

В. В. Грабко, Б. І. Мокін



**МОДЕЛІ ТА СИСТЕМИ  
ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ  
ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ**

**В. В. Грабко, Б. І. Мокін**

**МОДЕЛІ ТА СИСТЕМИ  
ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ  
ВИСOKОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ**



**«УНІВЕРСУМ-Вінниця»**

**1999**

УДК 621.316.5: 621.317.312

Г 75

*Рецензенти:*

д.т.н., професор **В. Я. Синельников** (Національний технічний університет «КПІ», м. Київ),

д.т.н., професор **В. О. Поджаренко** (Вінницький державний технічний університет, м. Вінниця)

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького державного технічного університету Міністерства освіти України

**Гرابко В. В., Мокін Б. І.**

**Г 75** **Моделі та системи технічної діагностики високовольтних вимикачів.** Монографія – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. — 74 с.

**ISBN 966-7199-68-1**

В монографії описані математичні моделі та системи діагностики високовольтних вимикачів як із числа тих, що випускає промисловість, так і синтезовані авторами.

Розрахована на інженерно-технічних працівників електротехнічної промисловості і електроенергетики, які експлуатують електричні системи та мережі, а також може бути корисною студентам та аспірантам вузів, котрі спеціалізуються в галузі технічної діагностики електрообладнання.

**УДК 621.316.5: 621.317.312**

**ISBN 966-7199-68-1**

© В. Грабко, Б. Мокін, 1999

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП .....	5
Розділ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ .....	7
1.1. Огляд методів технічної діагностики вимикачів.....	9
1.2. Аналіз засобів технічної діагностики вимикачів .....	13
1.3. Висновки .....	22
Розділ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИСОКО- ВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ, ПРИДАТНОЇ ДЛЯ РОЗВ'Я- ЗАННЯ ЗАДАЧІ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ .....	23
2.1. Розробка математичної моделі високовольтного вимикача як об'єкта діагностики .....	23
2.2. Висновки .....	27
Розділ 3. СИНТЕЗ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ .....	28
3.1. Вибір математичного апарату, придатного для розв'язання задачі синтезу структури системи діагностики .....	28
3.2. Розробка математичної моделі структури системи діагно- стики вимикача .....	30
3.3. Синтез структури системи діагностики вимикача .....	38
3.4. Практична реалізація синтезованої структури системи діагностики .....	40
3.5. Висновки .....	46
Розділ 4. РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ ПОДАЛЬШОГО ВДОСКО- НАЛЕННЯ СИСТЕМ ДІАГНОСТИКИ ВИСОКО- ВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ.....	47
4.1. Схемні реалізації запропонованих систем діагностики вимикачів .....	47
4.2. Мікропроцесорна реалізація системи діагностики високо- вольтних вимикачів .....	63
4.3. Висновки .....	68
ПІДСУМКИ .....	68
ЛІТЕРАТУРА.....	69

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач  
БВЗ – блок вибірки-зберігання  
ВА – випробуваний апарат  
МНК – метод найменших квадратів  
МП – масштабувальний підсилювач  
ОЗП – оперативний запам'ятовувальний пристрій  
ППР – планово-попереджувальний ремонт  
СДВ – система діагностики групи високовольтних вимикачів  
СКЗ – струм короткого замикання  
ФІМІ – Фур'є-інтегральний метод

## ВСТУП

В усі часи одним із головних важелів поліпшення соціально-економічного стану країни є підвищення ефективності виробництва і якості продукції, які суттєво залежать від надійності їх енергопостачання.

Значна роль у забезпеченні безперебійного електропостачання споживачів приділяється вимикачам, за допомогою яких здійснюються відключення аварійних струмів короткого замикання, операції комутації електроприймачів, а також комутації, пов'язані зі зміною напрямку потоків потужностей в електроенергетичних системах.

Очевидно, що в залежності від роботи вимикача його комутаційний ресурс витрачається нерівномірно. Будь-яким вимикачем можна виконати набагато більше операцій комутації номінального робочого струму, ніж аварійного, який в декілька десятків разів перевищує робочий струм вимикача.

Оскільки спроби експлуатації вимикачів після вичерпання їхнього комутаційного ресурсу призводять до значних збитків, важливою технічною задачею є своєчасна кількісна оцінка залишкового комутаційного ресурсу цього класу пристроїв.

В книзі викладені математичні моделі і системи, як із числа тих, що випускає промисловість, так і синтезовані авторами для розв'язання задачі діагностики високовольтних вимикачів.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що впровадження запропонованих моделей і систем діагностики дозволяє істотно підвищити надійність електропостачання споживачів, що живляться від електричних мереж змінного струму.

Книга містить чотири розділи.

Перший розділ присвячено аналізу існуючих методів і засобів оцінки комутаційного ресурсу вимикачів та обґрунтуванню необхідності пошуку нових рішень у цій області.

В другому розділі розроблена математична модель вимикача, придатна для розв'язання задачі його діагностування.

В третьому розділі обґрунтована необхідність використання математичного апарату секвенцій для синтезу структури системи діагностики вимикача, розроблена секвенціальна математична модель

цієї структури і синтезовані структурні схеми пристроїв для вимірювання залишкового комутаційного ресурсу вимикачів.

У четвертому розділі розроблено ряд пропозицій подальшого удосконалювання системи діагностики вимикачів, в тому числі і з використанням мікропроцесорів.

Відгуки, зауваження і побажання просимо надсилати за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, Видавництво ВДТУ "УНІВЕРСУМ - Вінниця".

## **Розділ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ**

Відомо [1, 2, 3], що діагностування – це процес визначення технічного стану об'єкта або системи з заданою точністю, який може включати розв'язок задач визначення працездатності, пошуку дефектів і прогнозування зміни стану об'єкта діагностування.

Відповідно до класифікації, приведеної в роботах [4, 5], процес діагностування можна розділити на два етапи. На першому (визначення працездатності) встановлюється належність об'єкта за станом до підмножин працездатного або непрацездатного станів, а на другому (виявлення несправності, що виникла) визначається місце у підмножині, в якій знаходиться об'єкт, що перевіряється.

При використанні імовірнісних методів на підставі множини ознак, які з визначеною імовірністю характеризують стан системи, за обраним правилом прийняття рішення система може бути віднесена до одного з  $N$  можливих станів. Для конкретизації умов прийняття рішення звичайно керуються одним із критеріїв, описаних у [6, 7, 8, 9]. Застосування статистичних методів розпізнавання для розв'язання задач діагностування викладено в [9, 10, 11, 12].

При детерміністському підході стан системи в кожний момент часу характеризується  $m$  - мірним вектором  $A$ , простір ознак якого ділиться на області діагнозу  $D_i$ .

Як відомо [12], імовірнісні методи більш загальні, проте, у відмінності від них, детерміністські більш стисло описують істотні сторони процесу розпізнавання, менше залежать від надлишкової, малоцінної інформації, більше відповідають логіці мислення людини і дозволяють виробити рішення за менший проміжок часу.

При дослідженні фізичних об'єктів можливі два підходи – функціональний і структурний [13].

Структурний підхід припускає дослідження внутрішньої організації або структури об'єкта.

При функціональному підході розглядаються алгоритми функціонування об'єкта. Внутрішня організація об'єкта має другорядне значення.

Очевидно, що при структурному підході до об'єкта діагностування кількість використовуваних вихідних параметрів буде пропорційною ступеню деталізації об'єкта діагностування.

В роботі [14] зазначено, що при реалізації діагностування матеріально-технічні витрати, в першому наближенні, пропорційні числу контрольованих параметрів, які забезпечують необхідну



повноту контролю. Отже, функціональний підхід дозволяє реалізувати процес діагностування з меншими апаратурними витратами.

Метою діагностування електроустаткування є забезпечення найбільш економічної його експлуатації при заданому рівні надійності і скорочення до мінімуму витрат на технічне обслуговування і ремонт. Ця мета досягається шляхом визначення технічного стану електроустаткування, що дозволяє своєчасно запобігати відмовам, скорочувати простой через пошкодження, проводити комплекс заходів для підтримки працездатності електроустаткування відповідно до даних діагностування, тобто мета досягається за допомогою відслідковування технічного стану електроустаткування в процесі експлуатації.

Задачі діагностування в системі експлуатації електроустаткування полягають у встановленні необхідності заміни змінних вузлів і деталей, а також регулювання; необхідності ремонтних впливів (поточного або капітального ремонтів); причин можливих відмов електроустаткування; якості проведення ремонтних робіт.

Аварія в будь-якому елементі енергосистеми (а таких елементів багато тисяч) може призвести до повного (або часткового) припинення подачі електроенергії багатомільйонному населенню, припинення роботи промислових і сільськогосподарських підприємств, транспорту та ін. В зв'язку з цим всі елементи енергосистеми повинні мати достатню надійність, а для цього необхідно діагностувати устаткування енергосистеми, серед якого важливе місце займають комутаційні апарати, за допомогою яких здійснюється відключення аварійних струмів, зміна напрямку потоку потужностей, зміна конфігурації мережі тощо.

Найважливішими з високовольтних комутаційних апаратів - вимикачів, запобіжників, вимикачів навантаження, роз'єднувачів, відділювачів і короткозамикачів, є вимикачі, надійність функціонування яких залежить від точності визначення їхнього залишкового комутаційного ресурсу, який в свою чергу суттєво залежить від умов експлуатації вимикачів. Очевидно, що той самий вимикач спроможний відключити більше коротких замикань на кінці лінії, ніж на шинах підстанції, ще більше відключень він зробить при нормальному струмі навантаження і ще більше – якщо лінія навантажена лише струмом холостого ходу. Це обумовлено тим, що фізичне середовище вимикача, у якому здійснюється гасіння дуги при розриванні його контактів, спрацьовується по-різному і комутаційний ресурс вимикача витрачається нерівномірно.

## 1.1. Огляд методів технічної діагностики вимикачів

В роботі [15] приведена схема застосування методів і засобів діагностування при проведенні планового контролю, технічного обслуговування і поточних ремонтів електроустаткування. Ця схема зображена на рис. 1.

Поточний і капітальний ремонти доцільно проводити за даними діагностування, тобто тільки з урахуванням технічного стану. При поточному і капітальному ремонтах проводять діагностування основних деталей і вузлів для визначення їхнього залишкового ресурсу. За даними діагностування при поточному ремонті встановлюють або уточнюють терміни проведення чергового капітального ремонту, оскільки стає відомим залишковий ресурс основних деталей і вузлів електроустаткування.

Розглянемо докладно методи діагностування високовольних вимикачів, як одного з основних елементів електричних мереж та систем.

До недавнього часу в енергосистемах застосовували систему планово-попереджувального ремонту (ППР), що передбачає періодичне проведення технічного обслуговування і ремонтів вимикачів через визначені, заздалегідь встановлені терміни. Недоліком системи ППР є порівняно велика трудомісткість технічного обслуговування і ремонтів вимикачів, оскільки багато робіт регламентні (наприклад, розбирання вимикача для визначення технічного стану). Відповідно до положень системи ППР пропорційно росту кількості вимикачів збільшується і загальна трудомісткість їхньої експлуатації, що потребує значного збільшення чисельності обслуговуючого персоналу.

При проведенні ремонтів вимикачів через усереднені періоди без попереднього визначення їхнього технічного стану (що також є недоліком системи ППР) необхідно виконувати великий об'єм робіт, пов'язаних з виводом вимикачів з експлуатації і розбиранням для визначення стану вузлів і деталей. Досить часто після цього виявляється, що технічний стан вимикачів задовільний, тобто вони не потребують ремонту, а операції по регулюваннях і змашуванню можна було б зробити і без розбирання. Відомо, що будь-які розбирання і складання, навіть проведені висококваліфікованими спеціалістами, призводять до зниження надійності і зменшення терміну служби як вимикачів, так і будь-якого іншого устаткування, оскільки порушуються з'єднання і знову відбувається приробка деталей, що супроводжується інтенсивним спрацюванням. Крім

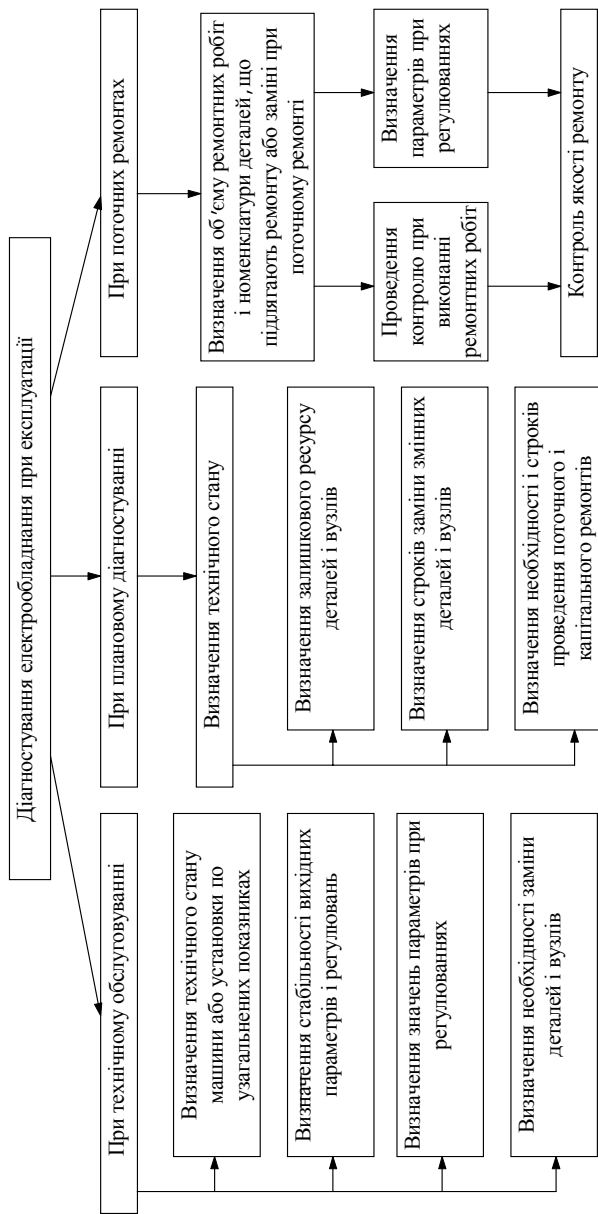


Рис.1. Схема застосування методів і засобів діагностування електрообладнання

того, при розбираннях і складаннях можливе ушкодження окремих деталей і вузлів.

