

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 розподулу 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 виміряної індукції магнітного поля. Представлений аналіз виміряної 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
Огляд методів і засобів оперативної діагностики асинхронних двигунів.....	28
Промислові системи контролю стану асинхронних двигунів.....	38
Класифікація діагностичних ознак	49
Постановка задачі досліджень.....	57
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ	
ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ІНДУКЦІЇ ЗМІННОГО МАГНІТНОГО	
ПОЛЯ НА ПОВЕРХНІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА.....	58
Моделювання індукції магнітного поля на поверхні статора АД.....	58
Характеристики обладнання та умови проведення експериментів	72
Обґрунтування необхідної точності вимірювань	75
Експериментальні дослідження індукції магнітного поля симетричних і	
несиметричних двигунів.....	82
Висновки по розділу 2.....	98
РОЗДІЛ 3 ОЦІНКИ СТАНУ ТА ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	
АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАННЯ	
ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	100
Модель оцінки стану та терміну експлуатації асинхронного двигуна на основі	
вимірювання зовнішнього магнітного поля.....	100
Виявлення зміни параметрів асинхронного двигуна при його	
моніторингу шляхом вимірювання індукції магнітного поля на поверхні	
статора	112
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
Модульна структура інформаційної технології.....	135
Формалізація інформаційних потоків функціональної діагностики	137
Формалізація архітектури системи моніторингу.....	143
Програмна реалізація інформаційної технології комплексного моніторингу	145
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
Техніко-економічне оцінювання результатів впровадження інформаційної технології.....	161
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 вимірюваної 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.

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/tlektrooborudovanie_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 Magnetism*, vol. 45, №. 3, 2009.

- [41] С. Л. Кужеков, П. Г. Колпахчян, Б. Б. Сербиновский, 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», *Проц. 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*, M.: 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/Коеффіцієнт_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»», *Теория и 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.

