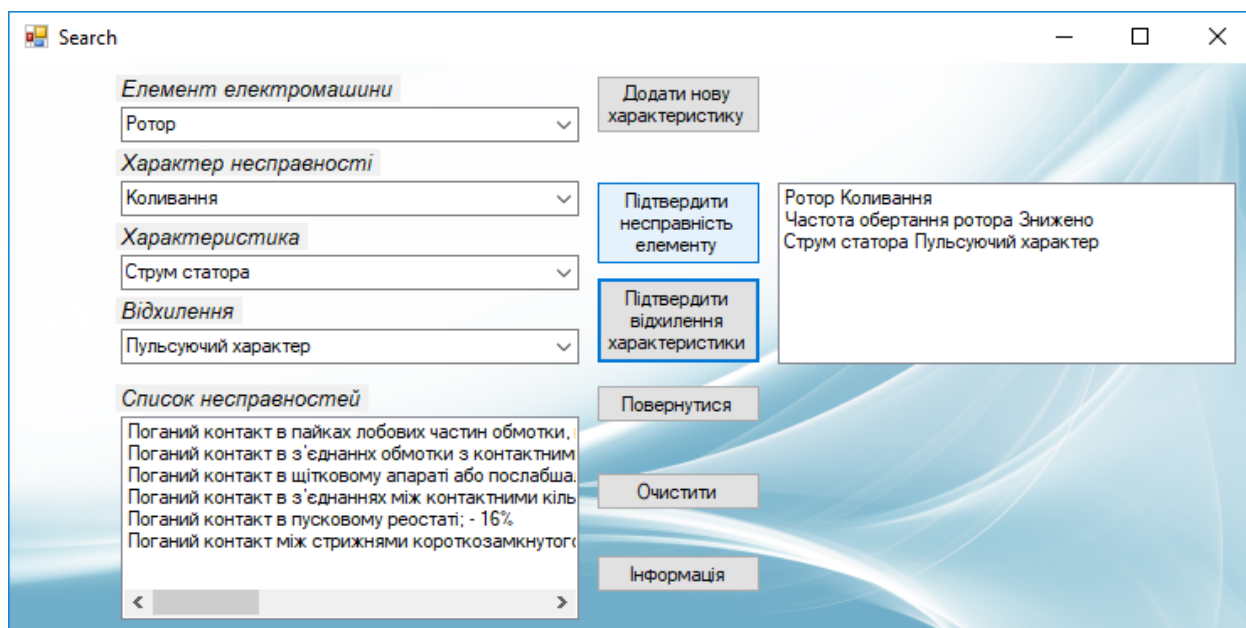


Рисунок 4.16 – Вікно пошуку несправності

Після обрання несправності зі списку та натисканні кнопки «Інформація» відкриється вікно з рекомендаціями усунення несправності. (рис.4.17):

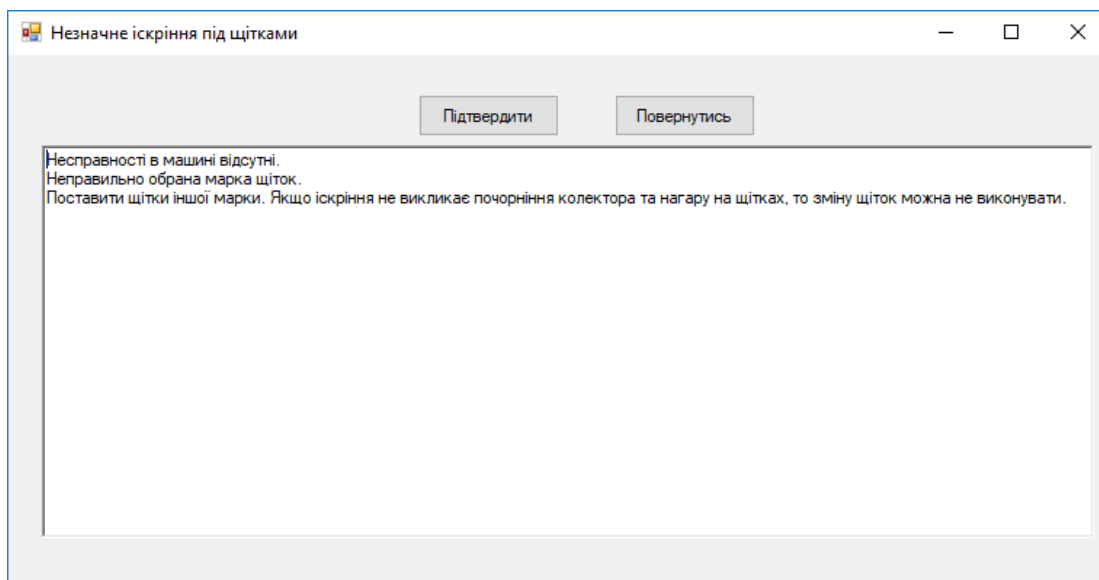


Рисунок 4.17 – Вікно з рекомендаціями усунення несправності

4.6 Висновки по розділу 4

1. На основі проведеного аналізу систем моніторингу та діагностики електричних машин, реалізації методу «оцінки за станом» для попередньої діагностики стану прийнята експертна система, що аналізує зовнішні ознаки режиму роботи електричних машин.
2. Розроблена інформаційна технологія оцінки стану електродвигунів на основі зовнішніх діагностичних показників дозволяє проводити попередню діагностику двигуна з видачою рекомендацій про можливість і доцільність його подальшої експлуатації.
3. Розглянута система функціональної діагностики може бути віднесена до класу діагностичних систем, тому що, найчастіше поповнення інформаційних зв'язків базується на індивідуальному досвіді персоналу який експлуатує дану систему.
4. Запропонована методика добору діагностичних параметрів, що ґрунтується на критерії максимальної індивідуальності. Параметр максимальної індивідуальності приймається в якості базового. Добір діагностичних параметрів, що дозволяють вирішити задачу розпізнавання, здійснюється методом послідовних доповнень. При цьому спочатку вибирається

параметр, що доповнює, комбінаційна інформативність якого в сполученні з базовим виявляється максимальною. Потім до отриманої бази додається третій параметр і т.д. до повного розпізнавання.

5. Уперше отримано інформаційну технологію комплексного моніторингу асинхронних двигунів, яка відрізняється від існуючих застосуванням моделі стану асинхронного двигуна на основі Буземанової метрики та методу моніторингу на основі зовнішніх ознак режиму роботи двигунів, що дозволяє за рахунок попередньої діагностики підвищити ефективність їх експлуатації на основі актуальної інформації про поточний стан і рекомендацій щодо доцільності подальшої експлуатації

Основні результати даного розділу опубліковані в роботах [2]-[4], [12]-[13], [15], [19].

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОГО МОНІТОРИНГУ СТАНУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

5.1. Експериментальні дослідження інформаційної технології

Експериментальні дослідження інформаційної технології проведені в умовах виробництва, на гірничо-збагачувальному комбінаті ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат», м. Горішні Плавні. В якості асинхронного двигуна, що підлягає обстеженню в експерименті, був прийнятий асинхронний двигун АКЗ-12-39-6УХЛ4 (табл. 5.1), приводу стрічкового конвеєра №82, ділянки СМС-2 дробильно-збагачувальної фабрики (ДЗФ). Конвеєр № 82 має довжину 182 м і продуктивність 3000 т/год. Він виконує транспортування руди з дробарок «Бармак» и барабанних магнітних сепараторів.

Таблиця 5.1 – Паспортні дані асинхронного двигуна АКЗ-12-39-6УХЛ4

Номінальна потужність, кВт	320
Номінальна напруга, кВ	6
Частота обертання, об/хв	985
Номінальний струм статора, А	38,5
Номінальна напруга ротора, В	560
Номінальний струм ротора, А	355
Номінальний ККД	92,5
Номінальний коефіцієнт потужності	0,86
Перевантажувальна здатність	2,3

Зовнішній вигляд АД показаний на рис. 5.1.



а)



б)

Рисунок 5.1 – Вид АД: а) – по осі обертання валу, б) – вид збоку

Даний двигун був обраний як об'єкт моніторингу з тієї причини, що обслуговуючий персонал виявив такі відхилення у ознаках нормальної роботи:

- Акустичні коливання, у яких відчувається періодична зміна тональності з низькочастотною гармонійною складовою частотою, приблизно 0,5 – 1 Гц.
- Частота обертання ротора двигуна при номінальному навантаженні знижена і відчуються її коливання. Це спостерігається по незначному нерівномірному рухові стрічки конвеєра.

- Струм статора, за коливаннями стрілки амперметра, має пульсуючий характер, при цьому амплітуда коливань становить 5-10% від значення номінального струму.

Для встановлення причини такої роботи АД були проведені вимірювання струму фази статора і шуму, який створювався працюючим двигуном. Для реєстрації шуму використаний електронний шумомір, реєстрація струму здійснена шляхом запису сигналу з трансформатора струму високовольтної комірки підключення АД за допомогою цифрової системи реєстрації та візуалізації електричних сигналів "Візор-3". Графічне відображення записаних даних здійснювалось за допомогою програмного середовища Mathcad (рис. 5.3-5.4).



Рисунок 5.2 - Прилад реєстрації та візуалізації електричних сигналів "Візор-3"

На рис. 5.3 показані записи у часі зміни струму двигуна.

Вимірний сигнал струму, як видно з рис. 5.3, дуже засмічений імпульсними завадами. Проведемо фільтрацію сигналу із застосуванням медіанних фільтрів [143–145]. Відфільтровані сигнали показані на рис. 5.4.

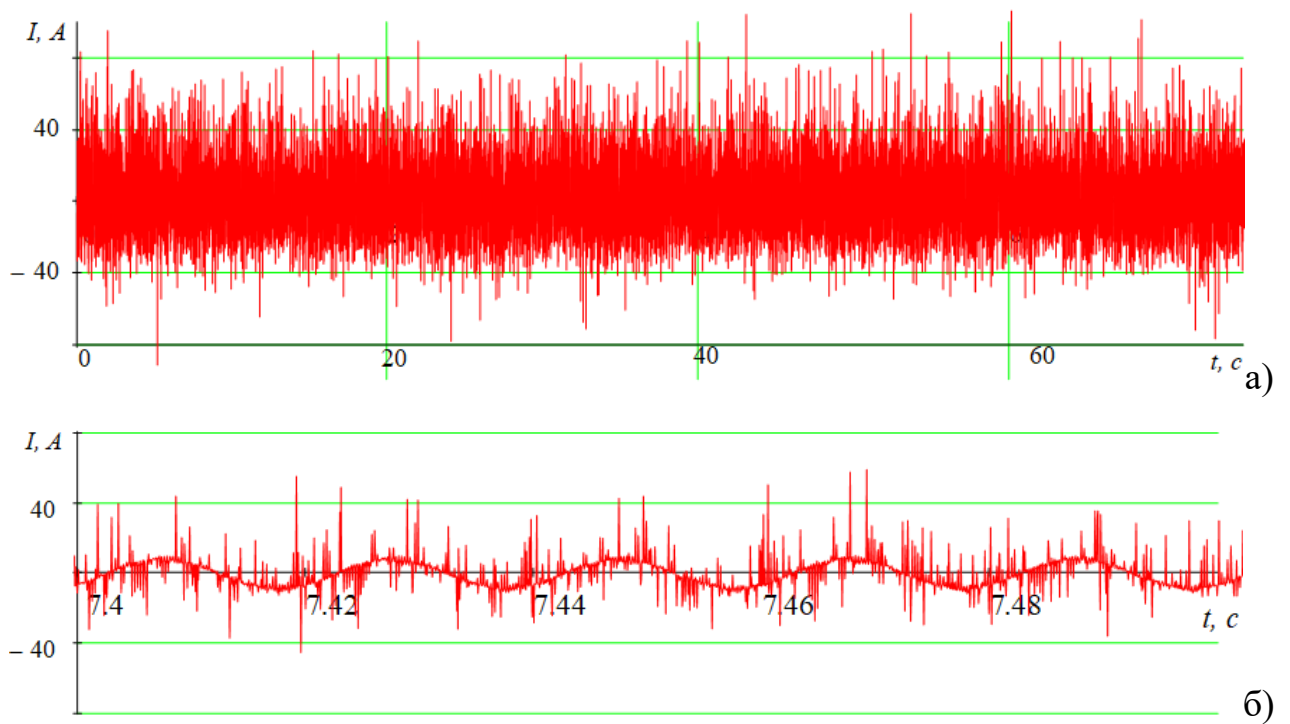


Рисунок 5.3 – Часові процеси зміни струму фази статора АД:

