

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. В. Грабко, О. В. Дідушок

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

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2022

УДК 621.316.5:681.518.5

Г75

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 31.03.2022 р.)

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор **В. М. Кутін**
доктор технічних наук, професор **О. П. Чорний**

Грабко, В. В.

Г75 Методи та засоби діагностування технічного стану вакуумних вимикачів : монографія [Електронний ресурс] / В. В. Грабко, О. В. Дідушок. – Вінниця: ВНТУ, 2022. – 113 с.

ISBN 978-966-641-905-0

В монографії здійснено огляд та аналіз існуючих методів і засобів діагностування вакуумних вимикачів. Представлені розроблені авторами математичні моделі визначення технічного стану вакуумних вимикачів та побудовані на їх основі пристрої, що дозволяють опосередковано діагностувати технічний стан вакуумних вимикачів.

Книга розрахована на інженерно-технічних працівників електротехнічної промисловості та електроенергетики, що займаються експлуатацією електричного обладнання, а також може бути корисною студентам та аспірантам закладів вищої освіти та наукових установ.

УДК 621.316.5:681.518.5

ISBN 978-966-641-905-0

© В. Грабко, О. Дідушок, 2022

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАНЬ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ	8
1.1 Аналіз методів діагностування комутаційних апаратів	8
1.2 Аналіз засобів діагностування приводів вимикачів	14
1.3 Аналіз засобів діагностування контактної системи вимикачів.....	21
1.4 Узагальнення результатів аналізу і постановка задачі дослідження	26
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ	28
2.1 Математична модель діагностування технічного стану електромагнітного привода на основі аналізу вебер-амперних характеристик	28
2.2 Математична модель системи виявлення зносу контактної системи вакуумного виимикача.....	32
2.3 Математична модель оцінки та налаштування синхронної роботи контактної системи вакуумного вимикача	40
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ ПРИСТРОЇВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ.....	46
3.1 Мікропроцесорна реалізація засобу для діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача на основі аналізу вебер-амперних характеристик.....	46
3.2 Пристрій діагностування електричного привода вакуумного вимикача.....	49
3.3 Пристрій для визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача	53

3.4 Пристрій для формування керуючої дії налаштування синхронної роботи контактної системи.....	55
3.5 Реалізація пристрою діагностування неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача із застосуванням програмованих логічних інтегральних мікросхем.....	58
3.6 Мікропроцесорний пристрій для виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача.....	61
3.7 Інтеграція реалізованих засобів.....	65
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНОГО ВИМИКАЧА.....	66
4.1 Комп'ютерна модель електромагнітного привода вакуумного вимикача.....	67
4.2 Комп'ютерна модель системи виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача.....	72
4.3 Обробка експериментальних даних	79
ВИСНОВКИ.....	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	91
Додаток Комп'ютерне моделювання електромагнітного привода Е-10 вакуумного вимикача ВР0-10-12,5/630 У2 у програмі FEMM.....	107

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПД	– пристрій діагностування
ТХ	– технічний стан
ДК	– датчик комутації
ДН	– датчик напруги
ДС	– датчик струму
АВС	– автоматична вимірювальна система
КС	– контактна система
ППП	– пакет прикладних програм
ДЖ	– джерело живлення
РП	– реєструючий пристрій
БУ	– блок управління
ПК	– персональний комп'ютер
ЕРС	– електрорушійна сила
ФНЧ	– фільтр низьких частот
КДС	– кероване джерело струму

ВСТУП

Надійне електропостачання споживачів можливе лише у випадку надійної роботи усього обладнання енергосистеми. При цьому особлива увага приділяється вимикачам, за допомогою яких здійснюється комутація в електричних мережах [1]. 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, а також комутації, пов'язані зі зміною напрямку потоків потужностей в електроенергетичних системах.

Світова тенденція розвитку електротехнічного устаткування свідчить про заміну поширених у минулому масляних та маломасляних вимикачів напругою 6-35 кВ на вакуумні вимикачі [2]. Вакуумні комутаційні апарати мають найбільшу динаміку розвитку і є найбільш перспективними в розподільчих установках середньої номінальної напруги. Вакуумні дугогасильні пристрої мають високу надійність і зносостійкість [3]. Але є також певні недоліки: перенапруги, викликані неодночасністю комутації полюсів вимикача; розрегулювання контактної системи в процесі довготривалої роботи; висока вартість даного типу комутаційного обладнання.

Для оцінки технічного стану вакуумного вимикача використовуються різні засоби діагностування [4]. Особливу увагу в процесі діагностування технічного стану вакуумного вимикача приділяють дослідженню роботи його приводу [5]. 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.

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

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАНЬ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ

1.1 Аналіз методів діагностування комутаційних апаратів

Відомо [6], [7], що діагностування – це процес визначення дійсного технічного стану об'єкта або системи з заданою точністю та характеру його змін з часом. Основною метою технічної діагностики є розпізнавання стану технічної системи в умовах обмеженої інформації і, як наслідок, підвищення надійності та оцінка залишкового ресурсу системи (обладнання) [8].

Діагностування технічного стану вимикачів є складним процесом. Метою роботи систем діагностування технічного стану комутаційних апаратів є визначення функціональної можливості контрольованого обладнання виконати наступний цикл комутації лінії, що відходить, в найбільш важких, критичних умовах [9].

Для реалізації повної системи моніторингу комутаційного обладнання, необхідно провести оперативну діагностику стану його основних підсистем [10]:

1. Визначити залишковий технічний ресурс головних контактів комутаційного апарата. Він повинен бути достатнім для відключення максимальних струмів короткого замикання в лінії, що відходить.

2. Визначити технічний стан привода комутаційного апарата, який має бути достатнім для проведення комутації. Технічний ресурс привода вимикача повинен забезпечувати закінчення розпочатої комутації.

3. Контролювати технічний стан ізоляційної системи комутаційного апарата. В процесі перебування вимикача під напругою його ізоляція має відповідати усім необхідним вимогам безпеки.

Як показує досвід, не існує єдиних підходів до визначення технічного стану того чи іншого виду електрообладнання. Відомо, що в багатьох випадках для якісного діагностування електрообладнання необхідно виводити його з роботи [11]. Але такий підхід не завжди є ефективним та

призводить до певних збитків, а тому виникає необхідність виконувати діагностування технічного стану обладнання в процесі його роботи.

В нормативних документах [12], [13] прописано параметри, які повинні контролюватися для відповідності заводським нормам при випробуванні комутаційних апаратів.

Існує два напрямки розробки пристроїв діагностування комутаційного обладнання [14]-[18]:

- універсальні пристрої, призначені для контролю усіх типів вимикачів;
- спеціалізовані пристрої, орієнтовані на контроль одного або двох типів вимикачів.

Спеціалізовані пристрої в 1,5 - 2 рази дешевші універсальних, мають менше режимів роботи і управління та простіші в обслуговуванні. Такі прилади підійдуть для підприємств, на яких є тільки один вид вимикачів. Якщо ж є декілька видів вимикачів, то універсальний пристрій діагностування буде доцільнішим [19].

Застосування універсальних пристроїв діагностування скорочує час проведення комплексного обстеження при значному підвищенні його якості, дозволяє виявляти приховані дефекти. Такі прилади визначають несправності на ранній стадії їх розвитку на основі реєстрації процесу переміщення одного з елементів механізму (рухливого контакту, траверси, вала привода) при пусках вимикача й зіставленні отриманого графіка із графіком повністю справного вимикача або із графіком, знятим з цього ж вимикача при останньому його обстеженні. При автоматичних вимірюваннях швидкісних характеристик за допомогою датчиків переміщення з високою роздільною здатністю можна одержати графіки залежності: швидкості від часу, швидкості від ходу вала вимикача, ходу вала вимикача від часу. Вони відображають процеси руху траверси й рухомих контактів, взаємодію їх з направленими механізмами, рухомими контактами й буферами [20].

В залежності від типу комутаційного апарату та кількості вимірювальних параметрів існує багато пристроїв діагностування [22].

Порівняльний аналіз пристроїв контролю вимикачів, наведений в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця пристроїв діагностування

Тип пристрою	Тип вимикачів				Кількість дискретних каналів	Вимірювальні канали струму	Сенсори лінійні (Л), Кутові (К)	Енергонезалежна пам'ять	Пристрій введення/виведення інформації
	Вакуумні	Елегазові	Масляні	Повітряні					
ПКВ/УЗ	+	+	+	+	20	+	+	+	+
ПКВ/М6	+	+	+	-	3	-	+	-	-
ПКВ/М7	+	+	+	-	4	+	+	+	-
ПОЛИКОМ	+	+	+	+	18	+	Л	+	+
Рекон	+	+	+	+	16	+	-	+	-
ТМ-1800	+	+	+	+	16	+	+	+	-
СОВА-2	+	+	+	+	16	+	Л	+	+
РК-АЦП-03М	+	+	+	+	18	+	+	+	+
МАРС-1	-	-	+	-	3	-	-	+	-
НИКТА	+	+	+	+	14	+	-	+	+

Пристрої ПКВ/УЗ, РК-АЦП, Поліком, СОВА-2 мають у своєму складі ноутбук, а самі системи виконані у вигляді двох блоків. Інші прилади із табл. 1.1 використовують вбудований мікропроцесор. Наявність ноутбука надає більш широкі можливості опрацювання вимірних параметрів і можливість використання більш складних алгоритмів діагностики, які не мають необхідних потужностей для реалізації на звичайному процесорі [22].

Одним із поширених засобів діагностування є пристрій [23] ПКВ/М7, призначений для контролю технічного стану вимикачів. Схема підключення пристрою наведена на рис. 1.1:

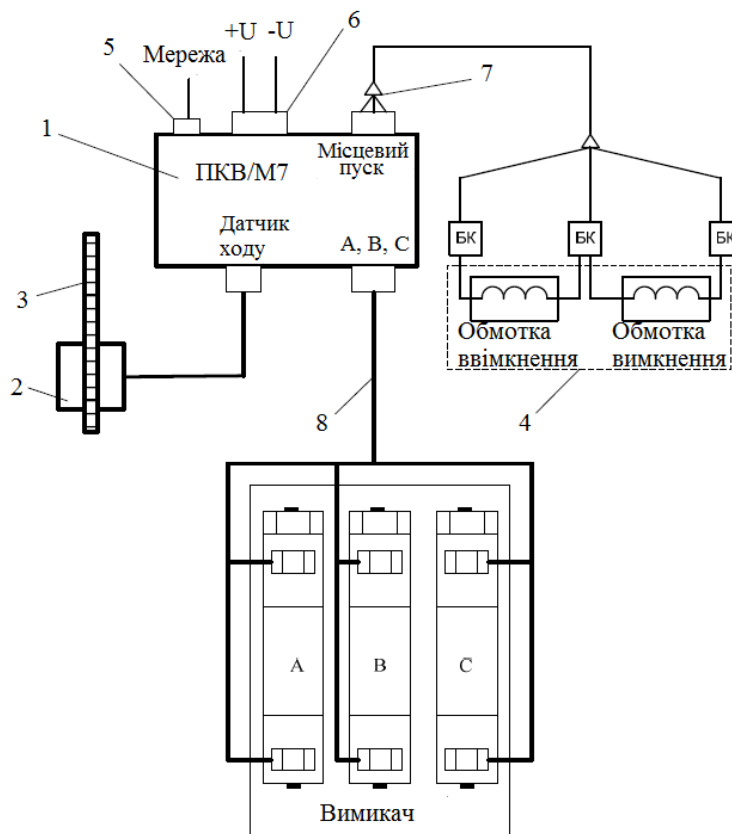


Рисунок 1.1 – Схема підключення пристрою ПКВ/М7 для діагностування технічного стану вимикачів

На рис. 1.1: 1 – вимірювальний блок ПКВ/М7; 2 – датчик переміщення лінійний (кутовий); 3 – вимірювальний стержень; 4 – привод вимикача; 5 – мережевий кабель; 6 – кабель живлення комутатора; 7 – кабель місцевого пуску; 8 – кабель полюсів.

Прилад забезпечує контроль параметрів часу, ходу і швидкості рухомих частин масляних, вакуумних, елегазових і електромагнітних вимикачів радянського, українського та зарубіжного виробництва, а також контроль часових характеристик роз'єднувачів і короткозамикачів.

У роботах [24], [25] представлено системи моніторингу, оперативного контролю технічного стану для різних типів вимикачів в КРП (комплектний розподільчий пристрій) та інтеграції системи діагностування

вимикачів у інформаційну мережу моніторингу роботи електричних мереж. Інформаційно-діагностичні комплекси призначені для визначення місць пошкодження при коротких замиканнях на лініях електропередачі, визначення залишкового ресурсу вимикачів, побудови добових відомостей режимів, а також передачі зареєстрованої та обробленої інформації на будь-які вищі рівні управління [26], [27].

У роботах [28]-[31] автори пропонують комбінований метод діагностування шляхом подання тестового сигналу в коло з контактами вимикача при виконанні операцій ввімкнення та вимкнення, з подальшим визначенням швидкісної характеристики в умовах резонансу напруг і порівняння отриманої характеристики із еталонною.

Для реалізації комбінованого методу діагностування розроблено структурну схему діагностичного комплексу [32] (рис. 1.2).

На рис. 1.2: 1 – вимикач; 2 – комутатор; 3 – пристрій контролю технічного стану вимикачів, де С – сенсор, ДТС – джерело тестового сигналу, ПК – пристрій контролю.

Запропонована математична модель [33] комбінованого методу діагностування при зміні струму тестового сигналу враховує параметри дугогасного середовища та опір ізоляції апаратних ввідів відносно заземлених частин вимикача.

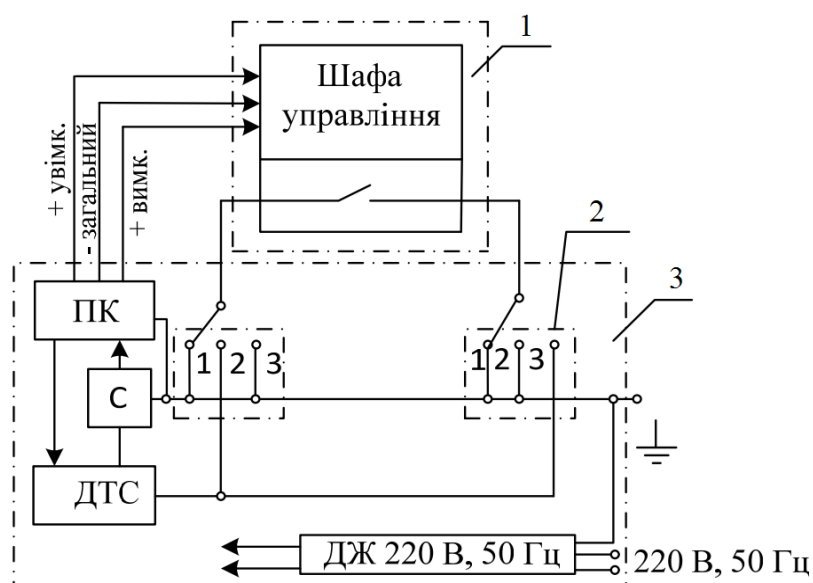


Рисунок 1.2 – Структурна схема діагностування

В роботі [34] зазначено, що конструктивні особливості комутаційних апаратів дозволяють здійснювати технічну діагностику засобами інфрачервоної техніки таких частин: роз'ємних і нероз'ємних контактних з'єднань, високовольтних вводів, елементів конструкції із склопластику, опорних ізоляторів, струмопровідних частин. Такий підхід дозволяє ідентифікувати погані контактні з'єднання, дефекти зварювання тощо.

Автори у роботі [35] описали роль автоматизації в процесі діагностування технічного стану електрообладнання за тепловим портретом та алгоритм прийняття рішення про результат тепловізійного обстеження.

Застосування тепловізійної діагностики засноване на тому, що наявність деяких видів дефектів комутаційного устаткування викликає зміну температури дефектних елементів і, як наслідок, зміну інтенсивності інфрачервоного випромінювання, яке може бути зареєстроване тепловізійними приладами [36]-[38]. Основними перевагами застосування тепловізійної діагностики є безпека персоналу при проведенні обстеження обладнання, відсутність необхідності відключення досліджуваного обладнання, можливість визначення дефектів на ранніх стадіях розвитку, діагностика великої кількості типів підстанційного електрообладнання [39], [40].

У роботах [41], [42] представлено приклади промислового застосування тепловізійної техніки у задачах діагностування комутаційних апаратів. Показано, що тепловізійні сенсори можуть об'єднувати у матричні панелі для діагностування групи комутаційних апаратів [43].

Перспективним є використання вібродіагностики для контролю технічного стану комутаційного обладнання. Вібродіагностика забезпечує контроль стану найбільш вразливих і, як правило, найбільш дорогих елементів високовольтного обладнання [44], [45]. Важливою інформацією про стан вимикача є гучний шум і вібрація під час його роботи. Вібраційні та акустичні сигнали, згенеровані вимикачем впродовж операцій замикання/розмикання контактів у певній точці їхнього ходу, можуть вказати на зношення дугогасильних контактів, незадовільне демпфірування, послаблення механічних кріплень основних болтів та

розпірок, брак у змащуванні засувки, механічні залипання з'єднувальних елементів, зношення електромагніту.

Технічним забезпеченням вібраційної діагностики є високоточні засоби вимірювання вібрації та цифрової обробки сигналів, можливості яких безперервно ростуть, а вартість знижується [46].

1.2 Аналіз засобів діагностування приводів вимикачів

Комутаційні апарати оснащуються приводами, які можуть мати різну конструкцію. Від технічного стану привода залежить надійність роботи усього комутаційного апарата, його технічна можливість здійснити замикання/розмикання головних і допоміжних контактів із заданими швидкісними і динамічними параметрами [47], [48].

Привод вимикача – досить складна механічна конструкція, що складається з багатьох окремих елементів. Тому найбільш інформативною є комплексна, функціональна оцінка технічного стану механічної системи.

Найбільш поширеними методами комплексної оцінки технічного стану привода (комутаційного апарата) є [49]:

Контроль швидкісних і часових параметрів роботи привода вимикача. Для цього на доступному елементі привода встановлюється кутовий або лінійний датчик швидкості (в залежності від типу привода), що дозволяє оцінювати динамічні параметри роботи привода вимикача.

Контроль вібраційних процесів, які супроводжують роботу привода. На конструкційному елементі привода вимикача встановлюється, як мінімум, один датчик вібрації. За допомогою аналізу форми зареєстрованих вібраційних сигналів, що супроводжують кожну комутацію, визначаються динамічні процеси роботи. Аналіз спектрального складу сигналів дозволяє оцінювати технічні параметри стану усіх конструкційних елементів вимикача.

Контроль кривої струму управління комутаційним апаратом. Форма кривої струму характеризує роботу привода вимикача в цілому. На кривій зміни струму управління визначаються характерні точки, що показують моменти зміни стану привода. Ці точки і екстремуми дозволяють визначати тимчасові і швидкісні параметри роботи привода вимикача.

Існуючий пристрій РИП-2 призначений для перевірки роботи електромагнітних приводів вимикачів [50]. Функціональна схема пристрою РИП – 2 представлена на рис. 1.3.

Застосування пристрою РИП-2 дозволяє проводити перевірку мінімальної напруги спрацьовування вимикачів згідно з нормами заводів-виробників комутаційного обладнання. Аналогом такого пристрою є тестер В10Е виробника Megger, що забезпечує подачу різних рівнів постійної напруги на обмотки електромагнітного привода вимикача [51].

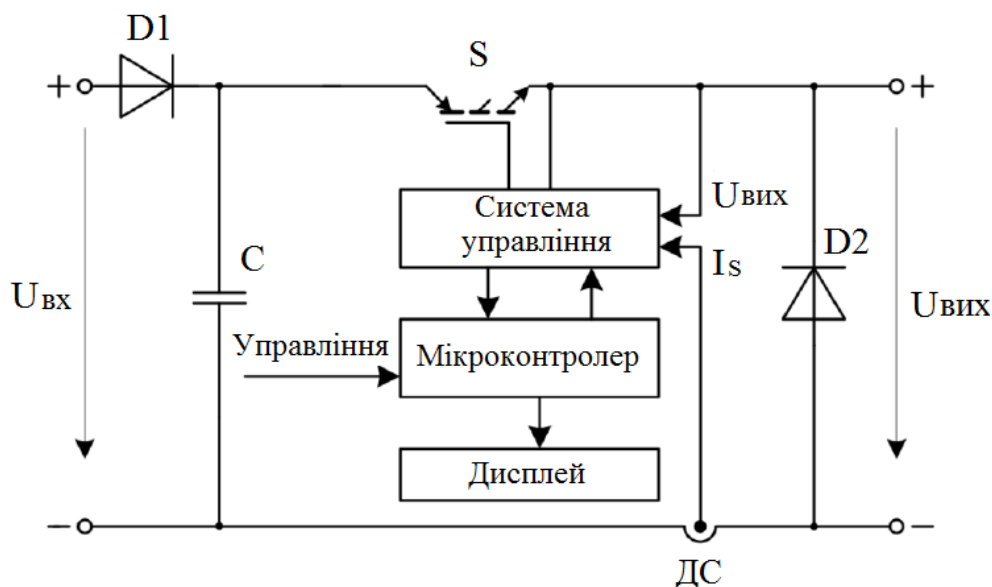


Рисунок 1.3 – Функціональна схема пристрою контролю роботи привода вимикача

Для реалізації задач діагностування електромагнітного привода вимикачів проведено багато досліджень на основі аналізу вебер-амперних характеристик. У роботах [52]–[56] представлений ряд доказів, що підтверджують вплив дефектів, які виникають в електромагнітному приводі, на форму кривої вебер-амперної характеристики електромагніту. На форму кривої вебер-амперної характеристики впливає: поява міжвиткових замикань в обмотці, що приводить до зниження її електричного опору і ефективного числа витків; зміна геометричних параметрів феромагнітних елементів електромагніта, що приводить до збільшення немагнітного зазору; забруднення дотичних робочих

поверхонь, що підвищує коефіцієнт тертя і перешкоджає роботі привода при заданих параметрах електричних сигналів.

Відомий спосіб вимірювання магнітних характеристик без вимірювальної обмотки [57], [58]. Робоча обмотка підключається до джерела живлення і визначається сигнал струму в ній через напругу та опір в намагнічуючому колі.

Напруга на виході джерела живлення u_r визначається виразом:

$$u_r = i \cdot R_n + k \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.1)$$

де i – струм, що протікає через робочу обмотку;

R_n – активна складова опору намагнічувального кола;

$d\Phi$ – зміна магнітного потоку в часі;

k – коефіцієнт, який визначається кількістю витків робочої обмотки, довжиною середньої лінії випробуваного зразка і його площею поперечного перерізу;

t – час.

Відповідно до рівняння (1.1) формула для розрахунку магнітного потоку буде мати вигляд:

$$\Phi = \frac{1}{k} \int (u_r - i \cdot R_n) dt. \quad (1.2)$$

Активну складову R_n намагнічуючого кола, що включає активну частину опору робочої обмотки, опору для вимірювання струму і вихідного опору джерела живлення, попередньо визначають і потім застосовують при обчисленні магнітного потоку. Магнітна індукція в електромагніті визначається пропорційно магнітному потоку Φ , напруженість магнітного поля визначається пропорційно струму в робочій обмотці.

Недоліком даного способу є те, що в процесі вимірювання, внаслідок протікання по намагнічувальній обмотці струму, відбувається її нагрів, а збільшення температури намагнічувальної обмотки викликає збільшення активної складової опору R_n . Тоді вираз (1.2) обчислюється не коректно,

оскільки вносить значну похибку в результат вимірювання, що накопичується в процесі інтегрування. Цей недолік може бути усунутий шляхом врахування зміни активного опору намагнічувальної обмотки [59].

Відома схема мостового «безсенсорного» пристрою для випробування електромагніту, яка наведена на рис. 1.4. [60].

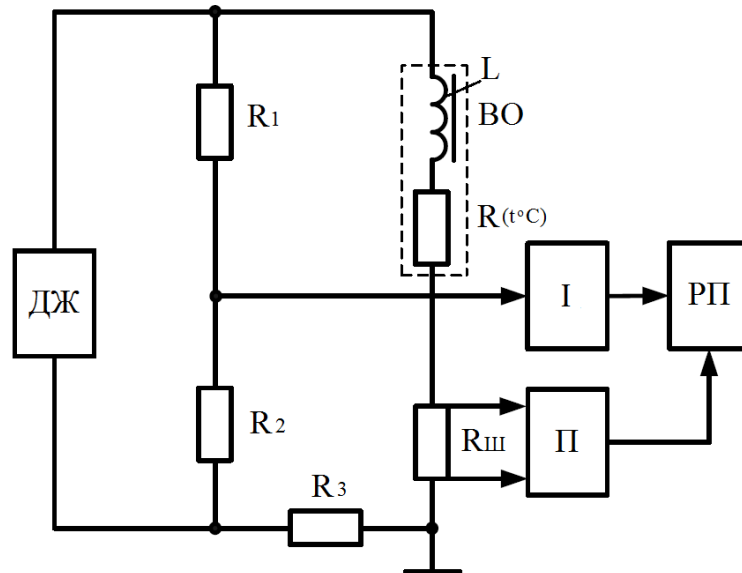


Рисунок 1.4 – Структурна схема «безсенсорного» пристрою випробування електромагніту

На рис. 1.4: ДЖ – джерело живлення; І – інтегратор; П – підсилювач; РП – реєструючий пристрій.

Напруга на виході підсилювача пропорційна струму і напруженості в електромагніті. Інтегратор розраховує потокозчеплення відповідно до виразу (1.2) при $R_1=R_2$, $R_3= R + R_{ш}$.

На основі схеми рис. 1.4 було розроблено АВС MagHyst, яка призначена для визначення квазістатичних характеристик магнітних матеріалів [61], [62]. Функціональна схема АВС MagHyst зображена на рис. 1.5.

На рис. 1.5: БУ – блок управління; КДС – кероване джерело струму; ЗЗ – зворотній зв’язок.

Керуюча напруга $u(t)$ блоку управління надходить в кероване джерело струму, яке змінює струм намагнічування $i_p(t)$. Навантаженням КДС є намагнічувальна обмотка W_p кільцевого типу досліджуваного

електромагніта. Індукована у вимірювальній обмотці W_s , при перемагнічуванні електромагніту, ЕРС $u_s(t)$ інтегрується і визначається потокозчеплення Ψ у вимірювальній обмотці W_s . Для непрямого вимірювання напруженості магнітного поля по струму $i_p(t)$ в електромагніті підключений шунт $R_{ш}$, що включений послідовно із намагнічувальною обмоткою. Первинна (намагнічувальна) і вторинна (вимірювальна) обмотки рівномірно розподілені по електромагніту. Електромагніт має геометричні розміри: площа поперечного перерізу A_{Fe} , довжина середньої лінії L_{Fe} , внутрішній діаметр D_i , зовнішній діаметр D_a , товщина h . Струм первинної обмотки $i_p(t)$ викликає силу, що намагнічує Θ , і магнітний потік Φ в електромагніті.

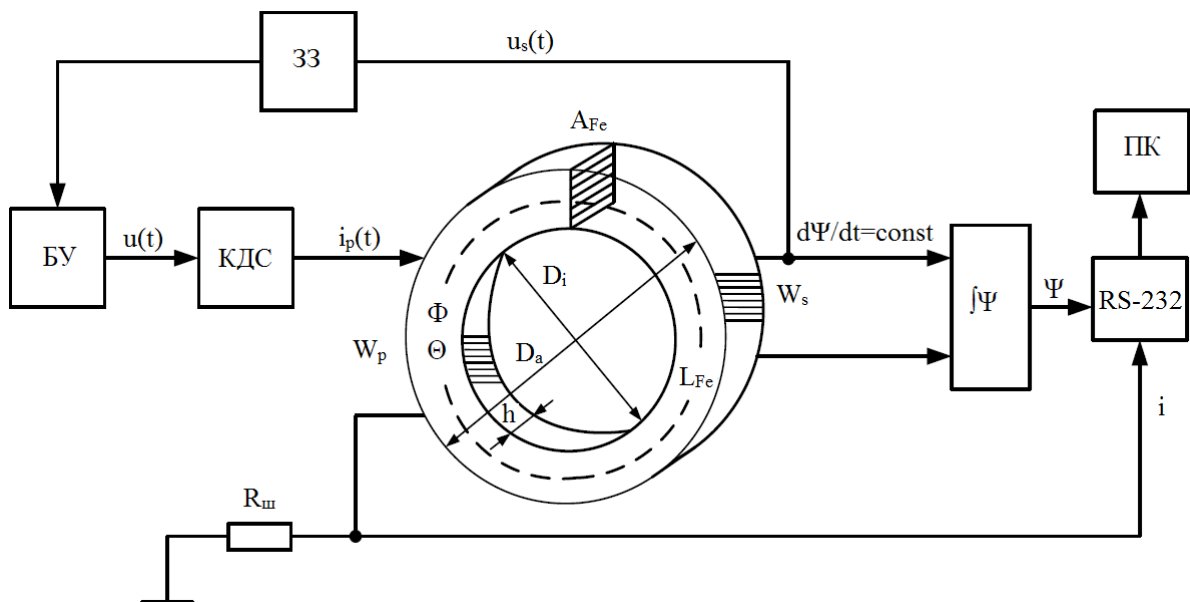


Рисунок 1.5 – Функціональна схема ABC MagHyst

Вимірювальні величини напруг і струмів відображаються на моніторі ПК в процесі дослідження квазістатичних характеристик. По завершенню вимірювання залежності представляються у вигляді $\Psi(I)$, $\Phi(\Theta)$, $B(H)$ і зберігаються в пам'яті ПК.

ABC MagHyst може працювати у «безсенсорному» режимі визначення магнітних характеристик приладів. Для цього використовується робоча обмотка пристрою. На рис. 1.6 зображено пристрій для створення заданого режиму зміни магнітної індукції.

