

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ДІДУШОК ОЛЕГ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.316.542.9.032.11:681.518.5 (043.3)

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ
ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Вінниця – 2020

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті,
Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Гرابко Володимир Віталійович,
Вінницький національний технічний університет,
ректор.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Чорний Олексій Петрович,
Кременчуцький національний університет імені Михайла
Остроградського,
директор Інституту електромеханіки, енергозбереження і
систем управління;

кандидат технічних наук, доцент
Гладь Іван Васильович,
Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу,
доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та
електромеханіки.

Захист відбудеться “4” грудня 2020 р. о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий “3” листопада 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Надійне електропостачання споживачів можливе лише у випадку надійної роботи усього обладнання енергосистеми. При цьому особлива увага приділяється вимикачам, за допомогою яких здійснюються комутації в електричних мережах. Вони належать до найбільш важливих комутаційних апаратів, від надійності функціонування яких залежить стійкість забезпечення електропостачання споживачів. За допомогою вимикачів здійснюється відключення аварійних струмів короткого замикання, операції комутації номінального робочого струму.

Світова тенденція розвитку електротехнічного устаткування свідчить про заміну поширених у минулому масляних та маломасляних вимикачів напругою 6-35 кВ на вакуумні вимикачі. Вакуумні комутаційні апарати мають найбільшу динаміку розвитку і є перспективними в розподільчих установках середньої номінальної напруги. Вакуумні дугогасильні пристрої мають високу надійність і зносостійкість. Але є також певні недоліки: перенапруги, викликані неодноразовою комутацією полюсів вимикача; розрегулювання контактної системи в процесі довготривалої роботи, висока вартість даного типу комутаційного обладнання.

Для оцінювання технічного стану вакуумного вимикача використовуються різні засоби діагностування. Особливу увагу в процесі діагностування технічного стану вакуумного вимикача приділяють дослідженню роботи його приводу. Від технічного стану приводу залежить надійність роботи усього комутаційного апарату, його технічна можливість здійснити замикання/розмикання головних і допоміжних контактів із заданими швидкісними та динамічними параметрами. В процесі роботи вакуумного вимикача дугові процеси під час комутації призводять до зношення контактної системи (зміна форми, розміру, маси робочих поверхонь силових контактів, зменшення їх провалу). Існуючі засоби діагностування контактної системи вакуумних вимикачів зводяться до виявлення існуючих відхилень від заводських параметрів, але виявлення прихованих дефектів або тих, що зароджуються, потребує застосування нових методів діагностування.

Вказані проблеми обумовлюють актуальність наукової задачі, спрямованої на підвищення надійної роботи вакуумного комутаційного апарату шляхом розробки нових методів діагностування його технічного стану.

Дослідженню та створенню засобів діагностування технічного стану вимикачів присвячена велика кількість робіт, авторами яких є: В. В. Кутін, О. Є. Рубаненко, Б. С. Стогній, М. Ф. Сопель, Є. М. Танкевич, А. В. Панов, В. І. Паньків, Г. М. Міхєєв, В. А. Шахнін, В. І. Прівалов, Н. І. Овчаренко, А. І. Ящура та багато інших.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень, що проводились на кафедрі електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті Вінницького національного технічного університету у відповідності до

наукового напрямку «Розробка математичних моделей процесів, що протікають в електричних та енергетичних системах, інформаційно-вимірювальних систем та систем автоматичного та автоматизованого керування цими процесами», зокрема дисертаційне дослідження пов'язане з кафедральною науково-дослідною темою № 29 КЗ «Діагностика, захист від аварійних режимів та методи експлуатації електрообладнання автоматизованих та автоматичних систем промислових підприємств і транспорту».

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення надійності роботи вакуумних вимикачів, а отже, і електричних мереж в цілому шляхом вдосконалення методів і засобів діагностування електромагнітного приводу та контактної системи вакуумного вимикача.

Відповідно до вказаної мети необхідно розв'язати такі основні задачі:

- провести аналіз існуючих методів та засобів діагностування комутаційних апаратів;
- розробити математичні моделі діагностування електромагнітного приводу та контактної системи вакуумних вимикачів;
- за математичними моделями розробити структурні схеми пристроїв для діагностування електромагнітного приводу та контактної системи вакуумного вимикача, що далі реалізуються на базі промислових компонентів, які виробляються серійно, або інтегрувати їх в існуючі системи діагностування електричного обладнання;
- шляхом комп'ютерного моделювання дослідити адекватність запропонованих математичних моделей та реалізованих пристроїв;
- оцінити похибки першого і другого роду при визначенні часу неодночасності комутації полюсів вимикача та знайти середній ризик.

Об'єктом дослідження в дисертаційній роботі є процеси зміни технічного стану вакуумних вимикачів в процесі їх експлуатації.

Предмет дослідження є методи та засоби визначення технічного стану системи електроприводу вакуумних вимикачів та їх діагностичні ознаки під час експлуатації.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач й аналізу прийнятих схемотехнічних та алгоритмічних рішень використані методи: теорії загальної електротехніки для опису електричних процесів під час комутації вимикача, теорії магнетизму для опису магнітних процесів в електромагніті, метод скінченних елементів для побудови комп'ютерної моделі електромагніту, теорії термогазодинаміки для опису дугових процесів у вакуумній камері, методи комп'ютерного моделювання для дослідження перехідних процесів, що протікають в процесі комутації вимикача та для підтвердження адекватності розроблених математичних моделей, теорії ймовірностей для знаходження помилок першого і другого роду, аналітичні можливості комп'ютерної алгебри для здійснення розрахунків математичних моделей.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- вперше розроблено математичну модель діагностування технічного стану електромагнітного приводу вакуумного вимикача на основі порівняння еталонної вебер-амперної характеристики із поточною та визначенні

коефіцієнта відхилення, що дозволяє оцінити поточний технічний стан електромагніту вимикача в процесі експлуатації;

– вперше розроблено математичну модель, яка дозволяє визначати знос контактної системи, спричинений дуговими процесами та механічними перенапруженнями, при ввімкненні та вимкненні вакуумного вимикача, що дозволяє оцінити наближення технічного стану контактної системи вимикача до аварійного;

– удосконалено математичну модель оцінювання синхронної роботи контактної системи вимикача, що на відміну від існуючих, дозволяє розраховувати відхилення від допустимого значення часу ввімкнення вимикача та формувати сигнали керуючої дії для оперативного персоналу щодо регулювання рухомих контактів полюсів вимикача. Для кожного полюса формується інформативний сигнал на зближення або віддалення його рухомих контактів від нерухомих для забезпечення синхронної роботи контактної системи вимикача.

Практичне значення отриманих результатів:

- на основі математичної моделі порівняння вебер-амперних характеристик електромагнітного приводу розроблено алгоритм та мікропроцесорний пристрій, який має розширені функціональні можливості і застосування якого, на відміну від відомих, дозволяє діагностувати електромагнітний привід, а саме окремо обмотку ввімкнення та обмотку вимкнення вимикача;

- з використанням математичної моделі діагностування електромагнітного приводу розроблена структурна схема пристрою, застосування якої, на відміну від відомих, дозволяє здійснювати діагностування електромагнітного приводу в процесі роботи вакуумного вимикача;

- на основі математичних моделей для визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача та визначення допустимого відхилення положення рухомих контактів полюсів вимикача розроблені структурні схеми пристроїв, які легко реалізуються на програмованих логічних інтегральних схемах;

- з використанням математичної моделі для визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача запропоновано реалізацію пристрою визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача із використанням ПЛІС на базі мікросхеми Altera марки MAXII EPM570T100C5. Програму розроблено в середовищі Quartus II 15.0. Така реалізація дозволяє суттєво підвищити швидкодію пристрою, зменшити його енергоспоживання та розміри;

- на основі математичної моделі виявлення зносу контактної системи розроблено мікропроцесорний пристрій та алгоритм роботи, який з високою достовірністю дозволяє визначати знос контактної системи, має розширені функціональні можливості і може легко інтегруватись у загальну систему діагностування комутаційного обладнання.

