

Азовський морський інститут
Національного університету «Одеська морська академія»
Міністерство освіти і науки України

Харківський національний технічний університет
сільського господарства ім. Петра Василенка
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Василенко Сергій Вікторович

УДК 621.313.333

ДИСЕРТАЦІЯ

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ЗНИЖЕННЯ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ ІЗОЛЯЦІЇ
АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НАПРУГОЮ ДО 1000 В**

05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

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

С.В. Василенко

Науковий керівник:
доктор технічних наук
Кривоносов Валерій Єгорович

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Василенко С.В. Дослідження причин зниження терміну служби асинхронних двигунів напругою до 1000 В. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» (14 - Електрична інженерія). – Азовський морський інститут Національного університету «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка Міністерства освіти і науки України, Харків, 2020.

На промислових підприємствах понад 80 % всього обладнання складають асинхронні двигуни (АД). Умови неякісної напруги мережі живлення, підвищена запиленість, технологічні і випадкові навантаження на валу АД, призводять до високої пошкоджуваності двигунів. В результаті виникають міжвиткові і міжфазні замикання, пробої на корпус. Міжвиткові замикання можуть мати незначні прояви і розвиватися поступово. Щорічно пошкодження становлять до 20–25 % від загальної кількості встановлених АД. Майже всі підприємства використовують технічне обслуговування, що проводиться за графіком планових ремонтів. Проведені дослідження показують, що при планово-попереджувальних ремонтах і випробуваннях не менше 50 % обслуговувань виконується без фактичної потреби. Для більшості АД при цьому не знижується частота виходу з ладу. Надійність роботи після обслуговування з розбиранням і заміною деталей часто знижуються.

У зв'язку з цим питання удосконалення неруйнівного контролю, розробки пристроїв передаварійної діагностики і прогнозування стану АД є актуальним і дозволяє перейти від системи планово-попереджувальних ремонтів до проведення профілактичних робіт за фактом їх виявлення.

Недостатньо вивчені питання розробки теоретичних і практичних методів передаварійного діагностування пошкоджень і причин виходу з ладу АД, які

зумовлені сукупністю динамічних змін в системі електропостачання та параметрів оточуючого середовища.

При цьому недостатньо досліджено й потрібно зробити:

- проаналізувати та оцінити розроблені до теперішнього часу методи безперервної діагностики технічного стану АД і визначити на цій основі перспективні напрямки роботи з даної проблеми;
- удосконалити теплову модель старіння ізоляції двигуна в разі несиметрії і відхилення напруг, що динамічно змінюються, коли АД працюють в умовах запиленого середовища;
- розробити діагностичні критерії для раннього виявлення моменту виникнення виткових замикань в обмотці статора АД при змінній несиметрії і відхиленнях напруг;
- встановити закономірності і виявити межі зміни критеріальних параметрів при діагностиці причин теплового перевантаження ізоляції статорних обмоток АД в умовах струмового перевантаження та локального перегріву ізоляції під шаром пилу;
- розробити спосіб діагностики локального перегріву ізоляції при запиленні обмотки статора і теплового захисту АД при струмовому перевантаженні;
- проаналізувати математичні моделі динаміки старіння ізоляції обмоток АД при несиметрії та відхиленнях напруг мережі живлення;
- розробити програмні алгоритми діагностики та захисту АД при виявленні виткових замикань в обмотці статора та теплових перевантажень при покритті лобової частини обмотки шаром пилу.

Відсутність комплексного підходу, враховуючого вплив мережі живлення і навколишнього середовища, до розгляду питань раннього діагностування стану АД за рахунок виявлення дефектів в обмотках на ранній стадії їх виникнення призводить до виникнення непрогнозованих відхилень в нормальній роботі АД.

У роботі удосконалені методи неруйнівного контролю і захисту АД, що працюють в умовах неякісної електроенергії мережі живлення та підвищеного

запилення навколишнього середовища, за рахунок розроблення математичних моделей, методів та критеріїв для раннього виявлення моменту виникнення виткових замикань в обмотці статора і допустимого рівня шару пилу на лобовій частині обмотки статора.

Вперше розроблено математичну модель залежності зміни струмів в фазах АД при появі виткових замикань в обмотці статора при відхиленні та несиметрії напруг мережі живлення та встановлені діагностичні критерії, які дозволяють визначити кількість замкнених витків в обмотці з одним провідником чи в обмотці з паралельними провідниками.

Удосконалено математичну модель динаміки старіння ізоляції АД, яка встановлює взаємозв'язок між відхиленнями коефіцієнта несиметрії напруг і лінійної напруги, рівень зміни яких пропорційний ступеню нагріву ізоляції навантаженої фази, що попереджає її передчасне теплове старіння.

Вперше отримано аналітичний вираз, що зв'язує локальний перегрів ізоляції і товщину шару пилу на лобовій частині обмотки статора, який дозволяє здійснити температурний захист АД за різницею показань двох температурних датчиків, яка зростає пропорційно збільшенню різниці показань на них, а при досягненні критичного рівня товщини пилу формує аварійний сигнал щодо необхідності проведення технічного обслуговування.

Розроблено метод діагностики локальних перегрівів ізоляції, які викликані пиловим покриттям різної провідності і струмовим навантаженням, в якому діагностуються причини підвищення температури ізоляції обмоток АД; розпізнається і однозначно визначаються температурні перевантаження АД, які пов'язані з струмовими перевантаженнями, та перевантаженнями зумовленими покриттям ізоляції шаром пилу, визначенням її товщини на поверхні ізоляції. Контроль двох значень температур дозволяє виявити закономірність діагностики температурного перевантаження АД і здійснити захист ізоляції від локального перегріву, а АД від роботи в аварійному режимі, який викликано струмовим перевантаженням.

Вдосконалено методику визначення параметрів схеми заміщення яка дозволяє розрахувати значення елементів схеми заміщення з похибкою 1,5 % для асинхронних двигунів потужністю до 5 кВт.

Розроблено спосіб контролю та теплового захисту обмоток АД, що працюють в умовах підвищеної запиленості середовища, який дозволяє діагностувати струмове перевантаження та відокремити їх від граничного запилення обмоток статора.

Розроблено методику, алгоритм і програмне забезпечення виявлення неповно фазних режимів та виткових замикань на ранній стадії при наявності відхилень і несиметрії напруг.

Результати дисертаційної роботи використані на провідних підприємствах, таких як: Державно підприємство «Маріупольський морський торговельний порт» з річним економічним ефектом 124 239,38 грн./рік; «Маріупольський судноремонтний та суднобудівний завод» з річним економічним ефектом 52 810 грн./рік. У навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» Азовського морського інституту теоретичні дослідження знайшли застосування шляхом внесення доповнень до курсу лекцій та лабораторних робіт з дисциплін «Електротехніка та електричні машини» в розділах «Принцип дії асинхронного двигуна та пошук несправностей».

Ключові слова: асинхронний двигун, показники якості електроенергії, несиметрія напруг, відхилення напруг, коефіцієнт несиметрії струмів, несиметрія опорів, методи неруйнівного контролю, тепловий захист, діагностична система, діагностичні критерії.

Список публікацій здобувача:

85. Василенко С.В. Управление сроком службы изоляции асинхронных двигателей по скоростным характеристикам нагрева обмоток / С.В. Василенко, В.Е. Кривонос // Електротехніка та енергетика: зб. наук.пр.ДонНТУ. – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – Вип. 11(186). – С. 205-210.

86. Василенко С.В. Управление ресурсом работы асинхронного двигателя в условиях несимметрии питающей сети / С.В. Василенко, В.Е. Кривоносков // Научный вестник ДГМА. – Краматорск: ДГМА. – 2012. – Вып. №2 (10Е). – С. 14-24.

89. Василенко С.В. Диагностика и защита изоляции обмоток асинхронных двигателей, работающих в агрессивных средах / С.В. Василенко, В.Е. Кривоносков // Вестник Приазовского государственного технического университета: сб. науч. раб. – Мариуполь: ПГТУ. – 2015. – Вып. № 31. – С. 148-155.

90. Василенко С.В. Влияние запыленной среды на срок службы обмоток статора асинхронных двигателей / С.В. Василенко, В.Е. Кривоносков // Белорусского национального технического университета. «Энергетика». Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – Минск: БНТУ. – 2015. – № 6. – С. 35-40.

91. Vasilenko S.V. Influence of the quality of repair of an induction motor on the after repair life / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov, V.G. Skosyrev // ÖsterreichischesMultiscience Journal. – Innsbruck (Austria), 2019. – Vol. 1 № 22. – p. 46–51.

92. Vasilenko S.V. Comparative analysis of methods for calculating the parameters of asynchronous engines for reference data / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov // ÖsterreichischesMultiscience Journal. – Innsbruck (Austria), 2019. – Vol. 1 № 18. – p. 36–42.

93. Василенко С.В. Программное обеспечение для устройства диагностики и тепловой защиты электродвигателей, эксплуатируемых в условиях запыленной среды / С.В. Василенко, В.Е. Кривоносков, И.В. Федосова // Вестник Приазовского государственного технического университета: сб. науч. раб. – Мариуполь: ПГТУ. – 2019. Вып. № 38. – С. 129–137.

94. Vasilenko S.V. Influences of the imbalance of the active resistances of the stator windings on the asymmetry of phase currents in conditions of poor-quality

network voltage / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov, Karpolyuk I.T. // Znanstvenamisel journal. – Ljubljana (Slovenia), 2019. – Vol. 1 № 35. – p. 67–75.

96. Vasilenko S.V. Analysis of loss of power in the electric motor when closing the parallel branches of stator wending / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov // Slovak international scientific journal. – Bratislava (Slovakia), 2019. – Vol. 1 № 35. – p. 19–23.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

87. Василенко С.В. Управление ресурсом работы асинхронного двигателя в условиях несимметрии напряжений. Современные информационные технологии, средства автоматизации и электропривод: Всеукраинская научно-техн. конф., ДГМА, г. Краматорск, 17-21 декабря 2012 г. / С.В. Василенко, В.Е. Кривонос / – Краматорск: ДГМА, 2012. – С. 197-199.

88. Василенко С.В. Запыление обмоток статора, как фактор снижения срока службы изоляции асинхронного двигателя. Университетская наука 2014: Международная научно-техн. конф., ГБУЗ "Приазовский государственный технический университет", г. Мариуполь, 14-16 мая 2014г. / С.В. Василенко, В.Е. Кривонос / – Мариуполь: ГБУЗ "ПГТУ", 2014. – Т. II. – с.8-9.

95. Василенко С.В. Срок службы изоляции при отклонениях напряжений и учете отклонений активных сопротивлений обмоток статора асинхронного двигателя. Збірник статей науково-інформаційного центру «Знання» за матеріалами ІІІ міжнародної науково-практичної конференції: «Розвиток науки в ХХІ столітті», г. Харків: збірник зі статтями./ С.В. Василенко, В.Е. Кривонос, И.Т. Карполюк / – Харків: науково-інформаційний центр «Знання», 2019. – С. 57–65.

Патенти та свідоцтва

За темою дисертації автор має 1 патент та 1 свідоцтво на комп'ютерну програму.

ANNOTATION

Vasilenko S.V. Investigation of the reasons for reducing the insulation life of asynchronous motors up to 1000 V. As a manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.09.33 «Electrotechnical complexes and systems» (14 -Electrical Engineering) - National University «Odessa Maritime Academy» Azov Maritime Institute of the Ministry of Science and Education of Ukraine, Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture of the Ministry of Science and Education of Ukraine, Kharkiv, 2019.

At industrial enterprises more than 80% of all equipment are asynchronous motors (AM). Conditions of poor mains voltage, high dust, technological and accidental loads on the shaft of the AM, lead to high damage to the motors. As a result there are interterm short circuits and phase faults, case short circuit. Interturn short circuits may have minor manifestations and develop gradually. Annual damage is up to 20-25% of the total number of installed AM. Almost all companies use maintenance, which is carried out according to the schedule of scheduled repairs. The conducted researches show that at planned and preventive repairs and tests not less than 50% of services are carried out without actual need. For most AM, the frequency of failure is not reduced. Reliability of work after service with disassembly and replacement of details often decreases.

In this regard, the issue of improving non-destructive testing, development of devices for pre-emergency diagnostics and forecasting state of AM is relevant and allows moving from a system of planned and preventive repairs to preventive work upon their appearance.

The issues of developing theoretical and practical methods for pre-emergency diagnosis of damage and the causes of failure of AM caused by a combination of dynamic changes in the power supply system and environmental parameters have not been sufficiently studied.

At the same time, insufficiently researched and necessary to do:

- analyze and evaluate the methods developed so far for continuous diagnosis of the technical condition of AM and determine on this basis promising areas of work on this problem;
- improve the thermal model of aging of the insulation of the engine with asymmetries and voltage deviations, which dynamically change when the AM is working in a dusty environment;
- develop diagnostic criteria for early detection of the moment of occurrence of coil faults in the winding of the AM stator with variable asymmetry and voltage deviations;
- establish regularities and identify the limits of the change of criterial parameters in diagnosing the causes of thermal overload of the insulation of the stator windings of the AM in conditions of current overload and local overheating of the insulation under a dust layer;
- to develop a method for diagnosing local insulation overheating during dusting of the stator winding and the thermal protection of the AM during current overload;
- analyze mathematical models of the dynamics of aging of the winding insulation of the motor windings with asymmetries and deviations of the supply voltage;
- to develop software algorithms for the diagnosis and protection of AM when detecting coil faults in the stator winding and thermal overloads when covering the frontal part of the winding with a layer of dust.

The lack of an integrated approach, taking into account the influence of the power supply network and the environment, to the consideration of issues of early diagnosis of the state of AM by identifying defects in the windings at an early stage of their occurrence leads to the appearance of unpredictable deviations in the normal operation of the AM.

The work improves the methods of non-destructive testing and protection of AM, working in conditions of poor-quality power supply network and increased dusting of the environment, through the development of mathematical models,

methods and criteria for early detection of the occurrence of coil faults in the stator winding and the permissible level of dust layer on the frontal part stator windings.

For the first time, a mathematical model was developed for the dependence of changes in currents in the AM phases when coil faults appear in the stator winding when the voltage supply deviates and is asymmetrical, and diagnostic criteria are established that allow determining the number of closed turns in a winding with one conductor or in a winding with parallel conductors.

A mathematical model of the dynamics of aging of the insulation of AD has been improved, which establishes the relationship between deviations of the voltage asymmetry coefficient and line voltage, the level of change of which is proportional to the degree of heating of the insulation of the loaded phase, prevents its premature thermal aging/

For the first time, a mathematical model was developed for the dependence of changes in currents in the AM phases when coil faults appear in the stator winding when the voltage supply deviates and is asymmetrical, and diagnostic criteria are established that allow determining the number of closed turns in a winding with one conductor or in a winding with parallel conductors.

A mathematical model of the dynamics of aging of the insulation of AM, which establishes the relationship between deviations of the voltage asymmetry coefficient and line voltage, the level of change of which is proportional to the degree of heating of the insulation of the loaded phase, prevents its premature thermal aging, is improved/

For the first time, an analytical expression was obtained that relates the local insulation overheating and the thickness of the dust layer on the frontal part of the stator winding, which allows temperature protection of the AM by the difference in the readings of the two temperature sensors, which grows in proportion to the increase in the difference in readings on them, and when the critical level of dust thickness is reached, it forms an emergency signal about the need for maintenance.

A diagnostic method has been developed for local insulation overheating caused by a dust coating of different conductivity and current load, in which the

causes of the increase in the temperature of the insulation of the windings of the motor windings are diagnosed; the temperature overloads associated with current overloads and overloads due to coating the insulation with a dust layer and determining its thickness on the insulation surface are recognized and uniquely determined. Monitoring of two temperature values makes it possible to identify the regularity of diagnostics of temperature overload of AM and to protect the insulation from local overheating, and AM from emergency operation, which is caused by current overload.

The methodology for determining the parameters of the equivalent circuit has been improved which allows us to calculate the values of the elements of the equivalent circuit with an error of 1.5% for asynchronous motors up to 5 kW.

A method for monitoring and thermal protection of AM windings has been developed, operating in conditions of increased dustiness of the environment, which allows diagnosing current overloads and separating them from the limiting dusting of stator windings.

A methodology, algorithm, and software for detecting incomplete phase modes and windings at an early stage in the presence of deviations and voltage unbalance have been developed.

The results of the dissertation work were used at leading enterprises, such as: State enterprise "Mariupol Sea Commercial Port" with an annual economic effect of 124 239,38 UAH/year; "Mariupol Shipyard and Shipbuilding Plant" with an annual economic effect of UAH 52 810 UAH/year. Results were also used in the educational process of the National University "Odessa Maritime Academy" Azov Maritime Institute, where theoretical studies have been applied by making additions to the course of lectures and laboratory work in the disciplines "Electrical Engineering and Electrical Machines" in the sections "Principle of operation of an induction motor and troubleshooting".

Keywords: asynchronous motor, indicators of electric power quality, voltage unbalance, voltage deviation, current asymmetry coefficient, resistance asymmetry,

methods of non-destructive control, thermal protection, diagnostic system, diagnostic criteria.

List of publication:

85. Vasilenko S.V. Management of insulation service life by high-speed heating characteristics / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov // Electrical engineering and energy: scientific digest DonNSU. – Donetsk: DonNSU. – 2011. – Iss.11. – PP. 205-210.

86. Vasilenko S.V. Resource management of an asynchronous motor in asymmetric supply networks / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov // Scientific Herald of the DSEA. – Kramatorsk: DSEA. – 2012. – Iss. 2 (10E). – PP. 14-24.

89. Vasilenko S.V. Diagnostics and insulation protection of windings of induction motors operating in an aggressive environment / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov // Bulletin of the Priazov State Technical University: scientific works digest. – Mariupol: PSTU. – 2015. – Iss. 31. – PP.148-155.

90. Vasilenko S.V. The influence of dusty environment on the service life of stator windings of induction motors / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov // Belarusian National Technical University. "Energy". Digest of higher educational institutions and energy associations of the CIS. – Minsk: BNTU. – 2015. – Iss. 6. – PP.35-40.

91. Vasilenko S.V. Influence of the quality of repair of an induction motor on the after repair life / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov, V.G. Skosyrev // Österreichisches Multiscience Journal. – Innsbruck (Austria), 2019. – Vol. 1 № 22. – p. 46–51.

92. Vasilenko S.V. Comparative analysis of methods for calculating the parameters of asynchronous engines for reference data / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov // Österreichisches Multiscience Journal. – Innsbruck (Austria), 2019. – Vol. 1 № 18. – p. 36–42.

93. Vasilenko S.V. Software for diagnostic and thermal protection devices for electric motors operating in dusty environments / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov, I.V. Fedosova // Bulletin of the Priazov State Technical University: scientific works digest. – Mariupol: PSTU. – 2019. Iss.38. – PP. 129–137.

94. Vasilenko S.V. Influences of the imbalance of the active resistances of the stator windings on the asymmetry of phase currents in conditions of poor-quality network voltage / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov, Karpolyuk I.T. // Znanstvenamisel journal. – Ljubljana (Slovenia), 2019. – Vol. 1 № 35. – p. 67–75.

96. Vasilenko S.V. Analysis of loss of power in the electric motor when closing the parallel branches of stator winding / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov // Slovak international scientific journal. – Bratislava (Slovakia), 2019. – Vol. 1 № 35. – p. 19–23.

Published approbation works:

87. Vasilenko S.V. Resource management of an asynchronous motor in conditions of voltage unbalance: abstract Modern information technology, automation and electric drive: All-Ukrainian scientific and technical. Conf., DSEA, Kramatorsk, December 17-21, 2012 / Vasilenko S.V., Krivonosov V.E. / – Kramatorsk: “DSEA”, 2012. –PP. 197-199.

88. Vasilenko S.V. Dusting of stator windings as a factor in reducing the service life of an induction motor insulation. University Science 2014: International Science and Technology Conf., State Educational Institution "Priazov State Technical University", Mariupol, May 14-16, 2014 / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov / – Mariupol: PSTU, 2014. – Tome II. –PP. 8–9.

95. Vasilenko S.V. The service life of insulation with voltage deviations and taking into account deviations of the active resistances of the stator windings of an induction motor. Collection of articles of the scientific-information center "Knowledge" on the materials of the LIII international scientific-practical conference: "Development of science in the XXI century", Kharkiv: collection of articles / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov, I.T. Karpolyuk / Kharkiv: Scientific and Information Center "Knowledge", 2019. –PP. 57-65.

Patents and certificates

On the topic of the dissertation, the author has 1 patent and 1 certificate for computer program.

ЗМІСТ

	стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	17
ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	24
1.1 Вимоги до засобів діагностики і захисту АД, що працюють в аномальних умовах експлуатації	24
1.2 Фактори, що впливають на термін експлуатації асинхронних двигунів	27
1.3 Вплив відхилень показників якості мережі живлення на температуру ізоляції обмоток АД	32
1.4 Аналіз методів діагностики і захисту АД в умовах струмових перевантажень при підвищеної запиленості	34
1.5 Аналіз методів і пристроїв виявлення виткових замикань в статорних обмотках АД в умовах погіршеної якості електроенергії	36
1.6 Аналіз причин дисбалансу опорів обмоток статора АД	38
1.6.1 Несиметрія активних опорів обмотки статора	40
1.6.2 Несиметрія активних і індуктивних опорів обмотки статора АД	43
1.7 Аналіз методів визначення параметрів схеми заміщення АД	44
1.8 Висновки і завдання дослідження	48
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЯВЛЕННЯ ВИТКОВИХ ЗАМИКАНЬ НА РАННІХ СТАДІЯХ ПРИ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ МЕРЕЖІ	50
2.1 Удосконалення методики визначення параметрів схеми заміщення АД потужністю до 5 кВт	50
2.2 Розробка математичної моделі виявлення виткових замикань на ранніх стадіях в мережах з несиметричними напругами	56
2.2.1 Облік впливу відхилень активних опорів обмоток статора на додаткові втрати потужності в обмотках	56

2.2.2	Розробка математичної моделі визначення струмів і втрат потужності в обмотках АД при виникненні виткових замикань в мережах з несиметричними напругами	63
2.2.3	Встановлення залежностей розподілу фазних струмів при наявності виткових замикань в мережах з несиметричними напругами	69
2.2.3.1	Встановлення залежності розподілу струмів при несиметрії активних опорів і наявності відхилень напруг	69
2.2.3.2	Встановлення залежності розподілу втрат потужності при виткових замиканнях в паралельних провідниках обмотки статора	75
2.2.3.3	Встановлення залежності розподілу струмів при виткових замиканнях і наявності відхилень напруг в фазах	80
2.3	Уточнення теплової моделі АД для розрахунку додаткового нагріву обмоток з несиметричними опорами в мережах з несиметричними напругами	93
	Висновки до розділу	97
	РОЗДІЛ 3 ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ В ЛОБОВИХ ЧАСТИНАХ ОБМОТОК СТАТОРА ПРИ ЗАПИЛЕННІ	98
3.1	Фактори оточуючого середовища, що знижують термін служби ізоляції обмоток АД	98
3.2	Оцінка додаткового нагріву ізоляції при запиленні лобової частини обмотки статора АД	100
3.3	Визначення додаткового нагріву при протіканні поверхневого струму в шарі пилу	104
3.3.1	Схема заміщення ізоляції при визначенні поверхневого струму	104
3.3.2	Аналіз результатів моделювання	108
3.3.3	Облік впливу зволоження запиленої обмотки	110
	Висновки до розділу	114
	РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СПОСОБІВ КОНТРОЛЮ І ЗАХИСТУ АД	116

4.1	Спосіб діагностики виткових замикань і захисту АД від аномальних режимів роботи	116
4.2	Спосіб контролю та теплового захисту АД при запиленні обмоток статора	125
	Висновки до розділу	131
	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	132
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	134
	ДОДАТКИ	146

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АД	асинхронний двигун
АЦП	аналогово-цифровий перетворювач
ЕД	електродвигун
ЕРС	електрорушійна сила
ККД	коефіцієнт корисної дії
МЖ	мережа живлення
ППР	планово-попереджувальний ремонт
ПЯЕ	показник якості електроенергії
ТС	технічний стан

ВСТУП

Актуальність теми. На промислових підприємствах понад 80 % всього обладнання складають асинхронні двигуни (АД). Умови неякісної напруги мережі живлення, підвищена запиленість, технологічні і випадкові навантаження на валу АД, призводять до високої пошкоджуваності двигунів. Щорічно пошкодження становлять до 20–25 % від загальної кількості встановлених АД. В сучасних економічних умовах підприємства часто змушені скорочувати обсяги ремонтних робіт. Через обмежені кошти на ремонт обладнання промислові підприємства багаторазово відновлюють АД, які вийшли з ладу. В таких умовах оцінка технічного стану АД являє собою важливу задачу. В процесі експлуатації АД, вплив несприятливих факторів навколишнього середовища і змінених показників якості електроенергії призводять до прискореного зносу ізоляції. В результаті виникають міжвиткові і міжфазні замикання, пробої на корпус. Міжвиткові замикання можуть мати незначні прояви і розвиватися поступово.

Технічне обслуговування, що проводиться за графіком планових ремонтів, часто спричиняє виникнення додаткових дефектів. В таких умовах потрібна розробка методів неруйнівного контролю, які дозволяють визначити стан двигуна в процесі його експлуатації.

В даний час існує декілька основних методів діагностування АД. До них відносять: вібраційні, електромагнітні, теплові та струмові. Найбільш поширеними є вібраційні і електромагнітні методи діагностики. Дані методи знайшли широке застосування для АД потужністю понад 15 кВт. У ряді випадків застосування даних методів може бути економічно невиправданим, наприклад, для АД потужністю до 5 кВт, або АД може перебувати в важкодоступному місці. Альтернативою є метод струмової діагностики, який дозволяє проводити діагностичне обстеження без втручання в роботу двигуна.

В даний час розвиток методів і засобів контролю поточного стану двигунів дозволяє реалізувати технологію обслуговування по фактичному

стану. Таке обслуговування призводить до збільшення часу між поточними і капітальними ремонтами, зниження аварійності обладнання, підвищення економічності виробництва. Підвищення техніко-економічних показників роботи обладнання можна певною мірою вирішувати на основі діагностування стану АД за рахунок виявлення дефектів в обмотках на ранній стадії їх виникнення.

Отже, розробка вдосконалених методів струмової діагностики АД, що включають уточнені діагностичні критерії, є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні результати роботи отримані автором в процесі його участі в науково-дослідній роботі «Моніторинг режимів електричних мереж, від яких живляться перевантажувальні машини другого перевантажувального району і КПК», відповідно до господарської теми (ДР № 0116U007129).

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – вдосконалення теплових і електричних методів контролю та діагностики асинхронних двигунів напругою до 1000 В, працюючих в умовах відхиленні і несиметричної напруги та підвищеної запиленості навколишнього середовища.

Відповідно до поставленої мети вирішуються наступні завдання:

– аналіз розроблених до теперішнього часу методів безперервної діагностики технічного стану АД і визначення на цій основі перспективних напрямків робіт з даної проблеми;

– удосконалення теплової моделі старіння ізоляції двигуна в разі несиметрії і відхилення напруг, що динамічно змінюються, коли АД працюють в умовах запиленого середовища;

– розробка діагностичних критеріїв для раннього виявлення моменту виникнення виткових замикань в обмотці статора АД при змінній несиметрії і відхиленнях напруг;

– встановлення закономірності і виявлення меж зміни критеріальних параметрів при діагностиці причин теплового перевантаження ізоляції

статорних обмоток АД в умовах струмового перевантаження та локального перегріву ізоляції під шаром пилу;

– розробка способу діагностики локального перегріву ізоляції при запиленні обмотки статора і теплового захисту АД при струмовому перевантаженні;

– аналіз математичних моделей динаміки старіння ізоляції обмоток АД при несиметрії та відхиленнях напруг мережі живлення;

– розробка програмних алгоритмів діагностики та захисту АД при виявленні виткових замикань в обмотці статора та теплових перевантажень при покритті лобової частини обмотки шаром пилу.

Об'єктом дослідження є загальнопромислові АД з короткозамкненим ротором, що працюють в тривалому режимі S1 при несиметричних напругах мережі в умовах запиленого середовища.

Предметом дослідження є залежність зміни струмів в фазах АД від кількості замкнутих витків обмотки статора і залежність температури в лобовій частині обмотки від рівня відхилень і несиметрії напруги та запиленості навколишнього середовища.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовувалися: методи математичного моделювання, теорії електричних ланцюгів, метод симетричних складових, диференціальне та інтегральне обчислювання, методи експериментального дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше розроблено математичну модель залежності зміни струмів в фазах АД при появі виткових замикань в обмотці статора при відхиленні та несиметрії напруг мережі живлення.

2. Вперше встановлені діагностичні критерії, які дозволяють визначити кількість замкнених витків в обмотці з одним провідником чи в обмотці з паралельними провідниками.

3. Удосконалено математичну модель динаміки старіння ізоляції АД, яка встановлює взаємозв'язок між відхиленнями коефіцієнта несиметрії напруг і

лінійної напруги, рівень зміни яких пропорційний ступеню нагріву ізоляції навантаженої фази, що попереджає її передчасне теплове старіння.

4. Вперше отримано аналітичний вираз, що зв'язує локальний перегрів ізоляції і товщину шару пилю на лобовій частині обмотки статора, який дозволяє здійснити температурний захист АД за різницею показань двох температурних датчиків, яка зростає пропорційно збільшенню різниці показань на них, а при досягненні критичного рівня товщини пилю формує аварійний сигнал щодо необхідності проведення технічного обслуговування.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено метод діагностики локальних перегрівів ізоляції, які викликані пиловим покриттям різної провідності і струмовим навантаженням, в якому діагностуються причини підвищення температури ізоляції обмоток АД.

2. Вдосконалена методика визначення параметрів схеми заміщення яка дозволяє розрахувати значення елементів схеми заміщення з похибкою 1,5 % для асинхронних двигунів потужністю до 5 кВт.

3. Розроблено спосіб контролю та теплового захисту обмоток АД, що працюють в умовах підвищеної запиленості середовища, який дозволяє діагностувати струмове перевантаження та відокремити їх від граничного запилення обмоток статора;

4. Розроблено методику, алгоритм і програмне забезпечення виявлення неповно фазних режимів та виткових замикань на ранній стадії при наявності відхилень і несиметрії напруг.

5. Результати дисертаційної роботи використані на провідних підприємствах, таких як: Державно підприємство «Маріупольський морський торговельний порт» з річним економічним ефектом 124 239,38 грн./рік; «Маріупольський судноремонтний та суднобудівний завод» з річним економічним ефектом 52 810 грн./рік. У навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» Азовського морського інституту теоретичні дослідження знайшли застосування шляхом внесення

доповнень до курсу лекцій та лабораторних робіт з дисциплін «Електротехніка та електричні машини» в розділах «Принцип дії асинхронного двигуна та пошук несправностей».

Особистий внесок здобувача.

Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належать: проведення експериментального дослідження і отримання швидкісних характеристик нагріву обмоток АД [85]; модель пристрою, який дозволяє керувати терміном служби ізоляції обмоток АД по швидкості нагріву обмоток [86]; експериментальні дослідження впливу товщини шару пилу на лобовій частині обмотки на додатковий нагрів ізоляції [89]; визначення умови настання моменту проведення профілактичних робіт при запиленні обмотки статора АД [93]; експериментально встановлені залежності між товщиною шару пилу і додатковим нагрівом [90]; аналіз впливу відхилень активних опорів обмотки статора на розрахунок параметрів схеми заміщення АД [91]; запропоновано вдосконалену методику розрахунку параметрів схеми заміщення АД [92]; удосконалено теплову модель нагріву АД, представленого однорідним тілом [94]; комп'ютерне моделювання зміни розподілу струмів в обмотках АД при замиканні витків в паралельних провідниках обмотки [96]; розробка критеріїв визначення граничного рівня запиленості обмотки і критерій струмового перевантаження [97], запропоновано алгоритм роботи пристрою [98].

Апробація результатів дисертації.

Основні наукові результати дисертаційної роботи представлялися, доповідалися автором і обговорювалися на: Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації і електропривод» (м. Краматорськ, 2012 рік); Міжнародній науково-технічній конференції «Університетська наука 2016» (м. Маріуполь, 2016 рік); ЛІІ міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток науки в ХХІ столітті» (м. Харків, 2019 рік).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 19 роботи, з них: в міжнародних науково-технічних журналах – 5; в збірниках наукових праць, що містяться в переліку ВАК, – 4; 1 патент України на винахід; 1 авторське свідоцтво на комп'ютерну програму.

Структура і склад дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів і висновків. Повний обсяг дисертації включає 163 сторінки машинописного тексту, 37 ілюстрацій по тексту, 34 таблиці по тексту, список літератури з 99 найменувань, 7 доданків, які складають 17 сторінок.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Вимоги до засобів діагностики і захисту АД, що працюють в аномальних умовах експлуатації

Асинхронний електродвигун (АД), напругою до 1000 В, застосовується в багатьох галузях народного господарства, завдяки простоті виготовлення та експлуатації, а з розвитком частотно перетворювальних засобів знаходять застосування в приводах, де потрібно плавне регулювання числа обертів. Асинхронні двигуни споживають до 40 % електроенергії, виробленої в світі [1], причому 90 % двигунів становлять АД з короткозамкненим ротором [2]. У ряді випадком АД, на вимогу технологічного процесу, працюють з різко змінним навантаженням і в умовах агресивного середовища (підвищена запиленість, вологість, загазованість та ін.) При цьому отримують живлення від мережі з відхиленнями показників якості електроенергії (ПЯЕ) від нормованих ГОСТ 13109-97. Термін експлуатації АД, які працюють в таких умовах, в 2,8-5,6 разів нижче нормативного показника. Підвищення тривалості без аварійної експлуатації АД, в сучасних умовах, можливо при достовірній оцінці технічного стану АД в реальному масштабі часу.

З впровадженням систем частотного регулювання та автоматизованих систем управління виробництвом, АД потужністю до 5 кВт знаходять все більш широке застосування на відповідальних технологічних механізмах. Вони використовуються у дистанційному управлінні водо-, газо- та ін. засувками, в приводах подачі матеріалів і сировини, в приводах металорізальних верстатів, гільйотин, тельферів, вентиляторів, слайдів та ін. Аварійна зупинка приводу з АД потужністю до 5 кВт, що стоїть в кінці технологічного ланцюжка, при повній автоматизації виробничого процесу, призводить до зупинки всього технологічного циклу. Тому в сучасних умовах до двигунів потужністю до 5 кВт пред'являються вимоги надійності і безаварійності роботи, як і до

відповідальних приводів, потужністю від 15 до 250 кВт. Необхідно адаптувати діагностичні методи, що застосовуються до двигунів потужністю понад 15 кВт, для застосування в АД потужністю до 5 кВт, тому що вони мають ряд особливостей при розрахунках параметрів схем заміщення і розрахунку електромеханічних характеристик.

Питання діагностики АД в режимі реального часу при їх експлуатації стали підніматися в кінці двадцятого століття. Сучасні методи діагностики АД умовно діляться на дві групи.

До першої групи належать методи тестової діагностики, що вимагають формування штучних збурень, впливаючих на електродвигун (виявляються несправності: обрив в обмотці, внутрішні дефекти конструкції і т.д.): а) вимірювання опору ізоляції, струмів витоків, тангенса кута діелектричних втрат обмоток [3]; б) метод високовольтного імпульсу [4].

Недоліки методів тестової діагностики полягають в тому, що вони сприяють не тільки попередженню розвитку різних дефектів, але і їх появі [5], а також вимагають тимчасову зупинку роботи електродвигуна, що перевіряється [6]. Прикладом можуть служити високовольтні випробування після планово-примусових ремонтів, які викликають появу в обмотці АД мікрodefektів, що розвиваються в процесі роботи під впливом несприятливих чинників.

Друга група включає в себе методи оперативної та функціональної діагностики стану: а) вібродіагностика [7] (спектральний аналіз вібрації, низькочастотних коливань потужності вібрації); б) оцінка діагностичних параметрів (по струму, по магнітному полю, по ковзанню і т.д.); в) ультразвукова дефектоскопія і акустична діагностика; г) спектральний аналіз споживаного струму [8].

Контроль стану електродвигуна методами вібродіагностики, який отримав найбільше поширення, має такі недоліки: неможливість точного визначення природи дефекту [9, 10], складність апаратної реалізації і програмного забезпечення [11], слабку чутливість до дефектів, що тільки зароджуються [12, 13], складність інтерпретації результатів [14, 15]. Недоліком

методу спектрального аналізу споживаного струму є можливість отримання невірних результатів через появу помилкових гармонік сигналу при різних перешкодах електричної мережі [16, 17]. Ультразвукова і акустична дефектоскопія є складно застосовними безпосередньо на АД в процесі його експлуатації на виробництві. Методи акустичної емісії недостатньо чутливі до електричних пошкоджень низьковольтних двигунів [18]. Застосування оцінки зворотного магнітного поля, що виникає в результаті виткового замикання, є малоефективною при невеликій кількості замкнутих витків [19].

У роботах [20, 21] проаналізовано практику застосування планово-попереджувальних ремонтів (ППР) у виробництві. Виділено основні недоліки системи ППР, до яких відносять: 1) велика трудомісткість ремонту, особливо поточного; 2) електротехнічний персонал змушений виконувати великий обсяг робіт для визначення технічного стану АД, часто без особливої необхідності, тому що у більшості АД задовільний технічний стан; 3) будь-які операції розбирання та збирання (особливо справного обладнання) знижують показники надійності і термін їх експлуатації.

Дослідження, проведені в [22] показують, що при планово-попереджувальних ремонтах і випробуваннях не менше 50 % обслуговувань виконується без фактичної потреби. Для більшості АД при цьому не знижується частота виходу з ладу. Надійність роботи після обслуговування з розбиранням і заміною деталей часто знижуються. Близько 70 % дефектів викликано проведенням робіт з обслуговування.

Альтернативою ППР запропонована методика планового діагностування обладнання [23]. Застосування данної методики, в умовах, коли параметри середовища і ПЯЕ мережі живлення динамічно змінюються, не завжди коректно, особливо при експлуатації АД в тривалому режимі. Епізодичне визначення технічного стану АД тільки в періоди технологічних пауз не дозволяють своєчасно виявити початковий момент передаварійної ситуації.

В умовах економічної доцільності ряд промислових підприємств змушений переходити від системи планово-попереджувальних ремонтів до

ремонтів і профілактики за фактом виявлення передаварійної ситуації, що вимагає удосконалення відомих і розробки нових методів неруйнівного контролю. При обслуговуванні по фактичному стану не порушується нормальна робота АД через втручання людини.

В даний час актуальною є розробка методів і засобів безперервної діагностики, захисту і прогнозування терміну експлуатації АД, що дозволяє здійснювати профілактичні заходи або ремонт на початковій стадії виявленого дефекту. Достовірне виявлення початкової стадії появи передаварійної ситуації потребує вдосконалення існуючих методів і розробки нових методів контролю.

1.2 Фактори, що впливають на термін експлуатації асинхронних двигунів

Термін експлуатації АД, які працюють в умовах технологічних перевантажень, агресивних середовищ і знижених ПЯЕ, знижується в 3–8 разів. Згідно [24, 25], щорічно 20–25 % від загальної кількості встановлених електродвигунів виходять з ладу.

У табл. А.1 наведені причини виходу АД з ладу, основною причиною аварійного виходу АД є пошкодження статорних обмоток.

У 75 % випадків скорочення терміну служби ізоляції відбувається через прискорене старіння ізоляції обмоток. Результатом такого старіння в 75–80 % являються виткові замикання. При замиканнях більше 50 % витків виникає несиметрія струмів, яку можуть ідентифікувати багато засобів захисту від несиметричних режимів і відключити такий АД від мережі. Замикання 3–15 % витків не призводять до значних перекосів струмів по фазах, і АД продовжує працювати в звичайному режимі. небезпека полягає в тому, що в місці замикання утворюються короткозамкнені витки, в яких починає індукувати струм, що спричиняє додаткове нагрівання сусідніх непошкоджених витків. При тривалому тепловому впливі ізоляція справних витків починає прискореними темпами старіти, що з часом призведе до серйозних аварійних ситуацій у вигляді межфазного замикання або замикання на корпус.

Причинами утворення міжвиткових замикань в обмотках статора АД є: загальний нагрів обмоток, локальний перегрів ізоляції обмоток і механічні дії на дроти, що виходять з пазів статора АД.

Загальний нагрів ізоляції обмоток АД – це струмові перевантаження, викликані технологічними порушеннями роботи приводу, тривалими пусками АД, неповно фазними режимами мережі живлення і струмових ланцюгів, пошкодженнями механічних частин АД, наявністю несиметрії і відхиленнями напруг мережі живлення.

Основною методикою визначення температури вузлів АД є використання еквівалентних теплових схем, які дозволяють побачити вплив режиму роботи на нагрів АД. Джерелами тепла є втрати у вузлах двигуна. Теплові схеми мають різні ступені деталізації. Найбільш простою є теплова модель, в якій АД представляється єдиним тілом [26]. Теплова модель, що складається з двох тіл – статора і ротора [27], враховує теплообмін між статором і ротором. Існує теплова модель, в якій джерелами тепла є статор, ротор і магнітопровід [28]. Існують і більш докладні еквівалентні схеми заміщення [29, 30].

Теплові моделі з трьома і більше джерелами тепла є найбільш придатними при проведенні ґрунтовних конструкторських розрахунків. Основним недоліком їх застосування в практичних інженерних розрахунках є необхідність в розрахунках численних коефіцієнтів, що фігурують в матрицях теплоємностей і теплових провідностей. Тому на практиці часто використовують більш спрощені моделі.

В роботі [31] досліджена узагальнена теплова модель АД, в якій враховуються тільки три основних джерела теплоти, тобто електричні втрати в обмотці статора, електричні втрати в обмотці ротора і втрати в сталі.

Рівняння для визначення середньої температури має вигляд:

$$\theta_1 = R_{11}\Delta P_1 + R_{12}\Delta P_2 + R_{13}\Delta P_3 \quad (1.1)$$

де θ_1 – середнє перевищення температури обмотки статора АД, °С;
 $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$ – відповідно, електричні втрати в обмотці статора, електричні

втрати в обмотці ротора і втрати в сталі, Вт; R_{11}, R_{12}, R_{13} – невідомі узагальнені теплові опори еквівалентної теплової схеми заміщення, °С/Вт.

Невідомі теплові опори в рівнянні (1.1) визначаються за допомогою трьох дослідів, похибка розрахунку зазначеним методом становить 2–3 %.

Теплові опори розраховуються за допомогою емпіричних виразів:

$$R_{11} \cong \frac{K}{D_{a1} l_1}; R_{12} \cong R_{13} \cong 0,6 R_{11} \quad (1.2)$$

де D_{a1} – зовнішній діаметр сердечника статора, см; l_1 – довжина сердечника статора, см; K – коефіцієнт, що дорівнює 27 для АД потужністю 0,5÷10 кВт і 35 для АД потужністю 11÷250 кВт.