а) – струм фази статора АД, б) – фрагмент

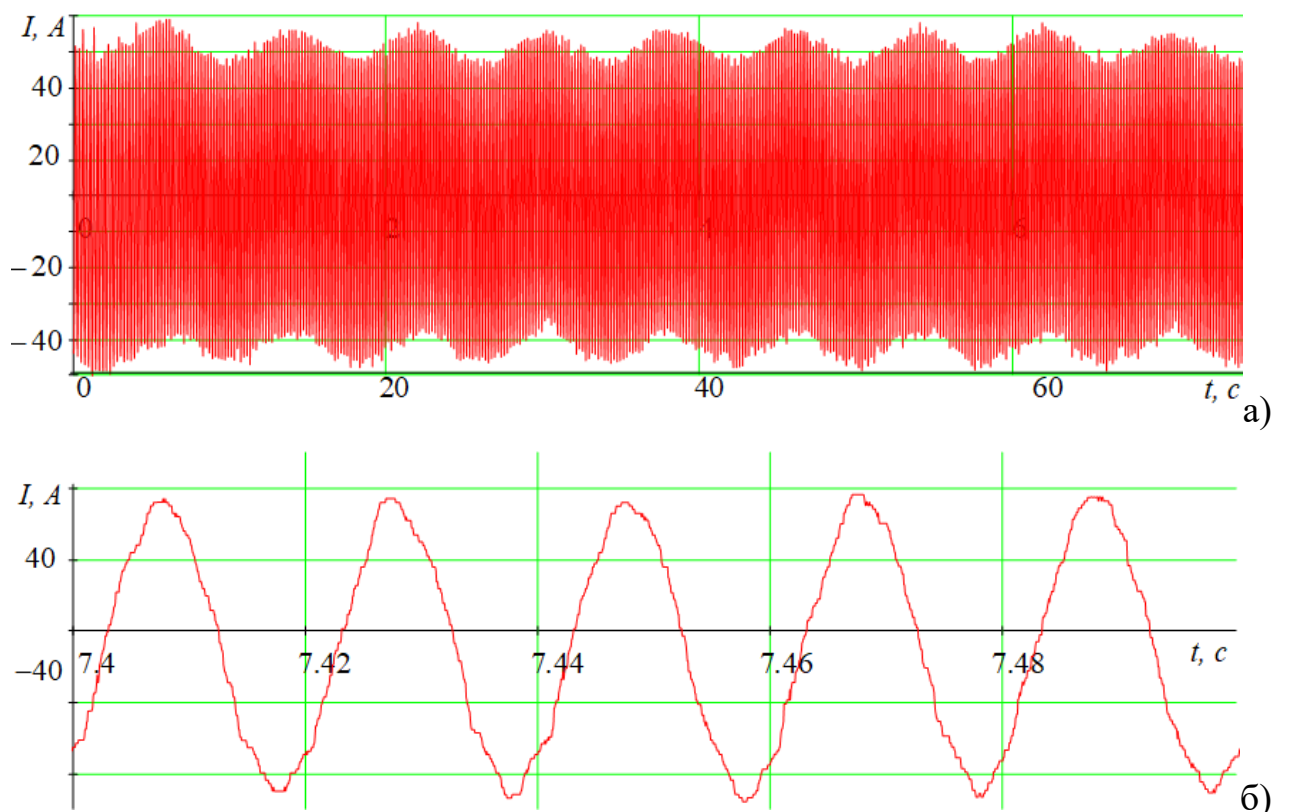


Рисунок 5.4 – Часові процеси зміни струму фази статора АД після фільтрації:

а) – струм фази статора АД, б) – фрагмент

Як видно з рис. 5.3, а), струм статора містить періодичну складову, яка є діагностичною ознакою для визначення стану двигуна.

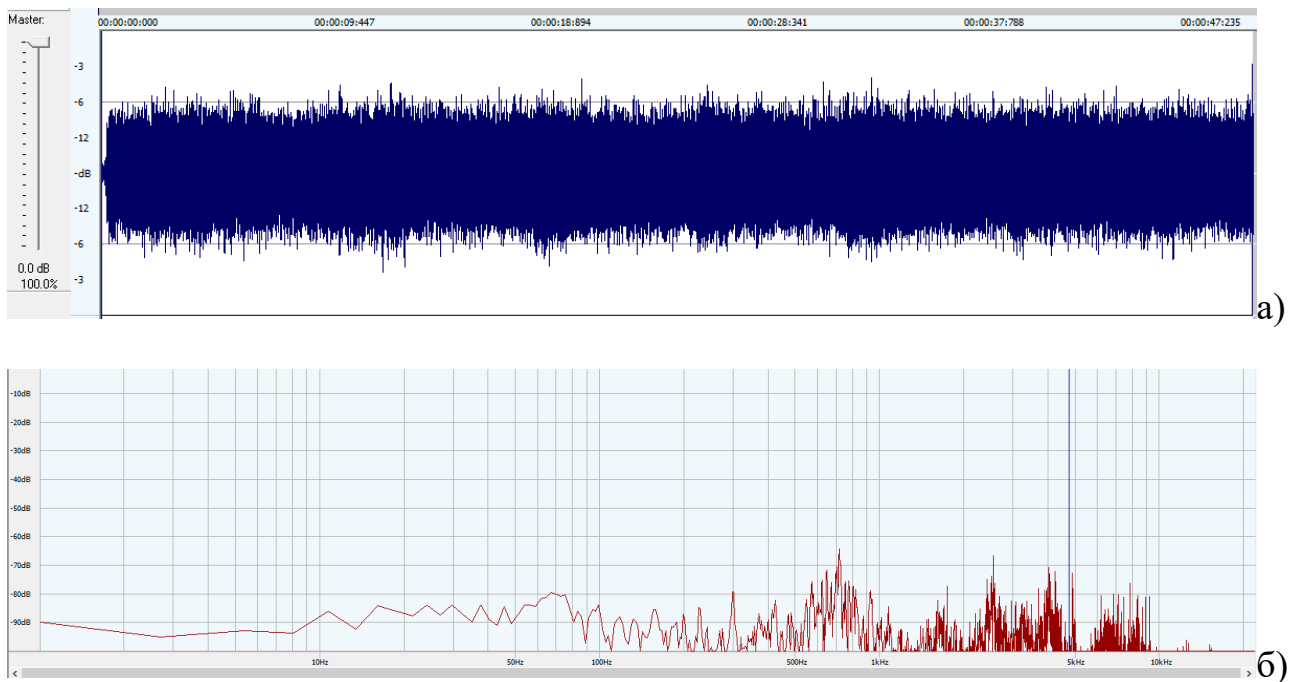


Рисунок 5.5 – Часові процеси та спектр акустичного сигналу при роботі АД:

а) – звук, б) – спектр

Візуально дуже складно зробити висновок про наявність періодичної складової в акустичному сигналі. На слух періодична складова відчувається, а на отриманому записі візуально її спостерігати складно. Тому здійснимо фільтрацію акустичного сигналу.

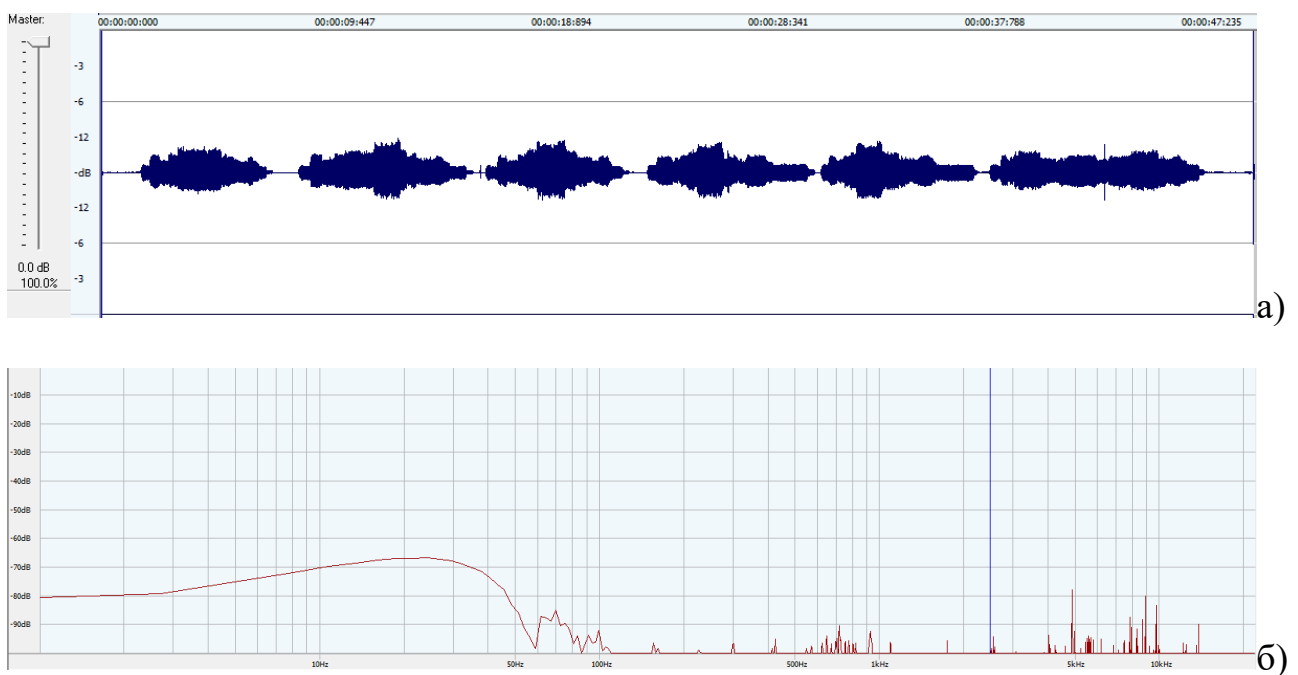


Рисунок 5.6 – Часові процеси та спектр відфільтрованого акустичного сигналу при роботі АД: а) – звук, б) – спектр

Підводячи підсумок зазначимо, що отримані дані містять діагностичні ознаки: коливання струму, акустичний сигнал містить періодичну низькочастотну складову частотою близько 0,16 Гц. Частотні складові струму струму і акустичного сигналу майже співпадають. Невелика різниця обумовлена зсувом після фільтрування, адже алгоритми фільтрації різні. Вікно програми з відображенням акустичного сигналу і розрахунковою інформацією показано на рис. 5.7.

Для діагностування можливої несправності використаємо розроблену інформаційну технологію і систему моніторингу (розділ 4). В систему вкладено базу ознак, причин і рекомендації щодо подібного режиму роботи (табл. 5.2).