Використання одержаних результатів дало можливість розробити та впровадити підхід та математичну модель діагностування електромагнітного

привода вакуумного вимикача на основі аналізу вебер-амперних характеристик та математичну модель оцінки синхронної роботи контактної системи вакуумного вимикача, що дозволяє визначати поточний технічний стан електромагніта та здійснити налаштування синхронної роботи полюсів вакуумного вимикача, що в свою чергу, підвищує надійність роботи вакуумного комутаційного апарату. Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджено в СО "ВВЕМ" ПАТ "Вінницяобленерго" (акт впровадження від 19.05.2020 р.) та в навчальний процес Вінницького національного технічного університету (акт впровадження від 12.05.2020 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1] – метод діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача на основі аналізу вебер-амперних характеристик; [2] – структура схеми та алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою для діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача; [3] – розробка моделі магнітної системи електромагнітного приводу вакуумного вимикача у програмі FEMM; [4] – математична модель виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача; [5] – розробка структури моделі виявлення зносу контактної системи при ввімкненні вакуумного вимикача; [6] – розробка блока розрахунку відносного квадрата відхилення; [7] – обґрунтування розрахунку вебер-амперної характеристики; [8] – опис дугових процесів при комутації вимикача.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [1] – [8], були отримані у Вінницькому національному технічному університеті.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких науково-технічних конференціях: III Міжнародній науково-практичній Інтернет - конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи», м. Вінниця, (м. Вінниця 2017 р.); XVI Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах», (м. Вінниця, 2018 р.); XXIV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика», (м. Одеса, 2019 р.); 5-ій Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (м. Вінниця, 2019 р.); щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області на базі ВНТУ в 2015-2019 роках.

Публікації. Основний зміст роботи опублікований у 8 друкованих працях, з яких 5 входять до переліку наукових фахових видань України, 3 статті, що входять до НМБ Scopus. Також опубліковано двоє тез доповідей за результатами виступів на міжнародних конференціях. За результатами дисертаційної роботи отримано один патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (144 найменувань) і 5

додатків. Основний зміст викладений на 114 сторінках друкованого тексту, містить 42 рисунки, 7 таблиць. Загальний обсяг роботи – 148 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі. Наведено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, а також подано відомості щодо апробації роботи, особистого внеску здобувача та публікацій. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами та темами.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану питань діагностування комутаційних апаратів, серед яких було розглянуто засоби діагностування приводів вимикачів, а також засоби діагностування контактної системи вимикачів. Уточнено задачі наукового дослідження.

На сьогоднішній день, в складі електричного обладнання енергетичних підприємств використовують різні типи комутаційних апаратів. Організація системи моніторингу для кожного типу комутаційних апаратів має свої спеціальні особливості і потребує застосування часто унікальних методів діагностування. Особливу увагу приділено діагностуванню залишкового ресурсу головних контактів, технічного стану приводу та контролю ізоляційної системи комутаційного апарату. Універсальними методами є використання тепловізійної діагностики та вібродіагностики.

Однією із причин відмов надійної роботи вакуумного вимикача є некоректна робота приводу. Більша частина вакуумних вимикачів має електромагнітний привод. Основними методами діагностування приводу є: контроль швидкісних і часових параметрів контактної системи, контроль вібраційних процесів, контроль форми струму управління електромагніта вимикача. Для реалізації задачі діагностування електромагнітного приводу проведені дослідження на основі аналізу вебер-амперних характеристик. Відомі методи та моделі діагностування вебер-амперних характеристик не використовуються у задачах діагностування технічного стану електроприводу вакуумного вимикача. Вирішення цієї проблеми потребує застосування методів, які врахують ступінь відхилення між еталонною та виміряною вебер-амперною характеристикою обмоток електромагніту вимикача.

При комутації вимикача відбувається знос силових контактів. Основними методами діагностування технічного стану контактів вимикачів є: вимірювання величини відключеною фазами потужності короткого замикання, контроль стану головних контактів по величині струму, контроль стану головних контактів, який визначається за видом і тривалістю горіння дуги. Проте запропоновані рішення не дозволяють охопити весь спектр комутаційних апаратів та підходів, оскільки виробники не завжди надають ресурсну характеристику на вимикач і існує обмеженість інформації щодо співвідношень між кількістю комутацій та значеннями комутуваного струму.

У **другому розділі** розроблено модель діагностування технічного стану електромагнітного приводу на основі аналізу вебер-амперних характеристик,

що дозволяє оцінити поточний технічний стан електромагніта вимикача за рахунок зіставлення коефіцієнта відхилення із граничними коефіцієнтами.

Для розрахунку вебер-амперної характеристики необхідно здійснити вимірювання електричних параметрів та розрахувати диференціали потокозчеплень на кожному i – ому кроці електричних вимірювань:

$$d\Psi_i = (U_i - I_i \cdot R_a) \cdot (t_i - t_{i-1}), \quad (1)$$

де U_i – значення напруги живлення обмотки електромагніту; I_i – значення струму, який протікає через обмотку електромагніту; t_i – час, протягом якого здійснюється вимірювання напруги та струму; i – порядковий номер кроку вимірювання.

Відповідно значення потокозчеплення на кожному i – ому кроці вимірювання:

$$\Psi_i = \Psi_{i-1} + d\Psi_i. \quad (2)$$

Для чисельного розрахунку магнітної характеристики, на першому кроці (при $i=1$) приймаємо величину потокозчеплення $\Psi_1=0$, при подальшому обчисленні використовуємо виміряні значення на кожному відповідному кроці вимірювання.

За розрахованими значеннями диференціалів потокозчеплення та струму обмотки можна отримати характеристику $\Psi_i = f(I_i)$ в кожній точці i – го вимірювання.

Для визначення поточного технічного стану електромагніту необхідно мати набір значень еталонної вебер-амперної характеристики $\Psi_{i,et} = f(I_{i,et})$ та поточної вебер-амперної характеристики $\Psi_{i,b} = f(I_{i,b})$ за якими розраховується відносний квадрат відхилення:

$$\delta\Psi_i^2 = \left(\frac{(\Psi_{i,b} - \Psi_{i,et})}{\Psi_{i,et}} \right)^2. \quad (3)$$

Коефіцієнт відхилення враховує загальний ступінь відхилення між еталонними та поточними значеннями вебер-амперної характеристики:

$$K_B = \sum_{i=1}^N \delta\Psi_i^2. \quad (4)$$

Такий коефіцієнт відхилення може бути застосований у моделі прийняття діагностичного висновку про поточний стан електромагніту:

$$\begin{cases} K_B \leq K_{ГР1} \rightarrow \text{справний стан;} \\ K_{ГР1} < K_B \leq K_{ГР2} \rightarrow \text{на межі несправності;} \\ K_B > K_{ГР2} \rightarrow \text{несправність.} \end{cases} \quad (5)$$

Для отримання коефіцієнтів $K_{ГР1}$, $K_{ГР2}$ необхідно по осцилограмах ввімкнення/вимкнення при різному технічному стані привода розрахувати вебер-амперні характеристики обмоток. Осцилограми, на яких зображено криві

струму та напруги (виміряні для різних технічних станах електромагнітного приводу) при ввімкненні/вимкненні вимикача, надаються заводом-виробником вакуумного вимикача. Зміна форми кривої відображає ступінь зносу, розрегулювання рухомих частин або погіршення провідних властивостей електричних кіл електромагнітного приводу.

Запропоновано математичну модель системи виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача, яка дозволяє визначати знос комутаційної системи при ввімкненні та вимкненні вакуумного вимикача.

Величина тягового зусилля приводного електромагніту при ввімкненні та вимкненні вакуумного вимикача (за умови, при яких магнітопровід магнітної системи електромагніту ненасичений, втрати на гістерезис відсутні):

$$F_T = \frac{i}{2 \cdot V} \cdot \frac{d\Psi}{dt}, \quad (6)$$

де i – струм, що протікає через обмотку електромагніту; V – швидкість руху якоря електромагніту.