В [20] з точки зору нагріву АД розглядається як система двох тіл – обмотки статора і сталі. Обмотка (тіло 1) і сталь (тіло 2) мають теплоємності C_1 і C_2 і пов'язані між собою тепловою провідністю L_{12} , а з навколишнім середовищем – тепловими провідностями L_1 і L_2 . В обмотці виділяються втрати P_1 , а в сталі – втрати P_2 . Теплоємність навколишнього середовища $C_{\text{сер}}$ дорівнює нескінченності, а температура середовища $V_{\text{сер}}$ постійна.

Рівняння теплового балансу для обмотки і сталі:

$$P_1 \cdot (1 + \alpha \tau_1) dt = C_1 d\tau_1 + L_1 \tau_1 dt + L_{12} \cdot (\tau_1 - \tau_2) dt \quad (1.3)$$

$$P_2 dt + L_{12} \cdot (\tau_1 - \tau_2) dt = C_2 d\tau_2 + L_2 \tau_2 dt \quad (1.4)$$

де τ_1 і τ_2 – перевищення температури відповідно обмотки і сталі над температурою навколишнього середовища; $\alpha = 0,0043$ [1/°С] – температурний коефіцієнт опору міді.

Після відповідних перетворень формула для розрахунку сталої температури обмотки в функції струму навантаження АД по відношенню до номінального значення набуває вигляду:

$$\Delta\Theta_{\text{уст}} = \Delta\Theta_{\text{ном}} \cdot \frac{a + k^2}{1 + a - \alpha \cdot \Delta\Theta_{\text{ном}} \cdot (k^2 - 1)} \quad (1.5)$$

де $\Delta\Theta_{\text{уст}}$ – усталене перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища; $\Delta\Theta_{\text{ном}}$ – перевищення температури

обмотки, викликане номінальним струмом над температурою навколишнього середовища; $a = \frac{\Delta P_{c.ном}}{\Delta P_{m.ном}}$ – коефіцієнт номінальних втрат в двигуні; $\Delta P_{c.ном}$ – номінальні втрати в сталі АД; $\Delta P_{m.ном}$ – номінальні втрати в міді АД; $k = \frac{I_p}{I_{ном}}$ – кратність робочого струму I_p по відношенню до номінального $I_{ном}$.

В роботі [32] температуру ізоляції обмоток при виникненні струмового перевантаження у відносних одиницях, розраховують застосовуючи одностільну теплову модель. В роботі [33], з достатньою для практичних цілей точністю, застосовується рівняння нагріву, виведене для однорідного тіла, нагрівання якого відбувається за рахунок виділених в ньому втрат. Аналогічно в роботі [34] досліджена доцільність використання в умовах експлуатації теплової моделі, що представляє АД однорідним тілом, причому в якості її вихідного параметра пропонується розглядати температуру лобових частин обмотки статора. Тому температуру лобових частин розглядають як критичний по нагріванню елемент АД. Динамічна теплова модель описується наступним диференціальним рівнянням:

$$\Delta P = \alpha \cdot \Theta + \frac{\Delta \Theta}{\Delta t} \cdot c \quad (1.6)$$

де Θ – перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища; $\Delta \Theta$ – збільшення температури двигуна, що відбулося за час Δt ; α – коефіцієнт теплопередачі; c – питома теплоємність.

В роботі [35] вхідними параметрами теплової моделі, описуваної рівнянням (1.6), приймають: споживану потужність, що динамічно змінюється, і показники якості електроенергії, які змінюються в часі. Температуру АД, яка змінюється під час роботи, знаходять шляхом чисельного інтегрування рівняння (1.6):

$$\Theta_k = \Theta_{k-1} + \frac{1}{c} \cdot (\Delta P - A \cdot \Theta_{k-1}) \cdot h \quad (1.7)$$

де Θ_k, Θ_{k-1} – значення перевищення температури АД над температурою навколишнього середовища на k -му і $(k-1)$ -му кроці інтегрування; h – крок інтегрування.

Результати досліджень [34] на АД типу 4А80А4У3 показали, що похибка між теоретичним розрахунком і експериментальними вимірами температури обмоток при застосуванні одностійної теплової моделі при несиметрії напруг 4 % склала 3,2 %. Наведені дані показують, що залежність (1.7) дозволяє врахувати зміни нагріву АД в процесі експлуатації.

Описані вище дослідження, дозволяють говорити про адекватність застосування одностійної теплової моделі в розрахунках температур обмоток при навантаженні, що змінюється, в умовах несиметричної мережі і запиленні обмоток статора.

Згідно з правилами улаштування електроустановок [36], на АД напругою до 1000 В та потужністю від 0,25 до 250 кВт з короткозамкнутим ротором повинні встановлюватися такі пристрої релейного захисту: захист від міжфазних коротких замикань; захист від замикань на землю; захист від перевантаження; струмове відсічення.

Ці засоби виконують захист АД після виникнення, розвитку несправності і її переходу в аварійний режим, в результаті зниження ПЯЕ, обриву фази або виткового замикання.

Локальний перегрів ізоляції обмоток АД, є причиною міжвиткових замикань, що виникають в результаті локального старіння ізоляції, через запилення лобових частин обмотки. Дослідження впливу пилу на додатковий нагрів обмоток носить в основному експериментальний характер. Перевищення температури ізоляції під шаром пилу і струмові перевантаження призводять до скорочення терміну експлуатації АД в 2,8–3,5 разів. Розробка методів раннього діагностування допустимого запилення ізоляції обмоток АД і виявлення струмових перевантажень АД недостатньо вивчені і є актуальним питанням для АД, що працюють в умовах підвищеного запилення навколишнього середовища. У засобах діагностики запилення обмоток необхідно чітко

ідентифікувати та розділяти загальний перегрів АД від локального перегріву в місці запилення, тобто в лобових частинах обмотки.

Питання раннього діагностування виткового замикання в статорних обмотках АД, в умовах, коли змінюються ПЯЕ мережі живлення, є не до кінця вивченим і залишається актуальним. А методи діагностики виткових замикань повинні бути: неруйнівним, мати високу точність і інформаційність.

В умовах, коли змінюються навантаження на валу АД і параметри ПЯЕ мережі, необхідно оцінити достовірність існуючих методик визначення параметрів схем заміщення АД і розробити математичну модель оцінки кількості замкнута витків в обмотці статора.

1.3 Вплив відхилень показників якості мережі живлення на температуру ізоляції обмоток АД

Для оцінки теплового старіння ізоляції статорних обмоток АД при наявності несиметрії і відхилень напруг мережі живлення необхідно визначити розподіл потужності втрат в статорних обмотках.

В роботі [37] проведено дослідження і виявлено, що вплив на втрати потужності в обмотках статора АД при заданому значенні коефіцієнта несиметрії напруг k_{2U} надає кут зсуву по фазі між симетричними складовими напруги прямої і зворотної послідовності $\Delta\varphi = \varphi_{ПР} - \varphi_{ОБР}$.

В роботі [38], наводиться емпірична формула для розрахунку додаткових втрат потужності від несиметрії напруг

$$\Delta P_{АД} = 2,41 k_{П}^2 k_{2U}^2 \Delta P_1 \quad (1.8)$$

де $k_{П}$ – кратність пускового струму при номінальній напрузі; $k_{2U} = U_2/U_1$ – коефіцієнт зворотної послідовності напруг, який дорівнює відношенню напруги зворотної послідовності U_2 до напруги прямої послідовності U_1 ; ΔP_1 – втрати в обмотці статора при номінальному струмі, Вт.

У роботах [39, 40], елементи конструкції кожної фази статора виділені у вигляді окремих вузлів, пов'язуючи це з тим, що потужність джерел тепла в обмотках статора при несиметрії може мати істотні відмінності.

В роботі [41] для визначення температури двигуна використана трифазна теплова модель із зосередженими параметрами, що складається з двох теплових схем заміщення – окремо для статора і ротора.

В роботі [42] представлена теплова модель, основні перепади температур при русі теплового потоку відбуваються в товщі ізоляції і між охолоджуваними поверхнями і охолоджуючим середовищем.

В роботі [43] для визначення температури ізоляції обмоток використовували метод еквівалентних гріючих втрат, який заснований на принципі суперпозиції (накладення перевищень температури, які створюються кожним видом втрат):

$$\Delta\Theta_{об} = k_{эл1} \cdot \Delta P_{эл1} + k_{ст} \cdot \Delta P_{ст} + k_{эл2} \cdot \Delta P_{эл2} + k_{мех} \cdot \Delta P_{мех} + k_{д} \cdot \Delta P_{д} \quad (1.9)$$

де $\Delta\Theta_{об}$ – перевищення температури обмотки статора над температурою навколишнього середовища, °С; $k_{эл1}$, $k_{эл2}$, $k_{ст}$, $k_{мех}$, $k_{д}$ – коефіцієнти, що характеризують вплив втрат в обмотці статора на нагрів обмотки статора, ротора, втрат в сталі, механічних і додаткових втрат, визначаються по [44]; $\Delta P_{эл1}$, $\Delta P_{эл2}$ – втрати в обмотках статора і ротора, Вт; $\Delta P_{ст}$ – втрати в сталі, Вт; $\Delta P_{мех}$, $\Delta P_{д}$ – механічні і додаткові втрати, Вт.

Для розрахунку температури обмотки статора при несиметрії в залежності від значення коефіцієнта несиметрії можна використовувати емпіричний вираз, наведений в [45]:

$$\Theta_{об} = \Theta \cdot \left[1 + 2 \cdot (k_{2U\%})^2 \right] \quad (1.10)$$

де Θ – температура обмоток при симетричній нарузі мережі, °С.

Згідно [46] температура обмоток, при наявності несиметрії напруг, може визначатися за емпіричним виразом:

$$\Delta\Theta_{(2)} = \frac{2 \cdot k_{2U\%}^2}{100} \cdot \Theta_1, \quad (1.11)$$

де $\Theta_{(2)}$ – температура обмоток при коефіцієнті несиметрії k_{2U} , °C; Θ_1 – температура при симетричному режимі роботи, °C.

Вплив відхилення напруги на нагрів обмоток статора АД вивчено в роботах [47–50], де досліджено вплив відхилення напруги на електромеханічні характеристики і на тепловий стан двигуна. У даних роботах для аналізу теплового стану АД використовуються еквівалентні теплові схеми, представлені в [51].

У роботах [52] та [53] аналіз впливу несиметрії і відхилень напруг на режими роботи АД проводиться за допомогою комп'ютерного моделювання в середовищі MatLab. Виконано дослідження статичних і динамічних характеристик АД при несиметричній напрузі мережі живлення.

Несиметричні режими можуть бути викликані наявністю різних опорів за фазами АД, в результаті неякісних ремонтів, виткових замикань в обмотках з одним або декількома паралельними провідниками.

Описані вище методи припускають розрахунок додаткового нагріву обмоток статора АД при впливі тільки несиметрії або відхилення напруги. Однак у важких умовах промисловості АД знаходяться під постійним впливом і несиметрії, і відхилення напруг і можуть мати несиметричну обмотку статора. Дослідження теплових режимів обмоток АД при спільному впливі несиметрії, відхилень напруг і несиметрії опорів статора є актуальними при аналізі зниження термінів експлуатації АД. У відомих джерелах дані питання вивчені недостатньо.

1.4 Аналіз методів діагностики і захисту АД в умовах струмових перевантажень при підвищеній запиленості

Дослідження впливу пилу на додатковий нагрів обмоток носить в основному експериментальний характер. Деякі автори досліджували вплив пилу на конкретних прикладах, в роботі [54] показано, що наявність на

поверхні обмотки статора шару вугільного пилу товщиною 0,9 см призводить до підвищення її нагріву приблизно на 10°C для АД потужністю 30 кВт.

Дослідити питання підвищення температури покритої пилом ізоляції в лобовій частині обмотки можна, застосовуючи теорію теплопередачі. Адже процес протікання тепла через шар пилу є не що інше, як перенесення тепла через плоску стінку, де джерелом тепла є обмотка, плоскою стінкою – пил, а навколишнім середовищем – внутрішнє повітря АД. Щільність теплового потоку відповідає втратам потужності в обмотках АД.

Відповідно до теорії теплообміну [55] вихідними даними для розрахунку теплопередачі через плоску стінку (рис. 1.1) є: товщина δ і теплопровідність λ пласкої стінки, температура гарячого середовища $t_{жс1}$, температура холодного середовища $t_{жс2}$, коефіцієнти тепловідведення на гарячій α_1 і холодній α_2 стороні. Невідомими являються температури поверхонь стінки t_{c1} і t_{c2} .

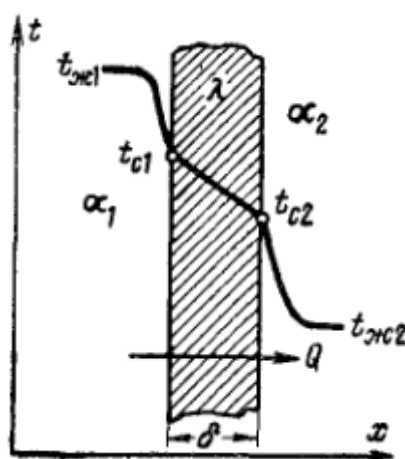


Рис. 1.1 Теплопередача через одношарову плоску стінку

При сталому тепловому стані щільність теплового потоку від гарячого середовища до холодного описується рівняннями:

$$\begin{aligned} q &= \alpha_1 \cdot (t_{жс1} - t_{c1}) \\ q &= \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{c1} - t_{c2}) \\ q &= \alpha_2 \cdot (t_{c2} - t_{жс2}) \end{aligned} \quad (1.12)$$

Після відповідних перетворень отримуємо вираз, що зв'яже температури гарячого та холодного середовища:

$$t_{жс1} - t_{жс2} = q \cdot R \quad (1.13)$$

де $R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$ – загальний термічний опір теплопередачі.

Можливість застосування методики теплового розрахунку плоскої стінки для оцінки локального теплового старіння ізоляції обмоток АД є цілком прийнятною. Необхідно з достатньою точністю визначити коефіцієнт теплопровідності матеріалу пилю. Для цього потрібно провести дослідження матеріалів, які є основними джерелами пилю на промислових підприємствах.

Дослідження показали, що запилення лобових частин обмотки відбувається у АД потужністю понад 15 кВт, у яких висота спинки сердечника статора більше 3 см. У таких АД виліт лобової частини з паза складає більше 2-х см, а її вигин по висоті можна порівняти з розміром спинки статора, що дозволяє пилу накопичуватися на поверхні. На обмотках АД потужністю менше 5,5 кВт осідання пилю не призводить до локального перегріву.

Тому питання розробки математичної моделі залежності локального нагріву ізоляції від рівня запиленості лобової частини обмоток АД, потужністю 15-110 кВт, є актуальним.

1.5 Аналіз методів і пристроїв виявлення виткових замикань в статорних обмотках АД в умовах погіршеної якості електроенергії

Несиметрія опору статорних обмоток проявляється при виткових замиканнях, що викликає несиметрію фазних струмів. В умовах ПЯЕ мережі живлення, що динамічно змінюється, труднощі виявлення початкового моменту виткового замикання виникають через складність визначення справжнього джерела несиметрії струмів. Адже незначну несиметрію струмів можуть викликати як несиметрія і відхилення напруг, так і невелика кількість замкнутих витків. Потрібна розробка алгоритму, що дозволяє виявляти при несиметричних напругах появу виткових замикань з достатньою точністю.

Останнім часом широко розвиваються методи безперервної діагностики, засновані на контролі споживаного струму [56]. Для обробки виміряного струму застосовують методи спектрального аналізу, що дозволяють достовірно визначати стан різних елементів АД. Основним недоліком методів функціональної діагностики, які використовують спектральний аналіз струмів статора, є необхідність врахування впливу параметрів мережі живлення.

В роботах [57]–[60] запропоновані способи і пристрої тестової діагностики. В них різними способами фіксують значення ЕРС, швидкість його затухання або зростання на відключеному від мережі двигуні. По зробленим замірам роблять висновки про наявність виткового замикання.

Вищеописані способи відносяться до методів тестової діагностики і не дозволяють виявляти початковий момент появи виткового замикання в обмотках АД в період експлуатації.

В роботі [61] представлений спосіб захисту АД від виткових замикань, в якому одночасно вимірюють амплітуди першої гармоніки струму і амплітуди резонансних гармонік, додатково вимірюють їх частоти, які існують в діапазоні зміни індуктивності АД від пуску до усталеного режиму. Як відомо з [62], рівні фазних струмів залежать від відхилень напруги мережі живлення, що призводить до відхилень амплітуд першої і вищих гармонійних складових струмів, що впливає на точність визначення початкового моменту виткового замикання в процесі експлуатації АД на виробництві.

В роботі [63] запропонована методика діагностики та ідентифікації несправностей обмоток АД в процесі його експлуатації. Метод заснований на формуванні годографа вектора магнітного поля і його координат, отриманих методом моделювання за реальними фазними струмами, і порівняння з годографом векторів магнітних полів, їх координат і енергетичних показників справного АД і цього ж двигуна з модельованими тестовими несправностями.

В роботі [64] запропоновано ряд діагностичних параметрів для ідентифікації місця знаходження і кількості замкнутих витків. До них

відносяться: коефіцієнти чутливості по потужності, по току, по ковзанню, по магнітній індукції в зубцях.

В роботі [65] досліджено вплив виткових замикань на індукцію в повітряному зазорі. Показано, що при збільшенні кількості замкнутих витків, ампер-витки в цих витках збільшуються, відповідно інтенсивність магнітного поля в повітряному зазорі теж збільшується. Запропоновано алгоритм, який дозволяє діагностувати вади обмотки статора за величиною індукції в повітряному зазорі, за умови розміщення на одному з полюсних поділів трьох датчиків поля.

У зазначених роботах [61, 63–65] не розглядаються питання роботи АД при несиметричних напругах, які призводять до спотворення магнітного поля.

В роботі [66] розроблено діагностичні ознаки, що дозволяють виявити наявність розриву стрижнів ротора або пошкодження обмотки статора. Суть методики полягає в порівнянні напруги при русанні з місця ротора АД в процесі експлуатації з еталонною напругою. Еталонною напругою є напруга, що підводиться до справного статора, при якій ротор рушить з місця.

Застосування даної методики можливе тільки на спеціально обладнаних стендах, що обмежує її можливості в застосуванні в системах безперервної діагностики раннього виявлення виткових замикань.

Розробка методу безперервної діагностики та виявлення початкового моменту появи виткового замикання в обмотці АД, що враховує несиметрію лінійних напруг мережі для АД є актуальною.

1.6 Аналіз причин дисбалансу опорів обмоток статора АД

Конструктивно обмотки АД поділяють на такі типи [67]: 1) котушкові обмотки; 2) секційні обмотки, одношарові і двошарові; 3) стрижневі обмотки.

Розрізняють одношарові обмотки (коли сторона котушки займає весь паз) і двошарові обмотки (коли сторона котушки займає половину паза). За типом укладання розрізняють: петльові і хвильові обмотки [68].

Характерною особливістю котушкових обмоток є концентричне розташування витків кожної котушки. Такі обмотки застосовуються як для статорів, так і для роторів. Котушкові обмотки відносяться до одношарових обмоток, так як кожна котушка під час намотування займає весь паз. Котушкові обмотки широко застосовуються на АД потужністю від 0,5 до 30 кВт. Кількість витків, покладених в пазу, варіюється від 40 до 200 витків. Раннє виявлення моменту початку замикання 5–20 % витків в таких обмотках є актуальним завданням.

Секційні обмотки вкладаються в пази заздалегідь намотаними секціями. Секційні обмотки бувають одношарові і двошарові. Секційні обмотки застосовуються лише в АД з відкритими або напіввідкритими пазами потужністю 30–90 кВт. Виткові замикання до 20 % витків в одній із секцій двошарової обмотки викликають зміну основного магнітного поля і поля розсіювання зубців, що достатньо для можливості їх визначення методами, які діагностують виткові замикання за зміною магнітних полів. Замикання в одношарових секційних обмотках аналогічні котушковим обмоткам і вимагають додаткових досліджень.

Основним елементом стрижневої обмотки є стрижень. Застосовується в двигунах потужністю більше 90 кВт і АД спеціального призначення потужністю від 37 до 75 кВт. У якості обмотувального дроту застосовують стрижні прямокутного перетину. Замикання одного витка в таких обмотках викликає несиметрію струмів до 20 %, яка може бути ідентифікована існуючими засобами діагностики виткових замикань. Обумовлено це малим числом витків в котушці, від 3 до 16 витків.

Петльові обмотки найчастіше застосовуються для АД потужністю від 0,5 до 110 кВт для всіх типів конструкцій обмоток. Хвильові обмотки застосовуються в основному в синхронних машинах, гідрогенераторах і турбогенераторах [69] при струмах в паралельних гілках понад 1000 А.

Проведені дослідження показали, що більше 90 % АД потужністю від 0,5 до 90 кВт, що вийшли з ладу, мають котушкові, петльові одно- і двошарові

обмотки. З огляду на те, що такі обмотки мають велику кількість витків, часто паралельні провідники, міжвиткову ізоляцію, що складається лише з власної ізоляції провідників, під впливом динамічних і теплових впливів більш інших схильні до ймовірності виникнення виткових замикань.

Виткові замикання в одношарових петльових обмотках, замикання паралельних провідників, обриви провідників, неякісні ремонти призводять до появи несиметричних опорів статорних обмоток, які при симетричній напрузі викликають несиметрію струмів в фазах. На рис. 1.2 показані основні види та причини виникнення несиметрії опорів.

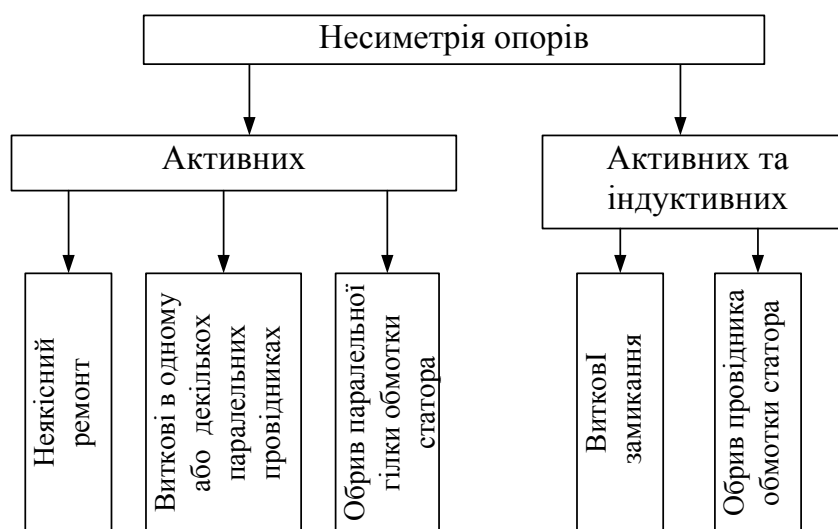


Рис. 1.2 Види і причини несиметрії опорів обмотки статора

1.6.1 Несиметрія активних опорів обмотки статора

Несиметрія активних опорів АД може бути наслідком неякісного ремонту. В сучасних економічних умовах промислові підприємства багаторазово відновлюють АД, які вийшли з ладу. Через обмежені кошти на ремонт обладнання підприємства часто змушені скорочувати обсяги ремонтних робіт. В результаті знижується якість, як самої роботи, так і наступних контрольних випробувань. Зрозуміло, що зниження обсягів випробувань безпосередньо впливає на кількість відмов АД після ремонтів.

Дослідження післяремонтних АД, проведені в електроремонтних цехах металургійних комбінатів «Метінвесту» ім. Ілліча і Азовсталі та Маріупольському морському державному торговому порту, показали наявність дисбалансу активних опорів до 4,8 % після повної заміни обмоток. Дані досліджень наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Коефіцієнт дисбалансу активних опорів післяремонтних АД

	$P < 15$ кВт	$P = 15 - 63$ кВт	$P > 75$ кВт
Коефіцієнт дисбалансу опорів r_{dc} , %	0 – 4,8 %	0 – 4,0 %	0 – 2 %
% від загального числа ремонттованих двигунів	20 %	11 %	4 %

Аналіз даних табл. 1.1 показує, що найбільша кількість АД з дисбалансом активних опорів після ремонту мають двигуни потужністю менше 15 кВт.

В обмотці АД, що має кілька паралельних провідників в пазу, замикання витків або обрив в одному або декількох паралельних провідниках також призводить до виникнення несиметрії активних опорів в обмотках. Приклад виткових замикань в обмотці яка має 4 паралельних провідника представлений на рис. 1.3.

Відповідно до [70] активний опір обмотки статора визначається виразом:

$$r_1 = \rho_{Cu} \cdot \frac{10^3 \cdot w_1 \cdot l_{cp}}{s \cdot m_1 \cdot a_1}; \quad (1.14)$$

де $\rho_{Cu} = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (\Theta - 20))$ – питомий опір міді при робочій температурі Θ °С; $\rho_{20} = 17.1 \cdot 10^{-9}$ Ом·мм – питомий опір міді при 20 °С; α – температурний коефіцієнт опору міді, $\alpha = 0,004$ °С⁻¹; w_1 – кількість витків обмотки; l_{cp} – середня довжина витка в обмотці, мм; s – площа поперечного перерізу елементарного провідника, мм²; m_1 – число паралельних провідників обмотки статора; a_1 – число паралельних гілок в фазі статора.

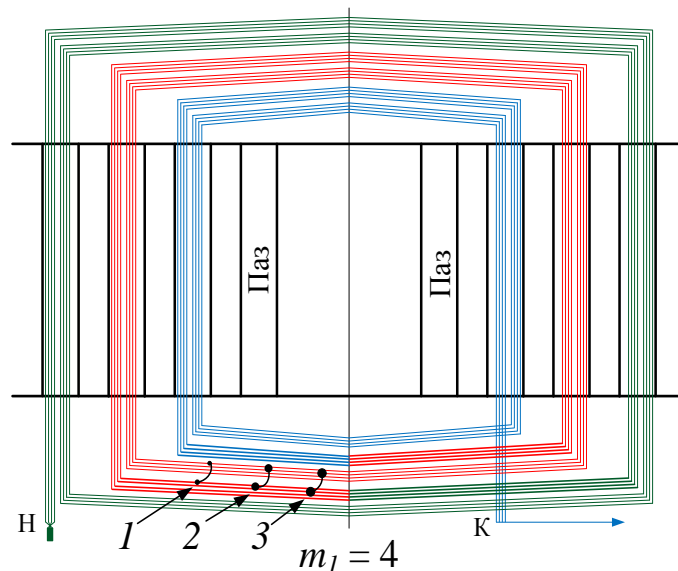


Рис. 1.3 Зображення кількох витків катушечної групи з 4 паралельно з'єднаними провідниками $m_1=4$:

- 1 – замикання одного витка в 1 паралельному провіднику;
- 2 – замикання одного витка в 2 паралельних провідниках;
- 3 – замикання одного витка в 3 паралельних провідниках

З виразу (1.14) активний опір фази обмотки статора залежить від числа витків, середньої довжини витка, числа паралельних провідників, числа паралельних гілок і від температури АД. Активний опір зменшується пропорційно кількості замкнутих витків при виткових замиканнях. Збільшення опору відбувається при замиканні між собою паралельних провідників в котушці обмотки статора. При замиканні двох витків одного паралельного провідника в лобовій частині обмотки опір цього витка, відповідно до формули (1.14), збільшиться в $\left(\frac{1}{m_1 - 1}\right)$ раз. При замиканні між собою двох витків двох паралельних провідників, опір цього витка збільшиться в $\left(\frac{1}{m_1 - 2}\right)$ раз, і т.д.

Наявність відхилень активних опорів обмоток статора АД призводить до зміни фазових кутів між напругою і струмом. Дослідження вимагає оцінку впливу зміни фазового кута на додаткові втрати потужності в АД.

1.6.2 Несиметрія активних і індуктивних опорів обмотки статора АД

Одночасна зміна активних і індуктивних опорів в обмотках статора відбувається при виключенні частини витків з обмотки статора, яке відбувається при виникненні виткових замикань. Індуктивний опір обмотки статора визначається за виразом [71]:

$$x_1 = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot l_1 \cdot w_1^2 \cdot \lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^{-8}} \quad (1.15)$$

де f_1 – частота мережі; l_1 – довжина сердечника статора; p – число пар полюсів; q_1 – кількість пазів на полюс; $\lambda_1 = \lambda_{n1} + \lambda_{\delta 1} + \lambda_{nl}$ – коефіцієнт провідності розсіювання обмоток статора; λ_{n1} – коефіцієнт провідності паза; $\lambda_{\delta 1}$ – коефіцієнт провідності диференціального розсіювання; λ_{nl} – коефіцієнт провідності розсіювання лобових частин обмотки.

Індуктивний опір обмотки статора при виткових замиканнях, тобто зменшенні числа витків, зменшується в квадратичній залежності.

Головна індуктивність фази, згідно [70], визначається виразом:

$$L_\Gamma = \frac{4\mu_o}{p \cdot \pi^2} \cdot (w_1 \cdot k_{ob})^2 \cdot \frac{\tau \cdot l_1}{\delta \cdot k_\delta \cdot k_\mu} \quad (1.16)$$

де $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнітна постійна; w_A – число витків фази А; k_{ob} – обмотувальний коефіцієнт статора; τ – полюсний розподіл; δ – величина повітряного зазору; k_δ – коефіцієнт повітряного зазору; k_μ – коефіцієнт насичення магнітного кола АД.

Індуктивний опір ланцюга намагнічування дорівнює:

$$x_\mu = \omega \cdot L_\Gamma. \quad (1.17)$$

Величина головного індуктивного опору АД прямо пропорційна квадрату числа витків при незмінних геометричних параметрах магнітної системи.

Відповідно до виразу (1.16) індуктивність фази не залежить від числа паралельних провідників. При витковому замиканні в одному або декількох

паралельних провідниках змінюється тільки активна складова опору обмотки статора.

У роботах [72, 73], наведено методику розрахунку струмів в фазах, крутного моменту і визначення допустимого навантаження АД при несиметрії обмоток статора, викликаній виключенням частини витків.

Дана методика розроблена для визначення допустимих навантажень на валу АД з конструкцією усічених статорних обмоток. Застосування даної методики у випадках виявлення виткових замикань на ранній стадії, при динамічній зміні напруги живлення, є складним, тому що вона має малу чутливість при невеликій кількості замкнутих витків.

Точність розрахунку активних і індуктивних опорів при виткових замиканнях залежить від точності розрахунку параметрів схеми заміщення АД. У системах діагностики виткових замикань в режимі онлайн підвищення чутливості і точності виявлення початкового моменту передаварійної ситуації залежить від достовірності визначення параметрів схем заміщення АД.

1.7 Аналіз методів визначення параметрів схеми заміщення АД

У практичних розрахунках механічних характеристик АД представляють еквівалентною схемою заміщення, в якій електромагнітний зв'язок замінений електричним. Параметри ланцюга ротора приводяться до параметрів ланцюга статора. Найбільш повно характеристики АД і ефекти, що відбуваються в ньому, відображає Т-подібна схема заміщення АД (рис. 1.4 а)). Вона дозволяє знайти точні розрахункові формули для всіх величин, що характеризують електромагнітні процеси в АД [70]. Для спрощення розрахунку цих величин Т-образну схему доцільно перетворити в еквівалентну Г-подібну схему заміщення (рис. 1.4 б)), при цьому точність розрахунку параметрів трохи знижується.

На рис. 1.4 позначені: r_1 , x_1 – активний опір і індуктивний опір розсіювання обмотки статора; r_2 , x_2 – приведені до обмотки статора активний опір і індуктивний опір розсіювання роторної обмотки; r_μ , x_μ – активний та

індуктивний опори намагнічуючого контуру; c_1 – коефіцієнт приведення Т-подібної схеми заміщення до Г-образної схеми заміщення.

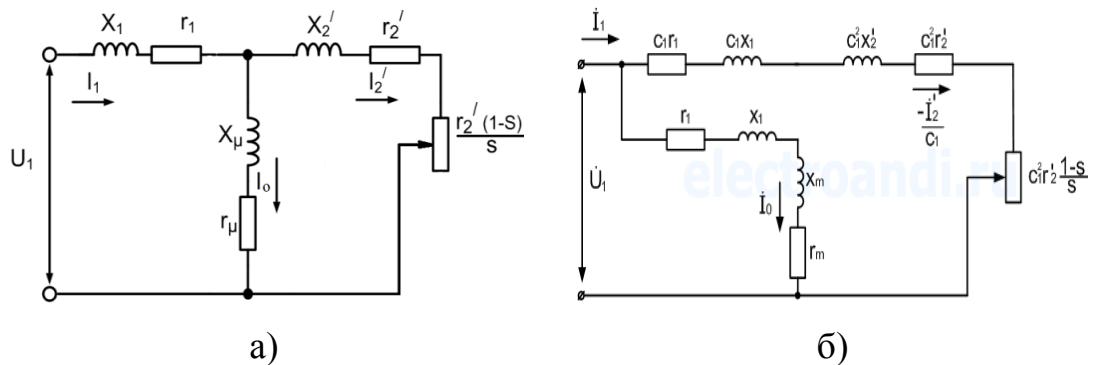


Рис. 1.4 а) Т-образна схема, б) Г-образна схема заміщення АД

Існує безліч способів розрахунку параметрів схеми заміщення за каталожними даними.

В роботі [74] проведено порівняльний аналіз двох методів розрахунку параметрів схеми заміщення. Один з них заснований на інженерних розрахунках при проектуванні машин [75], другий – на спрощеній методиці, приведений в [76]. Основні результати представлені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Параметри схеми заміщення, розраховані різними способами

Спосіб розрахунку	Параметри схеми заміщення				
	r_1 , Ом	x_1 , Ом	r_2' , Ом	x_2' , Ом	x_μ , Ом
Методика [75]	0.091	1.044	0.036	0.834	58.27
Методика [76]	0.036	0.305	0.020	0.305	19.00

Отримані параметри спроектованого АД по [75] і розрахованого по [76] порівнювалися шляхом комп'ютерного моделювання. В результаті були отримані наступні висновки: розрахунок по [75] є більш глибоким, враховує масу параметрів і факторів, але вимагає значної кількості розрахунків і не виключає можливих помилок; розрахунок по [76] дозволяє відносно швидко, але з похибкою розрахувати параметри схеми заміщення.

В роботі [77] наведені експериментальне і аналітичне визначення параметрів схеми заміщення АД. Експериментальне визначення засноване на результатах вимірювань струмів, напруг і потужності в обмотці ланцюга статора при двох різних ковзаннях і довільно заданому одному з параметрів ротора, а при аналітичному способі задача зводиться до вирішення системи нелінійних алгебраїчних рівнянь і також при довільно заданому одному з параметрів ротора.

В роботі [78] параметри схеми заміщення АД визначаються при несиметричному живленні статора і нерухомому роторі. На основі проведених дослідів і припущень про рівність індуктивних опорів статора і ротора складається система з 3-х нелінійних рівнянь для визначення параметрів АД.

Автори [79] пропонують безітераційну методику визначення параметрів АД за каталожними даними. Застосування ітераційних методів вважається, на думку авторів, складними для використання на практиці, і вони пропонують просту методику визначення параметрів АД, застосовуючи спрощені аналітичні вирази. У методиці [79] відхилення параметрів викликані використанням спрощеного аналітичного виразу для визначення струму холостого ходу. Похибка вносить і широкий діапазон змін коефіцієнта β . Використання рекомендованого значення струму часткового навантаження 0,25 або 0,5 при визначенні струму холостого ходу для АД потужністю до 5 кВт призводить до похибки розрахунку до 20 %, оскільки I_o невеликих АД може досягати 80 %. Для АД потужністю від 5,5 до 45 кВт похибка при визначенні струму I_o , при зазначеному навантаженні, складе від 10 до 15 %. Для АД потужністю понад 45 кВт розкид коефіцієнта β викличе відхилення розрахункових значень параметрів до 10 %. В даному методі відсутній розрахунок активного опору намагнічуючого контуру, що вносить додаткову похибку розрахунку до 4 %.

В роботі [80] запропонований алгоритм, що дозволяє визначити параметри схеми заміщення АД за каталожними даними і суттєво економити обчислювальні ресурси завдяки виключенню ітераційних процедур. Похибка методу [80], для АД потужністю понад 30 кВт, становить 10–15 %. Це

викликано завищеним розрахунковим значенням приведенного опору ротора, отриманим з допущенням, що в діапазоні значень $0 < s < s_n$, характерних для сталих режимів роботи АД, допустима лінійна апроксимація механічної характеристики. Застосування даної методики для АД потужністю менше 30 кВт призводить до похибки більше 20 %, тому що вимагає застосування виразів для визначення струму I_o з іншого методу. Відсутність розрахунку активного опору намагнічуючого контуру вносить додаткові відхилення розрахункових параметрів до 4 %.

В роботі [81] запропонована методика визначення параметрів схеми заміщення АД, що забезпечує відповідність розрахункових координат механічної характеристики, використовуючи довідкові дані. У методиці [81] всі параметри отримані у вигляді функції коефіцієнта a . Параметр a можна однозначно визначити, знаючи критичне ковзання, яке в довідковій літературі не вказується, в запропонованому авторами алгоритмі створений цикл з варіацією a і подальшим вибором його оптимального значення. Для визначення коефіцієнта c_1 автори вводять ітераційний цикл з перериванням за умови збіжності до сталого значення c_1 . Запропонований алгоритм розрахунку заснований на інтерполяції механічної характеристики по двох точках, що призводить до відхилення розрахункових параметрів схеми заміщення для АД потужністю менше 1,5 кВт до 20 %, для АД потужністю понад 1,5 кВт близько 10 %, тому що робоча частина механічної характеристики не є лінійною. Відсутній розрахунок активного опору гілки намагнічування, що призводить до відхилень розрахункового опору двигуна до 4 %.

В [76] викладено методику розрахунку параметрів схеми заміщення АД, що працюють в сталому режимі двигуна. Вихідними даними є каталожні дані. У методі [76] основна причина відхилення розрахункових значень параметрів схеми заміщення виникає в результаті варіативного підбору коефіцієнтів c_1 , β_o , ξ в заданих границях. В даному методі розкид параметрів для АД потужністю від 0,5 кВт до 250 кВт буде змінюватися від 3 до 15 %. У методиці відсутнє

визначення реактивного опору статора і ротора, що призводить до відхилення розрахункового опору двигуна від істинного значення до 10 %.

Порівняльний аналіз результатів, наведених в роботах [76, 79, 80, 81] показав, що розкид параметрів при визначенні величин елементів схем заміщення АД становить від 4 до 20 % і залежить від типу АД і його потужності. Максимальні значення відхилень 15–20 % при розрахунку параметрів спостерігаються для АД потужністю до 5 кВт.

Отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що некоректне визначення параметрів схеми заміщення при використанні їх в теплових моделях призведе до переоцінки або недооцінки температури статорних обмоток АД. Крім того, вищевикладені методики незастосовні в системах діагностики раннього виявлення виткового замикання, де необхідна висока точність визначення значень елементів схеми заміщення з відхиленням не більше 1,5 %, тому що похибка наведених розрахунків може досягати 20 %.

1.8 Висновки і задачі дослідження

1. У сучасних методах діагностики АД, заснованих на аналізі електричних параметрів (струм, напруга, ковзання і т.д.), стосовно до двигунів потужністю до 5 кВт відсутні надійні критерії оцінки виявлення виткових замикань в мережах з несиметричною напругою. Наявні критерії враховують тільки граничні стани параметрів, що не дозволяє оцінювати дефекти на ранній стадії їх розвитку.

2. Спрощені теплові моделі для розрахунку температур обмоток АД потужністю до 5 кВт справедливі в сталому режимі, коли параметри мережі змінюються повільно. Похибка розрахунків даними методами збільшується до 10–15 %, коли напруга мережі динамічно змінюється, і при роботі в умовах агресивного середовища.

3. Існуючі методи безпосереднього і непрямого контролю температури обмоток застосовні до АД потужністю понад 15 кВт, що працюють в умовах

загальних теплових перевантажень і не чутливі до локальних перегрівів, викликаних запиленням лобової частини обмоток статора.

4. Відомі методи визначення параметрів схеми заміщення АД потужністю від 0,5 до 5 кВт для розрахунку струмів, моментів призводять до похибки від 15 до 20 %. Використання результатів розрахунку за даними методиками в системах ранньої діагностики виткових замикань призведе до зниження чутливості і достовірності отриманих результатів.

На підставі отриманих результатів можна сформулювати наступні завдання досліджень:

1) розробити діагностичні критерії виявлення виткових замикань в обмотках статора АД при зміні ПЯЕ мережі живлення на підставі багатопараметричного контролю основних експлуатаційних параметрів АД;

2) удосконалити математичну теплову модель старіння ізоляції в умовах несиметрії, що динамічно змінюється, і відхилень напруг мережі живлення АД, що працюють в умовах запиленого середовища;

3) розробити метод ранньої діагностики локального перегріву ізоляції і теплового захисту АД потужністю 15–110 кВт, які працюють в умовах запиленого середовища;

4) удосконалити методику визначення параметрів схеми заміщення АД потужністю до 5 кВт.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЯВЛЕННЯ ВИТКОВИХ
ЗАМИКАНЬ НА РАННІХ СТАДІЯХ ПРИ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ МЕРЕЖІ2.1 Удосконалення методики визначення параметрів схеми заміщення
асинхронного двигуна потужністю до 5 кВт

Алгоритми розрахунку і основні формули, що застосовуються в розглянутих раніше методах визначення параметрів схем заміщення, наведені в табл. Б.1. Причини, що призводять до розкиду значень параметрів схем заміщення АД в описаних методиках, розглянуті в попередньому розділі.

У методі [79] використані: I_o – струм холостого ходу; I_{lp^*} – струм при частковому навантаженні, що дорівнює $p^* = 0,25$ або $0,5$; m – число фаз статора; c_l – коефіцієнт приведення Т-образної схеми до Г-образної схеми заміщення; β – коефіцієнт, що характеризує співвідношення між опорами статолрної і роторної обмотки; s_n – номінальне ковзання; s_k – критичне ковзання; A_o, A_l, B, C – коефіцієнти; $\omega_l = 2\pi f$ – синхронна частота обертання поля статора; φ_o – кут між струмом I_o і напругою U ; γ – коефіцієнт; X_k – індуктивний опір короткого замикання.

У методі [80], крім перерахованих вище, додатково використані: M_n – номінальний крутний момент АД; p – число пар полюсів; A, β – коефіцієнти, параметри яких визначаються напругою мережі, потужністю АД, кількістю фаз, коефіцієнтом c_l , приведеним опором ротора.

У методі [81] додатково використані: Ω – швидкість ідеального холостого ходу; $b(s)$ – реактивна складова комплексної провідності.