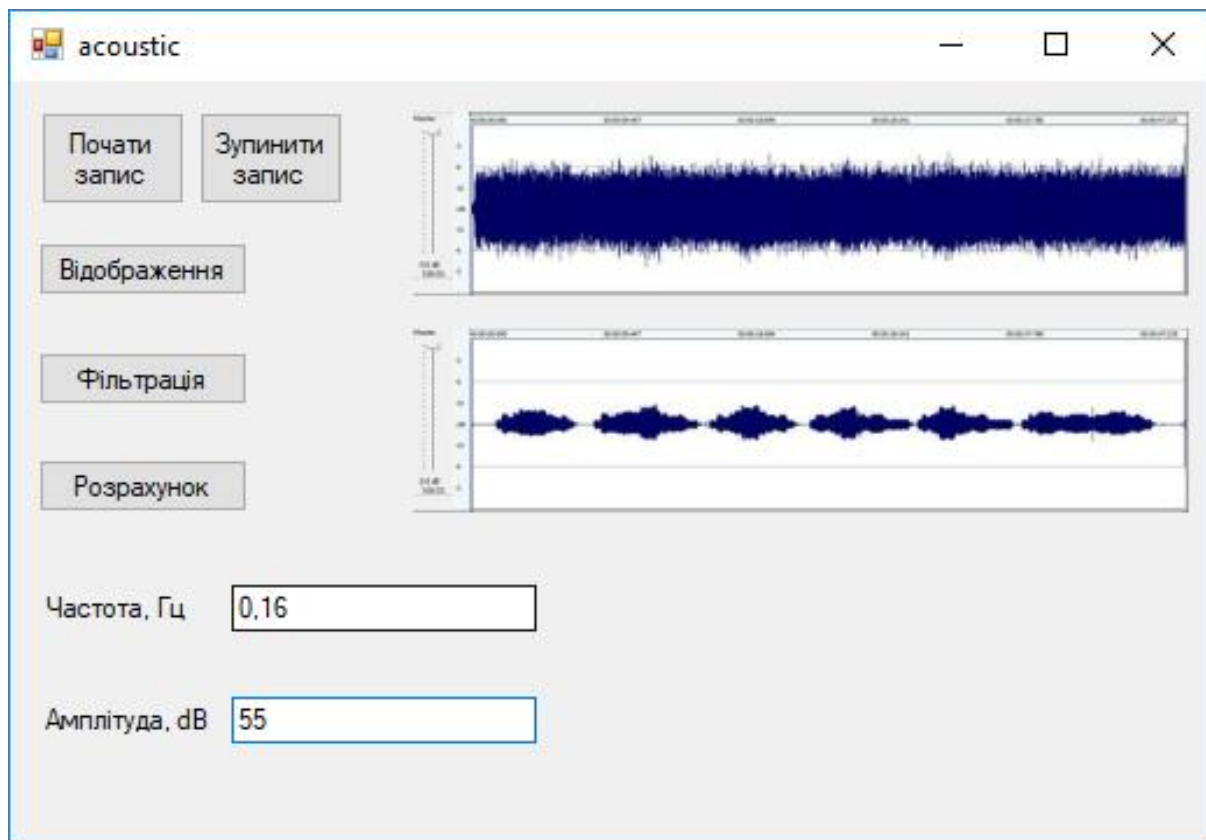


Рисунок 5.7 – Вікно програми з відображенням акустичного сигналу і розрахунковою інформацією

Таблиця 5.2 – Ознаки, причини і рекомендації діагностованого режиму роботи.

Ознака	Причина	Рекомендація
Швидкість обертання ротора знижена і має коливальний характер; струм статора має пульсуючий характер	Поганий контакт в колі ротора:	
	1. поганий контакт в пайках лобових частин обмотки, перехідних опорах між стрижнями або з'єднанням між паралельними групами;	перевірити всі пайки обмотки ротора;
	2. поганий контакт в з'єднаннях обмотки з контактними кільцями;	перевірити контакти токопроводів в місцях з'єднання їх з обмоткою і контактними кільцями;
	3. поганий контакт в щітковому апараті або послабшали контакти механізму для короткого замикання ротора і підйому щіток;	прошліфувати щітки, очистити контактні кільця, відрегулювати притискання щіток, перевірити контакти траверси щіткотримача і відрегулювати рівномірний притиск;
	4. поганий контакт в з'єднаннях між контактними кільцями і пусковим реостатом;	перевірити справність контактів в місцях під'єднання з'єднувальних дротів до виводів статора і пускового реостата;
	5. поганий контакт в пусковому реостаті;	недостатнє прилягання щіток, перевірити і почистити контакти і щітки пускового реостату;

Продовження табл. 5.2.

	6. поганий контакт між стрижнями короткозамкнутого ротора і короткозамикаючими кільцями із-за відриву стрижнів від короткозамикаючих кілець або розриву стрижнів.	знайти місце обриву, перепаяти або замінити стрижень, що лопнув
--	---	---

Виділені ознаки введені до розробленої програми «Експертна система діагностики несправностей електричних двигунів» і отримані причини і рекомендації щодо їх усунення.

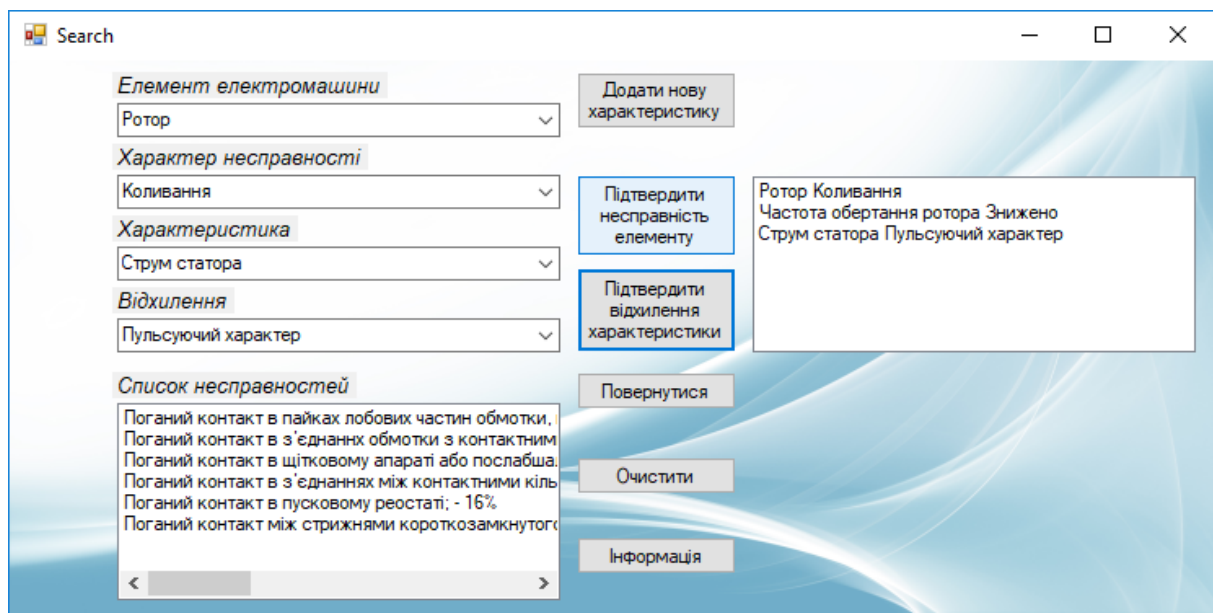


Рисунок 5.8 – Робота комп'ютерної діагностичної система з розпізнавання несправностей

Для прогнозування ресурсу і терміну роботи двигуна виміряний розподіл індукції магнітного поля на статорі, згідно схеми (рис. 3,1).

Дані вимірювання показані в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Індукція магнітного поля на статорі АД

	Індукція, мкТ															
Точка, i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Значення	380	190	73	21	81	215	368	118	233	159	24	16	27	138	261	108

Отриманий розподіл індукції відображається діаграмою – рис.5.8.

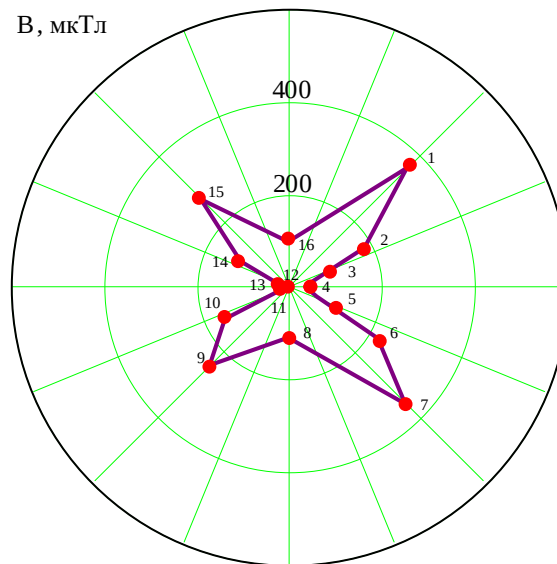


Рисунок 5.9 – Розподіл індукції магнітного поля на статорі АД

Вікно програми з відображенням розподілу індукції магнітного поля і розрахунковою інформацією показано на рис. 5.10.

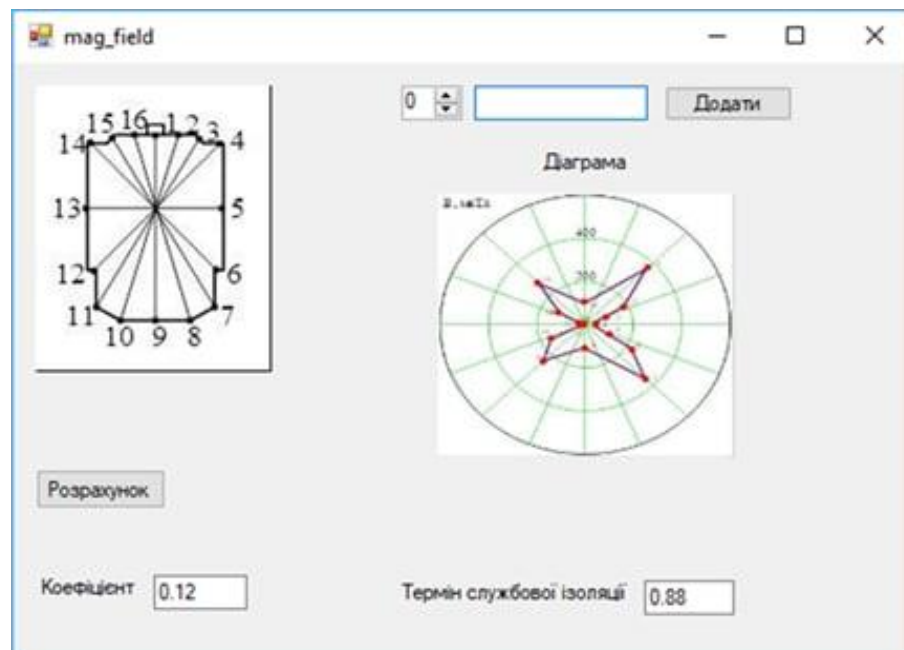


Рисунок 5.10 – Вікно програми з відображенням розподілу індукції магнітного поля і розрахунковою інформацією

За отриманими даними розрахуємо значення коефіцієнту Буземанової метрики за виразом (3.3):

$$k_b = 0,12$$

Тоді відносна тривалість життя ізоляції асинхронного двигуна:

$$z = 1 - k_b = 1 - 0,12 = 0,88.$$

5.2 Техніко-економічне оцінювання результатів впровадження інформаційної технології

Економічна ефективність від впровадження системи моніторингу і оцінки експлуатаційного ресурсу роботи електричних машин на підприємствах металургійної, гірничо-видобувної, нафтопереробної промисловості та транспорту на 500 асинхронних двигунів середньої потужності – 160...250 кВт.

Економічний ефект:

$$\mathcal{E}_9 = (3_{p1} + 3_{n1} + A_{yc}) - (3_p + 3_n + A_{90}).$$

Витрати на ремонт за існуючою системою планово-попереджувальних ремонтів (ППР):

$$3_p = \frac{P_n \cdot (C_{kp} \cdot N_{kp} + C_{cp} \cdot N_{cp} + C_{np} \cdot N_{np}) \cdot n}{t},$$

$$3_p = \frac{250 \cdot (42 \cdot 3.5 + 12 \cdot 10 + 3 \cdot 60) \cdot 500}{10} = 5587500.00 \text{ грн.},$$

де $P_n = 250 \text{ кВт}$ – номінальна потужність двигунів;

$N_{kp} = 3.5$ – кількість капітальних ремонтів за існуючою системою ППР за 10 років;

$N_{cp} = 10$ – середніх ремонтів за існуючою системою ППР;

$N_{np} = 60$ – кількість профілактичних технічних оглядів;

$C_{kp} = 42 \text{ грн / кВт}$ – питома вартість капітального ремонту;

$C_{cp} = 12 \text{ грн / кВт}$ – питома вартість середнього ремонту;

$C_{np} = 3 \text{ грн} / \text{кВт}$ – питома вартість профілактичних технічних оглядів;

$n = 500$ – кількість двигунів;

$t = 10 \text{ років}$ – інтервал розрахунку.