Все викладене вище свідчить про необхідність удосконалення системи ППР вимикачів шляхом розробки і застосування її нових форм.

В ДАЕК "Вінницяобленерго" раніше була запроваджена більш досконала система діагностики вимикачів, суть якої полягає в тому, що для усіх вимикачів, встановлених на кожній підстанції, розраховане число припустимих відключень найбільшого струму короткого замикання (СКЗ), значення якого обчислено на збірних шинах кожної підстанції. По цьому значенню СКЗ для кожної підстанції обчислювався ресурс кожного вимикача, якщо, навіть, вимикач відключав віддалене замикання і значення СКЗ менше максимального. Кожне аварійне відключення вимикача фіксувалось в оперативному журналі чергового персоналу, і якщо цих записів для кожного вимикача накопичувалось стільки, скільки відключень нормовано для кожного вимикача, то тоді останній виводився в ремонт.

Така система хоч і дозволяла збільшити міжремонтні терміни вимикачів, проте виявилась незручною для розрахунку залишкового комутаційного ресурсу кожного вимикача, оскільки, по-перше, супроводжувалась неточностями у визначенні ресурсу вимикачів по оперативному журналу за рахунок помилкових підрахунків, що виконує експлуатаційний персонал, а, по-друге, такий підхід дає істотне значення похибки в оцінці залишкового комутаційного ресурсу вимикача за рахунок того, що не враховується фактичне значення СКЗ, що відключається, а щораз приймається найбільше значення струму, який має місце лише у випадку короткого замикання на шинах підстанції.

Нині в енергосистемах запроваджена методика, що вимагає врахування значення СКЗ в момент комутації вимикачів [16], проте не існує серійних пристроїв для реалізації цієї методики.

В роботі [17] пропонується визначати міжремонтні періоди вимикачів на підставі статистичних даних про можливість, число і тип ушкоджень, а також по сумарному СКЗ, що може відключати вимикач без зниження нормальної працездатності.

Зовсім інший підхід до питання технічної діагностики вимикачів використовується в ряді закордонних країн.

Попередньо необхідно відзначити, що закордонні фірми по випуску вимикачів перейшли на їх виробництво у вакуумному і елегазовому виконаннях [18], що привело до істотного підвищення їхньої надійності, зменшення габаритів і зниження пожежонебезпеки.

В роботі [19] показано, що за даними фірми Toshiba в розподільних мережах Японії нині експлуатується 3% масляних вимикачів, 12% - маломасляних вимикачів, 65% - вакуумних і 15% - елегазових вимикачів.

В роботі [20] відзначена висока надійність елегазових комплектних розподільних пристроїв фірми Siemens AG, що використовують вакуумні вимикачі. Число відмов складає менше 0,7%, час наробки на відмову 150 років.

Висока надійність елегазових вимикачів дозволяє проводити ревізії останнім через 8 років [21], а в майбутньому після впровадження ефективної системи оцінки стану вимикачів цей термін можна буде збільшити.

За даними Всесоюзної науково-технічної конференції, що відбулася у ВЕІ ім. В.І.Леніна в лютому 1990 р. на території колишнього СРСР, кількість елегазових і вакуумних вимикачів, що експлуатуються, складає 1% від усіх вимикачів, у той час як кількість масляних і повітряних вимикачів досягає 85%.

А звідси і висновок про різні підходи до розв'язання задачі діагностування даного класу електроапаратів в нашій країні і за рубежом.

В роботі [22] відзначено, що в Японії розроблено метод контролю контактного з'єднання в електроапаратах. Встановлено, що перерозподіл струму, який виникає через погіршення контакту, в контрольованому вузлі викликає перерозподіл магнітного поля в просторі, що оточує конструкцію струмопроводу, і фіксується за допомогою спеціальних датчиків.

В роботі [23] описаний вакуумний вимикач, що містить вмонтовану мікропроцесорну систему діагностики, яка контролює роботу приводу, контакти у вакуумі, здійснює контроль за обмеженнями перенапруги, за механічними деталями вимикача, контроль наявності кола соленоїда відключення вимикача.

Фірма Toshiba Corporation разом із Токуо Electric Power Co створила і ввела систему моніторингу операцій з вимикачем і стан його електроізоляції. При цьому фіксується час вмикання вимикача по фазах, при неполадці видається попереджувальний сигнал [24].

Для зменшення спрацювання вимикача використовується система відключення струму пошкодження в момент його переходу через нуль [25].

В Японії розроблена і впроваджена система зовнішньої діагностики стану вимикачів за допомогою рентгенівських променів [26]. Сюди також входить пристрій аналізу інфрачервоного випромінювання для вимірювання температури в окремих точках;

система спостереження за короною; накопичувальний реєстратор для контролю стану контактів вимикачів.

В роботі [27] відзначається, що для діагностики вимикачів широко використовується мікропроцесорна, лазерна техніка та оптоелектроніка.

Великий інтерес має методика обслуговування вимикачів, що описана в роботах [28, 29, 30]. Відповідно до цієї методики необхідно враховувати СКЗ в момент комутації, проте пристрої для підсумовування СКЗ відсутні, а тому експлуатаційний персонал для оцінки залишкового ресурсу вимикачів користується спеціальними таблицями.

## **1.2. Аналіз засобів технічної діагностики вимикачів**

Відомо [31], що до показників якості електричних апаратів відносяться комутаційний і механічний ресурси вимикача.

Для визначення залишкового комутаційного ресурсу вимикачів в даний час використовуються механічні лічильники, якими комплектуються вітчизняні вимикачі і які спрацьовують внаслідок переміщення рухомих частин вимикача в момент комутації шляхом впливу на лічильник за допомогою гнучкої тяги [32, 33].

Головним їх недоліком є те, що вони підраховують число спрацьовувань вимикача без врахування значень струму, що відключається. Тому залишковий комутаційний ресурс вимикача після чергового спрацювання визначається з неприпустимо великою похибкою.

Існує також пристрій, що містить електромагнітний лічильник імпульсів, блок-контакт вимикача і контакти реле фіксації командних імпульсів [34], який визначає залишковий комутаційний ресурс вимикача лише при відключенні СКЗ, проте він має такий же недолік, як і механічні лічильники імпульсів, а саме: за показниками лічильника залишковий ресурс вимикача визначається з великою похибкою, оскільки вимикачем комутуються різні струми. Крім того, зовсім не враховується спрацювання комутаційного ресурсу при відключенні струмів навантаження.

Іншим пристроєм для визначення комутаційного ресурсу вимикача є багатодіапазонний лічильник коротких замикань типу СКЗ-6 [35, 36], в якому весь діапазон СКЗ, що вимірюється, розбитий на шість піддіапазонів. Інформація по кожному піддіапазону струму, що відключається, виводиться на електромагнітні лічильники імпульсів. Якщо даний пристрій фіксує струм відключення вимикача, значення якого дорівнює струмові, що входить, наприклад, у

четвертий піддіапазон, то вихідні лічильники трьох попередніх піддіапазонів також збільшують свої показники на одиницю відліку. Це ускладнює застосування даного пристрою, оскільки при фіксації ним різноманітних значень СКЗ важко підрахувати по різних даних лічильників кожного піддіапазону загальний вичерпаний або залишковий ресурс вимикача. Крім того, залежностей струму відключення від числа спрацьовувань вимикача не існує, а по декількох значеннях, що наводяться в паспорті вимикача, неможливо зробити розрахунок залишкового ресурсу вимикача.

При визначенні комутаційного ресурсу вимикача можна використовувати значення потужності і енергії електричної дуги [37], проте вимірювання цих параметрів має ряд особливостей, оскільки процес відключення СКЗ (або вмикання вимикача на СКЗ) є перехідним, потужність і енергія, що виділяються в дузі в різноманітні напівперіоди, як правило, не рівні.

Вимірювання миттєвої потужності і енергії при відключенні вимикача пов'язано з рядом проблем, а саме: із недоступністю контактів, між якими горить дуга; з наявністю сильних електростатичних і електромагнітних полів електричної дуги; із тим, що напруга на дузі під час її горіння набагато менша напруги після того, як вона погасла; потужність електричної дуги є функцією часу та має випадковий характер.

При використанні перетворювачів Хола для виміру потужності і енергії дуги у високовольтному вимикачі принципово можливі два варіанти вимірювальних установок:

1. Керуючий струм  $I_{кер}$  в перетворювачі пропорційний струму в дузі  $i_d$ , а напруженість магнітного поля  $H$  - напрузі на дузі  $u_d$ .
2. Керуючий струм створюється напругою на дузі, а магнітне поле – струмом дуги.

В першому варіанті забезпечення пропорційності між  $i_d$  і  $I_{кер}$  не викликає труднощів і здійснюється за допомогою шунта або повітряного трансформатора струму. Набагато складніше забезпечити пропорційність між  $H$  и  $u_d$ . Для створення магнітного потоку, що збігається за формою і фазою з  $u_d$ , потрібно магнітопрвід. Проте, оскільки  $u_d$  містить спектр гармонік, важко скорегувати спотворення форми потоку і запізнювання відносно прикладеної напруги.

Тому доцільний другий варіант установки, структурна схема якої приведена на рис. 2.

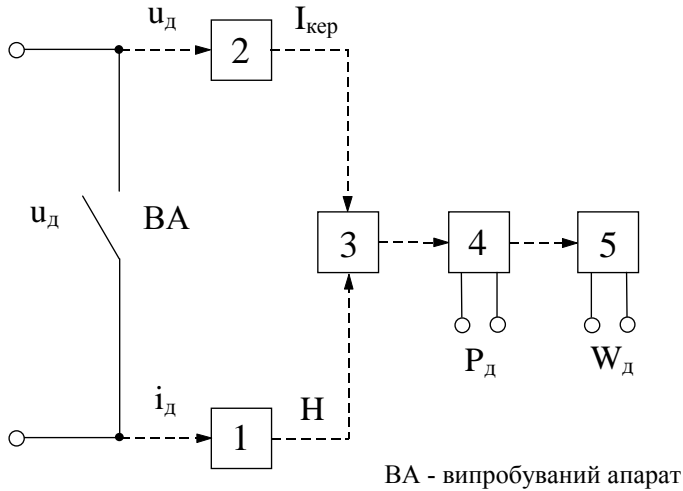


Рис. 2. Структурна схема установки для вимірювання потужності і енергії електричної дуги

В цьому варіанті використовується магнітне поле, що виникає поблизу струмової шини при протіканні по ній струму дуги  $i_d$ . Керуючий же струм  $I_{кер}$  може бути отриманий пропорційним напрузі  $u_d$  за допомогою дільника напруги.

На рис. 2 введені такі позначення: 1 - вимірювальний перетворювач струму  $i_d$  у  $H$ ; 2 - вимірювальний перетворювач напруги  $u_d$  в  $I_{кер}$ ; 3 - множний пристрій, що перемножує  $H$  і  $I_{кер}$  за допомогою перетворювача Хола; 4 - підсилувач, що дає на виході напругу, пропорційну потужності дуги  $P_d$ ; 5 - інтегруючий підсилувач, на виході якого утворюється сигнал, пропорційний енергії  $W_d$ , що виділяється в дузі.

Проте слід зазначити, що якщо в першому варіанті перетворювач Хола міг бути віддалений від струмової шини і поміщався в зазорі магнітопровода, що створює спотворене в часі, але просторово однорідне магнітне поле, то в другому варіанті перетворювач повинен розташовуватися поблизу струмових шин у неоднорідному магнітному полі, що виникає навколо струмопровода при протіканні по ньому великого струму. При цьому вихідна напруга, що з'являється на холовських електродах, може мати спотворення по амплітуді і, особливо, по фазі відносно струму в шині.

При обраній структурній схемі (рис. 2) вимірювальний перетворювач струму складається з відповідної шини і пристосування



для установки перетворювача Хола поблизу цієї шини в тій частині простору, де напруженість магнітного поля синфазна зі струмом.