Проходження струмів короткого замикання і близьких до них через замкнуті контакти або ті, що замикаються, супроводжується різким збільшенням температури в контактній площадці і виникненням електродинамічного зусилля відкиду (рис. 1).

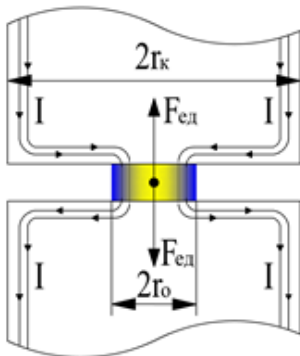


Рисунок 1 – Електродинамічні сили при протіканні струму в замкнутих контактах

Електродинамічна сила відкиду може призвести до зварювання контактів або самовільного розмикання контактів вимикача. Таке зусилля має найбільший вплив на процес ввімкнення та стійкість при проходженні струмів, близьких до короткого замикання у замкнутому положенні. Збільшення цієї сили порівняно із тяговим зусиллям при ввімкненні характеризується сильним зносом контактної системи та оплавленням контактів.

Величину електродинамічного зусилля відкиду контактів визначають:

$$F_{ед} = 10^{-7} i^2 \ln \frac{r_k}{r_0}, \quad (7)$$

де i – струм, що протікає через комутуючі контакти; r_k – радіус комутуючого контакту; r_0 – радіус металевого перешийка в контактні вимикача.

Математична модель, що описує роботу системи виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача, має вигляд (8):

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{d\Psi_{\text{об.вим}}}{dt} = u_{\text{об.вим}} - i_{\text{об.вим}} \cdot R_{\text{об.вим}}; \\
 & V_{\text{вим}} = \frac{dx}{dt}; \\
 & F_{\text{т.вим}} = \frac{i_{\text{об.вим}}}{2 \cdot V_{\text{вим}}} \cdot \frac{d\Psi_{\text{об.вим}}}{dt}; \\
 & \frac{d\Psi_{\text{об.ввим}}}{dt} = u_{\text{об.ввим}} - i_{\text{об.ввим}} \cdot R_{\text{об.ввим}}; \\
 & V_{\text{ввим}} = \frac{dx}{dt}; \\
 & F_{\text{т.ввим}} = \frac{i_{\text{об.ввим}}}{2 \cdot V_{\text{ввим}}} \cdot \frac{d\Psi_{\text{об.ввим}}}{dt}; \\
 & F_{\text{ед.заг}} = 10^{-7} i_A^2 \ln \frac{r_{\text{к.А}}}{r_{\text{о.А}}} + 10^{-7} i_B^2 \ln \frac{r_{\text{к.В}}}{r_{\text{о.В}}} + 10^{-7} i_C^2 \ln \frac{r_{\text{к.С}}}{r_{\text{о.С}}}; \\
 & K = 0, \text{ якщо } (F_{\text{т.ввим}} - F_{\text{ед.заг}} > \delta) \vee (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}} > \sigma); \\
 & K = 1, \text{ якщо } (F_{\text{т.ввим}} - F_{\text{ед.заг}} \leq \delta) \vee (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}} \leq \sigma).
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де $V_{\text{вим}}$ – швидкість руху якоря при вимкненні вимикача; $V_{\text{ввим}}$ – швидкість руху якоря при ввмкненні вимикача; $F_{\text{т.вим}}$ – тягове зусилля приводу при вимкненні вимикача; $F_{\text{т.ввим}}$ – тягове зусилля приводу при ввмкненні вимикача; i_A, i_B, i_C – миттєве значення струму, який протікає через полюси А, В, С вакуумного вимикача відповідно; $r_{\text{к.А}}, r_{\text{к.В}}, r_{\text{к.С}}$ – радіус комутуючих контактів в кожному із полюсів А, В, С вакуумного вимикача відповідно; $r_{\text{о.А}}, r_{\text{о.В}}, r_{\text{о.С}}$ – радіус металевого перешийка контакту в кожному із полюсів А, В, С вакуумного вимикача відповідно; $F_{\text{ед.заг}}$ – загальна електродинамічна сила відкиду для усієї контактної системи; $F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}}$ – мінімально допустиме тягове зусилля розмикання при вимкненні вимикача; δ – порогове значення різниці діючої сили тяги та загального електродинамічного зусилля протидії; σ – порогове значення різниці діючої сили тяги та мінімально допустимого тягового зусилля розмикання; K – логічна змінна виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача.

Порівнюючи діюче тягове зусилля та загальну електродинамічну силу відкиду контактів при замиканні і діюче тягове зусилля із мінімально допустимим тяговим зусиллям для процесу розмикання, можна отримати виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача. Якщо величина діючого тягового зусилля при ввмкненні відрізняється менше, ніж на задане значення δ від загального електродинамічного зусилля відкиду контактів або величина діючого тягового зусилля при вимкненні відрізняється менше, ніж на задане значення σ від мінімально допустимого тягового зусилля вимкнення, то формується сигнал виявлення зносу силових контактів контактної системи вимикача. Математична модель дозволяє визначати знос контактної системи,

спричинений дуговими процесами та механічними перенапруженнями, що дозволяє визначити ступінь наближення технічного стану контактної системи вимикача до аварійного.

Запропоновано математичну модель оцінки та налаштування синхронної роботи контактної системи вакуумного вимикача, яка дозволяє розраховувати відхилення від допустимого значення часу ввімкнення вимикача та формувати сигнали керуючої дії для оперативного персоналу щодо регулювання рухомих контактів полюсів вимикача.

Рухомі контакти кожного полюсу вимикача мають знаходитися на одній і тій же відстані від відповідних нерухомих контактів (на середній лінії між максимальною та мінімальною відстанями між контактами вимикача з діапазону допустимих значень). Тому середній час t_{cep} руху рухомих контактів від середньої лінії до нерухомих контактів визначається:

$$t_{\text{cep}} = \frac{t_{\text{max}} + t_{\text{min}}}{2}, \quad (9)$$

де t_{max} – найбільший час руху контактів вимикача із вимкненого стану у ввімкнений; t_{min} – найменший час руху контактів вимикача із вимкненого стану у ввімкнений.

Для контролю допустимого відхилення позначимо через L мінімальну неузгодженість ввімкнення всіх полюсів вимикача:

$$L = \min \left\{ |t_A - t_{\text{cep}}|; |t_B - t_{\text{cep}}|; |t_C - t_{\text{cep}}| \right\}, \quad (10)$$

де t_A – час ввімкнення полюса А вимикача; t_B – час ввімкнення полюса В вимикача; t_C – час ввімкнення полюса С вимикача.

Якщо час ввімкнення полюса вимикача відхиляється в сторону збільшення часу ввімкнення, то регулювання рухомої частини вимикача необхідно провести в напрямку зменшення часу ввімкнення вимикача:

$$t_{\text{п}} - t_{\text{cep}} \geq L \rightarrow \text{П} \downarrow, \quad (11)$$

де $t_{\text{п}}$ – час ввімкнення полюса вимикача; $\text{П} \downarrow$ – направлена дія по вибору напрямку регулювання полюса вимикача в сторону зменшення відстані між контактами.

У випадку, коли контактна поверхня рухомого полюса вимикача знаходиться надто близько до відповідного нерухомого контакту, то регулювання необхідно здійснити в напрямку збільшення часу ввімкнення полюса вимикача:

$$\left. \begin{array}{l} t_{\text{п}} - t_{\text{cep}} < 0 \\ t_{\text{cep}} - t_{\text{п}} \geq L \end{array} \right\} \rightarrow \text{П} \uparrow, \quad (12)$$

де $\text{П} \uparrow$ – направлена дія по вибору напрямку регулювання полюса вимикача в сторону збільшення відстані між контактами.