У методі [76] додатково використані: ξ – коефіцієнт, що характеризує відношення суми механічних і додаткових втрат до номінальної потужності; β_o – коефіцієнт завантаження АД, для якого η максимальний; α_o, a, R_m, G, b – коефіцієнти, які залежать від ковзання, ККД, напруги живлення, потужності і т.д.; I_{2n} – номінальний струм в обмотці ротора, приведений до обмотки статора;

φ_{2n} – кут між векторами струму I_{2n} і напруги U ; Z_o – повний опір гілки намагнічування.

У методиці [76] пропонується перевіряти отримані в результаті розрахунків значення опорів r_1 , r_2 та X_k за формулами:

$$P_n = \frac{3 \cdot U^2 \cdot (1 - s_n) \cdot \frac{r_2}{s_n}}{\xi \cdot \left[\left(r_1 + \frac{r_2}{s_n} \right)^2 + X_k^2 \right]}, \quad (2.1)$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot U^2}{2 \cdot P_n} \cdot \frac{1 - s_n}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + X_k^2}} + 1 - \xi. \quad (2.2)$$

де P_n – номінальна потужність АД, U – фазна напруга; λ – відношення максимального крутного моменту до номінального; s_n – номінальне ковзання; ξ – коефіцієнт, що характеризує відношення механічних і додаткових втрат до номінальної потужності АД.

Для ряду АД потужністю від 1 до 100 кВт були взяті довідкові дані [82, 83] і проектні значення параметрів схеми заміщення і за виразами (2.1) і (2.2) виконаний розрахунок потужності P_n і коефіцієнта λ . Результати представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Розрахунок потужності P_n і коефіцієнта λ за довідковими даними

Довідкові дані	P_n	1,1	3,0	7,5	22	45	75	110
	λ	2,2	2,2	2,2	2,5	2,4	2,2	2
Розрахунок за довідковими даними	P_n	1,15	3,08	7,28	22,0	45,2	75,3	113,7
	λ	2,16	2,26	2,31	2,41	2,48	2,25	1,91
Похибка	δ_{P_n}	4,5	2,7	2,9	0	0,4	0,4	0,6
	δ_λ	1,8	2,7	5	3,6	3,3	2,3	4,5

Розкид отриманих результатів параметрів елементів схеми заміщення, згідно з даними в табл. 2.1, не перевищив 5 %. Можна стверджувати, що

перевірочний розрахунок за виразами (2.1) і (2.2) є критерієм збіжності результатів розрахунку параметрів схем заміщення.

В роботі [84] проведено дослідження швидкісних змін температури обмоток АД при змінах несиметрії і відхилення напруг мережі на натурній моделі. Крива нагрівання АД, отримана експериментальним шляхом, представлена на рис. 2.1 кривою 1. Графіки зміни температури нагріву обмоток АД при розкіді величин параметрів схем заміщення до 20 %, визначених за методами [79, 80, 81], представлені на рис. 2.1.

Аналіз даних, представлених на рис. 2.1, показує, що не коректне визначення параметрів схеми заміщення при використанні їх в теплових моделях призведе до розкиду отриманих значень температури статорних обмоток АД на 40 %.

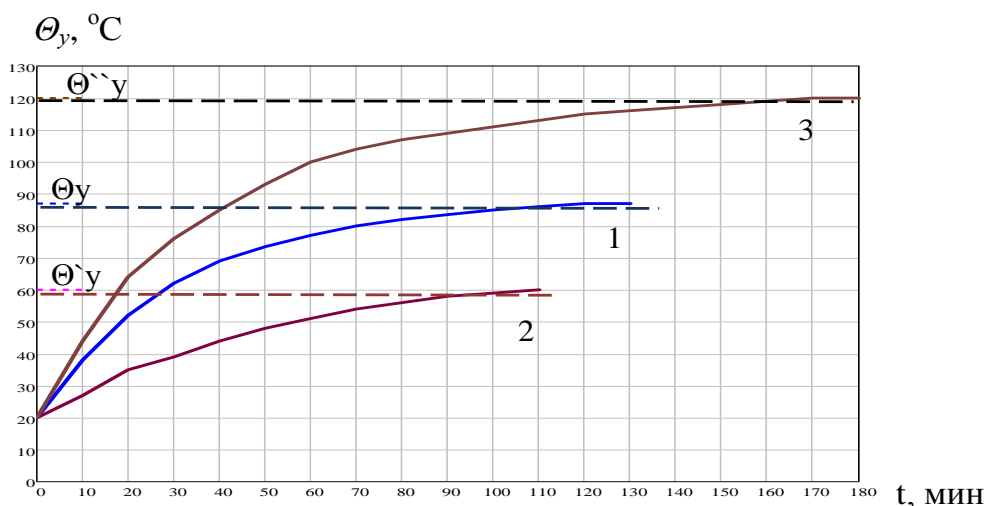


Рис. 2.1 Графіки зміни температури ізоляції обмотки статора:

- крива 1 - експериментально отримана залежність, Θ_y – устанлена температура обмоток АД, при номінальних параметрах схеми заміщення;
- крива 2 – розрахункова залежність, Θ'_y – усталена температура обмоток АД при відхиленні параметрів схеми заміщення на +20 %;
- крива 3 – розрахункова залежність, Θ''_y – теж саме при -20 %.

Існуючі методики визначення параметрів схеми заміщення в обмотках АД при розрахунку зон чутливості і порогів спрацьовування пристроїв

діагностики виткових замикань, з відхиленням розрахункових величин до 15-20 % від істинних значень, не прийнятні.

Для АД потужністю до 5 кВт розроблена комплексна методика визначення параметрів схеми заміщення АД. Особливістю даної методики є облік активної складової опору обмотки, так як величина активного опору порівняна з величиною індуктивного опору і становить від декількох Ом до десятків Ом. Величина активного опору в кілька Ом дозволяє з великою точністю провести вимірювання засобами контролю.

Порівняльний аналіз достовірності визначення параметрів схеми заміщення проведено для АД типу МТ 011-6 і схем заміщення рис. 1.4 а). Каталожні дані МТ 011-6: $P_n = 1,4$ кВт, $U = 380/220$ В, $n_n = 895$ об/хв, $\cos\varphi_n = 0,67$, $\eta_n = 0,73$, $\lambda = 2,7$, $k_n = 2,4$, $k_{ni} = 3$.

Збіжність теоретичного дослідження і практичного розрахунку параметрів схеми заміщення, досягається при виконанні наступного алгоритму, що визначає параметри схеми заміщення АД:

1. Здійснюється вимір активного опору обмотки статора. Прийнятним для вимірювань є вимірювальний міст Р333, що має клас точності 0,5 з межею вимірювань від 1 до 99990 Ом, і міліомметри МИКО-9А. Мультимедійні вимірювальні прилади в залежності від типу мають похибка від 5 до 15 %, що є неприйнятним.

2. Виконуються досліді холостого ходу і короткого замикання. Результати дослідів холостого ходу, короткого замикання і виміру активного опору обмотки статора наведені в табл. 2.2. За результатами дослідів проводиться розрахунок параметрів АД.

Повний опір АД при короткому замиканні:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} \quad (2.3)$$

Активний опір АД при короткому замиканні:

$$r_k = \frac{P_k}{3 \cdot I_k^2} \quad (2.4)$$

Таблиця 2.2

Результати випробування короткого замикання і холостого ходу АТ МТ 011-6

	Дослід холостого ходу			Дослід короткого замикання			Замір опору
	U_x , В	I_x , А	P_x , Вт	U_k , В	I_k , А	P_k , Вт	r_l , Ом
МТ 011-6	220	4,1	350	70	4,5	735	4,9

Індуктивний опір АД при короткому замиканні:

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} \quad (2.5)$$

Приведений опір ротора:

$$r_2' = r_k - r_1 \quad (2.6)$$

Повний опір АД при холостому ході:

$$Z_x = \frac{U_x}{I_x} \quad (2.7)$$

Активний опір АД при холостому ході:

$$r_x = \frac{P_x}{3 \cdot I_x^2} \quad (2.8)$$

Індуктивний опір АД при холостому ході:

$$X_x = \sqrt{Z_x^2 - r_x^2} \quad (2.9)$$

Активний опір намагнічуючого контуру:

$$r_\mu = r_x - r_1 \quad (2.10)$$

3. Визначаються відсутні параметри схеми заміщення з використанням виразів з перерахованих вище методик, які дозволяють найбільш точно розрахувати ці параметри.

Індуктивний опір обмотки статора:

$$x_1 = 0.48 \cdot X_k \quad (2.11)$$

Індуктивний опір ротора, приведений до статора:

$$x_2' = X_k - x_1 \quad (2.12)$$

Індуктивний опір намагнічуючого контуру

$$x_\mu = X_x - x_1 \quad (2.13)$$

У табл. 2.3 наведені результати визначення параметрів схеми заміщення для досліджуваного АД, отримані за відомими методиками і вдосконаленому алгоритму.

Таблиця 2.3

Параметри схем заміщення АД, отримані різними методами розрахунку

	1-й метод	2-й метод	3-й метод	4-й метод	Розроблений метод
r_1	5,17	5,44	4,99	4,9	4,9
x_1	3,73	5,00	4,1		4,7
r_2'	6,25	6,79	6,43	7,55	7,2
x_2'	3,97	5,29	4,68		5,08
r_μ				3,43	2,04
x_μ	47,09	50,00	60,77	47,68	48,96
Перевірочний розрахунок					
P_n	1641	1507	1602	1481	1449
λ	3,15	2,65	2,91	2,76	2,75

Розкид величин елементів схеми заміщення АД відомими методами і запропонованою методикою зведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Результати розкиду величин елементів схеми заміщення

	1-й метод	2-й метод	3-й метод	4-й метод	Розроблений метод
Розкид параметрів	4-22 %	1,7-11 %	2-22 %	0-5 %	0-1,4 %

Грунтуючись на даних, представлених в табл. 2.3 і 2.4, можна стверджувати, що параметри схеми заміщення АД, отримані за розробленою методикою, можна застосовувати в системах діагностики і захисту АД

потужністю до 5 кВт, де необхідна висока точність і достовірність визначення параметрів елементів схем заміщення АД.

2.2 Розробка математичної моделі виявлення виткових замикань на ранніх стадіях в мережах з несиметричними напругами

2.2.1 Облік впливу відхилень активних опорів обмоток статора на додаткові втрати потужності в обмотках

Розкид значень активних опорів обмоток статора може викликатися наступними причинами: 1) неякісним ремонтом АД, 2) замиканням або обривом одного або декількох паралельних провідників в котушці фази статора.

Причини виникнення несиметрії в результаті обриву одного або декількох паралельних провідників котушки фази детально розглянуті в розділі 1. З таким пошкодженням АД буде працювати тривалий час, повільно руйнуючи ізоляцію сусідніх з місцем ушкодження провідників. В результаті виникає аварійна ситуація з серйозним пошкодженням обмоток (наприклад, міжфазне замикання або замикання на корпус).

При капітальних ремонтах АД на підприємствах гірничодобувної галузі, чорної металургії та ін. заміна обмоток статора проводиться у 85 % АД, що надходять в ремонтні цехи. Практика експлуатації післяремонтних АД показує, що термін служби відновлених двигунів в 3–4 рази нижче доремонтного терміну експлуатації, що обумовлено декількома факторами: частковою заміною розмірної номенклатури обмотувального дроту, порушенням технологічної карти ремонту, скороченням обсягу ремонтних робіт, порушеннями регламенту демонтажних і монтажних робіт, зниженням кваліфікації обслуговуючого і керуючого персоналу і т.п. В результаті виникає ситуація коли АД здають в експлуатацію при розкиді значень активних опорів за фазами, що перевищує допустимі значення. Робота двигуна з

несиметричними опорами призводить до додаткового нагрівання однієї з фаз обмотки.

У електроремонтних цехах металургійних підприємств відносний коефіцієнт розкиду активних опорів після заміни обмотки статора визначається за виразом:

$$r_{\partial c} = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{min}} \cdot 100\%. \quad (2.14)$$

де R_{max} , R_{min} – відповідно максимальне і мінімальне вимірне значення активного опору обмоток статора.

Наведена відносна величина виміряного активного опору обмотки статора до довідкового значенням визначається виразом:

$$\Delta r = 1 - \frac{r_1'}{r_{ном}}, \quad (2.15)$$

де $r_{ном}$ – довідкове значення величини активного опору фазної обмотки статора; r_1' – фактично вимірне значення активного опору.

Нерівність активної складової опору обмотки статора призводить до нерівності фазових кутів між фазними струмами і напругами. На рис. 2.2 приведена векторна діаграма струмів і напруг обмоток АД при наявності відхилення активного опору в обмотці статора фази А. Індуктивна складова опору залишається незмінною. На рис. 2.2 позначено φ_a , φ_b і φ_c – фазові кути між струмами і напругами симетрії.

Наявність відхилення активного опору в фазі А викличе додатковий зсув фазового кута на величину $\Delta\varphi_a$, яка визначається виразом:

$$\Delta\varphi_a = \varphi_a - \varphi_a' \quad (2.16)$$

Згідно [33] фазові кути визначаються:

$$\varphi_a = \arctg \frac{x_a}{r_a} \quad (2.17)$$

$$\varphi_a' = \arctg \frac{x_a}{r_a'} \quad (2.18)$$

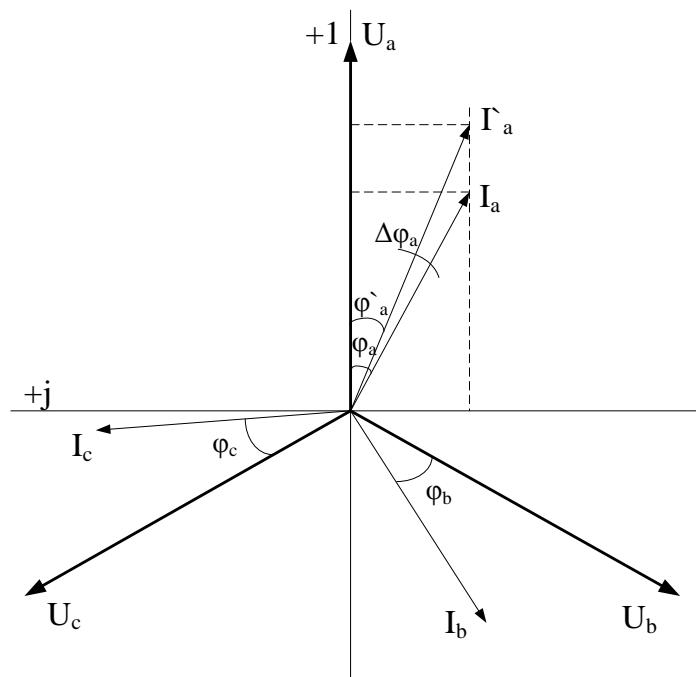


Рис. 2.2 Векторна діаграма струмів і напруг обмотки АД при відхиленні активного опору фази А обмотки статора

де x_a – індуктивна складова повного опору фази А; r_a – активна складова повного опору фази А; r'_a – активна складова повного опору фази А при відхиленні активного опору від довідкового.

Розрахунок активної r_a та індуктивної x_a складових повного опору АД проводиться за схемою заміщення, представленою на рис. 1.4 а).

Складові опорів – r_a , r'_a та x_a по [33] визначаються виразами:

$$x_a = x_1 + \frac{x'_2 \cdot Z_\mu^2 + x_\mu \cdot Z_2'^2}{Z_\mu^2 + Z_2'^2 + 2 \cdot \left(\frac{r'_2 \cdot r_\mu}{s} + x'_2 \cdot x_\mu \right)} \quad (2.19)$$

$$r_a = r_1 + \frac{\frac{r'_2}{s} \cdot Z_\mu^2 + r_\mu \cdot Z_2'^2}{Z_\mu^2 + Z_2'^2 + 2 \cdot \left(\frac{r'_2 \cdot r_\mu}{s} + x'_2 \cdot x_\mu \right)} \quad (2.20)$$

$$r'_a = r'_1 + \frac{\frac{r'_2}{s} \cdot Z_\mu^2 + r_\mu \cdot Z_2'^2}{Z_\mu^2 + Z_2'^2 + 2 \cdot \left(\frac{r'_2 \cdot r_\mu}{s} + x'_2 \cdot x_\mu \right)} \quad (2.21)$$

де $Z_2' = \sqrt{\left(\frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x'_2)^2}$ – повний опір ротора; $Z_\mu = \sqrt{(r_\mu)^2 + (x_\mu)^2}$ – повний

опір намагнічуючого контуру; r'_1 – змінений на величину Δr , відповідно до (2.15), активний опір фази А статора.

Поява додаткового кута зсуву $\Delta\varphi_a$ між напругою і струмом, спричинить зміну фазового струму в обмотці статора (див. рис. 2.2), і збільшення в ній втрат потужності. Вплив активного опору обмоток статора зростає зі зменшенням потужності АД.

Оцінка впливу відхилення активного опору обмоток фази статора АД, при змінах його значення в межах 10 %, розглянуто за умов: кількість витків в фазах статорних обмоток однакова і незмінна, навантаження на валу АД не змінюється, напруги мережі живлення симетричні і не змінюються, частота мережі дорівнює номінальному значенню.

Після підстановки (2.17) і (2.18) в (2.16) $\Delta\varphi_a$ визначиться за виразом:

$$\Delta\varphi_a = \arctg \frac{x_a \cdot (r_a - r'_a)}{r_a \cdot r'_a + x_a^2} \quad (2.22)$$

При $r'_1 = r_{1.ном} \cdot (1 - \Delta r)$, після відповідних перетворень, рівняння (2.22) набуде вигляду:

$$\Delta\varphi_a = \arctg \frac{x_{a.ном} \cdot r_{1.ном} \cdot \Delta r}{r_{a.ном} \cdot r'_a + x_{a.ном}^2} \quad (2.23)$$

Результати зміни значення $\Delta\varphi_a$, при наявності відхилення активного опору в одній обмотці статора для АД різної потужності представлені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Значення кута $\Delta\varphi_a$ для різних діапазонів потужностей АД при наявності відхиленні активного опору в одній обмотці АД від 2 до 10 %

Діапазон потужностей, кВт	Відхилення опору Δr , %				
	2	4	6	8	10
0,5 – 1,5	0,180	0,353	0,537	0,711	0,891
2,2 – 7,5	0,039	0,079	0,121	0,161	0,200
11 – 55	0,024	0,042	0,066	0,083	0,107
75 – 110	0,011	0,023	0,034	0,046	0,057

Графічні залежності зміни кута $\Delta\varphi_a$ від величин відхилень активного опору фазної обмотки статора представлені на рис. 2.3.

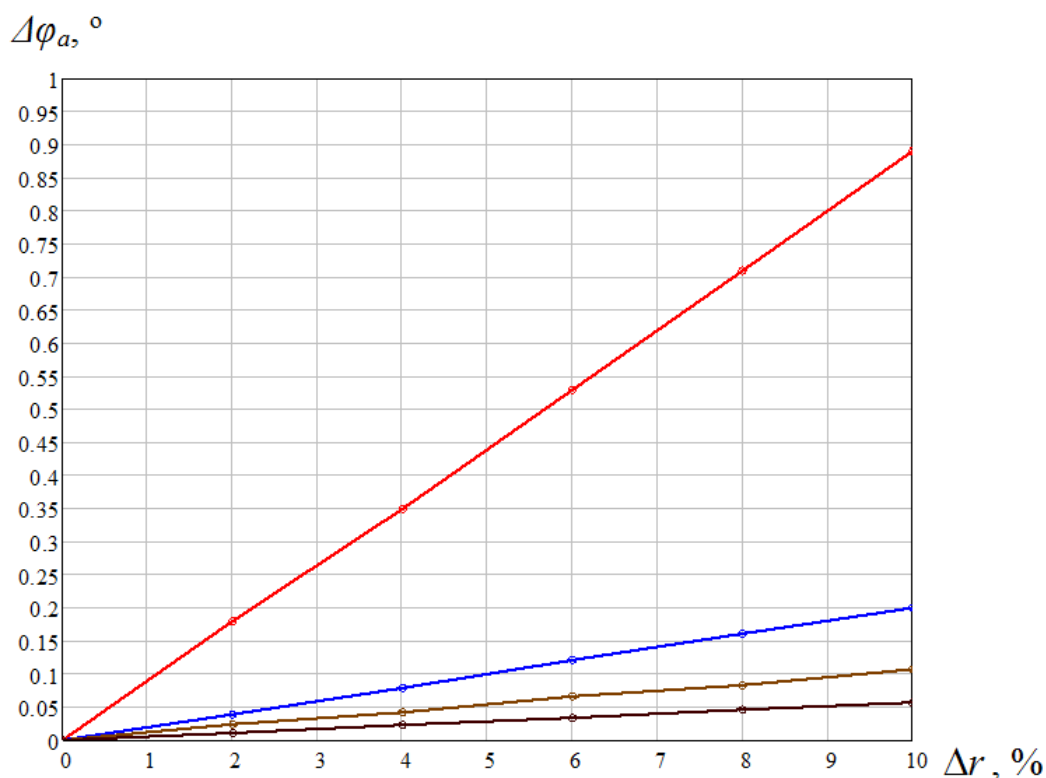


Рис. 2.3 Залежність кута зсуву між фазним струмом і номінальним від величини відхилення активного опору статора для АД різної потужності:

- АД потужністю 0,5–1,5 кВт
- АД потужністю 2,0–7,5 кВт
- АД потужністю 11–55 кВт
- АД потужністю 75–110 кВт

Для двигунів потужністю 0,5–1,5 кВт, відхилення активного опору в межах 4–8 % призводить до зміни кута $\Delta\varphi_a$ від $0,4^\circ$ до $0,9^\circ$ і збільшення або зниження фазового струму до 1 %.

Для АД в діапазоні потужностей 2–7,5 кВт, зміна фазового кута становить від $0,04^\circ$ до $0,17^\circ$, при зміні активного опору від 2 до 10 %. Це спричинить зміну струму в фазі не більше 0,5 %. Для АД потужністю 11–55 кВт зміна активного опору від 2 до 10 %, призводить до зміни фазового кута від $0,2^\circ$ до $0,1^\circ$. При цьому струм зміниться на 0,2 %. Для АД потужністю 75–110 кВт зміна активного опору від 2 до 10 %, призводить до зміни фазового кута від $0,01^\circ$ до $0,06^\circ$. Фазний ток зміниться на 0,1 %.

Аналіз результатів отриманих даних дозволяє зробити наступні висновки. При визначенні параметрів схеми заміщення для АД потужністю менше 2 кВт необхідно враховувати відхилення активного опору в обмотці статора для розрахунку втрат потужності і температури обмоток. Для АД потужністю понад 2 кВт похибка при визначенні параметрів схеми заміщення без урахування відхилення активного опору становить менше 0,5 %, що дозволяє не враховувати наявності відхилення активного опору в обмотках статора в теплових розрахунках АД.

Номінальні втрати потужності в обмотці статора $\Delta P_{ном}$ і втрати потужності ΔP , зумовлені відхиленням активних опорів, визначаються виразами:

$$\Delta P_{ном} = \left| \frac{U_{ном}}{Z_{ном}} \cdot e^{j\varphi_a} \right|^2 \cdot r_{1ном} = I_{ном}^2 \cdot r_{1ном} \quad (2.24)$$

$$\Delta P = \left| \frac{1}{T} \cdot \frac{U_{ном}}{Z_{ном}} \cdot e^{j\varphi_a - \Delta\varphi_a} \right|^2 \cdot r_{1ном} \cdot (1 - \Delta r) \quad (2.25)$$

де $U_{ном}$ – номінальна фазна напруга; $Z_{ном} = r_a + jx_a$ – номінальний комплексний опір АД; $T = \frac{Z}{Z_{ном}}$ – коефіцієнт зміни комплексного опору АД при наявності відхилення активного опору обмотки статора.

Приріст втрат потужності в обмотці статора дорівнює:

$$\Delta P_{\delta} = \Delta P - \Delta P_{ном} \quad (2.26)$$

У табл. 2.6 наведені результати розрахунку додаткових втрат ΔP_{δ} активної потужності в обмотці статора при наявності відхилення активного опору для 4A71B6Y3 потужністю 0,55 кВт і 4A80B4Y3 потужністю 1,5 кВт.

Таблиця 2.6

Додаткові втрати потужності в фазі АД при наявності відхилення активного опору обмотки статора в одній фазі від 0 % до 10 % щодо номінального значення

Потужність АД, кВт	$\Delta P_{ном}$, Вт	ΔP_{δ} при зміні Δr [%], Вт				
		2	4	6	8	10
0,55 кВт	55,77	0,91	1,80	2,73	3,63	4,58
1,5 кВт	70,52	1,03	1,97	3,03	4,16	5,14

Отримані результати показують, що не врахування відхилення активного опору обмотки статора для АД 0,5–1,5 кВт призведе до неточного визначення втрат потужності. У табл. 2.7 наведені величини відносної похибки ξ розрахунку втрат потужності при відхиленні величини опору обмотки статора від номінального.

$$\xi = \frac{\Delta P_{\delta}}{\Delta P_{ном}} \cdot 100\% \quad (2.27)$$

Таблиця 2.7

Похибка розрахунку втрат потужності при неврахуванні наявності відхилень активних опорів обмотки статора АД

$P_{ном}$, кВт	Похибка розрахунку ξ при зміні Δr [%], %				
	2	4	6	8	10
0,55	1,6	3,2	4,9	6,5	8,2
1,5	1,5	2,8	4,3	5,9	7,3

2.2.2 Розробка математичної моделі визначення струмів і втрат потужності в обмотках АД при виникненні виткових замикань в мережах з несиметричними напруженнями

Несиметрія напруг мережі призводить до змін кутів і модулів векторів фазних струмів в обмотках АД щодо симетричної системі напруг. Замикання 5–20 % витків призводять до зміни активної (2.20) і індуктивної (2.19) складових повного опору АД. На рис. 2.4 приведена векторна діаграма струмів і напруг обмоток статора при несиметрії напруг мережі живлення і наявності виткових замикань.

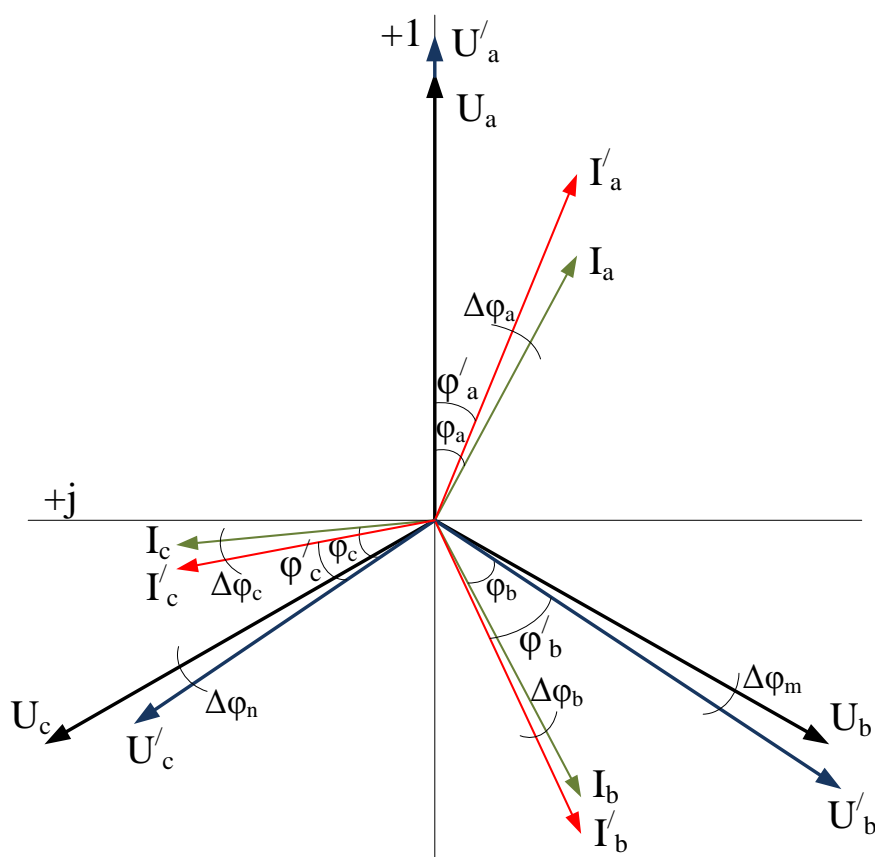


Рис. 2.4 Векторна діаграма струмів і напруг обмоток АД при несиметрії напруг і активних опорів статора

На рис. 2.4 зображені: U_a, U_b, U_c – симетричні фазні напруги; U'_a, U'_b, U'_c – фазні напруги, при несиметричному напрузі; I_a, I_b, I_c – фазные токи при симетричній фазній напрузі; I'_a, I'_b, I'_c – фазні струми при несиметричній

напрузі і виткових замиканнях; $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ – фазові кути між напругами U'_a, U'_b, U'_c і струмами I_a, I_b, I_c ; $\varphi'_a, \varphi'_b, \varphi'_c$ – кути між напругами U'_a, U'_b, U'_c і струмами I'_a, I'_b, I'_c .

Додатковий зсув фазового кута на величину $\Delta\varphi$, що викликано зміною активної і індуктивної складових в фазах АД, визначиться виразами:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_a &= \varphi_a - \varphi'_a \\ \Delta\varphi_b &= \varphi_b - \varphi'_b \\ \Delta\varphi_c &= \varphi_c - \varphi'_c\end{aligned}\quad (2.28)$$

Величини фазових кутів визначаються за виразами (2.17) і (2.18).

Представляючи систему симетричних фазових напруг через модуль номінальної напруги, за умови, що система координат проходить через нульову точку рис. 2.4, фазовий кут напруги фази А дорівнює нулю:

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= |U_n|; \\ \dot{U}_b &= |U_n| \cdot a^2; \\ \dot{U}_c &= |U_n| \cdot a,\end{aligned}\quad (2.29)$$

де $a = -0,5 + j0,866$ – фазовий множник або оператор повороту.

Система фазових напруг (2.29) при наявності несиметрії і відхилень напруг:

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= D \cdot |U_n|; \\ \dot{U}_b &= M \cdot |U_n| \cdot a^2 \cdot e^{j\Delta\varphi_m}; \\ \dot{U}_c &= N \cdot |U_n| \cdot a \cdot e^{j\Delta\varphi_n},\end{aligned}\quad (2.30)$$

де D, M, N – коефіцієнти, що враховують кратність зміни фазних напруг; $\Delta\varphi_m, \Delta\varphi_n$ – додаткові фазові кути зсуву цих напруг за умови, що кут фази А дорівнює нулю:

$$\Delta\varphi_m = \frac{2\pi}{3} - \arccos\left(\frac{|\dot{U}_a|^2 + |\dot{U}_b|^2 - |\dot{U}_{ab}|^2}{2 \cdot |\dot{U}_a| \cdot |\dot{U}_b|}\right);$$

$$\Delta\varphi_n = \arccos\left(\frac{|\dot{U}_c|^2 + |\dot{U}_a|^2 - |\dot{U}_{ca}|^2}{2 \cdot |\dot{U}_c| \cdot |\dot{U}_a|}\right) - \frac{2\pi}{3}.$$
(2.31)

U_{ab}, U_{ca} – лінійні напруги, при несиметрії напруги живлення.

Відповідно до (1.26), (1.27) і (1.28) при виткових замиканнях відбувається зміна величин активних і індуктивних опорів. Введемо відповідні діагностичні критерії, що враховують досліджувані несправності.

Коефіцієнт, що враховує наявність виткових замикань в обмотці статора:

$$k_w = 1 - \frac{w_k}{w_1},$$
(2.32)

де w_k – число короткозамкнутих витків обмотки статора.

Коефіцієнт, що враховує наявність виткових замикань в паралельних провідниках обмотки статора:

$$k_m = 1 + \frac{w_k}{w_1(m_1 - 1)}$$
(2.33)

Коефіцієнт k_w можна застосовувати для АД з петльовими одношаровими котушковими або секційними обмотками. Коефіцієнт k_m можна застосовувати для АД з петльовими одно-двошаровими котушковими або секційними обмотками.

Активний і індуктивний опір статора, індуктивний опір магнітного кола при виткових замиканнях з урахуванням (2.32) дорівнює:

$$r_{1w} = k_w \cdot r_1$$
(2.34)

$$x_{1w} = k_w^2 \cdot x_1$$
(2.35)

$$x_{\mu w} = k_w^2 \cdot x_{\mu}$$
(2.36)

При виткових замиканнях в обмотці статора величина активного і індуктивного опорів ротора, а також активна складова ланцюга намагнічування залишаються незмінними.

Повні опори статора і магнітного ланцюга з урахуванням (2.34)–(2.36):

$$Z_{1w} = k_w \cdot r_1 + jk_w^2 \cdot x_1 \quad (2.37)$$

$$Z_{\mu w} = r_\mu + jk_w^2 \cdot x_\mu \quad (2.38)$$

Відповідно, повний опір АД буде:

$$Z_w = Z_{1w} + \frac{Z_2' \cdot Z_{\mu w}}{Z_2' + Z_{\mu w}} \quad (2.39)$$

Активний опір статора при замиканнях витків в паралельних провідниках з урахуванням (2.33) визначається:

$$r_{1m} = \frac{r_1}{k_m} \quad (2.40)$$

Інші параметри схеми заміщення не залежать від коефіцієнта k_m .

Повний опір статора з урахуванням (2.40) знаходиться з:

$$Z_{1m} = \frac{r_1}{k_m} + jx_1 \quad (2.41)$$

Відповідно, повний опір АД:

$$Z_m = Z_{1m} + \frac{Z_2' \cdot Z_\mu}{Z_2' + Z_\mu} \quad (2.42)$$

Запишемо повні опори фаз АД при можливих несправностях через номінальні довідкові значення:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_a &= T_a \cdot |Z_n| \cdot e^{j\varphi_a'} = T_a \cdot |Z_n| \cdot e^{j\varphi_a + \Delta\varphi_a}; \\ \dot{Z}_b &= T_b \cdot |Z_n| \cdot e^{j\varphi_b'} = T_b \cdot |Z_n| \cdot e^{j\varphi_b + \Delta\varphi_b}; \\ \dot{Z}_c &= T_c \cdot |Z_n| \cdot e^{j\varphi_c'} = T_c \cdot |Z_n| \cdot e^{j\varphi_c - \Delta\varphi_c}; \end{aligned} \quad (2.43)$$

де $T_a = \frac{Z_{wa}(Z_{ma})}{Z_n}$ – коефіцієнт, що враховує зміну параметрів схеми

заміщення АД при виткових замиканнях в фазі А чи замиканні паралельних

провідників в котушці фази А; $T_b = \frac{Z_{wb}(Z_{mb})}{Z_n}$, $T_c = \frac{Z_{wc}(Z_{mc})}{Z_n}$ – аналогічно для

фаз В і С.

Фазні струми в АД, при виткових замиканнях в обмотках і несиметрії напруг мережі, визначаються за виразами:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\dot{Z}_a} = \frac{D \cdot |U_H|}{T_a \cdot |Z_H|} \cdot e^{-j(\varphi_a + \Delta\varphi_a)} = H \cdot |I_H| \cdot e^{-j(\varphi_a + \Delta\varphi_a)}; \quad (2.44)$$

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\dot{Z}_b} = \frac{M \cdot |U_H|}{T_b \cdot |Z_H|} \cdot a^2 \cdot e^{j(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b)} = L \cdot |I_H| \cdot a^2 \cdot e^{j(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b)}; \quad (2.45)$$

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\dot{Z}_c} = \frac{N \cdot |U_H|}{T_c \cdot |Z_H|} \cdot a \cdot e^{j(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c)} = J \cdot |I_H| \cdot a \cdot e^{j(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c)}, \quad (2.46)$$

де $H = \frac{D}{T_a}$; $L = \frac{M}{T_b}$; $J = \frac{N}{T_c}$ – коефіцієнти, що враховують кратність зміни струму при несиметричних напружених і виткових замиканнях до номінальної величини; I_H – номінальний струм АД.

Струми прямої і зворотної послідовностей, згідно з методом симетричних складових, визначаються виразами:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c}{3}; \quad (2.47)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c}{3}. \quad (2.48)$$

Підставляючи (2.44)–(2.46) в (2.47), (2.48) і виконуючи відповідні перетворення, отримаємо вирази для струмів I_1 та I_2 :

$$\dot{I}_1 = \frac{|I_H|}{3} \cdot V \cdot e^{j\varphi_V}; \quad (2.49)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{|I_H|}{3} \cdot Q \cdot e^{j\varphi_Q}; \quad (2.50)$$

де V і Q – коефіцієнти, що враховують наявність несиметрії напруг і несиметрії опорів обмоток і визначаються за виразами:

$$V = \sqrt{H^2 + L^2 + J^2 + 2HL \cos(\Delta\varphi_m - \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_b) + 2HJ \cdot \cos(\Delta\varphi_n - \Delta\varphi_a - \Delta\varphi_c) + 2LJ \cos(\Delta\varphi_n - \Delta\varphi_m - \Delta\varphi_b - \Delta\varphi_c)}; \quad (2.51)$$

$$Q = \sqrt{H^2 + L^2 + J^2 + 2HL \cos(\Delta\varphi_m - \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_b + \frac{2\pi}{3}) + 2HJ \cdot \cos(\Delta\varphi_n - \Delta\varphi_a - \Delta\varphi_c + \frac{4\pi}{3})} + 2LJ \cos(\Delta\varphi_n - \Delta\varphi_m - \Delta\varphi_b - \Delta\varphi_c - \frac{2\pi}{3}) \quad (2.52)$$

φ_V і φ_Q – аргументи струмів прямої і зворотної послідовностей, розраховані за виразами:

$$\varphi_V = \arctg \frac{H \sin(-\varphi_a - \Delta\varphi_a) + L \sin(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b) + J \sin(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c)}{H \cos(-\varphi_a - \Delta\varphi_a) + L \cos(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b) + J \cos(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c)}; \quad (2.53)$$

$$\varphi_Q = \arctg \frac{H \sin(-\varphi_a + \Delta\varphi_a) + L \sin(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b + \frac{2\pi}{3}) + J \sin(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c + \frac{4\pi}{3})}{H \cos(-\varphi_a + \Delta\varphi_a) + L \cos(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b + \frac{2\pi}{3}) + J \cos(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c + \frac{4\pi}{3})}. \quad (2.54)$$

Коефіцієнт несиметрії струмів визначиться як:

$$k_{2I} = \frac{|I_2|}{|I_1|} \cdot 100\% = \frac{Q}{V} \cdot 100\%. \quad (2.55)$$

Записуючи фазні струми через струми прямої (2.49) і зворотної (2.50) послідовностей, з урахуванням (2.51)–(2.54), отримаємо:

$$I_a = \frac{I_{ном} \cdot V}{3} \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_Q) + k_{2I}^2\right); \quad (2.56)$$

$$I_b = \frac{I_{ном} \cdot V}{3} \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos\left(\varphi_V - \varphi_Q + \frac{2\pi}{3}\right) + k_{2I}^2\right); \quad (2.57)$$

$$I_c = \frac{I_{ном} \cdot V}{3} \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos\left(\varphi_V - \varphi_Q - \frac{2\pi}{3}\right) + k_{2I}^2\right), \quad (2.58)$$

На підставі (2.56)–(2.58), втрати потужності в фазах АД визначаються за виразами:

$$\Delta P_a = \frac{\Delta P_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_Q) + k_{2I}^2\right); \quad (2.59)$$

$$\Delta P_b = \frac{\Delta P_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos\left(\varphi_V - \varphi_Q + \frac{2\pi}{3}\right) + k_{2I}^2\right); \quad (2.60)$$

$$\Delta P_c = \frac{\Delta P_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos\left(\varphi_V - \varphi_Q - \frac{2\pi}{3}\right) + k_{2I}^2\right), \quad (2.61)$$

де $\Delta P_{ном} = I_{ном}^2 \cdot r_{ном}$ – втрати потужності в фазі АД при номінальному навантаженні, відсутності відхилень опорів АД і симетричній системі живильної мережі.

Уточнимо вираз (2.15), підставивши в нього (2.34) і (2.40):

$$\Delta r = 1 - \frac{k_w \cdot r_1}{r_1} = 1 - k_w, \quad (2.62)$$

$$\Delta r = 1 - \frac{r_1}{k_m \cdot r_1} = 1 - \frac{1}{k_m}, \quad (2.63)$$

Вирази (2.56)–(2.58) для струмів і (2.59)–(2.61) для втрат потужності дозволяють ідентифікувати виникнення виткового замикання при наявності несиметрії і відхилень напруг.

2.2.3 Встановлення залежностей розподілу фазних струмів при наявності виткових замикань в мережах з несиметричними напругами

2.2.3.1 Встановлення залежності розподілу струмів при несиметрії активних опорів і наявності відхилень напруг

Натурні дослідження проведені для АД типу МТ011-6 з параметрами $P_n = 1,4$ кВт, $U = 380/220$ В, $n_n = 895$ об/хв, $\cos\varphi_n = 0,67$, $\eta_n = 0,73$, $\lambda = 2,7$, $k_n = 2,4$, $k_{ni} = 3$, у якого кількість витків в кожній фазі однакова, навантаження на валу АД незмінне, номінальне значення фазного струму дорівнює $I_{ном} = 4,937$ А, частота мережі дорівнює 50 Гц.

Параметри схеми заміщення, визначені згідно з удосконаленою методикою наведені в табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Параметри АД типу МТ 011-6

r_1	x_1	r'_2	x'_2	r_μ	x_μ
4,9	4,7	7,2	5,08	2,04	48,96

Результати досліджень зміни коефіцієнта несиметрії струмів в умовах змін відхилень фазних напруг мережі, наявності відхилення активного опору в одній обмотці АД на величини (4 % і 8 %), отримані з використанням програми Mathcad і представлені в табл.2.9–2.12.

Таблиця 2.9

Розрахункові дані коефіцієнта несиметрії струмів k_{2I} при несиметрії напруг $k_{2U} = 2\%$ і дисбалансі активних опорів Δr 4 і 8 %

$U_{\phi}, \text{В}$	Фаза*	«-» Δr %	$k_{2I}, \%$	«+» Δr %	$k_{2I}, \%$
$U_a = 227,0 \text{ В}$	А	0	2,032	0	2,032
		4	1,906	4	2,160
		8	1,784	8	2,292
$U_b = 222,1 \text{ В}$	В	0	2,032	0	2,032
		4	2,170	4	1,895
		8	2,311	8	1,760
$U_c = 209,1 \text{ В}$	С	0	2,032	0	2,032
		4	2,027	4	2,048
		8	2,033	8	2,074
$U_a = 224,0 \text{ В}$	А	0	2,009	0	2,009
		4	2,144	4	1,788
		8	2,282	8	1,750
$U_b = 200,9 \text{ В}$	В	0	2,009	0	2,009
		4	2,013	4	2,016
		8	2,029	8	2,034
$U_c = 202,8 \text{ В}$	С	0	2,009	0	2,009
		4	1,871	4	2,141
		8	1,748	8	2,274

Примітки: * – показує в якій фазі опір відмінний від номінального; «-» Δr та «+» Δr означає відповідно зменшення і збільшення опору в цій фазі на 4 % і 8 % щодо опору двох інших

Значення коефіцієнта несиметрії струму для симетричних фазних напруг ($k_{2U} = 0$) і відхилень активних опорів \pm (4 % і 8 %) дорівнюють:

- при $k_{2U} = 0, \Delta r = 0\%$ $k_{2I} = 0$;
- при $k_{2U} = 0, \Delta r = -4\%$ $k_{2I} = 0,141\%$; $\Delta r = +4\%$ $k_{2I} = 0,139\%$;
- при $k_{2U} = 0, \Delta r = -8\%$ $k_{2I} = 0,279\%$; $\Delta r = +8\%$ $k_{2I} = 0,277\%$.