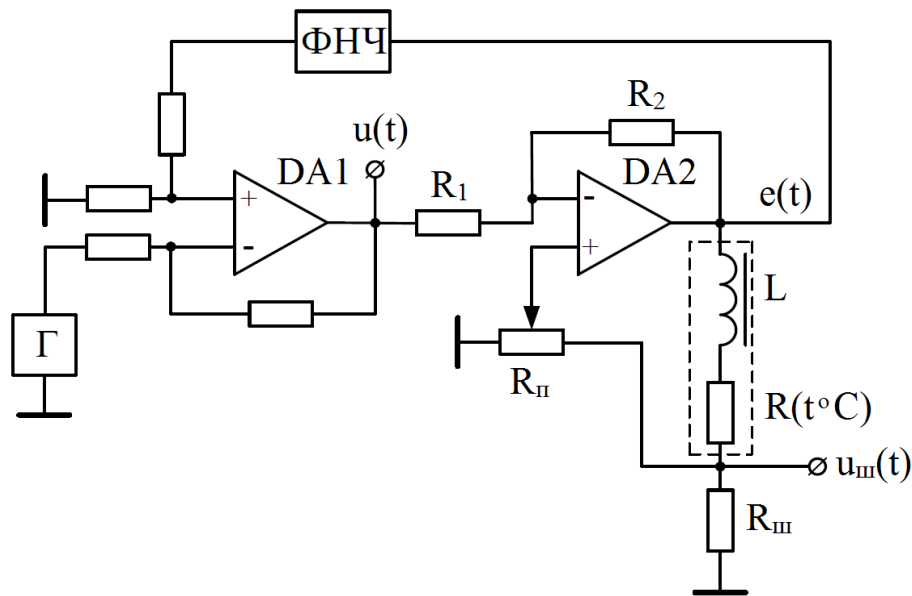


Рисунок 1.6 – Схема пристрою для створення заданого режиму зміни магнітної індукції

Створення необхідного режиму зводиться до підтримки бажаної форми ЕРС індукції $e(t)$. Намагнічувальну обмотку представимо індуктивністю L і резистором $R(t \circ C)$ з опором, рівним активному опору дроту реальної обмотки. При досить великому коефіцієнті підсилення операційного підсилювача DA2 і виконанні умов

$$R_{\text{ш}} \gg R_{\text{ш}} \quad (1.3)$$

та рівності

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R(t \circ C)}{R_{\text{ш}}}} - 1 = \frac{\frac{R_2}{R_1} - \frac{R(t \circ C)}{R_{\text{ш}}}}{1 + \frac{R(t \circ C)}{R_{\text{ш}}}} \quad (1.4)$$

буде справедливе рівняння:

$$e(t) = -\frac{R_2}{R_1} u(t), \quad (1.5)$$

де $R_{\text{ш}}$ – опір шунта для вимірювання намагнічувального струму;

R_3 , R_4 – опір між подільником напруги $R_{\text{ш}}$, його заземленим і незаземленим виводами відповідно.

Отже, магнітна індукція $B(t)$ у випробуваному зразку із поперечним перерізом S при кількості витків намагнічувальної обмотки N буде змінюватися у часі:

$$B(t) = \frac{1}{NS} \cdot \frac{R_2}{R_1} \int u(t) dt. \quad (1.6)$$

Наявність гармонік мережі у вихідній напрузі генератора (Γ) підтверджує вирази (1.5) і (1.6) за допомогою зворотного зв'язку на низьких частотах, що замикається через фільтр низької частоти (ФНЧ). У цьому випадку на виході операційного підсилювача DA1 напруга $u(t)$ являє собою протифазний сигнал генератора, вільний від низькочастотних складових.

Необхідне для виконання умови (1.4) положення подільника напруги встановлюється за нульовою напругою на виході операційного підсилювача DA2 при обмеженні на час цієї операції його вихідного струму і закороченні виходу генератора.

Запропонована система використовується на етапі виготовлення та перевірки якості електричних апаратів і не може бути використана в задачах діагностування поточного технічного стану електромагніту вакуумного вимикача.

У роботах [63], [64] авторами був запропонований метод вимірювання вебер-амперних характеристик, але він використовується для електромагнітів змінного струму, що не дозволяє його застосувати для отримання вебер-амперних характеристик електромагнітного привода постійного струму.

У роботах [65], [66] автори досліджують ступінь впливу вихрових струмів у сердечнику електромагнітного привода вакуумного вимикача на його динамічні характеристики. В залежності від конструктивного виконання і типу матеріалів змінюються динамічні характеристики електромагнітного привода вакуумного вимикача.

Авторами у роботах [67]-[71] приведені результати розрахунку статичних тягових характеристик електромагнітних систем. Отримані залежності розподілу магнітного потоку у перехідних режимах,

проаналізовано вплив додаткового опору на швидкодію електромагнітів постійного струму із магнітною заціпкою.

1.3 Аналіз засобів діагностування контактної системи вимикачів

Оскільки головні контакти вимикача під час роботи завжди знаходяться під робочою напругою, то визначення комутаційного ресурсу, в режимі моніторингу, може, як правило, виконуватись тільки непрямими засобами. Таких методів в практиці існує не так багато і ефективність роботи кожного з них, при індивідуальному використанні в системі моніторингу, зазвичай буває недостатньою для прийняття правильного діагностичного висновку [72], [73].

Існують такі методи діагностування технічного стану контактів вимикачів [74] - [78]:

Класичний метод контролю комутаційного ресурсу, заснований на вимірюванні величини відключеної фази потужності короткого замикання з підсумовуванням всіх критичних комутацій. Недоліком цього методу є відсутність врахування реального технічного стану контактів.

Непрямий контроль стану головних контактів по величині струму, що протікає через вимикач, час і тип замикання і розмикання головних контактів, порівняння роботи окремих фаз між собою. При цьому аналізуються криві наростання і спадання струмів через контакти за допомогою швидкодіючих АЦП, які пов'язані з фактичним станом поверхні головних контактів.

1. Непрямий контроль стану головних контактів, який визначається за видом і тривалістю горіння дуги при відключенні. Тривалість горіння може бути визначена на підставі аналізу спеціалізованих сигналів від первинних датчиків. В якості ефективних джерел інформації про інтенсивність і тривалість горіння дуги всередині вимикача можуть бути: вібро сигнали від датчиків, змонтованих на поверхні корпусу вимикача; сигнали із датчиків часткових розрядів, імпульсних струмів і перенапруг, установлених в колах заземлення вимикача; сигнали електромагнітного випромінювання від дуги на контактах, зареєстровані за допомогою спеціалізованих антен.

У роботі [79] розроблена модель розрахунку граничного струму зварювання контактів вакуумного вимикача. Дана модель зручна для аналізу теплових процесів та розрахунку граничного струму зварювання, але не може бути застосована у задачах діагностування ступеню зносу контактної системи. Запропонований спосіб випробування вакуумних вимикачів на стійкість при струмах короткого замикання, що опублікований у роботі [80], дозволяє підвищувати надійність роботи вакуумного вимикача. Даний спосіб складний для реалізації і має низьку точність вимірювання. Автори у роботі [81] описують вплив зміщення розташування елементів контактної пари на комутацію вакуумного вимикача. У роботі [82] запропоновано використовувати силу утримання привода, як критерій оцінки основних характеристик вакуумних вимикачів. Даний спосіб не може бути застосований для електромагнітного привода вакуумних вимикачів із магнітною заціпкою, оскільки привод утримується у крайніх положеннях магнітною заціпкою із фіксованою силою утримання. Автори у роботах [83], [84] пропонують здійснювати аналіз механічних процесів у вакуумних вимикачах із врахуванням електродинамічної сили, але лише для процесу ввімкнення вакуумного вимикача. У роботі [85] представлено розрахунок динамічних характеристик вимикача із врахуванням електродинамічних сил відкиду силових контактів. Автор у роботі [86] детально описує дуговий процес, який протікає при комутації вакуумного вимикача, але не оцінює його вплив на подальшу експлуатацію контактної пари. У роботі [87] представлено методи обчислення напруги відновлення перехідних процесів при комутаціях вакуумних вимикачів, але не враховано первинні дугові процеси, які мають більший вплив на роботу контактної системи.

Розроблений пристрій контролю характеристик високовольтних вимикачів дозволяє визначати часові параметри, швидкісні і ходові характеристики, наявність або відсутність «брязкоту» контактів в контактній системі вимикача, як для режиму ввімкнення так і для режиму вимкнення комутаційного пристрою [88], [89]. На рис. 1.7 наведена спрощена схема пристрою контролю характеристик вимикача.

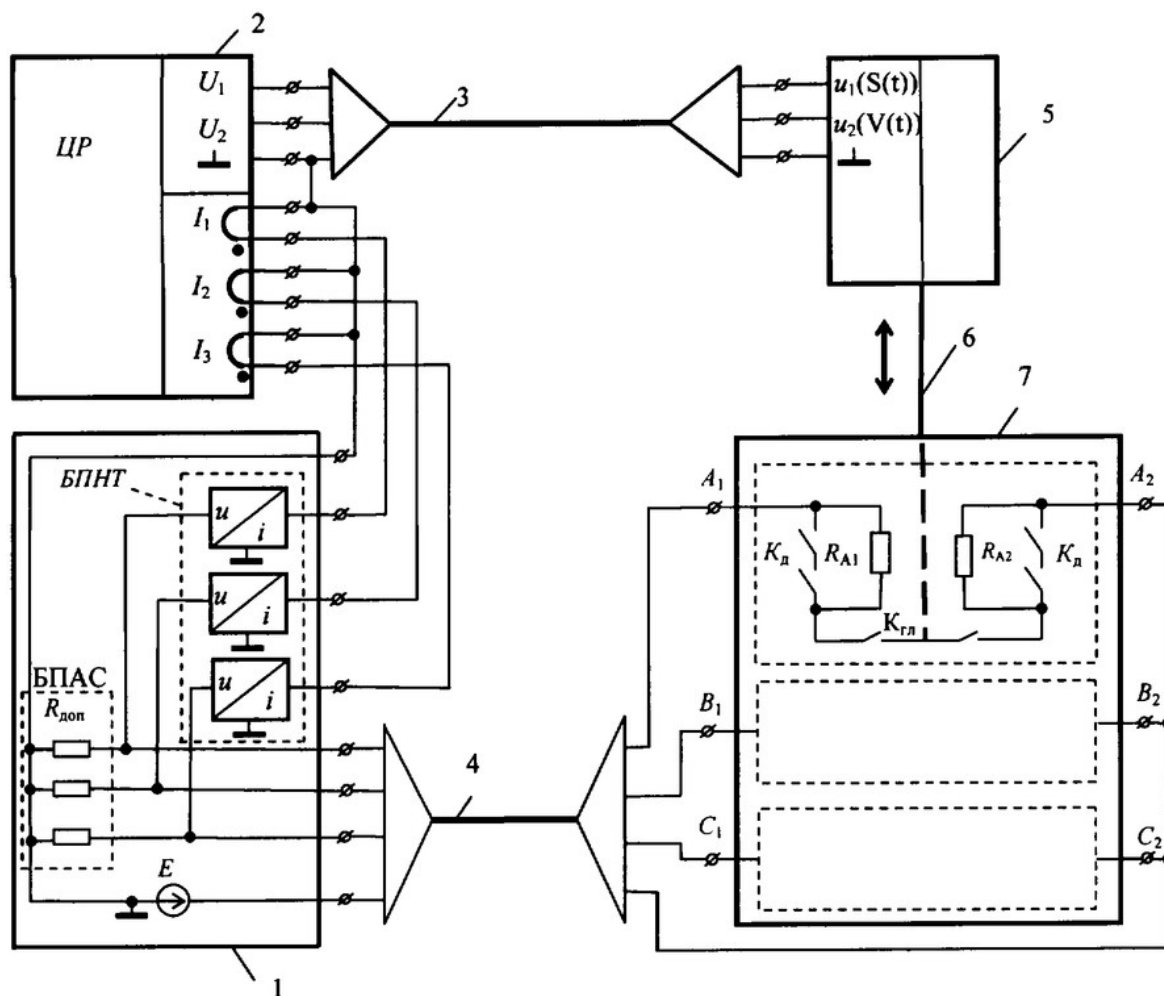


Рисунок 1.7 – Схема пристрою прискореного контролю характеристик високовольтних вимикачів

На рис. 1.7: 1 – джерело постійної напруги; 2 – цифровий реєстратор; 3 – трьохпровідний кабель; 4 – чотирьохпровідний кабель; 5 – блок з двома вихідними каналами швидкості і переміщення із нульовим спільним виводом; 6 – зовнішній рухомий стержень; 7 – високовольтний вимикач.

Запропонований пристрій здійснює контроль характеристик високовольтних вимикачів з шунтуючими опорами з метою вимірювання швидкості руху і ходу рухомих частин вимикача. Визначення неодночасності замикання рухомих контактів з нерухомими контактами в кожній з фаз здійснюється шляхом одночасної цифрової реєстрації сигналів в контактній системі всіх фаз вимикача і синхронно з ними сигналів, пропорційних швидкості руху, а також величині ходу рухомих

частин поетапно на всіх полюсах вимикача в режимі його ввімкнення і вимкнення з подальшим автоматичним аналізом осцилограм.

Спочатку проводиться одночасна реєстрація трьох струмів в контактній системі трьох фаз вимикача та швидкості руху полюсів, а також хід рухомих частин вимикача в режимі його ввімкнення і вимкнення. Потім проводиться аналіз отриманих осцилограм шляхом автоматичної їх розбивки на чотири інтервали як при ввімкненні, так і при вимкненні вимикача. Даний пристрій призначений для контролю роботи лише масляних вимикачів.

Особливу увагу приділено дослідженню залишкового ресурсу вимикачів. Визначення залишкового ресурсу вимикачів у процесі їхньої експлуатації є важливою науково-технічною задачею [90], [91]. Зазвичай заводи-виробники надають комутаційний ресурс у вигляді ресурсної характеристики, а саме декількома числами, що являють собою граничну кількість можливих циклів (операцій) відключення вимикачем різних за значенням струмів [92].

В роботі [93] автори пропонують математичну модель високовольтного вимикача, яка придатна для розв'язання задачі технічної діагностики:

$$R = n_n - \sum_{i=1}^X k_i \cdot m_i, \quad (1.7)$$

де n_n – кількість комутацій, яку може здійснити вимикач;

X – загальна невідома кількість комутацій, яку може виконати вимикач до повного спрацювання робочого ресурсу;

m_i – кількість комутацій i -го значення комутуваного струму;

k_i – ваговий коефіцієнт.

Математична модель побудована на основі гіперболічної нормалізації відомих значень ресурсної характеристики високовольтного вимикача при застосуванні методу найменших квадратів у поєднанні з зовнішнім критерієм О. Г. Івахненка.

На рис. 1.8 зображено структуру базового блоку системи діагностування вимикачів.

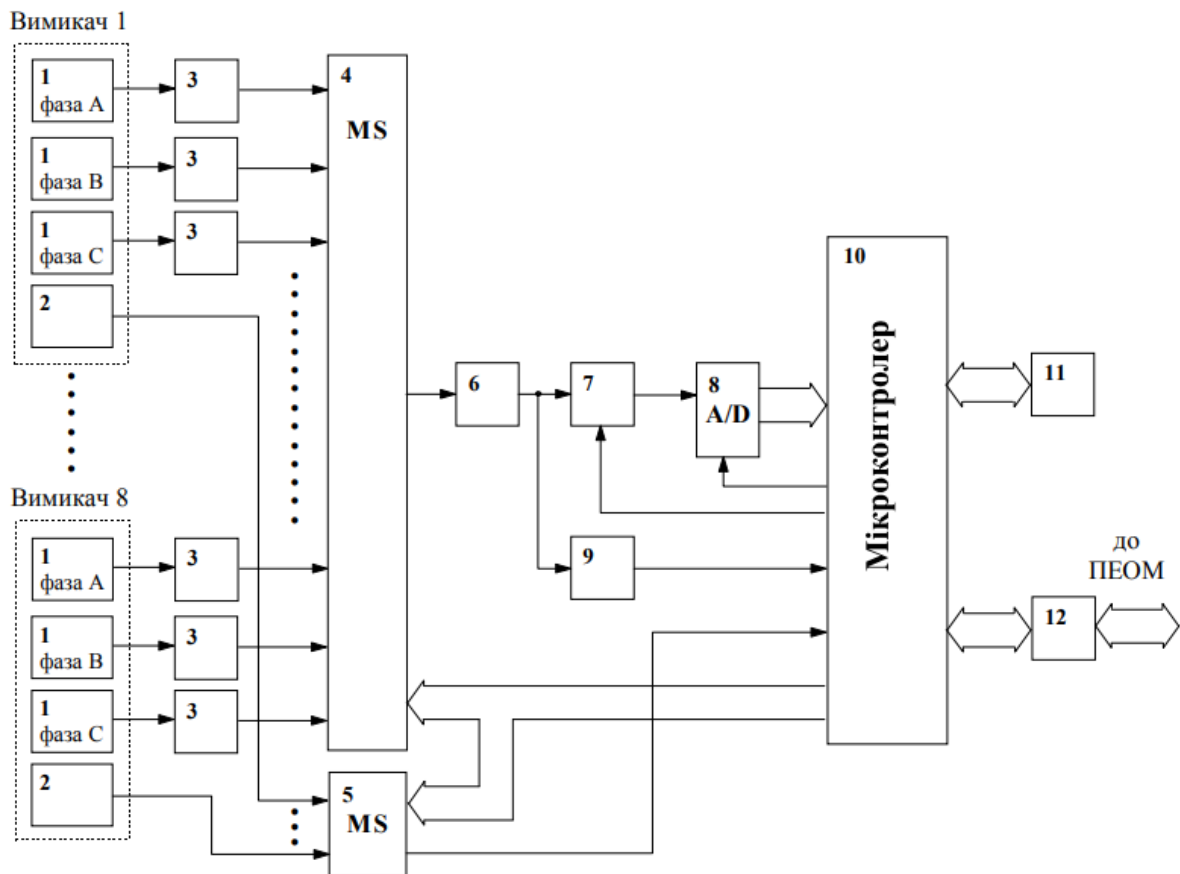


Рисунок 1.8 – Структурна схема базового блоку системи діагностування вимикачів

На рис. 1.8: 1 – датчик струму; 2 – датчик комутації; 3 – нормуючий перетворювач; 4 – аналоговий комутатор; 5 – комутатор; 6 – підсилювач; 7 – пристрій вибірки-зберігання; 8 – АЦП; 9 – компаратор нуля; 10 – мікроконтролер; 11 – блок індикації і клавіатури; 12 – блок інтерфейсу.

Запропонований пристрій призначений для діагностування всіх високовольтних вимикачів, встановлених на підстанції незалежно від їх кількості [94], [95].

Автори у роботах [96]-[98] розробили пристрої в яких обчислюються нерівномірно відпрацьовані ресурси вимикачів в момент комутації. Пристрої контролюють комутаційний ресурс вимикачів із врахуванням їхнього часу ввімкнення та вимкнення. Проте запропоновані рішення не дозволяють охопити весь спектр комутаційних апаратів та підходів до визначення залишкового комутаційного ресурсу. В даному випадку

розглядаються комутаційні апарати, що знаходяться в експлуатації під робочою напругою. Проблема ускладнюється ще й тим, що обмеженість інформації щодо співвідношень між кількістю комутацій та значеннями комутуваного струму не дозволяє приймати однозначне рішення по оцінці залишкового комутаційного ресурсу високовольтного вимикача.

Дані, отримані в результаті вимірювання і обробки кривої руху основних контактів в поєднанні з іншими параметрами, дають інформацію про механічне навантаження (удар) на амортизатор (буфер), стабільність руху контактів та комутаційну спроможність вимикача. На технічний стан вимикача і його здатність до подальших дій вказують також електричний опір основного шляху струму, максимальний хід і максимальна швидкість рухомого контакту, час переривання головних (дугових) контактів (від подачі команди до з'єднання), час електричного розриву контактів [99]-[101].

Ерозія контактів, що супроводжується втратою їхньої маси і зміною форми, може бути причиною раннього виникнення дуги, збільшення часу її горіння та розмивання сопла, впливаючи таким чином на продуктивність вимикача [102], [103].

1.4 Узагальнення результатів аналізу і постановка задачі дослідження

Виходячи з системного підходу, для розв'язання задачі створення високоефективних систем діагностування технічного стану вакуумних вимикачів слід провести дослідження та розробки в такій послідовності:

- на основі аналізу методів діагностування технічного стану вакуумних вимикачів та їх складових розробити математичні моделі діагностування електромагнітного привода та контактної системи, застосування яких дасть можливість підвищити надійність роботи вакуумного комутаційного апарата порівняно з відомими методами;

- синтезувати за розробленими математичними моделями структурні схеми пристроїв діагностування електромагнітного привода та контактної системи;

– шляхом комп'ютерного моделювання визначити параметри розробленої системи діагностування електромагнітного привода, контактної системи та дослідити її роботу;

– розробити алгоритми та структури мікропроцесорних засобів для діагностування електромагнітного привода та контактної системи вакуумного вимикача.

Розробки та пояснення щодо виконання поставлених завдань викладені в наступних розділах монографії.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ

2.1 Математична модель діагностування технічного стану електромагнітного привода на основі аналізу вебер-амперних характеристик

Привод відіграє важливу роль у роботі вакуумного вимикача. Вихід з ладу привода спричиняє відмову роботи вакуумного вимикача, що призводить до повного припинення подачі електроенергії населенню, припинення роботи промислових і сільськогосподарських підприємств, транспорту та інше. Більша частина вакуумних вимикачів має електромагнітний привод постійного струму, оскільки він є найбільш економічним і надійним у експлуатації. Електромагнітний привод здійснює ввімкнення та вимкнення вимикача, фіксує вимикач у крайніх положеннях.

Вебер-амперна характеристика дозволяє описати роботу електромагнітного привода вакуумного вимикача (рисунок 2.1) [104].

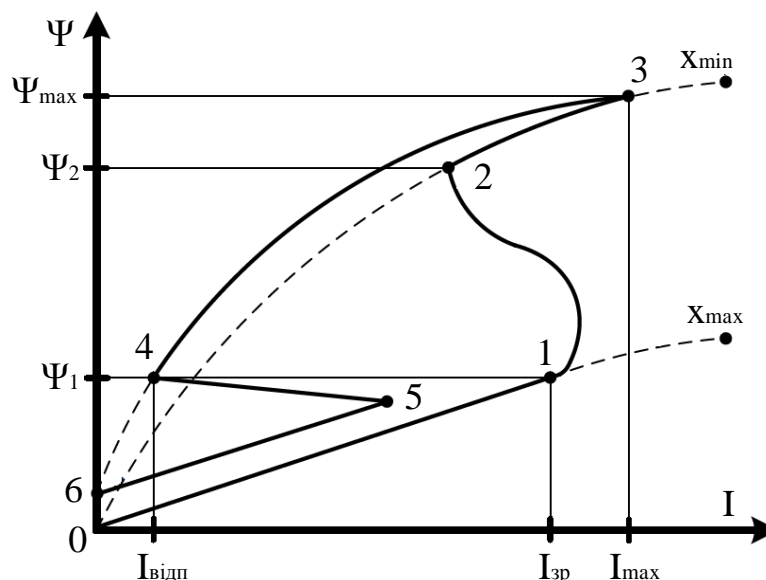


Рисунок 2.1 – Вебер-амперна характеристика робочого циклу електромагніту

Після подачі живлення на електромагніт, струм в обмотці досягає значення струму зрушення (точка 1). В даний момент часу якір електромагніту розпочинає рух, в результаті робочий зазор x зменшується, індуктивність обмотки зростає, а струм в ній спадає до тих пір, поки якір не досягне упору, що відповідає точці 2. Під час руху якоря взаємозв'язок між потокозчепленням Ψ і струмом I визначається кривою 1–2. Після закінчення руху якоря електромагніту струм знову розпочинає зростати і досягає усталеного значення у точці 3. В момент відключення живлення електромагніту струм в обмотці спадає і при досягненні значення струму відпускання $I_{\text{відп}}$ (точка 4) якір розпочинає рух, а робочий зазор збільшується від мінімального x_{min} до максимального x_{max} . Точка 5 відповідає закінченню руху штока електромагніту. Далі струм спадає до нуля, що відповідає точці 6. Через залишкову намагніченість магнітопроводу потокозчеплення у точці 6 більше нуля.

Відомо, що рівняння електричного кола обмотки електромагніту має вигляд [105]:

$$u = i \cdot R_a + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (2.1)$$

де u – напруга живлення обмотки електромагніту;

i – миттєве значення струму в обмотці електромагніту;

R_a – активний опір обмотки;

Ψ – миттєве значення потокозчеплення обмотки;

t – час.

Рівняння (2.1) описує енергетичне перетворення в електромагнітному пристрої, коли електрична енергія, яка надходить від джерела живлення, перетворюється в енергію магнітного поля.

Із рівняння (2.1) можна отримати магнітну характеристику електромагнітного привода:

$$\Psi = (u(t) - i(t) \cdot R_a) dt. \quad (2.2)$$

У загальному випадку рівняння (2.2) враховує вплив вихрових струмів, що виникають під час перехідних процесів у магнітопроводі, суцільних

конструктивних деталях і обмотках, зчеплених з магнітним потоком. Крива намагнічування магнітопроводу і її зміна при переміщенні якоря визначає ступінь перетворення магнітної енергії в механічну і обумовлює величину діючої в певний момент електромагнітної сили.

Для розрахунку вебер-амперної характеристики необхідно здійснити вимірювання активної складової опору обмотки R_a , напруги живлення обмотки та струму, який протікає через даний електромагніт під час комутації. На основі отриманих даних розраховуються значення вебер-амперної характеристики на кожному кроці вимірювання.

Для отримання магнітної характеристики розраховуємо диференціали потокозчеплення:

$$d\Psi_i = (U_i - I_i \cdot R_a) \cdot (t_i - t_{i-1}), \quad (2.3)$$

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:

$$\Psi_i = \Psi_{i-1} + d\Psi_i. \quad (2.4)$$

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 потокозчеплення та струму обмотки можна отримати залежність $\Psi_i = f(I_i)$, в кожній точці i -ого вимірювання.

Для діагностування технічного стану електромагнітного привода необхідно отримати від заводу-виробника вимикачів осцилограми вимірювань електричних величин справного електромагніту вимикача для розрахунку його вебер-амперної характеристики. Отримана характеристика $\Psi_{ет} = f(I_{ет})$ вважається еталонною, яка порівнюється із вимірними магнітними характеристиками $\Psi_b = f(I_b)$ в процесі подальшої

експлуатації вимикача. Еталонною може бути характеристика, отримана за результатами вимірювання і розрахунку після введення нового вимикача в експлуатацію або після його капітального ремонту [106].

Для визначення поточного технічного стану електромагніту необхідно мати набір значень еталонної вебер-амперної характеристики $\Psi_{i.ет} = f(I_{i.ет})$ та поточної вебер-амперної характеристики $\Psi_{i.в} = f(I_{i.в})$. Кількість розрахованих значень для еталонної і поточної вебер-амперної характеристики мають бути рівними ($i.ет = i.в$).

Відносний квадрат відхилення між еталонними та поточними значеннями на кожному кроці вимірювання:

$$\delta\Psi_i^2 = \left(\frac{(\Psi_{i.в} - \Psi_{i.ет})}{\Psi_{i.ет}} \right)^2, \quad (2.5)$$

де $\Psi_{i.в}$ – поточне значення потокозчеплення, розраховане на i -ому кроці вимірювання;

$\Psi_{i.ет}$ – еталонне значення потокозчеплення, розраховане на i -ому кроці вимірювання.

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

$$K_B = \sum_{i=1}^N \delta\Psi_i^2. \quad (2.6)$$

Даний коефіцієнт відображає ступінь відхилення, що відповідає відмінності поточної кривої вебер-амперної характеристики електромагніту від її початкової форми.

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

$$\begin{cases} K_B \leq K_{ГР1} \rightarrow \text{справний стан;} \\ K_{ГР1} < K_B \leq K_{ГР2} \rightarrow \text{на межі несправності;} \\ K_B > K_{ГР2} \rightarrow \text{несправність,} \end{cases} \quad (2.7)$$

де $K_{ГР1}$, $K_{ГР2}$ – граничні коефіцієнти, які відповідають технічному стану електромагнітного привода вимикача.

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 станів електромагнітного привода) при ввімкненні/вимкненні вимикача, надаються заводом-виробником вакуумного вимикача. По розрахованих вебер-амперних характеристиках при різному технічному стані розраховують коефіцієнти відхилення від еталонної кривої. Отримані коефіцієнти можуть використовуватися в процесі отримання діагностичного висновку про технічний стан електромагніту вимикача.

Запропонований метод аналізу вебер-амперних характеристик за наведеною математичною моделлю дозволяє визначити технічний стан електромагнітного привода вакуумного вимикача. Зміна форми кривої відображає ступінь зносу, розрегулювання рухомих частин або погіршення провідних властивостей електричних кіл електромагнітного привода.

Реалізація такого методу діагностування можлива за умови наявності розрахованих вебер-амперних характеристик для різних технічних станів електромагнітного привода, які затверджені заводом-виробником комутаційного обладнання.

Викладені матеріали опубліковані в роботі [107].

2.2 Математична модель системи виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача

Під час комутації вимикача відбувається знос силових контактів. Під зносом контактів розуміють руйнування робочих поверхонь силових контактів, що приводить до зміни їх форми, розміру, маси і до зменшення провалу. У більшості випадків електричний знос контактів (електрична ерозія) більший від зносу, який спричинений механічними факторами. Знос відбувається як при розмиканні контактів, так і при їх замиканні [108].

Знос контактів при замиканні викликаний вібрацією контактної системи та дуговою ерозією. Вібрація при замиканні можлива унаслідок удару при втягуванні якоря. При цьому знос може бути більшим, ніж від

удару самих контактів, оскільки вібрація контактів відбувається при набагато більших миттєвих значеннях струму. При замиканні вимикача відстань між контактними поверхнями поступово зменшується. При деякій відстані між ними відбувається пробій, виникає дуга, яка гасне при замиканні контактів. Знос від цього явища слід враховувати в апаратах на середню та високу напругу.

При розмиканні сила, що стискає контакти, знижується до нуля, різко зростають перехідний опір контакту і щільність струму в місці контакту. В місці контакту збільшується температура і між розмикаючими контактами утворюється контактний перешийок із розплавленого металу, який в подальшому розривається. При цьому в проміжку між контактами можуть виникнути різні форми електричного розряду. При струмі і напрузі, більших від мінімально необхідних, виникає дуговий розряд. Якщо струм менший мінімально необхідного, а напруга вище напруги запалювання дуги, то виникає іскровий розряд. Вплив електричної дуги в процесі відключення контактів призводить до ерозійного руйнування контактів. Ступінь руйнування контактів залежить від багатьох факторів – струму відключення, часу горіння дуги, властивостей контактного матеріалу [109].