Витрати на ремонт з використанням системи моніторингу:

$$Z_{p1} = \frac{P_n \cdot (C_{kp} \cdot N_{kp1} + C_{cp} \cdot N_{cp1} + C_{np} \cdot N_{np1}) \cdot n}{t},$$

$$Z_{p1} = \frac{250 \cdot (42 \cdot 2 + 12 \cdot 12 + 3 \cdot 60) \cdot 500}{10} = 5100000,00 \text{ грн.},$$

де $N_{kp1} = 2$ – кількість капітальних ремонтів з використанням системи моніторингу;

$N_{cp1} = 12$ – кількість середніх ремонтів з використанням системи моніторингу;

$N_{np1} = 60$ – кількість профілактичних технічних оглядів.

Витрати на простій технологічного обладнання за існуючою системою ППР електродвигунів:

$$Z_n = C_n \cdot N_n,$$

$$Z_n = 5000 \cdot 30 = 150000,00,$$

де $C_n = 5000 \text{ грн} / \text{годину}$ – витрати на простій;

$N_n = 30 \text{ годин} / \text{рік}$ – питомий термін тривалості простоїв.

Витрати на простій технологічного обладнання з використанням системи моніторингу:

$$Z_{n1} = C_n \cdot N_{n1},$$

$$Z_{n1} = 5000 \cdot 27 = 135000,00,$$

де $N_{n1} = 27 \text{ годин} / \text{рік}$ – питомий термін тривалості простоїв.

Витрати на амортизацію електродвигунів:

$$A_{\text{зо}} = n \cdot a \cdot k,$$

$$A_{\text{зо}} = 500 \cdot 7200 \cdot 0.2 = 720000,00 \text{ грн/рік},$$

де $k = 20\%$ – процент заміни електродвигунів на нові за розрахунковий період в

зв'язку з недоцільністю їх подальшої експлуатації. З статистичними даними електричний двигун повністю втрачає експлуатаційні властивості після 4-6 ремонтів;

$a = 7200 \text{ грн} / \text{рік}$ – питома амортизація електродвигуна.

Витрати на амортизацію впровадженої системи моніторингу:

$$A_y = 60000 \text{ грн} / \text{рік}$$

при орієнтовній вартості системи моніторингу 250000 грн.

Річний економічний ефект:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_y &= (5587500.00 + 150000.00 + 720000.00) - \\ &- (5100000.00 + 135000.00 + 60000.00) = 1162500,00 \text{ грн}. \end{aligned}$$

5.3 Висновки по розділу 5

1. Для асинхронного двигуна АКЗ-12-39-6УХЛ4, приводу стрічкового конвейера ДЗФ гірничо-збагачувального комбінату ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат», м. Горішні Плавні на основі проявів зовнішніх ознак роботи встановлена наявність внутрішнього пошкодження, внаслідок якої за величиною струму статора не викликає спрацьовування систем захисту.
2. На основі розробленого програмного забезпечення системи моніторингу і прийнятих ознак роботи АД: візуальне незначне зниження швидкості руху конвеєрної стрічки (швидкості обертання двигуна), коливальний характер струму статора та наявність періодичної складової в акустичному сигналі, що супроводжує обертання ротора АД, визначено наявне пошкодження ротора. Причина пошкодження полягає в поганому контакті в з'єднаннях лобових частин обмотки, перехідних опорах між стрижнями, з'єднанням між паралельними групами, щітковому апараті або пусковому реостаті.
3. На підставі розрахунку економічної ефективності показано, що застосування інформаційної технології системи моніторингу і оцінки експлуатаційного

ресурсу роботи електричних машин на підприємствах металургійної, гірничо-видобувної, нафтопереробної промисловості та транспорту на 500 асинхронних двигунів середньої потужності – 160...250 кВт дозволяє отримати річний економічний ефект 1160 тис. грн з терміном окупності три роки. Економічний ефект обумовлений зменшенням витрат на ремонт під час експлуатації асинхронних двигунів за рахунок попередження про виникнення несправності.

Основні результати даного розділу опубліковані в роботі [1].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання розробки інформаційної технології комплексного моніторингу стану асинхронних двигунів безпосередньо під час виконання технологічного процесу на основі зовнішніх ознак їх роботи, що дозволяє провести попередню діагностику асинхронного двигуна та визначити його поточний стан, а також отримати рекомендації про можливість і доцільність подальшої експлуатації.

Основні наукові та практичні результати, отримані в роботі, можна сформулювати таким чином:

1. На основі проведеного аналізу систем діагностики електричних машин та з метою реалізації принципу «оцінки за станом», для попередньої діагностики стану АД прийнято концепцію моніторингу зовнішніх ознак режиму роботи електричних машин. Розроблена інформаційна технологія комплексного моніторингу асинхронних двигунів на основі зовнішніх діагностичних показників дозволяє проводити попередню діагностику двигуна з наданням рекомендацій щодо можливості і доцільності його подальшої експлуатації.

2. Математичне моделювання несиметричних за параметрами асинхронних двигунів, при використанні програми FEMM, показало нерівномірний розподіл індукції магнітного поля, що свідчить про наявність внутрішніх дефектів обмоток. Отримані в результаті проведення експериментальних досліджень картини індукції магнітного поля навколо асинхронних двигунів якісно співпадають з результатами математичного моделювання і мають різко виражену нерівномірність, що несе важливу інформацію про технічний стан двигуна. Наявність пошкоджень спотворює загальну картину розподілу індукції магнітного поля на поверхні статора АД – в зоні пошкоджень зменшуються її значення. Якісний характер спотворення зберігається при зміні частоти напруги живлення двигуна та напрямку його обертання.

3. На основі отриманих результатів розроблені основні принципи аналізу зовнішнього магнітного поля двигунів, які дозволяють інтерпретувати отримані результати діагностики й зробити висновок про наявність у двигуні дефектів.

Дані принципи стали основою методу моніторингу асинхронних двигунів на основі аналізу параметрів їх зовнішнього магнітного поля.

4. На основі Буземанової метрики розроблені критерії оцінювання ступеня несиметрії двигуна, перегріву обмоток статора та зниження тривалості життя їх ізоляції. Встановлена лінійна залежність між терміном життя ізоляції обмоток та відносним значенням Буземанової дистанції. Отримані результати дозволяють оцінити термін експлуатації асинхронного двигуна.

5. Представлений аналіз вимірної індукції магнітного поля на поверхні статора АД, за даними моніторингу, відображає можливість виділення сигналу і реєстрації зміни параметрів двигуна для прогнозування його стану, терміну та доцільності подальшої експлуатації. Використані для аналізу функції Changepoint та CUSUM з різним ступенем точності та швидкодії дозволяють визначити точку зміни параметрів.

6. На процес аналізу сигналу практично не впливає шум, викликаний наявністю працюючого електричного обладнання та його включенням-виключенням. Проведення фільтрації сигналу ковзним середнім з різними вагами дозволяє удвічі підвищити точність отримання результату. Слід зазначити, що поєднання методів визначення точки зміни сигналу дозволяє суттєво підвищити точність розрахунку значень початкового та кінцевого рівня сигналу. Для цього точка зміни сигналу локалізується на основі методу кумулятивних сум функцією CUSUM, а потім уточнюється при застосуванні функції Changepoint.

7. Запропоновано систему комплексного моніторингу АД, яка може бути віднесена до класу експертних систем функціональної діагностики, а поповнення інформації базується на індивідуальному досвіді персоналу, який експлуатує дану систему.

8. Розроблено методику добору діагностичних параметрів, що ґрунтується на критерії максимальної індивідуальності, зокрема параметр максимальної індивідуальності приймається в якості базового. Добір інших діагностичних параметрів, що дозволяють вирішити задачу розпізнавання, здійснюється

методом послідовних доповнень. При цьому спочатку вибирається такий параметр, комбінаційна інформативність якого у сполученні з базовим, виявляється максимальною. Потім до отриманої бази додається третій параметр і т.ін. до повного розпізнавання.

9. На підставі розрахунку економічної ефективності показано, що застосування інформаційної технології системи моніторингу і оцінки експлуатаційного ресурсу роботи електричних машин на підприємствах металургійної, гірничо-видобувної, нафтопереробної промисловості та транспорті на 500 асинхронних двигунів середньої потужності – 160...250 кВт дозволяє отримати річний економічний ефект 1160 тис. грн з терміном окупності три роки. Економічний ефект обумовлений зменшенням витрат на ремонт під час експлуатації асинхронних двигунів за рахунок попередження про виникнення несправності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] А. В. Барков, Н. А. Баркова, *Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации*, СПб.: Ассоциация ВАСТ, Вып. 9, 1999.
- [2] *Микропроцессорный регистратор ст параметров работы силовых агрегатов. Руководство по эксплуатации*, СПб.: ООО "МикроКОР". 1999.
- [3] И. А. Биргер, «Определение диагностической ценности признаков», *Кибернетика*, №3, с. 80-85, 1968.
- [4] Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, Д. Ю. Пашали, О. А. Бойкова, «Обзор современных методов и средств оперативной диагностики электромеханических преобразователей энергии», *Вестник уфимского государственного авиационного технического университета*, т. 14, №4(39), с. 73-79, 2010.
- [5] В. И. Григорьев, *Приборы и средства диагностики электрооборудования и измерений в системах электроснабжения: Справ. пособие*. М.: Колос, 2006.
- [6] В. С. Петухов, «Диагностика состояния электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка напряжения и тока», *Новости электротехники*, № 49, с. 50-52, 2008.
- [7] В. С. Петухов, «Способ диагностики электродвигателя переменного тока и связанных с ним механических устройств»: *патент RU*, № 2339049 G 01R31/34, 2008.
- [8] 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.
- [9] F. Thollon [et al], «Asynchronous motor cage fault detection through electromagnetic torque measurement», *Proc ETEP*, vol. 3, № 5, pp. 556-560, 1993.
- [10] Е. М. Федосов, Д. Ю. Пашали, «Оценка состояния литой эпоксидной изоляции силовых трансформаторов по характеристикам частичных

- разрядов», *Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: Сб. науч. тр. II Всерос. НТК.*, т. 2, с. 65-67, 2009.
- [11] А. С. Лопатин, «Обоснование диагностических признаков дисбаланса роторов», *Вибродиагностика для начинающих и специалистов*. [Электронный ресурс]. Доступ: http://www.vibration.ru/disb_rot.shtml. Дата звернения: 20.12.2009.
- [12] А. А. Стеценко [и др.], «Метод оценки технического состояния машин»: *патент Украины № 13540 G01 №7/00*, 2004.
- [13] В. В. Бузаев, Ю. М. Сапожников, «Роль и возможность хроматографии при оценке состояния высоковольтного электрооборудования», *Электрические станции*. № 9, с. 57-60, 2004.
- [14] И. Х. Хайруллин, Д. Ю. Пашали, «Диагностика электромеханических преобразователей по внешнему магнитному полю», *Вестник УГАТУ*, т. 7, № 1(14), с. 165-170, 2006.
- [15] Д. Ю. Пашали [и др.], «Датчик перемещений (варианты)»: *патент RU*, № 2189562, МКИ G 01 B 7/14, бюл. № 26, 2002.
- [16] Д. Ю. Пашали [и др.], «Измеритель линейных перемещений»: *патент RU*, № 2178139, МКИ G 01 B 7/14, бюл. № 1, 2002.
- [17] О. А. Андреева [и др.], «Моделирование магнитных полей методом зеркальных отражений с коррекцией токов для синтеза защит электрических машин», *Электричество*, № 11, с. 43-48, 2008.
- [18] «Научно-производственный комплекс КРОНА». [Электронный ресурс]. Доступ: <http://npk-krona.ru>. Дата звернения: 20.12.2009.
- [19] И. Д. Труфанов, А. П. Лютый, «Современные информационно-диагностические комплексы и их применение в электроэнергетике», *Электрик*, № 10, с. 45-49, 2008.
- [20] В. А. Пономарев, И. Ф. Суворов, «Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей», *Новости электротехники*, № 5(59), 2009.