Результати дослідження показали:

1) при значенні відхилення напруги у фазі А $\Delta U_a = +7$ В ($\Delta U_b = +2,1$ В, $\Delta U_c = -10,9$ В, $k_{2U} = 2,03$ %), відхиленні $\Delta r = +8$ % в фазі А відносно фаз В і С, отримуємо значення $k_{2I} = 1,785$, що на 0,25 % нижче значення k_{2I} при симетричних опорах;

2) при значенні відхилення напруги у фазі А $\Delta U_a = +7$ В ($\Delta U_b = +2,1$ В, $\Delta U_c = -10,9$ В, $k_{2U} = 2,03$ %), відхиленні $\Delta r = -8$ % у фазі А відносно фаз В і С, отримуємо значення $k_{2I} = 2,286$, що на 0,25 % вище значення k_{2I} при симетричних опорах;

3) при значенні відхилення напруги у фазі С $\Delta U_c = -17,2$ В ($\Delta U_a = +4$ В, $\Delta U_b = -19,7$ В, $k_{2U} = 2,01$ %), відхиленні $\Delta r = -8$ % у фазі С відносно фаз А і В, отримуємо значення $k_{2I} = 2,264$, що на 0,25 % вище значення k_{2I} при симетричних опорах;

4) при значенні відхилення напруги у фазі С $\Delta U_c = -17,2$ В ($\Delta U_a = +4$ В, $\Delta U_b = -19,7$ В, $k_{2U} = 2,01$ %), відхиленні $\Delta r = +8$ % у фазі С відносно фаз А і В, отримуємо значення $k_{2I} = 1,755$, що на 0,24 % нижче значення k_{2I} при симетричних опорах;

Таблиця 2.10

Фазні струми при напрузі $U_a = 227,0$ В, $U_b = 222,1$ В, $U_c = 209,1$ В ($k_{2U} = 2,03$ %)

і наявності відхилень активних опорів

Фазні струми I_ϕ , А	$\Delta r = +(4 \text{ и } 8) \%$								
	А			В			С		
	0	4	8	0	4	8	0	4	8
I_a	4,737	4,752	4,765	4,737	4,742	4,747	4,737	4,732	4,726
I_b	4,635	4,625	4,614	4,635	4,635	4,634	4,635	4,631	4,627
I_c	4,364	4,370	4,378	4,364	4,369	4,375	4,364	4,384	4,403
	$\Delta r = -(4 \text{ и } 8) \%$								
	А			В			С		
	0	4	8	0	4	8	0	4	8
I_a	4,737	4,744	4,751	4,737	4,733	4,727	4,737	4,743	4,750
I_b	4,635	4,645	4,655	4,635	4,655	4,675	4,635	4,640	4,643
I_c	4,364	4,357	4,350	4,364	4,358	4,353	4,364	4,365	4,360

Таблиця 2.11

Розрахункові дані коефіцієнта несиметрії струмів k_{2I} при несиметрії напруг $k_{2U} = 4\%$ і дисбалансі активних опорів $\Delta r = 4\%$ і 8%

$U_\phi, \text{В}$	Фаза*	«-» Δr %	$k_{2I}, \%$	«+» Δr %	$k_{2I}, \%$
$U_a = 224,4 \text{ В}$	А	0	4,006	0	4,006
		4	3,979	4	4,037
		8	3,958	8	4,072
$U_b = 226,2 \text{ В}$	В	0	4,006	0	4,006
		4	4,150	4	3,863
		8	4,295	8	3,723
$U_c = 210,0 \text{ В}$	С	0	4,006	0	4,006
		4	3,892	4	4,121
		8	3,782	8	4,239
$U_a = 193,0 \text{ В}$	А	0	4,038	0	4,038
		4	3,987	4	4,093
		8	3,941	8	4,154
$U_b = 209,7 \text{ В}$	В	0	4,038	0	4,038
		4	3,938	4	4,139
		8	3,841	8	4,243
$U_c = 223,8 \text{ В}$	С	0	4,038	0	4,038
		4	4,192	4	3,884
		8	4,347	8	3,731

Таблиця 2.12

Величини фазних струмів при $U_a = 193,0 \text{ В}$, $U_b = 209,7 \text{ В}$, $U_c = 223,9 \text{ В}$ ($k_{2U} = 4,08\%$) і наявності відхилень активних опорів

Фазні струми I_ϕ , А	$\Delta r = +(4 \text{ и } 8) \%$								
	А			В			С		
	0	4	8	0	4	8	0	4	8
I_a	4,028	4,037	4,046	4,028	4,022	4,018	4,028	4,026	4,025
I_b	4,377	4,372	4,368	4,377	4,388	4,398	4,377	4,375	4,373
I_c	4,670	4,671	4,674	4,670	4,668	4,665	4,670	4,683	4,692
	$\Delta r = -(4 \text{ и } 8) \%$								
	А			В			С		
	0	4	8	0	4	8	0	4	8
I_a	4,028	4,019	4,011	4,028	4,033	4,038	4,028	4,030	4,032
I_b	4,377	4,379	4,382	4,377	4,368	4,359	4,377	4,379	4,384
I_c	4,670	4,669	4,667	4,670	4,674	4,677	4,670	4,659	4,647

5) при значенні відхилення напруги у фазі В $\Delta U_b = +6,2 \text{ В}$ ($\Delta U_a = +4,4 \text{ В}$, $\Delta U_c = -10,0 \text{ В}$, $k_{2U} = 4,01\%$), відхиленні $\Delta r = +8\%$ у фазі В відносно фаз А і С,

отриуємо значення $k_{2I} = 4,281$, що на 0,29 % вище значення k_{2I} при симетричних опорах;

6) при значенні відхилення напруги у фазі В $\Delta U_b = +6,2$ В ($\Delta U_a = +4,4$ В, $\Delta U_c = -10,0$ В, $k_{2U} = 4,01$ %), відхиленні $\Delta r = -8$ % у фазі В, відносно фаз А і С, отриуємо значення $k_{2I} = 1,734$, що на 0,26 % нижче значення k_{2I} при симетричних опорах;

7) при значенні відхилення напруги у фазі С $\Delta U_c = +3,8$ В ($\Delta U_a = -27$ В, $\Delta U_b = -10,3$ В, $k_{2U} = 4,08$ %), відхиленні $\Delta r = +8$ % у фазі С, відносно фаз А і В, отриуємо значення $k_{2I} = 4,320$, що на 0,28 % вище значення k_{2I} при симетричних опорах;

8) при значенні відхилення напруги у фазі С $\Delta U_c = +3,8$ В ($\Delta U_a = -27$ В, $\Delta U_b = -10,3$ В, $k_{2U} = 4,08$ %), відхиленні $\Delta r = -8$ % у фазі С, відносно фаз А і В, отриуємо значення $k_{2I} = 3,758$, що на 0,28 % нижче значення k_{2I} при симетричних опорах.

Величини змін втрат потужності в фазах АД представлені в табл. 2.13, при цьому номінальні втрати потужності складають $\Delta D_\delta = 103,3 \text{ \AA} \delta$ при робочому струмі навантаження рівному $0,8 I_{ном}$.

Таблиця 2.13

Втрати потужності в фазах при відхиленнях напруги в фазах $\Delta U_a = +7$ В, $\Delta U_b = +2,1$ В, $\Delta U_c = -10,9$ В ($k_{2U} = 2,03$ %) і відхиленнях активних опорів

Втрати потужності, Вт	$\Delta r = +(4 \text{ и } 8) \%$								
	А			В			С		
	0	4	8	0	4	8	0	4	8
ΔP_a	109,8	106,1	102,2	109,8	110,0	110,2	109,8	109,6	109,3
ΔP_b	105,1	104,7	104,2	105,1	101,0	96,7	105,1	105,0	105,3
ΔP_c	93,1	93,3	93,7	93,1	93,3	93,6	93,1	90,2	87,2
	$\Delta r = -(4 \text{ и } 8) \%$								
	А			В			С		
	0	4	8	0	4	8	0	4	8
ΔP_a	109,8	114,5	119,3	109,8	109,5	109,3	109,8	110,1	110,4
ΔP_b	105,1	105,6	106,0	105,1	110,3	115,5	105,1	105,2	105,5
ΔP_c	93,1	92,8	92,5	93,1	92,8	92,6	93,1	96,8	100,3

Аналіз даних, наведених в табл. 2.13, для найбільш завантаженої фази А дозволяє зробити наступні висновки:

1) поява відхилень напруг в фазах $\Delta U_a = +7$ В, $\Delta U_b = +2,1$ В, $\Delta U_c = -10,9$ В, що призводять до появи коефіцієнта несиметрії $k_{2U} = 2,03$ % при симетрії опорів обмоток статора АД, викликає перерозподіл струмів і втрат потужності на 6,5 % вище робочих втрат в фазі А;

2) при відхиленнях напруги в фазах $\Delta U_a = +7$ В, $\Delta U_b = +2,1$ В, $\Delta U_c = -10,9$ В наявність відхилення активного опору $\Delta r = -4$ % у фазі А призводить до додаткового збільшення втрат потужності у цій фазі на 4,3 %;

3) відхилення фазних напруг $\Delta U_a = +7$ В, $\Delta U_b = +2,1$ В, $\Delta U_c = -10,9$ В і відхилення активного опору $\Delta r = -8$ % у фазі А призводить до додаткового збільшення втрат потужності у цій фазі на 8,7 %.

Для отримання дисбалансу активних опорів в межах 4 % до обмоток статора АД МТ 011-6 підключили змінні опори величиною 0,21 Ом. При наявності відхилень напруг в фазах заміряли струми в обмотках АД.

Результати проведених теоретичних і експериментальних досліджень при відхиленнях напруги по фазах $\Delta U_a = +7$ В, $\Delta U_b = +2$ В, $\Delta U_c = -10$ В, $k_{2U} = 2,1$ % і відхиленні активного опору $\Delta r = +4$ % представлені в табл. 2.14.

Таблиця 2.14

Результати теоретичного розрахунку та експериментальні дані

	I_a, A	I_b, A	I_c, A	$k_{2i}, \%$
Відхилення $\Delta r = -4$ % у фазі А				
Розрахунок	4,68	4,58	4,30	1,907
Експеримент	4,57	4,49	4,41	1,831
Відхилення $\Delta r = -4$ % у фазі В				
Розрахунок	4,66	4,60	4,30	2,281
Експеримент	4,55	4,52	4,40	2,114
Відхилення $\Delta r = -4$ % у фазі С				
Розрахунок	4,67	4,57	4,31	2,057
Експеримент	4,56	4,50	4,42	1,979

Похибка теоретичних і експериментальних досліджень склала не більше 5 % для струмів і не більше 4 % для коефіцієнта несиметрії струмів.

2.2.3.2 Встановлення залежності розподілу втрат потужності при виткових замиканнях в паралельних провідниках обмотки статора

Обмотки АД в діапазоні потужностей 15–55 кВт мають від двох до чотирьох паралельних провідників. Визначимо залежність зміни коефіцієнта k_m від кількості замкнутих витків в паралельних провідниках. Паспортні дані АД і результати розрахунків представлені в табл. 2.15 і табл. 2.16. У цих таблицях позначено: $w_{наз}$ – кількість витків в пазу, m_l – кількість паралельних провідників в обмотці, a_l – кількість паралельних гілок, m_{lk} – кількість паралельних провідників, в яких одночасно присутні замкнуті витки. На підставі даних табл. 2.16 побудуємо графіки залежності (рис. 2.5) коефіцієнта k_m від кількості замкнутих витків.

Таблиця 2.15

Паспортні дані досліджуваних АД

Тип АД	$P_{ном}$, кВт	w_l	$w_{наз}$	m_l	a_l
4A160S4Y3	15	108	27	2	2
4A180S4Y3	22	92	23	3	2
4A180M4Y3	30	68	17	4	2
4A225M6Y3	37	80	10+10	3	3
4A250M6Y3	55	60	7+8	4	3

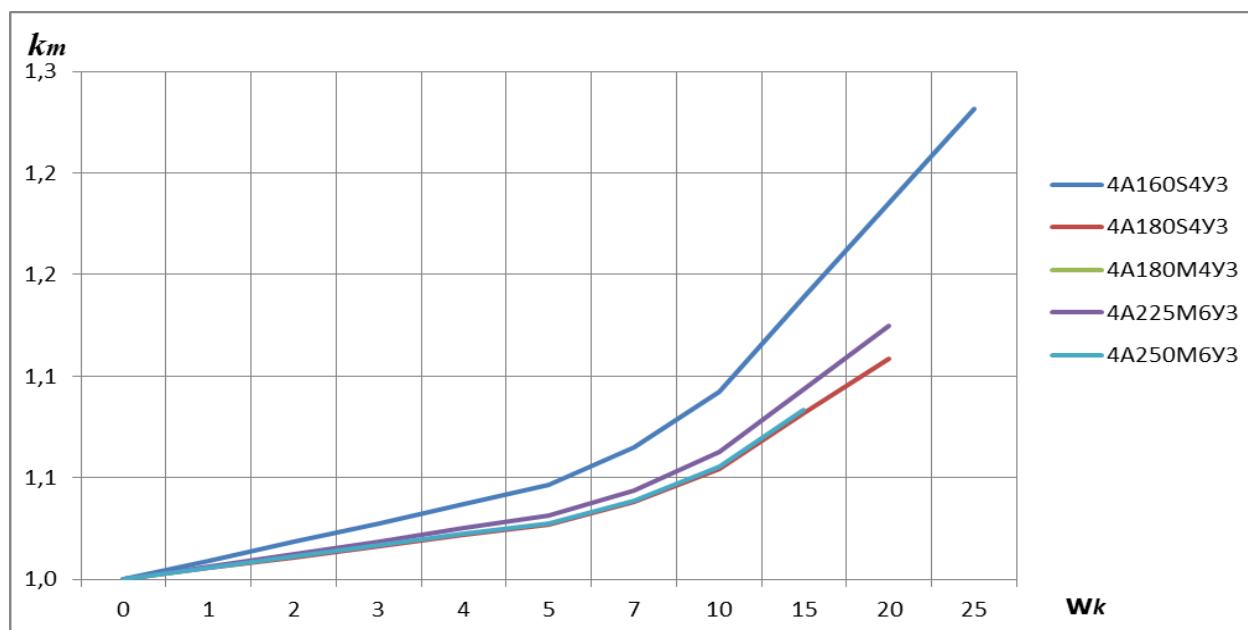
Дані табл. 2.16 показують, що критерієм виявлення замикання в обмотках з паралельними провідниками послужить значення коефіцієнта k_m при замиканні витків одного і того ж провідника. Замикання витків в 2-х і більше однойменних провідниках, також як і замикання витків в різнойменних провідниках призводять до збільшення коефіцієнта k_m в середньому на 5–7 % вже при замиканні 5 витків.

На підставі графіків, представлених на рис. 2.5, чутливість діагностичного критерію k_m становить 3–5 замкнутих витків в одному паралельному провіднику.

Таблиця 2.16

Зміна коефіцієнта k_m від кількості замкнутих витків

Тип АД	m_{1k}	0	1	2	3	4	5	7	10	15	20	25
4A160S4	1	1,0	1,009	1,019	1,028	1,037	1,046	1,065	1,093	1,139	1,185	1,231
A180S4	1	1,0	1,005	1,011	1,016	1,022	1,027	1,038	1,054	1,082	1,109	
	2	1,0	1,011	1,022	1,033	1,043	1,054	1,076	1,109	1,163	1,217	
4A180M4	1	1,0	1,005	1,010	1,015	1,020	1,025	1,034	1,049	1,074		
	2	1,0	1,007	1,015	1,022	1,029	1,037	1,051	1,074	1,110		
	3	1,0	1,015	1,029	1,044	1,059	1,074	1,103	1,147	1,221		
4A225M6	1	1,0	1,006	1,013	1,019	1,025	1,031	1,044	1,063	1,094	1,125	
	2	1,0	1,013	1,025	1,038	1,050	1,063	1,088	1,125	1,188	1,250	
4A250M6	1	1,0	1,006	1,011	1,017	1,022	1,028	1,039	1,056	1,083		
	2	1,0	1,008	1,017	1,025	1,033	1,042	1,058	1,083	1,125		
	3	1,0	1,017	1,033	1,050	1,067	1,083	1,117	1,167	1,250		

Рис. 2.5 Залежність коефіцієнта k_m від числа замкнутих витків

Розглянемо вплив виткових замикань в паралельних провідниках на зміну втрат потужності в обмотці для АД типу 4А180М4У3, що має наступні вихідні дані: кількість паралельних провідників в обмотці $m_1 = 4$, число паралельних гілок в фазі обмотки $a_1=2$, перетин використовуваного провідника $s = 1,227 \text{ мм}^2$, середня довжина витка $l_{cp} = 800 \text{ мм}$, кількість витків на фазу обмотки $w_1 = 68$, активний опір, відповідно до виразу (1.26) дорівнює $r_1 = 0,095 \text{ Ом}$. Номінальні втрати потужності в фазі обмотки $\Delta P_{ном} = 281,14 \text{ Вт}$. Двигун має чотири котушкові групи, які з'єднані в дві паралельні гілки, в кожній з яких по дві послідовно з'єднаних котушкові групи. На рис. 1.12 зображена котушкова група обмотки досліджуваного АД.

У табл. 2.17 представлено розрахунок активного опору при замиканні витків в одному, двох і трьох паралельних провідниках. На рис. 1.12 ці замикання позначені цифрами 1, 2 і 3, кількість замкнутих витків від 1 до максимального 17.

Таблиця 2.17

Зміна активного опору котушки обмотки при короткозамкнутих витках в паралельних провідниках

Виключені паралельні провідники		Кількість короткозамкнутих витків							
		1	2	3	5	7	10	15	17
1 провідник	Ом	0,0955	0,0960	0,0964	0,0972	0,0981	0,0993	0,1013	0,1022
	%	+0,5	+1,1	+1,5	+2,3	+3,3	+4,5	+6,6	+7,6
	r_1	0,095	0,0952	0,0953	0,0955	0,0958	0,0961	0,0965	0,0968
	k_m	1,005	1,010	1,015	1,025	1,034	1,049	1,074	1,083
2 провідника	Ом	0,0965	0,0977	0,0991	0,1015	0,1038	0,1072	0,1122	0,114
	%	+1,6	+2,8	+4,3	+6,8	+9,3	+12,8	+18,1	+20
	r_1	0,0954	0,0957	0,0960	0,0966	0,0972	0,0980	0,0991	0,0995
	k_m	1,007	1,015	1,022	1,037	1,051	1,074	1,110	1,125
3 провідника	Ом	0,0991	0,1026	0,106	0,1122	0,1174	0,124	0,1328	0,1356
	%	+4,3	+8,0	+11,6	+18,1	+23,6	+30,5	+39,8	+42,7
	r_1	0,0960	0,0968	0,0977	0,0991	0,1003	0,1017	0,1036	0,1042
	k_m	1,015	1,029	1,044	1,074	1,103	1,147	1,221	1,250

Примітка: r_1 – активний опір фази двигуна, Ом

При замиканні 1 витка в одній паралельній гілці обмотки опір в котушці збільшується на 0,5 %, при замиканні 17 витків опір збільшиться на 7,6 %. При замиканні 1 витка обмотки статора двох паралельних провідників активний опір котушки збільшується на 1,6 %, а при замиканні 17 витків активний опір збільшиться на 20,0 %. При замиканні витків трьох паралельних провідників активний опір котушки фази статора збільшується на 4,3 % при замиканні 1 витка і на 42,7 % при замиканні 17 витків.

Результати розрахунків струму і втрат потужності за виразами (2.56) і (2.59) наведено в табл. 2.18 і табл. 2.19.

Таблиця 2.18

Зміна струму в фазі А обмотки при короткозамкнутих витках в паралельних провідниках

Виключені паралельні провідники		Кількість короткозамкнутих витків							
		1	2	3	5	7	10	15	17
1 провідник	А	54,399	54,397	54,396	54,394	54,391	54,388	54,382	54,380
	%	+0,0	+0,0	+0,0	+0,017	+0,02	+0,03	+0,04	+0,05
2 провідника	А	54,396	54,392	54,388	54,382	54,375	54,366	54,353	54,348
	%	+0,0	+0,02	+0,03	+0,05	+0,06	+0,09	+0,12	+0,13
3 провідника	А	54,388	54,379	54,369	54,353	54,339	54,323	54,301	54,295
	%	+0,03	+0,055	+0,08	+0,12	+0,16	+0,2	+0,27	+0,29

Таблиця 2.19

Втрати потужності в фазі обмотки при короткозамкнутих витках в паралельних провідниках

Виключені паралельні провідники		Кількість короткозамкнутих витків							
		1	2	3	5	7	10	15	17
1 провідник	Вт	281,50	281,85	282,13	282,70	283,32	284,16	285,54	286,15
	%	+0,1	+0,25	+0,4	+0,55	+0,8	+1,1	+1,6	+1,8
2 провідника	Вт	282,2	283,04	284,02	285,68	287,24	289,52	292,81	293,97
	%	+0,4	+0,7	+1,0	+1,6	+2,2	+3,0	+4,2	+4,6
3 провідника	Вт	284,02	286,43	288,73	292,81	296,13	300,21	305,47	307,09
	%	+1,0	+1,9	+2,7	+4,2	+5,3	+6,8	+8,7	+9,2

Аналіз даних, представлених в табл. 2.18 і табл. 2.19 дозволяє зробити наступні висновки:

1. виткові замикання в одній з котушок обмотки, від мінімально можливого варіанту (замикання 1 витка в 1 паралельному провіднику) до максимально можливого (замикання 17 витків в трьох паралельних провідниках) призводить до зміни струму не більше 0,5 % від номінального значення для досліджуваного АД;

2. при витковому замиканні в 1 паралельному провіднику втрати потужності в даній обмотці збільшуються на 0,1 % при замиканні 1 витка і на 1,8 % при замиканні 17 витків;

3. при витковому замиканні в 2 паралельних провідниках втрати потужності в даній обмотці збільшуються на 0,4 % при замиканні 1 витка і на 4,6 % при замиканні 17 витків;

4. при витковому замиканні в 3 паралельних провідниках втрати потужності в даній обмотці збільшуються на 1,0 % при замиканні 1 витка і на 9,2 % при замиканні 17 витків (рис. 2.6).

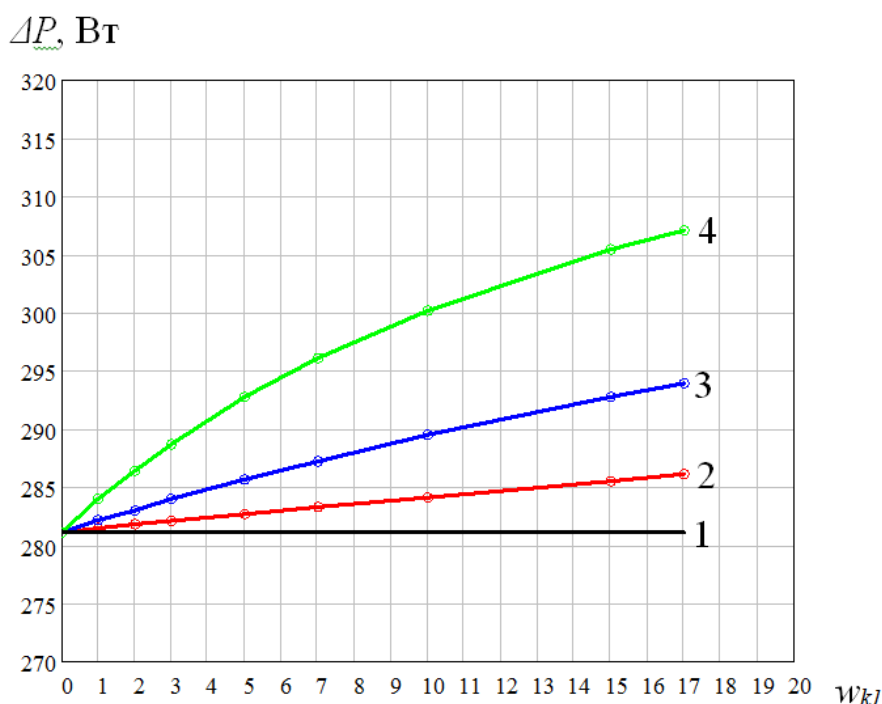


Рис. 2.6 Залежність втрат потужності від кількості замкнутих витків w_{kl} : 1 – номінальні втрати потужності; 2 – втрати потужності при виткових замиканнях в 1 паралельній гілці; 3 – втрати потужності при виткових замиканнях в 2 паралельних гілках; 4 – втрати потужності при виткових замиканнях в 3 паралельних гілках

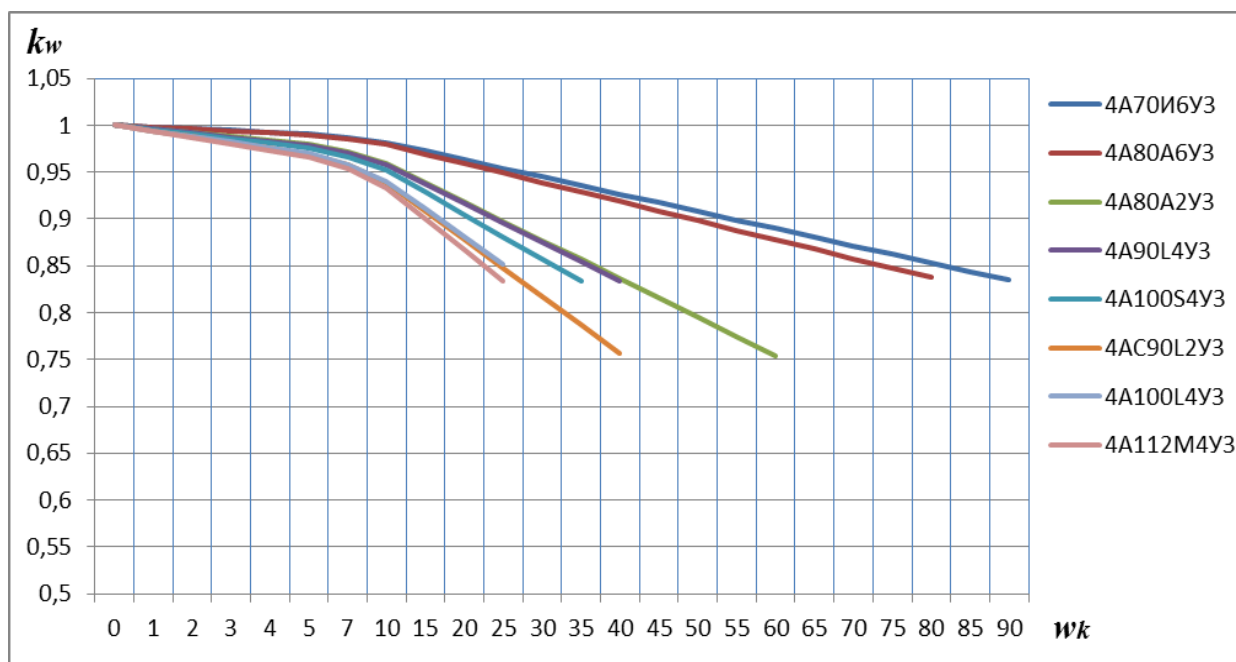
2.2.3.3 Встановлення залежності розподілу струмів при виткових замиканнях і наявності відхилень напруг у фазах

Дослідимо залежність коефіцієнта k_w від кількості замкнутих витків в обмотці для ряду АД потужністю до 5 кВт і визначимо його чутливість. Кількість замкнутих витків змінюється від 1 витка до максимально можливого, яке обмежується числом витків в пазу. Дані досліджуваних двигунів представлені в табл. 2.20. Відповідні графіки показані на рис. 2.7.

Таблиця 2.20

Довідкові дані досліджуваних АД

Тип АД	$P_{ном}$, кВт	w_l	$w_{паз}$
4A70B6Y3	0,55	545	91
4A80A6Y3	0,75	492	82
4A80A2Y3	1,5	244	61
4A90L4Y3	2,2	240	40
4A100S4Y3	3	210	35
4AC90L2Y3	3,5	164	41
4A100L4Y3	4	168	28
4A112M4Y3	5,5	150	25

Рис. 2.7 Графіки залежності коефіцієнта k_w від числа замкнутих витків

Аналіз отриманих залежностей дозволяє зробити наступні висновки:

а) чутливість діагностичного критерію k_w становить 10–15 замкнутих витків для АД з кількістю витків в обмотці понад 400;

б) чутливість діагностичного критерію k_w становить 5–10 замкнутих витків для АД з кількістю витків в обмотці менше 300.

Чутливість отриманого коефіцієнта залежить від класів точності вимірювальної та перетворювальної техніки.

Теоретичні дослідження проведені на АД типу 4А80А2У3 з параметрами: $P_n=1,5$ кВт, $n=2850$ об/хв, $I_n=3,31$ А, $\cos\varphi=0,85$, $\eta=0,86$, робочий струм $I_p=2,650$ А; величини елементів схеми заміщення: $r_1=4,1$ Ом, $x_1=4,3$ Ом, $r_2=3,67$ Ом, $x_2=4,52$ Ом, $r_\mu=4,11$ Ом, $x_\mu=123,15$ Ом. Кількість витків обмотки $w_1=244$, в пазу розташований 61 виток. У табл. 2.21 наведені значення коефіцієнта k_w і дані зміни повного опору АД при замиканнях від 1 до 60 витків.

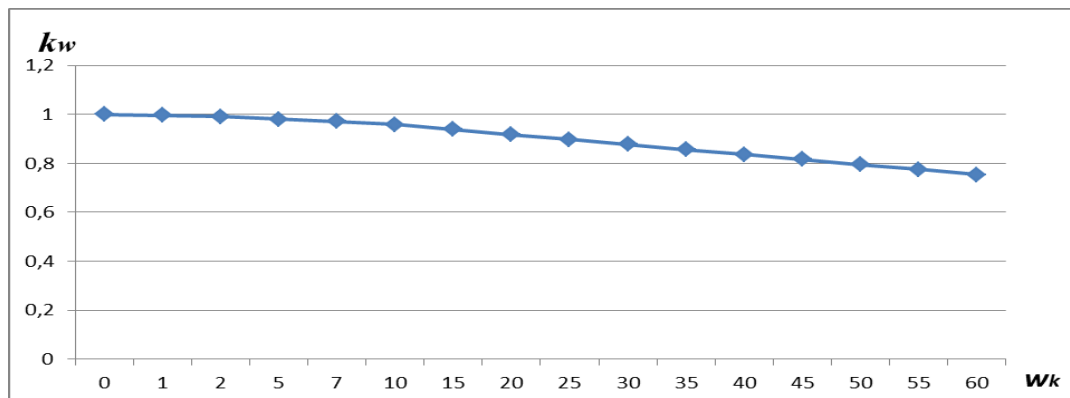
Таблиця 2.21

Зміна повного опору АД при виткових замиканнях

Кількість замкнутих витків	0	1	2	5	7	10	15	20
Повний опір	82,965	82,672	82,357	81,390	80,733	79,730	77,997	76,203
Коефіцієнт k_w	1	0,996	0,992	0,980	0,971	0,959	0,939	0,918
Кількість замкнутих витків	25	30	35	40	45	50	55	60
Повний опір	74,337	72,406	70,420	68,357	66,241	64,069	61,848	59,579
Коефіцієнт k_w	0,898	0,877	0,857	0,836	0,816	0,795	0,775	0,754

На рис. 2.8 представлена залежність зміни коефіцієнта k_w від числа замкнутих витків.

Знаючи зміну коефіцієнта k_w і повного опору АД за виразами (2.56)–(2.58), визначимо розподіл струмів по фазах. Як при симетричних напругах, так і при наявності відхилень напруг $\pm 5\%$ по фазах. Відповідні результати представлені в табл. 2.22–2.27 і на рис. 2.9–2.14.

Рис. 2.8 Зміна коефіцієнта k_w від числа замкнутих витків

Таблиця 2.22

Токи, при виткових в фазе А и отклонении напряжений в фазе А

КІЛЬК. К.З. ВИТКІВ	k_w	I_p при $\Delta U_a = 0 \%$			I_p при $\Delta U_a = + 5 \%$			I_p при $\Delta U_a = - 5 \%$		
		I_a, A	I_b, A	I_c, A	I_a, A	I_b, A	I_c, A	I_a, A	I_b, A	I_c, A
0	1	2,652	2,652	2,652	2,785	2,652	2,652	2,6962	2,564	2,564
1	0,996	2,6524	2,652	2,652	2,7851	2,652	2,652	2,6961	2,564	2,564
2	0,992	2,653	2,652	2,652	2,7855	2,652	2,652	2,696	2,564	2,564
5	0,980	2,6545	2,652	2,652	2,7873	2,652	2,652	2,6954	2,565	2,565
7	0,971	2,6558	2,652	2,652	2,7886	2,652	2,652	2,695	2,566	2,566
10	0,959	2,658	2,652	2,652	2,791	2,652	2,652	2,694	2,567	2,567
15	0,939	2,663	2,652	2,652	2,796	2,652	2,652	2,693	2,57	2,57
20	0,918	2,668	2,652	2,652	2,802	2,652	2,652	2,691	2,574	2,574
25	0,898	2,675	2,652	2,652	2,809	2,652	2,652	2,689	2,578	2,578
30	0,877	2,683	2,652	2,652	2,818	2,652	2,652	2,687	2,583	2,583
35	0,857	2,691	2,652	2,652	2,826	2,652	2,652	2,684	2,588	2,588
40	0,836	2,701	2,652	2,652	2,836	2,652	2,652	2,681	2,595	2,595
45	0,816	2,712	2,652	2,652	2,848	2,652	2,652	2,677	2,602	2,602
50	0,795	2,725	2,652	2,652	2,861	2,652	2,652	2,674	2,610	2,610
55	0,775	2,739	2,652	2,652	2,876	2,652	2,652	2,602	2,652	2,652
60	0,754	2,754	2,652	2,652	2,892	2,652	2,652	2,616	2,652	2,652

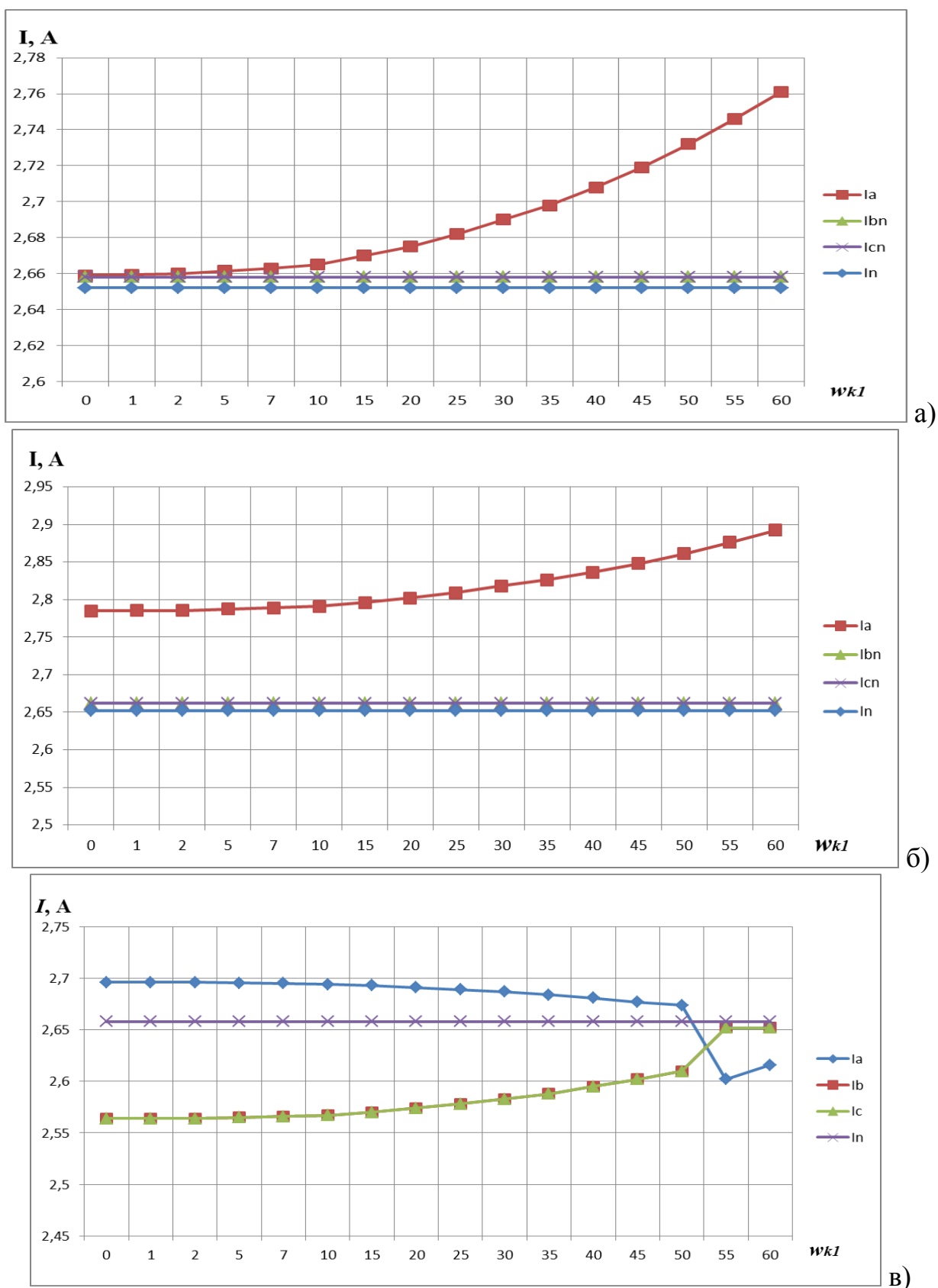
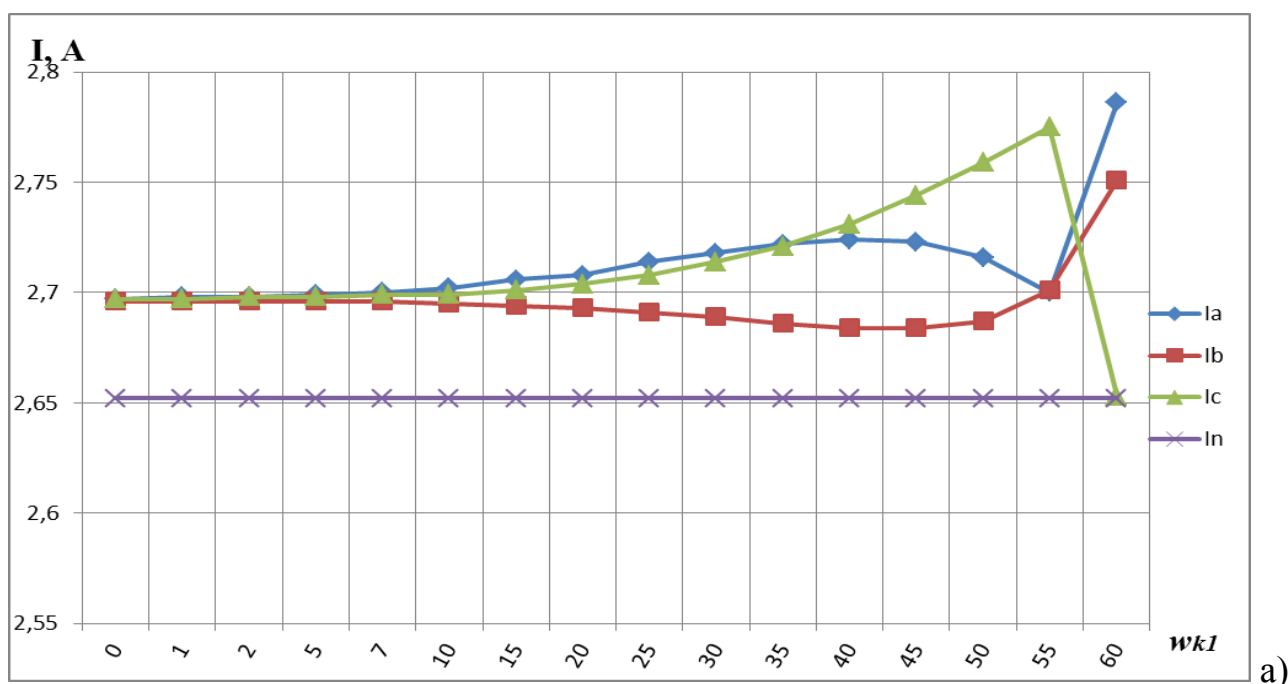


Рис. 2.9 Зміна струму по фазах залежно від кількості замкнутих витків в фазі А при відхиленнях напруги: а) $\Delta U_a = 0\%$, $\Delta U_b = 0\%$, $\Delta U_c = 0\%$; б) $\Delta U_a = +5\%$, $\Delta U_b = 0\%$, $\Delta U_c = 0\%$; в) $\Delta U_a = -5\%$, $\Delta U_b = 0\%$, $\Delta U_c = 0\%$