Для надійної експлуатації вимикача важливою є робота контактної системи при короткому замиканні. При коротких замиканнях виникають важкі умови роботи як для замкнутих, так і для комутуючих контактів. Також присутня небезпека зварювання контактів при знаходженні їх у замкнутому положенні (у випадку наскрізного струму короткого замикання) і тим більше в момент замикання (включення на коротке замикання). При короткому замиканні має місце не тільки різке збільшення струму, але і збільшення перехідного опору контакту через ослаблення контактного натиснення, що викликається електродинамічними силами. Теплова енергія, що виділяється в місці контакту, різко зростає і може викликати зварювання контактів. Зварювання замкнутих контактів відбувається за рахунок електродинамічного відкиду, коли електродинамічні сили дорівнюють або перевищують контактне натискання. Дуга, що виникає при відкиді контактів, викликає значне оплавлення робочих поверхонь і їх зварювання при замиканні. При

вмиканні на коротке замикання вірогідність зварювання контактів зростає як за рахунок можливої вібрації, так і меншого приводного зусилля. При відключенні струмів короткого замикання контакти вигоряють і оплаваються.

Для зменшення впливу дугової ерозії на контактну систему під час комутації вакуумного вимикача виробники електричного обладнання створюють контакти різної форми. Конструкція контактів така, щоб дуга існувала у дифузній формі або час дії стислої дуги був мінімальний. Це досягається створенням радіальних і аксіальних магнітних полів, які забезпечують переміщення опорних точок дуги із високою швидкістю по електродах. У вакуумних камерах на номінальну напругу 10 кВ і номінальні струми відключення до 50 кА застосовують контактні системи із поперечним радіальним магнітним полем. Контактні системи із поздовжнім магнітним полем дозволяють комутувати струми до 200 кА.

Незважаючи на технічні рішення виробників вакуумних комутаційних апаратів при конструюванні контактної системи, торцеві контакти мають недостатню динамічну стійкість. При великих струмах виникає відкид контактів, викликаний силами звуження ліній струму у контактах та вибух контактного містка. При протіканні великого струму контактний місток нагрівається до високої температури і переходить у пароподібний стан. Ця пара створює тиск, який відкидає контакти.

Запишемо рівняння (2.1) у вигляді:

$$\frac{d\Psi}{dt} = u - i \cdot R_a. \quad (2.8)$$

Помножимо рівняння (2.1) на вираз idt , отримаємо рівняння енергетичного балансу:

$$u \cdot idt = i^2 \cdot R_a dt + i \cdot d\Psi. \quad (2.9)$$

В будь-який момент часу t справедливе рівняння:

$$\int_0^t u \cdot idt = \int_0^t i^2 \cdot R_a dt + \int_0^{\Psi} id\Psi, \quad (2.10)$$

де $\int_0^t u \cdot idt$ – електрична енергія джерела живлення;

$\int_0^t i^2 \cdot R_a dt$ – втрати енергії в активному опорі обмотки електромагніту;

$\int_0^\Psi id\Psi$ – енергія, що затрачена на створення магнітного поля.

Енергія, отримана магнітним полем при елементарному переміщенні якоря, визначається механічною роботою, здійсненою якорем, і зміною запасу електромагнітної енергії:

$$i \cdot d\Psi = F_T dx + dW_M, \quad (2.11)$$

де $i \cdot d\Psi$ – елементарна енергія, отримана полем при переміщенні якоря;

$F_T dx$ – елементарна робота, що здійснена якорем;

dW_M – приріст магнітної енергії;

x – переміщення якоря;

F_T – тягове зусилля якоря.

Рівняння (2.11) можна записати у вигляді:

$$F_T = i \cdot \frac{d\Psi}{dx} - \frac{dW_M}{dx}. \quad (2.12)$$

Відомо, що енергію магнітного поля можна описати [110]:

$$W_M = \frac{1}{2} \cdot i \cdot \Psi. \quad (2.13)$$

Враховуючи рівняння (2.13) та умови, при яких магнітопровід магнітної системи електромагніту ненасичений, втрати на гістерезис відсутні, рівняння (2.12) буде мати вигляд:

$$F_T = i \cdot \frac{d\Psi}{dx} - \frac{1}{2} \cdot \Psi \frac{di}{dx} - \frac{1}{2} \cdot i \frac{d\Psi}{dx}. \quad (2.14)$$

Зважаючи, що струм i обмотки електромагніту при елементарному переміщенні dx не змінюється, вираз тягового зусилля (2.14) зміниться:

$$F_T = \frac{1}{2} \cdot i \frac{d\Psi}{dx}. \quad (2.15)$$

Швидкість руху V якоря є похідною від його переміщення x і залежить від часу:

$$V = \frac{dx}{dt}. \quad (2.16)$$

Рівняння (2.16) запишемо у вигляді:

$$dx = V \cdot dt. \quad (2.17)$$

Із врахуванням (2.17) рівняння тягового зусилля (2.15) матиме вигляд:

$$F_T = \frac{i}{2 \cdot V} \cdot \frac{d\Psi}{dt}. \quad (2.18)$$

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. 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. Тому для надійної роботи контроль електродинамічної сили відкиду при замиканні вакуумного вимикача є важливою задачею.

Електродинамічне зусилля відкиду визначається [111]:

$$F_{ед} = 10^{-7} i^2 \ln \frac{r_k}{r_o}, \quad (2.19)$$

де i – миттєве значення струму, що протікає через комутуючі контакти;

r_k – радіус комутуючого контакту;

r_o – радіус металевого перешийка в контакті вимикача.

На рисунку 2.2 зображено напрямки електродинамічного зусилля протидії замкнутим контактам при протіканні струмів через контактну систему вимикача.

При зміні перерізу провідника лінії струму змінюються і виникає поздовжня сила $F_{ед}$, що може розірвати місце переходу вздовж осі двох замкнутих контактів.

Розглянемо математичну модель діагностування силових контактів при ввімкненні та вимкненні вакуумного вимикача.

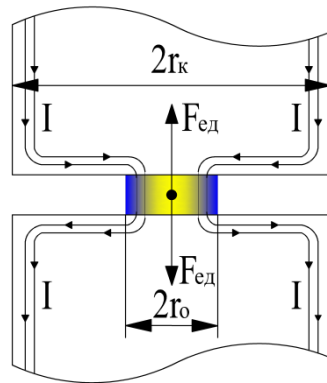


Рисунок 2.2 – Електродинамічні сили при протіканні струму в замкнутих контактах

Для процесу замикання силових контактів (задіяна обмотка ввімкнення) рівняння (2.8) зміниться відповідно до виміряних значень при ввімкненні вимикача:

$$\frac{d\Psi_{об.ввім}}{dt} = u_{об.ввім} - i_{об.ввім} \cdot R_{об.ввім}. \quad (2.20)$$

Для процесу вимкнення вакуумного вимикача (задіяна обмотка вимкнення) рівняння (2.8) матиме вигляд:

$$\frac{d\Psi_{об.вим}}{dt} = u_{об.вим} - i_{об.вим} \cdot R_{об.вим}. \quad (2.21)$$

Швидкість ввімкнення згідно рівняння (2.16) для процесу ввімкнення вакуумного вимикача має вигляд:

$$V_{ввім} = \frac{dx_{ввім}}{dt}. \quad (2.22)$$

Рівняння (2.16) для процесу вимкнення вакуумного вимикача:

$$V_{\text{вим}} = \frac{dx_{\text{вим}}}{dt}. \quad (2.23)$$

Рівняння тягового зусилля (2.18) при ввімкненні вакуумного вимикача (задіяна обмотка ввімкнення):

$$F_{\text{т.ввім}} = \frac{i_{\text{об.ввім}}}{2 \cdot V_{\text{ввім}}} \cdot \frac{d\Psi_{\text{об.ввім}}}{dt}. \quad (2.24)$$

Рівняння тягового зусилля (2.18) при вимкненні вакуумного вимикача (задіяна обмотка вимкнення):

$$F_{\text{т.вим}} = \frac{i_{\text{об.вим}}}{2 \cdot V_{\text{вим}}} \cdot \frac{d\Psi_{\text{об.вим}}}{dt}. \quad (2.25)$$

Розглянемо розрахунок загальної електродинамічної сили відкиду для усієї контактної системи із врахуванням кожного полюсу (полюсів А, В, С):

$$F_{\text{ед.заг}} = 10^{-7} i_A^2 \ln \frac{r_{\text{к.А}}}{r_{\text{о.А}}} + 10^{-7} i_B^2 \ln \frac{r_{\text{к.В}}}{r_{\text{о.В}}} + 10^{-7} i_C^2 \ln \frac{r_{\text{к.С}}}{r_{\text{о.С}}}, \quad (2.26)$$

де i_A , i_B , i_C – миттєві 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.

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 виявити знос контактної системи при комутації вакуумного вимикача. Якщо величина діючого тягового зусилля при ввімкненні 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.

$$\begin{cases} K = 0, \text{ якщо } (F_{\text{т.ввім}} - F_{\text{ед.заг}} > \delta) \vee (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}} > \sigma); \\ K = 1, \text{ якщо } (F_{\text{т.ввім}} - F_{\text{ед.заг}} \leq \delta) \vee (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}} \leq \sigma), \end{cases} \quad (2.27)$$

де δ – порогове значення різниці діючої сили тяги та загального електродинамічного зусилля протидії при ввімкненні вимикача;

σ – порогове значення різниці діючої сили тяги та мінімально допустимого тягового зусилля розмикання при вимкненні вимикача;

$F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}}$ – мінімально допустиме тягове зусилля розмикання при вимкненні вимикача (визначається експериментальним шляхом);

K – логічна змінна, що характеризує виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача.

Зведемо рівняння (2.20 – 2.27) в одну систему рівнянь, які є математичним описом роботи розробленої системи виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_{\text{об.вим}}}{dt} = u_{\text{об.вим}} - i_{\text{об.вим}} \cdot R_{\text{об.вим}}; \\ V_{\text{вим}} = \frac{dx}{dt}; \\ F_{\text{т.вим}} = \frac{i_{\text{об.вим}}}{2 \cdot V_{\text{вим}}} \cdot \frac{d\Psi_{\text{об.вим}}}{dt}; \\ \frac{d\Psi_{\text{об.ввім}}}{dt} = u_{\text{об.ввім}} - i_{\text{об.ввім}} \cdot R_{\text{об.ввім}}; \\ V_{\text{ввім}} = \frac{dx}{dt}; \\ F_{\text{т.ввім}} = \frac{i_{\text{об.ввім}}}{2 \cdot V_{\text{ввім}}} \cdot \frac{d\Psi_{\text{об.ввім}}}{dt}; \\ F_{\text{ед.заг}} = 10^{-7} i_A^2 \ln \frac{r_{\text{к.А}}}{r_{\text{о.А}}} + 10^{-7} i_B^2 \ln \frac{r_{\text{к.В}}}{r_{\text{о.В}}} + 10^{-7} i_C^2 \ln \frac{r_{\text{к.С}}}{r_{\text{о.С}}}; \\ K = 0, \text{ якщо } (F_{\text{т.ввім}} - F_{\text{ед.заг}} > \delta) \vee (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}} > \sigma); \\ K = 1, \text{ якщо } (F_{\text{т.ввім}} - F_{\text{ед.заг}} \leq \delta) \vee (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}} \leq \sigma). \end{array} \right. \quad (2.28)$$

Отже, розроблена математична модель (2.28) дозволяє визначити знос контактної системи в процесі роботи вакуумного вимикача. Сигнал про зношення контактів формується як при ввімкненні, так і при вимкненні вимикача. Застосування розробленої математичної моделі дозволяє вчасно попереджувати оперативний персонал про критичний стан контактної системи вимикача, необхідність виведення його в ремонт та запобігання його подальшого пошкодження.

Результати досліджень опубліковані в роботі [112].

2.3 Математична модель оцінки та налаштування синхронної роботи контактної системи вакуумного вимикача

Вимикачі мають допустимий робочий ресурс, який витрачається в залежності від інтенсивності здійснення ним комутацій. В процесі експлуатації в конструкції вимикачів утворюються люфти, які можуть спричинити несинхронне перемикання полюсів по фазах. Через інтенсивну роботу вимикач розрегулюється, внаслідок чого змінюється час його перемикання, змінюються відстані між контактами, що в певних умовах може викликати аварійну ситуацію [113].

В роботі пропонується відслідковувати час комутацій, неодноразовість перемикання по кожній фазі в процесі експлуатації вакуумного вимикача.

Припустимо, що швидкість переміщення контактів з вимкненого стану у ввімкнений та навпаки є величина стала. Відповідно відстань між контактами змінюється лінійно в часі. Тому відстань при ввімкненні вимикача між контактами можна визначити, вимірюючи час його ввімкнення. Варто зазначити, що розрахувати час безпосереднього руху контактів до моменту ввімкнення вимикача складно, а тому за точку відліку візьмемо момент подачі сигналу на обмотку ввімкнення вимикача. Кінцевим моментом визначення часу ввімкнення приймемо дотик рухомого контакту до нерухомого, тобто момент, коли опір між ними прямує до мінімального значення. Очевидно, що в такому випадку час ввімкнення вимикача буде складатися з часу реагування електромагніту ввімкнення вимикача, часу вільного руху штока електромагніту, часу

вільного руху механічної поворотної рами вимикача та часу руху його рухомого контакту.

Отже, час ввімкнення вимикача буде розраховуватися:

$$t_{\text{ввім.}} = t_{\text{ем.}} + t_{\text{ш.}} + t_{\text{м.р.}} + t_{\text{р.к.}}, \quad (2.29)$$

де $t_{\text{ем.}}$ – час реагування електромагніту ввімкнення;

$t_{\text{ш.}}$ – час вільного руху штока електромагніту;

$t_{\text{м.р.}}$ – час вільного руху механічної поворотної рами;

$t_{\text{р.к.}}$ – час руху рухомого контакту вимикача.

Відповідно до формули (2.29) розраховується час ввімкнення для усіх полюсів вакуумного вимикача.

Припустимо, що всі складові часу комутації, окрім часу руху рухомого контакту, є однаковими. Це спрощує процедуру оцінювання часу комутації вимикача і визначення кожної з окреслених компонент не є принциповим.

Відстань між контактами вимикача може набувати значення в діапазоні від мінімального до максимального серед допустимих значень.

Середня відстань між контактами вимикача визначається за формулою:

$$l_{\text{кс}} = \frac{(l_{\text{к.макс}} + l_{\text{к.мін}})}{2}, \quad (2.30)$$

де $l_{\text{к.макс}}$ – максимальна відстань між контактами вимикача в діапазоні допустимих значень;

$l_{\text{к.мін}}$ – мінімальна відстань між контактами вимикача в діапазоні допустимих значень.

Середня відстань між контактами вимикача $l_{\text{кс}}$ пропорційна часу $t_{\text{кс}}$, який відводиться для проходження цієї відстані:

$$l_{\text{кс}} \cdot k = t_{\text{кс}}, \quad (2.31)$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

При введенні вимикача в роботу рухомі контакти всіх полюсів вимикача знаходяться на однаковій відстані від нерухомих контактів. Припустимо, що рухомі контакти кожного полюсу вимикача знаходяться 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). Отже, можна припустити, що середній час $t_{\text{сеп}}$ руху рухомих контактів від середньої лінії до нерухомих контактів визначається за формулою:

$$t_{\text{сеп}} = \frac{t_{\text{max}} + t_{\text{min}}}{2}, \quad (2.32)$$

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.

В процесі експлуатації вимикача контактна система зношується і, як наслідок, відстань між рухомими і нерухомими контактами змінюється. Відомо [114], що в паспорті на вимикач регламентується допустиме відхилення від одночасного ввімкнення кожного полюса вимикача.

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

$$L = \min \left\{ |t_A - t_{\text{сеп}}|; |t_B - t_{\text{сеп}}|; |t_C - t_{\text{сеп}}| \right\}, \quad (2.33)$$

де t_A – час ввімкнення полюса А вимикача;

t_B – час ввімкнення полюса В вимикача;

t_C – час ввімкнення полюса С вимикача.

В процесі налагодження вимикач налаштовується так, що різниця між часом ввімкнення кожного полюсу є незначною, однак в процесі експлуатації вказані відстані змінюються як в одному напрямку, так і в іншому. Це вимагає при обчисленні мінімального значення згідно формули (2.33) розраховувати різницю часу ввімкнення кожного полюса за модулем. Протягом певного терміну роботи вимикача значення L зростає, і коли воно досягне нормованого значення допустимого відхилення необхідно здійснювати регулювання механічної частини 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:

$$t_{\text{п}} - t_{\text{сеп}} \geq L \rightarrow \Pi \downarrow, \quad (2.34)$$

де t_n – час ввімкнення полюса вимикача;

$\Pi \downarrow$ – 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:

$$\left. \begin{array}{l} t_n - t_{\text{сеп}} < 0 \\ t_{\text{сеп}} - t_n \geq L \end{array} \right\} \rightarrow \Pi \uparrow, \quad (2.35)$$

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

Формула (2.34) за умови, коли відхилення від середнього значення перевищує L та може досягати допустимої межі Δl , зміниться до вигляду:

$$t_n - t_{\text{сеп}} > L + \Delta l \rightarrow \Pi \downarrow. \quad (2.36)$$

або

$$L < t_n - t_{\text{сеп}} < L + \Delta l \rightarrow \Pi \downarrow. \quad (2.37)$$

Формула (2.35) за умови, коли відхилення від середнього значення перевищує L та може досягати допустимої межі Δl буде мати вигляд:

$$t_{\text{сеп}} - t_n > L - \Delta l \rightarrow \Pi \uparrow \quad (2.38)$$

або

$$L < t_{\text{сеп}} - t_n < L - \Delta l \rightarrow \Pi \uparrow. \quad (2.39)$$

У випадку, коли вимикач використовують у критичних режимах експлуатації, при досягненні додаткового значення неузгодження щодо одночасності ввімкнення всіх полюсів, близького до $2L$, процедура відстеження роботи вимикача описується виразами:

$$L < t_n - t_{\text{сеп}} < 2L \rightarrow \Pi \downarrow\downarrow \quad (2.40)$$

та

$$L < t_{\text{cep}} - t_{\text{п}} < 2L \rightarrow \Pi \uparrow\uparrow, \quad (2.41)$$

де $\Pi \downarrow$, $\Pi \uparrow\uparrow$ – направлена дія щодо термінового регулювання полюсів вимикача в сторону зменшення (збільшення) відстані між контактами, що підкреслює необхідність термінового втручання та виведення вимикача з експлуатації.

Графічна інтерпретація неузгодження контактів полюсів вимикача, що відповідає математичним виразам (2.30) – (2.41), наведена на рис. 2.3.

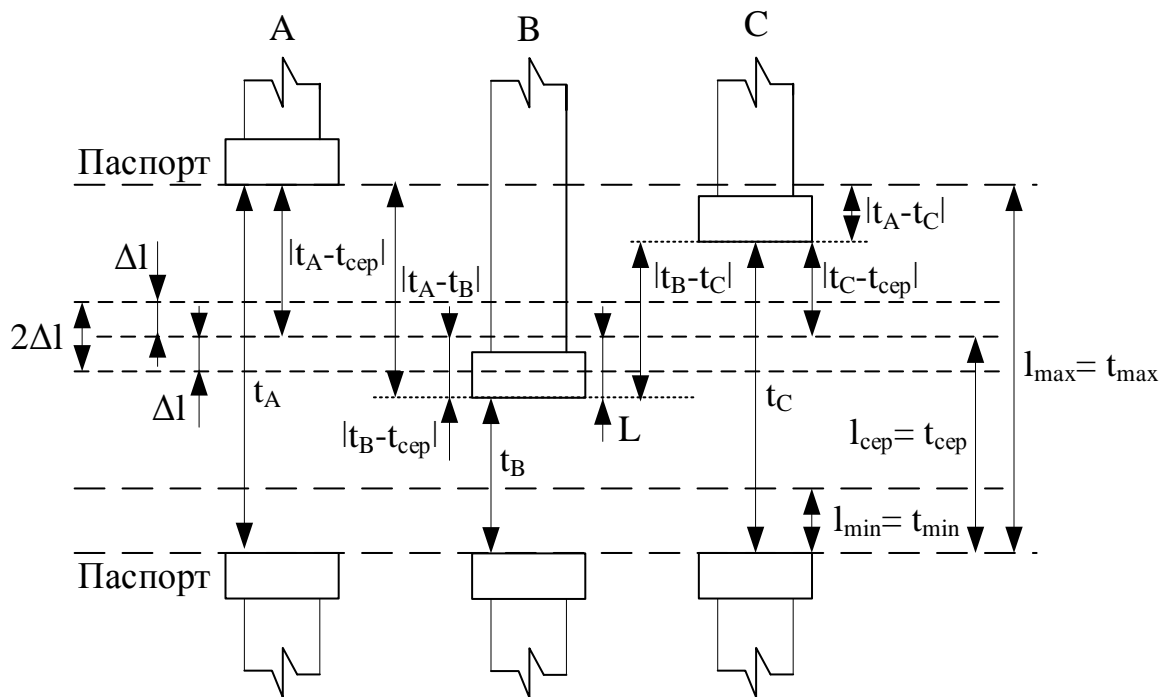


Рисунок 2.3 – Графічна ілюстрація неузгодження одночасності ввімкнення контактів полюсів вимикача

Для додаткового визначення ознак робочого стану вимикача та підвищення надійності його експлуатації доцільно при ввімкненні вимикача контролювати різницю в часі замикання всіх полюсів відносно кожного з них. Відповідний математичний вираз має вигляд:

$$|t_A - t_B| \vee |t_B - t_C| \vee |t_C - t_A| \leq \Delta t_{\text{доп}}, \quad (2.42)$$

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

Зведемо рівняння (2.30 – 2.42) в одну систему рівнянь, які є математичним описом роботи розробленої системи оцінки робочого стану вакуумного вимикача:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{\text{сеп}} = \frac{t_{\text{max}} + t_{\text{min}}}{2}; \\ l_c = \frac{l_{\text{max}} + l_{\text{min}}}{2}; \\ L = \min \{ |t_A - t_{\text{сеп}}|; |t_B - t_{\text{сеп}}|; |t_C - t_{\text{сеп}}| \}; \\ t_{\text{min}} \leq t_{\text{п}} \leq t_{\text{max}}; \\ t_{\text{п}} - t_{\text{сеп}} \geq L \rightarrow \text{П} \downarrow; \\ \left. \begin{array}{l} t_{\text{п}} - t_{\text{сеп}} < 0 \\ t_{\text{сеп}} - t_{\text{п}} \geq L \end{array} \right\} \rightarrow \text{П} \uparrow; \\ t_{\text{п}} - t_{\text{сеп}} = 0 \rightarrow \text{норма}; \\ t_{\text{п}} - t_{\text{сеп}} > L + \Delta l \rightarrow \text{П} \downarrow\downarrow; \\ t_{\text{сеп}} - t_{\text{п}} > L - \Delta l \rightarrow \text{П} \uparrow\uparrow; \\ |t_A - t_B| \vee |t_B - t_C| \vee |t_C - t_A| \leq \Delta t_{\text{доп}}. \end{array} \right. \quad (2.43)$$

Отже, застосування математичної моделі (2.43) 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.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ ПРИСТРОЇВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ

3.1 Мікропроцесорна реалізація засобу для діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача на основі аналізу вебер-амперних характеристик

В підрозділі 2.1 запропонований метод діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача на основі аналізу вебер-амперних характеристик. Суть такого діагностування полягає у вимірюванні «еталонної» кривої магнітної характеристики обмотки ввімкнення/вимкнення після введення нового вимикача в експлуатацію або після його капітального ремонту та порівняння даної кривої із поточними вимірними магнітними характеристиками в процесі його подальшої експлуатації.

Для реалізації даного методу запропоновано структурну схему мікропроцесорного пристрою системи діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача (рис. 3.1), який функціонує згідно з математичною моделлю (2.7).

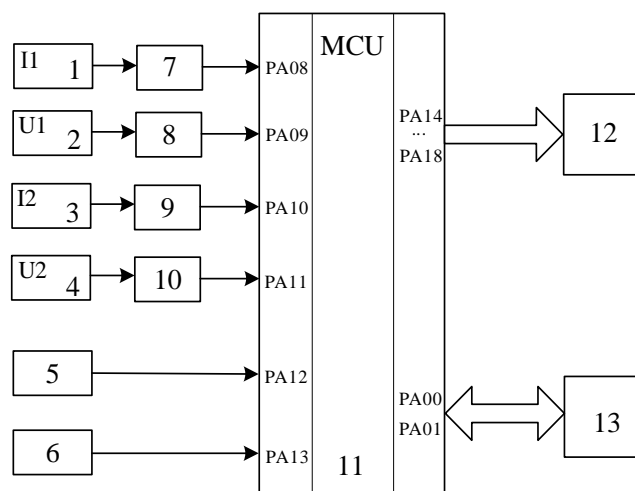


Рисунок 3.1 – Структурна схема блоку діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача

На рис. 3.1: 1 – сенсор для вимірювання струму обмотки ввімкнення; 2 – сенсор для вимірювання напруги на обмотці ввімкнення; 3 – сенсор для вимірювання струму обмотки вимкнення; 4 – сенсор для вимірювання напруги на обмотці вимкнення; 5 – блок сигналізації процесу ввімкнення; 6 – блок сигналізації процесу вимкнення; 7 – 10 масштабуючі перетворювачі; 11 – мікроконтролер; 12 – блок індикації; 13 – інтерфейсний перетворювач.

Для реалізації запропонованої системи діагностування електромагнітного привода вимикачів використаємо, наприклад, 32-розрядний високопродуктивний мікроконтролер AT32UC3L032 виробника Microchip Technology. Даний контролер має оптимізовану структуру команд, 48 програмованих каналів портів вводу/виводу та іншу периферію [115].

Працює блок діагностування електромагнітного привода вимикача так. За допомогою сенсорів струму 1, 3 та сенсорів напруги 2, 4 значення вимірюваних сигналів поступають в мікроконтролер 11. Сигнали струму і напруги нормуються у блоках 7-10 і подаються на входи мікроконтролера 11. Блоки 5, 6 надсилають сигнали про початок та кінець процесу ввімкнення/вимкнення вимикача. Після вимірювання відбувається розрахунок поточної вебер-амперної характеристики для процесу ввімкнення або вимкнення вимикача та порівняння її із «еталонною» характеристикою. На основі порівняння магнітних кривих формується діагностичний висновок про технічний стан електромагніту. Блок індикації 12 призначений для індикації результату діагностування безпосередньо біля пристрою діагностування. Інтерфейсний перетворювач 13 забезпечує передачу даних про поточний стан електромагнітного привода з мікроконтролера 11 в комп'ютер оперативного персоналу.

Укрупнений алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою діагностування технічного стану електромагнітного привода вакуумного вимикача представлено на рис. 3.2.

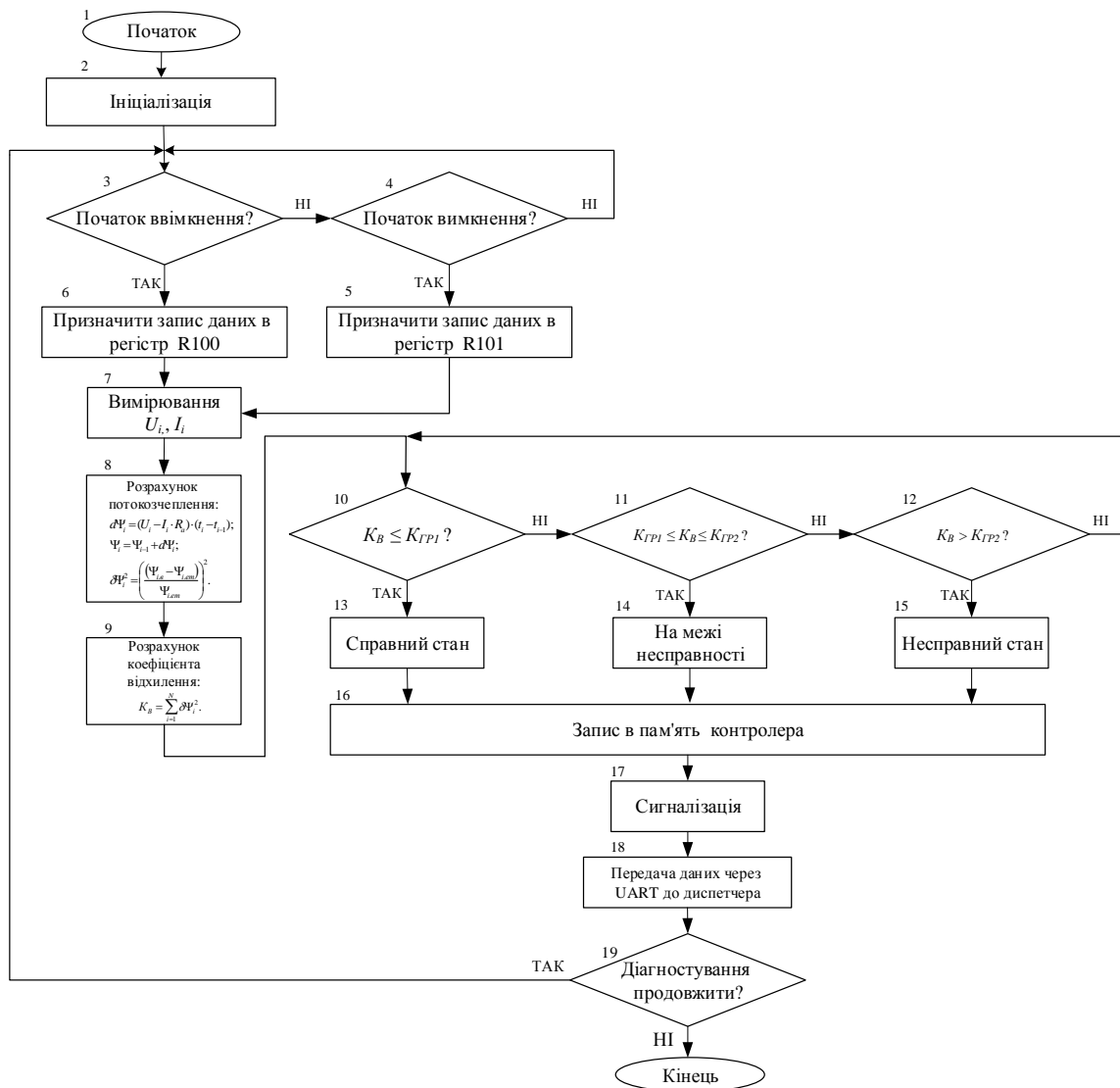


Рисунок 3.2 – Укрупнений алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача

Згідно наведеного алгоритму спочатку відбувається ініціалізація мікроконтролера, налаштування реєстрів, портів введення-виведення інформації. У блоках 3, 4 відбувається перевірка операції роботи вимикача. Для процесу вимкнення здійснюється призначення реєстра R101 для запису в пам'ять контролера вимірювальних даних (блок 5), для процесу ввімкнення - реєстра R100 (блок 6). У блоці 7 здійснюється зчитування інформації із сенсорів струму та напруги електромагніту вимикача. В блоках 8, 9 здійснюється розрахунок поточної вебер-амперної характеристики та відносного квадрату відхилення. У блоках 10-12

порівнюється відносний квадрат відхилення K_B та граничні коефіцієнти $K_{ГР1}$, $K_{ГР2}$. В блоках 13-15 визначається поточний стан електромагнітного привода вакуумного вимикача. У блоці 16 здійснюється запис результату діагностування у пам'ять мікроконтролера. Блоки 17, 18 забезпечують виведення інформації на пристрій індикації та передачу інформації до оператора.