Вимірювальний перетворювач напруги, що створює в перетворювачі Хола керуючий струм  $I_{кер}$ , пропорційний напрузі на дузі, являє собою дільник напруги [37], до низьковольтного плеча якого підключений обмежувальний елемент у вигляді неонові лампи або стабілітрона. Необхідність надійного обмеження обумовлена тим, що допустима потужність розсіювання перетворювача Хола є невеликою (порядку 0,1 Вт), а після гасіння дуги напруга, що відновлюється, більша дугової в 10-50 разів. Для компенсації активного і індуктивного падіння напруги на шинах застосована схема, що складається з повітряного трансформатора струму, включеного в інтегруюче коло з конденсатора та резисторів.

При використанні високоомного дільника напруги для одержання достатнього  $I_{кер}$  (порядку 10 мА) застосовується підсилювач потужності, зібраний по балансній схемі. Напруга з виходу підсилювача, яка пропорційна напрузі на дузі, підводиться до кіл керування перетворювачем Хола. Оскільки в цьому випадку  $U_{кер}$  і  $u_d$ , максимальна напруженість середньої лінії перетворювача Хола  $H_{cm}$  і найбільше значення струму  $I_m$  пропорційні один одному, а фазовий зсув між вихідною напругою перетворювача і струмом в шині  $\varphi_c = 0$ , то вихідна напруга перетворювача Хола може бути визначеною за формулою [37]:

$$U_y = k_p \cdot u_d \cdot I_m \cdot \sin \omega t = k_p \cdot P_d, \quad (1.1)$$

де  $P_d = u_d \cdot I_m \cdot \sin \omega t$  - потужність, що виділяється в електричній дузі,  $k_p$  - коефіцієнт пропорційності.

Вихідна напруга перетворювача, яка пропорційна потужності, подається на підсилювач постійного струму, що має регульований коефіцієнт підсилення і вихід на шлейф магнітоелектричного осцилографа і на інтегрувальний підсилювач, що дає на своєму виході значення енергії.

Похибка приладу при вимірюванні потужності визначається похибкою перетворення струму в напруженість поля; похибкою дільника напруги, а також похибкою перемножуючого елемента самого перетворювача Хола. На похибці позначається також нестабільність параметрів підсилювачів. За даними, наведеними в роботі [37], похибка пристрою, виготовленого за схемою рис. 2 (без урахування похибки дільника напруги), складає  $\pm 3,5\%$ .

При вимірюванні енергії на точність виміру впливають параметри кола інтегрування. Графік визначеної активної потужності, що

виділяється в електричній дузі, завжди має вигляд пульсуючої кривої. Як відомо [38], при інтегруванні кривих такого виду основну похибку дає постійна складова, тому що змінна складова інтегрується точніше. Проаналізуємо похибку при інтегруванні за допомогою інтегровального кола,  $R_w C_w$ . Нехай  $U_p$  - напруга, яка пропорційна постійній складовій потужності, тобто  $U_w$  - напруга, що знімається з ємності  $C_w$ , є пропорційною інтегралу потужності, тобто енергії. Очевидно, що

$$U_w = U_p \left( 1 - e^{-t/\tau_w} \right), \quad (1.2)$$

де  $\tau_w = R_w C_w$  - постійна часу інтегровального кола.

В ідеальному випадку інтегрування відбувалося б по прямій, дотичній до експоненти на початку координат. Оскільки

$$\left( \frac{dU_w}{dt} \right)_{t=0} = \frac{U_p}{\tau_w},$$

то

$$U_D = U_p \cdot \frac{t}{\tau_w}. \quad (1.3)$$

Відносна похибка - різниця між  $U_w$  і  $U_w^{iD}$  віднесена до  $U_w^{iD}$ ,

$$\delta_w = -\frac{1}{2} \cdot \frac{t}{\tau_w} + \frac{1}{6} \cdot \left( \frac{t}{\tau_w} \right)^2 - \frac{1}{24} \cdot \left( \frac{t}{\tau_w} \right)^3 + \dots \quad (1.4)$$

Ця формула показує, що похибка  $\delta_w$  змінюється в часі і залежить від  $\tau_w$ . Так, застосовуючи ланцюг з  $\tau_w = 1\text{с}$ , можна інтегрувати протягом 5 напівперіодів з похибкою, що не перевищує  $\pm 2,5\%$ , а протягом 10 напівперіодів - з похибкою, не більшою  $\pm 5\%$ .

Описаний пристрій хоча і придатний для визначення потужності і енергії електричної дуги в момент комутації вимикачем СКЗ, проте за його допомогою не можна визначати залишковий комутаційний ресурс серійного вимикача, оскільки в ньому не передбачений накопичувач інформації і щораз на виході пристрою з'являється інформація лише про останню комутацію.

Крім того, пристрій достатньо складний для наладки, а тому він знайшов застосування лише для лабораторних досліджень вимикачів.

Для реєстрації струмів та напруги аварійного режиму електричної мережі використовуються шлейфові осцилографи [39], але ці пристрої

зовсім непридатні для контролю залишкового комутаційного ресурсу вимикачів.

Існує пристрій для фіксації кількості електрики в дузі швидкодіючого вимикача [40], структурна схема якого наведена на рис. 3.

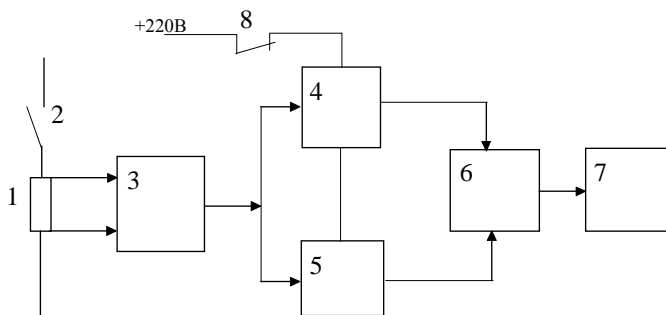


Рис. 3. Структурна схема пристрою для фіксації кількості електрики в дузі швидкодіючого вимикача

Пристрій містить: 1 - шунт; 2 - швидкодіючий вимикач; 3 - аналоговий перетворювач струм-напруга; 4 - пороговий орган; релаксаційний генератор; 6 - блок запам'ятовування та зчитування; 7 - електромеханічний лічильник імпульсів; 8 - блок-контакт вимикача 2.

Працює пристрій так. При аварійному відключенні вимикачем 2 струму сигнал з шунта 1 через аналоговий перетворювач струм-напруга 3 подається на вхід порогового органа 4 і перший вхід керованого релаксаційного генератора 5. Пороговий орган 4 налагоджений таким чином, що спрацює в момент досягнення струму, що протікає через шунт 1, значення уставки швидкодіючого вимикача 2. Керуюча напруга поступає на перший вхід релаксаційного генератора 5 постійно, але імпульси на його виході з'являються лише в момент відключення вимикача 2, оскільки напруга живлення на релаксаційний генератор 5 подається після спрацювання порогового органа 4, тобто після появи на другому вході релаксаційного генератора 5 живлячої напруги. Керований релаксаційний генератор 5 виробляє вихідний імпульс кожен раз, коли через електричну дугу вимикача 2 протікає завчасно задана кількість електрики, причому чим більше значення струму електричної дуги, тим частіше ідуть вихідні імпульси. Імпульси з виходу релаксаційного генератора 5 поступають на запам'ятовуючий вхід блока запам'ятовування та зчитування 6. В момент спрацювання

порогового органа 4 блок запам'ятовування та зчитування 6 готується до роботи (встановлюється в нульове положення) і після приходу "пачки" імпульсів запам'ятовує в двійковому коді кількість імпульсів, що поступили з виходу релаксаційного генератора 5. Після розриву електричної дуги вимикачем 2 напруга на виході аналогового перетворювача 3 стає рівною нулю і релаксаційний генератор 5 перестає генерувати імпульси. Одночасно пороговий орган 4, повертаючись у початковий стан, видає команду на зчитування числа імпульсів, закодованого в запам'ятовуючій частині блока 6 при вимкненні вимикача 2. Результати зчитування фіксуються електромеханічним лічильником імпульсів 7.

Пристрій також дозволяє враховувати кількість електрики, що протікає в дузі вимикача і при оперативному відключенні. Для цього до додаткового входу порогового органа 4 підключено нормально-замкнений блок-контакт 8 вимикача 2. За допомогою цього контакту в момент відключення вимикача 2 подається команда на примусове спрацювання порогового органа 4, після чого пристрій працює так, як при аварійному відключенні вимикача. Після кожного відключення вимикача блок запам'ятовування та зчитування 6 готується до роботи (встановлюється в нульове положення), кодує число імпульсів, які пройшли з релаксаційного генератора 5, і проводить зчитування. Результати підсумовує лічильник імпульсів 7.

Головним недоліком пристрою є те, що він враховує спрацювання комутаційного ресурсу вимикача по кількості електрики, що пройшла через вимикач в процесі комутації, в той час як ресурс вимикача в його паспорті задається кількістю комутацій певних значень струму. Крім того, застосування пристрою ускладнюється, оскільки релаксаційний генератор 5 необхідно переналагоджувати під конкретні умови експлуатації.

Відомий також пристрій для контролю ресурсу комутаційних апаратів [41], структурна схема якого приведена на рис. 4.

На схемі: 1 - датчик струму, 2 - датчик напруги дуги, 3 - датчик комутацій, 4 - аналого-частотний перетворювач, 5 - генератор імпульсів, 6 - тригер керування, 7,8 - лічильники імпульсів, 9 - блок передачі, 10 - елемент порівняння.

Пристрій працює так. При виникненні короткого замикання в контрольованому приєднанні на виході датчика струму 1 з'являється сигнал, пропорційний струму в мережі, що надходить на вхід аналого-частотного перетворювача 4. Через час, необхідний для спрацювання первинного струмового реле в схемі релейного захисту комутаційного апарата, датчик комутацій 3 видає сигнал початку комутації і запускає аналого-частотний перетворювач 4, що

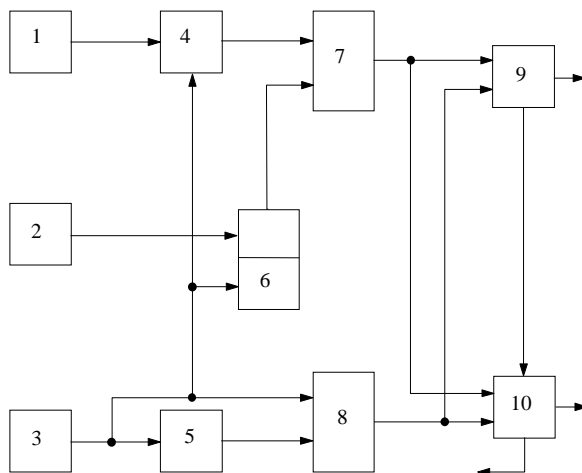


Рис. 4. Структурна схема пристрою для контролю ресурсу комутаційних апаратів

виробляє імпульси з частотою, пропорційною значенню комутованого струму і передає їх на вхід першого лічильника імпульсів 7. Одночасно цей сигнал від датчика комутації 3 надходить на нульовий вхід тригера керування 6, утримуючи його в неробочому стані і забезпечуючи тим самим блокування роботи лічильника 7. Цей же сигнал запускає в роботу генератор імпульсів 5, що виробляє імпульси і передає їх на вхід другого лічильника імпульсів 8, який фіксує час повного відключення комутаційного апарата.

При розмиканні силових контактів вимикача на них з'являється перехідна напруга відновлення, під дією якої спалахує електрична дуга і спрацьовує датчик 2. Дискретний сигнал від цього датчика приводить тригер керування 6 у робочий стан, відкриваючи тим самим лічильник імпульсів 7.

Кількість імпульсів, що надійшли в лічильник, пропорційна значенню комутованого струму і часу руйнуючої дії електричної дуги на силові контакти і дугогасні пристрої комутаційного апарата, тобто еквівалентно енергії їхньої руйнації.

У вимірюванні цієї енергії руйнації, що визначає спрацювання силових контактів і дугогасних пристроїв, і полягає вимірювання ресурсу, витраченого комутаційним апаратом за одне відключення.

Таким чином, протягом всього часу комутації вимикачем на вхід лічильника імпульсів 7 надходять імпульси в кількості, пропорційній значенню витраченого ресурсу за час кожної комутації

$$n_i = C \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt, \quad (1.5)$$

де  $C$  - коефіцієнт пропорційності,  $I(t)$  - значення комутованого струму,  $t_1$  - час початку розмикання контактів комутаційного апарата,  $t_2$  - час завершення горіння електричної дуги.

Після загасання дуги датчик комутацій 3 видає сигнал закінчення комутації, який закриває лічильник імпульсів 8 часу повного відключення комутаційного апарата, переводить тригер керування 6 у робоче положення, закриваючи цим лічильник імпульсів 7, зупиняє аналого-частотний перетворювач 4 і генератор імпульсів 5.

При наступних відключеннях ступінь спрацювання силових контактів і дугогасних пристроїв комутаційних апаратів збільшується, про що свідчать нові посилки імпульсів ( $n_i$ ) в лічильник імпульсів 7, де вони підсумовуються наростаючим результатом

$$N = \sum_{i=1}^k n_i, \quad (1.6)$$

де  $k$  - кількість комутацій.

При накопиченні в лічильнику імпульсів 7 числа імпульсів, рівного заданому  $N_1$ , включається попереджувальна сигналізація, а при досягненні  $N_2$  значення призначеного ресурсу між двома суміжними капітальними ремонтами блокується привід комутаційного апарата.