Таблиця 2.23

Струми при виткових замиканнях в фазі А і відхиленні напруги в фазі В

Кільк. к.з. витків	k_w	I_p при $\Delta U_b = 0\%$			I_p при $\Delta U_b = +5\%$			I_p при $\Delta U_b = -5\%$		
		I_a, A	I_b, A	I_c, A	I_a, A	I_b, A	I_c, A	I_a, A	I_b, A	I_c, A
0	1	2,652	2,652	2,652	2,697	2,696	2,697	2,609	2,608	2,609
1	0,996	2,6524	2,652	2,652	2,698	2,696	2,697	2,609	2,608	2,609
2	0,992	2,653	2,652	2,652	2,698	2,696	2,698	2,609	2,609	2,609
5	0,980	2,6545	2,652	2,652	2,699	2,696	2,698	2,609	2,610	2,610
7	0,971	2,6558	2,652	2,652	2,700	2,696	2,699	2,608	2,611	2,610
10	0,959	2,658	2,652	2,652	2,702	2,695	2,699	2,608	2,613	2,611
15	0,939	2,663	2,652	2,652	2,706	2,694	2,701	2,607	2,616	2,613
20	0,918	2,668	2,652	2,652	2,708	2,693	2,704	2,606	2,620	2,616
25	0,898	2,675	2,652	2,652	2,714	2,691	2,708	2,676	2,520	2,650
30	0,877	2,683	2,652	2,652	2,718	2,689	2,714	2,685	2,520	2,649
35	0,857	2,691	2,652	2,652	2,722	2,686	2,721	2,695	2,521	2,647
40	0,836	2,701	2,652	2,652	2,724	2,684	2,731	2,706	2,522	2,645
45	0,816	2,712	2,652	2,652	2,723	2,684	2,744	2,719	2,523	2,642
50	0,795	2,725	2,652	2,652	2,716	2,687	2,759	2,733	2,525	2,638
55	0,775	2,739	2,652	2,652	2,700	2,701	2,775	2,748	2,528	2,634
60	0,754	2,754	2,652	2,652	2,786	2,751	2,653	2,764	2,531	2,630



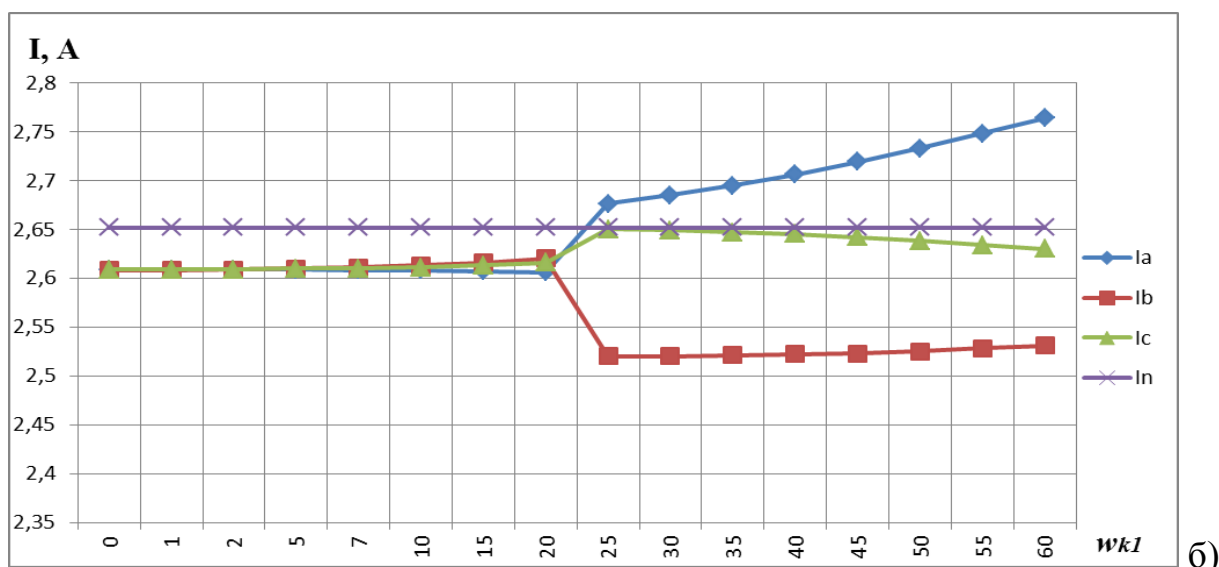
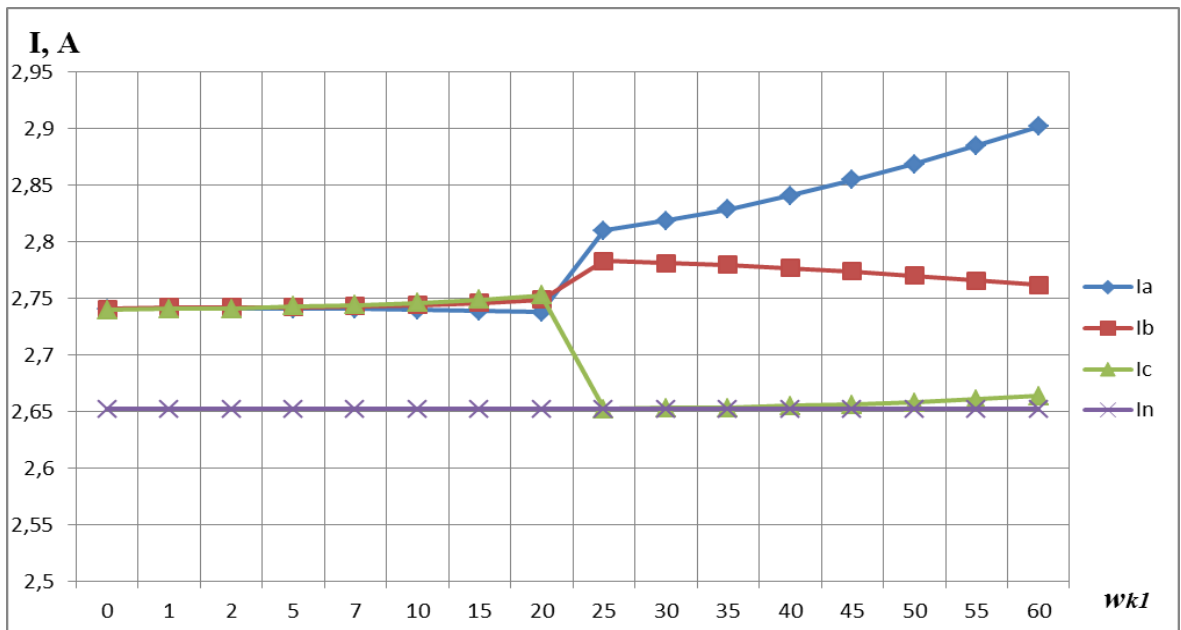


Рис. 2.10 Зміна струму по фазах залежно від кількості замкнутих витків в фазі А при відхиленнях напруги: а) $\Delta U_a = 0 \%$, $\Delta U_b = +5 \%$, $\Delta U_c = 0 \%$; б) $\Delta U_a = 0 \%$, $\Delta U_b = -5 \%$, $\Delta U_c = 0 \%$

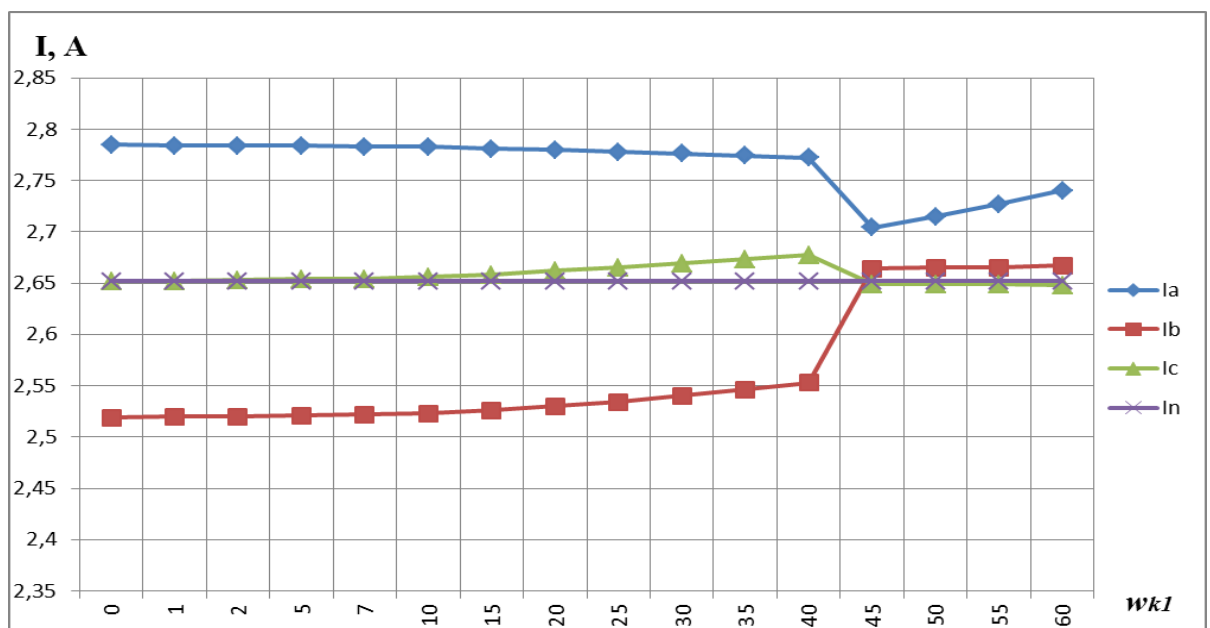
Таблиця 2.24

Токи, при виткових замиканнях в фазі А, при $\Delta U_b = +5 \%$, $\Delta U_c = 0 \%$ і зміні ΔU у фазі А

Кільк. к.з. витків	k_w	I_p при $\Delta U_a = 0 \%$			I_p при $\Delta U_a = +5 \%$			I_p при $\Delta U_a = -5 \%$		
		I_a, A	I_b, A	I_c, A	I_a, A	I_b, A	I_c, A	I_a, A	I_b, A	I_c, A
0	1	2,697	2,696	2,697	2,741	2,741	2,740	2,785	2,519	2,652
1	0,996	2,698	2,696	2,697	2,741	2,742	2,741	2,784	2,520	2,652
2	0,992	2,698	2,696	2,698	2,741	2,742	2,741	2,784	2,520	2,653
5	0,980	2,699	2,696	2,698	2,741	2,742	2,743	2,784	2,521	2,654
7	0,971	2,700	2,696	2,699	2,741	2,743	2,744	2,783	2,522	2,654
10	0,959	2,702	2,695	2,699	2,740	2,744	2,746	2,783	2,523	2,656
15	0,939	2,706	2,694	2,701	2,739	2,746	2,749	2,781	2,526	2,658
20	0,918	2,708	2,693	2,704	2,738	2,749	2,753	2,780	2,530	2,662
25	0,898	2,714	2,691	2,708	2,810	2,783	2,652	2,778	2,534	2,665
30	0,877	2,718	2,689	2,714	2,819	2,781	2,653	2,776	2,540	2,669
35	0,857	2,722	2,686	2,721	2,829	2,780	2,653	2,774	2,546	2,673
40	0,836	2,724	2,684	2,731	2,841	2,777	2,655	2,772	2,553	2,677
45	0,816	2,723	2,684	2,744	2,855	2,774	2,656	2,704	2,664	2,649
50	0,795	2,716	2,687	2,759	2,869	2,770	2,658	2,715	2,665	2,649
55	0,775	2,700	2,701	2,775	2,885	2,766	2,661	2,727	2,665	2,649
60	0,754	2,786	2,751	2,653	2,902	2,762	2,664	2,740	2,667	2,648



a)



б)

Рис. 2.11 Зміна струму по фазах залежно від кількості замкнутих витків в фазі А при відхиленнях напруги

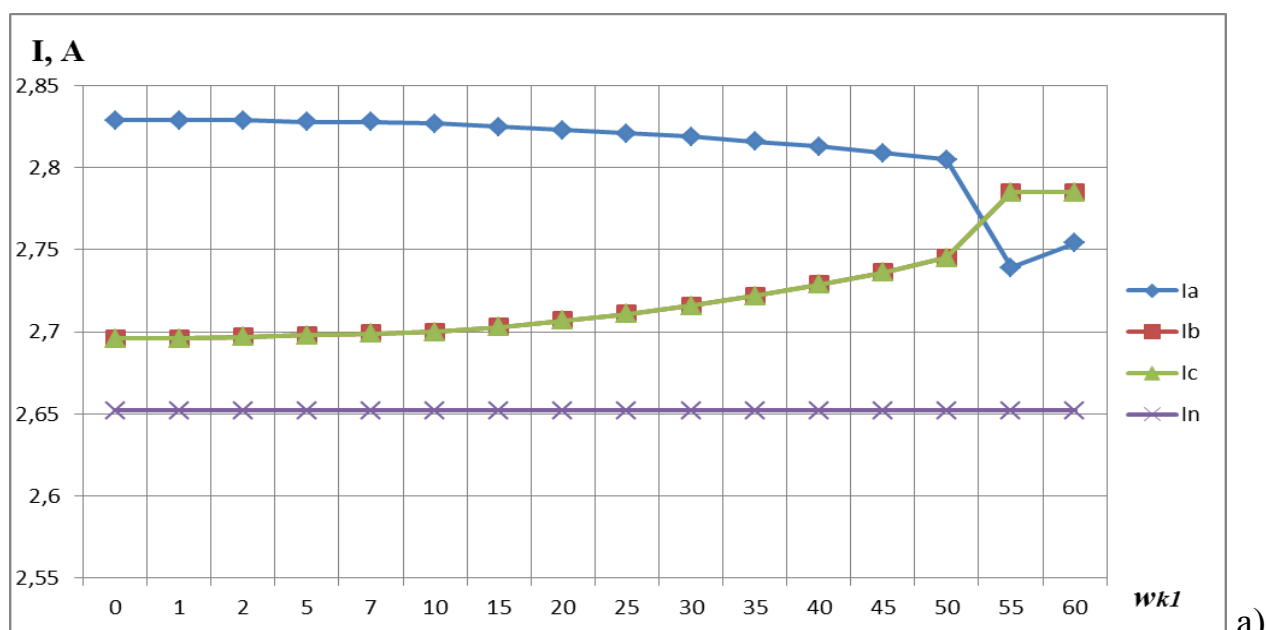
а) $\Delta U_a = +5\%$, $\Delta U_b = +5\%$, $\Delta U_c = 0\%$

б) $\Delta U_a = -5\%$, $\Delta U_b = +5\%$, $\Delta U_c = 0\%$

Таблиця 2.25

Токи при виткових замиканнях в фазі А, при $\Delta U_a = 0\%$, $\Delta U_b = +5\%$ і зміні ΔU у фазі С

Кільк. к.з. ВИТКІВ	k_w	I_p при $\Delta U_c = 0\%$			I_p при $\Delta U_c = +5\%$			I_p при $\Delta U_c = -5\%$		
		I_a, A	I_b, A	I_c, A	I_a, A	I_b, A	I_c, A	I_a, A	I_b, A	I_c, A
0	1	2,697	2,696	2,697	2,829	2,696	2,696	2,656	2,653	2,653
1	0,996	2,698	2,696	2,697	2,829	2,696	2,696	2,657	2,653	2,653
2	0,992	2,698	2,696	2,698	2,829	2,697	2,697	2,657	2,653	2,654
5	0,980	2,699	2,696	2,698	2,828	2,698	2,698	2,657	2,653	2,655
7	0,971	2,700	2,696	2,699	2,828	2,699	2,699	2,658	2,653	2,656
10	0,959	2,702	2,695	2,699	2,827	2,700	2,700	2,658	2,652	2,658
15	0,939	2,706	2,694	2,701	2,825	2,703	2,703	2,660	2,652	2,662
20	0,918	2,708	2,693	2,704	2,823	2,707	2,707	2,661	2,651	2,667
25	0,898	2,714	2,691	2,708	2,821	2,711	2,711	2,662	2,651	2,673
30	0,877	2,718	2,689	2,714	2,819	2,716	2,716	2,662	2,651	2,680
35	0,857	2,722	2,686	2,721	2,816	2,722	2,722	2,662	2,651	2,688
40	0,836	2,724	2,684	2,731	2,813	2,729	2,729	2,662	2,653	2,697
45	0,816	2,723	2,684	2,744	2,809	2,736	2,736	2,660	2,657	2,707
50	0,795	2,716	2,687	2,759	2,805	2,745	2,745	2,656	2,662	2,718
55	0,775	2,700	2,701	2,775	2,739	2,785	2,785	2,651	2,669	2,729
60	0,754	2,786	2,751	2,653	2,754	2,785	2,785	2,644	2,681	2,740



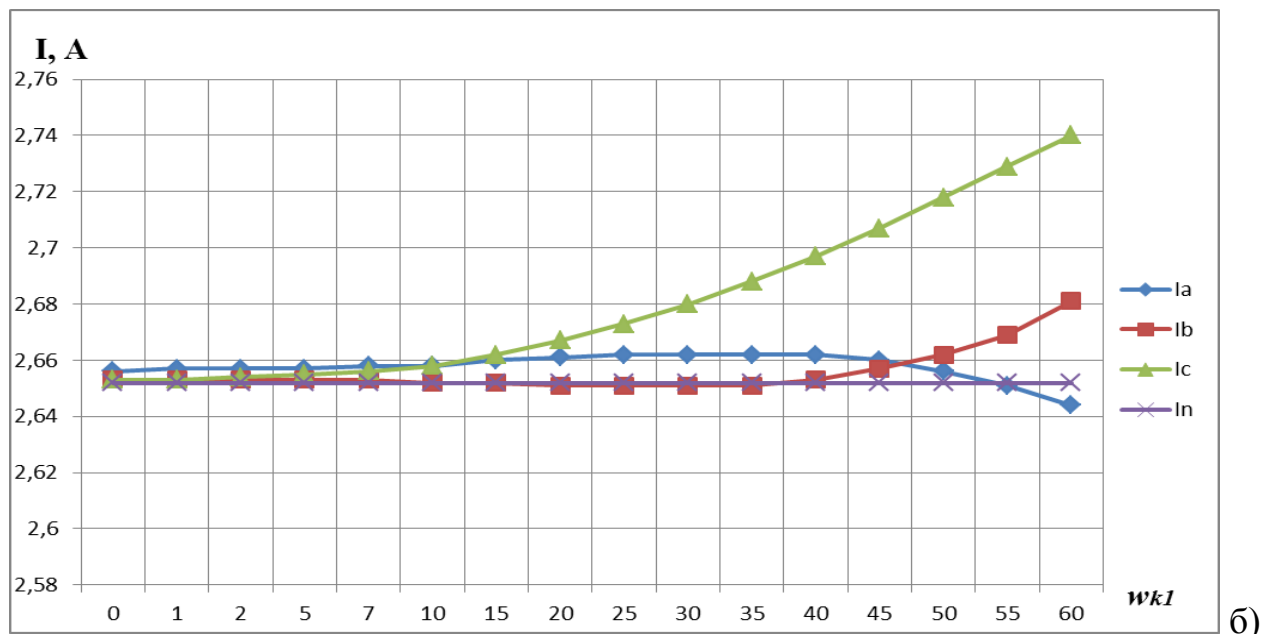
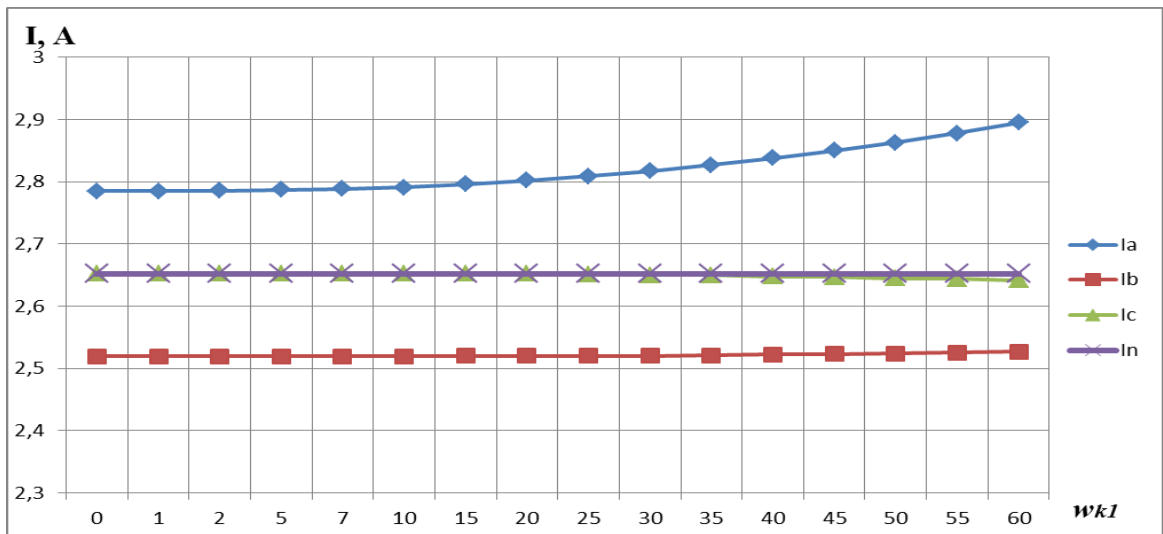


Рис. 2.12 Зміна струму по фазах залежно від кількості замкнутих витків в фазі А при відхиленнях напруги; а) $\Delta U_a = 0 \%$, $\Delta U_b = +5 \%$, $\Delta U_c = +5 \%$; б) $\Delta U_a = 0 \%$, $\Delta U_b = +5 \%$, $\Delta U_c = -5 \%$

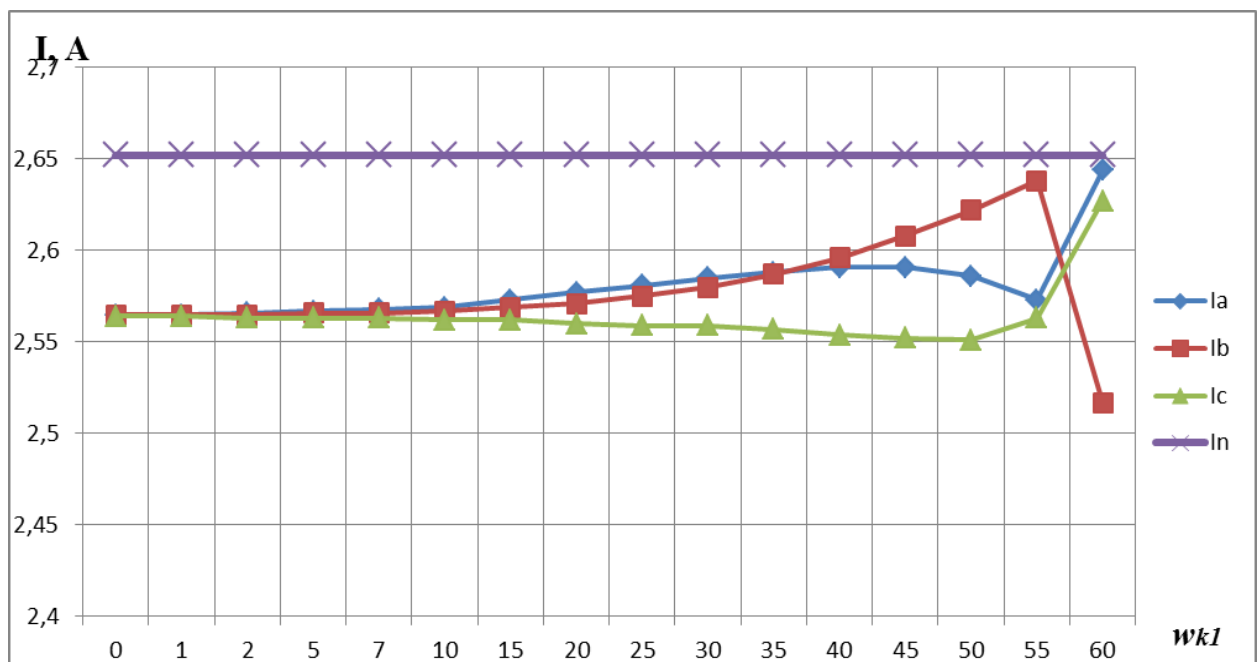
Таблиця 2.26

Токи при виткових замиканнях в фазі А, при $\Delta U_b = -5 \%$, $\Delta U_c = 0 \%$ і зміні ΔU

Кільк. к.з. витків	k_w	I_p при $\Delta U_a = 0 \%$			I_p при $\Delta U_a = +5 \%$			I_p при $\Delta U_a = -5 \%$		
		I_a , А	I_b , А	I_c , А	I_a , А	I_b , А	I_c , А	I_a , А	I_b , А	I_c , А
0	1	2,609	2,608	2,609	2,785	2,519	2,652	2,565	2,565	2,564
1	0,996	2,609	2,608	2,609	2,785	2,519	2,652	2,565	2,565	2,564
2	0,992	2,609	2,609	2,609	2,786	2,519	2,652	2,566	2,565	2,563
5	0,980	2,609	2,610	2,610	2,787	2,519	2,652	2,567	2,566	2,563
7	0,971	2,608	2,611	2,610	2,789	2,519	2,652	2,568	2,566	2,563
10	0,959	2,608	2,613	2,611	2,791	2,519	2,652	2,569	2,567	2,562
15	0,939	2,607	2,616	2,613	2,796	2,520	2,652	2,573	2,569	2,562
20	0,918	2,606	2,620	2,616	2,802	2,520	2,652	2,577	2,571	2,560
25	0,898	2,676	2,520	2,650	2,809	2,520	2,651	2,581	2,575	2,559
30	0,877	2,685	2,520	2,649	2,817	2,520	2,650	2,585	2,580	2,559
35	0,857	2,695	2,521	2,647	2,827	2,521	2,650	2,588	2,587	2,557
40	0,836	2,706	2,522	2,645	2,838	2,522	2,648	2,591	2,596	2,554
45	0,816	2,719	2,523	2,642	2,850	2,523	2,647	2,591	2,608	2,552
50	0,795	2,733	2,525	2,638	2,863	2,524	2,645	2,586	2,622	2,551
55	0,775	2,748	2,528	2,634	2,878	2,525	2,644	2,573	2,638	2,563
60	0,754	2,764	2,531	2,630	2,895	2,527	2,642	2,644	2,517	2,627



а)



б)

Рис. 2.13 Зміна струму по фазах залежно від кількості замкнутих витків в фазі А при відхиленнях напруги

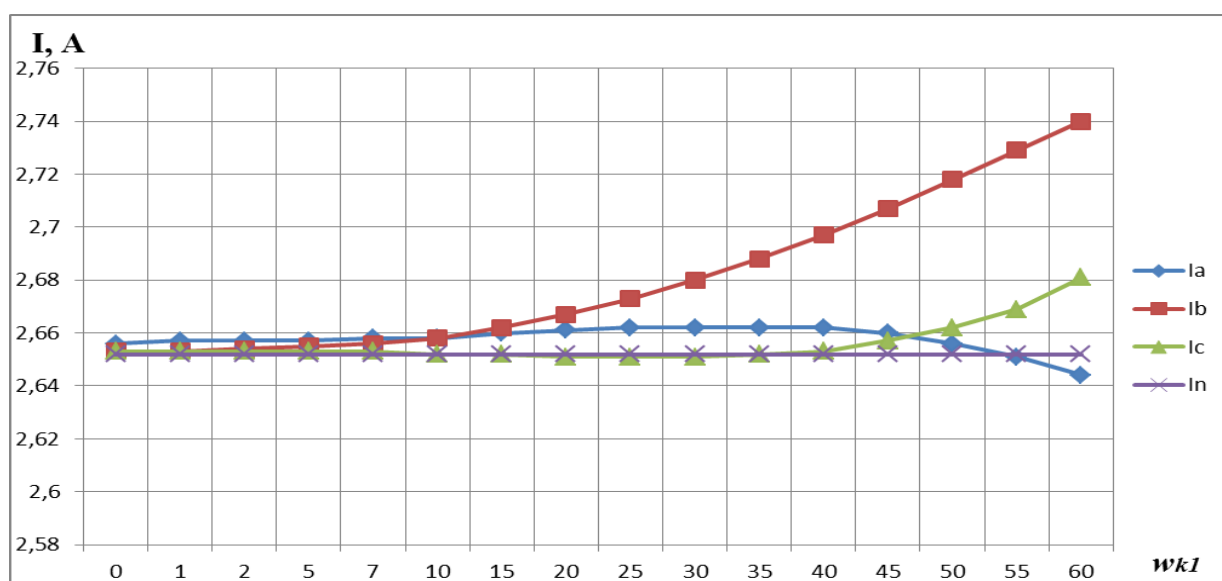
а) $\Delta U_a = +5\%$, $\Delta U_b = -5\%$, $\Delta U_c = 0\%$

б) $\Delta U_a = -5\%$, $\Delta U_b = -5\%$, $\Delta U_c = 0\%$

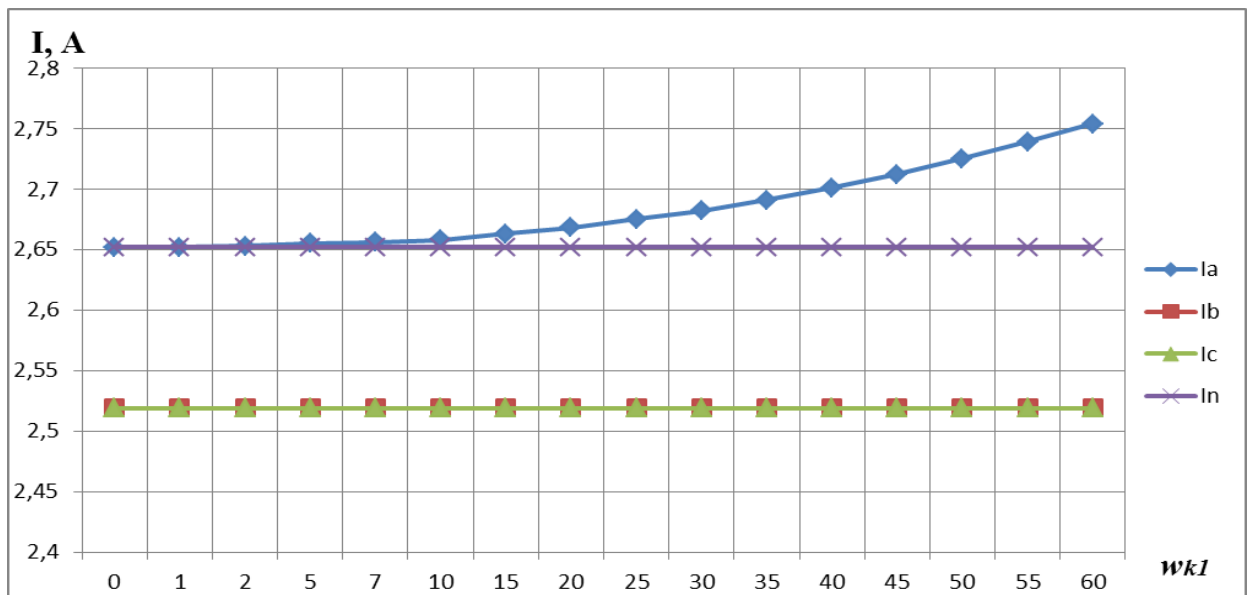
Таблиця 2.27

Токи при виткових замиканнях в фазі А, при $\Delta U_a = 0\%$, $\Delta U_b = -5\%$ і зміні ΔU у фазі С

Кільк. к.з. витків	k_w	I_p при $\Delta U_c = 0\%$			I_p при $\Delta U_c = +5\%$			I_p при $\Delta U_c = -5\%$		
		I_a, A	I_b, A	I_c, A	I_a, A	I_b, A	I_c, A	I_a, A	I_b, A	I_c, A
0	1	2,609	2,608	2,609	2,656	2,653	2,653	2,652	2,519	2,519
1	0,996	2,609	2,608	2,609	2,657	2,653	2,653	2,652	2,519	2,519
2	0,992	2,609	2,609	2,609	2,657	2,654	2,653	2,653	2,519	2,519
5	0,980	2,609	2,610	2,610	2,657	2,655	2,653	2,655	2,519	2,519
7	0,971	2,608	2,611	2,610	2,658	2,656	2,653	2,656	2,519	2,519
10	0,959	2,608	2,613	2,611	2,658	2,658	2,652	2,658	2,519	2,519
15	0,939	2,607	2,616	2,613	2,660	2,662	2,652	2,663	2,519	2,519
20	0,918	2,606	2,620	2,616	2,661	2,667	2,651	2,668	2,519	2,519
25	0,898	2,676	2,520	2,650	2,662	2,673	2,651	2,675	2,519	2,519
30	0,877	2,685	2,520	2,649	2,662	2,680	2,651	2,682	2,519	2,519
35	0,857	2,695	2,521	2,647	2,662	2,688	2,652	2,691	2,519	2,519
40	0,836	2,706	2,522	2,645	2,662	2,697	2,653	2,701	2,519	2,519
45	0,816	2,719	2,523	2,642	2,660	2,707	2,657	2,712	2,519	2,519
50	0,795	2,733	2,525	2,638	2,656	2,718	2,662	2,725	2,519	2,519
55	0,775	2,748	2,528	2,634	2,651	2,729	2,669	2,739	2,519	2,519
60	0,754	2,764	2,531	2,630	2,644	2,740	2,681	2,754	2,519	2,519



a)



б)

Рис. 2.14 Зміна струму по фазах залежно від кількості замкнутих витків в фазі А при відхиленнях напруги

$$\text{а) } \Delta U_a = 0 \%, \Delta U_b = -5 \%, \Delta U_c = +5 \%$$

$$\text{б) } \Delta U_a = 0 \%, \Delta U_b = -5 \%, \Delta U_c = -5 \%$$

Отримані дані дозволяють прогнозувати зміну струмів в фазах при виникненні виткових замикань і наявності відхилень напруг по фазах. Застосування розробленої математичної моделі в системах діагностики виявлення виткових замикань в процесі експлуатації АД дозволить визначати початковий момент виникнення виткового замикання методом порівняння змодельованих значень при несиметрії опорів і напруг мережі з фактично вимірними величинами.

2.3 Уточнення теплової моделі АД для розрахунку додаткового нагріву обмоток з несиметричними опорами в мережах з несиметричними напругами

Дослідження впливу режимів роботи АД на його температурне поле здійснюють за допомогою теплових моделей різного ступеня деталізації. Як зазначалося раніше, моделі, що мають 3 і більше джерел тепла, мають меншу похибку. Однак для цього необхідні додаткові дані про теплові провідності і ємності окремих конструктивних елементів АД, які дуже проблематично

визначити на двигунах, що знаходяться в роботі. Такі моделі застосовуються, як правило, тільки на стадії проектування. Найбільш простою є теплова модель, що представляє АД як єдине однорідне тіло із загальною температурою. У роботах [34, 35] обґрунтована адекватність застосування такої теплової моделі для визначення температури в найбільш навантаженої обмотці.

Застосування однотільної теплової моделі, що описана вище, при наявності виткових замикань в умовах показників якості електроенергії, які динамічно змінюються, можливе при додатковому обліку зміни параметрів схеми заміщення АД при короткозамкнутих витках. Точність результату буде залежати від правильності визначення параметрів елементів схеми заміщення АД в процесі експлуатації і від обліку при розрахунку втрат потужності в обмотках, несиметричних режимах мережі і відхиленнях опорів у фазах.

При сталому режимі роботи, при номінальному навантаженні і симетричних напруженнях мережі температура АД визначається:

$$\Theta_{ном} = \Theta_{о.с.} + \frac{\Delta P_{ном}}{\alpha \cdot s_{пов}}, \quad (2.64)$$

де $\Theta_{о.с.}$ – температура оточуючого середовища; $s_{пов}$ – площа поверхні охолодження.

Згідно теплової моделі тепло, що виділяється в одиницю часу в обмотці, пропорційно потужності електричних втрат:

$$\Delta \Theta_{уст} = \Delta \Theta_{ном} \cdot \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_{ном}} \right), \quad (2.65)$$

де $\Delta \Theta_{ном} = \Theta_{ном} - \Theta_{о.с.}$ – перевищення температури обмоток відповідно номінальному режиму; $\Delta P_{ном}$ – втрати потужності при номінальному режимі роботи АД; ΔP – втрати потужності, відповідні температурі $\Delta \Theta_{уст}$.

Відповідно, підставляючи втрати потужності згідно з (2.59)–(2.61), що враховують наявність відхилень напруг і відмінність опорів по фазах, рівняння (2.65) набуде вигляду

$$\Theta_a = \frac{\Theta_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_Q) + k_{2I}^2\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{t_{ном}}}\right) \quad (2.66)$$

$$\Theta_b = \frac{\Theta_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos\left(\varphi_V - \varphi_Q + \frac{2\pi}{3}\right) + k_{2I}^2\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{t_{ном}}}\right) \quad (2.67)$$

$$\Theta_c = \frac{\Theta_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos\left(\varphi_V - \varphi_Q - \frac{2\pi}{3}\right) + k_{2I}^2\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{t_{ном}}}\right) \quad (2.68)$$

де Θ_a – перевищення температури обмотки фази А при наявності несиметрії напруг і відхиленні активних опорів; t – час; $t_{ном}$ – постійна часу нагрівання.

Вирази (2.66)–(2.68) можна використовувати для оцінки теплового стану обмоток АД при різних ступенях несиметрії опорів, викликаній витковими замиканнями, і відхиленнях напруги, що динамічно змінюються.

На підставі даних табл. 2.13, за виразами (2.66)–(2.68) визначимо зміни температури по фазах при наявності відхилень напруги і відхиленнях активних опорів. Результати розрахунків представлені в табл. 2.28.

Аналіз даних табл. 2.28 показав, що при відхиленнях напруги $\Delta U_a = +7$ В, $\Delta U_b = +2,1$ В, $\Delta U_c = -10,9$ В наявність відхилення активного опору в найбільш завантаженій фазі А $\Delta r = -4$ % призводить до додаткового підвищення температури на $3,4$ °С, а наявність $\Delta r = -8$ % спричиняє додаткове підвищення температури на $6,7$ °С.

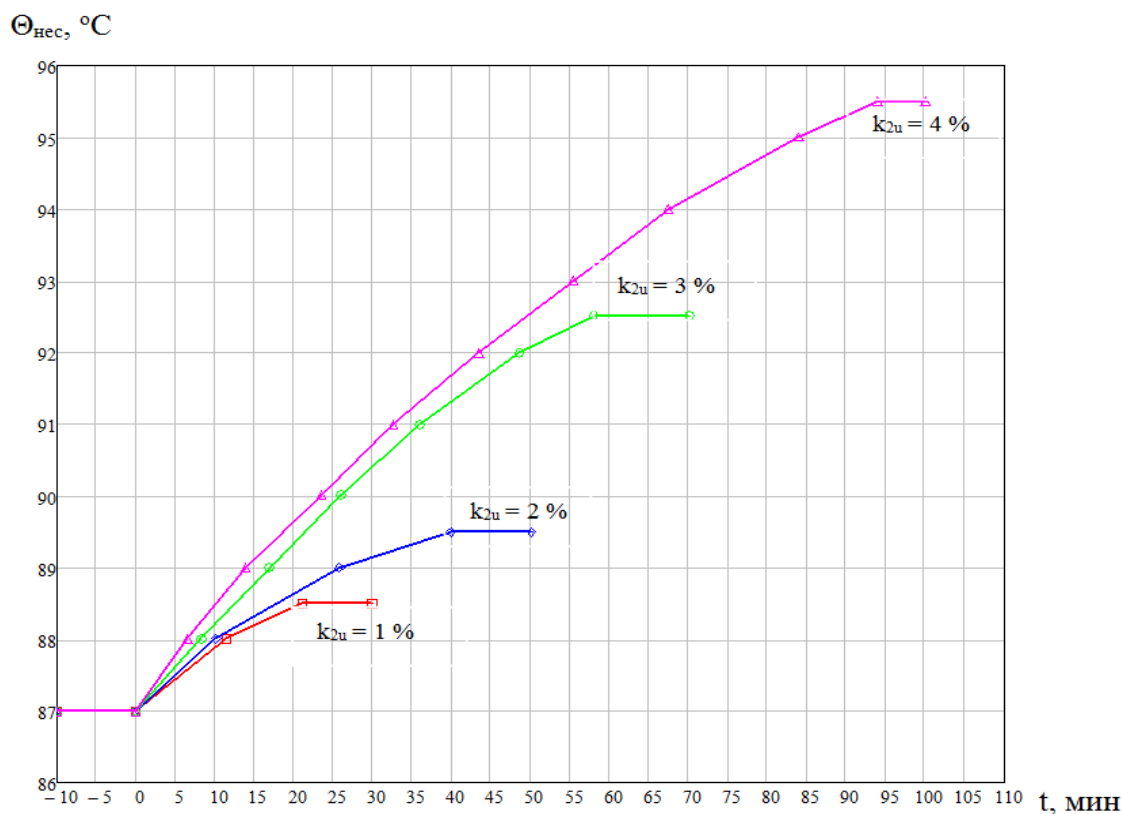
Експериментальне дослідження нагріву обмоток при несиметрії опорів і напруг мережі провели на АД 4А71В6У3. Паспортні дані: $P_{ном} = 0,55$ кВт, $n = 890$ об/хв, $\cos\varphi = 0,71$, $\eta = 0,7$. Двигун після заміни обмоток має несиметричні опори по фазах статора: $Z_a = 23,96 + j46,91\Omega$, $Z_b = 24,80 + j47,09\Omega$, $Z_c = 24,05 + j46,95\Omega$, приведений опір ротора $Z'_2 = \frac{17,71}{s} + j25,8\Omega$, опір гілки намагнічування $Z_\mu = 28,5 + j181,1\Omega$. На обмотку встановлений термодатчик. Дослідження проводилися на лабораторному стенді, який дозволяє задавати несиметрію напруг до 4 %.

Таблиця 2.28

Температури фаз і їх зміни щодо робочої температури при відхиленнях напруги $\Delta U_a = +7$ В, $\Delta U_b = +2,1$ В, $\Delta U_c = -10,9$ В ($k_{2U} = 2,03$ %) і відхиленнях активних опорів

Температура, °С	$\Delta r = +(4 \text{ та } 8) \%$								
	А*			В*			С*		
	0	4	8	0	4	8	0	4	8
θ_a	77,6	75,0	72,2	77,6	77,6	77,6	77,6	77,4	77,3
θ_b	74,3	74,0	73,7	74,3	71,7	68,9	74,3	74,2	74,1
θ_c	65,8	66,0	66,2	65,8	65,7	65,8	65,8	63,8	61,6
$\Delta\theta_a = \theta_a - \theta_n$	+4,6	+2,0	-0,8	+4,6	+4,6	+4,6	+4,6	+4,4	+4,3
$\Delta\theta_b = \theta_b - \theta_n$	+1,3	+1,0	+0,7	+1,3	-1,3	-4,1	+1,3	+1,2	+1,1
$\Delta\theta_c = \theta_c - \theta_n$	-7,2	-7,0	-6,8	-7,2	-7,3	-7,2	-7,2	-9,2	-11,4
	$\Delta r = -(4 \text{ та } 8) \%$								
	А*			В*			С*		
	0	4	8	0	4	8	0	4	8
θ_a	77,6	81,0	84,3	77,6	77,6	77,5	77,6	77,8	78,0
θ_b	74,3	74,6	74,9	74,3	77,7	81,0	74,3	74,4	74,6
θ_c	65,8	65,6	65,3	65,8	65,8	65,9	65,8	68,4	71,0
$\Delta\theta_a = \theta_a - \theta_n$	+4,6	+8,0	+11, 3	+4,6	+4,6	+4,5	+4,6	+4,8	+5,0
$\Delta\theta_b = \theta_b - \theta_n$	+1,3	+1,6	+1,9	+1,3	+4,7	+8,0	+1,3	+1,4	+1,6
$\Delta\theta_c = \theta_c - \theta_n$	-7,2	-7,4	-7,7	-7,2	-7,2	-7,1	-7,2	-4,6	-2,0

В ході експерименту АД нагрівався до сталої температури номінальним струмом. Далі за допомогою несиметричного навантаження встановлювався коефіцієнт несиметрії напруг k_{2U} 1, 2, 3 і 4 %. Для кожного випадку знімалася крива нагріву при температурі навколишнього середовища 20 °С. Відповідні криві наведені на рис. 2.15. Вимірювання електричних параметрів проводились мікропроцесорним багатофункціональним приладом Fluke 432. Знімалися дані про напругу на затискачах АД, токи в фазах, вимірювалися коефіцієнти несиметрії напруг і струмів. Результати експерименту та теоретичного розрахунку за виразами (2.66)–(2.68) представлені в таблиці 2.29.