Запропонована реалізація пристрою діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача розглянута в роботі [116].

3.2 Пристрій діагностування електричного привода вакуумного вимикача

В підрозділі 2.1 запропонована математична модель діагностування електромагнітного привода вимикача та описано принцип, за яким здійснюється розрахунок коефіцієнтів відхилення вебер-амперних характеристик.

В результаті на основі математичної моделі діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача розроблено структуру пристрою для діагностування електричного привода вимикача (рис. 3.3).

На рис. 3.3: 1 – датчик напруги; 2 – датчик струму; 3, 4 – нормуючі перетворювачі; 5 – масштабований підсилювач; 6, 7, – аналого-цифрові перетворювачі; 8 – суматор; 9 – функціональний блок; 10 – суматор; 11 – блок оперативної пам'яті; 12 – генератор імпульсів; 13 – формувач імпульсів; 14 – датчик комутації; 15 – тригер; 16, 17 – елементи І; 18, 19 – елементи АБО; 20 – лічильник; 21 – блок постійної пам'яті; 22 – функціональний блок; 23 – суматор; 24 – блок задання коефіцієнта; 25 – цифровий компаратор; 26, 27, 28 – індикатори; 29, 30 – регістри; 31 – блок установки нуля; 32 – елемент АБО; 33 – тригер; 34 – елемент АБО; 35 – тригер; 36 – генератор імпульсів; 37 – елемент І; 38 – лічильник; 39 – дешифратор.

Зміна форми вебер-амперної характеристики відображає ступінь зносу, розрегулювання рухомих частин або погіршення провідних властивостей електромагнітного привода вакуумного вимикача.

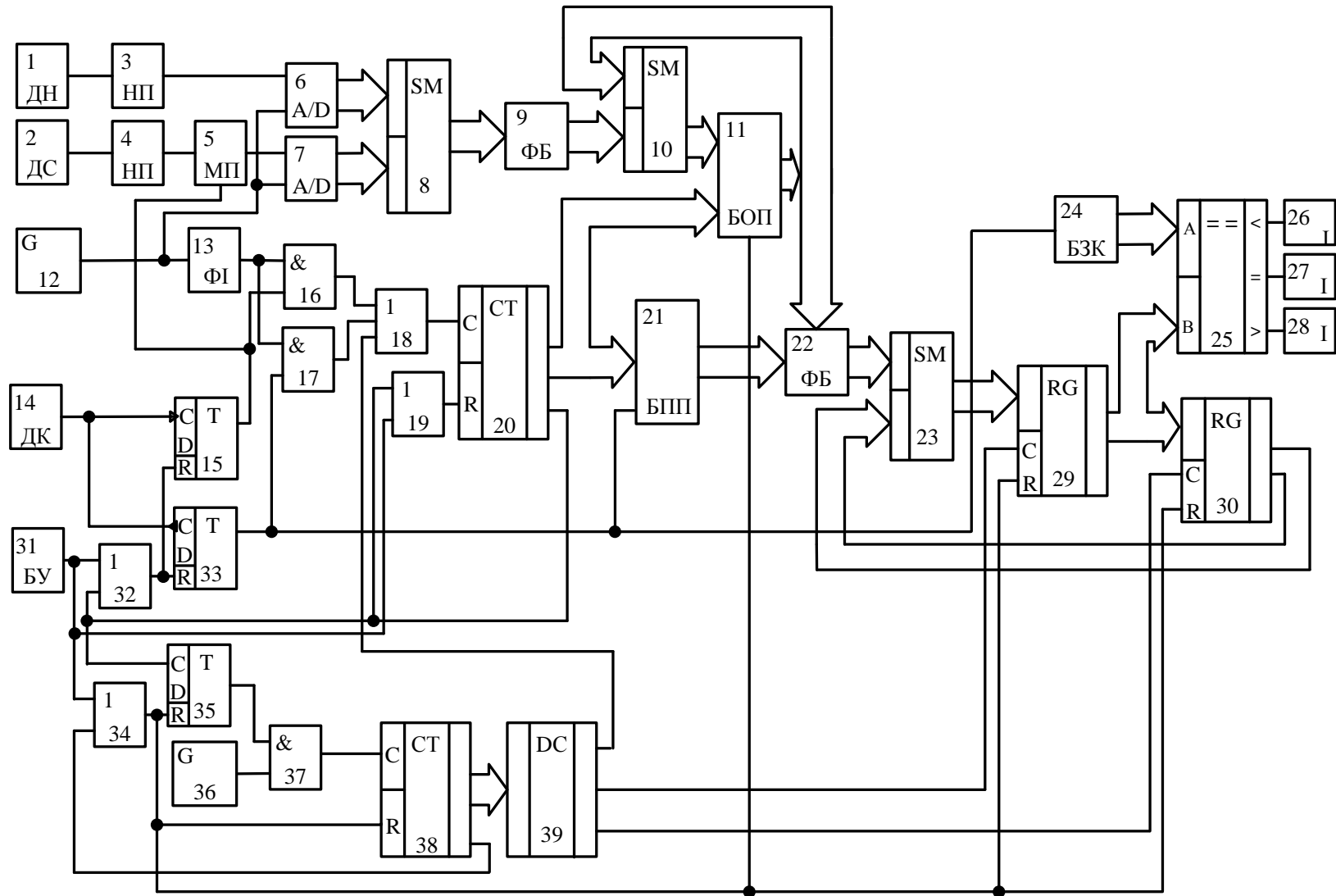


Рисунок 3.3 – Структура пристрою для діагностування електричного привода вимикача

Вимірювання діагностичних параметрів здійснюється за допомогою датчиків струму, напруги та датчика комутації, який сигналізує про ввімкнення або вимкнення вимикача. При виконанні операції ввімкнення електромагнітного привода вимикача на виході датчика комутації 14 встановлюється сигнал логічної одиниці, внаслідок чого тригер 15 по передньому фронту імпульсу встановлюється в одиничний стан. Одночасно, в зв'язку з подачею електричної енергії на електромагніт ввімкнення електричного привода, на виходах датчика напруги 1 та датчика струму 2 з'являються послідовно миттєві сигнали, що відповідають напрузі та струму процесу ввімкнення електричного привода високовольтного вимикача. Ці сигнали через нормуючі перетворювачі 3 та 4 приводяться до виду, зручного для подальшої обробки. Миттєвий сигнал з датчика струму надходить після нормуючого перетворювача 4 в масштабований підсилювач 5, в якому вхідний сигнал перемножується на опір обмотки ввімкнення R_1 . По сигналу з виходу генератора імпульсів 12 відбувається перетворення аналогових сигналів в цифрові коди, які надходять на входи суматора 8. Враховуючи те, що сигнали з виходу генератора імпульсів 12 надходять з одним і тим же періодом чергування імпульсів, вихідний сигнал суматора 8 подається на вхід функціонального блока 9, вихідний сигнал якого знаходиться як залежність від вхідного, згідно математичного виразу (2.3), з виходу якого цифровий код надходить на вхід суматора 11. В цьому суматорі здійснюється обчислення значення потокозчеплення на кожному i -му кроці вимірювання за формулою (2.4). Таким чином в кожному комірці блока оперативної пам'яті 11 записується інформація, що характеризує весь процес ввімкнення електричним приводом вимикача за сигналами з датчика напруги 1 та датчика струму 2. Одночасно цифрові коди з виходу лічильника 20 надходять на вхід блоку постійної пам'яті 21, в якому записані в кожній комірці зразкові (початкові) значення вебер-амперної характеристики електромагніту ввімкнення електропривода вимикача.

По закінченні процесу ввімкнення високовольтного вимикача на виході лічильника 20 з'являється сигнал, яким через елемент АБО 19 обнуляється лічильник 20, та через елемент АБО 32 скидаються тригери 15

та 33. Процес ввімкнення електричним приводом високовольтного вимикача на цьому завершується. Одночасно зазначений сигнал з виходу лічильника 20 надходить на вхід тригера 35, внаслідок чого елемент І 37 відкривається і імпульси з генератора імпульсів 36 починають надходити в лічильник 38, вихідний цифровий код якого подається на вхід дешифратора 39. По мірі зміни цифрового коду на виході лічильника 38 спочатку імпульс з'являється на першому виході дешифратора 39, яким через елемент АБО 18 лічильник 20 нарощує свій вихідний цифровий код. При цьому в блоці оперативної пам'яті 11 та в блоці постійної пам'яті 21 надається доступ до перших комірок, в яких записані виміряне та зразкове значення поточкозчеплень вебер-амперної характеристики. Ці значення сигналів надходять в функціональний блок 21, в якому обчислюється їхнє миттєве середньоквадратичне відхилення за формулою (2.5).

З виходу функціонального блока 22 цифровий код надходить в суматор 23, в якому складається поточне та попереднє значення миттєвих середньоквадратичних відхилень вебер-амперної характеристики. Далі результуючий цифровий код подається в регістр 29, в якому код запам'ятовується по сигналу з другого виходу дешифратора 39, а по сигналу з третього виходу дешифратора 39 перезаписується в регістр 30. Тепер в наступних циклах вимірювання миттєвого значення середньоквадратичного відхилення вебер-амперної характеристики в регістрі 29 буде записуватись сумарне значення середньоквадратичного відхилення вебер-амперної характеристики. По завершенню на виході лічильника 38 з'являється сигнал, яким через елемент АБО 34 обнуляється тригер 35, лічильник 38, регістри 29 та 30, а також всі комірки пам'яті блоку оперативної пам'яті 11. Коефіцієнт відхилення K_v (2.6) записується в регістр 29 і в цифровому компараторі 25 порівнюється з допустимим значенням, код якого записаний в блоці задання коефіцієнта 24. В залежності від співвідношення вказаних значень на виходах цифрового компаратора 25 формуються сигнали, якими вмикаються один з індикаторів 26, 27 або 28, що свідчить про поточний технічний стан електромагніту ввімкнення електричного привода високовольтного вимикача, а саме: ввімкнення індикатора 26 свідчить про наявність

залишкового робочого ресурсу електромагніту ввімкнення, ввімкнення індикатора 27 свідчить про відсутність робочого ресурсу електромагніту ввімкнення, ввімкнення індикатора 28 свідчить про перевищення робочого ресурсу електромагніту ввімкнення і можливість виникнення аварійної ситуації.

Детальніше робота пристрою описана в патенті України на корисну модель [117].

3.3 Пристрій для визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача

В підрозділі 2.3 запропонована математична модель для визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача.

Розроблена математична модель (2.42) дозволяє розраховувати відхилення між полюсами із допустимим значенням неузгодженого ввімкнення полюсів вимикача.

На основі цієї математичної моделі розроблено пристрій визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача (рис. 3.4).

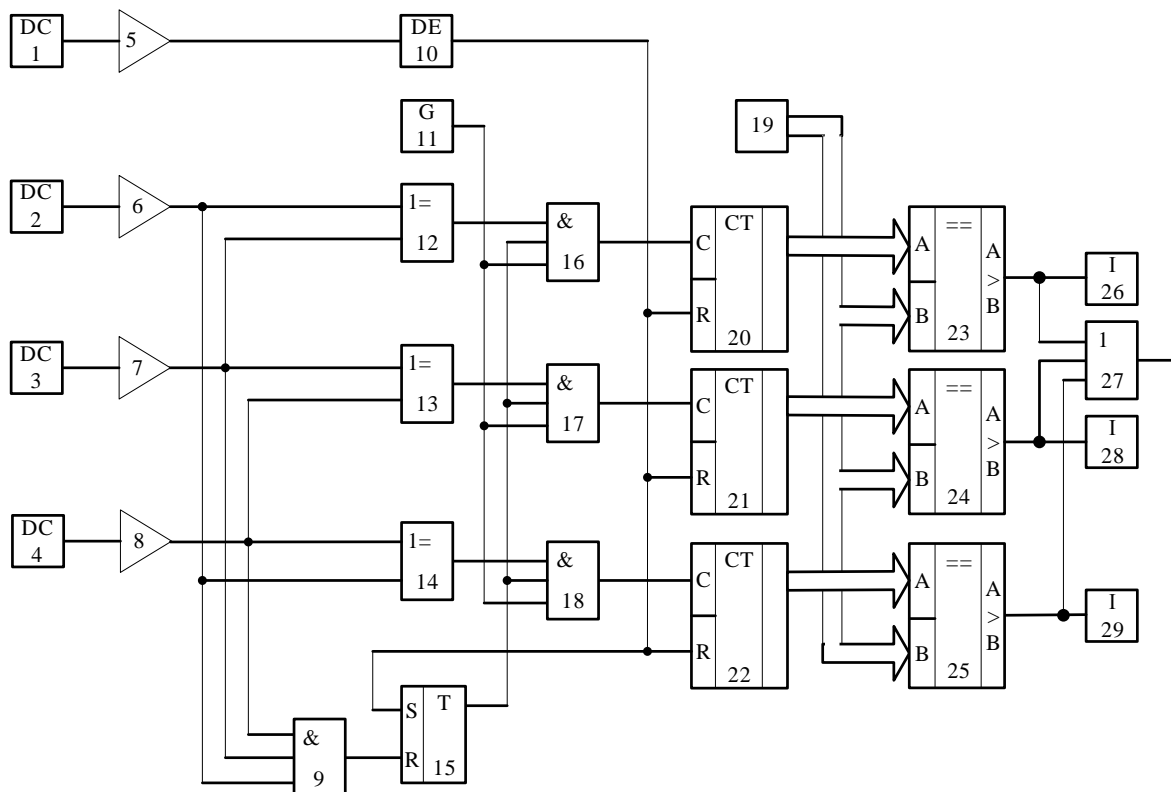


Рисунок 3.4 – Структурна схема пристрою для визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача

На рис. 3.4: 1 – датчик струму, що ввімкнений в коло ввімкнення обмотки електромагніту ввімкнення вимикача; 2, 3, 4 – датчики струму, що встановлені у фазах відповідно А, В та С вимикача; 5, 6, 7, 8 – компаратори; 9 – елемент І; 10 – диференціальний елемент; 11 – генератор імпульсів; 12, 13, 14 – елементи «Виключне АБО»; 15 – тригер; 16, 17, 18 – елементи І; 19 – блок задання допустимого часу $\Delta t_{\text{доп}}$ неузгодженого ввімкнення полюсів вимикача; 20, 21, 22 – лічильники імпульсів; 23, 24, 25 – цифрові компаратори; 26, 28, 29 – індикатори; 27 – елемент АБО.

Контроль різниці замикання всіх полюсів вимикача здійснюється при ввімкненні вимикача, коли сигнал з виходу датчика струму обмотки ввімкнення 1 через компаратор 5 надходить на диференціальний елемент 10 і далі у вигляді імпульсу обнуляє лічильники 20, 21 і 22 та встановлює тригер 15. При цьому операція ввімкнення вимикача продовжується і якщо, наприклад, перше замикання контактів відбулося у полюсі фази А, то на виході датчика струму 2 з'являється сигнал, яким через компаратор 6 та елемент «Виключне АБО» 12 відкривається елемент І 16 і імпульси з генератора імпульсів 11 починають надходити в лічильник імпульсів 20. Одночасно відкривається і елемент «Виключне АБО» 14, внаслідок чого імпульси з генератора імпульсів 11 надходять також в лічильник 22. Це продовжується до тих пір, поки не замкнуться контакти в іншому полюсі вимикача, наприклад, в полюсі С. При цьому сигнал з виходу датчика струму 4 надходить через компаратор 8 на вхід елемента «Виключне АБО» 14, внаслідок чого подання імпульсів в лічильник імпульсів 22 припиняється. Однак сигнал з виходу компаратора 8 через елемент «Виключне АБО» 13 відкриває елемент І 17 і імпульси з генератора імпульсів 11 починають надходити в лічильник імпульсів 21. Це продовжується до тих пір, поки не замкнуться контакти полюса В вимикача, внаслідок чого подання імпульсів в лічильники імпульсів 20 та 21 зупиняється. Аналогічно визначається час неузгодженого ввімкнення між іншими полюсами вимикача.

В момент початку протікання струму в усіх фазах вимикача на виході елемента І 9 з'являється сигнал, яким скидається тригер 15 та блокується подання імпульсів в лічильники. Код, що збережений в лічильниках 20, 21

та 22, порівнюється з кодом, який відповідає значенню $\Delta t_{\text{доп}}$ та записаний в блоці 19. У випадку перевищення допустимого часу неузгодженого ввімкнення полюсів вимикача на відповідному індикаторі 26, 28 або 29 з'являється повідомлення та через елемент АБО 27 подається сигнал оперативному персоналу.

3.4 Пристрій для формування керуючої дії налаштування синхронної роботи контактної системи

Відповідно до математичної моделі, розробленої у підрозділі 2.3 синтезуємо пристрій, який дозволяє формувати сигнали керуючої дії для оперативного персоналу щодо регулювання рухомих контактів полюсів вимикача. Запропонований пристрій визначає для кожного полюса інформативний сигнал на зближення або віддалення його рухомих контактів від нерухомих для забезпечення синхронної роботи контактної системи вимикача. В результаті отримуємо структурну схему, зображену на рисунку 3.5.

На рис. 3.5: 1 – блок установки нуля; 2 – датчики струму, що встановлений у фазі А; 3 – датчик струму, що ввімкнений в коло ввімкнення обмотки електромагніту ввімкнення вимикача; 4 – елемент АБО; 5 – компаратор; 6 – диференціальний елемент; 7 – компаратор; 8, 9 – одинвібратори; 10 тригер; 11 – генератор імпульсів; 12 – тригер; 13 – елемент І; 14 – блок задання часу $t_{\text{сер}}$; 15 – лічильник; 16 – цифровий компаратор; 17 – формувач імпульсів; 18 – елемент НІ; 19, 20 – мультиплексори; 21 – цифровий суматор; 22 – цифровий компаратор; 23, 24 – елементи І; 25, 26, 27 – індикатори; 28, 30 – цифрові компаратори; 29, 31 – мультиплексори; 32 – регістр.

Наведена структурна схема пояснює роботу пристрою тільки по одному полюсу вимикача (наприклад А). Введення в пристрій двох аналогічних каналів обробки інформації (від каналу полюса В, від каналу полюса С) дозволяє відтворити роботу пристрою на весь вимикач.

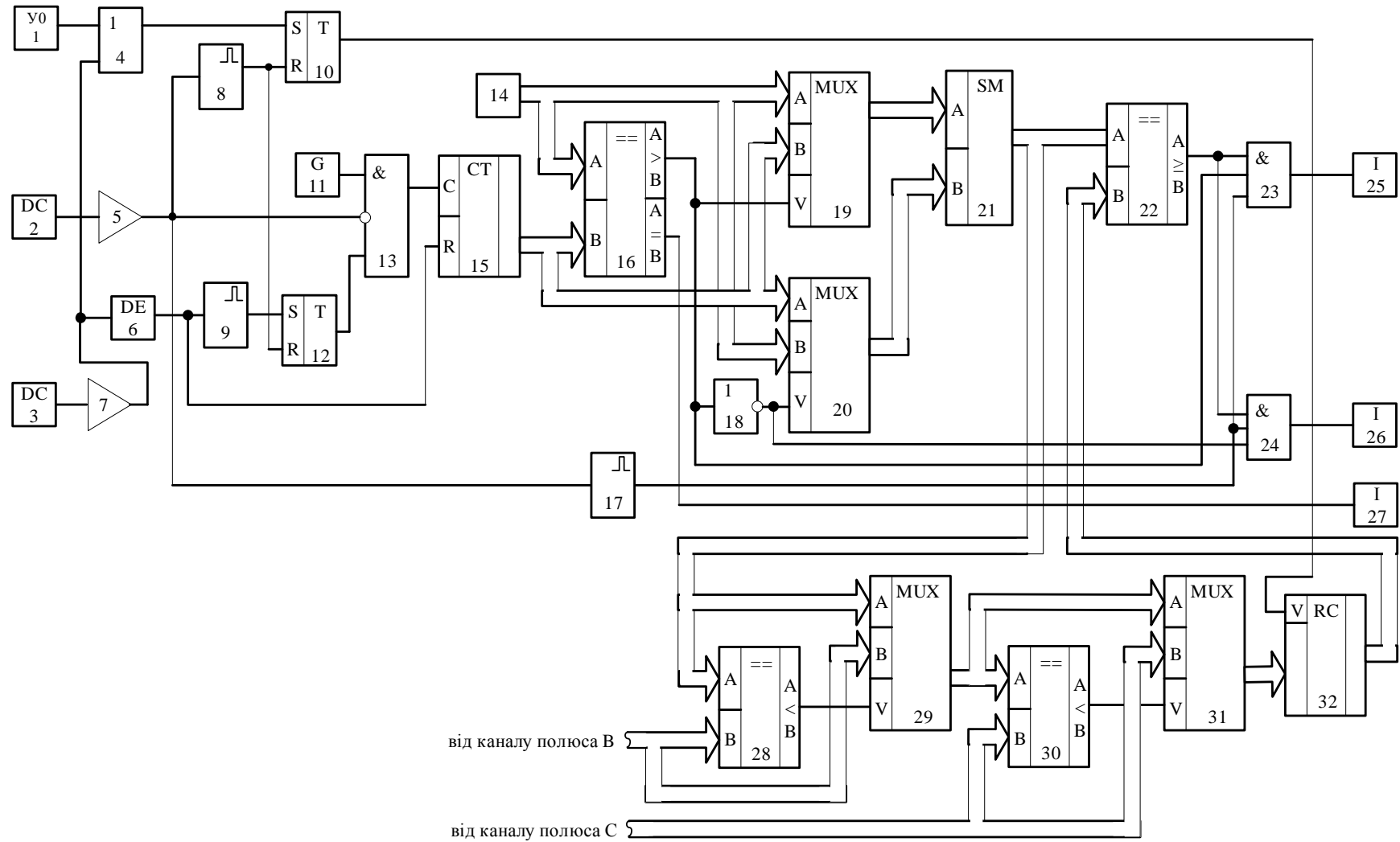


Рисунок 3.5 – Структура пристрою, яким визначається допустиме відхилення положення рухомих контактів полюсів вимикача

При подачі напруги блок установки нуля формує імпульс, яким через елемент АБО 4 встановлюється тригер 10, сигналом якого відкривається для запису реєстр 32. В момент ввімкнення вимикача в обмотці електромагніту ввімкнення з'являється струм, внаслідок чого сигнал з виходу датчика струму 3 через компаратор 7 та через диференціальний елемент 6 обнуляє лічильник 15 і запускає одновібратор 9, яким встановлюється тригер 12. При цьому відкривається елемент І 13 (на виході датчика струму 2 в фазі А відсутній сигнал) і імпульси з генератора імпульсів 11 надходять в лічильник 15. Це триває до тих пір, поки контакти полюса А вимикача не замкнулися. В момент замикання елемент І 13 закривається і в лічильнику 15 залишається певна кількість імпульсів, пропорційна часу ввімкнення полюса А вимикача. Код, записаний в лічильнику 15, порівнюється зі значенням $t_{сер}$, записаним в блоці 14, і в залежності від їх співвідношень на одному з виходів цифрового компаратора 16 з'являється сигнал. Якщо різниця зазначених кодів додатна, тобто коли виконується математичний вираз (6), то мультиплексори 19 та 20 відкриваються таким чином, що у цифровому суматорі 21 від більшого значення віднімається менше і результат є додатнім двійковим числом. Якщо ж різниця зазначених кодів є від'ємною то мультиплексори 19 та 20 забезпечують подання сигналів на цифровий суматор 21 так, щоб різниця на його виході знову була додатна. Вихідний код цифрового суматора 21 в цифровому компараторі 22 порівнюється зі значенням мінімальної неузгодженості по одночасності ввімкнення всіх полюсів вимикача L, код якого подається з реєстра 32 і у разі перевищення значення L через елементи І 23 або 24 на індикатори 25 або 26 надходить сигнал, який свідчить про необхідність регулювання рухомого контакту полюса фази А відповідно вниз або вгору (тобто наблизити або віддалити рухомий від нерухомого контакти). Якщо в результаті порівняння кодів в цифровому компараторі 16 встановлюється їх рівність, то сигнал з другого його виходу вмикає індикатор 27, що свідчить про нормальний технічний стан полюса вимикача.

Варто зазначити, що робота кожного полюса вимикача контролюється аналогічно. Мінімальне значення L визначається так. З виходу цифрового

суматора 21 код надходить на цифровий компаратор 28, в якому він порівнюється з таким же кодом, визначеним в фазі В вимикача і в залежності від того, значення якого із кодів є меншим, відкривається мультиплексор 29 і менший код порівнюється в цифровому компараторі 30 з кодом, визначеним в фазі С вимикача. В результаті порівняння на виході мультиплексора 31 з'являється код, який записується в регістр 32 і є мінімальним значенням L. За сигналом з виходу одновібратора 8 тригер 10 скидається і зазначене значення L зберігається в регістрі.

3.5 Реалізація пристрою діагностування неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача із застосуванням програмованих логічних інтегральних мікросхем

Програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС) або FPGA (field programmable gate arrays) є електронними компонентами, що використовуються для створення конфігурованих цифрових електронних схем. Логіка роботи ПЛІС задається за допомогою програмування, а не визначається при виготовленні, як для звичайних мікросхем [118], [119].

У відповідності до розроблених математичних моделей та синтезованих засобів, у попередніх розділах розглянемо задачу створення та моделювання роботи засобу для діагностування неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача. Здійснимо реалізацію засобу на базі ПЛІС, наприклад, виробника Altera марки MAXII EMP570T100C5 [120] за допомогою програмного середовища Quartus II 15.0, в якому можливе створення різноманітних по складності цифрових засобів.

В результаті розробки програмного забезпечення було отримано структурну схему засобу діагностування неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача в середовищі Quartus II, зображену на рис. 3.6.

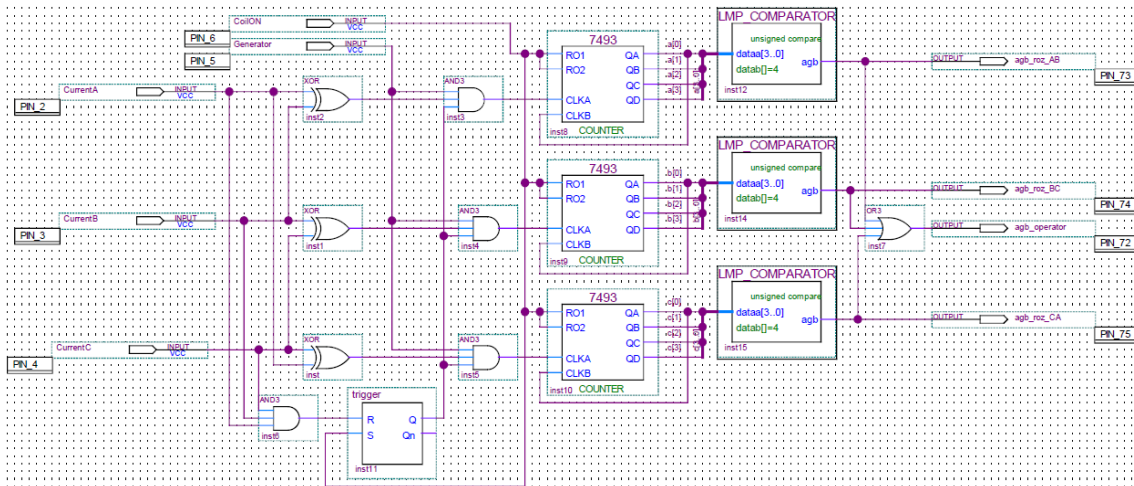


Рисунок 3.6 – Структурна схема засобу діагностування неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача

Для функціонування запропонованого пристрою діагностування налаштовано конфігурацію входів та виходів мікросхеми, рисунок 3.7.

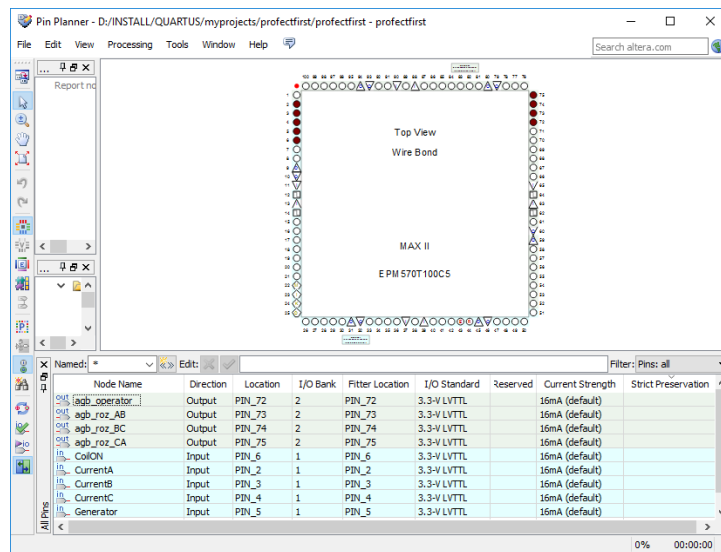


Рисунок 3.7 – Вікно конфігурації входів та виходів мікросхеми

Здійснено симуляцію роботи засобу. На рисунку 3.8 зображена діаграма сигналів, що пояснюють роботу засобу в характерних точках.