Лічильник імпульсів 8 призначений для відліку часу повного відключення комутаційного апарата. В елементі порівняння 10 цей час порівнюється із заданим і вмикається сигналізація про його перевищення.

Інформація про стан комутаційного апарату і його привід від лічильника імпульсів 7 і 8 через блок передачі 9 поступає на диспетчерський пункт.

Головним недоліком даного пристрою є те, що він використовує такий елемент як датчик напруги дуги. Процес горіння дуги протікає в закритій дугогасній камері вимикача і тому прямим шляхом виміряти напругу дуги неможливо. Якщо скористатись непрямим методом, то до кожного полюсу вимикача необхідно підключати пристрій для виміру напруги на його контактах. Таким пристроєм може бути трансформатор напруги, ємнісний подільник та ін., підключені паралельно кожному полюсу вимикача. Слід зазначити, що для класу напруг 110 - 750 кВ подібні пристрої мають великі габарити і високу вартість. Крім того, згідно Правил Обладнання

Електроустановок [43] та Правил технічної експлуатації електричних станцій та мереж [44], паралельно вимикачу не дозволяється підключати ніякі елементи мережі. Тому даний пристрій використати в електричних системах та мережах практично неможливо.

### **1.3. Висновки**

Як витікає з аналізу, описані пристрої для вимірювання комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів мають такі обмеження, які роблять їх практично непридатними для технічної діагностики цих вимикачів.

А тому розробка більш ефективних пристроїв для розв'язання даної задачі є актуальною.

## Розділ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ, ПРИДАТНОЇ ДЛЯ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

### 2.1. Розробка математичної моделі високовольтного вимикача як об'єкта діагностики

Як уже було відзначено в першому розділі, кількість комутацій, яку може зробити високовольтний вимикач, істотно залежить від значень комутуваного струму.

В роботі [45] показано, що вимикач серії ВМПП може здійснити 17 відключень струму короткого замикання значенням до 12 кА і всього лише 6 відключень, якщо струм короткого замикання досягає значення 31,5 кА.

Оскільки кожний сучасний вимикач комплектується механічним [32, 33], або електричним [34] лічильниками імпульсів, що визначають комутаційний ресурс вимикача без врахування значення комутуваного струму, то для правильної оцінки залишкового ресурсу вимикача необхідно синтезувати пристрій, що враховує струм комутації.

Очевидно, що для підвищення точності оцінки ресурсу вимикача необхідно мати характеристику, що відображає залежність числа комутацій  $n$  від значень комутуваного струму  $I$ . Ця залежність і може стати математичною моделлю, придатною для діагностування високовольтного вимикача з метою оцінки його комутаційного ресурсу.

Як правило, у паспортних даних вимикача така характеристика не приводиться, проте в довідкових матеріалах можна знайти її декілька значень [45, 46, 47, 48, 49]. Наприклад, для вимикачів серії ВВШ у роботі [48] приведені чотири значення ресурсної характеристики, що задаються табл. 1.

Таблиця 1

$I(\text{кА})$	2	7.5	15	25
$n$	500	60	30	20

Виникає задача – по декількох значеннях ресурсної характеристики вимикача відновити її всю. Розв'язання цієї задачі ускладнюється тим, що хоча залежність  $n = f(I)$  і нагадує гіперболу (рис. 5) насправді такою не є, у чому легко переконатися, вирахувавши добуток ( $n \cdot I$ ) у кожному стовпчику таблиці 1 (як відомо [38] для гіперболи значення цих добутків є величиною сталою).



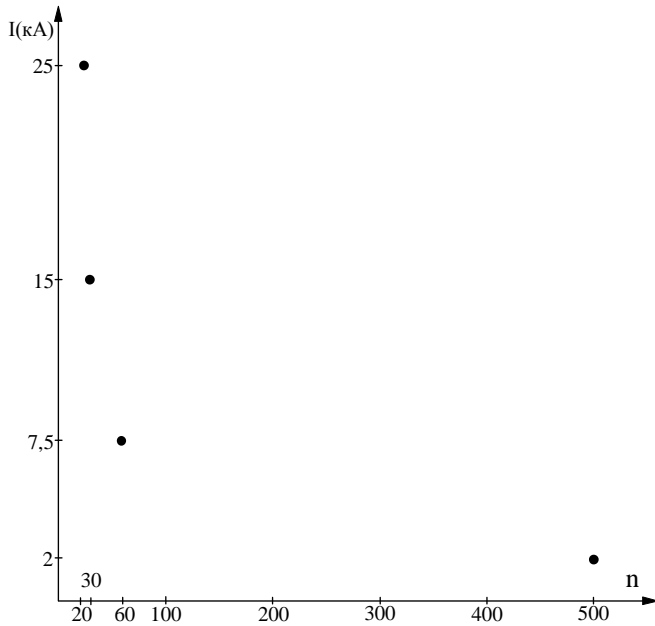


Рис. 5. Залежність кількості мутацій від значення комутованого струму

Для побудови ресурсної характеристики здійснимо гіперболічну нормалізацію таблиці відомих значень ресурсної характеристики по найбільшому значенню добутку ( $n \cdot I$ ), тобто, виходячи з першого стовпчика,

$$n \cdot I = 1000. \quad (2.1)$$

Для зручності приведемо співвідношення (2.1) до вигляду

$$\frac{I}{10} = \frac{100}{n}, \quad (2.2)$$

або, що те ж саме, до вигляду

$$I^* = \frac{1}{n^*}. \quad (2.3)$$

Виходячи з виразу (2.3), який витікає з (2.2), нормалізуємо інші значення цієї таблиці. В результаті отримаємо табл. 2.

Таблиця 2

$I^* = \frac{I}{10}$	0,2	0,75	1,5	2,5
$\frac{1}{n^*} = \frac{100}{n}$	0,2	1,67	3,3	5

Далі перейдемо до розгляду гіперболічно нормалізованої оберненої функції

$$\frac{1}{n^*} = f(I^*),$$

яка у випадку "чистої" гіперболи являла б собою пряму лінію, а в нашому випадку очевидно буде апроксимуватися степеневим поліномом порядку вище першого

$$\frac{1}{n^*} = a_0 + a_1 I^* + a_2 (I^*)^2 + \dots + a_m (I^*)^m. \quad (2.4)$$

Для визначення порядку  $m$  полінома  $f(I^*)$  і значень його коефіцієнтів  $a_i, i = \overline{1, m}$  використовуємо метод найменших квадратів (МНК) [50] у поєднанні з зовнішнім критерієм О.Г.Івахненко [51], що використовує поняття "свіжих" точок. Відповідно до цього критерію порядок полінома (2.4), що апроксимує залежність  $f(I^*)$ , буде оптимальним у тому випадку, коли поліном, коефіцієнти якого розраховані по МНК на навчальній послідовності точок, буде давати мінімум суми квадратів відхилень

$$\Delta = \sum_{i=1}^k \left( \frac{1}{n^*} - a_0 - a_1 (I^*) - \dots - a_m (I_i^*)^m \right)^2 \quad (2.5)$$

на послідовності, що містить також  $i$  "свіжі" точки, не використані при визначенні коефіцієнтів  $a_i, i = \overline{1, m}$ .

Склавши систему нормальних рівнянь Гауса для виразу (2.5) та розв'язавши їх за допомогою, наприклад, пакету прикладних програм MathCAD7.0Pro [52], отримаємо наступні поліноміальні вирази:

$$\begin{aligned} f_1(I^*) &= -0,0138 + 2,072 \cdot I^*, \\ f_2(I^*) &= -0,378 + 2,964 \cdot I^* - 0,3254 \cdot (I^*)^2, \\ f_3(I^*) &= -0,0875 + 1,728 \cdot I^* + 0,743 \cdot (I^*)^2 - 0,2435 \cdot (I^*)^3. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Значення  $\Delta$ , обчислені з урахуванням однієї "свіжої" точки по виразу (2.5) для функцій (2.6), виявилися відповідно рівними:

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= 62689, \\ \Delta_2 &= 22,527, \\ \Delta_3 &= 24,131.\end{aligned}\tag{2.7}$$

З співвідношень (2.7) очевидно, що найкраще функцію  $\frac{1}{n^*} = f(I^*)$ , що є оберненою до ресурсної характеристики вимикача, апроксимує залежність  $f_2(I^*)$ .

Розв'язання задачі завершується побудовою ресурсної характеристики  $n = f(I)$  на підставі співвідношень переходу (2.2) і (2.3).

Запропонована методика побудови ресурсної характеристики високовольтних вимикачів опублікована в роботі [53].

Знаючи залежність  $n = f(I)$ , легко знайти вагові коефіцієнти  $r_i$ , якими враховується спрацювання комутаційного ресурсу вимикача при будь-яких значеннях струму  $I_i$ , що протікає через вимикач в момент комутації.

$$r_i = \frac{1}{n_i},\tag{2.8}$$

де  $n_i$  - значення кількості комутацій струму  $I_i$ .

Враховуючи вищеведене, моделювати залишковий комутаційний ресурс вимикача можна за виразом

$$R = 1 - \sum_{i=1}^X r_i.\tag{2.9}$$

Для технічної реалізації системи діагностики високовольтних вимикачів необхідно отримати вагові коефіцієнти, якими враховується процес вичерпання комутаційного ресурсу вимикача, в зручній формі.

Позначимо  $r_n = \frac{1}{n_n}$  ресурс вимикача, що спрацьовується під час однієї комутації номінального робочого струму вимикача  $I_n$ . Очевидно, що кількість комутацій, яку може здійснити вимикач, дорівнює  $n_n$ . Тоді для будь-якого значення комутуваного струму  $I_i$  спрацювання робочого ресурсу вимикача за одну комутацію буде визначатись згідно (2.8).

Тож відношення

$$k_i = \frac{I_i}{I_n}, \quad (2.10)$$

яке характеризує як витрачається комутаційний ресурс вимикача за одну комутацію струму  $I_i$  по відношенню до струму  $I_n$  і являє собою ваговий коефіцієнт  $k_i$ , що кількісно віддзеркалює ступінь спрацювання ресурсу вимикача за одну комутацію в перерахунку на кількість комутацій номінального робочого струму вимикача.

При цьому залишковий ресурс вимикача знаходиться за формулою

$$R = n_n - \sum_{i=1}^X k_i m_i, \quad (2.11)$$

де  $X$  - загальна попередньо невідома кількість комутацій, яку може виконати вимикач до повного спрацювання робочого ресурсу,  $m_i$  - кількість комутацій  $i$ -го значення комутуваного струму.

Слід зазначити, що таку "прив'язку" у визначенні ресурсу вимикача можна виконати для будь-якого значення струму.

## 2.2. Висновки

1. На основі гіперболічної нормалізації відомих значень ресурсної характеристики високовольтного вимикача при використанні методу найменших квадратів у поєднанні з зовнішнім критерієм О.Г. Івахненко розроблена математична модель вимикача, яка є придатною для розв'язання задачі визначення його ресурсу після чергової комутації.

2. Запропонована методика адаптації моделі ресурсної характеристики та визначення вагових коефіцієнтів для синтезу системи технічної діагностики високовольтних вимикачів.

### **Розділ 3. СИНТЕЗ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ**

#### **3.1. Вибір математичного апарату, придатного для розв'язання задачі синтезу структури системи діагностики**

З попереднього розділу витікає, що для того, щоб одержати достовірну інформацію про залишковий комутаційний ресурс вимикача, необхідно враховувати не лише кількість комутацій, але і струм, що відключається вимикачем. Оскільки промисловістю такі пристрої не випускаються, то постає задача синтезу структури системи діагностики високовольтного вимикача, яка враховує і цю обставину.

В роботі [54] зазначено, що спрацювання вимикача при струмах відключення, співвимірних за рівнем з номінальним робочим струмом, здійснюється в основному за рахунок механічних переключень, тобто ігнорується той факт, що відключення великих струмів призводить також до істотного термічного і динамічного впливу на вимикач.

Тож в системі діагностики необхідно поєднати врахування впливу відключень як малих так і великих струмів.

Отже, до лічильника, який входить у стандартну систему діагностики, що враховує спрацювання вимикача шляхом підрахування числа комутацій номінального робочого струму (це число легко визначити з ресурсної характеристики вимикача), необхідно додати підсистему врахування струмів, що перевищують за значенням номінальний робочий струм, при реалізації якої слід використати вагові коефіцієнти, за якими перевищення комутowanego струму над номінальним можна враховувати додатковою кількістю відключень номінального робочого струму [55].

З викладеного можна зробити висновок, що структура системи діагностики вимикача повинна бути синтезована з урахуванням ряду логічних виразів, за якими враховуються різні значення комутowanego струму, що робить структуру пристрою достатньо складною. Тому для синтезу структури системи діагностики доцільно використовувати математичний апарат секвенцій [56, 57], який є настільки ж універсальним, як і класична мова кінцевих автоматів - мова автоматних таблиць, проте описи на мові секвенцій є більш компактними. Крім того, цей математичний апарат зручніший для синтезу систем з розподіленою пам'яттю.

Як відзначається в роботі [56] при використанні апарату секвенцій кожна складова частина складного логічного вислову записується у вигляді виразу:

$$\varphi(x) \vdash \psi(y), \quad (3.1)$$

що можна інтерпретувати таким чином: висловлення  $\psi$  істинне, коли істинне висловлення  $\varphi$ .