Рис. 2.15 Експериментальні криві нагріву АД при зміні k_{2U}

Таблиця 2.29

Результати теплового розрахунку і експерименту

Тип АД	$k_{2U}, \%$	Перевищення температури обмотки, $^\circ\text{C}$	
		Експеримент	Розрахунок за виразом (2.66)
4A71B6У3	0	87	85,8
	1	88,5	91,1
	2	89,5	89,1
	3	92,5	90,7
	4	95,5	93,1

Як видно з табл. 2.29 похибка теоретичного розрахунку і експерименту не перевищує 5 %. Тому для визначення температури найбільш завантаженої фази в інженерних розрахунках можна використовувати вирази (2.66)–(2.68).

Висновки до розділу

1. Удосконалено методику визначення параметрів схеми заміщення для АД потужністю до 5 кВт, в якій проводиться вимір активного опору обмоток статора, проводяться досліди холостого ходу і короткого замикання, за результатами яких обчислюються опори статора, ротора і магнітного ланцюга. Запропонований алгоритм розрахунку підвищив точність отриманих результатів, в порівнянні з існуючими методами на 10–15 %. Похибка методики не перевищує 1,5 %.

2. Проведені дослідження показали, що для АД потужністю до 2 кВт при теплових розрахунках необхідно враховувати наявність відхилень активних опорів в обмотках статора. Неврахування відхилень активних опорів призводить до похибки розрахунку втрат потужності до 8 % для АД 0,5 кВт і до 7 % для АД 1,5 кВт. Для АД потужністю понад 2 кВт похибка розрахунку при неврахуванні відхилень активних опорів не перевищує 1 %.

3. Несиметрія активних опорів в АД потужністю від 5,5 до 55 кВт, викликана замиканням витків в паралельних провідниках, призводить до додаткових втрат потужності в обмотках. Для АД 4A180M4У3, що має 4 паралельних провідника в обмотці: при витковому замиканні в 1 паралельному провіднику втрати потужності збільшуються на 0,1 % при замиканні 1 витка і на 1,8 % при замиканні 17 витків; при витковому замиканні в 2 паралельних провідниках втрати потужності збільшуються на 0,4 % при замиканні 1 витка і на 4,6 % при замиканні 17 витків; при витковому замиканні в 3 паралельних провідниках втрати потужності збільшуються на 1,0 % при замиканні 1 витка і на 9,2 % при замиканні 17 витків.

4. Розроблено математичну модель визначення струмів і втрат потужності в фазах АД при появі будь-якого виду несиметрії опорів в мережах з рівнями несиметрії напруг до 4 %. Модель застосовна в системах раннього виявлення виткових замикань 2–10 % витків. Висока чутливість забезпечується точним

визначенням параметрів схеми заміщення АД і постійним коригуванням їх значень в процесі експлуатації.

5. Похибка застосування отриманої математичної моделі для розрахунку струмів в фазах АД МТ011-6, з відхиленням в одній з фаз активного опору на 4 % і коефіцієнтом несиметрії напруг 1 %, в порівнянні з результатами експериментального дослідження склала не більше 5 % для струмів і не більше 4 % для коефіцієнта несиметрії струмів.

6. Встановлені залежності зміни струмів в фазах, при різній кількості замкнутих витків і різних значеннях відхилень напруг по фазах, дозволяють діагностувати появу виткових замикань 2–10 % витків на ранніх стадіях. Отримані залежності застосовні в системах діагностики і виявлення виткових замикань на початковій стадії їх утворення.

7. Удосконалена теплова модель визначення температури обмоток з несиметричними опорами в фазах АД при живленні від несиметричної мережі, яка розглядає АД як однорідне тіло. Похибка розрахунку температури по запропонованій моделі щодо експериментальних вимірів не перевищує 5 %.

РОЗДІЛ 3

ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ В ЛОБОВИХ ЧАСТИНАХ ОБМОТОК СТАТОРА ПРИ ЗАПИЛЕННІ

3.1. Фактори оточуючого середовища, що знижують термін служби ізоляції обмоток АД

Найбільш істотним чинником впливу навколишнього середовища на ізоляцію, що досить часто має місце, є пил, який покриває її поверхню.

Значною мірою від факторів впливу навколишнього середовища страждають АД, що працюють на підприємствах гірничодобувної, металургійної, машинобудівної та хімічної галузей. Тут має місце наявність в повітрі виробничих цехів різного роду пилу, агресивних домішок, що є побічним продуктом основних виробництв, водяної пари та інших шкідливих домішок.

Проведені дослідження на металургійних комбінатах і вугільно перевалочному комплексі Маріупольського порту показали наявність дрібнодисперсного пилу на лобових частинах обмотки до 2 см для АД потужністю від 15 до 90 кВт.

Дрібний непровідний пил проникає всередину корпусів асинхронних двигунів, осідаючи на поверхні ізоляції обмоток, знижуючи поверхневий опір і погіршуючи умови охолодження ізоляції. Провідний пил, що потрапив всередину машини, створює струмопровідні містки, опір яких залежить від матеріалу пилу, що покриває ізоляцію, і товщини шару.

У нормальному стані частина теплоти, що виробляється обмоткою АД, за допомогою теплопровідності і конвекції з лобової частини передається внутрішньому повітрю. Утворений на поверхні лобової частини шар пилу, створює теплоізоляційний шар. В результаті в місці запилення відведення тепла знижується в кілька разів і відбувається лише за рахунок теплопровідності між ізоляцією обмотки і шаром пилу. Частина тепла затримується і витрачається на

додаткове обігрів лобової частини АД, що знаходиться під шаром пилю. Кількість тепла, яке затримується пилом, залежить від товщини шару і її теплопровідності.

В процесі роботи ізоляція обмоток в місці виходу з паза зазнає найбільших динамічних навантажень. При нагріванні і охолодженні обмотки, від вібрації самої машини, при пусках, реверсуванні і т.д. саме тут найчастіше і швидше, ніж в пазовій частині обмотки виникають тріщини і деформації. Це призводить до фізичного пошкодження ізоляції (утворення мікротріщин). До зносу виткової ізоляції і утворення дефектів призводить тертя між витками і витків по корпусній ізоляції, що виникає в АД через різні коефіцієнти теплового розширення міді обмоток і активної сталі сердечників. Зазвичай таке тертя відбувається при нагріванні електричних машин під час пуску і роботи, а також при охолодженні після її виключення з мережі. В результаті тріщини забиваючись і припадаючи пилом, сприяють багаторазовому зниженню терміну служби ізоляції АД.

Вищеописані динамічні дії в максимальному ступені проявляють себе в лобовій частині ізоляції обмотки в місці її виходу з паза, де утворюють місцеві дефекти і мікротріщини.

Експериментальні дослідження показали, що при запиленні обмоток з дефектами в ізоляції опір ізоляції знижується в кілька десятків разів і при цьому різко збільшуються струми витоків через ізоляцію. У цих випадках через дефекти в ізоляції під дією напруги проходить струм, що руйнує ізоляцію, внаслідок чого виникає коротке замикання між витками обмоток або замикання обмоток на землю.

Наявність на поверхні ізоляції мікротріщин в сукупності з запиленням і зволоженням призводить до виникнення поверхневого струму, який поступово нагріває ізоляцію в місці пробую. Нагріта ізоляція руйнується, струм, що проходить через місце пошкодження, збільшується і нагріває ізоляцію розташованих поруч з дефектом витків обмотки.

Якщо врахувати той факт, що від 60 до 80 % локальних пробоїв ізоляції пов'язані з перегрівом в місці виходу обмотки з паза, за даними електроремонтних цехів підприємств чорної металургії, то питання врахування впливу запиленості на термін служби ізоляції є актуальним.

У сучасній літературі питання запиленості обмоток практично не розглядається. Рідкісні дослідження носять експериментальний характер. Практичний інтерес представляє: визначення додаткового нагріву ізоляції при осіданні на обмотці шару пилу завтовшки h , визначення додаткового нагріву за рахунок протікання поверхневого струму в шарі провідного або непровідного пилу, що осів на обмотках, при її зволоженні.

Дослідження проводилися для матеріалів пилу, які найбільш часто зустрічаються на виробництві. До них відносять:

- окалину, що утворюється на прокатних станах;
- будівельний пил, що виникає при проведенні в виробничих приміщеннях всіляких ремонтно-оздоблювальних робіт (фарбування, побілка, штукатурка, робота з цементним розчином і т.д.);
- графітовий пил, який утворюється при роботі колекторних машин як змінного, так і постійного струму;
- виробничий пил, що є результатом роботи основного технологічного процесу різних виробництв.

3.2. Оцінка додаткового нагріву ізоляції при запиленні лобової частини обмотки статора АД

Велика кількість асинхронних двигунів працюють в запиленому середовищі. У робочих приміщеннях металургійних і вугільних підприємств, прокатних, коксових та інших цехів пил проникає всередину машини. Вона утворює провідні містки, які можуть викликати перекриття або пробій на корпус. На підприємствах гірничо-металургійного комплексу спостерігається

наявність шару пилу на лобовій частині. Як наслідок – локальний перегрів лобових частин обмоток асинхронних двигунів і передчасний вихід з ладу.

Визначення товщини шару пилу на поверхні ізоляції, при якому температура обмотки перевищить допустиме значення для відповідного класу ізоляції не більше 5 °С, є предметом дослідження. Час запилення ізоляції обмоток АД є значно більшою величиною, ніж постійна часу нагріву АД. Розглянемо отримання перевищення температури ізоляції під шаром пилу в сталому тепловому режимі роботи АД.

Обмотка статора АД розглядається як однорідне тіло, що контактує з навколишнім середовищем. На підставі [33] рівняння теплового балансу має вигляд:

$$\Delta P dt = k_{\text{то}} s_{\text{п}} \Delta \Theta dt + cmd\Theta, \quad (3.1)$$

де ΔP – втрати потужності в АД; $k_{\text{то}}$ – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні АД; $s_{\text{п}}$ – площа поверхні охолодження; $\Delta \Theta$ – різниця температур між обмоткою АД і навколишнім повітрям; m – маса обмотки; c – теплоємність міді.

Для усталеного режиму рівняння (3.1) приймає вигляд

$$\Delta P = k_{\text{то}} s_{\text{п}} (\Theta_{\text{об}} - \Theta_{\text{о.с.}}), \quad (3.2)$$

де $\Theta_{\text{об}}$ – температура обмотки; $\Theta_{\text{о.с.}}$ – температура навколишнього середовища.

При утворенні шару пилу на поверхні лобової частини обмотки частина тепла затримується, а решта тепла за допомогою теплопровідності передається шару пилу. На підставі законів теплопередачі, відповідно до рівняння (1.24), ослаблення теплового потоку q від ізоляції обмотки статора до охолоджуючого повітря через плоскопаралельні стінки пилу визначиться з виразу:

$$q = -\lambda \frac{d\Theta}{dx}, \quad (3.3)$$

де q – питомий тепловий потік; λ – коефіцієнт теплопровідності пилу, що осів на обмотці; Θ – температура зміни потоку уздовж осі x .

На підставі рівняння теплового балансу, наведеного в (3.2) і рівняння (3.3), отримано вираз для визначення товщини шару пилу з умови допустимого нагріву АД

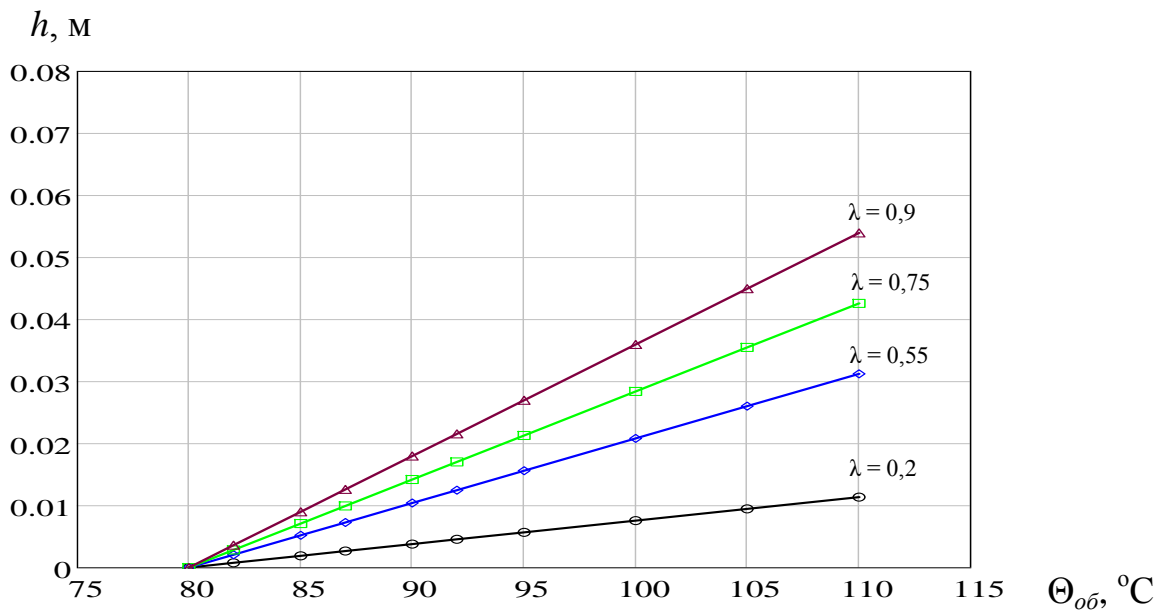
$$h = \frac{\lambda \cdot (\Theta_{\text{YC2}} - \Theta_{\text{YC1}})}{\frac{\Delta P}{s_{\text{П}}} - \Theta_{\text{YC1}} \cdot k_{\text{ТО}}}, \quad (3.4)$$

де Θ_{YC1} – температура ізоляції, непокритої пилом; Θ_{YC2} – температура ізоляції під шаром пилу завтовшки h .

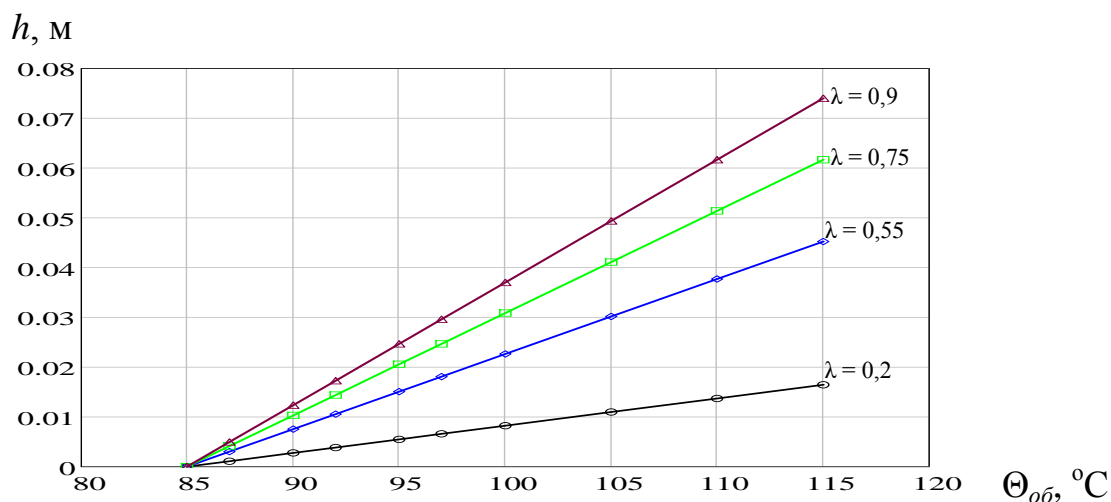
Отриманий вираз дозволяє визначити товщину шару пилу, при якому температура обмоток АД підвищиться на величину рівну $(\Theta_{\text{YC2}} - \Theta_{\text{YC1}})$ і може бути застосована в системах діагностики і прогнозування роботи АД.

Проведені експерименти показали, що теплопровідності описаних на початку глави матеріалів потрапляють в діапазон значень теплопровідності представлених в довідковій літературі [55], де для будівельних і ізоляційних матеріалів діапазон становить 0,12–0,9 Вт/(м·°C).

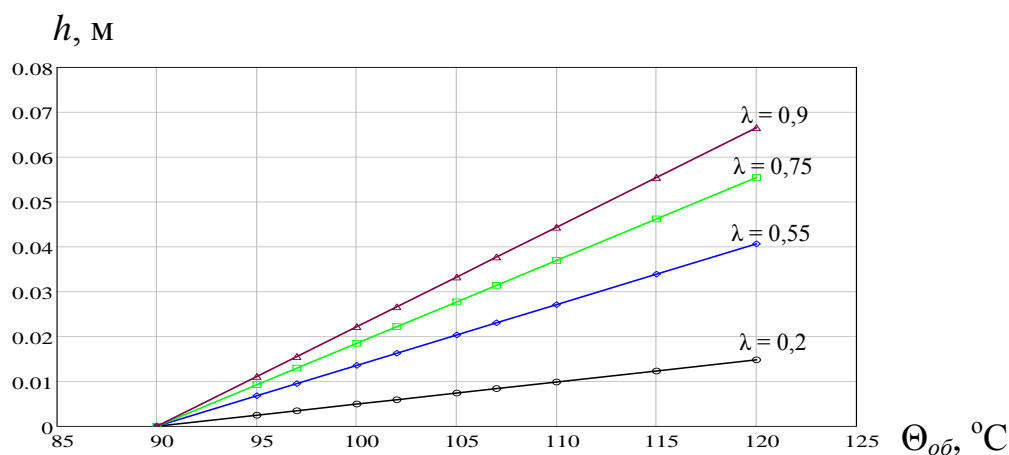
Результати моделювання для двигунів потужністю до 90 кВт при різних значеннях теплопровідності матеріалів наведені на рис. 3.1.



а)



б)



в)

Рис. 3.1 Графіки залежності температури $\Theta_{об}$ від товщини шару пилу h а) для АД типу 4A160S4У3 ($P_{ном} = 15$ кВт);б) для АД типу 4A180M4У3 ($P_{ном} = 30$ кВт);в) для АД типу 4A255M4У3 ($P_{ном} = 55$ кВт).

Аналіз графіків на рис. 3.1 дозволив зробити наступні висновки:

- чим менше коефіцієнт теплопровідності матеріалу, що осів на поверхні обмоток, тим вище температура обмоток під цим шаром. Наприклад, при шарі пилу в 1,5 см (рис. 1 в)) температура обмоток при $\lambda = 0,75 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ складає 98°C , а при $\lambda = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ складає 120°C ;
- локальне перевищення температури ізоляції обмотки на 8–10 °C, при товщині запилення обмоток від 1–1,5 см, знижує термін експлуатації АД в два рази і залежить безпосередньо від товщини шару пилу і її теплопровідності;

- тип і потужність АД не впливає на локальний перегрів ізоляції, так, відмінність між температурами обмоток, при їх запыленості для АД різної потужності, не перевищує 10%.

При розрахунку терміну служби ізоляції необхідно знати додатковий нагрів ізоляції при осіданні пилу на обмотці. Після відповідних перетворень виразу (3.4) температура ізоляції під шаром пилу визначиться за формулою

$$\Theta_{yc2} = \frac{\Delta P \cdot h + \Theta_{yc1} \cdot (\lambda - k_{TO}) \cdot s_{II}}{\lambda \cdot s_{II}}. \quad (3.5)$$

3.3. Визначення додаткового нагріву при протіканні поверхневого струму в шарі пилу

3.3.1. Схема заміщення ізоляції при визначенні поверхневого струму

Електрична схема заміщення ізоляції, зображена на рис. 3.2 складається з трьох паралельно включених гілок [84]. Гілка з ємністю C_{II} враховує проходження струмів поляризації, а її величина визначається геометричними розмірами ізоляції. Ланцюг, що складається з ємності C_a і опору R_a , характеризує ступінь неоднорідності матеріалу, наявність розшарувань, зволоження. Протікає по ньому струм абсорбції, обумовлений процесами сповільненої поляризації і пов'язаний зі втратами в діелектрику, ємність C_a називається абсорбційною. Величина R_a залежить від неоднорідності і діелектричних властивостей ізоляції. Чим краще діелектричні властивості ізоляції, тим більше R_a . Наявність провідних включень в ізоляції (у вигляді бульбашок газу, вологи, забруднень, мікротріщин і т.п.) призводить до виникнення каналів наскрізної провідності з опором R_{np} .

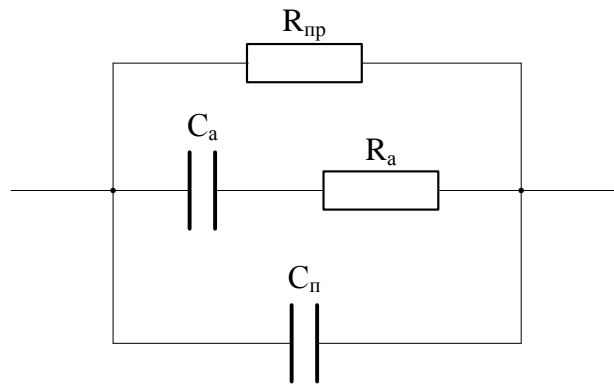


Рис. 3.2 Електрична схема заміщення ізоляції

Опір ізоляції не нескінченний, при наявності фазної напруги в діелектрику ізоляції обмотки АД протікає струм $I_{уз}$. Цей струм складається з ємнісного струму I_c , обумовленого ємністю самоізоляції $C_{п}$, струму абсорбції I_{abc} і активної складової струму витоку I_{ym} , що виникає у разі провідних включень в ізоляції.

Якщо до ізоляції прикласти постійну напругу, то опір буде наростати по експоненті з постійною часу $\tau = C_a \cdot R_a$. Через 1 хв. опір ізоляції, як правило, перестає змінюватися, оскільки абсорбційний ток припиняється, тому що всі поляризаційні процеси закінчуються.

Струм витоку I_{ym} , що проходить через ізоляцію обмоток при сталому процесі електропровідності, визначає істинне значення опору ізоляції. Тому при сталому режимі роботи АД приймається струм ізоляції $I_{уз}$ рівним наскрізному струму витоку I_{ym} .

Ізоляція лобової частини обмотки, особливо в місці виходу її з паза, має чітко виявлені дефекти. Для аналізу величини поверхневого струму виділимо на прямолінійній ділянці лобової частини обмотки дві точки (рис. 3.3), що характеризують два різних режими роботи і відповідно мають різні значення опору ізоляції. Прийmemo значення опору ізоляції першої точки, яка піддається лише до природного старіння за базову. Швидкість зниження опору ізоляції в точці 2 вище, ніж швидкість зниження опору ізоляції в точці 1, внаслідок

динамічного впливу пусків і підвищеної запиленості в місцях примикання обмотки до сердечника статора.

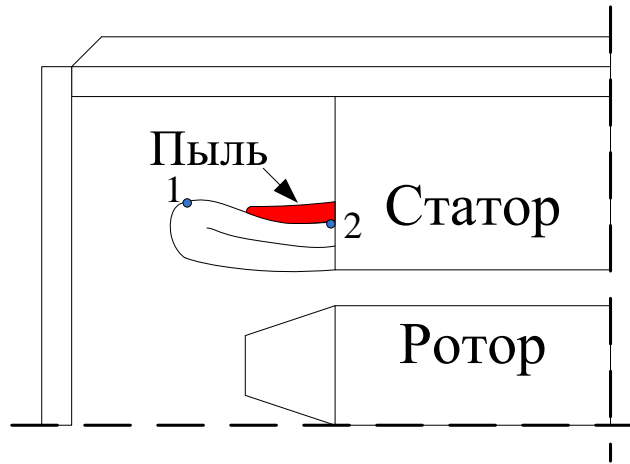


Рис. 3.3 Досліджувані точки на лобовій частині обмотки статора

Токи витоків в точках 1 і 2 рівні

$$I_{ym1} = \frac{U_{\phi} - U_1}{Z_{из1}}, \quad (3.8)$$

$$I_{ym2} = \frac{U_{\phi} - U_2}{Z_{из2}}, \quad (3.9)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга; $U_{1,2}$ – напруги на поверхні ізоляції в точках 1 і 2; $Z_{из1,2}$ – опір ізоляції в точках 1 і 2.

При новій ізоляції струми I_{ym1} і I_{ym2} рівні, рівні і напруги в цих точках, поверхневий струм $I_{пов}$ відсутній. Тривала експлуатація АД призведе до того, що опір ізоляції в точках 1 і 2 змінюється нерівномірно.

Виразимо опір в точці 2 через базовий опір точки 1:

$$Z_{из2} = Z_{из1} - \Delta Z, \quad (3.10)$$

де ΔZ – значення зниження опору ізоляції.

Поява ΔZ обумовлена погіршенням діелектричних властивостей ізоляції в точці 2 в результаті теплових перевантажень, динамічних зусиль, появи мікротріщин, запилення, підвищеної температури навколишнього середовища, зволоження і т.д.

З урахуванням виразу (3.10) струм витoku (3.9) подається у вигляді

$$I_{ym2} = \frac{U_{\phi} - U_2}{Z_{из1} - \Delta Z}. \quad (3.11)$$

Потенціали на поверхні ізоляції в цих точках залежать від ступеня неоднорідності діелектрика і нерівномірного зносу ізоляції по довжині провідника в процесі експлуатації і визначаються за виразами

$$U_1 = U_{\phi} - I_{ym1} \cdot Z_{из1}, \quad (3.23)$$

$$U_2 = U_{\phi} - I_{ym2} \cdot (Z_{из1} - \Delta Z), \quad (3.13)$$

$$\Delta U_{12} = U_{\phi} - I_{ym2} \cdot (Z_{из} - \Delta Z) - U_{\phi} + I_{ym1} \cdot Z_{из} = I_{yt2} \cdot \Delta Z. \quad (3.14)$$

Наявність провідного пилу і зволоженого непровідного (в моменти пуску) на обмотці, призводить до появи поверхневого струму

$$I_{пов} = \frac{\Delta U_{12}}{R_{пов}}, \quad (3.15)$$

де $R_{пов}$ – опір пилу на поверхні обмотки.

Перебіг поверхневого струму по шару пилу, відповідно до закону Джоуля-Ленца, викличе виділення тепла, яке при тривалому впливі призведе до локального пропалювання ослабленої ізоляції.

Величина $R_{пов}$, пропорційна питомому опору пилу, залежить від товщини шару пилу на обмотці, довжини покриття пилом ізоляції, стану поверхневої ізоляції (поздовжні тріщини, розшарування і т.д.), а також наявністю вологи. Поверхневий опір розраховується за виразом

$$R_{пов} = \rho_{пыли} \rho_{вл} \rho_{возд} \frac{l}{s}, \quad (3.16)$$

де $\rho_{пыли}$ – питомий опір пилу; $\rho_{вл}$ – питомий опір вологи; $\rho_{возд}$ – питомий опір повітря; l – довжина ділянки, покритої пилом; s – площа перерізу пилу, що лежить на обмотці.

Величина поверхневого опору $R_{пов}$ змінюється від 0 до ∞ .

3.3.2. Аналіз результатів моделювання

При моделюванні фізичних явищ при протіканні поверхневих струмів в ізоляції використовували датчик поверхневої провідності. Датчик являє собою парні паралельні електроди, розташовані на текстолітовій платівці. На рис. 3.4 наведені криві залежності поверхневого опору $R_{пов}$ різних матеріалів пилю від товщини шару h і незмінній площі покриття.

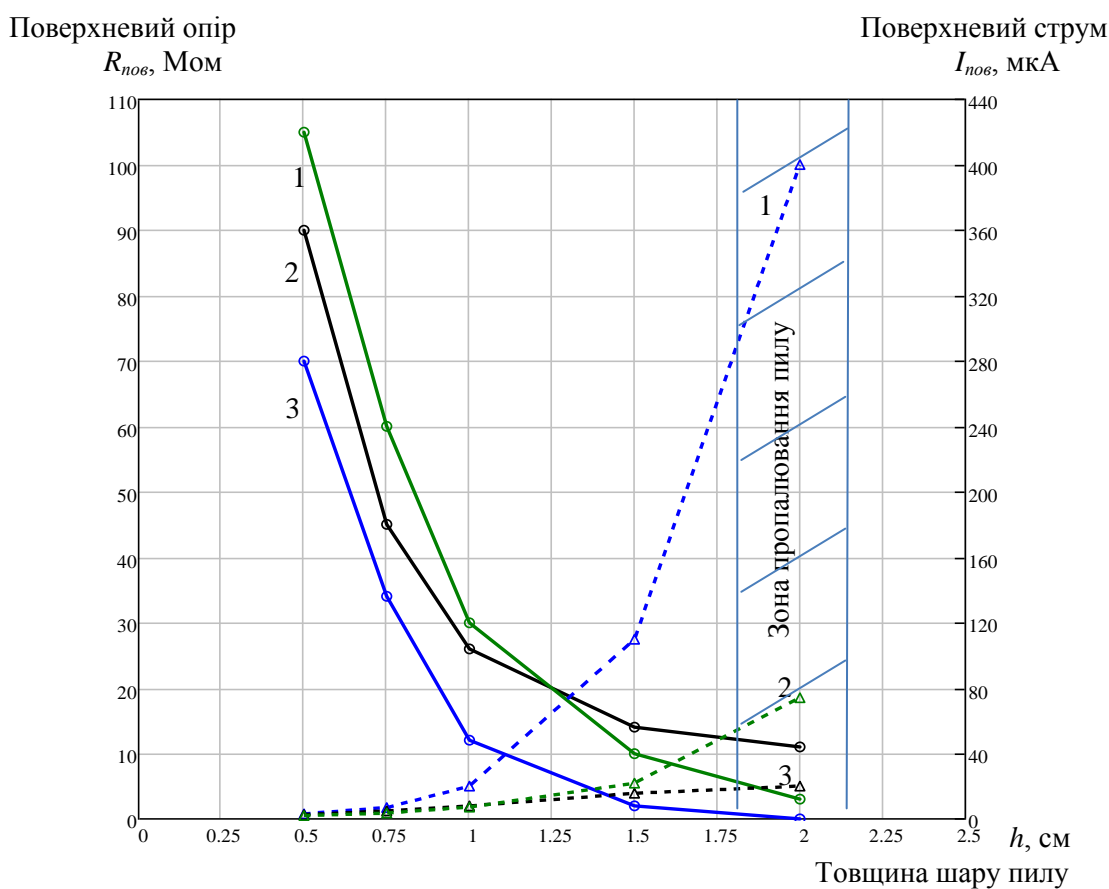


Рис. 3.4 Графіки залежності величини опору $R_{пов}$ і струму $I_{пов}$ для різних видів пилю і товщин h шару:

крива 1 – окалина і виробничий пил;

крива 2 – будівельний пил;

крива 3 – графітовий пил.

Під час експерименту на датчик насипали описані вище матеріали сухого пилю товщиною 0,5, 0,75, 1, 1,5 і 2 см. Для кожної товщини фіксувалися

напруга, що підводиться до датчика, і струм, що протікає через шар пилу. Потім розраховували опір матеріалу. Результати досліджень представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Зміна опору матеріалу пилу $R_{\text{пов}}$ від товщини його шару h

$R_{\text{пов}}$, Мом	$h = 0,5$ см	$h = 0,75$ см	$h = 1,0$ см	$h = 1,5$ см	$h = 2,0$ см
Окалина (30 %) будівельний пил (70 %)	105	60	30	10	3
Будівельний пил	90	45	26	14	11
Графітовий пил	70	34	12	2	0,07

Аналіз отриманих даних показав, що опір матеріалу $R_{\text{пов}}$, що складається з окалини (30%) і виробничого пилу (70%) крива 1, знижується з 105 Мом (при шарі в 0,5 см) до 3 Мом (при шарі в 2 см), для будівельного пилу – крива 2, опір знижується з 90 Мом до 11 Мом при збільшенні шару від 0,5 см до 2 см. Графітовий пил – крива 3 опір знижується з 70 Мом (при шарі 0,5 см) до 0,1 Мом (при шарі в 2 см). Величина поверхневого струму ($I_{\text{пов}}$) крива 1 при збільшенні шару пилу від 0,5 до 2 см збільшилася в 37 разів і склала 74 мкА. Для будівельного пилу величина поверхневого струму (крива 2) при збільшенні шару від 0,5 до 2 см зросла в 8 разів і склала 20 мкА. Поверхневий струм графітового пилу $I_{\text{пов}}$ збільшився в 127 разів і склав 440 мкА при збільшенні шару пилу з 0,5 до 2 см. В цілому можна зробити висновок, що зі збільшенням шару пилу на поверхні ізоляції опір $R_{\text{пов}}$ знижується, це призводить до зростання струмів $I_{\text{пов}}$.

3.3.3. Облік впливу зволоження запиленої обмотки

При технологічному простої обладнання в більшості промислових цехів відбувається зволоження ізоляції обмоток АД. Процес зволоження чистої ізоляції обмоток і їх сушка зображені на рис. 3.5.

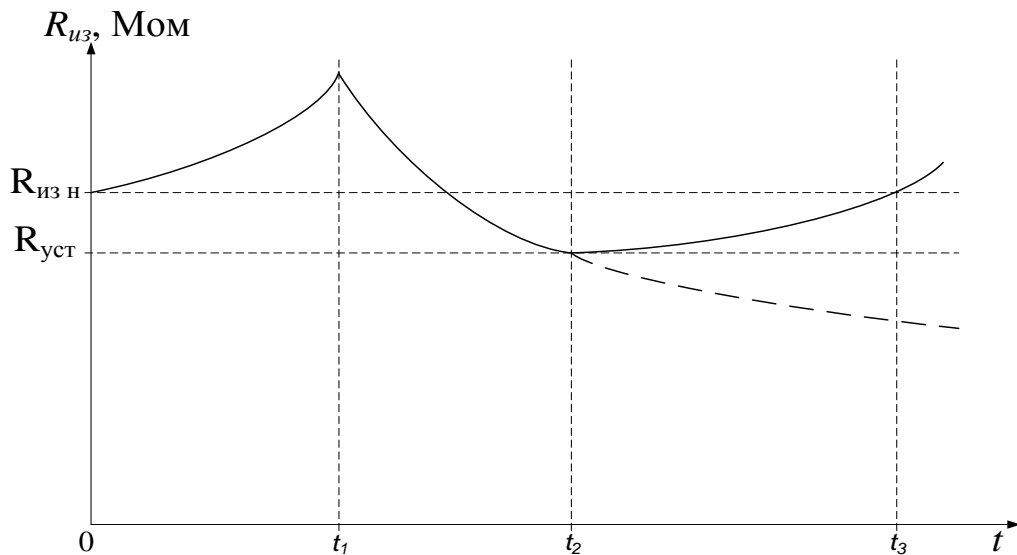


Рис. 3.5 Зміна опору ізоляції при зволоженні і подальшій сушці

У початковий момент відбувається відключення двигуна від мережі. Величина опору ізоляції відповідає номінальному $R_{из н}$ в нагрітому стані. На ділянці $0 - t_1$ відбувається охолодження ізоляції до температури навколишнього середовища, опір ізоляції $R_{из}$ збільшується. У момент часу t_1 починається зволоження ізоляції, в результаті її опір починає знижуватися. При досягненні значення опору $R_{из н} = 0,7 * R_{из}$, який є уставкою для пристрою сушіння обмоток, підключається низьковольтне джерело живлення (70 В) на одну з обмоток. На ділянці $t_2 - t_3$ йде сушка ізоляції. Швидкість нагріву становить $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$. У момент часу t_3 , опір $R_{из}$ досягає значення уставки – $R_{из н}$, відключається пристрій підігріву. Протягом всієї технологічної паузи процес повторюється циклічно. Пунктиром позначено зниження опору ізоляції при відсутності сушіння, що призводить до різкого зниження ресурсу двигуна.

На шкідливих виробництвах відбувається зволоження запиленої обмотки. Дослідження впливу зволоження на зміну поверхневого опору $R_{пов}$ при різних

товщинах шару пилю проведені для непровідних сумішей. Зволоження пилю в процесі роботи АД може відбуватися тільки під час технологічних пауз, коли є коливання температури навколишнього середовища і вологості. Зволоження ізоляції покритої пилом, зроблено штучним зрошенням. Зволоження матеріалу пилю відбувається інтенсивніше, ніж зволоження обмотки.

Дослідження впливу зволоження на зниження опору непровідного пилю проводили за наступною програмою

Програма досліджень:

- 1) датчик провідності покрили непровідним пилом (будівельним) шаром товщиною 0,5, 1 і 2 см, опір $R_{\text{пов.ном}}$ для кожного шару склав відповідно 90, 26 і 11 Мом;
- 2) кожен шар піддавався зволоженню з однаковою інтенсивністю, час зволоження відповідав зниженню опору матеріалу в 2 рази, для шару 0,5 см він склав 50 хв., для шару 1 см – 1 год. 55 хв., для шару 2 см – 4 год. 10 хвилин.;
- 3) при виконанні умови $R_{\text{пов}} = 0,5R_{\text{пов.ном}}$ здійснений підігрів датчика з інтенсивністю $1^{\circ}\text{C}/\text{мин.}$, при досягненні опором $R_{\text{пов}} = 0,95R_{\text{пов.ном}}$ нагрів відключали;
- 4) на підставі розрахункових величин опорів матеріалу пилю побудовані криві зволоження і нагріву; для ділянок нагріву побудовані дотичні, що дозволяють визначити швидкісні характеристики зміни поверхневої провідності.

Даний експеримент моделює роботу АД при технологічних паузах у вологих приміщеннях.

Графіки зміни величини поверхневого опору $R_{\text{пов}}$ ізоляції покритої пилом різної товщини, при її зволоженні і подальшим нагріванням, наведені на рис. 3.6. Дослідження проводилися для будівельного пилю. Величини опорів $R_{\text{пов н}}$ відповідають значенням на рис. 3.4 (крива 2) для різної товщини шару пилю. Опір уставки визначається з умови $R_{\text{уст}} = 0,5 \cdot R_{\text{пов н}}$.

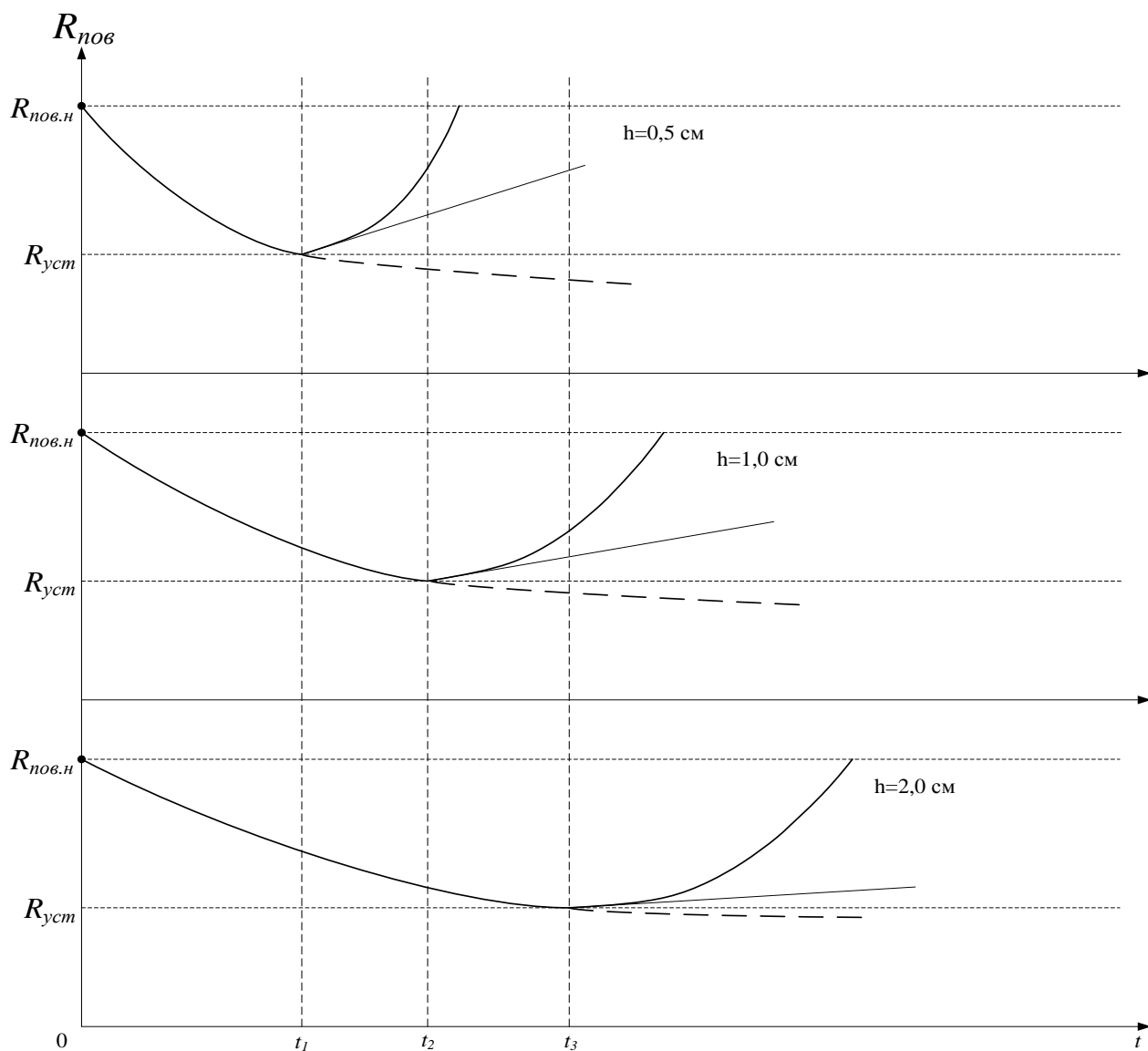


Рис. 3.6 Графіки зміни поверхневого опору $R_{\text{пов}}$ будівельного непровідного пилю при зволоженні і нагріванні з товщиною шару h

На рис. 3.6 періоди часу $0-t_1$, $0-t_2$, $0-t_3$ відповідають зволоженню матеріалу пилю при його шарі в 0,5 см, 1 см і 2 см відповідно. При досягненні опором $R_{\text{пов}}$ значення уставки включається обігрів. Відключення відбувається при досягненні опором $R_{\text{пов}}$ номінального значення. Практичний інтерес представляють дотичні до кривих нагрівання, які є швидкісними характеристиками зміни поверхневої провідності при нагріванні ізоляції. Вони дозволяють діагностувати запылення поверхні ізоляції непровідним пилом.