- [21] «ООО «Импульс механика»» [Электронный ресурс]. Доступ: <http://www.progrest.ru/page32/1/2/>. Дата звернения: 20.12.2009.
- [22] «Вибро-Центр». [Электронный ресурс]. Доступ: <http://vibrocenter.ru/tdm.htm>. Дата звернения: 20.12.2009.
- [23] «Вибро-Центр». [Электронный ресурс]. Доступ: <http://vibrocenter.ru/mdr.htm>. Дата звернения: 20.12.2009.
- [24] «Вибро-Центр». [Электронный ресурс]. Доступ: <http://vibrocenter.ru/remm.htm>. Дата звернения: 20.12.2009.
- [25] «Вибро-Центр». [Электронный ресурс]. Доступ: <http://vibrocenter.ru/amtest2.htm>. Дата звернения: 20.12.2009.
- [26] «Диагностическая система оценки качества». [Электронный ресурс]. Доступ: http://www.omgups.ru/science/ctl_2/02.html, Дата звернения: 20.12.2009.
- [27] «Отраслевой центр внедрения новой техники и технологий». [Электронный ресурс]. Доступ: <http://www.ocv.ru/project/systrans/index.php>. Дата звернения: 20.12.2009.
- [28] С. О. Хомутов, В. Г Тонких, «Применение информационно-логического анализа при изучении влияния дефектов асинхронного двигателя на спектр его внешнего магнитного поля», *Социальные, информационные и энергетические проблемы региона: Бюллетень оперативной научной информации. Приложение к журналу «Вестник Томского государственного университета»*, с. 32-38, 2006.
- [29] Д. Ю. Пашали [и др.], «Устройство для диагностики подшипников электрической машины»: *патент RU*, № 68802, бюл. № 33, 2007.
- [30] Н. Л. Кузнецов, *Надежность электрических машин: Учеб. пособие для вузов*, М.: Изд. дом МЭИ, 2006.
- [31] Р. Г. Гемке, *Неисправности электрических машин. 8-е изд., испр. и доп.*, Л.: Энергия, 1975
- [32] «Неисправности электрооборудования, методы их поиска и устранения». [Электронный ресурс]. Доступ:

http://alyos.ru/enciklopediya/tektrooborudovanie_i_tlektrosnabzhenie_beregovi_h_ustanovok_rechnogo_transporta/neispravnosti_tlektrooborudovaniya_metodi_ih_poiska_i_ustraneniya.html. Дата звернення: 10.11.2016.

- [33] А. О. Семенцова, Л. О. Копистинський, «Методи і прилади контролю енергетичних параметрів ефективності буріння свердловин електробурами», *Науковий вісник ІФНТУНГ*, № 2(35), с. 181-188, ISSN 1993-9965, 2013.
- [34] Т. М. Алиев, А. А. Тер-Хачатуров, *Автоматический контроль и диагностика скважинных штанговых насосных установок*, М.: Недра, 1988.
- [35] В. А. Ровінський, О. В. Євчук, Ю. Й. Стрілецький, «Розширення можливостей діагностування нафтовидобувного обладнання за швидкісними характеристиками приводного електродвигуна», *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, т. 1, №. 54, с. 65–71, 2015.
- [36] Sahil Sahni, Avid Boustani, Timothy Gutowski, Steven Graves, «Electric motor remanufacturing and energy savings», *Proc. MITEI-1*, pp. 1–31, 2010,
- [37] Н. В. Крупенин, А. В. Голубев, В. И. Завидей, «Новые возможности в диагностике электрических машин», *Электричество*, № 9, с. 45–47, 2011.
- [38] Д. В. Сурков, «Электромагнитные способы определения эксцентриситета и несимметрии короткозамкнутой клетки ротора асинхронных двигателей». *Дисс. канд. техн. наук: спец. 05.09.01*. Оренбург, 2008.
- [39] Fiorrenzo Filippetti, Alberto Bellini, Gerard-Andre Capolino, «Condition Monitoring and Diagnosis of Rotor Faults in Induction Machines: State of Art and Future Perspectives», *Proc. in conference WEMDCD, IEEE*, pp. 196–209, 2013.
- [40] 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, №. 3, 2009.

- [41] С. Л. Кужеков, П. Г. Колпахчян, Б. Б. Сербинковский, В. А. Рогачёв? «Токи статора асинхронного электродвигателя с эксцентриситетом ротора», *Известия вузов. Электромеханика*, № 4, с. 25–27. 2008.
- [42] В. И. Полищук, А. Н. Новожилов, Н. А. Исупова, «Обзор способов диагностики эксцентриситета ротора машин переменного тока», *Известия вузов. Электромеханика*, № 6, с. 29–33. 2011
- [43] В. С. Петухов, В. А. Соколов, «Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока», *Новости электротехники*, № 1(31), с. 50–52, 2005
- [44] А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. А. Борисов, В. В. Федорищев, Д. В. Грищенко, *Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току*: СПб: НОУ «Северо-Западный учебный центр» ООО «Вибротехника», 2012.
- [45] Doosoo Hyun, Jongman Hong, Ernesto J. Wiedenburger, «Automated Monitoring of Air-gap eccentricity for Inverter-fed Induction motors under standstill conditions», *Proc. IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, pp. 1257–1266, 2010
- [46] Bashir Mahdi Ebrahimi, Mehrsan 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.
- [47] О. О. Закладний, «Оцінка залишкового ресурсу асинхронного електроприводу», *Вісник НТУУ «КПІ», серія Гірництво*, вип. 19, с. 140–148, 2010.
- [48] Janitza Electronics GmbH, *Reactive Power Controller Propfi, Operating Instructions.. Dok Nr 1.020.009.a Serie II*. Germany, 2003..
- [49] В. К. Паули, Р. А. Воротников, «Компенсация реактивной мощности как эффективное средство рационального использования электроэнергии», *Энергоэксперт*, № 2, с. 16–22, 2007.

- [50] А. М. Липский, В. Е. Кривоносов, В. И. Мякотин, «Способ контроля изоляции обмоток низковольтных электродвигателей»: *авторське свідоцтво ССРСР*, № 1371233, МПК G01R31\34, 1985.
- [51] В. Є. Кривоносов, «Спосіб контролю зміни опору ізоляції електродвигуна й живильного кабелю»: *патент Україна*, № 98353, МПК H02K15/12 G 01 R 31/34, 2012.
- [52] В. Є. Кривоносов, М.Д. Д'яченко, «Пристрій контролю і захисту електроустаткування»: *патент Україна*, № 98721 МПК H02K15/12 (2006.01), G01R31\34(2006.01), 2012.
- [53] «Диагностика технического состояния электромеханических систем». [Електронний ресурс]. Доступ: http://elprivod.nmu.org.ua/ru/science/condition_diagnostics_ru.pdf. Дата звернення: 12.11.2016.
- [54] А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев, *Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: Учеб. пособие*, СПб.: СПбГМТУ, 2000.
- [55] В. В. Петрухин, С. В. Петрухин, *Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации*, М.:Инфра-Инженерия, 2010.
- [56] А. С. Гольдин, *Вибрация роторных машин*, М.: Машиностроение, 2000.
- [57] В. В. Ключев, П. П. Пархоменко, В. Е. Абрамчук и др., *Технические средства диагностирования: Справочник*, М.: Машиностроение, 1989.
- [58] С. И. Захаров, «Способ диагностирования остаточного ресурса подшипников качения»: *патент RU*, №96121171\28, МПК G01M 13\04, 1998.
- [59] А. М. Ахтямов, *Теория идентификации краевых условий и её приложения*, М.: Физматлит, 2009.
- [60] В. Н. Костюков, А. П. Науменко, *Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования: Учеб. пособие*. Омск: ОмГТУ, 2002.

- [61] А. П. Наumenко. «Методология виброакустической диагностики поршневых машин» *Вестник МГТУ. Специальный выпуск «Двигатели внутреннего сгорания»*, с.85-93, 2007.
- [62] С. И. Захаров, И. С. Захаров, «Новая концепция возбуждения вибрации подшипников качения при наличии повреждений и дефектов», *Вестник машиностроения*, №2, стр.37-38, 2006.
- [63] Ю. Р. Никитин, И. В. Абрамов, *Диагностирование мехатронных систем: учеб. Пособие*, Ижевск: ИЖГТУ, 2011.
- [64] В. В. Мишин, «Метод и средство контроля состояния подшипников электродвигателя на этапе ввода в эксплуатацию», *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, № 5-2, 296-304, 2011.
- [65] С. И. Захаров, «Новый подход к спектральному анализу вибраций с автоматической оценкой состояния вращающихся деталей машин», *Вестник машиностроения*, №4, стр. 93-94, 2009.
- [66] С. И. Захаров, «Формирование акустических сигналов машин для цифровой обработки результатов испытаний и диагностики», *Вестник машиностроения*, №12, стр.88-90, 2009.
- [67] В. А. Русов, *Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам.* – Пермь: Вибро-Центр, 2012.
- [68] F. Immovilli et al. «Diagnosis of bearing faults in induction machines by vibration or current signals: A critical comparison», *IEEE Transactions on Industry Applications*, т. 46, №. 4, с. 1350-1359, 2010.
- [69] R. Yan, R. X. Gao, «Energy-based feature extraction for defect diagnosis in rotary machines», *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, т. 58, №. 9, с. 3130-3139, 2009.
- [70] А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев, *Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования*, М.: Наука, 1996 г.
- [71] Д. Ю. Пашали, «Диагностика электромеханических преобразователей по внешнему магнитному полю». *Дис. канд. техн. наук: спец. 05.09.01.* Уфа, 2004.

- [72] Н. В. Зачепа, О. А. Чорна, Д. В. Рєзнік, К. Д. Ніколаєв, І. А. Луценко, «Дослідження поширення магнітного поля асинхронної машини в умовах навчально-виробничих лабораторій», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*, 3 (39), с. 45-52, 2017.
- [73] 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.
- [74] К. С. Панченко, О. А. Черная, О. А. Сакун, Бердай Абдельмажид, «Экспериментальные измерения магнитного поля электромеханических объектов», *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації* : збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2013, с. 114–115.
- [75] О. А. Чорна, Д. В. Рєзнік, Н. В. Зачепа, О. Ю. Кісліцин, Д. О. Кулік, Д. О. Прошин, «Чисельне моделювання розподілу індукції зовнішнього магнітного поля асинхронного двигуна», *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації* : збірник наукових праць XVI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2018, с. 91-92.
- [76] О. А. Чорна, Д. В. Рєзнік, А. І. Реуцька, Н. В. Зачепа, «Експериментальні дослідження параметрів шуму при вимірюванні індукції магнітного поля», *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації*: збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2019, с. 131-134.
- [77] О. А. Чорна, К. С. Панченко, «Исследование распределения индукции магнитного поля переменного тока промышленной частоты снаружи

- асинхронных двигателей», *свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір*, № 70361, 28.04.2015.
- [78] О. А. Чорна, О. В. Бісікало, О. П. Чорний, «Оцінка ресурсу роботи асинхронного двигуна на основі вимірювань зовнішнього магнітного поля», *свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір*, № 78794, 04.05.2018.
- [79] А. В. Лукьянов, Ю. С. Мухачев, И. О. Бельский, «Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей», *Системы. Методы. Технологии.*, №. 2, с. 61-69, 2014.
- [80] В. Г. Тонких, «Исследование процессов изменения формы внешнего магнитного поля электродвигателя при развитии в нем различных дефектов», *Прос. Измерение, контроль, информатизация: Барнаул*, с. 56, 2006..
- [81] В. Г. Тонких, «Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля»: *автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.20.02*. Барнаул, 2009
- [82] Adam Glowacz, Zygfryd Głowacz, «Diagnostics of induction motor based on analysis of acoustic signals with application of FFT and classifier based on words», *Archives of Metallurgy and Materials*, t. 55, №. 3, pp. 707-712, 2010.
- [83] A. Głowacz, «Sound recognition of induction motor with the use of discrete Meyer wavelet transform and classifier based on words», *Przegląd Elektrotechniczny*, т. 89, №. 6, pp. 152-154, 2013.
- [84] Adam Glowacz, Witold Glowacz, «Diagnostics of synchronous motor based on analysis of acoustic signals with application of LPCC and nearest mean classifier with cosine distance», *Archives of Metallurgy and Materials*, t. 55, № 2, pp.563-569, 2010.
- [85] A. Głowacz, W. Głowacz, «Diagnostyka maszyny prądu stałego oparta na rozpoznawaniu dźwięków z zastosowaniem LPC i logiki rozmytej», *Przegląd Elektrotechniczny*, т. 85, p. 112-115, 2009.