Кінцевий автомат з пам'яттю, для опису якого необхідно задати функцію переходів і функцію виходів можна представити за допомогою секвенціальних виразів виду [56]:

$$\tilde{X}_{i_1} \dots \tilde{X}_{i_q} \tilde{S}_{i_1} \dots \tilde{S}_{i_r} \vdash \tilde{S}_{j_1} \dots \tilde{S}_{j_r}, \quad (3.2)$$

$$\tilde{X}_{i_1} \dots \tilde{X}_{i_q} \tilde{S}_{i_1} \dots \tilde{S}_{i_r} \vdash \tilde{Y}_{k_1} \dots \tilde{Y}_{k_v}, \quad (3.3)$$

де  $q$  - число розрядів коду вхідних символів;

$r$  - число розрядів коду станів;

$v$  - число розрядів коду вихідних символів;

$\tilde{x}_t$  - значення кодових змінних вхідних символів ( $t = 1, \dots, q$ );

$\tilde{s}_p, \tilde{s}_{j_p}$  - значення кодових змінних станів ( $p = 1, \dots, r$ );

$\tilde{y}_{k_w}$  - значення кодових змінних вихідних символів ( $w = 1, \dots, v$ ).

Змінна  $\tilde{u}_{l_s} \in \{ \tilde{x}_t, \tilde{s}_p, \tilde{s}_{j_p}, \tilde{y}_{k_w} \} \in$  або  $u_{l_s}$ , або  $\overline{u_{l_s}}$ .

Вирази (3.2) і (3.3) описують функціонування автомата, функція виходів якого залежить як від стану, так і від вхідного слова. Такий автомат називають автоматом Мілі [58]. Якщо функція виходів автомата така, що кожному внутрішньому стану автомата відповідає одне визначене вихідне слово, незалежно від того, під впливом якого вхідного слова перейшов він у цей стан, то такий автомат називають автоматом Мура [58].

Кінцевий автомат Мура може бути описаний системою, що складається із секвенцій такого виду [56]:

$$\tilde{X}_{i_1} \dots \tilde{X}_{i_q} \tilde{S}_{i_1} \dots \tilde{S}_{i_r} \vdash \tilde{S}_{j_1} \dots \tilde{S}_{j_r}, \quad (3.4)$$

$$\tilde{S}_{i_1} \dots \tilde{S}_{i_r} \vdash \tilde{Y}_{k_1} \dots \tilde{Y}_{k_v}. \quad (3.5)$$

Для синтезу структури системи діагностики вимикача будемо використовувати вирази виду (3.4) і (3.5), оскільки запис у накопичувальний лічильник залишкового ресурсу вимикача і відповідний перерахунок здійснюються після відключення визначеного рівня струму вимикачем.

Якщо до складу структури системи діагностики входять часові елементи, що обумовлюють затримку окремих блоків на спрацьовування або на повернення, то ці часові елементи можна зобразити за допомогою часових булевих функцій [59], що визначені такими виразами

$$\tau = \begin{cases} 0, & t < T, \\ 1, & t \geq T, \end{cases} \quad (3.6)$$

де  $\tau$  - змінна часу;

$t$  - поточне значення часу;

$T$  - поріг часу.

Отже, при синтезі структури системи діагностики вимикача будемо враховувати відключення великих (у порівнянні з номінальним робочим) струмів у перерахунку на номінальний робочий струм вимикача і малих струмів, або, що те саме, механічних відключень вимикача.

### **3.2. Розробка математичної моделі структури системи діагностики вимикача**

В якості датчика механічних відключень вимикача, тобто при струмах, що не перевищують його номінальний робочий струм, будемо використовувати блок-контакт вимикача [33, 34]. Відключення вимикача, що фіксується за допомогою блока-контакту, позначимо  $A$ . Якщо вимикач знаходиться у включеному стані, то цей стан позначимо  $\bar{A}$ .

Для вимірювання коמוтованого струму використовуємо трансформатор струму [60].

В даній синтезованій структурі системи діагностики, як приклад, покажемо необхідність фіксації трьох значень струму, що відключається, хоча в реальних умовах їх набагато більше.

При виділенні кожного значення струму відключення використовуємо компаратор [61]. Позначимо символами  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  перевищення струмами, що відключаються, першого (найменшого), другого і третього порогів фіксування струмів, що відключаються. Відповідно  $\bar{X}_1$ ,  $\bar{X}_2$ ,  $\bar{X}_3$  буде позначати, що комутований струм менше кожного порога спрацьовування.

Фрагмент структурної схеми системи діагностики для фіксування в лічильнику факту відключення вимикачем струму, співвимірною з номінальним робочим струмом, повинен містити тригер і елемент затримки часу на повернення з метою виділення одиночного імпульсу.

Функціонування системи діагностики для виміру ресурсу вимикача при відключенні струмів, співвимірних за значенням із номінальним, полягає в тому, що при включеному вимикачеві тригер знаходиться в стані очікування  $S_1$ , але одразу ж після відключення

вимикача за допомогою сигналу А блок-контакту тригер переходить в стан спрацювання  $S_2$ , а потім під дією сигналу часової затримки  $\tau_1$  він повертається у вихідний стан. В накопичувальний лічильник відпрацьованого комутаційного ресурсу вимикача надходить сигнал  $Y_1$  і стан лічильника збільшується на одиницю. Відповідний граф функціонування системи зображено на рис. 6.

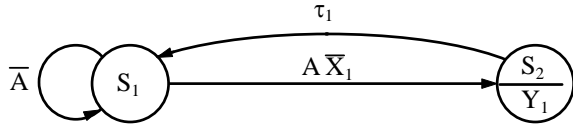


Рис. 6. Граф функціонування системи діагностики вимикача в режимі відключення малих струмів

Аналітично функціонування системи діагностики в режимі відключення малих струмів може бути описано такою системою секвенцій:

$$\begin{cases} A \bar{X}_1 S_1 \vdash S_2, \\ \tau_1 S_2 \vdash S_1, \\ \bar{A} S_1 \vdash S_1, \\ S_2 \vdash Y_1, \end{cases} \quad (3.7)$$

при умові 
$$\begin{cases} \bar{T}_1 \in S_1, \\ T_1 \in S_2, \end{cases} \quad (3.8)$$

де  $T_1, \bar{T}_1$  - стани спрацювання і неспрацювання тригера формування сигналу  $Y_1$ .

Для синтезу структури системи діагностики в режимі відключення великих струмів необхідно спочатку звернути увагу на наступне. Щоб фіксувати три різних значення струму відключення будемо використовувати три тригери. Припустимо, що відключення аварійного струму, що відповідає уставкам першого, другого і третього компараторів, еквівалентно двом, трьом і чотирьом відключенням номінального робочого струму.

Позначимо  $T_2, T_3, T_4$  - тригери, що фіксують перший, другий і третій рівні уставок компараторів.

Оскільки при відключенні будь-якого значення струму, що фіксується компараторами, у накопичувальний лічильник відпрацьованого або залишкового ресурсу вимикача повинні надходити два, три або чотири імпульси, то для подачі цих імпульсів



у вигляді сигналу  $Y_2$  в лічильник системи діагностики вводимо тригер  $T_5$  з часовими затримками  $\tau_4$  і  $\tau_5$  на переключення, а для запам'ятовування імпульсів у процесі перерахунку введемо ще і тригери  $T_6$ ,  $T_7$ ,  $T_8$  і  $T_9$ . В електричній мережі можуть бути ситуації, коли через вимикач протікають струми аварійних режимів роботи електричної мережі, а відключення не відбувається. Це має місце при селективній роботі пристроїв релейного захисту, подвійних замиканнях, кидках струму намагнічування [62] тощо.

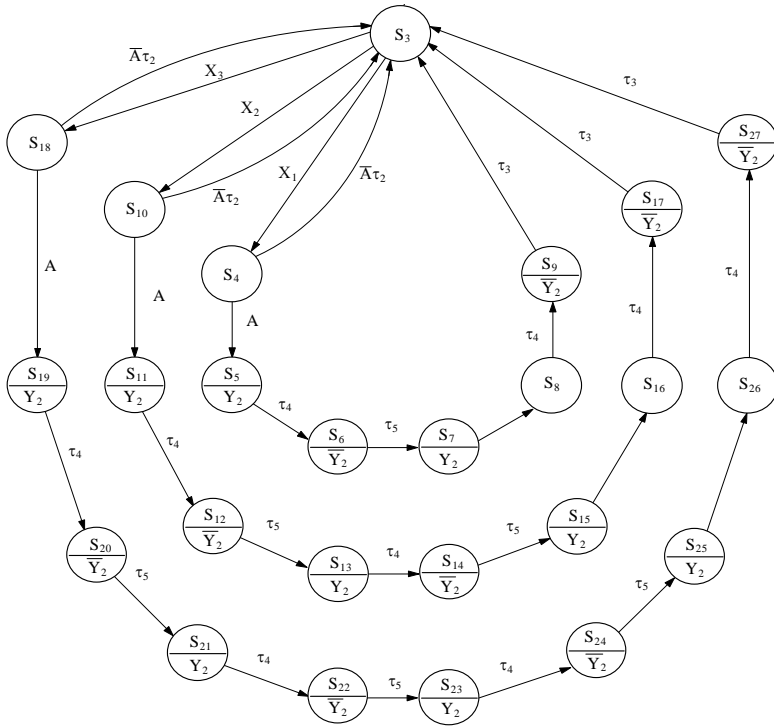


Рис. 7. Граф функціонування системи діагностики вимикача в режимі відключення великих струмів

Очевидно, що в такій ситуації в тригерах  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  залишиться інформація, що відповідає струмам, які протікають через вимикач, але оскільки відключення вимикача не відбувається, то необхідно в систему діагностики ввести часову затримку  $\tau_2$  для обнулення

тригерів  $T_2, T_3, T_4$  через деякий проміжок часу після спрацьовування. Крім того, у структуру необхідно ввести ще і тригер  $T_{10}$  з відповідною затримкою часу  $\tau_3$  для повернення всіх тригерів у вихідний стан по закінченні циклу "вимірювання струму - запис визначеної кількості імпульсів в накопичувальний лічильник".

З урахуванням викладених зауважень граф функціонування системи діагностики вимикача при відключенні великих струмів має вигляд, приведений на рис. 7.

Аналітично функціонування системи діагностики в цьому режимі може бути описано такою системою секвенцій:

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 X_1 S_3 \mapsto '4, & S_{15} \mapsto '16, \\
 \bar{A} \tau_2 S_4 \mapsto '3, & \tau_4 S_{16} \mapsto '17, \\
 AS_4 \mapsto '5, & \tau_3 S_{17} \mapsto '3, \\
 \tau_4 S_5 \mapsto '6, & X_3 S_3 \mapsto '18, \\
 \tau_5 S_6 \mapsto '7, & \bar{A} \tau_2 S_{18} \mapsto '3, \\
 S_7 \mapsto '8, & AS_{18} \mapsto '19, \\
 \tau_4 S_8 \mapsto '9, & \tau_4 S_{19} \mapsto '20, \\
 \tau_3 S_9 \mapsto '3, & \tau_5 S_{20} \mapsto '21, \\
 X_2 S_3 \mapsto '10, & \tau_4 S_{21} \mapsto '22, \\
 \bar{A} \tau_2 S_{10} \mapsto '3, & \tau_5 S_{22} \mapsto '23, \\
 AS_{10} \mapsto '11, & \tau_4 S_{23} \mapsto '24, \\
 \tau_4 S_{11} \mapsto '12, & \tau_5 S_{24} \mapsto '25, \\
 \tau_5 S_{12} \mapsto '13, & S_{25} \mapsto '26, \\
 \tau_4 S_{13} \mapsto '14, & \tau_4 S_{26} \mapsto '27, \\
 \tau_5 S_{14} \mapsto '15, & \tau_3 S_{27} \mapsto '3, \\
 & S_5 \vee S_7 \vee S_{11} \vee S_{13} \vee S_{15} \vee S_{19} \vee S_{21} \vee S_{23} \vee S_{25} \mapsto \dot{2}, \\
 & S_6 \vee S_9 \vee S_{12} \vee S_{14} \vee S_{17} \vee S_{20} \vee S_{22} \vee S_{24} \vee S_{27} \mapsto \dot{2},
 \end{array} \right. \quad (3.9)$$

за умови, що:

$$\begin{aligned}
& \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \in S_3, \\
& T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \in S_4, \\
& T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_5, \\
& T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_6, \\
& T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_7, \\
& \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_8, \\
& \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_9, \\
& T_2 T_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \in S_{10}, \\
& T_2 T_3 \bar{T}_4 T_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_{11}, \\
& T_2 T_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_{12}, \\
& T_2 T_3 \bar{T}_4 T_5 T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_{13}, \\
& T_2 T_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_{14}, \\
& T_2 T_3 \bar{T}_4 T_5 T_6 T_7 T_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_{15}, \\
& \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_{16}, \\
& \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_{17}, \\
& T_2 T_3 T_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \in S_{18}, \\
& T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_{19}, \\
& T_2 T_3 T_4 \bar{T}_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_{20}, \\
& T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_{21}, \\
& T_2 T_3 T_4 \bar{T}_5 T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_{22}, \\
& T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_{23}, \\
& T_2 T_3 T_4 \bar{T}_5 T_6 T_7 T_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_{24}, \\
& T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} \in S_{25}, \\
& \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \in S_{26}, \\
& \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \in S_{27}.
\end{aligned}
\tag{3.10}$$

Оскільки графи, зображені на рис. 6 і 7, характеризують роботу системи діагностики вимикача в різних режимах роботи, то доцільно їх об'єднати для одержання графа, що описує роботу системи діагностики вимикача при відключенні будь-яких значень струму.