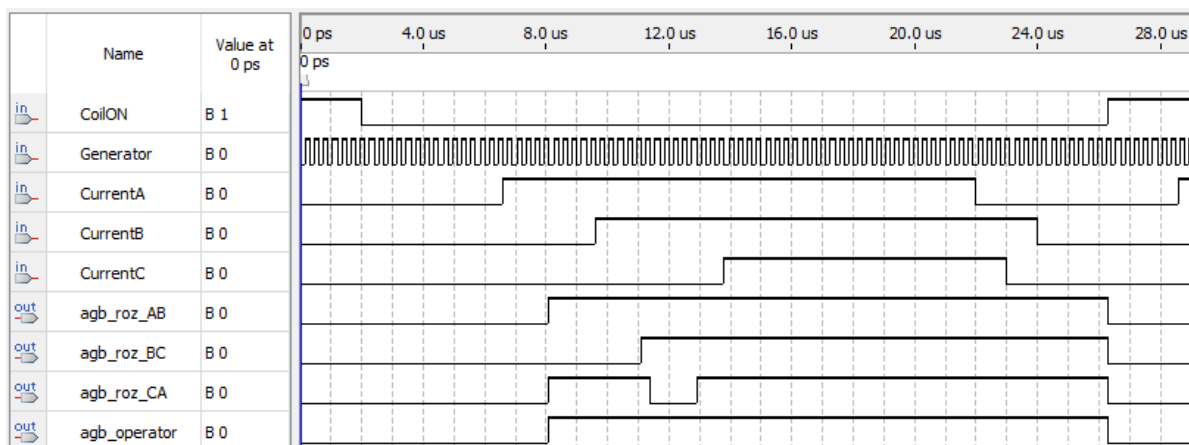


Рисунок 3.8 – Діаграма сигналів, що відображають роботу засобу для діагностування неузгодження ввімкнення полюсів вимикача

На рисунку 3.8 введені наступні позначення діаграм сигналів: CoilON – сигнал з датчика струму обмотки ввімкнення, який сигналізує про початок ввімкнення вимикача; Generator – послідовність імпульсів від генератора, який синхронізує роботу частини засобу по вимірюванню неодноразовості ввімкнення полюсів вимикача по кожній фазі; CurrentA, CurrentB, CurrentC – вхідні сигнали від датчиків струму, які встановлені у фазах А, В та С вимикача відповідно; agb_roz_AB, agb_roz_BC, agb_roz_CA – вихідні сигнали обчислення неузгодженості перемикачів між фазами А та В, В та С, С та А відповідно; agb_operator – вихідний сигнал, що сигналізує оператору про перевищення допустимого часу неузгодженого ввімкнення полюсів вимикача.

Запрограмувавши ПЛІС та поєднавши її з вхідними датчиками та вихідними колами, реалізуємо засіб для діагностування неузгодженого ввімкнення полюсів вимикача згідно розробленої математичної моделі.

Очевидно, що аналогічним чином можливо реалізувати решту засобів діагностування технічного стану вимикача відповідно до розроблених математичних моделей. Дана реалізація дозволяє суттєво підвищити надійність роботи пристрою та його швидкодію, оскільки використовується лише одна мікросхема, а також дозволяє зменшити енергоспоживання та розміри, порівняно з реалізацією на інтегральних мікросхемах.

3.6 Мікропроцесорний пристрій для виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача

Відповідно розробленої математичної моделі (2.28) для технічної реалізації пристрою необхідно передбачити зчитування інформації з датчиків напруги та струму обмоток ввімкнення та вимкнення, а також з датчиків струму у кожній із фаз вимикача, та швидкості руху контактної системи. Для зручності використання мікропроцесорного пристрою та введення даних передбачається підключення матричної клавіатури. Виведення інформації здійснюється через монохромний рідкокристалічний дисплей. Доцільно також передбачити виведення масиву отриманої інформації для подальшої обробки та збереження в ПК.

Здійснено реалізацію мікропроцесорного пристрою системи виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача, структурна схема якого наведена на рис. 3.9.

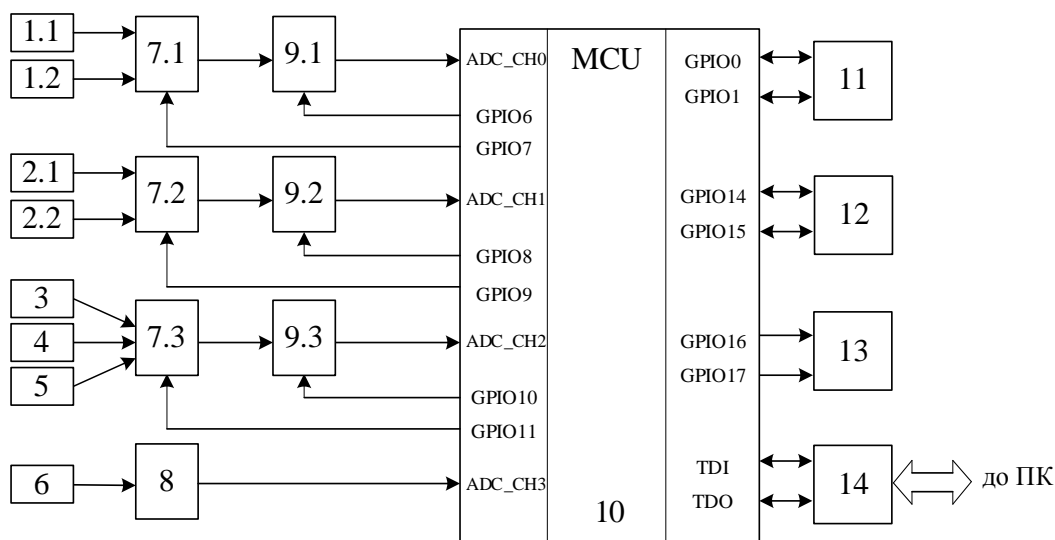


Рисунок 3.9 – Структурна схема мікропроцесорного пристрою системи виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача

На схемі 3.9: 1.1, 1.2 – датчики для вимірювання струму в обмотках ввімкнення та вимкнення електромагнітного привода вимикача; 2.1, 2.2 – датчики для вимірювання напруг в обмотках ввімкнення та вимкнення електромагнітного привода вимикача; 3 - 5 – датчики для вимірювання струму в трифазній мережі (i_A , i_B , i_C); 6 – датчик швидкості руху контактної системи вимикача; 7.1 - 7.3 – комутатори; 8 – масштабуючий

перетворювач; 9.1 - 9.3 – пристрої вибірки і запам'ятовування; 10 – цифровий сигнальний процесор; 11 – матрична клавіатура; 12 – монохромний рідкокристалічний екран; 13 – блок індикації; 14 – перетворювач сигналу.

Мікропроцесорний пристрій системи виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача побудований на основі 32-розрядного цифрового сигнального процесора CC3200 виробництва фірми Texas Instruments. Даний процесор має в своєму складі 64 програмованих канали портів вводу/виводу, модуль 12-розрядного АЦП з чотирма мультиплексованими входами та іншою периферією [121].

Датчики струму 1.1, 1.2 та напруги 2.1, 2.2 обмоток електромагніту вимикача підключені до входів комутаторів 7.1 та 7.2, виходи яких підключені до входів пристроїв вибірки та запам'ятовування 9.1 та 9.2, виходи яких підключені до входів цифрового сигнального процесора ADC_CH0 та ADC_CH1, відповідно. Датчики струму 3-5 призначені для вимірювання значень струму у відповідних полюсах вимикача та підключені до входів комутатора 7.3, вихід якого підключений до входу пристрою вибірки й запам'ятовування 9.3, вихід якого підключений безпосередньо до входу цифрового сигнального процесора ADC_CH2. Датчик швидкості 6 підключений до входу масштабуючого перетворювача 8, вихід якого підключений до входу цифрового сигнального процесора ADC_CH3. Датчик швидкості 6 призначений для вимірювання швидкості руху контактної системи при ввімкненні та вимкненні вимикача. Матрична клавіатура 11 підключена до входів цифрового сигнального процесора GPIO0 та GPIO1 і призначена для введення та підтвердження числових значень величини r_k радіусів комутуючих контактів в кожному із полюсів вимикача. Монохромний рідкокристалічний екран 12 підключений до виходів цифрового сигнального процесора GPIO14 та GPIO15 і призначений для виведення на екран числових значень r_k радіусів комутуючих контактів. Блок індикації 13 призначений для відображення результату діагностування. Перетворювач сигналу 14 призначений для перетворення рівня сигналів із внутрішнього передавача у будь-який інший протокол послідовних інтерфейсів з метою з'єднання пристрою

діагностування з системами вищого рівня обробки інформації та інтеграції у системи автоматизації.

Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою виявлення зносу контактної системи вимикача наведений на рис. 3.10.

Алгоритм роботи пристрою містить такі складові:

- в блоках 3, 4 реалізована перевірка вибору операції роботи вимикача;
- в блоках 5-12 відбувається зчитування значень із датчиків струму, напруги для обмоток ввімкнення або вимкнення та швидкості руху контактної системи вимикача, перетворення цих сигналів в цифрову форму та запис даних у відповідні змінні;

- в блоках 13, 14 відбувається розрахунок співвідношення $\frac{d\Psi_{об.вв\text{ім}}}{dt}$ та

$\frac{d\Psi_{об.вв\text{ім}}}{dt}$ для процесу ввімкнення або вимкнення вимикача;

- в блоках 15, 16 здійснюється розрахунок тягових зусиль $F_{т.вв\text{ім}}$ та $F_{т.в\text{ім}}$ електромагнітного привода для процесу ввімкнення або вимкнення вимикача;

- в блоці 17 відбувається введення оператором значень радіусів комутуючих контактів для кожного полюса вимикача за допомогою матричної клавіатури;

- в блоці 18 здійснюється виведення числових значень радіусів комутуючих контактів на екран для підтвердження вірного набору;

- в блоці 19 відбувається розрахунок $F_{ед.заг}$ загальної електродинамічної сили відкиду $F_{ед.заг}$;

- в блоках 20, 21 порівнюється діюче тягове зусилля із мінімально допустимим тяговим зусиллям для процесу вимкнення вимикача;

- в блоках 22, 23 порівнюється діюче тягове зусилля та загальна електродинамічна сила відкиду контактів при ввімкненні вимикача;

- в блоках 24-26 визначається ознака зношення контактної системи вимикача та проводиться запис результату діагностування у пам'ять мікроконтролера;

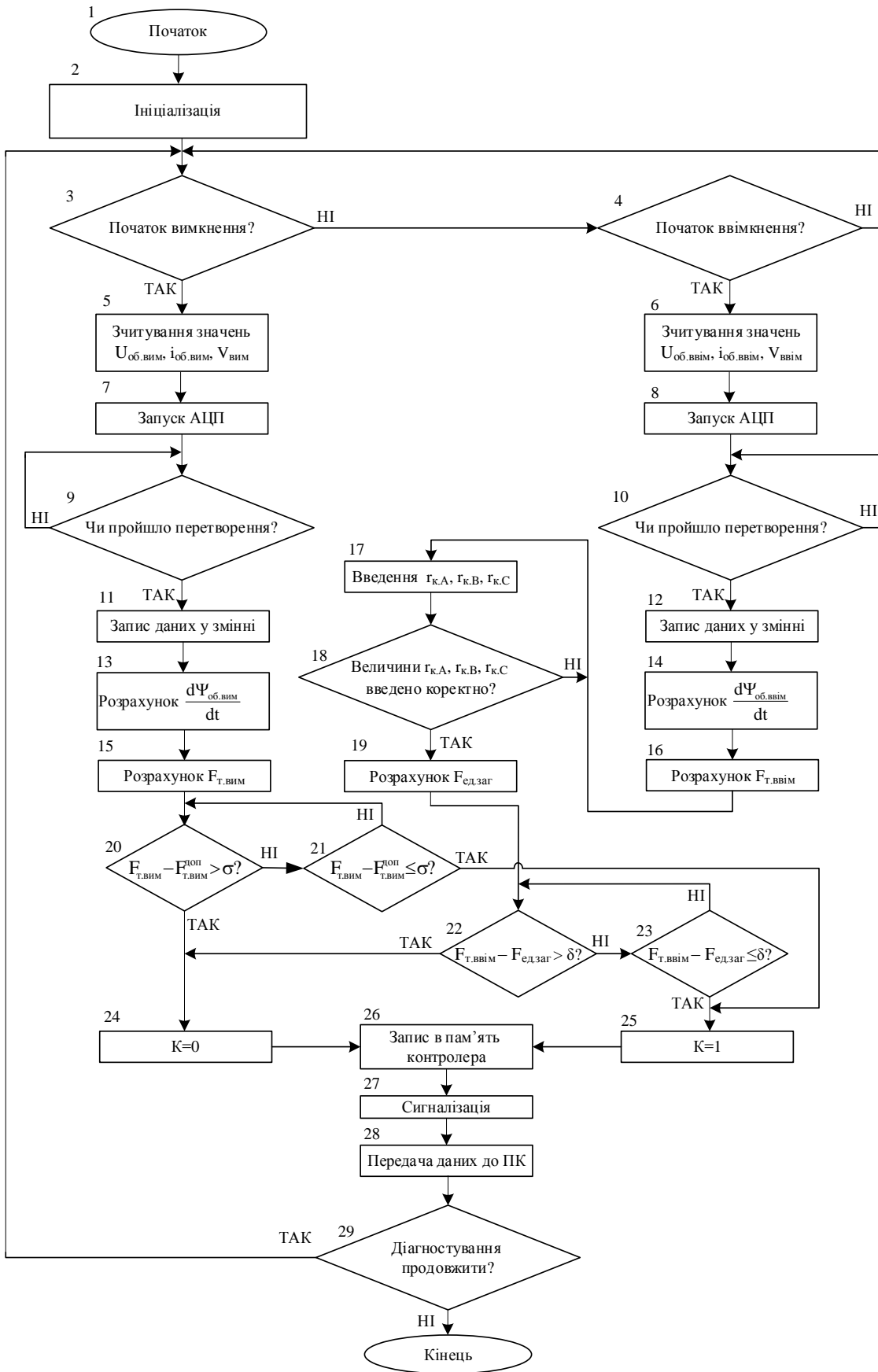


Рисунок 3.10 – Узагальнений алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача

- в блоках 27, 28 здійснюється виведення інформації на пристрій індикації та передачу інформації до ПК оператора.

3.7 Інтеграція реалізованих засобів

Наведені в попередніх підрозділах пристрої діагностування технічного стану електромагнітного привода та контактної системи вакуумного вимикача реалізовані таким чином, що кожен із запропонованих пристроїв має зв'язок із АРМ оператора за допомогою комунікаційного інтерфейсу. Кожен із реалізованих пристроїв дозволяє контролювати технічний стан електромагнітного привода та контактної системи вакуумного вимикача і працює в автономному режимі.

Управління усієї системи діагностування здійснюється з АРМ оператора за допомогою ПК із спеціальним програмним забезпеченням на базі сучасних SCADA-технологій (Supervisory Control And Data Acquisition - диспетчерське управління і збір даних). Застосування SCADA-технологій об'єднує методики вимірювання і вимірювальні прилади в єдиний інформаційно-вимірювальний комплекс, що дозволяє досягти високого рівня автоматизації у вирішенні завдань управління, вимірювання параметрів, збору, обробки, передачі, зберігання і відображення інформації [122].

Враховуючи те, що запропоновані у попередніх розділах пристрої діагностування технічного стану електромагнітного привода та контактної системи вимикача засновані на використанні сучасної мікропроцесорної техніки, що підтримують промислові протоколи та інтерфейси обміну інформацією, такі пристрої легко інтегрувати у автоматизовану систему діагностичного моніторингу обладнання підстанції. Загальна автоматизована система дозволяє проводити збір і обробку параметрів роботи різних видів електрообладнання на підстанції; оповіщувати оперативний персонал про виникнення аварійних режимів роботи електрообладнання; видавати рекомендації щодо проведення профілактичних заходів до електричного обладнання.

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНОГО ВИМИКАЧА

Важливим засобом дослідження роботи вимикачів є комп'ютерне моделювання їх роботи на основі математичних моделей. Комп'ютерне моделювання дозволяє відтворювати (імітувати) процеси функціонування вимикача в штатних і нештатних експлуатаційних режимах.

Електромагнітний привод відіграє важливу роль у роботі вакуумного вимикача. Дослідження електромагнітних характеристик, які впливають на роботу електромагніту постійного струму вакуумного вимикача, є складним процесом. Від правильного вибору методу розрахунку електромагнітних полів залежить точність роботи комп'ютерної моделі електромагнітного привода.

Існують польові та ланцюгові загальні методи розрахунку електромагнітних полів. Основні з них наведені на рис.4.1 [123].



Рисунок 4.1 – Основні методи розрахунку електромагнітних полів

Для аналітичних методів розрахунку по кінцевій формулі можна отримати числовий результат для будь-яких значень змінної. Також за

допомогою математичної формули є можливість проаналізувати взаємозв'язок між змінною і результатом. Недоліком аналітичних методів є залежність магнітної індукції або напруженості магнітного поля в точці від координат. Окремі аналітичні вирази вдається отримати в кінцевому вигляді або лише для невеликого числа простих випадків, або кінцеві вирази виходять настільки складними, що їх доводиться обробляти на ЕОМ і результат представляти в вигляді параметричних кривих.

Ефективним є метод скінченних елементів для розрахунку задач, пов'язаних із електромагнетизмом. В наш час популярними програмами для розрахунку магнітних полів є ANSYS, FEMM, Ansoft, Vector Fields, Cosmosm, FEMLAB, ELCUT [124]. Скінченно-елементні програми можна розділити на дві групи: програми для спеціалізованого розрахунку магнітних полів і програми загального призначення, які використовуються для вирішення багатьох науково-технічних задач. Програми для спеціалізованого розрахунку магнітних полів призначені лише для розрахунку двовимірних полів, що звужує область їх застосування. Програми загального призначення типу ANSYS, Ansoft, Vector Field і Cosmosm оснащені широким функціоналом, але складні у використанні і мають високу вартість. Оптимальним варіантом для вирішення поставленої задачі є використання спеціалізованої програми скінченно-елементного розрахунку FEMM.

Програма Finite Element Method Magnetics (Магнітні розрахунки методом скінченних елементів) дозволяє створювати моделі для розрахунку плоско-паралельного або плоско-меридіанного стаціонарного і квазістаціонарного магнітного і стаціонарного електростатичного та теплового полів, побудувати їх картини і визначити польові і колові параметри. Задачі розрахунку магнітних полів можуть бути як лінійні, так і нелінійні [125].

4.1 Комп'ютерна модель електромагнітного привода вакуумного вимикача

При реалізації методу скінченних елементів розрахункова область, в якій здійснюється розрахунок, розбивається на об'ємні (для об'ємних

полів) або плоскі (для плоско-паралельних полів) елементи кінцевої величини, всередині яких значення магнітного потенціалу апроксимуються кусково-плоскою функцією. Розміри і форми елементів можуть довільно змінюватися, а їх взаємні з'єднання можуть мати різну структуру. При виборі розмірів і форми елементів враховується очікуваний розподіл щільності енергії в межах розглянутої області.

Після розбивки розрахункової області на елементи і накладення граничних умов розраховуються коефіцієнти апроксимації, виходячи з мінімуму функціоналу, що визначає сумарну накопичену енергію системи за умови з'єднання потенціалів у вузлах. Вид функціоналу для феромагнітного середовища має вигляд [126]:

$$F(\mathbf{A}) = \int_V W(\vec{\mathbf{A}}) \cdot dV - \int_V \vec{\mathbf{J}} \cdot \vec{\mathbf{A}} \cdot dV, \quad (4.1)$$

де $W(\vec{\mathbf{A}})$ – питома енергія:

$$W(\vec{\mathbf{A}}) = \int \vec{\mathbf{H}} \cdot d\vec{\mathbf{B}}, \quad (4.2)$$

де V – об'єм, який займає феромагнетик;

$\vec{\mathbf{J}}$ – вектор щільності струму в обмотці електромагніту;

$\vec{\mathbf{A}}$ – векторний магнітний потенціал;

$\vec{\mathbf{B}}$ – вектор магнітної індукції;

$\vec{\mathbf{H}}$ – вектор напруженості магнітного поля.

Вектор магнітної індукції:

$$\vec{\mathbf{B}} = \text{rot} \vec{\mathbf{A}}. \quad (4.3)$$

Вектор напруженості магнітного поля:

$$\vec{\mathbf{H}} = v \cdot \vec{\mathbf{B}}, \quad (4.4)$$

де v – величина, яка обернено пропорційна магнітній проникності.

Для плоско-паралельного поля вектор електромагнітної сили, що діє на явір, визначається по заданому розподілу магнітної індукції:

$$\vec{\mathbf{Q}} = \frac{1}{\mu_0} \int \left((\vec{\mathbf{B}} \cdot \vec{\mathbf{n}}) \cdot \vec{\mathbf{B}} - \frac{1}{2} (B^2) \cdot \vec{\mathbf{n}} \right) \cdot d\mathbf{l}, \quad (4.5)$$

де l – довжина контуру інтегрування;

\vec{n} – вектор зовнішньої нормалі до елементарної ділянки контуру інтегрування dl .

В якості об'єкта для комп'ютерної моделі розглянуто електромагнітний привод вакуумного вимикача ВР0, виробник ТОВ «ВИСОКОВОЛЬТНИЙ СОЮЗ РЗВА».

Розрахункова модель (осесиметрична задача) магнітної системи досліджуваного електромагніту вакуумного вимикача у вимкненому положенні приведена на рис. 4.2.

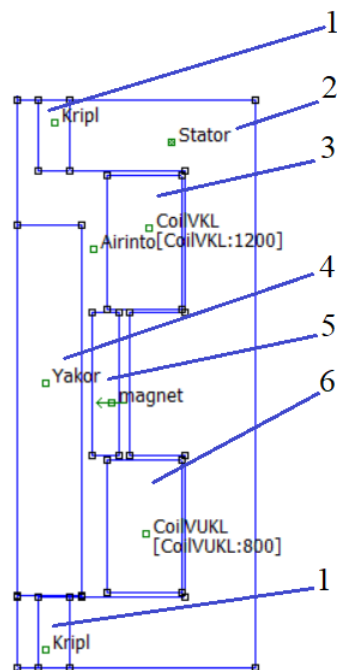


Рисунок 4.2 – Розрахункова модель магнітної системи електромагнітного привода вакуумного вимикача у програмі FEMM

На рис. 4.2: 1 – кріплення призми; 2 – магнітопровід; 3 – обмотка ввімкнення; 4 – осердя; 5 – постійний магніт; 6 – обмотка вимкнення.

Для моделювання роботи електропривода необхідно побудувати контури моделі, які відповідають реальним геометричним розмірам електромагніту. Після введення усіх опорних точок моделі необхідно ввести властивості усіх блоків і частин зовнішнього контуру моделі (граничні умови). Властивості для блоків комп'ютерної моделі наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики електромагнітного приводу вакуумного вимикача ВР0

№ п.п	Параметри	Значення
1	Тип електромагніту	Е-10
2	Матеріал пластин магнітопроводу	ОЦ 08кп ВГ-МТ-УР-2
3	Матеріал осердя	Сталь 10
4	Матеріал постійного магніту	Nd-Fe-B
5	Коерцитивна сила магніту, кА/м	860
6	Залишкова індукція, Тл	1,18
7	Кількість витків обмотки ввімкнення, шт	1200
8	Активний опір обмотки ввімкнення, Ом	13 ± 1,3
9	Тип проводу обмотки ввімкнення	ПЭТ-155-0,8
10	Кількість витків обмотки вимкнення, шт	800
11	Активний опір обмотки вимкнення, Ом	7,5 ± 0,7
12	Тип проводу обмотки вимкнення	ПЭТ-155-0,8

Після налаштування усіх необхідних властивостей блоків моделі та граничних умов встановлюються властивості електричних кіл в моделі електромагніту. Для блока Stator (магнітопровід електромагніту) задана крива намагнічування В-Н Curve, що відповідає технічним характеристикам ОЦ 08кп ВГ-МТ-УР-2. Для блоку Yacor (осердя) задана крива намагнічування В-Н Curve, що відповідає технічним характеристикам Сталь 10. Для обмотки ввімкнення CoilVKL задано кількість витків Number of Turns 1200, для обмотки вимкнення CoilVUKL кількість витків Number of Turns 800. Діаметр проводу для обмотки ввімкнення CoilVKL і вимкнення CoilVUKL задано в полі Strand dia 0.8 мм.

По заданих вхідних параметрах змодельована у програмі FEMM робота електромагнітного приводу у крайніх та проміжних положеннях. На рисунку 4.3 представлено розподіл магнітного поля в електромагніті у ввімкненому та вимкненому стані.

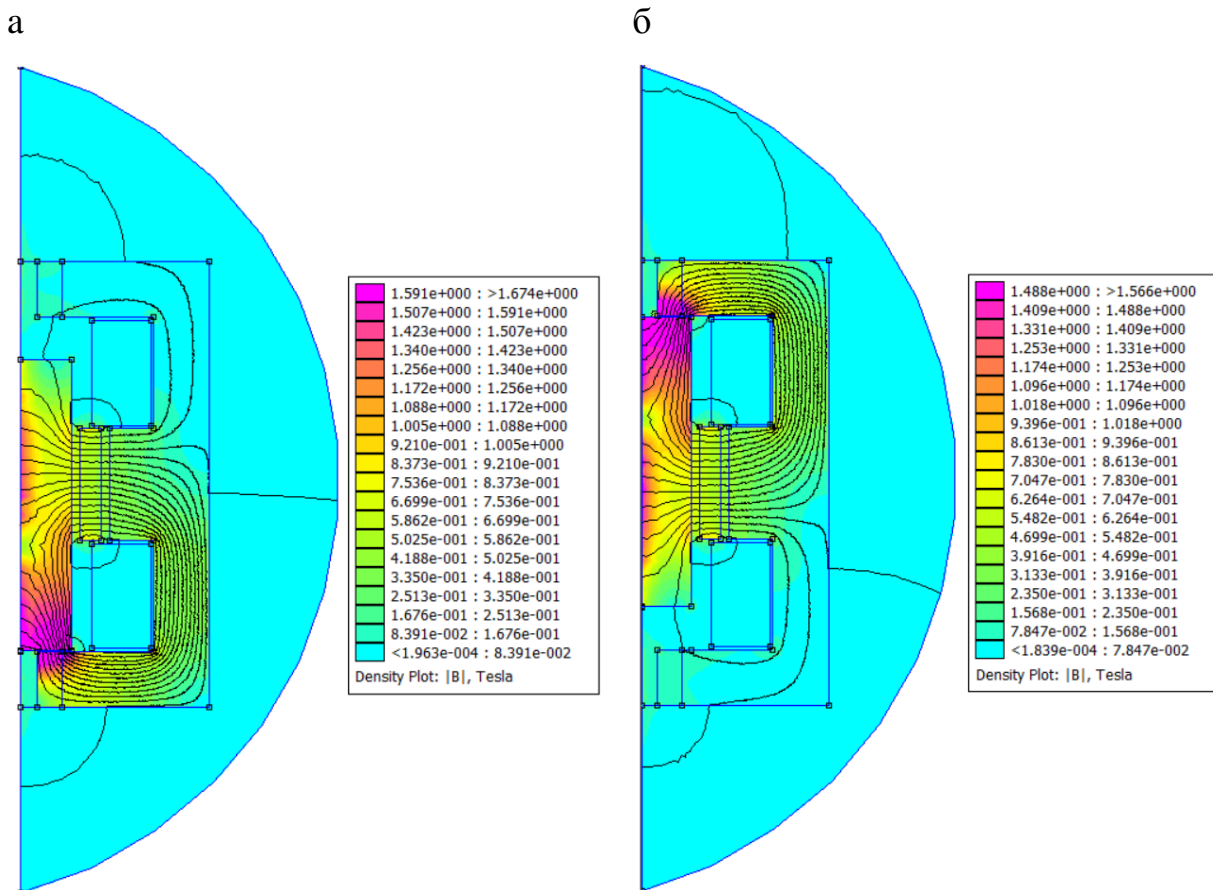


Рисунок 4.3 – Розподіл магнітного поля в електромагніті вакуумного вимикача у крайніх положеннях: а – електромагніт у вимкненому положенні; б – електромагніт у ввімкненому положенні

На рисунку 4.3 представлено окрім розподілу магнітного потоку при ввімкненому і вимкненому положенні електромагніту для стаціонарного магнітного поля і розподіл дійсної складової векторного магнітного потенціалу для квазістаціонарного магнітного поля. Модель відображає зміну густини ліній на екрані, виводить кольорову інтенсивність поля і будує вектори, які характеризують магнітне поле.

Розрахуємо силу утримання якоря електромагніту у програмі FEMM методом інтеграла тензора Максвелла. Результат моделювання представлено на рис. 4.4.

В результаті моделювання сила утримання якоря у вимкненому положенні вздовж осі z у програмі FEMM для електромагнітного приводу вимикача ВР0 становить 2993,98 Н. Через інтегрування вздовж контуру блока Яког визначаються складові сил, що діють на контур по осі

координат z і формують силу утримання електромагніту. Згідно паспортних даних на вимикач [114] сила утримання якоря електромагніту вакуумного вимикача ВР0 у положенні «ВИМКНЕНО» має бути 3000 ± 300 Н.

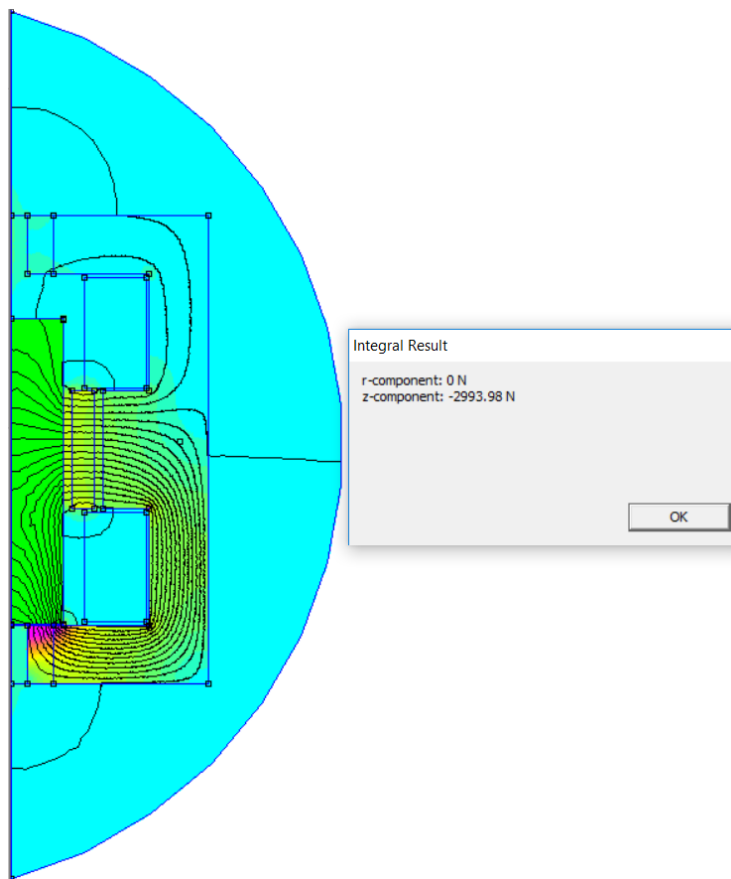


Рисунок 4.4 – Розрахунок сили утримання якоря електромагніту у вимкненому положенні методом інтеграла тензора Максвелла

Відповідно до отриманих значень можна зробити висновок, що результати моделювання коректні, оскільки вони знаходяться в діапазоні значень, які допускаються паспортними даними на вимикач.