Для підвищення надійної роботи вимикача при ввімкненні контролюється різниця в часі замикання всіх полюсів відносно кожного з них:

$$|t_A - t_B| \vee |t_B - t_C| \vee |t_C - t_A| \leq \Delta t_{\text{доп}}, \quad (13)$$

де $\Delta t_{\text{доп}}$ – допустимий час з паспортних даних неузгодженого ввімкнення полюсів вимикача.

Математична модель системи оцінки роботоздатності вакуумного вимикача:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{\text{сеп}} = \frac{t_{\text{max}} + t_{\text{min}}}{2}; \\ I_c = \frac{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}{2}; \\ L = \min \{ |t_A - t_{\text{сеп}}|; |t_B - t_{\text{сеп}}|; |t_C - t_{\text{сеп}}| \}; \\ t_{\text{min}} \leq t_{\text{п}} \leq t_{\text{max}}; \\ t_{\text{п}} - t_{\text{сеп}} \geq L \rightarrow \text{П} \downarrow; \\ \left. \begin{array}{l} t_{\text{п}} - t_{\text{сеп}} < 0 \\ t_{\text{сеп}} - t_{\text{п}} \geq L \end{array} \right\} \rightarrow \text{П} \uparrow; \\ t_{\text{п}} - t_{\text{сеп}} = 0 \rightarrow \text{норма}; \\ t_{\text{п}} - t_{\text{сеп}} > L + \Delta l \rightarrow \text{П} \downarrow\downarrow; \\ t_{\text{сеп}} - t_{\text{п}} > L - \Delta l \rightarrow \text{П} \uparrow\uparrow; \\ |t_A - t_B| \vee |t_B - t_C| \vee |t_C - t_A| \leq \Delta t_{\text{доп}}. \end{array} \right. \quad (14)$$

Часові діаграми неузгодження комутації полюсів вимикача, які відповідають математичній моделі (14), наведені на рис. 2.

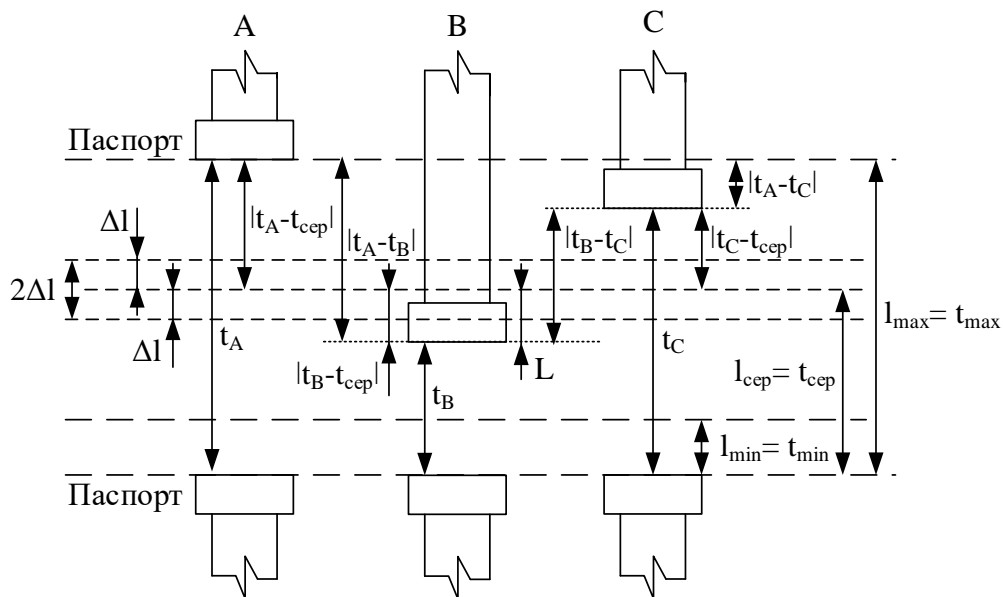


Рисунок 2 – Часові діаграми неузгодження ввімкнення контактної системи полюсів вимикача

У **третьому розділі**, на основі математичної моделі порівняння вебер-амперних характеристик електромагнітного приводу запропоновано алгоритм та

мікропроцесорний пристрій для діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача. Здійснено синтез апаратного та програмного забезпечення, необхідного для реалізації мікропроцесорного засобу діагностування. Основними компонентами пристрою є мікроконтролер AT32UC3L032, блоки комутації, сенсори струму та напруги. Даний тип мікроконтролера, за рахунок добре розвиненої периферії, дає можливість легко інтегрувати пристрій в загальну систему діагностування комутаційного обладнання та забезпечує достатню швидкодію в процесі його експлуатації.

З використанням математичної моделі діагностування електромагнітного приводу запропоновано пристрій, структура якого наведена на рис. 3.

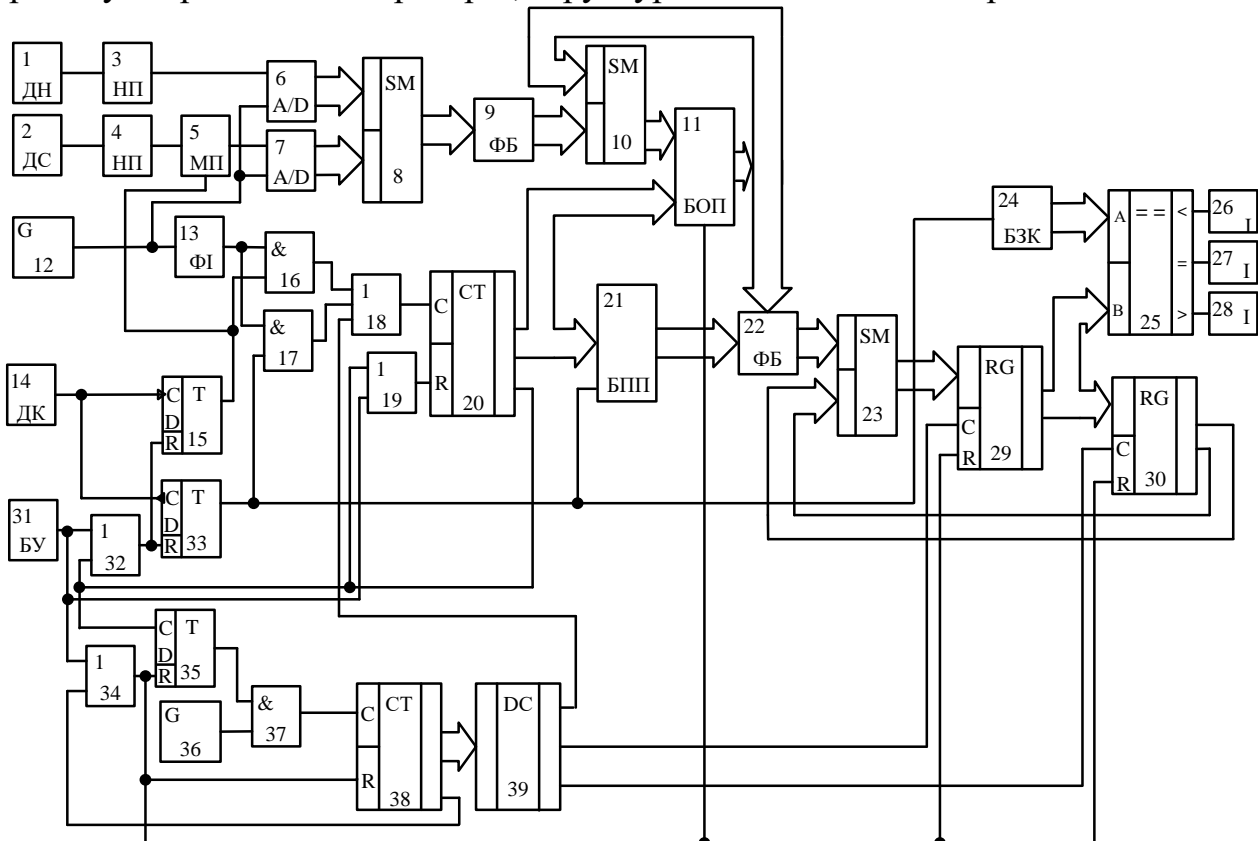


Рисунок 3 – Схема пристрою для діагностування електричного приводу вимикача (1 – датчик напруги; 2 – датчик струму; 3, 4 – нормуючі перетворювачі; 5 – масштабований підсилювач; 6, 7 – аналого-цифрові перетворювачі; 8, 10, 23 – суматори; 9, 22 – функціональні блоки; 11 – блок оперативної пам'яті; 12, 36 – генератори імпульсів; 13 – формувач імпульсів; 14 – датчик комутації; 15, 33, 35 – тригери; 16, 17, 37 – елементи І; 18, 19, 32, 34 – елементи АБО; 20, 38 – лічильники; 21 – блок постійної пам'яті; 24 – блок задання коефіцієнта; 25 – цифровий компаратор; 26, 27, 28 – індикатори; 29, 30 – регістри; 31 – блок установки нуля; 39 – дешифратор)

На основі математичної моделі для визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача запропоновано пристрій для реалізації системи діагностування неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача.