- [86] В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. П. Афонин, «Формирование эффективного множества диагностических параметров для контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей в условиях неидентичности коммутационных циклов», *Известия Транссиба*, №. 4 (12), с. 69-74, 2012.
- [87] А. А. Осадченко, А. Б. Цукублин, О. Л. Рапопорт, «Мониторинг щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя при эксплуатации», *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, т. 308, №. 7, с. 107-109, 2005.
- [88] P. J. Tavner, «Review of condition monitoring of rotating electrical machines», *IET Electric Power Applications*, т. 2, №. 4 с. 215-247, 2008.
- [89] Е. Е. Привалов, *Диагностика асинхронных двигателей электроэнергетического оборудования*, Берлин: Directmedia, 2015.
- [90] X. Ying, «Performance evaluation and thermal fields analysis of induction motor with broken rotor bars located at different relative positions», *IEEE Transactions on Magnetics*, т. 46, №. 5, с. 1243-1250, 2010.
- [91] A. Siddique, G. S. Yadava, B. Singh, «A review of stator fault monitoring techniques of induction motors», *IEEE transactions on energy conversion*, т. 20, №. 1, с. 106-114, 2005.
- [92] С. А. Бажанов, *Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств*, М.: НТФ "Энергопрогресс", 2000.
- [93] Ж. Госсорг, *Инфракрасная термография. Основы, техника, применение*, М.: Мир, 1988.
- [94] «Численные расчеты электромагнитных полей в электрических машинах на основе метода конечных элементов». [Электронный ресурс]. Доступ: <http://elmech.mpei.ac.ru/books/edu/ELCUT/index.html>. Дата звернения: 09.06.2018.
- [95] «Электродинамика для чайников». [Электронный ресурс]. Доступ: <http://ru.solverbook.com/spravochnik/fizika/elektrodinamika-dlya-chajnikov/> Дата звернения: 09.06.2018.

- [96] «Рівняння_Максвелла». [Електронний ресурс]. Доступ: https://uk.wikipedia.org/wiki/Рівняння_Максвелла. Дата звернення: 12.11.2016.
- [97] О. П. Чорний, В. К. Титюк, Н. М. Істоміна, В. А. Власенко, *Математичні методи моделювання. Навчальний посібник*, Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2016.
- [98] B. Szabo, I. Babushka, *Finite Element Analysis*, New York : John Wiley and Sons, 1991.
- [99] Л. М. Скворцов, «Явные адаптивные методы численного решения жестких систем», *Математическое моделирование*, № 2 (12), с. 97–107, 2000.
- [100] Г. Стренг, Д. Фикс, *Теория метода конечных элементов*, М.: Мир, 1977.
- [101] «Finite Element Method Magnetics: Download». [Електронний ресурс]. Доступ: <http://www.femm.info/wiki/download>. Дата звернення: 23.10.2019.
- [102] B. I. Kuznetsov, A. N. Turenko, T. B. Nikitina, A. V. Voloshko, V. V Kolomiets, «Method of synthesis of closed-loop systems of active shielding magnetic field of power transmission lines», *Technical Electrodynamics*, № 4, pp. 8-10, 2016.
- [103] B. I. Kuznetsov, T. B. Nikitina, A. V. Voloshko, I. V. Bovdyj, E. V. Vinichenko, B. B. Kobilyanskiy, «Synthesis of active screening system by magnetic field of high voltage power lines of different design allowing for spatial and temporal distribution of magnetic field», *Electrical Engineering & Electromechanics*, vol. 2, pp. 29-33, 2017.
- [104] B. I. Kuznetsov, T. B. Nikitina, A. V. Voloshko, I. V. Bovdyj, E. V. Vinichenko, B. B. Kobilyanskiy, «Experimental research of magnetic field sensors spatial arrangement influence on efficiency of closed loop of active screening system of magnetic field of power line», *Electrical Engineering & Electromechanics*, vol. 1, pp. 16-20, 2017.
- [105] Yelena Deza, Michel Mari Deza, *Dictionary of Distances*, М.: Nauka, 2008.

- [106] П. Д. Андреев «Геометрия идеальных границ геодезических пространств с неположительной кривизной в смысле Буземана», *Математические труды*, т. 10, №. 1, с. 16-28, 2007.
- [107] M. Zagirnyak, O. Chorny, V. Nykyforov, O. Sakun, K. Panchenko, «Experimental research of electromechanical and biological systems compatibility», *Przegląd Elektrotechniczny*, № 92(1), p. 128-131, 2016.
- [108] M. Zagirnyak, V. Nykyforov, O. Sakun, O. Chorna, «The industrial electrical equipment screened magnetic fields effect on model organisms», *Proc. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 18323434, 2017, с. 380-383, doi: 10.1117/12.2229083.
- [109] «Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний (с Изменениями N 1, 2)»: *ГОСТ 11828-86*.
- [110] О. П. Чорний, Є. В. Бурдільна, О. Ю. Романов, В. К. Титюк, О. А. Позігун, Абдельмажид Бердай, «Особливості чисельного розв'язку систем диференціальних рівнянь моделей електромеханічних систем у програмному середовищі Matlab», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*, вип. 2/2017 (38). с. 33-48, 2017.
- [111] А. П. Черный, Д. И. Родькин, А. П. Калинов, О. С. Воробейчик, «Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем»: *Монография*, 2008.
- [112] «Коефіцієнт детермінації». [Електронний ресурс]. Доступ: https://uk.wikipedia.org/wiki/Коефіцієнт_детермінації. Дата звернення: 12.11.2016.)
- [113] S. N. Rodionov, «A brief overview of the regime shift detection methods», *Large-scale disturbances (regime shifts) and recovery in aquatic ecosystems: challenges for management toward sustainability*, с. 17-24, 2005.
- [114] S. Rodionov, J. E. Overland, «Application of a sequential regime shift detection method to the Bering Sea ecosystem», *ICES Journal of Marine Science*, т. 62, №. 3, с. 328-332, 2005.

- [115] Y. Chapanov, C. Ron, J. Vondrak, «Accuracy and sensitivity of a method of jump detection, evaluated by simulated time series», *Acta Geodynamica et Geromaterialia*, т. 14, №. 1, с. 73-83, 2017.
- [116] B. I. Kuznetsov et al., «Method of synthesis of closed-loop systems of active shielding magnetic field of power transmission lines», *Technical electrodynamics*, №. 4, с. 8-10, 2016.
- [117] B. I. Kuznetsov et al., «Synthesis of an active shielding system of the magnetic field of power lines based on multiobjective optimization», *Электротехника и электромеханика*, №. 6 (eng), 2016.
- [118] B. I. Kuznetsov et al., «Experimental research of magnetic field sensors spatial arrangement influence on efficiency of closed loop of active screening system of magnetic field of power line», *Электротехника и электромеханика*, №. 1 (eng), 2017.
- [119] Биллингс Ли, «В ожидании бури», *Популярная механика*, №8, 2012. [Электронный ресурс]. Доступ: https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431737 Дата звернения: 15.10.2019.
- [120] M. Zagirnyak et al., «Experimental research of electromechanical and biological systems compatibility», *Przegląd Elektrotechniczny*, т. 92, №. 1, с. 128—131, 2016.
- [121] 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.
- [122] E.Abualsauod, «Integrating Multiobjective Optimization With The Six Sigma Methodology For Online Process Control» [Электронный ресурс]. Доступ: <https://stars.library.ucf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3728&context=etd>. Дата звернения: 19.09.2017..
- [123] M. Lavielle «Using penalized contrasts for the change-point problem», *Signal processing*, т. 85, №. 8, с. 1501-1510, 2005.

- [124] R. Killick, P. Fearnhead, I. A. Eckley, «Optimal detection of changepoints with a linear computational cost», *Journal of the American Statistical Association*, т. 107, №. 500, с. 1590-1598, 2012.
- [125] C. D. Lewis, *Industrial and business forecasting methods: A practical guide to exponential smoothing and curve fitting*, Boston: Butterworth Scientific, 1982.
- [126] «CUSUM». [Электронный ресурс]. Доступ: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/cusum.html>. Дата звернення: 18.06.2017.
- [127] Н. В. Федоров, *Проектирование информационных систем на основе современных CASE-технологий: учеб. пособие*, М.: МГИУ, 2008.
- [128] К. А.Аксенов, Б. И. Клебанов, *Работа с CASE-средствами BPwin, ERwin*, Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004.
- [129] Э. Брауде, *Технология разработки программного обеспечения*, СПб.: Питер, 2004.
- [130] П. Дюбуа, *MySQL: Полное и исчерпывающее руководство по применению и администрированию баз данных MySQL 4, а также программированию приложений*, М.: Издательский дом Вильямс, 2004.
- [131] О. В. Бабич, «Вивчення основ SQL в курсі «Бази даних та інформаційні системи»», *Теорія і методика обучения математике, физике, информатике*, т. 4, №. 3, с. 3-5, 2004.
- [132] Л.Ульман, *MySQL: руководство по изучению языка*, СПб.: Питер, 2004.
- [133] И. А. Биргер, *Определение диагностической ценности признаков*, М.: Кибернетика, №3, с.80-85, 1968
- [134] И. Б. Мандельштам, *Болезни электрических машин* М.-Л.: Государственное издательство, 1929.
- [135] В. Д. Потапов, В. Ф. Кузнецов, И. А. Дроздов, «Методика выбора параметров диагностической модели главных электроприводов экскаваторов», *Горный журнал*, №5, с.46-48, 1980.

- [136] А. М. Синельников, В. В. Боннет, «Анализ методов диагностики неисправностей электрических машин», *Вестник ИрГСХА*, №30, с. 111-114, 2008.
- [137] О. Н. Осипов, Ю. С. Усынин, *Техническая диагностика автоматизированных электро-приводов.* – М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [138] Е. М. Коварский, Ю. И. Янко, *Испытание электрических машин*, М.: Энергоатомиздат, 1990.
- [139] Г. К. Жерве, *Промышленное испытание электрических машин*, Л.: Энергоатомиздат, 1984.
- [140] О. Д. Гольдберг, И. М. Абдуллаев, А. Н. Абиев, *Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей*, М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [141] Д. И. Родькин, *Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях*, М.: Недра, 1992.
- [142] А.П. Черный, Д.И. Родькин, А.П. Калинов, О.С. Воробейчик, *Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: Монография.* Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2008.
- [143] У.Прэтт, *Цифровая обработка изображений: Пер. с англ.*, М.: Мир, Кн. 2, 1982.
- [144] J. W. Tukey, *Exploratory Data Analysis*, Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1977.
- [145] Э.Айфичер, Б.Джервис *Цифровая обработка сигналов. Практический подход.* М., "Вильямс", 2004.