Отримані результати опубліковані в роботі [127].

Детальніше структурні блоки та результати моделювання роботи електромагнітного привода вакуумного вимикача наведено у додатку.

4.2 Комп'ютерна модель системи виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача

Для комп'ютерного моделювання виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача використаємо пакет прикладних програм (ППП)

Matlab. ППП MatLab дозволяє вирішувати широке коло наукових та інженерних задач та містить в своєму складі програму Simulink [128].

Для моделювання системи виявлення зносу важливим є врахування впливу електричної дуги на процес комутації. Електрична дуга є завершальною стадією пробою газу при досить малому опорі джерела напруги, що забезпечує баланс енергії, яка виділяється в дузі у результаті протікання струму та розсіюється у навколишній простір [129]. Аналіз і розрахунок дугових процесів в дугогасильній камері залежить від спільного розгляду термогазодинамічних, електричних, дугових та механічних процесів. Перелічені умови значно ускладнюють пошук універсальних моделей і тому зараз не існує загальноприйнятих моделей, які б враховували усі процеси. Проте в деяких випадках можливо отримати прості вирази для розрахунку характеристики дуги, ґрунтуючись на аналізі важливості членів вихідних рівнянь та враховуючи результати теоретичних і експериментальних досліджень властивостей плазми.

В перехідних процесах для формування моделей враховуються результати експериментальних досліджень і їх поєднання з вихідними загальними теоретичними передумовами дозволяє побудувати адаптивні моделі дуги. Однією із таких моделей є модель дуги Майра. Принцип моделі Майра полягає у описі електричної дуги між контактами вимикача у вигляді нелінійного опору R_e [130], [131]. Модель дуги Майра дозволяє проаналізувати процеси переходу струму через нуль в електричних апаратах змінного струму під час комутації [132].

Математичну модель дуги Майра можна записати у вигляді [133]:

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = -\frac{1}{R_e} \frac{dR_e}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{U_D I}{P_{роз}} - 1 \right) = \frac{U_D}{I} \left(\frac{1}{U_D} \frac{dI}{dt} - \frac{I}{U_D^2} \frac{dU_D}{dt} \right), \quad (4.6)$$

де G – провідність дуги,

τ_m – стала часу дуги Майра,

U_D – напруга дуги;

I – струм дуги;

$P_{роз}$ – потужність розсіювання дуги.

Стала часу дуги Майра запишеться:

$$\tau_M = \frac{H_0}{P_{роз}}, \quad (4.7)$$

де H_0 – постійна тепломісткість дуги.

Рівняння (4.6) є математичним виразом динамічної вольт-амперної характеристики дуги. Модель Майра дозволяє визначити гасіння або негасіння дуги в залежності від зовнішніх умов (параметрів схеми заміщення мережі) та внутрішніх (взаємодія дуги із охолоджуючим середовищем, властивостей середовища та параметрів дугогасильного пристрою).

Структурна схема комп'ютерної моделі виявлення зносу контактної системи при ввімкненні вакуумного вимикача зображена на рис. 4.5.

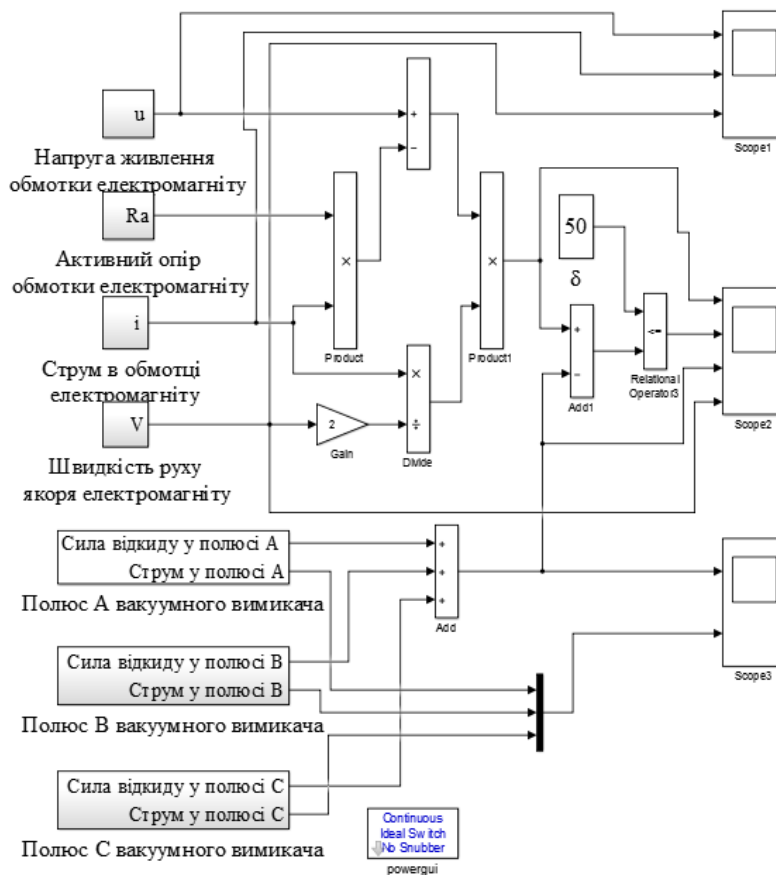


Рисунок 4.5 – Структура моделі виявлення зносу контактної системи при ввімкненні вакуумного вимикача

Дана комп'ютерна модель описує процес ввімкнення вакуумного вимикача на струми короткого замикання. Модель складається із розрахунку тягового зусилля електромагнітного привода та визначення сили відкиду по кожному полюсу вакуумного вимикача. Тягове зусилля

електромагніту розраховується за електричними параметрами обмотки ввімкнення (напряга живлення обмотки, струм який протікає через обмотку, активний опір обмотки) та механічними параметрами (швидкість руху якоря електромагніту в процесі ввімкнення вимикача). Сили відкиду у кожному із полюсів розраховуються відповідно до формули (2.19). Фізичні параметри контактів для кожного полюсу задаються окремо. В якості миттєвого значення струму, який протікає через полюси вимикача, прийнято величину струму дуги математичної моделі Майра. Модель горіння дуги Майра представлена окремо для кожного полюса через вбудовану в пакеті SimPowerSystems команду power_arcmodels. Загальна сила відкиду визначається з врахуванням сил відкиду в кожному із полюсів вакуумного вимикача.

Детальна структура комп'ютерної моделі для розрахунку сили відкиду для полюсу А представлена рис. 4.6.

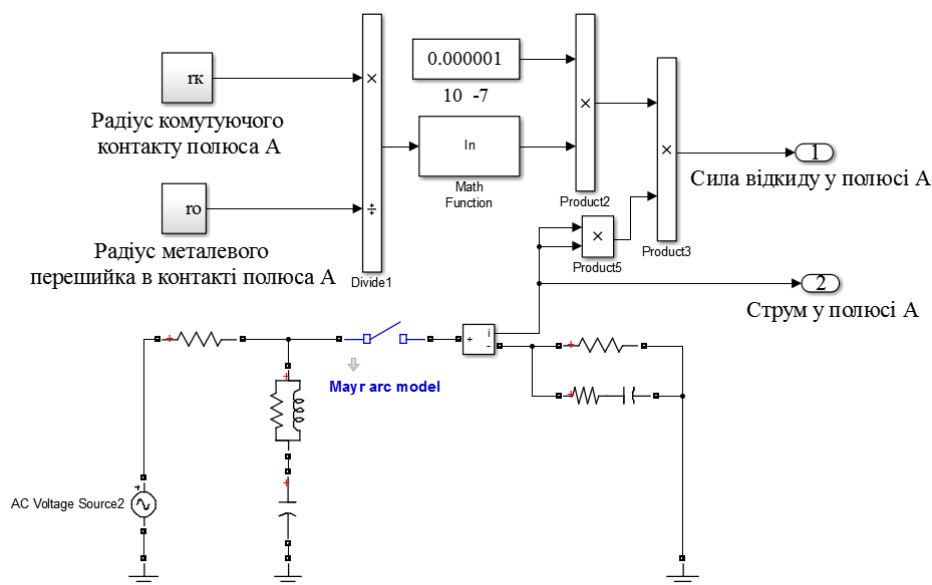


Рисунок 4.6 – Структура моделі визначення сили відкиду у полюсі А вакуумного вимикача

Комп'ютерна модель на рисунку 4.6 дозволяє розрахувати силу відкиду у полюсі А, отримати значення струму горіння дуги. Модель (2) дозволяє змінювати фізичні властивості технічного стану контактів полюса А та параметри електричної мережі. Величини радіусів комутуючих контактів полюсів $r_{k,A}$, $r_{k,B}$, $r_{k,C}$ приймаємо 36 мм, а радіуси металевих

перешийку в контактi полюсiв; $r_{0,A}$, $r_{0,B}$, $r_{0,C}$ задаємо 16 мм для контактної системи вакуумного вимикача [134].

Процес визначення зносу контактної системи вакуумного вимикача передбачає визначення тягового зусилля електромагнітного привода, загальну електродинамічну силу відкиду для усієї контактної системи та порівняння їх між собою. Оскільки для надійної роботи вакуумного вимикача необхідно забезпечити необхідне контактне натискання, згідно паспортних даних, на вимикач, величину δ приймаємо 50 Н. Для різних виробників та типів комутаційного обладнання величина δ буде різною. Результати моделювання електричних та механічних параметрів електромагнітного привода при ввімкненні вакуумного вимикача представлено на рис. 4.7.

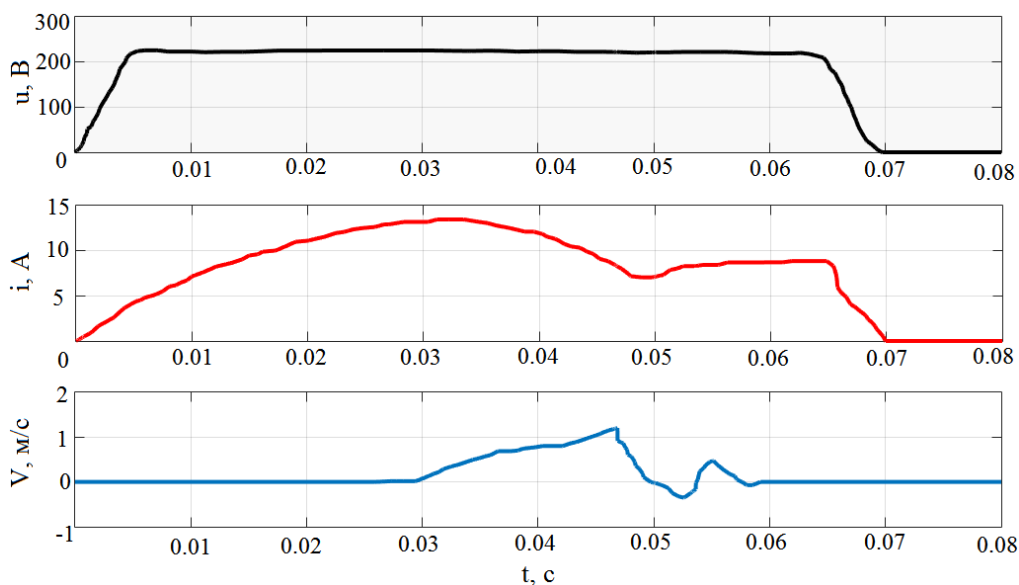


Рисунок 4.7 – Результати моделювання електричних параметрів (напруги і струму обмотки ввімкнення) та механічних (швидкості руху якоря) електромагнітного привода при ввімкненні вакуумного вимикача

Для моделювання використовуються величини параметрів (струму, напруги, швидкості руху якоря електромагніту) з осцилограм при нормальному режимі роботи вимикача.

На рисунку 4.8 зображено результати роботи комп'ютерної моделі виявлення зносу контактної системи.

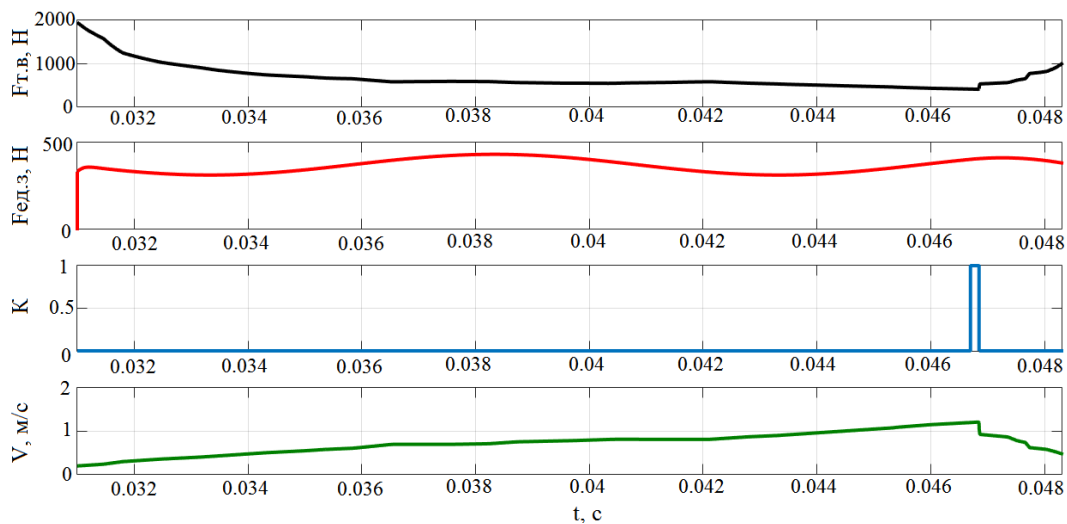


Рисунок 4.8 – Результати моделювання виявлення та попередження зносу контактної системи при ввімкненні вакуумного вимикача

У моделі вимикача початок замикання контактів (ввімкнення вимикача) було задано при $t=0,465$ с. Комп'ютерна модель зафіксувала знос контактів (перевищення допустимої умови) протягом $t=0.467\dots0.468$. Таким чином, подальша експлуатація в майбутньому може призвести до недовмикання вакуумного вимикача (відкид силових контактів). На графіку коефіцієнт K змінив своє значення з $K=1$ на $K=0$, але фактично контактна система залишається у зношеному стані.

Комп'ютерна модель для режиму вимкнення вимикача складається із розрахунку діючого тягового зусилля електромагніту та порівняння його із мінімально допустимим тяговим зусиллям протидії. На рисунку 4.9 зображена структура комп'ютерної моделі виявлення зносу контактної системи при вимкненні вакуумного вимикача.

У випадку перевищення умови, яка описана рівнянням (2.28), система формує сигнал зношення контактної системи.

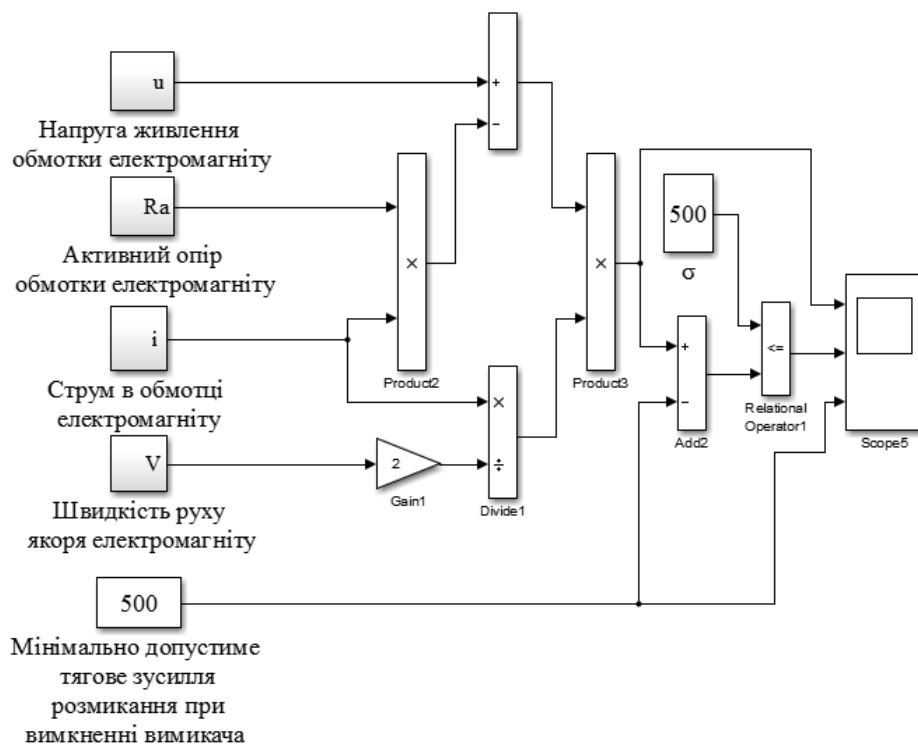


Рисунок 4.9 – Структура моделі виявлення зносу контактної системи при вимкненні вакуумного вимикача

На рис. 4.10 представлено результати моделювання при вимкненні вакуумного вимикача.

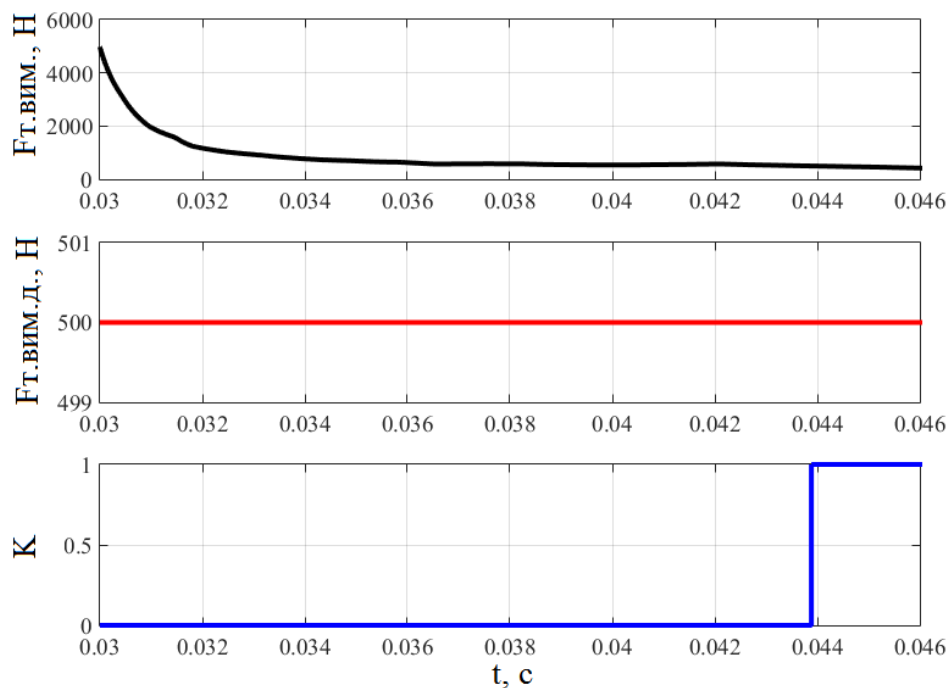


Рисунок 4.10 – Результати моделювання виявлення та попередження зносу контактної системи при вимкненні вакуумного вимикача

Згідно рекомендацій виробників комутаційного обладнання [82] значення σ при вимкненні вимикача приймаємо 500 Н.

Отримані результати з різним ступенем деталізації опубліковані в роботах [135], [136].

4.3 Обробка експериментальних даних

Для перевірки адекватності запропонованої у другому розділі математичної моделі та точності математичного моделювання проведено натурний експеримент роботи електромагнітного привода вакуумного вимикача ВР0-10-12,5/630 У2 на підприємстві СО «ВВЕМ» ПАТ «Вінницяобленерго».

Структурна схема експериментальної установки для дослідження вебер-амперної характеристики електромагнітного привода наведена на рис. 4.11.

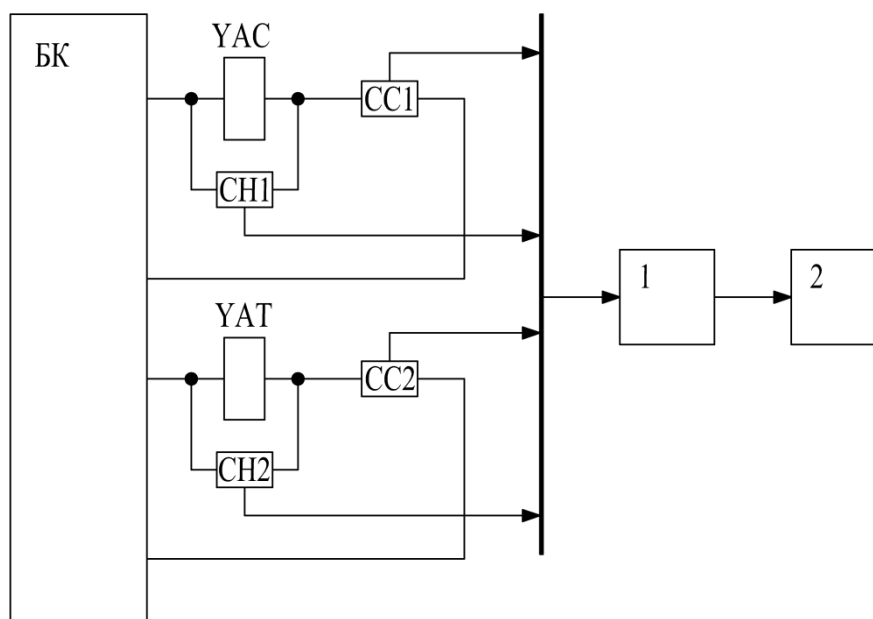


Рисунок 4.11 – Структурна схема експериментальної установки

Управління роботою вимикача здійснюється за допомогою блоку керування БК. Для отримання вебер-амперних характеристики обмоток електромагнітного привода здійснюється ввімкнення та вимкнення вакуумного вимикача ВР0. Під час ввімкнення вимикача проводяться вимірювання струму, який протікає через обмотку ввімкнення УАС (датчик струму СС1), та напруги на обмотці ввімкнення УАС (датчик

напруги СН1). Під час вимкнення вимикача проводяться вимірювання струму, який протікає через обмотку вимкнення УАТ (датчик струму СС2), та напруги на обмотці вимкнення УАТ (датчик напруги СН2). Після вимірювання струму та напруги на обмотках здійснюється вимірювання їх активних складових опорів. Отримання вимірюваної інформації здійснюється за допомогою інформаційно-вимірювальної системи 1, а результати вимірювання та розрахунку виводяться і зберігаються на персональний комп'ютер 2.

Зовнішній вигляд експериментальної установки зображено на рис. 4.12.



Рисунок 4.12 – Зовнішній вигляд експериментальної установки

Відповідно до формул (2.1)-(2.4) розраховано значення поточкозчеплення на кожному кроці вимірювання для обмоток ввімкнення та вимкнення при комутації вакуумного вимикача.

Результати дослідів при вимірюванні струму та напруги обмоток електромагніту під час комутації вакуумного вимикача наведено на рисунку 4.13:

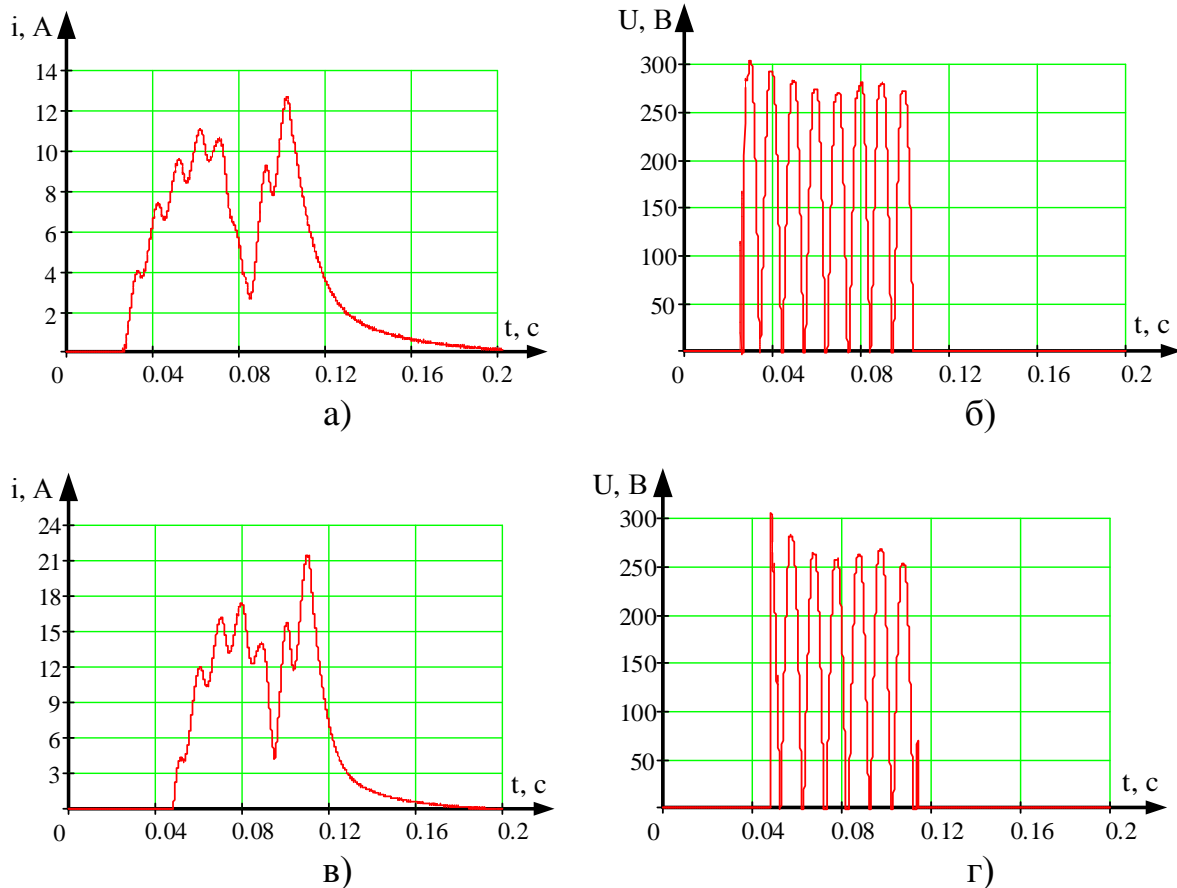


Рисунок 4.13 – Графіки струму та напруги при вмиканні та вимиканні вимикача: а) струм обмотки ввімкнення при вмиканні вимикача; б) напруга на обмотці ввімкнення при вмиканні вимикача; в) струм обмотки вимкнення при вимиканні вимикача; г) напруга на обмотці вимкнення при вимиканні вимикача

В результаті багаторазового вимірювання було з'ясовано, що оптимальна кількість точок для вимірювання електричних параметрів (із періодичністю вимірювання 0,00004 с) для обмотки ввімкнення складає 2500 значень, для обмотки вимкнення — 2700 значень.

Для прикладу розрахуємо диференціал потокозчеплення для обмотки вимкнення. Для цього в довільній формі вибрано крок вимірювання $i=1901$. Відповідно диференціал потокозчеплення при $i=1901$ згідно вимірних значень струму, напруги та активного опору:

$$d\psi_{1901} = (U_{1901} - I_{1901} \cdot R_a) \cdot (t_{1901} - t_{1900}) = (229.646 - 14.3 \cdot 8.3) \cdot (0.076 - 0.07596),$$

$$d\psi_{1901} = 0.0044(\text{Вб}).$$

Відповідно до формули (2.4) величина потокозчеплення ($i=1901$):

$$\Psi_{1901} = (\Psi_{1900} + d\Psi_{1901}) = 2,10225 + 0,0044 = 2,107(\text{Вб}).$$

Результати розрахунку для інших значень потокозчеплення для обмотки вимкнення представлені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Дані для розрахунку потокозчеплення обмотки вимкнення

№ i	$t_i, \text{с}$	$U_i, \text{В}$	$I_i, \text{А}$	$d\Psi_i, \text{Вб}$	$\Psi_i, \text{Вб}$
1	0	0	0	0	0
2	0,00004	0	0	0	0
3	0,00008	0	0	0	0
...					
1900	0,07596	227,313	14,264	0,00436	2,10225
1901	0,076	229,646	14,3	0,0044	2,107
1902	0,07604	232,3481	14,33	0,00453	2,1112
...					
2748	0,10988	183,437	21,514	0,000195	4,0584
2749	0,10992	180,92	21,45	0,000115	4,0586
2750	0,10996	178,403	21,483	0,0000036	4,0585

Відповідно до розрахованих значень потокозчеплення побудуємо вебер-амперну характеристику обмотки вимкнення електромагніту вакуумного вимикача. Результати розрахунку зображено на рисунку 4.14.



Рисунок 4.14 – Вебер-амперна характеристика обмотки вимкнення електромагніту вакуумного вимикача

Розрахуємо вебер-амперну характеристику для обмотки ввімкнення. Результати розрахунку наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Дані для розрахунку потокозчеплення обмотки ввімкнення

№ i	t_i, c	U_i, B	I_i, A	$d\Psi_i, B\delta$	$\Psi_i, B\delta$
1	0	0	0	0	0
2	0,00004	0	0	0	0
3	0,00008	0	0	0	0
...					
1020	0,04076	279,82	6,853	0,0077	2,313
1021	0,0408	278,37	6,82	0,00764	2,321
1022	0,04084	276,9	6,95	0,0075	2,328
...					
2557	0,10224	170,31	12,71	0,000305	6,657
2558	0,10228	167,082	12,646	0,000208	6,659
2559	0,10232	163,65	12,615	0,000087	6,659

Згідно отриманих значень побудуємо вебер-амперну характеристику обмотки ввімкнення при ввімкненні електромагніту вакуумного вимикача. Результати розрахунку зображено на рисунку 4.15.



Рисунок 4.15 – Вебер-амперна характеристика обмотки ввімкнення електромагніту вакуумного вимикача

Вебер-амперні характеристики на рисунках 4.14 і 4.15 для обмоток вимкнення та ввімкнення електромагніту вакуумного вимикача приймаємо еталонними, оскільки вимикач є справним і відповідає паспортним параметрам. Для перевірки адекватності роботи запропонованої математичної моделі було зімітовано несправності при ввімкненні та при вимкненні вакуумного вимикача. При ввімкненні було розрегульовано блок-контакти положення вимикача, що призвело до раннього відключення живлення від обмотки ввімкнення. При вимкненні вакуумного вимикача було зміщено напрямок руху осі приводної тяги, що призвело до додаткового навантаження при вимкненні вимикача.