З використанням математичної моделі для визначення допустимого відхилення положення рухомих контактів полюсів вимикача запропоновано

пристрій для реалізації системи контролю допустимого положення контактів та забезпечення синхронної роботи контактної системи вакуумного вимикача. Запропонований пристрій легко реалізується на програмованих логічних інтегральних схемах будь-яких виробників.

Запропоновано мікропроцесорний пристрій та алгоритм роботи (рис. 4) системи виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача.

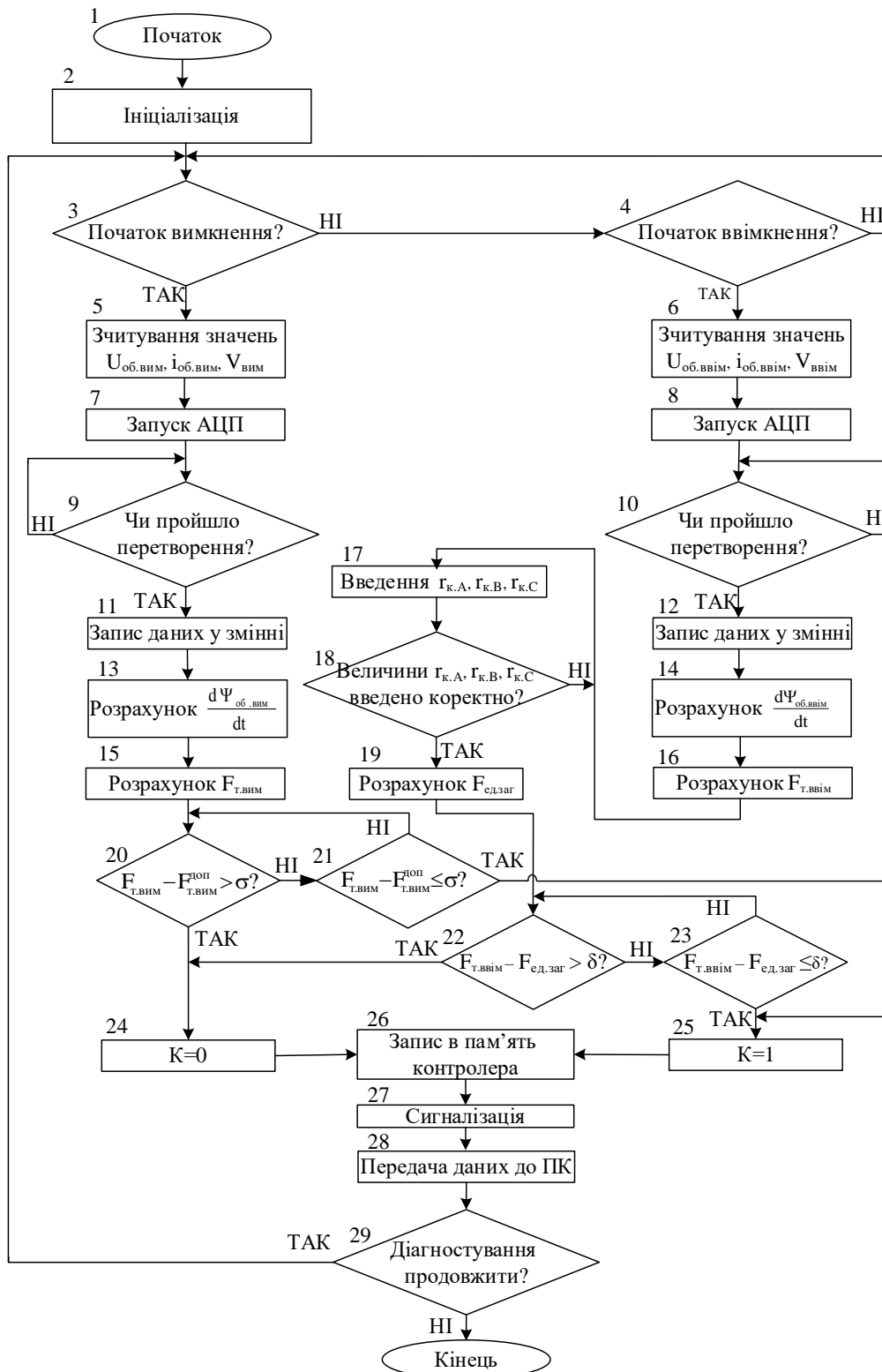


Рисунок 4 – Узагальнений алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою виявлення зносу контактної системи

Враховуючи складність обробки інформації, для вирішення даної задачі було здійснено вибір сучасної мікропроцесорної бази, а саме: процесор СС3200 виробництва фірми Texas Instruments. Запропонований алгоритм та програмна реалізація мікропроцесорного пристрою легко інтегруються в загальну систему діагностування вакуумного вимикача.

Запропоновано реалізацію пристрою визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача з використанням ПЛІС на базі мікросхеми Altera марки MAXII EMP570T100C5. Програму розроблено в середовищі Quartus II 15.0. Така реалізація дозволяє суттєво підвищити швидкодію пристрою, зменшити його енергоспоживання та розміри.

У **четвертому розділі** розроблено комп'ютерну модель електромагнітного привода вакуумного вимикача ВР0-10-12,5/630 У2 в програмі FEMM. Проведено розрахунок його магнітної системи (рис. 5).

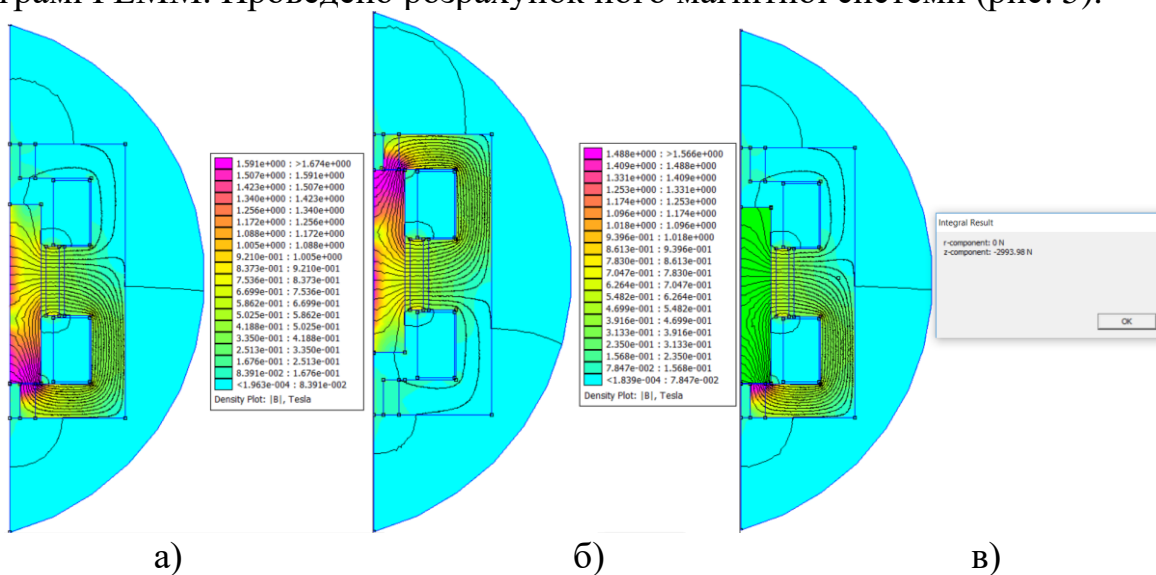


Рисунок 5 – Результати моделювання роботи електромагнітного привода: а) розподіл магнітного поля у вимкненому положенні вимикача; б) розподіл магнітного поля у ввімкненому положенні вимикача; в) розрахунок сили утримання якоря електромагніта методом інтеграла тензора Максвелла