Швидкість зміни поверхневої провідності визначити за виразом:

$$\frac{dR_{\text{пов}}}{dt} = d\rho_{\text{вл}} \cdot \rho_{\text{пыли}} \cdot \rho_{\text{возд}} \frac{l}{s}. \quad (3.18)$$

У табл. 3.2 наведені швидкісні значення для досліджених видів пилю при інтенсивності нагріву 1 °С/хв.

Таблиця 3.2

Швидкість зміни $R_{\text{пов}}$ (МОм/хв)

	h = 0,5 см	h = 1,0 см	h = 2,0 см
Графіт (провідний)	0,9	0,5	0,1
Окалина і пил (провідний)	1,1	0,6	0,15
Будівельний пил (непровідний)	0,4	0,1	0,03

Отримані результати дозволили розробити діагностичну карту стану ізоляції обмоток АД, за "одиницю" приймаємо відбулося подія, за "нуль» – не відбулося.

Таблиця 3.3

Діагностична карта стану ізоляції обмотки АД

№ п/п	Вид дефекту	$R_{\text{из.н}}$, при $t_{\text{обм}} = 70^\circ\text{C}$ ($R_{\text{из.н}} > 0,5 \text{ МОм}$)	$R_{\text{из}} = 0,9 R_{\text{из.н}}$	$R_{\text{пов}}$	$\frac{dR_{\text{пов}}}{dt}$	Висновки
1	2	3	4	5	6	7
Двигун працює–включений в мережу						
1	Запилення обмотки провідним пилом	0	0	1	0	Сигналізація про запилення провідним пилом

продовження табл. 3.3

Двигун відключений від мережі–технологічна пауза						
1	Природне старіння ізоляції	1	0	0	0	АД – справний
2	Запилення обмотки провідним пилом зі зволоженням	0	1	1	0	Включається сушка ізоляції, сигналізація
3	Запилення ізоляції	1	0	1	0	Сигналізація про запилення
4	Зволоження з запиленням обмотки пилом	1	1	0	0	Включення сушки обмотки
5	Зволоження з запиленням непровідним пилом	1	1	1	0	Сигналізація про запилення і включення сушки
6	Запилення провідним і непровідним пилом зі зволоженням	1	1	1	1	Сигналізація і сушка АД

Висновки по розділу

1. Тривала робота АД в умовах запиленості на промислових підприємствах призводить до утворення в місцях примикання лобових частин обмотки до статора шар пилу.

2. Залежність локального перегріву в лобовій частині обмотки в функції товщини шару пилу носить лінійний характер і показує, що середнє перевищення температури під шаром пилу 1 см становить 6 °С, при 2 см – 13°С, при 3 см – 19 °С для АД потужністю до 90 кВт.

3. Наявність різниці потенціалів на поверхні ізоляції і шару пилу на обмотці товщиною h призводить до появи поверхневого струму $I_{\text{пов}}$, величина якого є функцією товщини шару пилу і його матеріалу. Для непровідних матеріалів, які осідають на обмотках, середнє значення $I_{\text{пов}}$ складає 60 мкА, для провідних – більше 400 мкА.

4. Вимірювання швидкості поверхневої провідності дозволяє діагностувати допустиму товщину запилення поверхні ізоляції, для шару пилу 0,5 см середнє значення швидкості зміни $R_{\text{пов}}$ складає 0,8 МОм/хв., для шару в 1 см – 0,4 Мом/хв., для 2 см – 0,09 Мом/хв.

5. Визначення додаткового нагріву при запиленні обмоток статора і швидкісних характеристик зміни поверхневої провідності дозволили розробити діагностичну карту стану ізоляції обмоток АД, яка використовується в способі виявлення дефектів ізоляції.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СПОСОБІВ КОНТРОЛЮ І ЗАХИСТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

4.1 Спосіб діагностики виткових замикань і захисту АД від аномальних режимів роботи

На етапі експлуатації з часом в наслідок напрацювання і несприятливих впливів мережі та навколишнього середовища відбуваються зміни параметрів АД і знос ізоляції АД, які призводять до появи внутрішніх пошкоджень, найчастіше виткових замикань. Виткові замикання можуть мати незначні прояви і розвиватися поступово, що надалі призведе до перерозподілу струмів, збільшенню температури обмоток і аварійному відключенню АД від мережі засобами захисту. Для запобігання виникненню таких ситуацій використовують різні методи і пристрої визначення початкового моменту виткового замикання на працюючому АД.

Найбільші спотворення в результаті діагностування існуючими методами вносять неякісна електроенергія мережі і не точне визначення параметрів схеми заміщення АД. На робочому АД його параметри, активний і індуктивний опори статора і ротора, і змінні стану (частота оберту ротора, момент обертання та ін.) в різній мірі змінюються і залежать від навантаження двигуна і його температурного стану. Тому параметри АД, які приводяться в каталогах, не можуть бути використані для діагностики і захисту працюючого АД. Отже для отримання достовірної інформації треба проволити безперервний за часом контроль параметрів АД і його змінних величин.

З урахуванням вищезгаданого та на підставі результатів досліджень, проведених у розділі 2 було запропоновано алгоритм роботи пристрою діагностики і захисту АД. На рис. 4.1 приведена блок-схема пристрою. На рис. 4.2 приведена блок-схема програмного алгоритму роботи мікроконтролера. В доданку В приведено лістинг і протокол роботи комп'ютерної програми

«Пристрій діагностики неповнофазних режимів мережі, струмових ланцюгів, початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках і захисту електродвигуна».

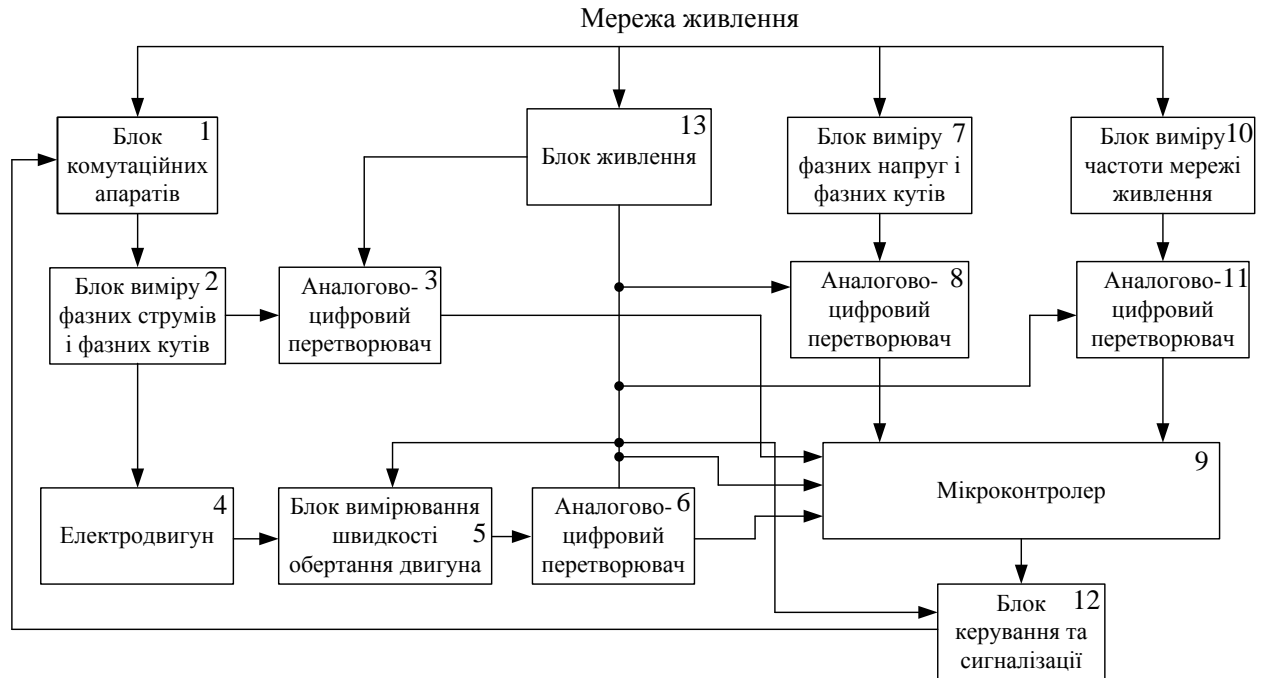
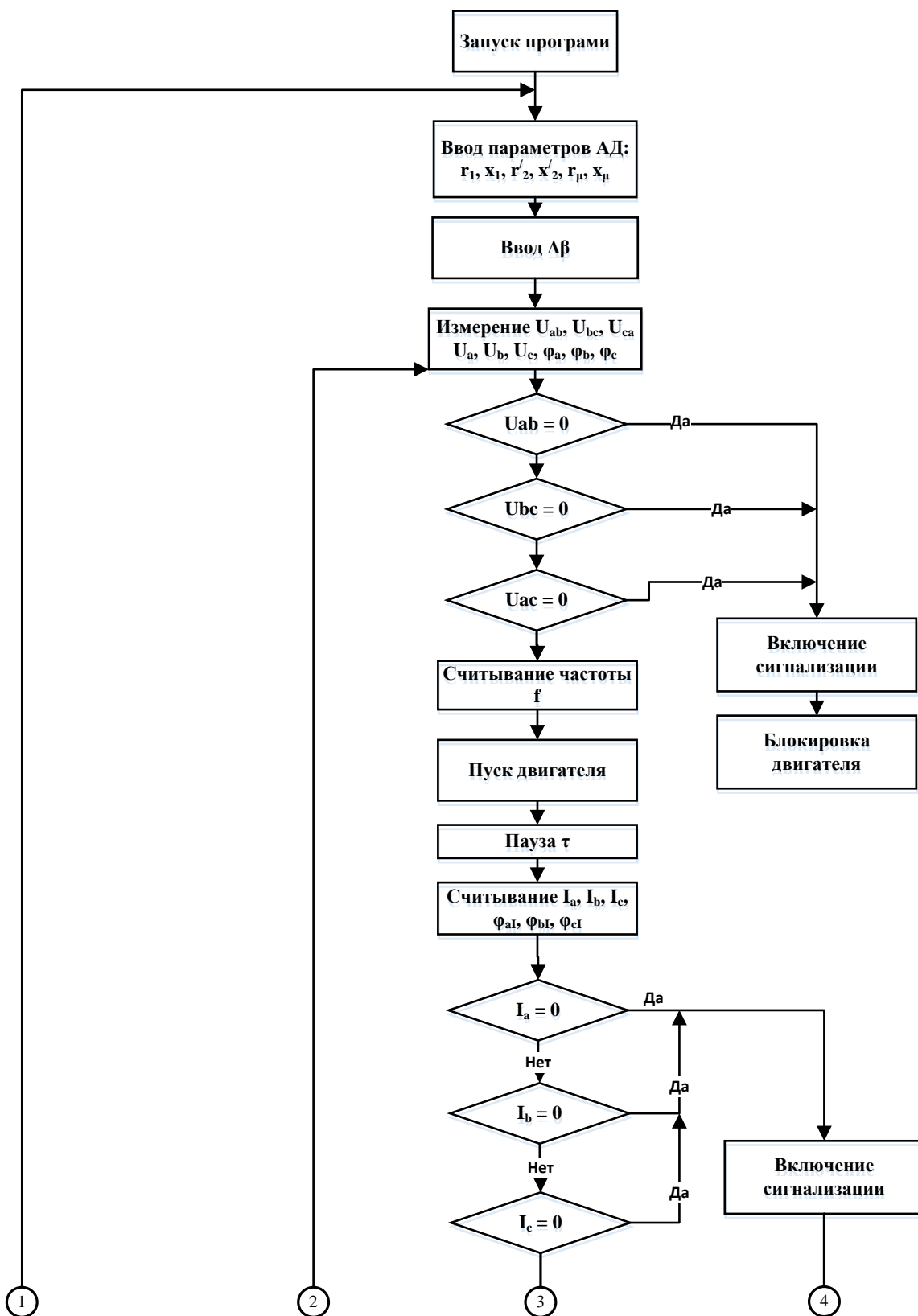


Рис. 4.1 Блок-схема пристрою діагностики і захисту ЕД

Пристрій складається з комутаційного апарату 1, блоку вимірювання лінійних струмів двигуна 2, аналогово-цифрового перетворювача 3, двигуна 4, блоку вимірювання швидкості обертання двигуна 5, аналогово-цифрового перетворювача 6, блок вимірювання лінійних напруг мережі живлення 7, аналогово-цифрового перетворювача 8, мікроконтролера 9, блоку вимірювання частоти мережі живлення 10, аналогово-цифрового перетворювача 11, виконавчого блоку управління і сигналізації 12, блоку живлення 13.



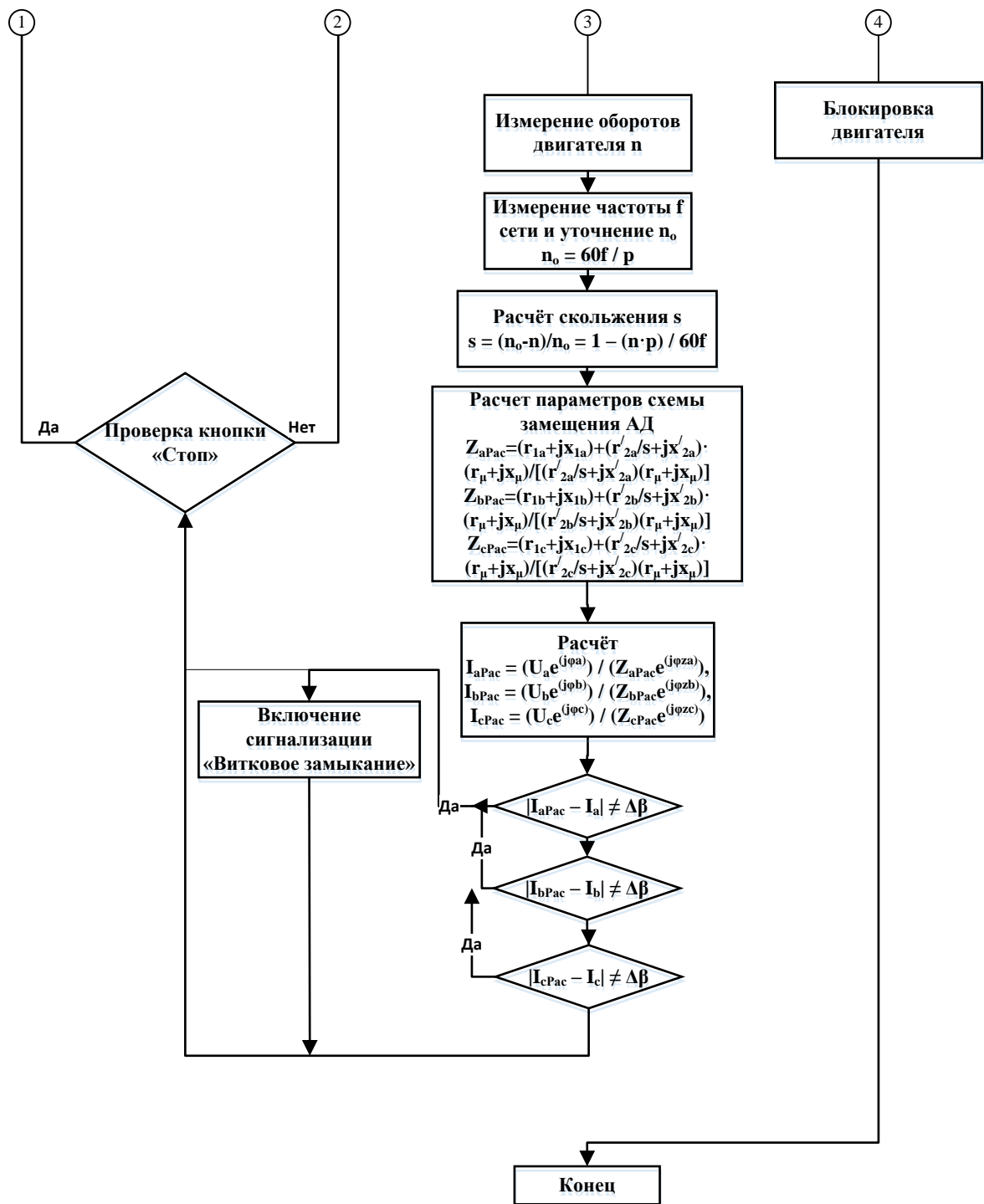


Рис. 4.2 Алгоритм роботи мікроконтролера

Електродвигун 4, через блок вимірювання лінійних струмів 2 і комутаційний апарат 1, підключений до мережі живлення. Блок живлення 13, блок вимірювання лінійних напруг живильної мережі 7, блок вимірювання частоти мережі 10 підключені своїми входами до мережі живлення. Вихід блоку вимірювання лінійних струмів АД 2, через перший аналогово-цифровий

перетворювач 3 підключений до першого входу мікроконтролера 9. Блок вимірювання обертів електродвигуна 5 через аналогово-цифровий перетворювач 6 підключений до другого входу мікроконтролера 9. Блок вимірювання лінійних напруг мережі живлення 7 через третій аналогово-цифровий перетворювач 8 підключений до третього входу мікроконтролера 9. Блок вимірювання частоти мережі 10 через четвертий аналогово-цифровий перетворювач 11 підключений до четвертого входу мікроконтролера 9, а вихід мікроконтролера 9 через виконавчий блок управління і сигналізації 12 підключений до комутаційного блоку 1, вхід блоку живлення 13 підключений до мережі живлення, а вихід підключений до чотирьох аналогово-цифрових перетворювачів 3, 6, 8 і 11, до блоку вимірювання обертів електродвигуна 5, мікроконтролеру 9 і виконавчому блоку управління і сигналізації 12.

Комутаційний апарат 1, в якості якого може використовуватися пускач, відповідає рівню напруги і силі струму.

Блок вимірювання фазних напруг 2 складається з трьох трансформаторів струму, у вторинних обмотках яких використані вимірювальні шунти для перетворення вимірюваних струмів в напруги не більше 5 В.

Аналогово-цифрові перетворювачі 3, 6, 8 і 11, в якості яких можуть бути використані, наприклад, AD7705BNZ: АЦП-[DIP-16]; розрядність: 16 біт; каналів: 2; архітектура: Sigma-Delta; інтерфейс: Serial, SPI; SNR: 116 дБ; $P_{\text{потр}}$: 6.5 мВт або перетворювачі змінного струму і напруги Е854ЕЛ, призначені для лінійного перетворення вхідних сигналів змінного струму і напруги частотою 50 Гц в один або два уніфікованих гальванічно розв'язаних вихідних сигнали постійного струму.

Для реалізації блоку вимірювання швидкості обертання АД 5, використана елементна база: DD1-K555ТЛ1, DD2-K555ТМ2, DD3-KP1830BE35, DD4-K580IP82, DD5-K556PT5, DD6 ... DD9-K514ІД1, DD10 ... DD13-АЛС324А. Датчик, реалізований на світлодіоді АЛ107Б (VD1), фотодіоді ФД27К (VD2) і зведеному операційному підсилювачі К140УД20 (DA1). ОУ, має внутрішній

ланцюг частотної корекції, малі вхідні струми і мале споживання струму джерела живлення.

Блок вимірювання лінійних напруг живильної мережі 7 утворений трьома однофазними трансформаторами напруги, які підключені до лінійних напруг мережі, у вторинні котушки включені мостові випрямлячі з паралельно-послідовною фільтрацією.

Блок живлення 13 утворений трьома однофазними трансформаторами напруги, які підключені до лінійних напруг мережі, у вторинні котушки включені мостові випрямлячі з паралельно-послідовною фільтрацією. До трьох позитивних виходів послідовно включені діоди в кожній лінії, які пов'язані один з одним, що дозволяє отримати живлення для блоків 3, 5, 8, 9, 10, 11, 12 незалежно від неповно фазної напруги мережі; негативні потенціали блоків 3, 5, 8, 9, 10, 11, 12 об'єднані в загальну точку.

У якості мікроконтролера 9 використана система ARDUINO, що дозволяє отримувати цифрові сигнали, обробляти їх і здійснювати управлінням АД 4.

У блоці вимірювання частоти мережі живлення 10 використаний 8-бітний мікроконтролер AVR ATtiny2313 виробництва компанії ATME, з можливою індикацією, виконаною на 7-сегментних індикаторах із загальним анодом.

На рис.2.9 і 2.10 наведені залежності зміни фазних струмів від кількості короткозамкнутих витків у статорній обмотці АД фази «А», при чергуваннях відхилення напруги мережі нормованого розміру (ГОСТ 13109-97), в одній фазі – 5 %.

На рис 2.11–2.14, наведено залежності зміни фазних струмів від кількості короткозамкнутих витків у статорній обмотці АД фази «А», при чергуваннях відхилень напруг мережі, нормованих величин ГОСТ 13109-97, 5 % одночасно в двох фазах.

Наведені на графіках залежності показали, що при однакових значеннях коефіцієнтів несиметрії напруг (див. рис. 2.9–2.14) рівні фазних струмів змінюють значення в залежності від кількості короткозамкнутих витків в обмотці статора фази АД і від величини відхилення напруги в фазах живлячої

мережі. Отримати однозначну залежність між коефіцієнтами несиметрії напруги і струмів можливо шляхом порівняння розрахункових і вимірних струмів ЕД.

Одночасний контроль рівнів напруг і фазних струмів дозволяє діагностувати неповнофазні режими мережі живлення, обрив в струмових ланцюгах і виявити провали напруг до величини $0,6 U_{\text{н}}$.

Пристрій працює наступним чином.

На непрацюючому АД вимірюють активний опір r_1 статорних обмоток електродвигуна, наприклад, за допомогою Міліомметра МИКО-9А, що дозволяє проводити вимірювання активного опору в індуктивних і безіндуктивних ланцюгах в діапазоні $10 \text{ мкОм} \div 300 \text{ кОм}$ на токах до 10 А .

Проводяться досліди холостого ходу і короткого замикання і визначаються параметри схеми заміщення.

При подачі команди «Пуск електродвигуна» перевіряється наявність блокування від пуску. При відсутності блокування перевіряється неповнофазний режим мережі, якщо неповнофазний режим у мережі живлення відсутній, комутаційний апарат 1 підключає АД 4 до мережі живлення. Блок вимірювання струмів АД 2 контролює обрив кола струму. При виявленні обриву кола струму на виході мікроконтролера 9 з'явиться сигнал, виконавчий блок 12 блокує АД 4 від включення. Відсутність неповнофазних режимів залишається в роботі.

У робочому режимі АД за допомогою блоку 2 вимірюють величини струмів АД і кути зсуву між струмами, за допомогою блоку 7 вимірюють рівні лінійних напруг. За допомогою блоку 10 вимірюють частоту мережі, за допомогою блоку 5 вимірюють оберти АД. Вимірні аналогові сигнали за допомогою блоків 3, 6, 8, 11 перетворюються в цифрові і надходять на входи мікроконтролера 9. Відповідно до алгоритму (рис. 4.2) розраховують значення фазних струмів і кутів.

Порівнюють розрахункові значення фазних струмів фазових кутів з вимірюваними величинами фазних струмів і кутів.

Виконання рівностей

$$I_a = I_{a \text{ вимр}} \pm \delta; I_b = I_{b \text{ вимр}} \pm \delta; I_c = I_{c \text{ вимр}} \pm \delta$$

або

$$\varphi_a = \varphi_{a \text{ вимр}} \pm \delta; \varphi_b = \varphi_{b \text{ вимр}} \pm \delta; \varphi_c = \varphi_{c \text{ вимр}} \pm \delta;$$

вимірних і розрахункових значень фазних струмів в межах заданої похибки δ є критерієм нормальній роботі АД.

Виконання нерівностей

$$I_a \neq I_{a \text{ вимр}} \pm \delta; I_b \neq I_{b \text{ вимр}} \pm \delta; I_c \neq I_{c \text{ вимр}} \pm \delta$$

або

$$\varphi_a \neq \varphi_{a \text{ вимр}} \pm \delta; \varphi_b \neq \varphi_{b \text{ вимр}} \pm \delta; \varphi_c \neq \varphi_{c \text{ вимр}} \pm \delta;$$

є критерієм виявлення початкового моменту виткового замикання.

Одночасне зниження рівнів напруги і фазних струмів до величин нижче (0,8–0,6) номінального значення і тривалістю більше трьох постійних нагріву АД є критерієм діагностики провалу напруги, при якому АД відключають від мережі живлення.

Приклад виконання апробації способу.

Дослідження проведені для асинхронного електродвигуна типу 4А80А2У3: потужність 1,5 кВт, напруга 380 В, номінальний струм 3,31 А, коефіцієнт потужності 0,85, ККД 0,81, номінальне ковзання 0,04, параметри схеми заміщення визначені на підставі даних вимірювань активного опору обмотки статора АД, дослідів холостого ходу і короткого замикання: $r_1 = 4,1$ Ом, $x_1 = 4,3$ Ом, $r_2 = 3,67$ Ом, $x_2 = 4,52$, $r_o = 4,11$ Ом, $x_o = 123,15$ Ом.

1. Замір активного опору обмотки приладом МИКО-9А $r_{Iuzm} = 4,05$ Ом;

2. Дані випробування короткого замикання: $U_k = 38,8$ В, $I_k = 3,3$ А, $P_k = 254$ Вт. Значення параметрів схеми заміщення:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{38,8}{3,3} = 11,75 \text{ А},$$

$$r_k = \frac{P_k}{3 \cdot I_k^2} = \frac{254}{3 \cdot 3,3^2} = 7,77 \text{ Ом},$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{11,75^2 - 7,77^2} = 8,82 \text{ Ом},$$

$$r'_2 = r_k - r_1 = 7,77 - 4,1 = 3,67 \text{ Ом}.$$

3. Дані випробування холостого ходу: $U_x = 220 \text{ В}$, $I_x = 1,72 \text{ А}$, $P_x = 72,9 \text{ Вт}$.

Значення параметрів схеми заміщення:

$$Z_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{220}{1,72} = 127,71 \text{ Ом},$$

$$r_x = \frac{P_x}{3 \cdot I_x^2} = \frac{72,9}{3 \cdot 1,72^2} = 8,21 \text{ Ом},$$

$$X_x = \sqrt{Z_x^2 - r_x^2} = \sqrt{127,71^2 - 8,21^2} = 127,45 \text{ Ом},$$

$$r_\mu = r_x - r_1 = 8,21 - 4,1 = 4,11 \text{ Ом},$$

$$x_\mu = X_x - x_1 = 127,45 - 4,3 = 123,15 \text{ Ом}.$$

4. Розраховуємо параметри схеми заміщення, що залишилися:

$$x_1 = 0,48 \cdot X_k = 0,48 \cdot 8,82 = 4,23 \text{ Ом},$$

$$x'_2 = X_k - x_1 = 8,82 - 4,3 = 4,52 \text{ Ом}.$$

5. Повний опір АД при номінальному ковзанні:

$$Z_{\text{АД}} = Z_1 + \frac{Z'_2 \cdot Z_o}{Z'_2 + Z_o} = (4,1 + 4,3i) + \frac{\left(\frac{3,67}{s_n} + 4,52i\right) \cdot (4,11 + 123,15i)}{\left(\frac{3,67}{s_n} + 4,52i\right) + (4,11 + 123,15i)} = 66,46 \cdot e^{j34}$$

6. Вимірюємо оберти АД при робочому струмі $I_p = 2,65 \text{ А}$ і розраховуємо ковзання:

$$s = \frac{n_o - n_{\text{узм}}}{n_o} = \frac{3000 - 2895}{3000} = 0,035.$$

7. Уточнюємо повний опір АД при робочому струмі:

$$Z_p = (4,1 + 4,3i) + \frac{\left(\frac{3,67}{s_p} + 4,52i\right) \cdot (4,11 + 123,15i)}{\left(\frac{3,67}{s_p} + 4,52i\right) + (4,11 + 123,15i)} = 82,97 \cdot e^{j41,4}.$$

На рис. 2.9–2.14 наведені результати апробації роботи пристрою.

Запропоновано пристрій діагностики початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках АД, в якому безперервно здійснюється моніторинг рівнів напруг, фазних струмів, частоти мережі і обертів електродвигуна, що дозволяє своєчасно виявити початковий момент виткового замикання, тим самим своєчасно запобігти аварійній ситуації.

4.2 Спосіб контролю та теплового захисту АД при запиленні обмоток статора

Основним фактором зниження терміну експлуатації АД є прискорене старіння ізоляції статорних обмоток. Дослідження показали, що 75 % ушкоджень АД, які працюють в умовах металургійної, машинобудівної, вугільної, хімічної та ін. промисловостей, складають пробої ізоляції обмотки статора, при цьому 70 % з них припадає на лобову частину. Основною причиною прискореного старіння ізоляції є теплові навантаження. Як відомо, перегрів обмоток на 8–10 °С вище допустимого значення призводить до зниження терміну служби АД в два і більше разів.

У ряді галузей промисловості АД працюють в умовах підвищеної запиленості, зокрема в доменних, конвертерних, прокатних цехах металургійних підприємств, вугільно-видобувних підприємств і ін. Тривала експлуатація АД в таких умовах призводить до покриття верхньої частини лобової обмотки статора пилом. Товщина шару пилу для АД потужністю від 15 кВт і вище спостерігається від 2 до 5 см, при цьому нижня частина лобової обмотки залишається чистою. Шар пилу на обмотках призводить до зниження тепловіддачі і локального підвищення температури ізоляції під шаром пилу.

Питання теплового захисту АД, що працюють в умовах запиленого середовища, залишаються актуальними. Існуючі пристрої теплового захисту обмоток АД використовують показання або з встановленого на лобову частину температурного датчика, або зі вбудованих в пази двох або трьох датчиків. Основним недоліком таких методів є те, що температура вимірюється в одній

точці лобової частини або не вимірюється зовсім. Один встановлений датчик не дозволяє однозначно визначити причину збільшення температури обмотки, тим самим виключити помилкове відключення АД від мережі живлення. Якщо датчик встановлений у верхній частині лобової частини, він вимірює температуру і фіксує підвищення температури, яке викликане різними причинами. Це струмові перевантаження, механічні пошкодження підшипників або приводного механізму, виткове замикання в фазі обмотки, неповнофазний режим мережі живлення або локальне запилення обмотки. Будь-яка з цих причин підвищення температури призведе до відключення АД від мережі живлення. Але в разі запилення обмоток немає необхідності відключати АД від мережі, досить сигналізувати про це. Якщо температурний датчик розташований в будь-якій іншій частини обмотки статора, то при запиленні поверхні обмотки неможливо своєчасно виявити і попередити обслуговуючий персонал про локальне запилення лобової частини.

Вищеописані пристрої не дозволяють однозначно виявити причину перегріву ізоляції обмоток, виключити помилкове відключення АД від мережі, попередити початок розвитку прискореного старіння ізоляції в результаті її запилення і своєчасно провести технічне обслуговування.

Теоретичні та експериментальні дослідження дозволили розробити новий спосіб температурного захисту АД [103]. Реалізація способу представлена на рис. 4.3. На рис 4.4. наведена блок-схема способу та пристрій температурного захисту АД та визначення товщини шару пилу на поверхні ізоляції.

Новизною розробленого пристрою є те, що діагностика струмового перевантаження і визначення товщини пилового покриття здійснюється за двома значеннями температур та швидкості їх зміни.

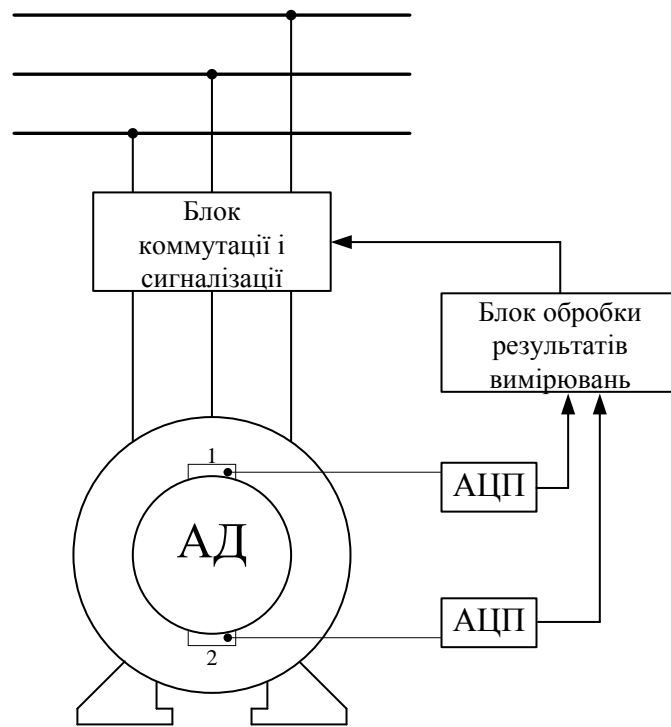


Рис. 4.3 Реалізація способу теплового захисту АД



Рис. 4.4 Блок-схема пристрою діагностики теплового навантаження та температурного захисту АД

Для виконання умов діагностики температурного перевантаження ізоляції треба виконати наступні умови:

1. На поверхні обмоток АД, схильних і несхильних до запилення, встановлюються температурні давачі.
2. За значеннями температур давачів визначається струмове перевантаження, граничне локальне запилення ізоляції, товщина пилового покриття обмотки.

Виявлення граничного запилення визначає момент проведення профілактичних заходів.

На рис. 4.5 приведена логічна схема проходження інформаційних сигналів, сигналів виміру контрольованих величин, командних сигналів, що управляють.

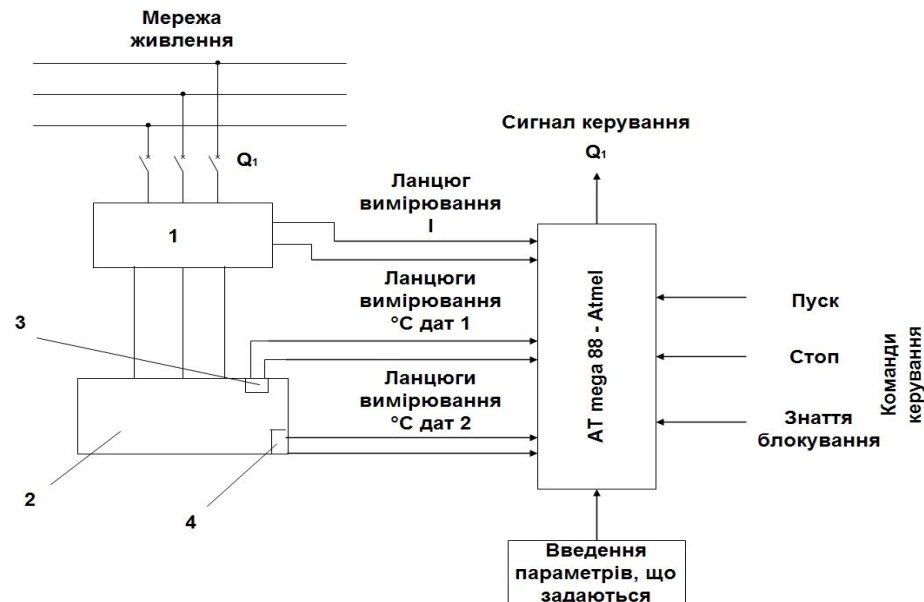


Рис. 4.5 Логічна схема проходження інформаційних сигналів, сигналів виміру контрольованих величин, командних сигналів, що управляють.

На рис. 4.5 позначено: 1 – блок трансформаторів струму; 2 – електроспоживач (в данному випадку АД); 3 – перший датчики виміру температури ізоляції; 4 – другий датчик виміру температури ізоляції, Q_1 – пускач (вимикач) для включення і відключення електроспоживача.

Для роботи мікроконтролера розроблено алгоритм діагностики причин теплового навантаження і температурного захисту АД, що представлено на рис. 4.6.

На рис. 4.6 позначено: $t_{д1}$ – температура першого давача, $t_{д2}$ – температура другого давача, $t_{доп}$ – допустима температура нагріву ізоляції, H – товщина шару пилу, $H_{доп}$ – допустима товщина шару пилового покриття, I – сила струму навантаження.

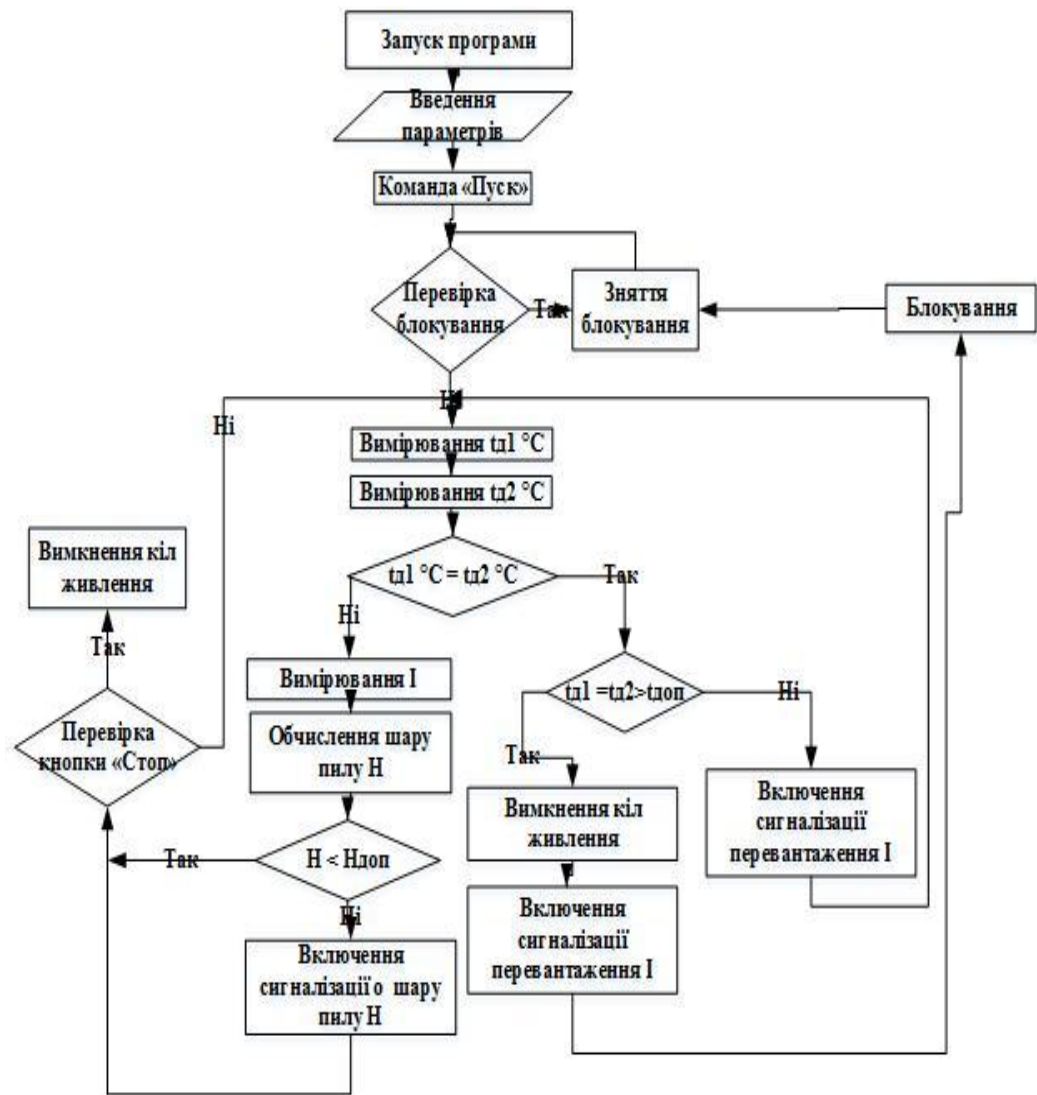


Рис. 4.6 Алгоритм роботи пристрою діагностики причин теплового навантаження і температурного захисту ЕО

Програма працює таким чином.

Встановлюють датчики температури на запилені і незапилені ділянках поверхні ізоляції. Вступ команди "Пуск", що управляє, приводить до перевірки наявності команди "Блокування". За відсутності "Блокування" виконується підключення електроустаткування до живлячої мережі. В період роботи електроустаткування вимірюють величини температур першого і другого датчиків. При відсутності струмового перевантаження і запилювання поверхні ізоляції температурні показники датчиків однакові. Температурні свідчення поступають на вхід мікроконтролера і обробляються. На дисплеї відображаються температурні значення датчиків і величина струму. Збільшення

струмового навантаження, що відбувається з причин зміни режимів мережі або виникнення внутрішніх поломок електроустаткування, призводить до одночасного підвищення температурних значень обох датчиків. Ця інформація поступає в мікроконтролер, обробляється, і при досягненні температур датчиків допустимої величини, наприклад, 95 °С, на виході мікроконтролера сформується сигнал, який поступить у блок управління і сигналізації, включається сигналізація, яка сповіщає, що відбулось струмове перевантаження. При досягненні температурою датчиків критичного значення, наприклад, 105°С, пускач Q_1 відключить від мережі електроустаткування, включить команду "Блокування" і сигналізацію про струмове перевантаження. В процесі роботи відбувається запилювання поверхні ізоляції нерівномірним шаром. Температурне значення датчика, встановленого на запиленій частині ізоляції, буде вище за температурне значення другого датчика. Температурна інформація поступає на вхід мікроконтролера і обробляється. За виразом (3) визначають товщину пилового покриву, включається сигналізація про необхідність проведення профілактичних робіт. Діагностування причин температурного перевантаження електроустаткування дозволяє однозначно визначити причину температурного перевантаження і своєчасно захистити електроустаткування від перегрівання, тим сам підвищити термін його експлуатації.

На рис. 4.7 приведений протокол роботи комп'ютерної програми «Діагностика причин температурного перевантаження і захист електроустаткування від перегрівання» [105].

Висновки по розділу

1. Запропоновано пристрій, що дозволяє на підставі безперервного моніторингу рівнів напруг, фазних струмів, частоти мережі і обертів електродвигуна діагностувати початковий момент виткового замикання в статорних обмотках АД.

```

Меню:
0 - Ввод параметров.
1 - Запуск работы.
Выбор:

```

```

Меню изменения:
0 - Изменение tдоп.
1 - Изменение R.
2 - Изменение AI.
3 - Изменение Hдоп.
4 - Назад.
Выбор:
0
Ввод значения tдоп:
105

```

```

Проверка Блокировки!
Блокировка отключена. Продолжение работы.
Измерение температуры tд1: 106
Измерение температуры tд2: 106
Отключение цепей питания.
Включение сигнализации перегрузки I.
Проверка Блокировки!
Включена блокировка. Снять блокировку? (0-да 1-нет): 0
Измерение температуры tд1: 20
Измерение температуры tд2: 25
Измерение тока I: 20
Вычисление слоя пыли H: 0.001875 м.
Проверка нажатия на кнопку СТОП?
Кнопка СТОП нажата?(0-да, 1-нет): 0
Отключение цепей питания.Для продолжения нажмите любую клавишу . . .