Порівняння вебер-амперних характеристик для справного електромагнітного привода вимикача та привода із дефектом при ввімкненні вимикача наведено на рисунку 4.16.

Порівняння вебер-амперних характеристик для справного електромагнітного привода вимикача та привода із дефектом при вимкненні вимикача наведено на рисунку 4.17.

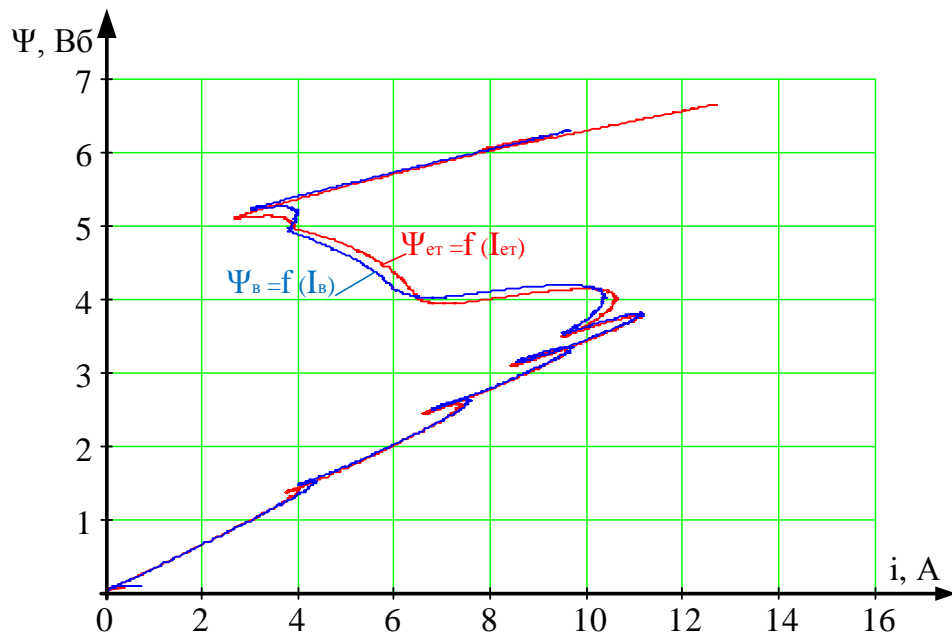


Рисунок 4.16 – Порівняння вебер-амперних характеристик справного $\Psi_{ер} = f(I_{ер})$ та з дефектом $\Psi_B = f(I_B)$ електромагнітного привода вакуумного вимикача для обмотки ввімкнення

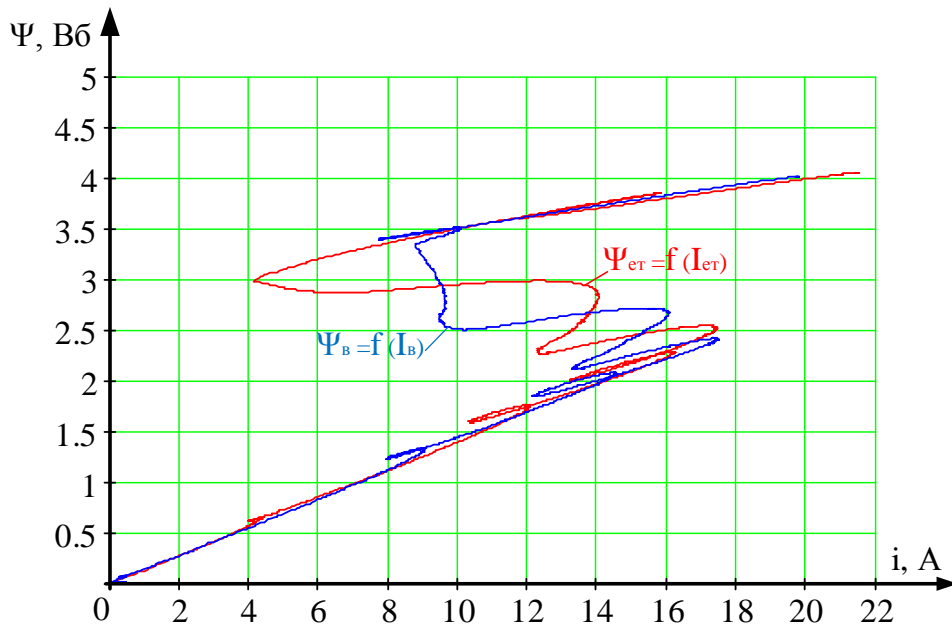


Рисунок 4.17 – Порівняння вебер-амперних характеристик справного $\Psi_{ер} = f(I_{ер})$ та з дефектом $\Psi_B = f(I_B)$ електромагнітного привода вакуумного вимикача для обмотки вимкнення

Отримані дані дозволяють розрахувати коефіцієнти відхилення для обмоток ввімкнення та вимкнення електромагнітного привода вакуумного вимикача. Для прикладу розрахуємо відносний квадрат відхилення між еталонними та поточними значеннями для обмотки ввімкнення. Для цього в довільній формі вибрано крок вимірювання $i=1021$. Відповідно відносний квадрат відхилення при $i=1021$ для вимірних і еталонних значень по формулі (2.5):

$$\delta\Psi_{1021}^2 = \left(\frac{(\Psi_{1021\text{в}} - \Psi_{1021\text{ет}})}{\Psi_{1021\text{ет}}} \right)^2 = \left(\frac{(2,39 - 2,32)}{2,32} \right)^2 = 0,011.$$

Для решти значень результат розрахунку відносних квадратів відхилення для обмотки ввімкнення електромагнітного привода наведено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Дані для розрахунку відхилення між еталонними значеннями вебер-амперної характеристики для обмотки ввімкнення вимикача

№, i	$\Psi_{i\text{ет}}$, Вб	$\Psi_{i\text{в}}$, Вб	$\delta\Psi_i^2$
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
...			
1020	2,31	2,39	0,0011
1021	2,32	2,39	0,0011
1022	2,32	2,4	0,001
...			
2557	6,65	0	1
2558	6,65	0	1
2559	6,65	0	1

За результатами розрахунку таблиці 2.3 визначимо загальний коефіцієнт відхилення між еталонними та поточними значеннями вебер-амперної характеристики обмотки ввімкнення вакуумного вимикача по формулі (2.6):

$$K_B = 0_1 + \dots + 0.011_{1020} + \dots + 1_{2559} = 321.022.$$

В даному випадку технічний стан комутаційного апарата є на межі несправності. Подальша експлуатація вимикача із розрегульованими блок-контактами призведе до недовмикання вакуумного вимикача.

Для прикладу аналогічно розрахуємо відносний квадрат відхилення між еталонними та поточними значеннями для обмотки вимкнення. Для цього в довільній формі вибрано крок вимірювання $i=1901$. Відповідно відносний квадрат відхилення при $i=1901$ для виміряних і еталонних значень по формулі (2.5):

$$\delta\Psi_{1901}^2 = \left(\frac{(\Psi_{1901\text{В}} - \Psi_{1901\text{ет}})}{\Psi_{1901\text{ет}}} \right)^2 = \left(\frac{(2,38 - 2,1)}{2,1} \right)^2 = 0,017.$$

Результат розрахунку для решти значень квадратів відхилення обмотки вимкнення електромагнітного привода представлено у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Дані для розрахунку відхилення між еталонними значеннями вебер-амперної характеристики для обмотки вимкнення вимикача

№, i	$\Psi_{i\text{ет}}$, Вб	$\Psi_{i\text{В}}$, Вб	$\delta\Psi_i^2$
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
...			
1900	2,1	2,39	0,018
1901	2,1	2,38	0,017
1902	2,11	2,38	0,016
...			
2748	4,05	0	1
2749	4,06	0	1
2750	4,06	0	1

Загальний коефіцієнт відхилення між еталонними та поточними значеннями вебер-амперної характеристики для обмотки вимкнення при вимкненні вакуумного вимикача розрахуємо по формулі (2.6):

$$K_{\text{В}} = 0_1 + \dots + 0.018_{1900} + \dots + 1_{2750} = 209,074.$$

При вимкненні вимикача технічний стан електромагніту також є на межі несправності, оскільки подальше тестування вимикача призвело до збільшення струму в обмотці вимкнення.

Порівняємо результати розрахунку потокозчеплення, отримані при моделюванні у програмі FEMM та розраховані по експериментальних даних у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Порівняння результатів розрахунку потокозчеплення дослідним шляхом та моделюванням у програмі FEMM

Процес	Експериментальні дані			Потокозчеплення обмотки, розраховане за експериментальними даними Ψ , Вб	Потокозчеплення обмотки, розраховане у FEMM Ψ , Вб
	Струм I, А	Напруга U, В	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

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновки, що розрахункові значення потокозчеплення для обмоток електромагніту вакуумного вимикача підтверджуються моделюванням у програмі FEMM. Результати моделювання у FEMM наближені до значень потокозчеплення, розрахованих за результатами експерименту.

Отже, наведений спосіб отримання вебер-амперної характеристики є адекватним і розрахункові дані потокозчеплення можуть бути використані для діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача на основі аналізу вебер-амперних характеристик обмоток в процесі його експлуатації.

ВИСНОВКИ

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

Основні наукові та практичні результати роботи є такими:

1. Розроблено математичну модель для діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача на основі аналізу вебер-амперних характеристик, застосування якої 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 дозволяє визначати знос комутаційної системи при ввімкненні та вимкненні вакуумного вимикача.

3. Розроблено математичну модель для оцінки робочого стану 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. На основі математичних моделей діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача розроблено алгоритми та функціональні схеми мікропроцесорних засобів, застосування яких дозволяє здійснювати діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача, що, в свою чергу, дозволяє з високою достовірністю визначати його технічний стан.

5. На основі математичної моделі діагностування електромагнітного привода за вебер-амперними характеристиками розроблена структурна схема пристрою, застосування якого дозволяє здійснювати діагностування електромагнітного привода в процесі роботи вакуумного вимикача.

6. На основі математичної моделі оцінки робочого стану контактної системи вакуумного вимикача розроблені структурні схеми пристроїв, поєднання яких дозволяє реалізувати комплексний пристрій визначення робочого стану контактної системи та формувати дії для оперативного персоналу щодо регулювання рухомих контактів полюсів вимикача.

7. Розроблено комп'ютерну модель електромагнітного привода вакуумного вимикача у програмному середовищі FEMM та комп'ютерну модель виявлення та попередження зносу контактної системи вакуумного вимикача у програмі у Matlab Simulink, які адекватно відображають та підтверджують достовірність запропонованих математичних моделей та їх технічні реалізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] K. Niayesh, and M. Runde, *Power Switching Components: Theory, Applications and Future Trends*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2017.

[2] P. Gill, *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing. Second Edition*. Bosa Roca, United States: Taylor & Francis Inc, 2009.

[3] R. Smeets, L. Sluis, M. Kapetanovic, D. Peelo, and A. Janssen, *Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2015.

[4] D. F. Peelo, *Current Interruption Transients Calculation*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.

[5] S.G. Jeyaraj, and Y. Habtay, «Effective and efficient circuit breaker analysis», in *IET Conference on reliability of transmission and distribution networks (RTDN 2011)*, London, 2011, pp. 157-162.

[6] В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, та М. В. Кутіна, *Діагностика електрообладнання: навчальний посібник*. Вінниця: ВНТУ, 2014.

[7] В. Я. Кучер, *Основы технической диагностики и теории надежности*. Санкт-Петербург, Россия: СЗТУ, 2004.

[8] В. М. Казак, *Основы контролю та технічної діагностики*. Київ, Україна: НАУ, 2013.

[9] А. И. Хальясма, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин, и Д. А. Глушков, *Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие*. Екатеринбург: Издательство Урал. Ун-та, 2015.

[10] W. Hauschild, and E. Lemke, *High-Voltage Test and Measuring Techniques*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2019.

[11] Г. М. Михеев, *Цифровая диагностика высоковольтного оборудования*. М.: Изд. дом “ДОДЭКА”, 2009.

[12] ПУЕ-2017. *Правила улаштування електроустановок*. Київ: Міненерговугілля України, 2017.

[13] СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. *Норми випробування електрообладнання*. Харків: Мінпаливенерго України норми, 2009.

[14] В. И. Григорьев и др., *Приборы и средства диагностики электрооборудования и измерений в системах электроснабжения: Справочное пособие*. М.: Колос. - 2006.

[15] Е. Е. Привалов, *Диагностика электроэнергетического оборудования: учебное пособие*. М.: Директ-Медиа, 2015.

[16] Е. Е. Привалов, *Диагностика электроэнергетического оборудования*. Ставрополь: Параграф, 2014.

[17] В. М. Левин, *Диагностика и эксплуатация оборудования электрических сетей*. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011.

[18] Г. М. Михеев, *Электростанции и электрические сети. Диагностика и контроль оборудования*. М.: Изд. дом «Додэка-XXI», 2010.

[19] В. Н. Кольцов, и Ю. М. Миронюк, «Современные мобильные комплексы для диагностики объектов электроснабжения», *Контроль. Диагностика*. № 12. с. 39-43, 2014.

[20] Н. И. Овчаренко, *Автоматизированный анализ состояния высоковольтного оборудования*. М.: Изд. Дом МЭИ, 2009.

[21] В. А. Шахнин, *Методы и средства диагностики высоковольтного оборудования: учеб. пособие*. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018

[22] Обзор отечественных и импортных приборов для контроля высоковольтных выключателей, 2020. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://skbpribor.ru/info/reviews/5746>. Дата обращения: Июнь. 1, 2020.

[23] Прибор контроля высоковольтных выключателей ПКВ/М7, 2020. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://skbpribor.ru/instrument/pkv-m7/>. Дата обращения: Июнь. 1, 2020.

[24] Б. Г. Стогній, М. Ф. Сопель, О. І. Стасюк, В. В. Сорочинський, та О. С. Михайлевський «Інформаційно-діагностичний комплекс РЕГІНА», *МПК G06F 11/00 (2014.01)*. № 88652, Бер. 25, 2015.

[25] «BDM» – система моніторинга и діагностики дефектов комутаційного обладнання, 2020. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://dimrus.ru/manuals/bdm.pdf>. Дата звернення: Іюнь. 1, 2020.

[26] О. Ф. Буткевич, та В. Л. Тутик, «Моніторинг та діагностування електроенергетичних об'єктів та систем України на базі комплексів «Регіна», *Гідроенергетика України*, № 3, с. 46-49, 2010.

[27] Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, О. Ф. Буткевич, М. Ф. Сопель, О. Б. Рибіна, та В. Л. Тутик, «Система збору та обробки інформації, що реєструється комплексами «Регіна-Ч», *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, Вип. 29, с. 35-46, 2011.

[28] О. Є. Рубаненко, *Вдосконалення методів і засобів діагностування високовольтних вимикачів: монографія*. Вінниця: ВНТУ, 2012.

[29] В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, та С. В. Мисенко, «Вдосконалення методів діагностування високовольтних вимикачів», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с. 109-113, 2012.

[30] В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, та С. В. Мисенко, «Досвід впровадження та забезпечення надійності елегазових вимикачів в умовах експлуатації», *Наукові праці ВНТУ*, №1, с. 1-7, 2013.

[31] В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, та С. В. Мисенко, «Визначення діагностичних параметрів оцінки технічного стану високовольтного вимикача», *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 3, с. 33-39, 2014.

[32] В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, та С. В. Мисенко, «Визначення технічного стану елегазових високовольтних вимикачів в умовах експлуатації», *Вісник НТУ «ХПІ»*, №60 (1102), с. 57-68, 2014.

[33] О. Є. Рубаненко, Ю. Г. Ведміцький, та С. В. Мисенко, «Вдосконалення методів визначення технічного стану високовольтних вимикачів», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 78-86, 2016.

[34] Є. І. Удод, Р. М. Горбей, та В. Ф. Чернов, *Діагностування електроустановок 0,4–750 кВ засобами інфрачервоної техніки*. К.: «КВІЦ», 2007.

[35] В. М. Кутін, О. О. Шпачук, М. В. Нікітчук, та В. М. Світко, «Автоматизація аналізу теплового стану електрообладнання», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 51-56, 2018.

[36] В. П. Вавилов, и А. Н. Александров, *Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике*. М.: Энергопрогресс, 2014.

[37] С. А. Бажанов, *Инфракрасная: диагностика электрооборудования РУ*. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2000.

[38] Е. Е. Привалов, *Диагностика и тепловизионный контроль электроэнергетического оборудования: учебное пособие*. Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ, 2014.

[39] Д. Ю. Уразов, «О преимуществах тепловизионного метода анализа работы электрооборудования», *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. № 3 (53), с. 51-53, 2012.

[40] А. Ю. Хренников, и М. Г. Сидоренко, «Тепловизионное обследование электрооборудования подстанций и промышленных предприятий и его экономическая эффективность», *Рынок Электротехники*, № 2 (14), с. 96-100, 2009.

[41] H. Tianshu, L. Bo, W. Yaowei, L. Tianci, S. Yuanlin, S. Yang, H. Yang, H. Wenfeng, L. Chenyang, and H. Lin, «Research and application of infrared leak detection technology for SF6 equipment», in *2018 6th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT 2018)*, Jinan, 2018, pp. 189-193.

[42] Y. Kang, Y. Li, T. Wang, L. Guo, G. Yang and N. Zhang, «Detection and analysis of internal abnormal heating for high voltage switchgear based on

infrared thermometric technology», in *2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, Chengdu, 2017, pp. 199-203.

[43] B. A. Freer, S. P. Iannce, J. M. Manahan, R. Rothenberger, and J. Bonaccio, «Infrared sensor array circuit breaker monitoring», *U.S Patent Appl. US10371576B2*, Aug. 6, 2019.

[44] M. Landry, F. Leonard, C. Landry, R. Beauchemin, O. Turcotte and F. Brikci, «An Improved Vibration Analysis Algorithm as a Diagnostic Tool for Detecting Mechanical Anomalies on Power Circuit Breakers» in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, 2008, pp. 1986-1994.

[45] J. V. Anjaneyulu, and G. K. Mohan Rao, «Analysis and Vibration Behavior of a Medium Voltage Spring Operated Switch Gear Mechanism used for Circuit Breaker» in *16th National Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013)*, IIT Roorkee, India, 2013, pp. 972-979.

[46] О. Є. Рубаненко, С. В. Мисенко, та О. О. Рубаненко, «Вплив вібрації на подальшу роботу високовольтних вимикачів», *Вібрації в техніці та технологіях*, № 1 (69), с. 72-77, 2013.

[47] П. М. Сви, *Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения*. М.: Энергоатомиздат, 1992.

[48] А. И. Ящура, *Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: справочник*. М.: Энас, 2012.

[49] С. И. Чичев, В. Ф. Калинин, и Е. И. Глинкин, *Система контроля и управления электротехническим оборудованием подстанций*. М.: Спектр, 2011.

[50] Стабилизированный источник постоянного тока РИП-2. Руководство по эксплуатации, 2020. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.elizpribor.ru/files/products/rip-2.pdf>. Дата обращения: Июн. 1, 2020.

[51] B10E AC/DC Voltage Power Supply, 2020. [Online]. Available: http://www.steoelectric.be/user/image/megger-b10e_ds_en_v03.pdf. Accessed on: June 1, 2020.

[52] A. Gadyuchko, and E. Kallenbach, «Magnetische Messung - Neue Wege der Funktionsprüfung bei der Herstellung von Magnetaktoren», in *Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik*, Würzburg, 2010, pp. 59-64.

[53] M. Ruderman, and A. Gadyuchko, «Phenomenological Modeling and Measurement of Proportional Solenoid with Stroke-dependent Magnetic Hysteresis Characteristics», *IEEE International Conference on Mechatronics*, Takamatsu, 2013, pp. 180-185.

[54] Д. В. Шайхутдинов, С. Г. Январев, К. М. Широков, и Р. И. Леухин, «Метод технической диагностики межвитковых замыканий электромагнитных устройств на базе их вебер-амперных характеристик», *Современные наукоемкие технологии*, № 8, с. 69–71, 2014.

[55] Д. В. Шайхутдинов, С. Г. Январев, К. М. Широков, и Ш. В. Ахмедов, «Метод технической диагностики нарушений геометрических параметров магнитной системы электромагнитных устройств на базе их вебер-амперных характеристик», *Международный журнал экспериментального образования*, № 8, с. 84–86, 2014.

[56] К. М. Широков, «Алгоритм определения магнитных характеристик электротехнических изделий», *Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки.*, № 1, с. 70-73, 2013.

[57] Е. В. Комаров и др., *Испытание магнитных материалов и систем*. М.: Энергоатомиздат, 1984.

[58] Н. И. Горбатенко, М. В. Ланкин, и Н. Д. Наракидзе, «Прибор для определения магнитных характеристик образцов и деталей из магнитомягких материалов», на *Металлургия. Машиностроение. Станкоинструмент – 2006*, Ростов-на-Дону, 2006, с. 77- 80.

[59] Н. И. Горбатенко, М. В. Ланкин, Д. В. Шайхутдинов, и К. М. Широков, «Устройство для измерения характеристик магнитомягких материалов», *МПК G01R33/12. № 20091121158/28*, Май 27, 2010.

[60] В. Г. Сергеев, и А. Я. Шихин, *Магнитоизмерительные приборы и установки*. М.: Энергоатомиздат, 1982.

[61] U. Glet, «Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln von magnetischen Kenngrößen», *Patent DE 102005011227A1*, Br. 11, 2005.

[62] J. Baumbach, E. Kallenbach, U. Kucera, and K. Neumann, «MagHyst®-modular — ein universelles Gerät zur Messung magnetischer Größen und Kennlinien an Materialien, Halbzeugen und Magnetaktoren», *Messeartikel für die Sensor+Test*, 2009.

[63] А. М. Ланкин, и М. В. Ланкин, «Метод измерения вебер-амперной характеристики электротехнических устройств», *Современные проблемы науки и образования*, № 1, с. 246-258, 2014.

[64] А. М. Ланкин, М. В. Ланкин, В. В. Гречихин, и Д. В. Шайхутдинов, «Определение гистерезисных магнитных характеристик методом решения обратной задачи гармонического баланса», *Фундаментальные исследования*, № 8 (часть 2), с. 303-306, 2015.

[65] А. М. Гречко, «Экспериментальное исследование влияния вихревых токов в сердечнике магнитопровода на динамические характеристики электромагнитного привода», *Вісник НТУ «ХПИ»*, № 49 (955), с. 9-17, 2012.

[66] Б. В. Клименко, и А. М. Гречко, «Электромагнитный привод с двухпозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего напряжения», *Електротехніка і Електромеханіка*, № 6, с. 40-43, 2007.

[67] Е. И. Байда, «Расчет динамики двухпозиционного электромагнита постоянного тока с магнитной защелкой», *Електротехніка і Електромеханіка*, № 4, с. 10-12, 2010.

[68] Е. И. Байда, «Динамика нечеткого срабатывания бистабильного электромагнитного актуатора на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов», *Електротехніка і Електромеханіка*, № 5, с. 18-20, 2012.

[69] R. Alexandru, M. Mihai, V. N. Iosif, and C. Radu, «New solution of linear DC actuator with additional permanent magnets: Working principle, design and testing», *Revue Roumaine des Sciences Techniques – Serie Électrotechnique et Énergétique*, no. 62, pp. 3-7, 2017.

[70] Y. Yong-Min, K. Dae-Kyung, and K. Byung-II, «Optimal Design of a Permanent Magnetic Actuator for Vacuum Circuit Breaker using FEM», *Journal of Electrical Engineering & Technology*, no. 1, pp. 92-97, 2006.

[71] W. A. Zhenxing, S. Liqiong, H. Sainan, G. Yingsan, and L. Zhiyuan, «Permanent Magnetic Actuator for 126 kV Vacuum Circuit Breakers», *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 50, no. 3, pp. 129-135, 2014.

[72] А. В. Панов, В. І. Паньків, М. Ф. Сопель, Б. С. Стогній та Є. М. Танкевич, «Актуальні питання моніторингу і технічного обслуговування високовольтних вимикачів», *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 75-85, 2018. doi: <https://doi.org/10.15407/techned.2018.02.075>

[73] А. В. Панов, В. І. Паньків, М. Ф. Сопель, Б. С. Стогній та Є. М. Танкевич, «Вдосконалення моніторингу технічного стану механічних елементів високовольтних вимикачів», *Праці ІЕД НАНУ*, Вип. 51, с. 99-109, 2018. doi: <https://doi.org/10.15407/publishing2018.51.099>

[74] Y. Fan, and H. Xiaoquang, «Research on the mechanical state parameter extraction method of high voltage circuit breakers», in *10th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Beijing, China, 2012, pp. 1062-1066.

[75] М.-Н. Kim, А. Smajkic, М. Kapetanovic, and М. Muratovic, «Influence of contact erosion on the state of SF₆ gas in interrupted chambers of HV SF₆ circuit breakers», in *2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference*, Santa Fe, New Mexico, 2014, pp. 466-469.

[76] I. Manea, C. Chiciu, F. Balasiu, and N. Tulici, «Complex method to diagnose the technical state of the medium and high voltage circuit breakers after short-circuit events», in *16th International conference and exhibition on electricity distribution*. Amsterdam, Netherlands, 2001, pp. 1-5.

[77] F. Mei, K. Zhu, J. Zheng, and M. Zhu, «Design of high voltage vacuum circuit breaker's on-line monitoring and fault diagnosis system», in *2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference*, Xi'an, China, 2016, pp. 408-413.

[78] L. Wenhua, Y. Xiaoquang, L. Jun, Y. Man, and Z. Sheng, «Study on the comprehensive test technology of circuit breaker mechanical life and its accessories based on virtual instrument», in *26th International Conference on Electrical Contacts*, Beijing, China, 2012. pp. 465-470. doi: <http://doi.org/10.1049/cp.2012.0698>

[79] Е. И. Байда, «Мультифизическая модель расчета граничного тока сваривания контактов вакуумного выключателя», *Вісник НТУ «ХПИ»*, № 41, с. 3-9, 2014.

[80] А. А. Перцев, В. П. Белотелов, и Л. А. Рыльская, «Способ испытаний вакуумных выключателей на стойкость при сквозных токах короткого замыкания», *МПК G01R 31/327 (2006.01)*. № 2269140, Янв. 1, 2006.

[81] В. С. Деева, и С. М. Слободян, «Модель коагуляции контакта вакуумного выключателя», *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*, № 4, с. 39-42, 2013.

[82] О. А. Аношин, П. В. Петров, и С. И. Малаховский, «О возможности использования силы удержания привода как критерия оценки основных характеристик вакуумных выключателей», *Электрические сети и системы*, № 6, с. 10-12, 2005.

[83] X. Wang, M. Rong, Y. Wu, F. Yang, and S. Jia, «Analyses of mechanical characteristics of vacuum circuit breaker during the closing process

taking electrodynamic force into account», *IET Sci. Meas. Technol.*, no. 6. pp. 323-328, 2007.

[84] M. Rong, X. Wang, W. Yang, and S. Jia, «Theoretical and experimental analyses of the mechanical characteristics of a medium-voltage circuit breaker», *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.* vol. 152, no. 2, pp. 45–49, 2005.

[85] J. Kang, S. Choi, D. En, H. Kim, and H. Jung, «Development and Analysis of New Type of Switchgear for High Voltage Gas Circuit Breaker», in *Proceedings of the 6th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines*, Tenerife, Spain, 2006, pp. 80-84.

[86] X. Zhan, X. Liu, L. Li, G. Zhu, and P. Li, «Experimental research on arc characteristics for a 40.5-kV vacuum circuit breaker», in *The 14th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2018)*. J., Eng., 2018, pp. 2777-2780.

[87] A. Soloot, A. Gholami, and K. Niayesh, «Study on Post Arc Current and Transient Recovery Voltage in Vacuum Circuit Breaker», *International Review of Modeling and Simulation*, vol. 4, no. 2, pp. 1-11, 2011.

[88] Г. М. Михеев, *Цифровая диагностика высоковольтного оборудования*. М.: Изд. дом «ДОДЭКА-XX1», 2008.

[89] Ю. А. Федоров, Г. М. Михеев, и В. М. Шевцов, «Способ контроля характеристик высоковольтных выключателей и устройство для его осуществления», *МПК G01R 31/327 (2006.01)*. № 2330302, Июнь 27, 2008.

[90] Б. С. Стогній, М. Ф. Сопель, Л. Д. Третьякова, Є. М. Танкевич, А. В. Панов, та В. І. Паньків, «Визначення комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів», *Технічна електродинаміка*, № 1, с. 71-80, 2017.

[91] И. С. Минкина, и А. А. Романов, «Алгоритм оценки остаточного ресурса выключателя», *Электрические станции*, № 12, с. 58-62, 2004.

[92] М. Ф. Сопель, В. Л. Тутик, А. В. Панов, та Ю.В. Пилипенко, «До визначення залишкового ресурсу елегазових високовольтних вимикачів 750 кВ», *Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України. Збірник наукових праць*, №1(16), с.136-139, 2007.

[93] В. В. Грабко, та Б. І. Мокін, *Моделі та системи технічної діагностики високовольтних вимикачів*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999.

[94] В. В. Грабко, «До питання побудови ресурсних характеристик повітряних високовольтних вимикачів», *Вісник ВПИ*, № 4, с. 61-65, 2001.

[95] В. В. Грабко, «Синтез структури інформаційно-вимірювальної системи для діагностики групи високовольтних вимикачів», *Наукові вісті Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут»*, № 3, с. 22-28, 2001.

[96] В. В. Грабко, В. В. Грабко, А. Л. Поліщук, та І. А. Співак «Пристрій для контролю ресурсу комутаційних апаратів», *МПК G 07 C 3 / 10. № 104059*, Січ. 1, 2016.

[97] В. В. Грабко, В. В. Грабко, А. Л. Поліщук, та І. А. Співак, «Пристрій для контролю ресурсу повітряних високовольтних вимикачів», *МПК G 07 C 3 / 10. № 104057*, Січ. 1, 2016.

[98] В. В. Грабко, В. В. Грабко, А. Л. Поліщук, та І. А. Співак, «Пристрій для контролю ресурсу групи повітряних високовольтних вимикачів», *МПК G 07 C 3 / 10. № 104055*, Січ. 1, 2016.

[99] L. Muyl, H. Jian, and H. Xiaoguang, «Insulative condition monitoring of high voltage circuit breaker», in *2010 the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Taichung, Taiwan, 2010, pp. 94-98.