Узагальнений граф зображений на рис. 8.

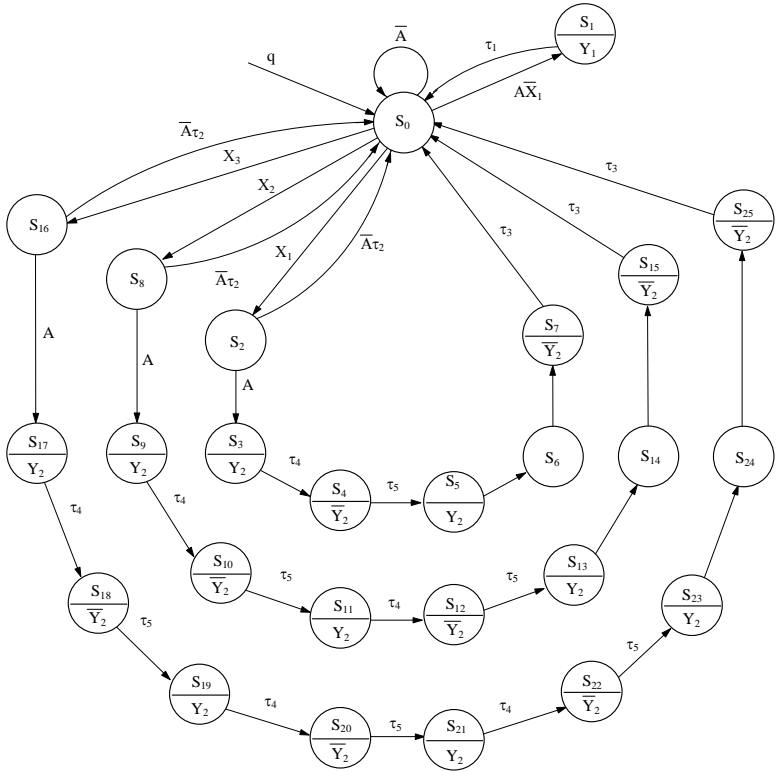


Рис. 8. Граф функціонування системи діагностики вимикача при відключенні будь-яких значень струму

В цьому графі введена ще одна гілка, яка описує сигнал  $q$ , що подається в систему діагностики в момент подачі напруги живлення з метою обнулення всіх тригерів і підготовки їх до робочого циклу. Аналітичні вирази для графа, зображеного на рис. 8, на мові секвенцій з урахуванням формул (3.7) - (3.10) мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}
& q \vdash \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10}, \\
A \bar{X}_1 \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \vdash & T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10}, \\
\tau_1 T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \vdash & \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10}, \\
\bar{A} \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \vdash & \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10}, \\
X_1 \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10}, \\
A \bar{T}_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
\bar{A} \tau_2 \bar{T}_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \vdash & \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10}, \\
\tau_4 \bar{T}_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
\tau_5 \bar{T}_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
& \bar{T}_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
\tau_4 \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash & \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
\tau_3 \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash & \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10}, \\
X_2 \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 T_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10}, \\
\bar{A} \tau_2 \bar{T}_1 T_2 T_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \vdash & \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10}, \\
A \bar{T}_1 T_2 T_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 T_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
\tau_4 \bar{T}_1 T_2 T_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 T_3 \bar{T}_4 T_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
\tau_5 \bar{T}_1 T_2 T_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 T_3 \bar{T}_4 T_5 T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
\tau_4 \bar{T}_1 T_2 T_3 \bar{T}_4 T_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 T_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
\tau_5 \bar{T}_1 T_2 T_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 T_3 \bar{T}_4 T_5 T_6 T_7 T_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
& \bar{T}_1 T_2 T_3 \bar{T}_4 T_5 T_6 T_7 T_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
X_3 \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10}, \\
\bar{A} \tau_2 \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \vdash & \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10}, \\
A \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
\tau_4 \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 \bar{T}_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
\tau_5 \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 \bar{T}_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
\tau_4 \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 \bar{T}_5 T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
\tau_5 \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 \bar{T}_5 T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
\tau_4 \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 \bar{T}_5 T_6 T_7 T_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
\tau_5 \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 \bar{T}_5 T_6 T_7 T_8 \bar{T}_9 T_{10} \vdash & \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}, \\
& \bar{T}_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} \vdash \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10}, \\
& T_1 \tilde{T}_2 \tilde{T}_3 \tilde{T}_4 \tilde{T}_5 \tilde{T}_6 \tilde{T}_7 \tilde{T}_8 \tilde{T}_9 \tilde{T}_{10} \mapsto Y_1, \\
& \bar{T}_1 \tilde{T}_2 \tilde{T}_3 \tilde{T}_4 \tilde{T}_5 \tilde{T}_6 \tilde{T}_7 \tilde{T}_8 \tilde{T}_9 \tilde{T}_{10} \vdash \bar{Y}_1, \\
& \tilde{T}_1 \tilde{T}_2 \tilde{T}_3 \tilde{T}_4 T_5 \tilde{T}_6 \tilde{T}_7 \tilde{T}_8 \tilde{T}_9 \tilde{T}_{10} \vdash Y_2, \\
& \tilde{T}_1 \tilde{T}_2 \tilde{T}_3 \tilde{T}_4 \bar{T}_5 \tilde{T}_6 \tilde{T}_7 \tilde{T}_8 \tilde{T}_9 \tilde{T}_{10} \vdash \bar{Y}_2.
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Оскільки секвенціальна система є (3.11) утворилася достатньо громіздкою, необхідно здійснити її мінімізацію, використовуючи такі властивості секвенцій [56]:

$$(\varphi_1 \vdash \psi_1) \vee (\varphi_2 \vdash \psi_1) \Leftrightarrow [(\varphi_1 \vee \varphi_2) \vdash \psi_1], \quad (3.12)$$

$$(\varphi_1 \varphi_2 \vdash \varphi_1 \psi_1) \Leftrightarrow (\varphi_1 \varphi_2 \vdash \psi_1). \quad (3.13)$$

З цих залежностей виведена також властивість секвенцій, відповідно до якої секвенція  $\varphi_2 \vdash \psi_1$  еквівалентна секвенції  $\varphi_1 \varphi_2 \vdash \psi_1$ , якщо справедливі секвенціальні вирази

$$\varphi_1 \varphi_2 \vdash \psi_1, \quad (3.14)$$

$$\bar{\varphi}_1 \varphi_2 \vdash \psi_1, \quad (3.15)$$

або якщо справедливі вирази

$$\varphi_1 \varphi_2 \vdash \varphi_1 \psi_1, \quad (3.16)$$

$$\varphi_1 \varphi_2 \vdash \bar{\varphi}_1 \psi_1. \quad (3.17)$$

Мінімізація секвенціальної системи (3.11) з використанням вказаних властивостей дозволяє отримати еквівалент цієї системи у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} A \bar{X}_1 \vdash \cdot T_1, \quad X_2 \vdash \cdot T_2 T_3, \\ \tau_1 T_1 \vdash \cdot \bar{T}_1, \quad X_3 \vdash \cdot T_2 T_3 T_4, \quad T_5 \vdash \cdot T_6, \\ X_1 \vdash \cdot T_2, \quad \tau_4 T_5 \vdash \cdot \bar{T}_5, \\ A(\bar{T}_7 T_2 \vee \bar{T}_8 T_2 T_3 \vee \bar{T}_9 T_2 T_3 T_4) \vdash \cdot T_{10}, \\ A(\bar{T}_7 T_2 \vee \bar{T}_8 T_2 T_3 \vee \bar{T}_9 T_2 T_3 T_4) \bar{T}_5 \tau_5 \vdash \cdot T_5, \\ \tau_4 \tau_5 T_5 T_6 \vdash \cdot T_7, \\ \tau_4 \tau_5 T_5 T_6 T_7 \vdash \cdot T_8, \\ \tau_4 \tau_5 T_5 T_6 T_7 T_8 \vdash \cdot T_9, \\ A(T_7 T_2 \vee T_8 T_2 T_3 \vee T_9 T_2 T_3 T_4) \tau_3 T_{10} \vdash \cdot \bar{T}_{10}, \\ q \vee \tau_2 (\bar{T}_7 T_2 \vee \bar{T}_8 T_2 T_3 \vee \bar{T}_9 T_2 T_3 T_4) \vee \\ \vee A T_{10} (T_7 T_2 \vee T_8 T_2 T_3 \vee T_9 T_2 T_3 T_4) \vdash \cdot \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9. \end{array} \right. \quad (3.18)$$

За умови, що:

$$\begin{cases} T_1 \vdash Y_1, \\ T_5 \vdash Y_2. \end{cases} \quad (3.19)$$

Секвенціальні системи (3.18) і (3.19) визначають математичну модель функціонування системи діагностики вимикачів в

однофазному виконанні при відключенні вимикачем як великих, так і малих струмів, співвимірних із номінальним робочим струмом вимикача.

### **3.3. Синтез структури системи діагностики вимикача**

На підставі отриманої математичної моделі у вигляді системи секвенцій (3.18), (3.19) синтезуємо структурну схему системи діагностики вимикача.

Перший етап синтезу полягає в побудові структурної схеми, що реалізує приведену систему секвенціальних виразів.

Системою секвенцій (3.18), (3.19) описують формування сигналу, що переключає регістр елементів пам'яті. Кожна з цих секвенцій реалізується схемою співпадання, на входи якої подаються сигнали, що відповідають кодовій комбінації лівої частини секвенції, і двостабільним елементом, до входу якого через діодну матрицю підключений вихід схеми співпадання. Якщо код стану двостабільного елемента в правій частині секвенції не має знака інверсії, то вихід схеми співпадання з'єднується з прямим входом двостабільного елемента. У випадку наявності інверсії в коді стану вихід схеми співпадання з'єднується з інверсним входом двостабільного елемента.

Секвенції системи (3.19) описують роботу перетворювача виходів. Оскільки вирази (3.18) і (3.19) відповідають секвенціальному опису автомата Мура, то в лівій частині секвенцій, що описують перетворювач виходів, відсутні кодові змінні входів. Отже, кожна з секвенцій системи (3.18), (3.19) може бути реалізована схемою співпадання, до входів якої підключені виходи двостабільних елементів, що відповідають кодовій комбінації лівої частини секвенції, а вихід схеми співпадання через діодну матрицю зв'язаний із відповідним входом двостабільного елемента.

Схема, побудована за математичними виразами (3.18) і (3.19), приведена на рис. 9.

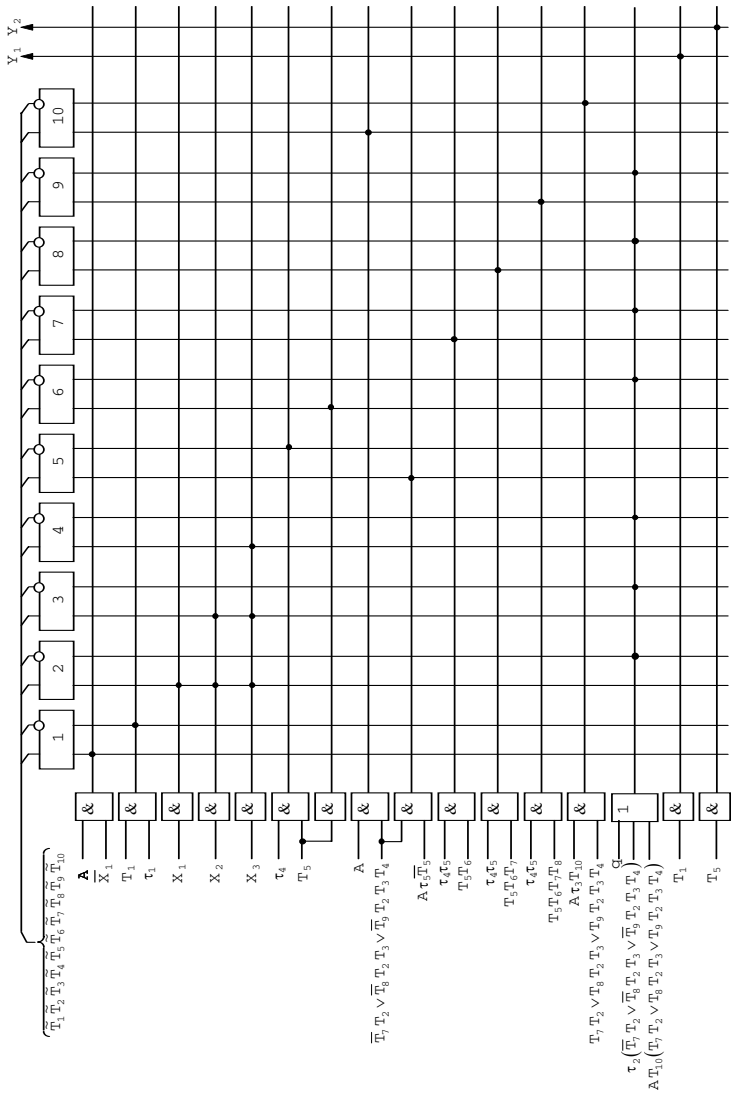


Рис. 9. Синтезована структурна схема системи діагностики вимикача , яка реалізує його секвенціальну модель



### 3.4. Практична реалізація синтезованої структури системи діагностики

На другому етапі синтезу структури системи діагностики вимикачів отриману структурну схему системи діагностики приводять до вигляду, зручного для реалізації в обраній елементній базі. Для цього спочатку перетворимо структурну схему, зображену на рис. 9, у такий спосіб, щоб замінити з'єднання елементів через діодну матрицю безпосереднім під'єднанням. В результаті отримаємо схему, яка приведена на рис. 10.