Отримані результати моделювання сили утримання якоря електромагніту у програмі FEMM відповідають паспортним даним на вимикач. Тому можна вважати, що моделювання підтверджує доцільність застосування запропонованого методу визначення магнітної характеристики обмоток вимикача.

Створено у ППП Matlab Simulink комп'ютерну модель виявлення та попередження зносу контактної системи вакуумного вимикача, яка дозволяє при ввімкненні та вимкненні вимикача отримати сигнал про зношення контактів вимикача. Оскільки дослідним шляхом перевірка запропонованого методу виявлення зносу із врахуванням зміни параметрів (мережі, електромагнітного привода, фізичного стану контактів) є задачею складною в реалізації, то використання розробленої комп'ютерної моделі вирішує дану задачу.

Проведено натурний експеримент із імітацією несправності вимикача для

перевірки адекватності роботи запропонованого методу діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача ВР0-10-12,5/630 У2. Результати при вимірюванні струму та напруги обмоток електромагніту під час комутації вакуумного вимикача наведено на рис. 6.

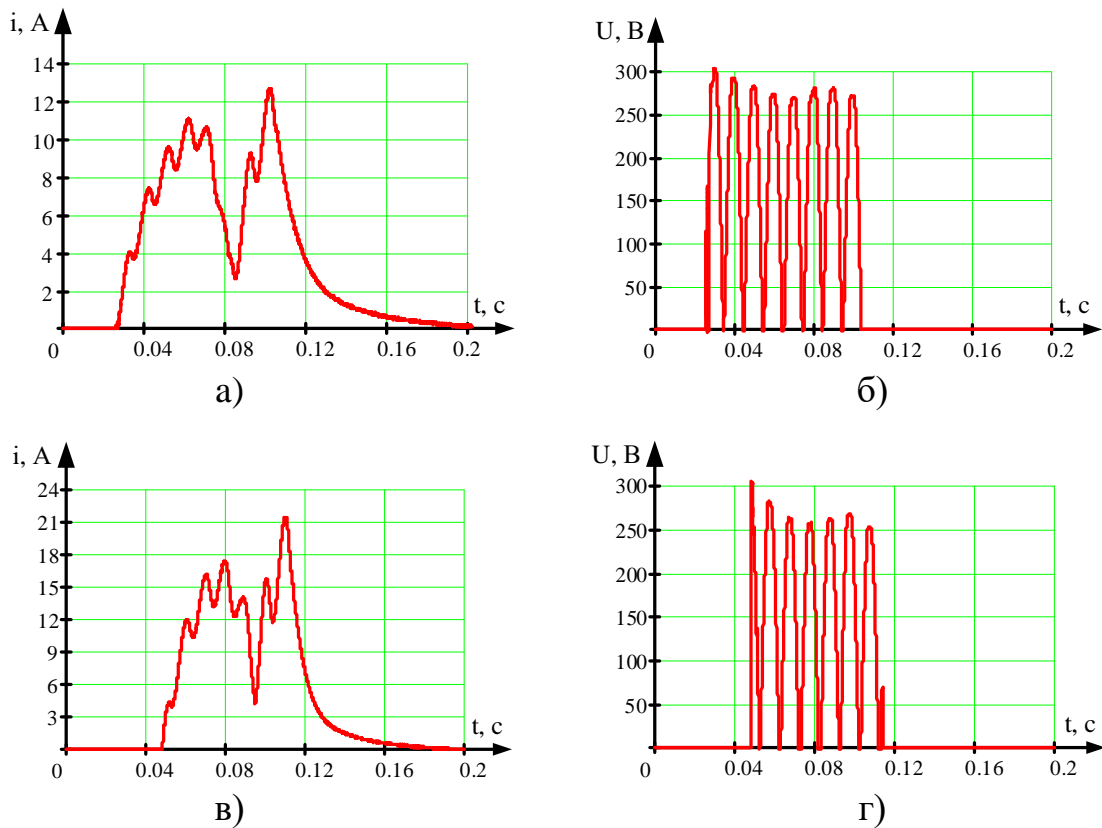


Рисунок 6 – Графіки струму та напруги при вмиканні та вимиканні вимикача: а), б) струм та напруга обмотки ввімкнення при вмиканні вимикача; в), г) струм та напруга обмотки вимкнення при вимиканні вимикача

Порівняння вебер-амперних характеристик для справного електромагнітного привода вимикача та привода із дефектом при ввімкненні та вимкненні вимикача наведено на рис. 7.

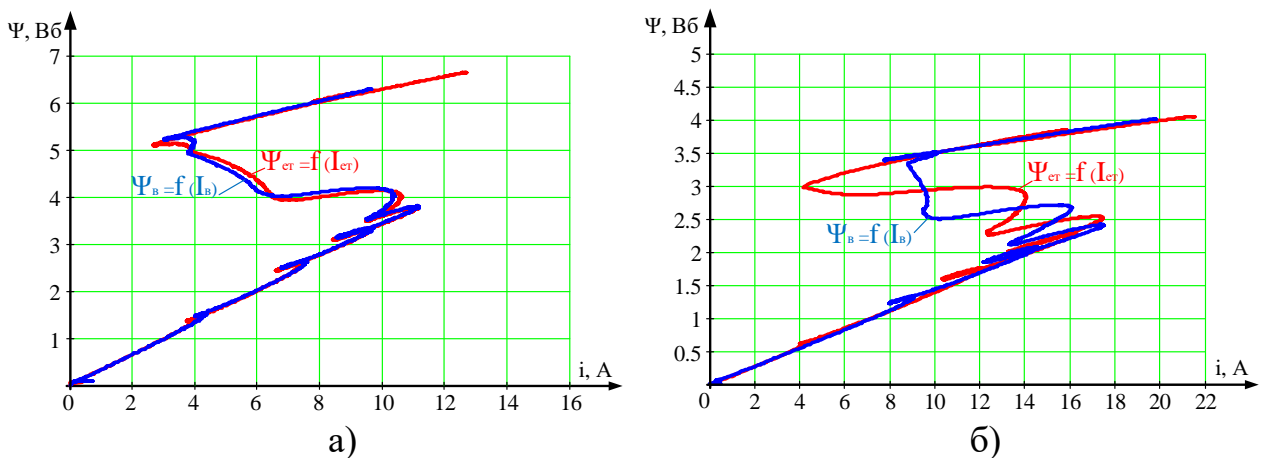


Рисунок 7 – Порівняння вебер-амперних характеристик справного $\Psi_{cr} = f(I_{cr})$ та з дефектом $\Psi_B = f(I_B)$ електромагнітного привода вакуумного вимикача: а) для обмотки ввімкнення; б) для обмотки вимкнення

У табл. 1 наведено результати розрахунку потокозчеплення отриманих при моделюванні у програмі FEMM та розрахованих по експериментальних даних.