```

Рис. 4.7 Протокол роботи комп'ютерної програми «Діагноста причин температурного перевантаження і захист електроустаткування від перегрівання»

2. Розроблений спосіб теплового захисту АД дозволяє однозначно виявляти причину перегріву ізоляції обмоток, виключає помилкове відключення АД від мережі, попереджає початок розвитку прискореного старіння ізоляції в результаті її запилення.

3. Результати дисертаційної роботи використані на провідних підприємствах, таких як: Державне підприємство «Маріупольський морський торговельний порт» з річним економічним ефектом 124 239,38 грн./рік; «Маріупольський судноремонтний та суднобудівний завод» з річним економічним ефектом 52 810 грн./рік.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу створення теоретичних засад безперервних неруйнівних методів і засобів виявлення початкових моментів розвитку пошкоджень в асинхронних двигунах для підвищення строку їх експлуатації і зниженню втрат від аварійних зупинок технологічних процесів, що має суттєве значення для промислової галузі. Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Вперше розроблено математичну модель залежності струмів в фазах АД при наявності виткових замикань в обмотках статора при відхиленнях та несиметрії напруг. При рівні несиметрії наруги мережі до 4 % розроблена математична модель ідентифікує замикання 2–10 % витків обмотки. Розрахункові значення струмів близькі до вимірних. Максимальна похибка становить 5 %. Удосконалено теплову модель, яка розглядає АД як однорідне тіло, яка дозволяє розрахувати температури кожної обмотки при появі виткових замикань. Проведені експериментальні дослідження виявили похибку в розрахунку запропонованої теплової моделі 5 %.

2. Встановлені діагностичні критерії раннього виявлення виткового замикання k_w в обмотці статора і замикання в паралельних провідниках k_m котушки обмотки статора. Коефіцієнт k_w застосовується для АД з петльовими одношаровими обмотками. Чутливість коефіцієнта k_w дозволяє розпізнавати виткові замикання 10–15 витків при кількості витків в обмотці понад 400 і 5–10 витків при кількості витків в обмотці менше 300 з похибкою до 10 %. Коефіцієнт k_m придатний для АД з петльовими одно-двошаровими обмотками. Чутливість коефіцієнта k_m дозволяє розпізнавати виткові замикання в паралельних провідниках при замиканні 3–5 витків в однойменному провіднику з похибкою до 7 %.

3. Вперше розроблено спосіб контролю та теплового захисту обмоток АД, який дозволяє виявляти причини температурних перевантажень, завдяки застосуванню двох датчиків температури на верхній і нижній лобовій частині

обмотки. При різниці в показаннях датчиків 5 °С і більше робиться висновок про початок запилення обмоток статора, і сигналізуються про необхідність проведення профілактичних робіт. Одночасне збільшення температур обох датчиків на 10 °С свідчить про наявність технологічних перевантажень або неповнофазних режимів і АД відключається від мережі. Запропонований спосіб підвищує надійність і продовжує термін експлуатації і безаварійної роботи АД.

4. Розроблено методику, алгоритм і програмне забезпечення раннього виявлення виткових замикань в обмотках АД. За рахунок безперервного моніторингу рівнів напруг, фазних струмів, частоти мережі і оборотів АД і їх порівняння з розрахованими, стає можливим своєчасне виявлення початкового моменту виткового замикання. Виконання рівностей $I = I_{вим} \pm \delta$ і $\varphi = \varphi_{вим} \pm \delta$ вимірних і розрахункових значень фазних струмів і фазних кутів в межах заданої похибки δ є критерієм нормальній роботі АД. Виконання нерівностей рівностей $I \neq I_{вим} \pm \delta$ і $\varphi \neq \varphi_{вим} \pm \delta$ є критерієм виявлення початкового моменту виткового замикання.

5. Зроблено аналіз існуючих методів визначення параметрів схеми заміщення АД. Показано, що для АД потужністю до 5 кВт похибка розрахунку становить 15–20 %. Запропоновано удосконалену методику визначення величин елементів схеми заміщення для АД потужністю до 5 кВт, яка враховує вимір активного опору кожної фази обмотки статора. Похибка запропонованої методики не перевищує 1,5 %. Отриманні за цією методикою значення використовуються в системі безперервного моніторингу стану АД.

6. Результати дисертаційної роботи використані на провідних підприємствах, таких як: Державне підприємство «Маріупольський морський торговельний порт» з річним економічним ефектом 124 239,38 грн./рік; «Маріупольський судноремонтний та суднобудівний завод» з річним економічним ефектом 52 810 грн./рік.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Воробьев В.И. Теория и практика Вейвлет-преобразования / В.И. Воробьев, В.Г. Грибунин. – СПб.: Типография ВУС, 1999. – 287 с.
2. Остапенко Д. А. Проблема качественного электроснабжения [Электронный ресурс] / Д.А. Остапенко // Новости Электротехники. – 2007. – Режим доступа: <http://ostapenko.uaprom.net/a12498-problema-kachestvennogo-electrosnabgeniya.html>.
3. Беспрозванных А.В. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций / А. В.Беспрозванных, Б. Г. Набока . – Харків: НТУ «ХП». – 2012. – 108 с.
4. Дубов А.А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования / А.А. Дубов // Теплоэнергетика. – 2003. – № 11. – С. 54–57.
5. Бобров В.В. Оценка эффективности основных методов диагностики асинхронных электродвигателей / В.В. Бобров // АлтГТУ им. И.И. Ползунова // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/1. – С. 198–203.
6. Коверженко Г.Г. Высоковольтные импульсные испытания электрических машин / Г.Г. Коверженко // Энергетик.– 2006.– № 7.– С.42–43.
7. Браташ О.В. Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей / О.В. Браташ, А.П. Калинов // Вести Кременчукского гос. политехн. ун-та. – 2006. – № 4. – С. 44–52.
8. Вайнреб К. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора / К. Вайнреб // Электричество. – 2012. – № 7. – С. 51–57.
9. Тэттер В.Ю. Диагностирование подшипниковых и редукторных узлов на переходных режимах / В.Ю. Тэттер, А.Ю. Тэттер, В.С. Барайщук // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2005. –№ 8(90). – Ч.2. – С. 236–239.
10. Руссов В.А. Спектральная вибродиагностика / В.А. Руссов. – Пермь: Вибро-центр, 1996. – 176 с.

11 Вибрация. Системы измерения вибраций вращающихся валов. Ч. 1: Устройства для снятия сигналов относительной и абсолютной вибрации (ISO 10817-1:1998): ГОСТ ИСО 10817-1–2002. – Введ. 01.11.2007. – М.: СТАНДАРТ ИНФОРМ, 2007. – 19 с.

12. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.Р. Ширман, А.Б. Соловьев. – М., 1996. – 276 с.

13. Кравченко В.М. Техническое диагностирование механического оборудования: учебник. Ч. 2. Практика технического диагностирования / В.М. Кравченко, В.А. Сидоров. – Донецк: Новый мир, 2006. – 125 с.

14. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.

15. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / И Добеши. – Ижевск, 2001. – 464 с.

16. Петухов В. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В. Петухов, В. Соколов // Новости электротехники. – 2005. – № 1. – С. 9.

17. Шевчук В.А. Сравнение методов диагностики асинхронного двигателя / В. А. Шевчук , А. С. Семёнов // Международный студенческий научный вестник. Технические науки. – 2015. – № 3. – Ч. 4. – С. 419–423.

18. Тонких В.Г. Метод диагностики асинхронных двигателей в сельском хозяйстве на основе анализа их внешнего магнитного поля / В. Г. Тонких. – Барнаул, 2009. – 61 с.

19. Гуторова М.С. Діагностування виткових замикань обмоток статора асинхронного двигуна за електромагнітними характеристиками в неробочих режимах при регулюванні напруги / М.С. Гуторова, О.І. Титко, В.О. Титко // Технічні вісті. – 2016. – Вип. 2. – С. 14–17.

20. Овчаров В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / В.В. Овчаров. – К.: Изд-во УСХА, 1990. – 168 с.

21. Сырых Н.Н. Эксплуатация сельских электроустановок / Н. Н. Сырых.- М.: Агропромиздат, 1986. – 58 с.
22. Сидельников Л. Г. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации / Л.Г. Сидельников, Д.О. Афанасьев // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 7. – С. 127–137.
23. Таран В.П. Техническое обслуживание электрооборудования в сельском хозяйстве / В. П. Таран. – М.: Колос, 1975. – 131 с.
24. Полковниченко Д.В. Послеремонтная оценка технического состояния короткозамкнутых асинхронных электродвигателей / Д. В.Полковниченко // Электротехника и электромеханика. – 2005. – № 1. – С. 59-62.
25. Пономарев В.А. Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей[Электронный ресурс] / В.А. Пономарев, И.Ф. Суворов // Новости электротехники. – 2011. – № 2 (68). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/proect/neuron.php>.
26. Качан Ю.Г. Идентификация параметров и проверка адекватности тепловой модели асинхронного двигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи.- 2012.- Вип. 1 (17). – С. 87.
27. Анучин А.С. Двухмассовая тепловая модель для энергоэффективного выбора асинхронного двигателя /А.С. Анучин, К.Г. Федорова // Труды VII Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. – Иваново, ГОУ ВПО ИГЭУ, 2012. – С. 179–183.
28. Шрейнер Р.Т. Электромеханические и тепловые режимы работы асинхронных двигателей в системах частотного регулирования: учебное пособие /Р.Т. Шрейнер, А.В. Костылев, В.К. Кривовяз, С.И. Шилин. – Екатеринбург, 2008. – 361 с.
29. Омельченко Е.Я. Исследование четырехмассовой термодинамической математической модели асинхронного двигателя / Е.Я. Омельченко, В.О.

Моисеев, О.А. Тележкин // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – Вып. 20. – С. 126–131.

30. Федоров М.М. Динамические тепловые модели узлов электрических машин / М.М. Федоров // Электромашинобудування та електрообладнання. – 1999. – № 53. – С. 70–73.

31. Shenkman A.L. Experimental method for synthesis of generalized thermal circuit of polyphase induction motors / A.L Shenkman, M. Chertkov // IEEE Transactions on Energy Conversion. –2000.- № 3. – P. 264-268.

32. Гурин В.В. Автоматическая защита электрооборудования: В 2 ч. Ч. 2. Защита асинхронных трехфазных электродвигателей: учебно-методическое пособие / В.В. Гурин. – Минск: БГАТУ, 2011. – 452 с.

33. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / И. А. Сыромятников. – М.: Энергия, 1984. – 240 с.

34. Качан Ю.Г.Идентификация параметров и проверка адекватности тепловой модели асинхронного двигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи.- 2012. – Вип. 1/ (17). – С. 87 – 90.

35. Качан Ю.Г.Тепловая составляющая экономического ущерба от работы асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. збірник. – Дніпропетровськ: НГУ, 2010. – Вип. 85. – С. 147–150.

36. Правила улаштування електроустановок. – К.: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.

37. Пинчук О. Г. Оценка токов и температур асинхронных двигателей мощностью до 400 кВт при различных характеристиках несимметрии сети: методические подходы / О.Г. Пинчук // Вестник национального технического университета "ХПИ": сб. науч. тр. - Х.: НТУ "ХПИ", 2008. – Вып. 7. – С. 89-98.

38. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях /И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.

39. Пинчук О.Г. Оценка теплового состояния асинхронного двигателя по данным контроля токов статора при несимметрии питающего напряжения / О.Г. Пинчук, И.П. Кутковой // Наукові праці ДонНТУ. - 2009. - № 9(158).- С.190-196.

40. Исследование влияния несимметрии питающих напряжений на электромеханические характеристики асинхронного двигателя и его тепловое состояние / Федоров М.М., Денник В.Ф., Алексеев Е.Р., Карась С.В. // Взрывозащищенное электрооборудование. – 1998. – С. 32-42.

41. Souto O.C.N. Induction motors thermal behaviour and life expectancy under non-ideal supply conditions /O.C.N Souto, J. C Oliveira, L.M. Neto // Proc. 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power. – Orlando, 2000. – P. 899-904.

42. Кузнецов В.Г. Влияние изменений напряжений на электропотребление, потери и срок службы асинхронного двигателя /В.Г. Кузнецов, О.Г. Шполянский // IV Międzynarodowe seminarium polsko-ukraińskie “Problemy elektroenergetyki”. – Łódź , 2004. – P. 283-291.

43. Терешкевич Л.Б. Определение предельных значений параметров несимметрии электрического режима из условия допустимого нагрева асинхронного двигателя / Л.Б. Терешкевич, Т.Н. Червинская // Наук. пр. ВНТУ. Сер. Энергетика и электротехника. – 2011. – Вып. 3. – С. 2-6.

44. Гольдберг О.Д. Проектирование эл. машин / О.Д. Гольдберг. – М.: МГОУ. - 2001. - 161 с.

45. Шидловский А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К Шидловский, В.Г. Кузнецов. – Киев: Наукова думка, 1985. – 268 с.

46. Кузнецов В.Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В.Г. Кузнецов, А.С. Григорьев, В.Б. Данилюк; Под ред. А.К. Шидловского. – К.: Наукова думка, 1992. – 240 с.

47. Фёдоров М. М. Пусковые и рабочие характеристики асинхронных двигателей при различных напряжениях сети / М.М. Фёдоров, Е.Р. Алексеев, М.В. Горелов // Труды Донецкого государственного технического университета. Сер. Электротехника и энергетика.- 1999.- Вып. 4. – С. 123-126.

48. Особенности моделирования и анализа пусковых и рабочих характеристик асинхронных двигателей при различных напряжениях сети /М.М. Федоров, Е.Р. Алексеев, В.Ф. Денник, М.В. Горелов // Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 19.05-21.05.1999. – Таганрог, 2000. – С. 230-235.

49. Алексеев Е. Р. Математические модели анализа кривых переходных процессов в узлах электрических машин при пониженных напряжениях / Е.Р. Алексеев // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Сер. Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка.- 1999.- Вип. 6. – С. 304-309.

50. Федоров М. М. Тепловое состояние асинхронных двигателей при изменении напряжения сети /М.М. Федоров, Е.Р. Алексеев // Праці Донецького державного технічного університету. Сер. Електротехніка і енергетика.- 2000.- Вип. 17. – С. 82-86.

51. Федоров М.М. Исследование распределения температур узлов асинхронного двигателя при несимметрии питающих напряжений / М.М. Федоров, В.Ф. Денник, А.В. Корощенко // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. Электротехника энергетика. – 1999. – Вып. 4. – С. 138–141.

52. Суворов И.И. Исследование влияния несимметрии фазных напряжений на режимы работы асинхронных двигателей в среде имитационного моделирования MATLAB/Simulink / И.Ф. Суворов, В.В. Романова, С.В. Хромов // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2016. – Т. 16.- № 3. – С. 72–83.

53. Романова В.В. Построение компьютерной модели для исследования режимов работы асинхронного двигателя / В.В. Романова, С.В. Хромов //

Развитие технических наук в современном мире: сб. науч. тр. по итогам II междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж: ИЦРОН, 2015. – С. 35 – 41.

54. Надежность асинхронных электродвигателей / Б.Н.Ванеев, В.Д. Главный, В.М. Гостищев, Л.И. Сердюк. – М.: Наука, 1964. – 143 с.

55. Михеев М. А. Основы теплопередачи /М.А. Михеев, И.М. Михеева.- М.: Энергия, 1977. – 344 с.

56. Петухов В.В. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока /В.В. Петухов // Новости Электротехники. – 2005. - № 1 (31). – С. 23–28.

57. Патент № 36791 UA, МПК 7 G01R31/06. Спосіб виявлення коротко замкнутих витків в обмотках електричних машин та пристрій для його здійснення: пат. № 36791 UA, МПК 7 G01R31/06/ Манько В.М.; заявник та патентовласник Манько В.М. – № 2000020703; заявл. 09.02.2000; опубл. 16.04.2001, Бюл. № 3. – 4 с.: іл.

58. Патент № 88707 UA, МПК G01R31/00, G01R31/06. Спосіб оцінки стану міжвиткової ізоляції електродвигуна / Барбинягра М.П. (Україна); заявник та патентовласник Барбинягра М.П. – № 200800902; заявл. 25.01.2008; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21. – 6 с.: іл.

59. Патент № 2529596 RU, МПК G01R31/06. Способ диагностики межвитковых замыкания асинхронного двигателя / Суворов И.Ф., Горбунов Р.В., Палкин Г.А., Коряков Д.В. (Россия); заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Забайкальский государственный университет». – № 2013110594/28; заявк. 11.03.2013; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27. – 8 с.: иллюстр.

60. Патент № 2537518 RU, МПК G01R31/06. Способ диагностики межвитковых замыкания асинхронного электродвигателя / Суворов И.Ф., Горбунов Р.В., Палкин Г.А., Коряков Д.В. (Россия); заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Забайкальский государственный университет». – № 2013110600/28; заявк. 11.03.2013; опубл. 20.10.2014, Бюл. № 29. – 6 с.: ил.

61. Патент № 105420 UA, МПК H02H7/08, G01R31/00, G01R31/06. Спосіб захисту асинхронного електродвигуна від виткових замикань / Чернишев В.І. (Україна); заявник та патентовласник ДВНЗ «Донецький національний технічний університет». – № а 201211385; заявл.02.10.2012; опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9. – 7 с.: іл.

62. Суворов И. Ф. Оценка влияния несимметрии напряжений системы питающих напряжений на режимы работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором» / И.Ф. Суворов, Д.А. Дейс, В.В. Романова, С.В. Хромов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – №3 (51). – С. 222-227.

63. Методика диагностики и идентификации неисправностей обмоток асинхронного двигателя в процессе его функционирования / Р.Г. Мугалимов , А.Р. Мугалимова, Ю.А. Калугин, К.Э. Одинцов // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 3 (40). – С. 70–78.

64. Гуторова М.С. Вплив виткових замикань обмотки статора на робочі характеристики асинхронних двигунів /М.С. Гуторова // Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2015. – Вип. 41. – С. 84–89.

65. Гуторова М.С. Моделювання магнітного поля в проміжку асинхронних двигунів за виткових замикань обмотки статора / М.С.Гуторова // Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2015. – Вип. 40. – С. 90–94.

66. Титко А.И. Новые методы диагностики асинхронных двигателей / А.И. Титко, В.М. Андриенко, А.В. Худяков, М.С. Гуторова // Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 37. – С. 58–61.

67. Кокорев А.С. Справочник молодого обмотчика электрических машин /А.С.Кокорев. – 6-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 207 с.

68. Андрианов В.Н. Электрические машины и аппараты В.Н. /Андрианов. – М.: Колос, 1971. – 448 с.

69. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник для бакалавров / Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Изд. Юрайт, 2015. – 767 с.

70. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. В 2-х т. Т. 1 / А.В. Иванов-Смоленский. – 3-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 652 с.

71. Вольдек А.И. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. –СПб.: Питер, 2008. – 350 с.

72. Никиян Н.Г. Уравнение напряжений асинхронной машины при наличии короткозамкнутых витков в обмотке статора /Н.Г. Никиян., А.Б. Омон // Вестник ОГУ. – 2006. – № 12. – С. 438–440.

73. Никиян Н.Г. Вращающий момент трехфазной асинхронной машины при несимметрии фазных обмоток статора / Н.Г. Никиян, А.С. Падеев, А.Б. Омон // Электричество. – 2008. – № 2. – С. 49–54.

74. Авдеев А.И. Сопоставление методик расчета параметров асинхронных машин / А.И. Авдеев, В.В. Рожков // Информационные технологии, энергетика и экономика: Сб. трудов XVI-ой Межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3-х т. – 2019. – Т.1. –С. 92–96.

75. Клоков Б.К. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов / Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. – 3-е изд. испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.

76. Гридин В.М. Расчет параметров и характеристик асинхронных двигателей: методические указания к выполнению домашнего задания по курсу "Электротехника и электроника"[Электронный ресурс] / В. М. Гриди. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

77.Сафарян В.С. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины / В.С. Сафарян, С.Г. Геворгян // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ.–2015. – № 6. – С. 20–34.

78. Бешта А.С. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя при несимметричном питании статора / А.С. Бешта, А.А. Семин // Электромеханические и энергосберегающие системы. – 2014. – Вып. 2. – С. 10–16.

79. Мощинский Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кирякин // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 38–42.

80. Макеев М.С. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным / М.С. Макеев, А.А. Кувшинов // Вектор науки ТГУ. – 2013. – Вып. 1 (23). – С. 108–112.

81. Усольцев А.А. Определение параметров схемы замещения АД по справочным данным / А.А. Усольцев, Д.В. Лукичев // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2008. – Т 51. – № 10. – С. 35–41.

82. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

83. Соловьев В.А. Расчет характеристик трехфазного асинхронного двигателя: методические указания к самостоятельной работе студентов по дисциплинам «Электротехника и Электроника», «Основы электропривода» / В.А. Соловьев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 44 с.

84. Мотузко Ф.Я. Защитные устройства в электроустановках / Ф.Я. Мотузко. – М.: Энергия, 1973. – 200 с.

85. Василенко С.В. Управление сроком службы изоляции асинхронных двигателей по скоростным характеристикам нагрева обмоток / С.В. Василенко, В.Е. Кривонос // Электротехника та енергетика: зб. наук. пр. ДонНТУ. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 11(186). – С. 205–210.

86. Василенко С.В. Управление ресурсом работы асинхронного двигателя в условиях не симметрии питающей сети / С.В. Василенко, В.Е. Кривонос // Научный вестник ДГМА. – 2012. – Вып. №2 (10Е). – С. 14–24.

87. Василенко С.В. Управление ресурсом работы асинхронного двигателя в условиях несимметрии напряжений. Современные информационные

технологии, средства автоматизации и электропривод /С.В. Василенко,В.Е. Кривоносов // Всеукраинская научно-техн. конф. ДГМА, г. Краматорск, 17-21 декабря 2012 г.– Краматорск: ДГМА, 2012. – С. 197–199.

88. Василенко С.В. Запыление обмоток статора, как фактор снижения срока службы изоляции асинхронного двигателя / С.В. Василенко, В.Е. Кривоносов // Университетская наука – 2014: в 5 т.: тез.докл. междунар. науч.-техн. конф. (Мариуполь, 20–21 мая 2014 г.). – Мариуполь: ПГТУ, 2014. – Т. 2. – С. 8–9.

89. Василенко С.В. Диагностика и защита изоляции обмоток асинхронных двигателей, работающих в агрессивных средах / С.В. Василенко, В.Е. Кривоносов // Вестник Приазовского государственного технического университета.– 2015. – Вып. № 31. –С. 148–155.

90. Василенко С.В. Влияние запыленной среды на срок службы обмоток статора асинхронных двигателей / С.В. Василенко,В.Е. Кривоносов // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Сер. Энергетика. – 2015. – № 6. – С. 35–40.

91. Vasilenko S.V. Influence of the quality of repair of an induction motor on the after repair life / S.V. Vasilenko,V.E. Krivonosov, V.G. Skosyrev // Österreichisches Multiscience Journal. –2019. – Vol. 1. – № 22. – P. 46–51.

92. Vasilenko S.V. Comparative analysis of methods for calculating the parameters of asynchronous engines for reference data/ S.V. Vasilenko,V.E. Krivonosov // Österreichisches Multiscience Journal. –2019. – Vol. 1. – № 18. – P. 36–42.

93. Василенко С.В. Программное обеспечение для устройства диагностики и тепловой защиты электродвигателей, эксплуатируемых в условиях запыленной среды/ С.В. Василенко,В.Е. Кривоносов, И.В. Федосова // Вестник Приазовского государственного технического университета.– 2019.– Вып. № 38. – С. 129–137.

94. Vasilenko S.V. Influences of the imbalance of the active resistances of the stator windings on the asymmetry of phase currents in conditions of poor-quality

network voltage/ S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov, Karpolyuk I.T. // Znanstvena misel journal. – 2019. – Vol. 1. – № 35. – P. 67–75.

95. Василенко С.В. Срок службы изоляции при отклонениях напряжений и учете отклонений активных сопротивлений обмоток статора асинхронного двигателя / С.В. Василенко // Розвиток науки в ХХІ столітті: Збірник статей науково-інформаційного центру «Знання» за матеріалами ІІІ міжнародної науково-практичної конференції / С.В. Василенко, В.Е. Кривоносов, І.Т. Карполюк. – Харків: Знання, 2019. – С. 57–65.

96. Vasilenko S.V. Analysis of loss of power in the electric motor when closing the parallel branches of stator winding / S.V. Vasilenko, V.E. Krivonosov // Slovak international scientific journal. – 2019. – Vol. 1. – № 35. – P. 19–23.

97. Пат. № 107898 UA, МПК H02H5/04, H02K15/12, G01K13/08. Спосіб контролю і теплового захисту обмоток електричних машин, які працюють у запиленому середовищі / Кривоносов В.Є., Жежеленко І.В., Московець О.В., Василенко С.В. № а 201401923; заявл. 26.02.2014, опубл. 25.02.2015, Бюл. № 4. – 5 с.: іл.

98. А. с. 96405 Україна. Комп'ютерна програма «Пристрій діагностики неповнофазних режимів мережі, струмових ланцюгів, початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках і захисту електродвигуна» / Кривоносов В.Є., Гриб О.Г., Карпалюк І.Т., Кривоносов В.В., Борякін А.О., Василенко С.В. – опубл. 27.02.2020. – 1 с.

99. А. с. 77424 Україна. Комп'ютерна програма «Діагностика причин температурного перевантаження і захист електроустаткування від перегрівання» / Кривоносов В.Є. – опубл. 06.03.2018. – 1 с.

Основні причини виходу АД з ладу

Вузол АД	% від загальної кількості пошкоджень	Основні причини
Обмотка статора	75	міжвиткові замикання – 75 %; пробій межфазної ізоляції – 10 %; пробій на корпус – 15 %. 70 % ушкоджень припадає на лобову частину обмотки, 20 % на пазову частину, 10 % складають перекриття і пробіи ізоляції в коробках виведень.
Підшипниковий вузол	12	пошкодження деталей підшипника; недостатня кількість мастила; затирання вала по кришці підшипника; підвищене навантаження через несовісність АД і приводного механізму
Ротор	10	обрив або поганий контакт стрижнів з кільцями; затирання по статору
Механічні ушкодження	3	викривлення валу; руйнування зовнішніх частин АД (наприклад, лапи, підшипникові щити) в результаті впливу приводного механізму

Лістинг комп'ютерної програми «Пристрій діагностики неповнофазних режимів мережі, струмових ланцюгів, початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках і захисту електродвигуна»

```
#include <iostream>

#include <complex>

#include "Math.h"

using namespace std;

const double PI = 3.1415926535897932384626433832795;

bool ChekZero(double a, double b, double c)
{
    if (a == 0 || b == 0 || c == 0)
    {
        cout << "Включення сигналізації \n";
        cout << "Блокування двигуна \n";
        return true;
    }
    return false;
}

void Out(complex < double> a)
{
    if (a._Val[1] == 0)
    {
        cout << a._Val[0];
    }
    else if (a._Val[1] < 0)
    {
        cout << a._Val[0] << a._Val[1] << "j";
    }
    else
```

```
        {
            cout << a._Val[0] << "+" << a._Val[1] << "j"<<endl;
        }
    }
void Sig()
{
    cout << "Сигналізація! Віткове замикання! \n";
}
int main()
{
    setlocale(LC_ALL, "RUS");
    double r1, x1, r2, x2, ru, xu;
    double B;
    double f;
    double Ia, Ib, Ic;
    double p;
    double fiab, fibc, fiac;
    complex< double > u1, u2, u3;
    double n;
    double f1;
    double n0;
    double s;
    double uab, ubc, uac;
    double fa, fb, fc;
    double tmpU1, tmpU2, tmpU3;
    complex< double > Iaras, Ibras, Icras;
    complex< double > za;
    complex< double > zb;
    complex< double > zc;
    start:
    cout << "Введення параметрів ЕД: \n";
```

```

cout << "r1 : "; cin >> r1;
cout << "x1: "; cin >> x1;
cout << "r2: "; cin >> r2;
cout << "x2: "; cin >> x2;
cout << "rm: "; cin >> ru;
cout << "xm: "; cin >> xu;
cout << "p: "; cin >> p;
cout << "B: "; cin >> B;

```

nostart:

```

        cout << "Измерение U: \n";
cout << "Ua: "; cin >> tmpU1;
cout << "Ub: "; cin >> tmpU2;
cout << "Ua: "; cin >> tmpU3;
cout << "Uab: "; cin >> uab;
cout << "Ubc: "; cin >> ubc;
cout << "Uac: "; cin >> uac;
cout << "Вимірювання ф(фи): \n";
cout << "фа: "; cin >> fa;
cout << "фb: "; cin >> fb;
cout << "фc: "; cin >> fc;
double a = tmpU1 * cos(fa*3.14 / 180);
double b = tmpU1 * sin(fa*3.14 / 180);
u1._Val[0] = a;
u1._Val[1] = b;
a = tmpU2 * cos(fb*3.14 / 180);
b = tmpU2 * sin(fb*3.14 / 180);
u2._Val[0] = a;
u2._Val[1] = b;
a = tmpU3 * cos(fc*3.14 / 180);
b= tmpU3 *sin(fc*3.14 / 180);
u3._Val[0] = a;

```



```

u3._Val[1] = b;
cout << "Ua: "; Out(u1);
cout << "\nUb: "; Out(u2);
cout << "\nUc: "; Out(u3);
    if (ChekZero(tmpU1, tmpU2, tmpU3))
    {
        goto end;
    }
else
    {
        cout << "Вимірювання частоти f: "; cin >> f;
        cout << "Пуск двигуна! \n";
        int t;
        cout << "Пауза t: "; cin >> t;
        cout << "Вимірювання I: \n";
        cout << "Ia: "; cin >> Ia;
        cout << "Ib: "; cin >> Ib;
        cout << "Ic: "; cin >> Ic;
        cout << "Вимірювання кутів фи: \n";
        cout << "φIab: "; cin >> fIab;
        cout << "φIab: "; cin >> fIbc;
        cout << "φIab: "; cin >> fIac;
        if (ChekZero(Ia, Ib, Ic))
        {
            goto end;
        }
        else
        {
            cout << "Вимірювання обертів двигуна n: "; cin >> n;
            cout << "Вимірювання частоти f: "; cin >> f1;
            n0 = (60 * f)/p;

```

```

cout << "Розрахунок n0: "; cout<< n0;
s = 1-((n*p)/(60*f));
cout << " \n Розрахунок ковзання s: "; cout<< s;
cout << "\n Розрахунок параметрів ЕД \n";
complex <double> tmp (r1, x1);
complex <double> tmp1(r2/s, x2);
complex <double> tmp3(ru, xu);
complex <double> tmp4(r2/s, x2);
complex <double> tmp5(ru, xu);
za = tmp + ((tmp1 * tmp3)/(tmp4+tmp5));
zb = zc = za;
cout << "Za: "; Out(za);
cout << "Zb: "; Out(zb);
cout << "Zac: "; Out(zc);
Iaras = u1 /za;
cout << "Iapac: "; Out(Iaras);
Ibras = u2 / zb;
cout << "\nIapac: "; Out(Ibras);
Icras = u3 / zc;
cout << "\nIapac: "; Out(Icras);
double mod = abs(abs(Iaras) - abs(Ia));
double mod1 = abs(abs(Ibras) - abs(Ib));
double mod2 = abs(abs(Icras) - abs(Ic));
double x1 = abs(arg(Iaras) *(180.0 / PI));
double x2 = abs(arg(Ibras) *(180.0 / PI));
double x3 = abs(arg(Icras) *(180.0 / PI));
double mod3 = abs(x1-abs(fiab));
double mod4 = abs(x2- abs(fibc));
double mod5 = abs(x3-abs(fiac));
if (mod > B || mod1 > B|| mod2 > B|| mod3 > B || mod4 > B || mod5 > B)
{

```

```
        Sig();
    }

        char yn;
    cout << "Нажатия кнопки \"Стоп\" ? (y/n) "; cin >> yn;
    if (yn == 'y')
    {
        goto start;
    }
    else
    {
        goto nostart;
    }
}
}
end:
return 0;
}
```

```

Ввод параметров АД:
r1 : 4.9
x1: 4.7
r2: 7.2
x2: 5.15
rm: 2.04
xm: 49.02
p: 3
B: 0.02
Измерение U:
Ua: 220
Ub: 220
Ua: 220
Uab: 380
Ubc: 380
Uac: 380
Измерение ф(фи):
фа: 0
фb: -120
фс: -240
Ua: 220
Ub: -109.798-190.642j
Uc: -110.404+190.292j
Измерение частоты f: 50
Пуск двигателя!
Пауза t: 10
Измерение I:
Ia: 4.640
Ib: 4.638
Ic: 4.655
Измерение угла фи:
фIab: -57
фIab: -177
фIab: 63
Измерение оборотов двигателя n: 915
Измерение частоты f: 50
Расчёт n0: 1000
Расчёт скольжения s: 0.085
Расчёт параметров АД
Za: 25.7991+39.6375j
Zb: 25.7991+39.6375j
Zac: 25.7991+39.6375j
Iарас: 2.53755-3.89867j
Iарас: -4.64486-0.253181j
Iарас: 2.09876+4.15138j
Сигналиция! Витковое замыкание!
Нажата кнопка "Стоп" ? (y/n) _

```

Рис. В.1 Протокол работы компьютерной программы

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
Азовського морського інституту
Національного університету «Одеська морська академія»



О.П. Лисий

2020 р.

АКТ**Впровадження у навчальний процес результатів
дисертаційної роботи Василенко Сергія Вікторовича**

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Василенко Сергія Вікторовича «Дослідження причин зниження терміну служби ізоляції асинхронних двигунів напругою до 1000 В при багатofакторному впливі мережі і навколишнього середовища» виконаної на кафедрі «Інженерії і технології» АМІ НУ ОМА, впроваджені в навчальний процес шляхом внесення доповнень до курсу лекцій та лабораторних робіт з дисциплін «Електротехніка та електричні машини» в розділах «Принцип дії асинхронного двигуна та пошук несправностей».

Окремі результати використовуються у науково-дослідницьких роботах студентів.

Заступник директора з ННР

Присянок В.В.

ЗАТВЕРДЖЕНО

Головний енергетик
ДП «ММТП»

Єрмоменко Д.В.

« » 2020 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Василенко Сергія Вікторовича, що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Члени комісії:

Начальник відділу енерго-водозабезпечення ДП «ММТП»

Перешивайлова М.Б.

Інженер енергетик першої категорії відділу енерго-водозабезпечення

Москавець О.В.

Склали цей акт в тому, що результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Василенко Сергія Вікторовича отримані в результаті виконаної науково-дослідної роботи «Моніторинг режимів електричних мереж, від яких живляться перевантажувальні машини другого перевантажувального району та вугільного перевантажувального комплексу» (№ держреєстрації 0116Г007129 ДП «ММТП») для підвищення надійності роботи та захисту електродвигунів працюючих у запиленому середовищі. Отримано патент № 107898 Україна «Спосіб контролю і теплового захисту обмоток електричних машин, які працюють у запиленому середовищі» // Кривонос В.Є., Жежеленко І.В., Москавець О.В., Василенко С.В. (2006.01) № а201401923, опубл. 20.02.2015: Бюл. № 4. – 5 с. Результати роботи впроваджені для захисту від впливу відхилень, провалів напруги живлення, контролю якості ізоляції та діагностики температурного перевантаження, використовуються та впроваджені аспірантом кафедри

«Інженерії і технологій» Азовського морського інституту НУ ОМА Василенко С.В., за допомогою розробленої системи діагностики та захисту одного електродвигуна потужністю 250 кВт, напругою 380 В.

Розрахунок економічної ефективності від використання системи діагностики і захисту асинхронного двигуна (АД) марки АІР355М4, потужність 250 кВт, напруга 380/660 В, 1500 об/хв., каталожна вартість 166 290 грн.

Річний економічний ефект визначено використовуючи вираз:

$$\mathcal{E}_{\text{e1}} = \left(C_1 \frac{\frac{1}{T_1} + E_H}{\frac{1}{T_2} + E_H} + \frac{(I_1 - I_2) + E_H(K_1 - K_2)}{\frac{1}{T_2} + E_H} - C_2 \right) = 124239,38 \text{ грн / год}$$

де C_1 , C_2 – вартість АД без та з системою діагностики та захисту відповідно 166 290 грн. і 171 360 грн.

I_1 , I_2 – річні експлуатаційні витрати без і з системою діагностики і захисту при терміні експлуатації АД 2,3 року $I_1 = 72 300$ грн/рік і при збільшенні терміну експлуатації до нормативного терміну 12 років $I_2 = 13 875$ грн/рік.

$K_1 - K_2$ – капітальні вкладення при використанні системи діагностики і захисту АД дорівнюють ціні пристрою і установки системи, при окупності 12 років складе 450 грн/рік.

T_1 – середній термін служби АД за даними служби експлуатації становить 2,3 роки.

T_2 – плановий термін експлуатації 12 років.

E_H – нормативний коефіцієнт капіталовкладення складає 0,15.

Даний акт впровадження не є підставою для пред'явлення претензій, пов'язаних з авторськими правами, та отримання будь якої винагороди.

Акт складений для подання в спеціалізовану вчену раду у зв'язку із захистом дисертації Василенко С.В.

Начальник ВЕЗ ДП «ММТП»



Перешивалова М.Б.

Інженер енергетик 1 категорії



Московець О.В.

ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор судноремонтного
та суднобудівного заводу

Колодяжний П.О.

10 грудня 2020 р.

АКТ

Про впровадження результатів дисертаційної роботи

Василенко Сергія Вікторовича

Що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, в галузі енергетичні комплекси та системи.

Члени комісії:

Головний енергетик судноремонтного та суднобудівного заводу Сиваш Г.Т.

Начальник планово-фінансового відділу Гармаш О.В.

Склали цей акт в тому, що результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Василенко Сергія Вікторовича використано на судноремонтному та суднобудівному заводі для зниження аварійності та забезпечення надійної роботи електродвигуна потужністю 160 кВт приводу сліпового підйомнику судів. Здійснено виявлення початкового моменту появи виткових замикань в обмотці електродвигуна, впроваджено результати заявки на «Спосіб діагностики початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках асинхронних двигунів» Кривоносова В.Є, Василенко С.В. та інші., реєстр. № а2019 12168, дата початку пріоритету 23.12.2019.

Впроваджено експериментальний зразок приладу, розробленого здобувачем старшим лаборантом кафедри «Інженерія і технології» Азовського морського інституту Національного університету «Одеська морська академія».

Розрахунок економічної ефективності від використання експериментальної системи діагностики і захисту асинхронного двигуна (АД) марки 5AM280S4, потужність 160 кВт, напруга 380/660 В, 1500 об/хв., каталожна вартість 126 630 грн.

Річний економічний ефект визначено використовуючи вираз:

$$\mathcal{E}_{21} = \left(C_1 \frac{\frac{1}{T_1} + E_H}{\frac{1}{T_2} + E_H} + \frac{(I_1 - I_2) + E_H(K_1 - K_2)}{\frac{1}{T_2} + E_H} - C_2 \right) = 52810 \text{ грн} / \text{год}$$

де C_1 , C_2 – вартість АД без та з системою діагностики та захисту відповідно 126 630 грн. і 135 360 грн.

I_1 , I_2 – річні експлуатаційні витрати без і з системою діагностики і захисту при терміні експлуатації АД 4,5 року $I_1 = 21\,300$ грн/рік і при збільшенні терміну експлуатації до нормативного терміну 11 років $I_2 = 10\,875$ грн/рік.

$K_1 - K_2$ – капітальні вкладення при використанні системи діагностики і захисту АД дорівнюють ціні пристрою і установки системи, при окупності 12 років складе 550 грн/рік.

T_1 – середній термін служби АД за даними служби експлуатації становить 4,5 роки.

T_2 – плановий термін експлуатації 11 років.

E_H – нормативний коефіцієнт капіталовкладення складає 0,35.

Даний акт впровадження не є підставою для пред'явлення претензій, пов'язаних з авторськими правами, та отримання будь якої винагороди.

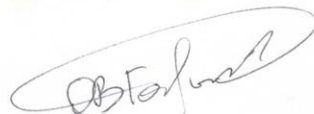
Акт складений для подання в спеціалізовану вчену раду у зв'язку із захистом дисертації Василенко С.В.

Головний енергетик судноремонтного
та суднобудівного заводу



Сиваш Т.Г.

Начальник планового
фінансового відділу



Гармаш О.В.

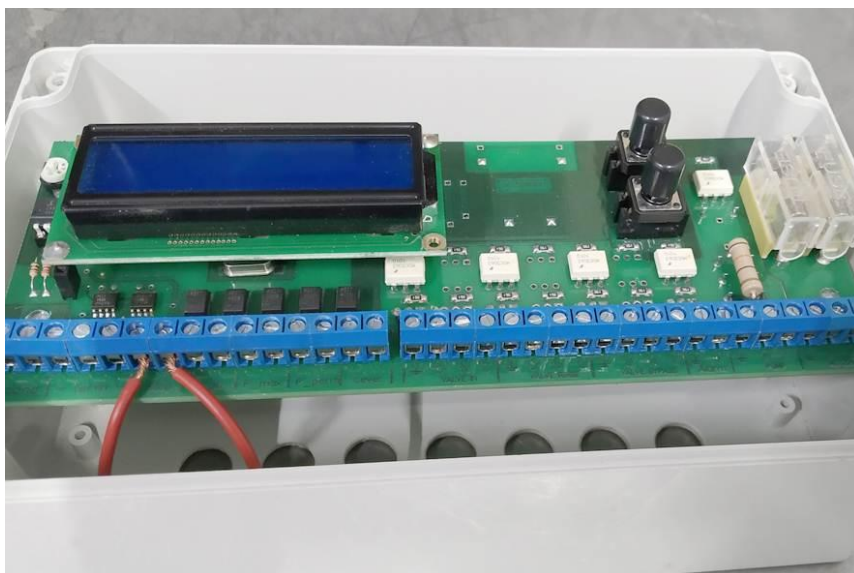


а)



б)

Рис Ж.1 Лабораторна установка для дослідження режимів роботи АД в умовах неякісної електроенергії мережі



а)



б)

Рис. Ж.2 Реалізація пристрою теплового контролю та захисту АД,
працюючих в умовах запиленого середовища

а) технічна реалізація пристрою;

б) впровадження пристрою на привід конвеєра потужністю 22 кВт