ДОДАТКИ

Додаток А

Алгоритм роботи діагностичної системи

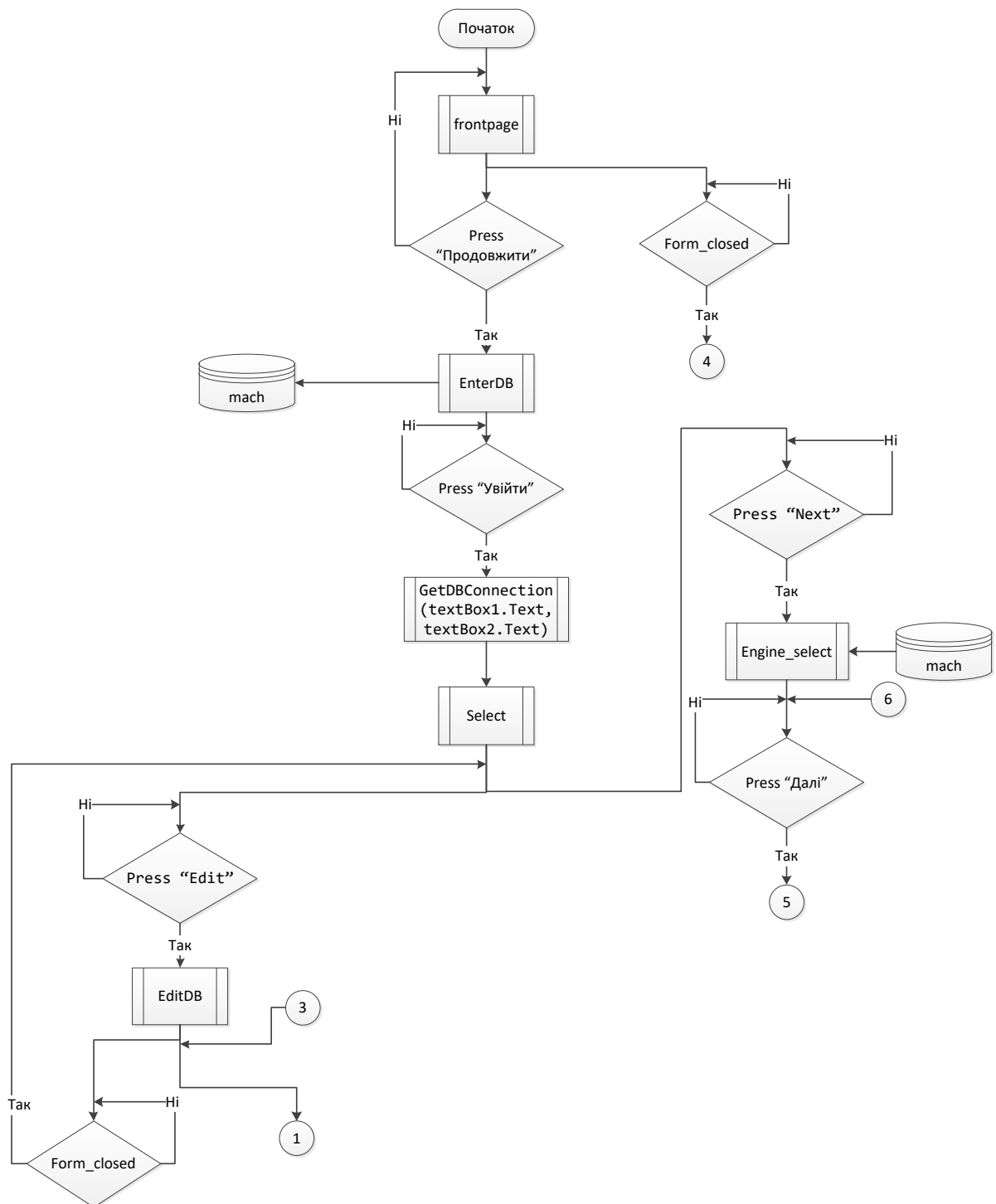


Рисунок А.1 - Алгоритм роботи діагностичної системи

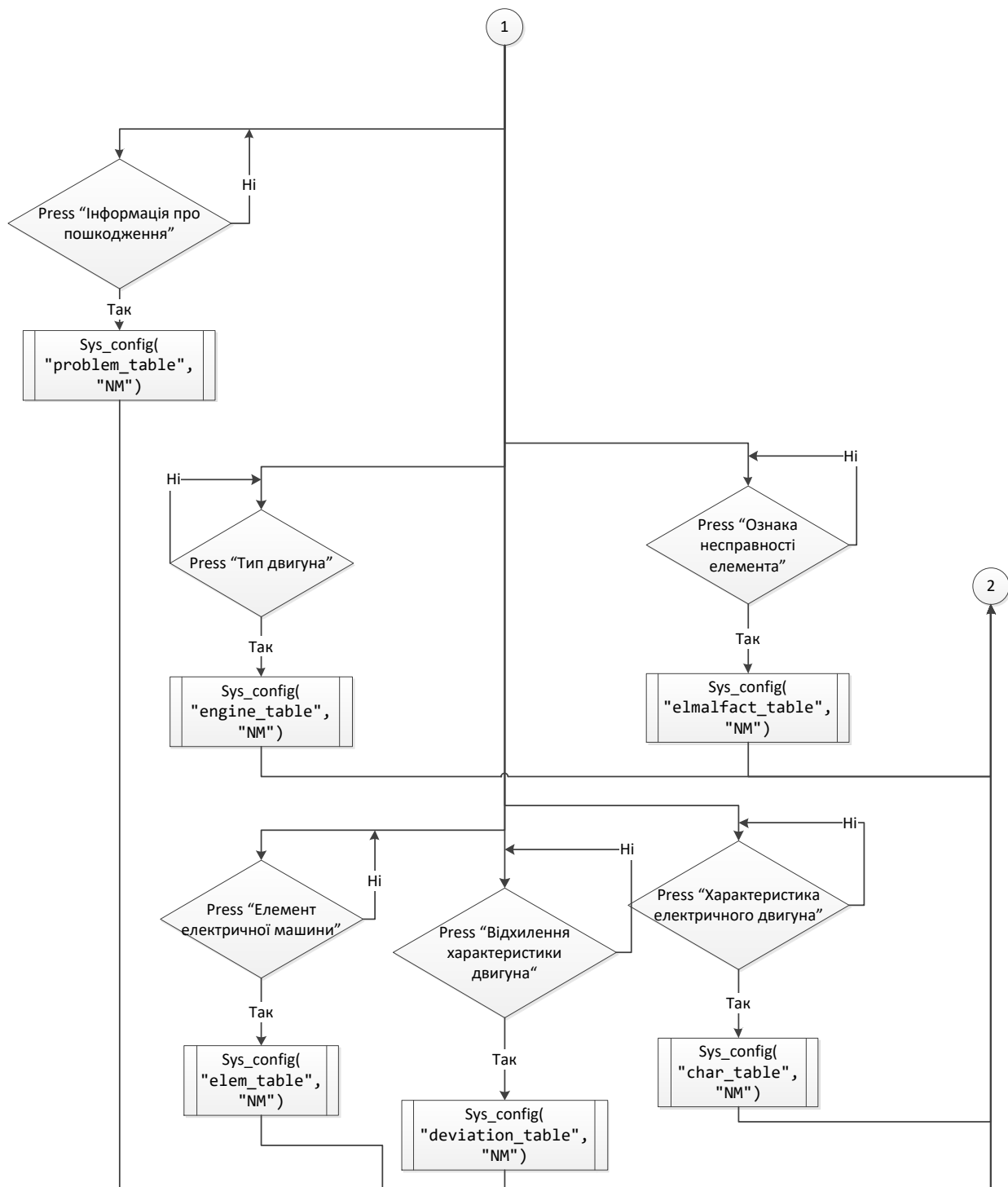


Рисунок А.1 - Алгоритм роботи діагностичної системи (продовження)

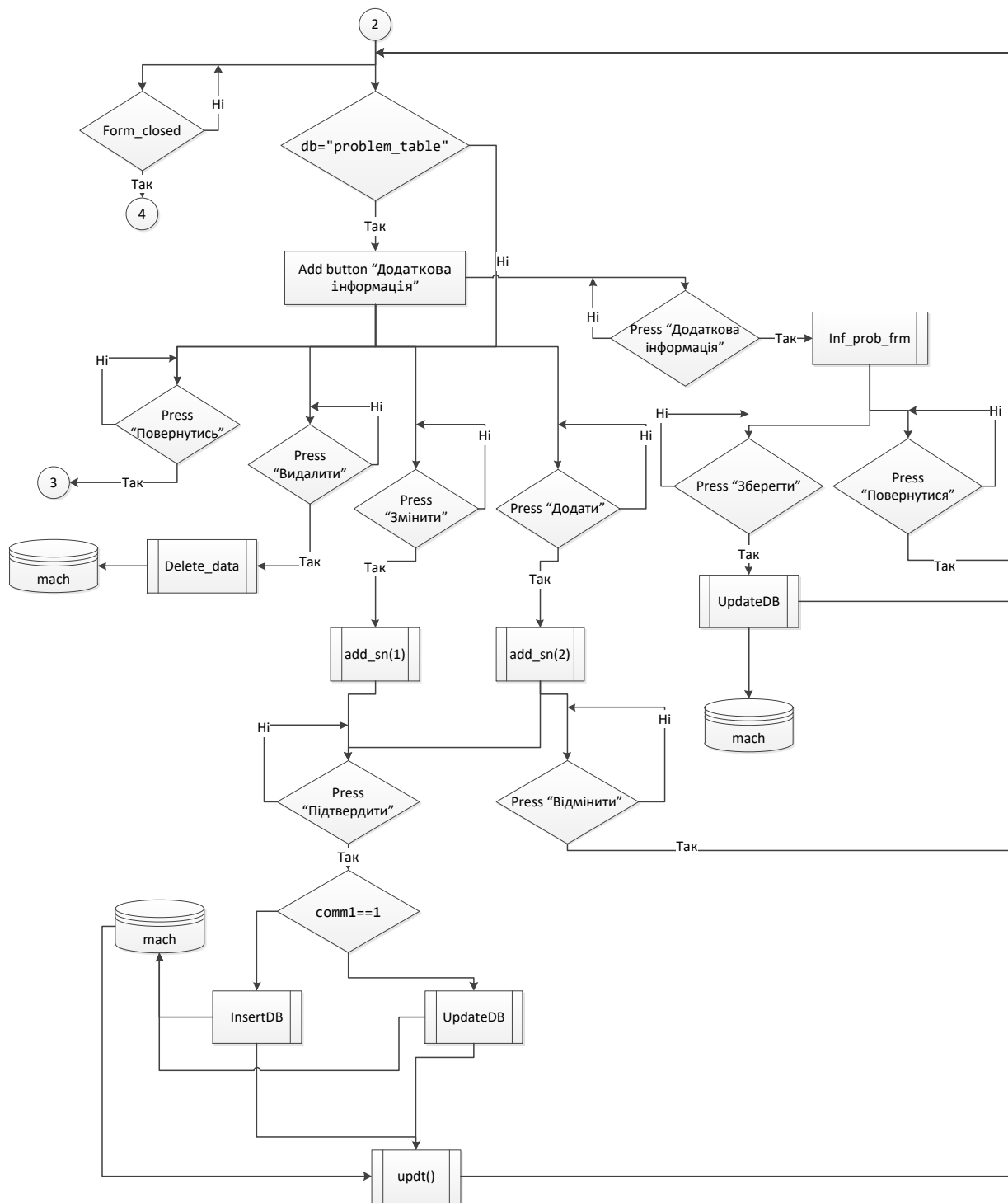


Рисунок А.1 - Алгоритм роботи діагностичної системи (продовження)

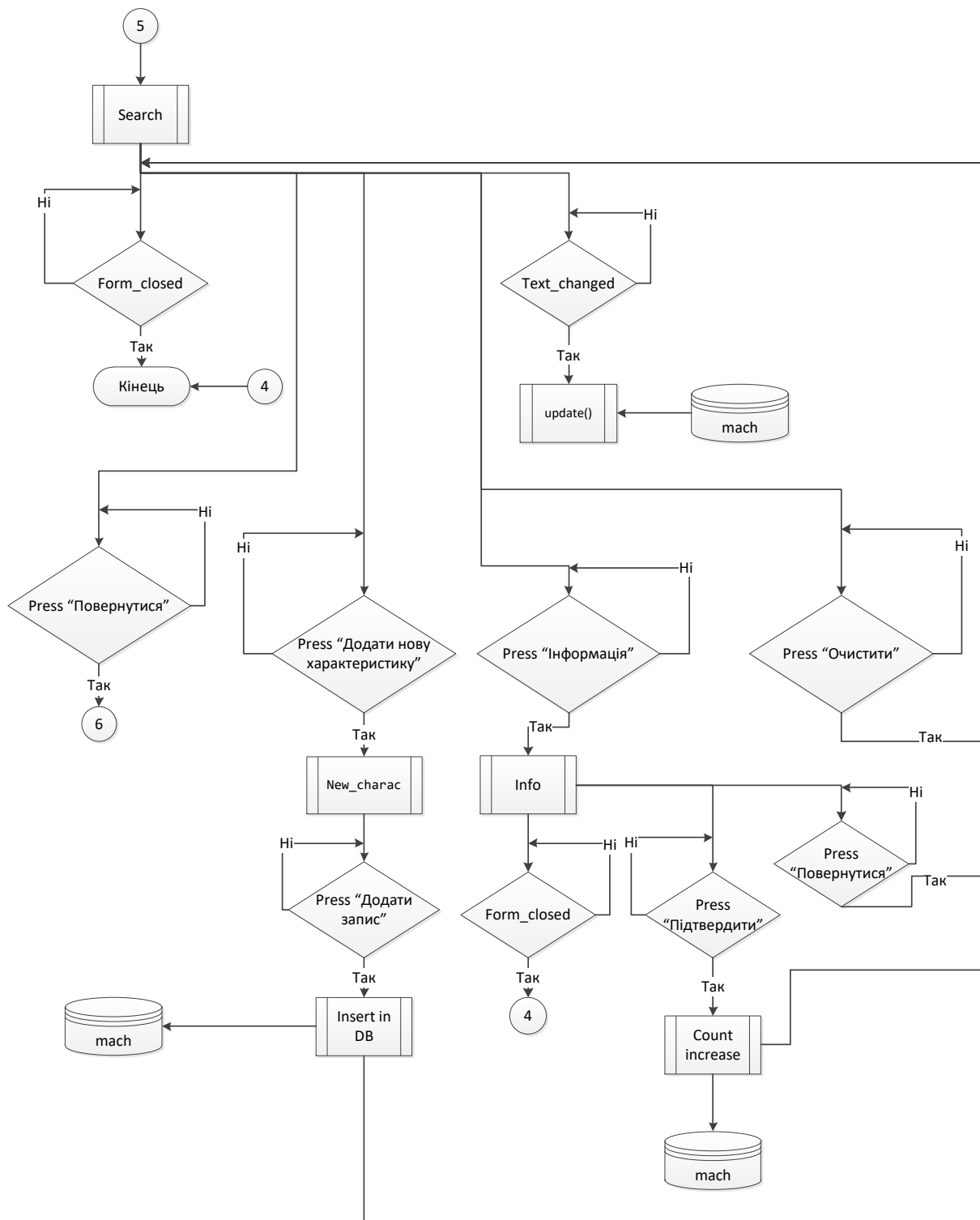


Рисунок А.1 - Алгоритм роботи діагностичної системи (закінчення)