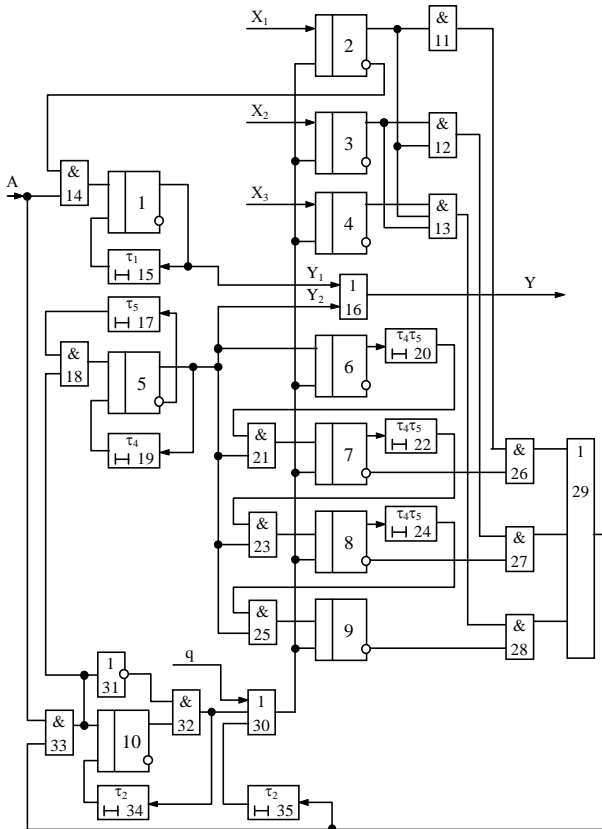


Рис. 10. Структурна схема системи діагностики вимикача після перетворення

Часові логічні функції  $\tau_1 - \tau_5$  на цьому рисунку замінені реалізуючими їх елементами затримки часу.

В структуру системи, зображеної на рис. 10, введено логічний елемент АБО 16, оскільки з виходів  $Y_1$  і  $Y_2$  імпульси надходять на один і той же самий лічильник, а це на схемі (рис. 9) не показано.

Перетворимо схему до вигляду, зручного для реалізації з використанням серійної елементної бази.

Логічні елементи 11, 12 і 13 є перетворювачами одинично-нормального коду в позиційний. Оскільки кількість тригерів, що фіксують визначені значення струму, може бути більшою трьох, то схему перетворювача кодів доцільно змінити на іншу, зображену на рис. 11.

Замість елементів 1 і 15 зручно використовувати диференціувальну ланку, а замість елемента 35 – інтегровальну ланку [61].

Сукупність елементів 10, 31, 32, 34 з метою спрощення заміняємо спеціальним блоком, який описаний в роботі [63].

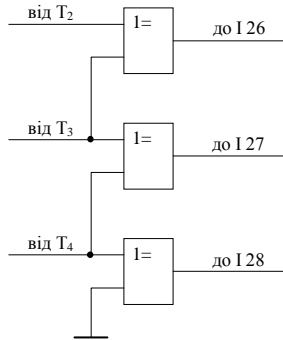


Рис. 11. Схема перетворювача кодів

Оскільки елементи 5, 17, 19 призначені для генерування імпульсів, що подаються один за одним в накопичувальний лічильник, то ці елементи замінюємо генератором імпульсів [64].

Елементи 6-9, 20-25 виконують роль регістра для зберігання імпульсів, переданих у кожному циклі роботи в лічильник, тому доцільно цю сукупність елементів замінити серійним двійковим лічильником.

Введемо в схему також блок-контакт вимикача, з виходу якого знімається керуючий сигнал  $A \vee \bar{A}$ , датчик струму і три компаратори для виділення фіксованих значень комутованого струму, накопичувальний лічильник комутаційного ресурсу вимикача, а також блок установки тригерів у початкове положення в момент подачі напруги живлення, опис якого дано в роботі [64].

Структурна схема системи діагностики, яка приведена на рис. 12, враховує всі вищезазначені зауваження.

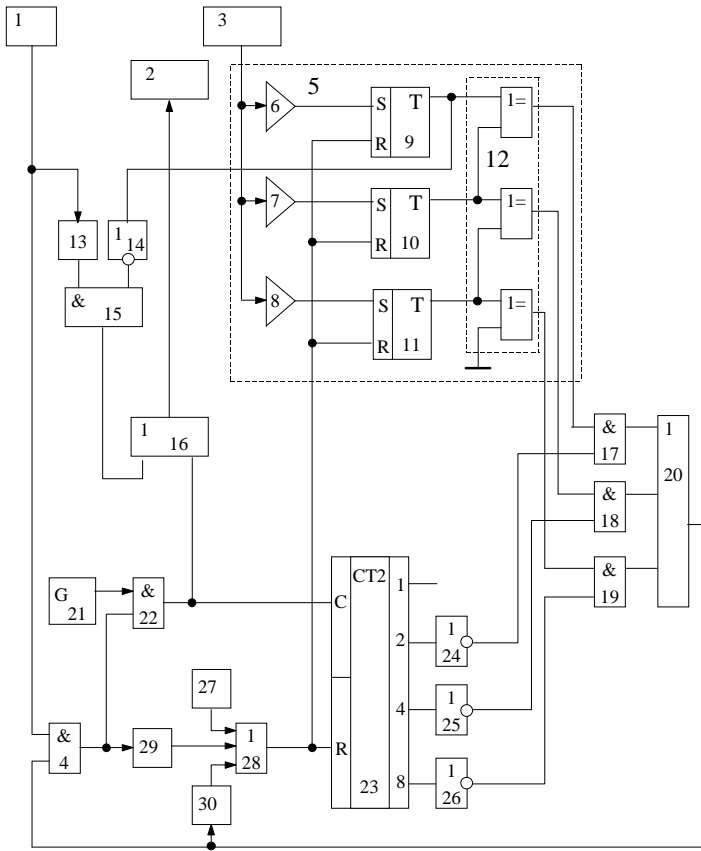


Рис. 12. Структурна схема системи діагностики вимикачів, що реалізована на елементах, які випускає промисловість

На схемі: 1 - датчик комутації (блок-контакт вимикача); 2 - накопичувальний лічильник імпульсів; 3 - датчик струму (трансформатор струму); 4, 15, 17, 18, 19, 22 - логічні елементи І; 5 - аналого-цифровий перетворювач (АЦП), що містить: 6, 7, 8 - компаратори; 9, 10, 11 - RS - тригери; 12 - шифратор, виконаний на логічних елементах Виключне АБО; 13 - диференціальний елемент; 14, 24, 25, 26 - логічні елементи НІ; 16, 20, 28 - логічні елементи АБО; 21 - генератор імпульсів; 23 - двійковий лічильник

імпульсів; 27 - блок установки нуля; 29 - формувач сигналу кінця циклу; 30 - інтегровальний елемент.

Працює даний пристрій діагностики вимикачів так.

При подачі напруги живлення блок 27 коротким імпульсом через елемент АБО 28 встановлює в нульове положення RS - тригери 9, 10 і 11, а також лічильник 23. На виходах логічних елементів 24, 25 і 26 встановлюються сигнали логічної одиниці. Схема знаходиться в стані очікування.

Якщо діагностований вимикач (у колі якого встановлені датчики 1 і 3) відключає коло зі струмом, значення якого менше порога спрацьовування АЦП 5, то спрацьовує датчик 1 і через диференціовальний елемент 13, елементи 15 і 16 одиночний імпульс надходить на вхід лічильника 2. За рахунок цього показання лічильника 2 збільшується на одиницю, тим самим фіксує спрацьовування вимикача. Якщо вимикач відключає коло зі струмом, значення якого більше порога спрацьовування компаратора 6, то в залежності від значення струмів, що відключаються, спрацьовує один, два або три тригери, що містяться в АЦП, з виходу яких код надходить на шифратор 12, де перетворюється в позиційний код і подається на схему співпадання, яка складається з логічних елементів 17, 18, 19, 20. В момент відключення вимикача замикається блок-контакт 1, надходить сигнал логічної одиниці на елементи 4, 22 і з генератора 21 послідовність імпульсів поступає в накопичувальний лічильник 2 і в двійковий лічильник 23. Кількість імпульсів, що надходять, залежить від відповідного вагового коефіцієнта, тобто скільком відключенням номінального робочого струму відповідає струм, що відключається в даний момент. По закінченні проходження імпульсів в лічильники 2 і 23 на входах схеми співпадання, що складається з логічних елементів 17,18,19,20, сигнали стають неузгодженими, елементи 4 і 22 закриваються, а з виходу блока 29 короткий імпульс надходить на R -входи RS -тригерів 9,10 і 11, а також лічильника 23, обнуляючи їх. На цьому цикл роботи системи закінчується. Інтегровальний елемент 30 призначений для подачі сигналу "Скид" у тому випадку, коли вимикач не відключається при проходженні через нього аварійного струму електричної мережі.

Кількість рівнів вимірювання комутованого струму вибирається в залежності від необхідного ступеня точності визначення робочого ресурсу вимикача. Описана система діагностики захищена авторським свідоцтвом СРСР [65] та патентом України [66] і розрахована для контролю за ресурсом однополюсних вимикачів.

У трифазних електричних мережах таку систему діагностики можна використовувати для контролю ресурсу вимикачів напругою 6-35 кВ, що є складовою частиною електричних мереж з ізольованою

нейтраллю [43]. У таких електричних мережах міжфазні короткі замикання відрізняються від однофазних замикань на землю великими значеннями струмів, у той час як замикання на землю не перевищують декілька десятків ампер.

При однофазних замиканнях на землю вимикач спрацьовується приблизно так само, як і при відключенні номінального робочого струму навантаження.

Конструкції вимикачів напругою 6-35 кВ виконані так, що час ревізії вимикача і час ревізії лише одного його полюса співвимірні. До того ж, вартість цих вимикачів порівняно невелика.

Тому для контролю ресурсу цих вимикачів немає необхідності використовувати систему діагностики, в якій враховується ресурс вимикача по кожному полюсу окремо, а можна визначати ресурс вимикача в цілому.

Для електричних мереж з глухозаземленою нейтраллю [43] напругою понад 110 кВ однофазні СКЗ співвимірні із струмами міжфазних замикань. У цьому випадку необхідно враховувати ресурс по кожному полюсу вимикача окремо. При такій експлуатації вимикачів час їхньої ревізії або ремонту може бути меншим звичайного, якщо спрацьовується тільки якийсь один полюс вимикача.

Схему системи діагностики трифазного вимикача з пополюсним визначенням його ресурсу легко синтезувати за допомогою секвенціальної моделі. Від структури, поданої на рис. 12, така схема відрізнятиметься лише наявністю трьох датчиків струму і трьох накопичувальних лічильників, що відносяться до кожної фази. Структурна схема цієї системи для пополюсного урахування ресурсу вимикача зображена на рис. 13.

На схемі: 1 - датчик комутації; 2, 3, 4 - датчики струму; 5 - диференціальний елемент; 6, 7, 8, 17, 18 - компаратори; 9, 10, 11 - аналогові ключі; 12, 13, 14, 19, 20 - RS - тригери; 15, 24, 32, 45, 46, 47 - логічні елементи АБО; 16 - шифратор; 21, 22, 23, 30, 34, 39, 40, 41, 42, 43, 44 - логічні елементи І; 25 - двійковий лічильник; 26, 27, 28, 36, 37, 38 - логічні елементи ІІ; 29 - генератор імпульсів; 31 - блок установки нуля; 33 - формувач сигналу кінця циклу; 35 - інтегровальний елемент; 48, 49, 50 - накопичувальні лічильники імпульсів.

Робота даної системи відрізняється від попередньої (рис. 12) тим, що при різноманітних видах замикань у роботі беруть участь відповідні накопичувальні лічильники. Наприклад, якщо відбувається коротке замикання у фазі А, то спрацьовує датчик струму 2, внаслідок чого визначена кількість імпульсів, що залежить від значення СКЗ, заноситься в лічильник 48. В лічильники 49 і 50 заноситься по одному

імпульсу, оскільки фази В і С брали участь у відключенні номінального робочого струму.