Таблиця 1 – Порівняння результатів розрахунку потокозчеплення дослідним шляхом та моделюванням у програмі FEMM

Процес	Експериментальні дані			Потокозчеплення обмотки розраховане за експериментальними даними $\Psi, Bб$	Потокозчеплення обмотки розраховане у FEMM $\Psi, Bб$
	Струм I, A	Напруга U, B	Активний опір обмотки $R_a, Ом$		
Ввімкнення	11,12	188,82	12,8	3,76	4,03
	8,01	0		4,01	4,23
	6,01	272,8		4,35	4,56
	5,01	281,61		4,73	4,99
	2,64	74,12		5,11	5,5
Вимкнення	17,47	202,14	8,3	2,52	2,74
	14,0	0		2,38	2,53
	11,51	70,52		2,98	3,14
	8,01	0		2,89	3,03
	4,13	186,14		2,99	3,22

Отримані результати потокозчеплення для обмоток електромагніту вакуумного вимикача підтверджуються моделюванням у програмі FEMM. Наведений спосіб отримання вебер–амперної характеристики може бути використаний для діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача на основі аналізу вебер–амперних характеристик обмоток.

Здійснено оцінку похибок помилок першого і другого роду при визначенні часу неодночасності комутації полюсів вимикача та з врахуванням вартості цін для відповідних помилок розраховано середній ризик.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі наведене теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової задачі діагностування електромагнітного приводу, виявлення зношення та розрегулювання контактної системи вакуумного вимикача та її технічні реалізації, що дозволяє підвищити надійність роботи вакуумного комутаційного апарату.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи є такими:

У галузі теоретичних та експериментальних досліджень:

1. Розроблено математичну модель для діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача на основі аналізу вебер-амперних характеристик, застосування якої, на відміну від відомих, дозволяє в процесі роботи оцінити

поточний стан електромагніту та ступінь його зносу через порівняння коефіцієнтів відхилення вебер-амперних характеристик.

2. Розроблено математичну модель виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача, застосування якої, на відміну від відомих, дозволяє визначати знос комутаційної системи при ввімкненні та вимкненні вакуумного вимикача.

3. Розроблено математичну модель для оцінки роботоздатності контактної системи вакуумного вимикача, застосування якої, на відміну від відомих, дозволяє розраховувати відхилення від допустимого значення часу ввімкнення вимикача та формувати сигнали керуючої дії для оперативного персоналу щодо регулювання рухомих контактів полюсів вимикача.

4. Здійснено оцінку похибок помилок першого і другого роду при визначенні часу неодночасності комутацій, а також розраховано значення середнього ризику.

У галузі практичного використання:

1. На основі математичної моделі діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача розроблено алгоритми та функціональні схеми мікропроцесорних засобів, які мають розширені функціональні можливості та дозволяють здійснювати діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача, що, в свою чергу, дозволяє з високою достовірністю визначати технічний стан, а також легко інтегруватися в загальну систему діагностування вакуумного комутаційного апарату.

2. На основі математичної моделі діагностування електромагнітного привода через аналіз вебер-амперних характеристик розроблена структурна схема пристрою, застосування якого, на відміну від відомих, дозволяє здійснювати діагностування електромагнітного привода в процесі роботи вакуумного вимикача.

3. На основі математичної моделі оцінки роботоздатності контактної системи вакуумного вимикача розроблені структурні схеми пристроїв, поєднання яких на відміну від відомих, дозволяє реалізувати пристрій визначення комплексної роботоздатності контактної системи та формувати дії для оперативного персоналу щодо регулювання рухомих контактів полюсів вимикача.

4. На основі математичної моделі виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача розроблено алгоритми та функціональні схеми мікропроцесорних засобів, які мають розширені функціональні можливості та дозволяють здійснювати діагностування зносу контактної системи, що, в свою чергу, дозволяє з високою достовірністю визначати технічний стан контактних з'єднань вакуумного вимикача.

5. На основі математичної моделі визначення неодночасності комутації полюсів вимикача запропоновано реалізацію пристрою визначення неодночасності комутації контактної системи із використанням ПЛІС на базі мікросхеми Altera MAXII EPM570T100C5. Програму було розроблено в середовищі Quartus II 15.0. Така реалізація дозволяє суттєво підвищити швидкодію пристрою, зменшити його енергоспоживання та розміри.

6. Розроблено комп'ютерну модель електромагнітного приводу вакуумного вимикача у програм FEMM та комп'ютерну модель виявлення та попередження зносу контактної системи вакуумного вимикача у програмі у Matlab Simulink, які адекватно відображають та підтверджують запропоновані математичні моделі та їх технічні реалізації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] В. В. Грабко, та О. В. Дідушок, “Метод діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача на основі вебер-амперних характеристик”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 53 – 61, 2018. doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2018-141-6-53-61>
- [2] О. В. Дідушок, “Мікропроцесорний пристрій для діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 31 – 36, 2019. doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-147-6-31-36>
- [3] В. В. Грабко, О. В. Дідушок, “Дослідження роботи електромагнітного приводу вакуумного вимикача як об'єкта діагностування”, *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*, № 9 (1334), с. 57 – 62, 2019. doi: [10.20998/2079-8024.2019.9.11](https://doi.org/10.20998/2079-8024.2019.9.11)
- [4] В. В. Грабко, О. В. Дідушок, “Математична модель виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача”, *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*, № 4 (1358), с. 12 – 19, 2020. doi: [10.20998/2079-8024.2020.4.01](https://doi.org/10.20998/2079-8024.2020.4.01)
- [5] В. В. Грабко, О. В. Дідушок, “Комп'ютерна модель виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача”, *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, Випуск 1 (49), с. 38 – 44, 2020. doi: [10.30929/2072-2052.2020.1.49.38-44](https://doi.org/10.30929/2072-2052.2020.1.49.38-44)
- [6] В. В. Грабко, В. В. Грабко, та О. В. Дідушок, “Пристрій для діагностування електричного приводу високовольтного вимикача”, *МПК G07C 3/10 (2006.01). № 137512*, Жов. 25, 2019.
- [7] В. Грабко, та О. Дідушок, “Математична модель діагностування технічного стану електромагнітного приводу вакуумного вимикача”, на *XIV Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах»*, Вінниця, 2018, с.95.
- [8] О. Дідушок, “Математична модель діагностування технічного стану контактної системи вакуумного вимикача”, на *5-ій Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах»*, Вінниця, 2019, с.90.

АНОТАЦІЇ

Дідушок О. В. Методи та засоби діагностування технічного стану вакуумних вимикачів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2020.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню надійності роботи вакуумних вимикачів шляхом вдосконалення методів і засобів діагностування електромагнітного приводу та контактної системи вакуумного вимикача.

З цією метою в роботі виконано аналіз методів та засобів діагностування технічного стану комутаційних апаратів, розроблено математичну модель діагностування електромагнітного приводу на основі аналізу вебер-амперних характеристик. Синтезовано математичні моделі системи виявлення зносу та оцінки роботоздатності контактної системи вакуумного вимикача. Розроблено необхідні структури пристроїв на основі запропонованих математичних моделей, а також алгоритми їх роботи. Створено комп'ютерну модель електромагнітного приводу вакуумного вимикача у програмі FEMM. Проведено розрахунок його магнітної системи. Отримані результати моделювання сили утримання якоря електромагніту у програмі FEMM відповідають паспортним даним на вимикач. Розроблено у ППП Matlab Simulink комп'ютерну модель виявлення та попередження зносу контактної системи вакуумного вимикача, яка дозволяє при ввімкненні та вимкненні вимикача отримати сигнал про зношення контактів вимикача. Комп'ютерна модель дозволяє імітувати ввімкнення/вимкнення вакуумного вимикача при різних струмах, змінювати технічні параметри контактної системи та інформувати про зношення контактної системи. Проведено натурний експеримент із імітацією несправності вимикача для перевірки адекватності роботи запропонованого методу діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача ВР0-10-12,5/630 У2. Отримані результати потокозчеплення для обмоток електромагніту вакуумного вимикача підтверджуються моделюванням у програмі FEMM. Наведений спосіб отримання вебер-амперної характеристики може бути використаний для діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача на основі аналізу вебер-амперних характеристик обмоток.