Додаток Б

Акти впровадження дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної та
методичної роботи
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського



Костін В.В.

05 2021 р

АКТ

**про впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи
Чорної Ольги Анатоліївни
«Інформаційна технологія комплексного моніторингу стану
асинхронних двигунів на основі зовнішніх ознак»**

Голова та члени комісії у складі: декана факультету електроніки і комп'ютерної інженерії доцента, канд. техн. наук Мосьпана В.О., заступника директора ННІ електромеханіки, енергозбереження і систем управління, доцента кафедри систем автоматичного управління і електроприводу, канд. техн. наук Зачепи Ю.В., завідувача кафедри комп'ютерних і інформаційних систем, доцента, канд. техн. наук Сидоренка В.М., завідувача кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій, доцента, докт. техн. наук Перекреста А.Л., начальника навчально-методичного відділу, канд. техн. наук Ченчевої О.О., склали акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Чорної О.А. у навчальний процес Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського при підготовці фахівців, за першим та другим освітнім рівнем, спеціальностей 123 – Комп'ютерна інженерія, 141 – Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка, 151 – Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології у вигляді методичного забезпечення для проведення лабораторних і практичних робіт навчальних курсів:

- спеціальності 123: «Організація баз даних», «Програмування», «Обробка сигналів та зображень»;

- спеціальності 151: «Технічні і програмні засоби контролю та діагностики», Основи збору, передачі та обробки інформації»;
- спеціальності 141: «Монтаж, налагодження та випробування електротехнічного обладнання», «Моніторинг та діагностика енергоємних виробництв».

Впровадження елементів дисертаційної роботи в методичні матеріали для проведення лабораторних і практичних робіт забезпечує підвищення ефективності, якості підготовки, формування професійних компетентностей фахівців за першим та другим освітнім рівнем.

Голова комісії



В. О. Мосьпан

Члени комісії:



Ю. В. Зачепа



В. М. Сидоренко



А. Л. Перекрест



О. О. Ченчева

ЗАТВЕРДЖУЮ
Головний енергетик
ПрАТ «Полтавський ГЗК»

Богатирьов К.М.

» 05 2020 р



АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи
Чорної Ольги Анатоліївни
«Інформаційна технологія комплексного моніторингу стану
асинхронних двигунів на основі зовнішніх ознак»

Результати дисертаційної роботи впроваджені у проектні і організаційні заходи при виконанні ремонтних робіт, а також планових технічних обстежень та профілактичних заходів під час експлуатації асинхронних двигунів у вигляді:

1. програмного забезпечення діагностичної системи, що дозволяє на практиці в умовах виробництва автоматично інтерпретувати результати діагностики;
2. методики вимірювання зовнішнього магнітного поля двигунів і інтерпретації отриманих результатів для судження про наявність в двигуні дефектів;
3. виразів для розрахунку прогнозування поточного стану асинхронних двигунів, терміну та доцільності їх подальшої експлуатації.

Впровадження зазначених розробок дозволить за рахунок попередньої діагностики асинхронних двигунів підвищити ефективність їх експлуатації на основі актуальної інформації про поточний стан та зменшення витрат на ремонт під час експлуатації за рахунок попередження про виникнення несправності.

Зам. головного енергетика
ПрАТ «Полтавський ГЗК»



С. В. Жовтяк

Додаток В
Свідоцтва на авторські твори

 УКРАЇНА Міністерство освіти і науки України Державний департамент інтелектуальної власності	
СВІДОЦТВО про реєстрацію авторського права на твір № 36743	
Програмний продукт "Експертна система визначення несправностей електричних двигунів за зовнішніми ознаками режиму їх роботи" (вид, назва службового твору)	
Автор(и) Дурницька Ольга Анатоліївна, Ракітін Валентин Юрійович, Гладкий Андрій Олександрович, Карпенко Євген Олександрович (повне ім'я, псевдонім (за наявності))	
Авторські майнові права належать Дурницька Ольга Анатоліївна, вул. Мічуріна, 87, кв. 38, м. Кременчук, Полтавська обл., 39600; Ракітін Валентин Юрійович, вул. Квт. 278, 18, кв. 97, м. Кременчук, полтавська обл., 39600; Гладкий Андрій Олександрович, вул. Радянської армії, 138, кв. 84, м. Кременчук, Полтавська обл., 39600; Карпенко Євген Олександрович, вул. Манагарова, 15, кв. 2, м. Кременчук, Полтавська обл., 39625; Кременчуцький державний університет імені Михайла Остроградського, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Полтавська обл., 39600 (повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)	
Дата реєстрації	31.01.2011
Голова Державного департаменту інтелектуальної власності	М.В.Паладій
	

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА · ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ ·
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 70361

Науковий твір "Исследование распределения индукции магнитного поля переменного тока промышленной частоты снаружи асинхронных двигателей"

(вид, назва твору)

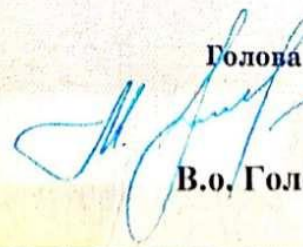
Автор(и) Чорна Ольга Анатоліївна, Панченко Кирил Сергійович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 10.02.2017



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
В.о. Голови А.А. Малиш



УКРАЇНА



СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 78794

Науковий твір "Оцінка ресурсу роботи асинхронного двигуна на основі
вимірювань зовнішнього магнітного поля"
(вид, назва твору)

Автор(и) Чорний Олексій Петрович, Чорна Ольга Анатоліївна, Бісікало Олег
Володимирович
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 04.05.2018



Державний секретар Міністерства
економічного розвитку і торгівлі
України О. Ю. Перевезенцев

11К «Україна» Зам. 18-2013. 2013 р. 1 кн.

Додаток Г

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] O. Chorna, M. Guchenko, O. Bisikalo, O. Chorny, A. Artemenko, «Experimental Study of Information Technology of Integrated Induction Motors Condition Monitoring», *World Science*. 6(58), Vol.1. 2020 doi: 10.31435/rsglobal_ws/30062020/7098
- [2] О. А. Дурницкая, В. Ю. Ракитин, «Экспертная система определения неисправностей электрических машин», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2009, №. 4, с. 39-42.
- [3] О. А. Дурницкая, Е. А. Карпенко, В. А. Огарь, «Расширение функциональных свойств экспертной системы определения неисправностей электрических машин» *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика*, 2010, № 28, с. 546-548.
- [4] Б. М. Горкунов, О. А. Чорна, А. А. Тищенко, «Розробка алгоритмічного і програмного забезпечення діагностичної системи оцінки стану електродвигунів на основі зовнішніх діагностичних показників», *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПИ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Автоматика та приладобудування*, 2016, № 15(1187), с. 12-15.
- [5] Н. В. Зачепа, О. А. Чорна, Д. В. Рєзнік, К. Д. Ніколаєв, І. А. Луценко, «Дослідження поширення магнітного поля асинхронної машини в умовах навчально-виробничих лабораторій», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*, 2017, 3(39), с. 45-52.
- [6] M. Zagirnyak, V. Nykyforov, O. Sakun, O. Chorna, «The industrial electrical equipment screened magnetic fields effect on model organisms», *Proc. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 18323434, 2017, с. 380-383, doi: 10.1117/12.2229083.
- [7] 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.
- [8] O. Chorna, O. Chornyi, V. Tytiuk, «Identification of Changes in the Parameters of Induction Motors during Monitoring by Measuring the Induction of A Magnetic Field on the Stator Surface», *Proc. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*, (MEES), 2019, с. 150-153, doi: 10.1109/MEES.2019.8896554
- [9] N. Zachepa, O. Chorna, D. Rieznik, «Research Levels and Zones Spatial Propagation of the Magnetic Field of the Induction Motor», *Proc. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*, (MEES), 2019, с. 158-161, doi: 10.1109/MEES.2019.8896439
- [10] B. Gorkunov, S. Lvov, Y. Borysenko, V. Shamardina, Saliba Abdel Nour, O. Chorna, «Application of Electromagnetic Transducer for Noncontact Monitoring of Shaft Torque in Electromechanical Systems», *Proc. 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice*, (PAEP), 2020, 9240804, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240804
- [11] V. Nykyforov, O. Sakun, M. Yelizarov, O. Chorna, «Measurement of Magnetic Induction of an Induction Motor Magnetic Field on the Basis of Biological Express Systems», *Proc. 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice*, (PAEP), 2020, 9240902, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240902.
- [12] О. А. Дурницкая, В. Ю. Ракитин «Экспертная система определения неисправностей электрических машин по внешним признакам», *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації* : збірник наукових праць VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2010, с. 386-387.

- [13] О. А. Чорна, Н. Л. Сохін, «Комп'ютерна тестова програма з розширеними можливостями», *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика: наукове видання*, №1/2011, с. 98–99, 2011.
- [14] К. С. Панченко, О. А. Черная, О. А. Сакун, Бердай Абдельмажид, «Экспериментальные измерения магнитного поля электромеханических объектов», *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації* : збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2013, с. 114–115.
- [15] О. В. Бісікало, О. А. Чорна, О. П. Чорний, «Комп'ютерна тестова програма з розширеними можливостями», *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика* : наукове видання, №1/2017, с. 101–104.
- [16] О. А. Чорна, Д. В. Рєзнік, Н. В. Зачепа, О. Ю. Кісліцин, Д. О. Кулік, Д. О. Прошин, «Чисельне моделювання розподілу індукції зовнішнього магнітного поля асинхронного двигуна», *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації* : збірник наукових праць XVI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2018, с. 91-92.
- [17] О. А. Чорна, Д. В. Рєзнік, А. І. Реуцька, Н. В. Зачепа, «Експериментальні дослідження параметрів шуму при вимірюванні індукції магнітного поля», *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації* : збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2019, с. 131-134.
- [18] О. А. Чорна, К. С. Панченко, «Исследование распределения индукции магнитного поля переменного тока промышленной частоты снаружи асинхронных двигателей», свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 70361, 28.04.2015.

- [19] О. А. Чорна, В. Ю. Ракітін, А. О. Гладкий, Є. О. Карпенко, «Експертна система діагностики електричних двигунів за зовнішніми ознаками режиму їх роботи», свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 36743, 31.01.2011.
- [20] О. А. Чорна, О. В. Бісікало, О. П. Чорний, «Оцінка ресурсу роботи асинхронного двигуна на основі вимірювань зовнішнього магнітного поля», свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 78794, 04.05.2018.