[100] A. A. Razi-Kazemi, M. Vakilian, K. Niayesh, and M. Lehtonen, «Data mining of online diagnosed waveforms for probcondition assessment of SF6 circuit», *IEEE Transaction on power delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1354-1362, 2015.

[101] M. S. Silva, J. A. Jardini, and L.C.Margrini, «On-line condition monitoring system for in-service circuit breaker», in *Cired 18th International conference on electricity distribution*, Turin, 2005, pp. 1-7.

[102] X. Jin, Z. LiuJun, H. Xiaoquang, L. Liang, and Z. Lei, «Development of on-line monitoring system for SF6 circuit breaker», in *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Beijing, China, 2011, pp. 537-541.

[103] T. Suwanasri, S. Wattanawongpitak, T. Homkeanchan, and C. Suwanasri «Failure statistics and inventory management or high voltage circuit breaker using statistical distribution techniques», in *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Bali, Indonesia, 2012, pp. 513-516.

[104] Е. В. Комаров, А. Д. Покровский, В. Г. Сергеев, и А. Я. Шихин, *Испытание магнитных материалов и систем* М.: Энергоатомиздат, 1984.

[105] А. Г. Сливинская, *Электромагниты и постоянные магниты*. М.: Энергия, 1972.

[106] В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, та В. В. Грабко, *Основи метрології та електричних вимірювань: підручник*. Вінниця : ВНТУ, 2012.

[107] В. В. Грабко, та О. В. Дідушок, «Метод діагностування електромагнітного привода 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>

[108] Г. Н. Александров, Г. С. Борисов, и Г. С. Каплан, *Теория электрических аппаратов: Учебник для вузов*. СПб.: Издательство СПб ГТУ, 2000.

[109] А. А. Перцев, и Л. А. Рыльская, *Вакуумные дугогасительные камеры. Сборник статей сотрудников ВЭИ*. Рязань: издательство «Рязанский дом», 2008.

[110] М. А. Любчик, *Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока (Расчёт и элементы проектирования)*. М.: Энергия, 1968.

[111] А. А. Чунихин, *Электрические аппараты*. М.: Энергоатомиздат, 1988.

[112] 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

[113] А. А. Базавлук, А. Р. Бакиров, и Д. А. Шкитов, «Исследование перенапряжений при коммутациях вакуумных выключателей», *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № S4, с. 265-279, 2011.

[114] Высоковольтный союз РЗВА, *Выключатели вакуумные серии ВР Техническая информация НК АИ.670049.011*. Ровно, Украина: Высоковольтный союз РЗВА, 2013.

[115] 32-bit Atmel AVR Microcontroller, 2020. [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc32099.pdf>. Accessed on: June 1, 2020.

[116] О. В. Дідушок, «Мікропроцесорний пристрій для діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 31 – 36, 2019. doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-147-6-31-36>

[117] В. В. Грабко, В. В. Грабко, та О. В. Дідушок, «Пристрій для діагностування електричного привода високовольтного вимикача», *МПК G07C 3/10 (2006.01). № 137512*, Жов. 25, 2019.

[118] Сравнительный анализ применения ПЛИС и микропроцессоров при разработке информационно-управляющих систем, важных для безопасности АЭС, Научно-технический отчет. НАУ им. Н. Е. Жуковского ХАИ, НТСКБ Полисвит, ИПМЭ им. Г. Е. Пухова НАН Украины, ИПММС НАН Украины, 2005.

[119] І. А. Клименко, «Класифікація та архітектурні особливості програмованих мультипроцесорних систем-на-кристалі», *Проблеми інформатизації та управління*, № 1, с. 55-72, 2012.

[120] Altera Corporation MAXII EMP570T100C5, 2020. [Online]. Available: <http://datasheet.buhieen.net/EPM570T100C5N.pdf>. Accessed on: June 1, 2020.

[121] CC3200 SimpleLink Wi-Fi Wireless MCU Technical Reference Manual (Rev. D), 2020. [Online]. Available: http://www.ti.com/lit/ug/swru367d/swru367d.pdf?ts=1591632539362&ref_url=https://www.google.com/. Accessed on: June 1, 2020.

[122] Б. Я. Советов, В. В. Цехановский, и В. Д. Чертовской, *Интеллектуальные системы и технологии: учебник*. М.: Академия, 2013.

[123] О. Б. Буль, *Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM*. М.: Академия, 2005.

[124] M. Augustyniak, and Z. Usarek, «Finite Element Method Applied in Electromagnetic NDTE: A Review», *Journal of Nondestructive Evaluation*, no. 35, 2016 doi: <https://doi.org/10.1007/s10921-016-0356-6>

[125] Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual [Online]. Available: <http://www.femm.info/wiki/Documentation/>.

[126] Е. И. Байда, *Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM: Учебно-методическое пособие*. Х.: НТУ «ХПИ», 2015.

[127] В. В. Грабко, О. В. Дідушок, «Дослідження роботи електромагнітного привода вакуумного вимикача як об'єкта діагностування», *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Сер. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*, № 9 (1334), с. 57 – 62, 2019. doi: 10.20998/2079-8024.2019.9.11

[128] В. П. Дьяконов, *MATLAB. Полный самоучитель*. М.: ДМК Пресс, 2012.

[129] В. И. Раховский, *Физические основы коммутации электрического тока в вакууме*. М.: Наука. Главная редакция физико–математической литературы, 1970.

[130] J. Budzisz, «The model of a vacuum circuit breaker for switching on capacitor bank», *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 2, pp. 140–145, 2019. doi: 10.15199/48.2019.02.31

[131] N. Mahajan, K. Patil, and S. Shembekar, «Electric Arc model for High Voltage Circuit Breakers Based on MATLAB/SIMULINK», *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENCE, SPIRITUALITY, BUSINESS AND TECHNOLOGY (IJSSBT)*, vol. 1, no. 2, pp. 15-21, 2013.

[132] S. Pasumpon, R. Saravanan, A. Maruthu, A. Saravanan, and M. Muneeswaran, «Evaluation of High-Voltage Circuit Breaker Performance with Modified Schavemaker Arc Model», *International Journal of Digital Communication and Networks (IJDCN)*. vol. 3, no. 2, pp. 18-23, 2014.

[133] N. Markovic, S. Bjelic, J. Zivanic, and U. Jaksic, «Numerical simulation and analytical model of electrical arc impedance in the transient processes», *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 89, no. 2a, pp. 113–117, 2013.

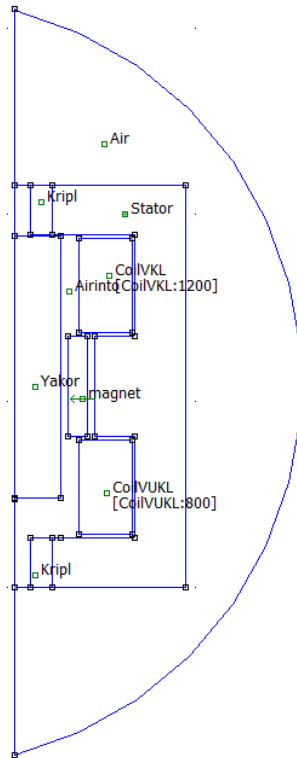
[134] Г. Н. Александров, Г. С. Борисов, Г. С. Каплан, *Теория электрических аппаратов: Учебник для вузов*. СПб.: Издательство СПб ГТУ, 2000.

[135] 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.

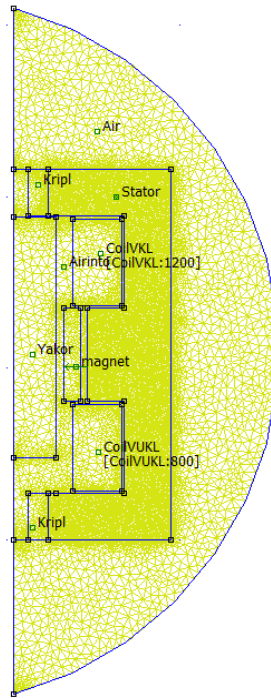
[136] О. Дідушок, «Математична модель діагностування технічного стану контактної системи вакуумного вимикача», на 5-ій Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах», Вінниця, 2019, с. 90.

Додаток

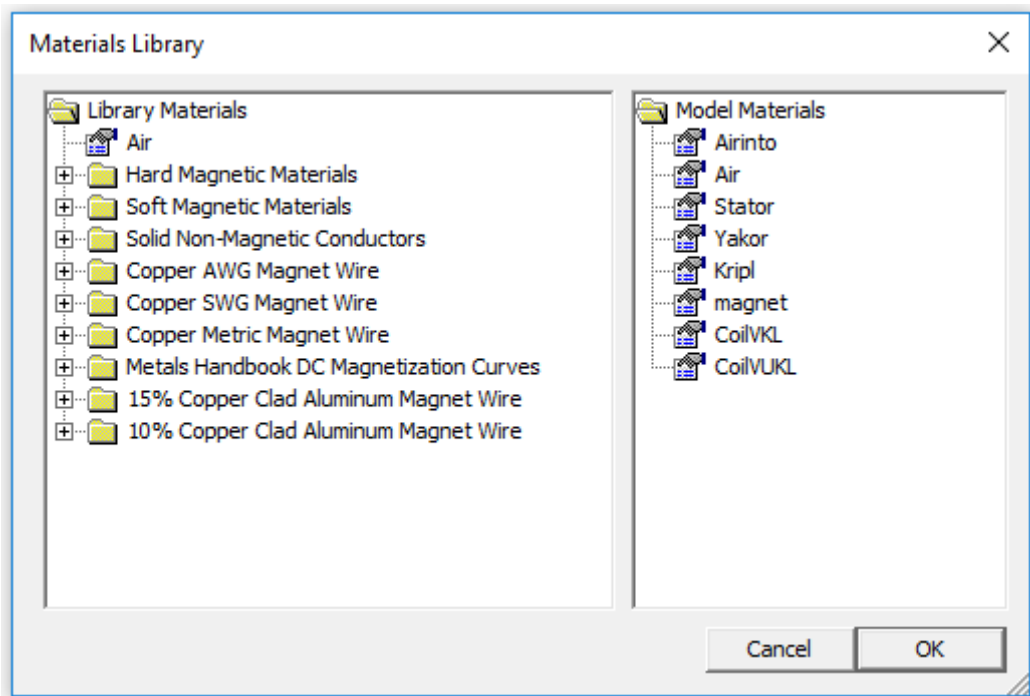
Комп'ютерне моделювання електромагнітного привода Е-10 вакуумного вимикача ВР0-10-12,5/630 У2 у програмі FEMM



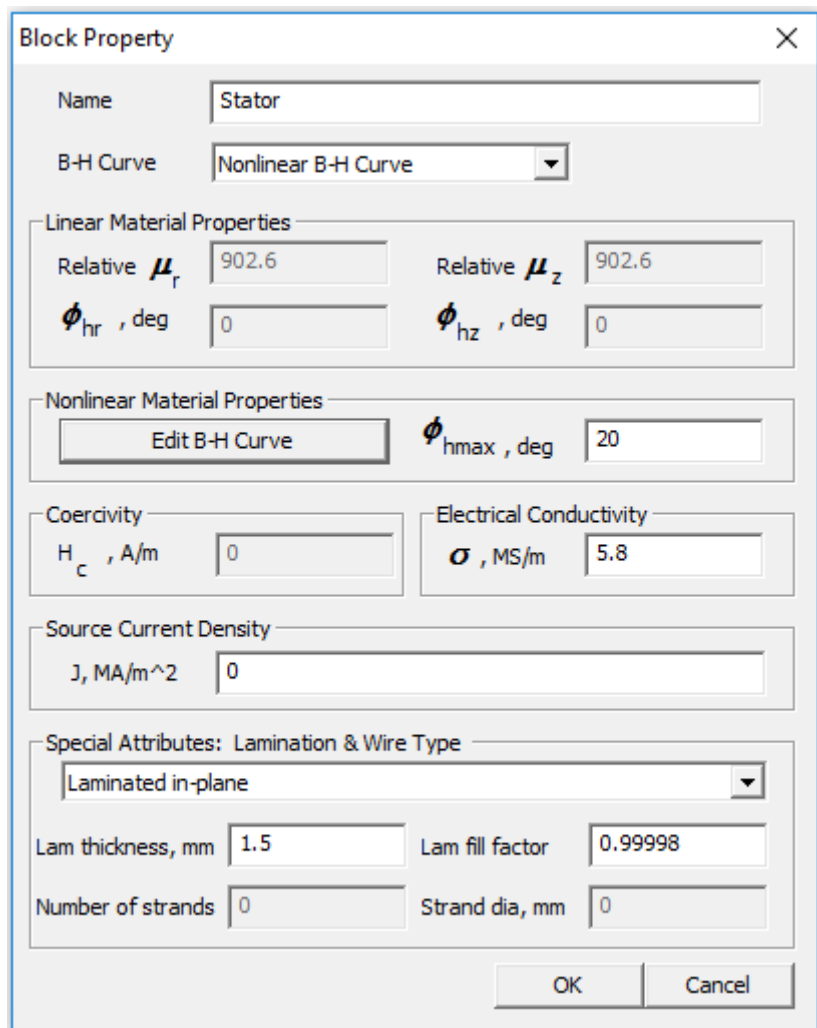
Модель електромагнітного привода із заданими властивостями блоків



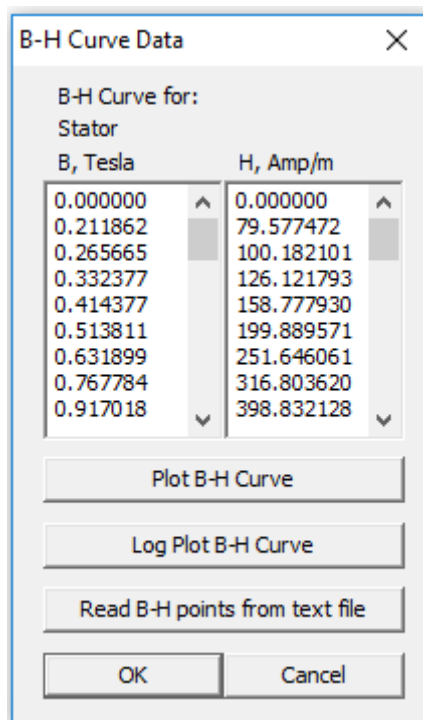
Модель електромагнітного привода в кінцево-елементній сітці



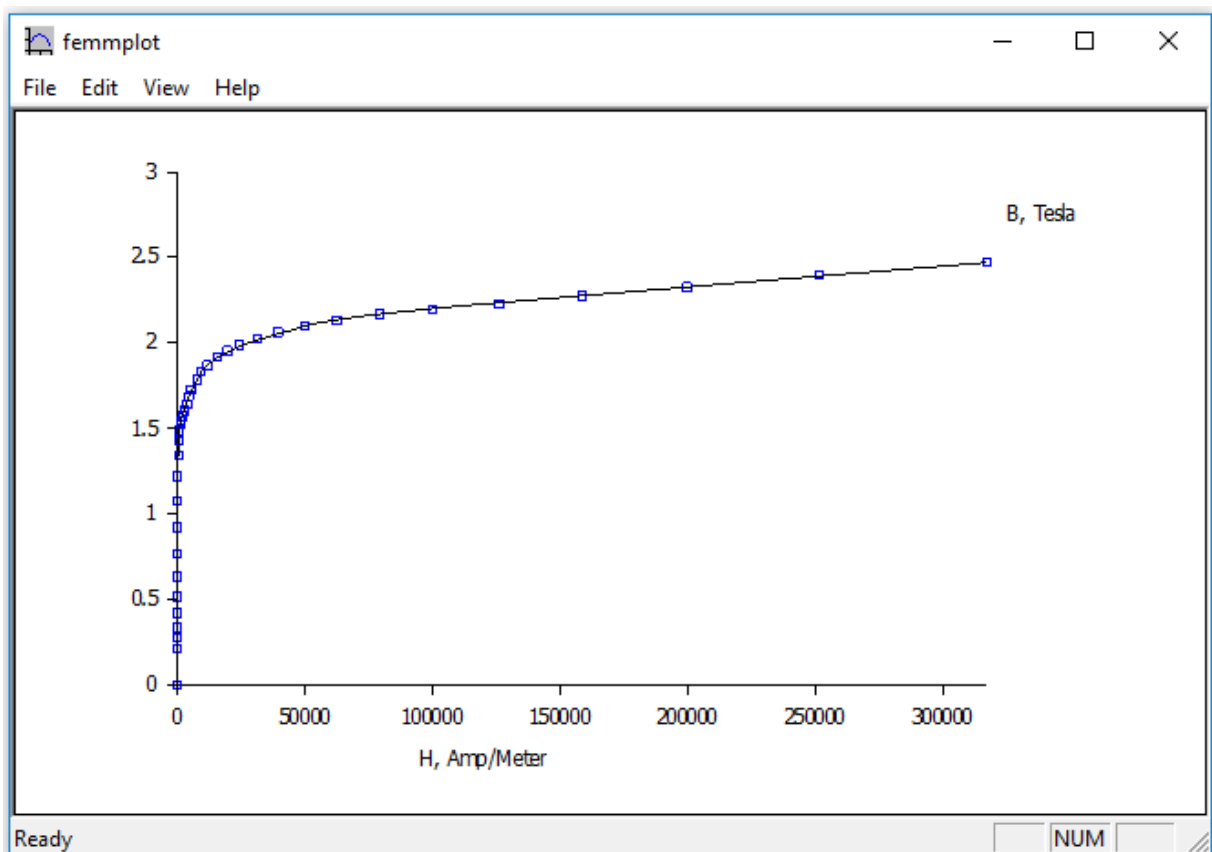
Бібліотека використаних блоків моделі



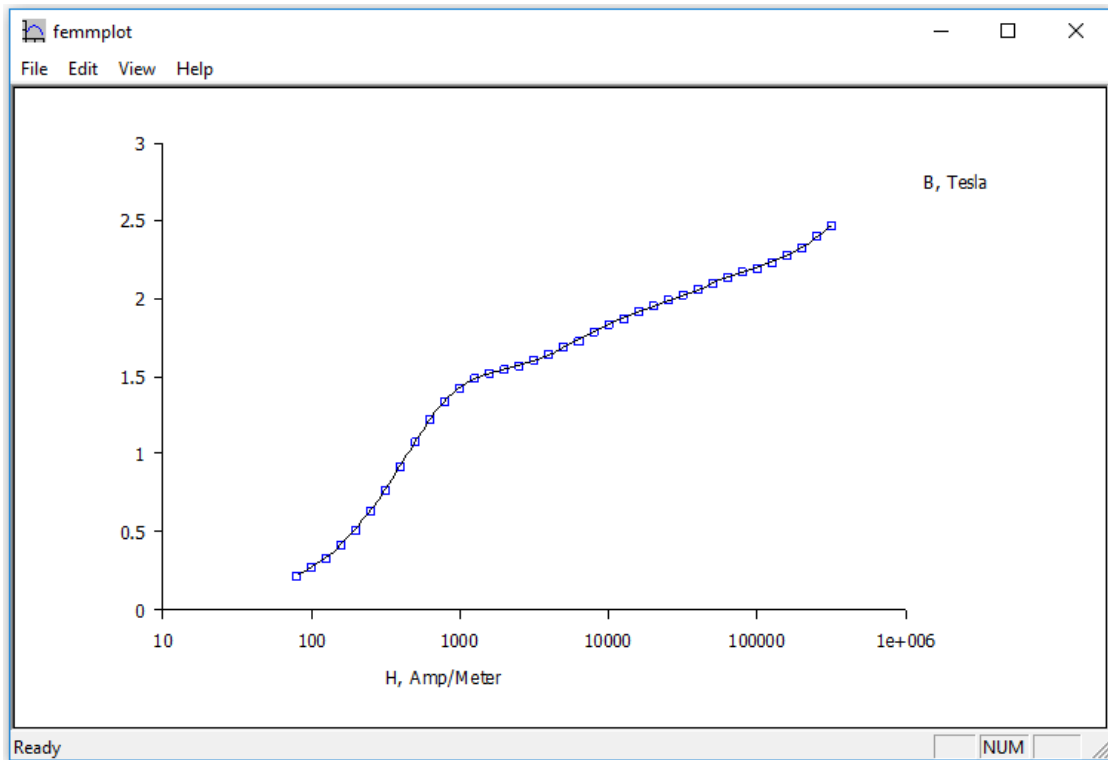
Блок властивостей моделі Stator



Координати точок кривої намагнічування для блоку Stator



Графік кривої намагнічування для блоку Stator

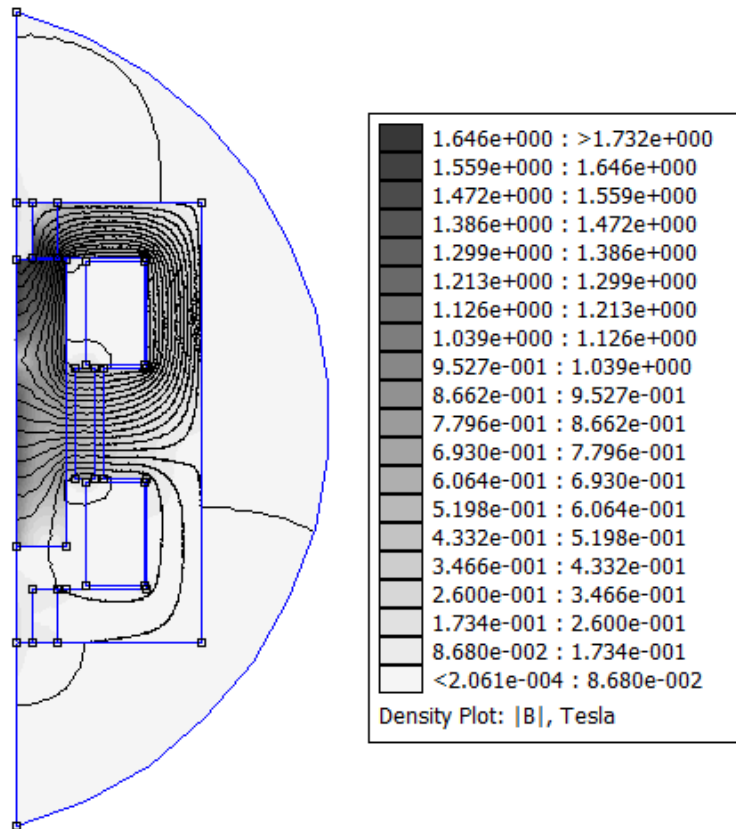


Логарифмічний графік кривої намагнічування для блоку Stator

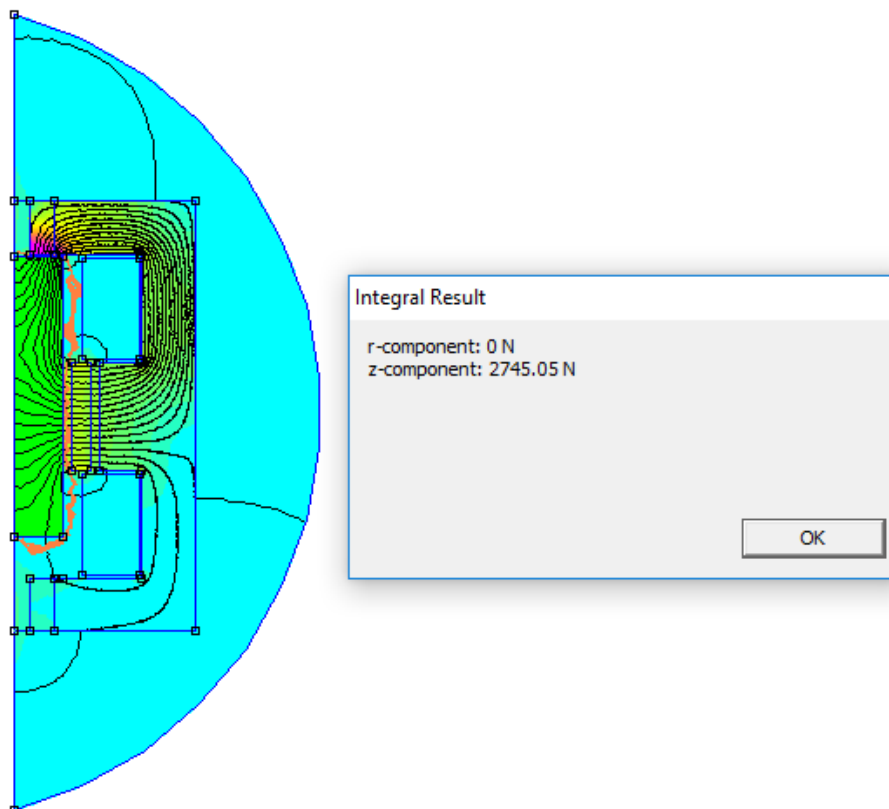
The 'Block Property' dialog box for a magnet block contains the following settings:

- Name: magnet
- B-H Curve: Linear B-H Relationship
- Linear Material Properties:
 - Relative μ_r : 1.05
 - Relative μ_z : 1.05
 - ϕ_{hr} , deg: 0
 - ϕ_{hz} , deg: 0
- Nonlinear Material Properties:
 - Edit B-H Curve: [button]
 - ϕ_{hmax} , deg: 0
- Coercivity:
 - H_c , A/m: 860000
- Electrical Conductivity:
 - σ , MS/m: 0
- Source Current Density:
 - J , MA/m²: 0
- Special Attributes: Lamination & Wire Type:
 - Not laminated or stranded
 - Lam thickness, mm: 0
 - Lam fill factor: 1
 - Number of strands: 0
 - Strand dia, mm: 0

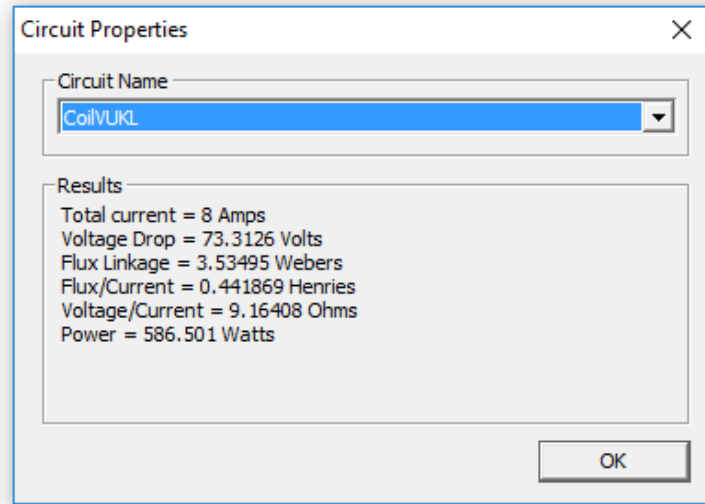
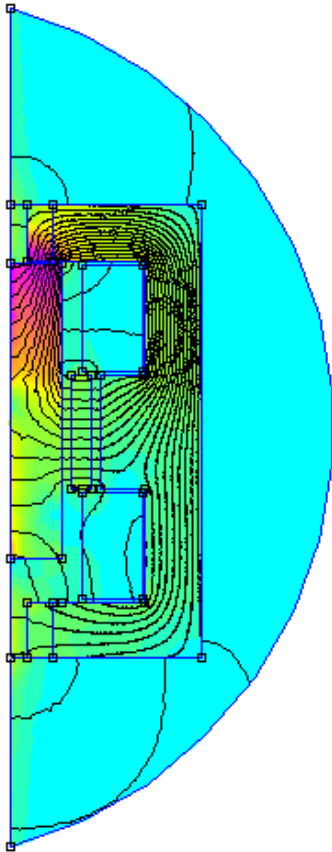
Блок властивостей моделі magnet



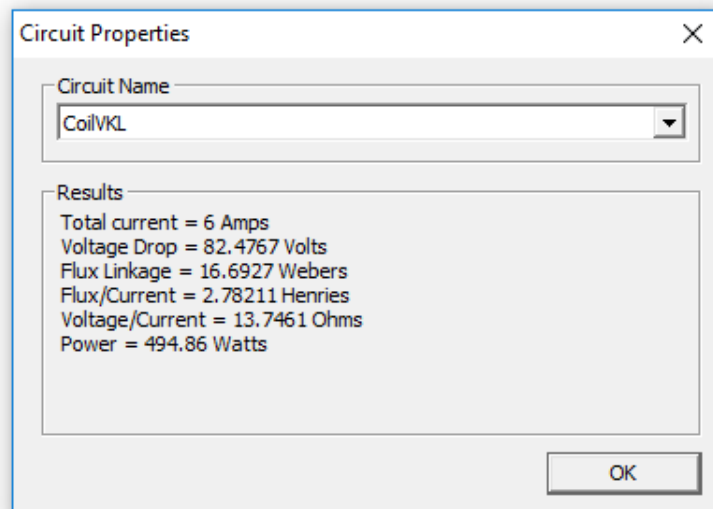
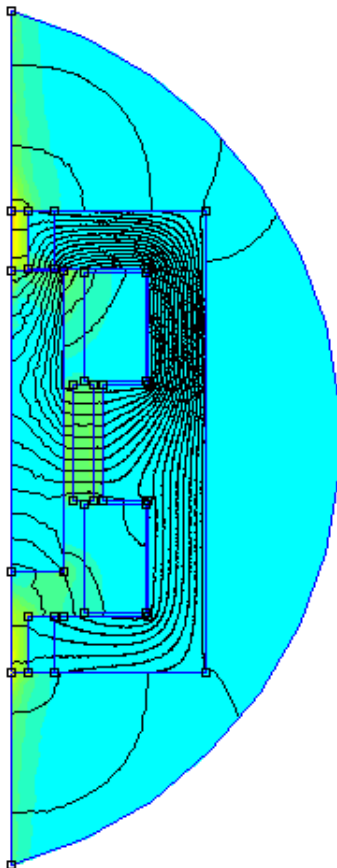
Картина поля ліній потоку електромагнітного привода



Розрахунок сили утримання привода методом інтеграла тензора Максвелла



Розрахунок параметрів електричного кола для блоку CoilVUKL



Розрахунок параметрів електричного кола для блоку CoilVKL

*Наукове електронне видання
комбінованого використання.
Можна використовувати в локальному та мережному режимах*

**Грабко Володимир Віталійович
Дідушок Олег Васильович**

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ

Монографія

Видається в авторській редакції

Оригінал-макет підготовлено авторами

Підписано до видання 20.04.2022 р.
Зам № P2022-08.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія
Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
редакційно-видавничий відділ.
Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к. 114,
м. Вінниця, 21021, тел.: (0432) 59-85-32, 59-81-59.
press.vntu.edu.ua; email: irvc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.