Здійснено оцінку похибок помилок першого і другого роду при визначенні часу неодночасності комутації полюсів вимикача та з врахуванням вартості цін для відповідних помилок розраховано середній ризик.

Ключові слова: вакуумний вимикач, діагностування, технічний стан, привод, електромагніт, контактна система, знос, пристрій, алгоритм, мікроконтролер, комп'ютерна модель.

Didushok O.V. Methods and means of diagnosing the technical condition of the vacuum circuit breakers. – Manuscript.

The dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering

sciences in speciality 05.09.03 “Electrotechnical complexes and systems”. – Vinnitsya National Technical University, 2020.

The dissertation work is devoted to increase of reliability of work of vacuum switches by improvement of methods and means of diagnostics of the electromagnetic drive and contact system of the vacuum switch.

For this purpose, the analysis of methods and means of diagnosing the technical condition of switching devices is performed, a mathematical model of diagnosing the electromagnetic drive based on the analysis of weber-ampere characteristics is developed. Mathematical models of the system for detecting wear and evaluating the efficiency of the contact system of a vacuum switch have been synthesized. Necessary structures of devices on the basis of the offered mathematical models, and also algorithms of their work are developed. A computer model of the electromagnetic drive of the vacuum switch in the FEMM program has been created. The calculation of its magnetic system is carried out. The obtained results of modeling the retention force of the armature of the electromagnet in the FEMM program correspond to the passport data on the switch. In program Matlab Simulink developed a computer model for detecting and preventing the wear of a vacuum circuit breaker contact system, which allows you to receive a signal about the wear of the circuit breaker contacts when you turn on and off the circuit breaker. The computer model allows to simulate switching on / off of the vacuum switch at various currents, to change technical parameters of contact system and to inform on wear of contact system. An experiment with simulation of circuit breaker failure to verify the adequacy of the proposed method of diagnosing the electromagnetic drive of the vacuum circuit breaker BP0-10-12,5/630 Y2. The obtained results of the calculation of the flux coupling for the electromagnet windings of the vacuum switch are confirmed by simulation in the FEMM program. The above method of obtaining the Weber-ampere characteristic can be used to diagnose the electromagnetic drive of the vacuum switch based on the analysis of the weber-ampere characteristics of the windings.

The estimation of errors of errors of the first and second kind for time of non-simultaneous switching of poles of the switch is calculated and the average risk taking into account cost of prices for the corresponding errors is calculated.

Keywords: vacuum circuit breaker, diagnostics, technical condition, drive, electromagnet, contact system, wear, device, algorithm, microcontroller, computer model.

Дидушок О. В. Методы и средства диагностирования технического состояния вакуумных выключателей. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2020.

В диссертации предложены методы диагностирования контактной системы и электромагнитного привода на основе анализа вебер-амперных характеристик вакуумного выключателя.

Выполнен анализ методов и средств диагностирования технического состояния коммутационных аппаратов.

В работе разработана математическая модель диагностирования технического состояния электромагнитного привода вакуумного выключателя на основе сравнения эталонной вебер-амперной характеристики с текущей и определении коэффициента отклонения, который позволяет оценить текущее техническое состояние электромагнита выключателя в процессе эксплуатации. Предложенная математическая модель позволяющая определять износ контактной системы, вызванный дуговыми процессами и механическими перенапряжениями, при включении и выключении вакуумного выключателя, позволяет определить степень приближения технического состояния контактной системы выключателя к аварийному. При включении износ силовых контактов определяется на основе сравнения действующего тягового усилия включения с общей электродинамической силой отброса по всем полюсам контактной системы. При отключении износ силовых контактов определяется на основе сравнения действующего приводного тягового усилия выключения с минимально допустимым тяговым усилием для процесса отключения вакуумного выключателя. Разработанная математическая модель оценки синхронной работы контактной системы выключателя, в отличие от существующих, позволяет рассчитывать отклонения от допустимого значения времени включения выключателя и формировать сигналы управляющего воздействия для оперативного персонала по регулированию подвижных контактов полюсов выключателя. Для каждого полюса формируется информативный сигнал на сближение или удаление его подвижных контактов от неподвижных для обеспечения синхронной работы контактной системы выключателя.

На основе математической модели сравнения вебер-амперных характеристик электромагнитного привода разработан алгоритм и микропроцессорное устройство, которое имеет расширенные функциональные возможности и может легко интегрироваться в общую систему диагностирования коммутационного оборудования и обеспечивает достаточное быстродействие в процессе его эксплуатации. С использованием математической модели диагностирования электромагнитного привода разработана структурная схема устройства, применение которой, в отличие от известных, позволяет осуществлять диагностирование электромагнитного привода в процессе работы вакуумного выключателя. На основе математических моделей для определения разновременности включения полюсов выключателя и определение допустимого отклонения положения подвижных контактов полюсов выключателя разработаны структурные схемы устройств, которые легко реализуется на программируемых логических интегральных схемах любых производителей. С использованием математической модели для определения разновременности включения полюсов выключателя предложено реализацию устройства определения разновременности включения полюсов выключателя с использованием ПЛИС на базе микросхемы Altera марки MAXII EPM570T100C5. Программа была

разработана в среде Quartus II 15.0. Такая реализация позволяет существенно повысить быстродействие устройства, уменьшить его энергопотребление и размеры. На основе математической модели выявления износа контактной системы разработаны микропроцессорное устройство и алгоритм работы, который с высокой достоверностью позволяет определять износ контактной системы, имеет расширенные функциональные возможности и может легко интегрироваться в общую систему диагностирования коммутационного оборудования.

Разработана компьютерная модель электромагнитного привода вакуумного выключателя ВР0-10-12,5 / 630 У2 в программе FEMM. Проведен расчет его магнитной системы. Определены потокосцепления обмоток выключателя при его включении и выключении. Полученные результаты моделирования силы удержания якоря электромагнита в программе FEMM соответствуют паспортным данным на выключатель. Результаты моделирования подтверждают целесообразность применения предложенного метода определения магнитной характеристики обмоток выключателя. Созданная в ППП Matlab Simulink компьютерная модель выявления и предупреждения износа контактной системы вакуумного выключателя позволяет при включении и выключении выключателя получить сигнал об износе контактов выключателя. Установлено, что в отличие от существующих способов разработана компьютерная модель позволяет описывать дуговые процессы при коммутации, изменять параметры сети и отображать реакцию контактной системы вакуумного выключателя на эти изменения. Поскольку опытно проверка предложенного метода выявления износа с учетом изменения параметров (сети, электромагнитного привода, физического состояния контактов) является задачей сложной в реализации, то использование разработанной компьютерной модели решает данную задачу. Проведен натурный эксперимент с имитацией неисправности выключателя для проверки адекватности работы предложенного метода диагностирования электромагнитного привода вакуумного выключателя ВР0-10-12,5 / 630 У2. При включении было разрегулировано блок-контакты положения выключателя, что привело к раннему отключению питания от обмотки включения. При отключении вакуумного выключателя было смещено направление движения оси приводной тяги, что привело к дополнительной нагрузке при отключении выключателя. Полученные результаты потокосцепления для обмоток электромагнита вакуумного выключателя подтверждаются моделированием в программе FEMM.

Осуществлена оценка погрешностей ошибок первого и второго рода при определении времени неодновременности коммутации полюсов выключателя и проведена оценка точности синтезированных устройств по критерию минимального риска.

Ключевые слова: вакуумный выключатель, диагностирования, техническое состояние, привод, электромагнит, контактная система, износ, устройство, алгоритм, микроконтроллер, компьютерная модель.

Підписано до друку 28.10.2020 р. Формат 29.7 × 42 ¼
Наклад 70 прим. Зам. № 2020-092
Віддруковано в інформаційному редакційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 65-18-06
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009