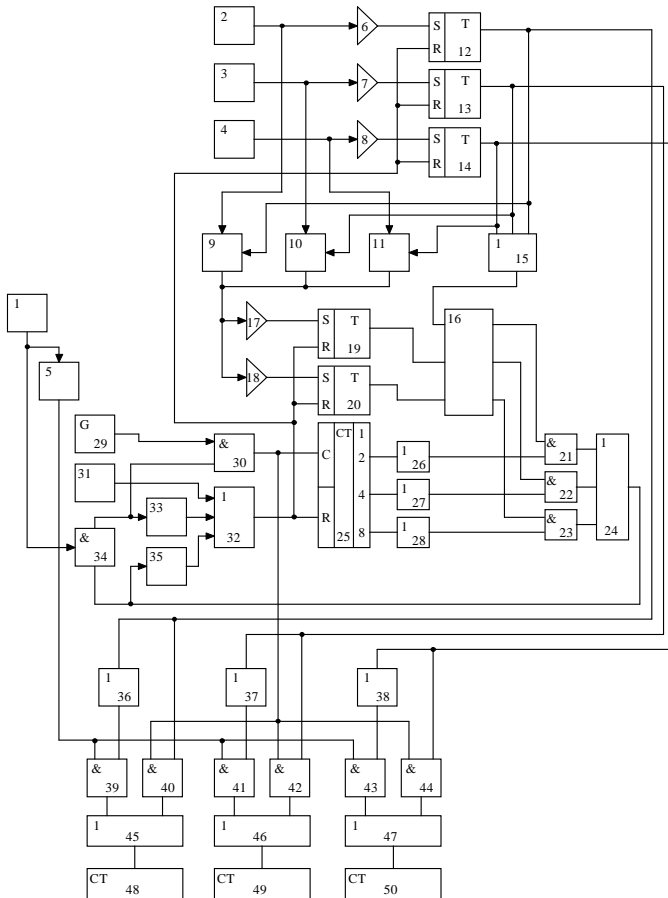


Рис. 13. Структурна схема системи діагностики вимикача при повноспом обліку його ресурсу

Відповідним чином система працює і при 2-х фазному, а також і при 3-х фазному коротких замиканнях.

Описана синтезована система діагностики трифазного вимикача захищена авторським свідоцтвом СРСР [67].

### **3.5. Висновки**

1. Розроблена методика та синтезована секвенціальна модель структури системи діагностики вимикача як для однополюсної, так і триполюсної конструкцій.

2. Отримані структурні схеми системи діагностики вимикача з використанням секвенціальних моделей.

3. Здійснено практичну реалізацію синтезованих структурних схем системи діагностики вимикача із застосуванням елементної бази, що серійно випускається промисловістю.

## **Розділ 4. РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ ПОДАЛЬШОГО ВОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ДІАГНОСТИКИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ**

### **4.1. Схемні реалізації запропонованих систем діагностики вимикачів**

Авторами розроблено також ряд систем діагностики вимикачів, які в порівнянні з синтезованими в розділі 3 мають ряд відмінностей.

Враховуючи те, що трансформатор струму, який використовується як датчик струму, при вимірюванні СКЗ дає спотворення сигналу, для забезпечення необхідної точності у визначенні залишкового ресурсу вимикача потрібно відновлювати реальне значення СКЗ. Це можна виконати різними методами, наприклад, за допомогою Фур'є-інтегрального методу ідентифікації (ФІМІ) [68, 69]. Для невеликих підстанцій доцільно застосовувати спрощені методи вимірювання СКЗ, що в свою чергу спрощує і систему діагностики вимикача.

На рис. 19 зображено структурну схему системи для контролю робочого ресурсу високовольтних вимикачів з вимірюванням струму, що протікає через вимикач в момент комутації, по початковій частині синусоїди [70].

На схемі: 1 - датчик струму; 2 - перетворювач струму в напругу; 3, 4, 5 - компаратори; 6 - генератор імпульсів; 7 - елемент І; 8 - елемент НІ; 9 - одновібратор; 10 - елемент НІ; 11 - елемент АБО; 12 - лічильник імпульсів; 13 - тригер; 14 - елемент І; 15 - регістр; 16 - датчик комутацій; 17 - елемент НІ; 18 - диференціювальний елемент; 19 - елемент І; 20 - елемент АБО; 21 - лічильник імпульсів; 22 - генератор імпульсів; 23 - елемент І; 24 - формувач сигналу; 25 - блок установки нуля; 26 - елемент затримки; 27 - елемент АБО; 28 - лічильник імпульсів; 29 - компаратор.

Система контролю працює так. При подачі напруги живлення на схему блок 25 коротким імпульсом через елемент АБО 27 встановлює в нульове положення тригер 13, лічильники 12 і 28 і регістр 15.

Якщо діагностований вимикач відключає коло із струмом, значення якого менше порога спрацьовування компаратора 5, то спрацьовує датчик 16, сигнал одиниці через диференціювальний елемент 18 подається на один вхід елемента І 19, на другому вході якого присутній сигнал одиниці з інверсного виходу тригера 13. З виходу елемента І 19 короткий імпульс через елемент АБО 20 надходить у лічильник 21, збільшуючи показання останнього на одиницю і, тим самим, фіксує спрацьовування вимикача при відключенні струму, що не перевищує номінальний робочий струм вимикача.



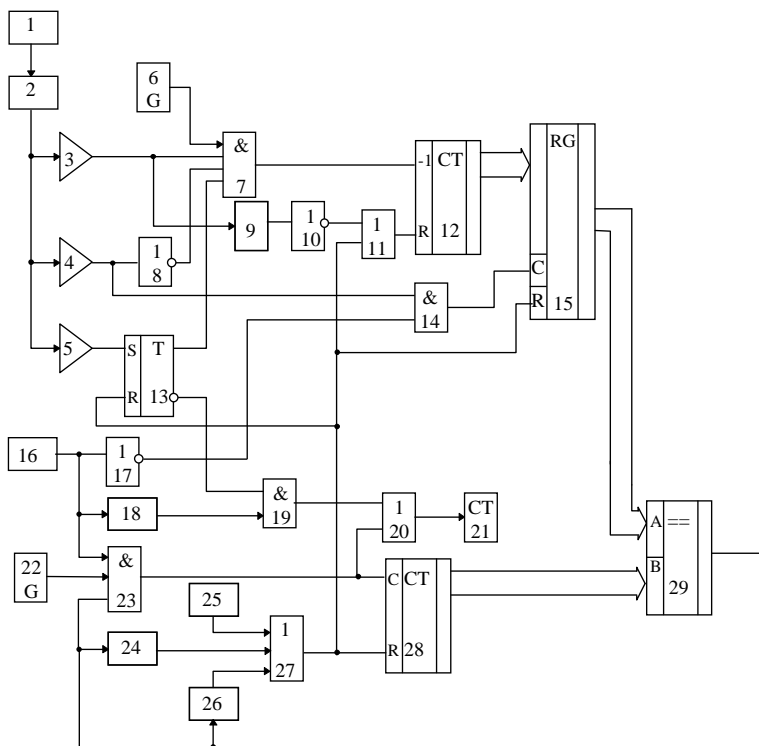


Рис. 19. Структурна схема системи для контролю робочого ресурсу високовольтних вимикачів з вимірюванням струму по початковій частині синусоїди

Якщо ж діагностований вимикач відключає струм, значення якого перевищує номінальний робочий струм вимикача, то в цьому випадку з виходу перетворювача 2 випрямлена напруга, що відповідає струмові, який протікає через вимикач, надходить на входи компараторів 3, 4 і 5. Компаратор 5 спрацьовує і на прямому виході тригера 13 встановлюється сигнал одиниці. Пороги спрацьовування компараторів 3 і 4 обрані таким чином, що компаратор 3 спрацьовує при позитивному близькому до нуля сигналі на висхідній лінії напівсинусоїди, що подається з виходу перетворювача 2, а компаратор 4 спрацьовує на лінійній висхідній лінії напівсинусоїди через декілька мілісекунд після спрацьовування компаратора 3. Одночасно зі спрацьовуванням компаратора 3 запускається одновібратор 9, що розблокує роботу лічильника 12. На його

віднімаючий вхід починають надходити імпульси від генератора 6 до тих пір, поки не спрацює компаратор 4 і зніме дозвіл з одного із входів елемента І 7 шляхом подачі нуля з виходу елемента НІ 8. Після цього по передньому фронту сигналу з виходу компаратора 4 інформація з лічильника 12 перезаписується в регістр 15, оскільки на його прямий динамічний вхід (тактовий) подається сигнал логічної одиниці з виходу елемента І 14. Очевидно, що чим більшим є струм, що протікає через датчик 1, тим менше імпульсів надійде в лічильник 12.

З моменту виникнення аварійного струму до його відключення звичайно проходить декілька десятків, а іноді і сотень мілісекунд. Тому за цей час через датчик 1 проходить декілька періодів аварійного струму, що у вигляді двохнапівперіодної випрямленої напруги подається з виходу перетворювача 2 на компаратори 3, 4, 5, а цифровий код, який відображає кожну напівхвилю напруги, послідовно записується в лічильник 12 і переноситься в регістр 15. Оскільки в якості лічильника 12 використано віднімальний лічильник, то очевидно, що чим більшою є амплітуда напівхвилі напруги, що подається на компаратори, тим більше число записується в ньому. Цифровий код, що записується в регістр 15, з виходу подається на А- вхід компаратора 29. Оскільки на В- вхід подається нульовий код з виходу лічильника 28, то в компараторі 29 виконується умова порівняння кодів і на виході "А>В" з'являється сигнал логічної одиниці.

В момент відключення вимикача в регістрі 15 зберігається інформація про останню напівхвилю струму, що протікає через вимикач і при спрацьовуванні датчика 16 вхід запису в регістр 15 блокується. Одночасно подається сигнал одиниці на один із входів елемента І 23, а з виходу генератора 22 через елемент І 23 імпульси надходять у лічильник 28 та через елемент АБО 20 - у лічильник 21. Коли кількість імпульсів, що надходять, досягає такого значення, що коди на виході регістра 15 і на виході лічильника 28 зрівнюються, на виході компаратора 29 з'являється сигнал нуля, що блокує елемент І 23, внаслідок чого подача імпульсів від генератора 22 припиняється. Одночасно на виході формувача сигналу 24 з'являється імпульс, що через елемент АБО 27 обнуляє тригер 13, регістр 15 і лічильники 12, 28. Цикл роботи системи на цьому закінчується. Кількість імпульсів, занесених у лічильник 21 залежить від значення струму, що відключається, і показує, як витрачається комутаційний ресурс вимикача при різних значеннях струму, що відключається, в перерахунку на кількість відключень номінального робочого струму вимикача.

Для захисту від короткочасних стрибків струму, що можуть мати місце, наприклад, при подвійних замиканнях, селективній роботі релейного захисту в системі передбачено елемент 26. Працює він так. Коли через датчик струму 1 протікає струм, який приводить до спрацьовування компаратора 5, то в регістр 15 записується цифровий код, який відповідає струмові, що протікає через вимикач. Але оскільки останній не відключається і датчик 16 не спрацьовує, то система "зависає" і для того, щоб повернути її у початкове положення, через деякий час з виходу елемента затримки 26 подається сигнал, що обнуляє тригер 13, регістр 15 і лічильники 12 і 28.

Час затримки сигналу в елементі 26 вибирається в залежності від зовнішніх умов, часу дії релейного захисту, але не менше найбільшого циклу роботи пристрою, коли в регістр 15 записується найбільше число з виходу лічильника 12.

Для коректної роботи системи сталу часу диференціального елемента 18 необхідно вибирати меншою періоду проходження імпульсів генератора 22.

Тактова частота генератора імпульсів 6 залежить від кількості розрядів лічильника 12 і від порогів спрацьовування компараторів 3 і 4.

Тривалість роботи одновібратора 9 вибирається в декілька разів більшою від часу, необхідного для проходження найбільшої кількості імпульсів від генератора 6 у лічильник 12.

Необхідно відзначити, що така система буде коректно працювати навіть тоді, коли сигнал про СКЗ електричної мережі буде спотворюватись при проходженні через датчик струму, оскільки вимірювання значення СКЗ проводиться по початковій частині синусоїди.

Діаграма сигналів, що пояснює роботу системи, наведена на рис. 20.

Вказана система має кращі експлуатаційні характеристики, ніж попередньо запропоновані, але при вимірюванні струму по початковій частині синусоїди можливі похибки у вимірюванні струму, обумовлені тим, що ці вимірювання проводиться лише по двох точках і можливе спотворення синусоїди, викликане вищими гармоніками.

Тож її недоцільно використовувати для контролю ресурсу вимикачів в мережах з вищими гармоніками струму.

Авторами розроблена інша система, в якій відсутній вказаний недолік. Структурна схема цієї системи зображена на рис. 21.

На схемі: 1 - датчик струму; 2 - перетворювач струму в напругу; 3 - генератор імпульсів; 4 - компаратор; 5 - елемент І; 6 - формувач сигналу; 7 - елемент АБО; 8 - лічильник імпульсів; 9 - функціональний перетворювач; 10,11,12,13 - блоки вибірки -

зберігання (БВЗ); 14, 15, 16, 17 - масштабувальні підсилювачі (МП); 18 - суматор; 19 - АЦП; 20 - регістр; 21 - диференціувальний елемент; 22 - компаратор; 23 - формувач сигналу; 24 - елемент І; 25 - компаратор; 26 - RS-тригер; 27 - датчик комутацій; 28 - елемент ІІ; 29 - диференціувальний елемент; 30 - елемент І; 31 - елемент АБО; 32 - лічильник імпульсів; 33 - генератор імпульсів; 34 - елемент І; 35 - блок установки нуля; 36 - формувач сигналу; 37 - елемент затримки; 38 - елемент АБО; 39 - лічильник імпульсів; 40 - компаратор.

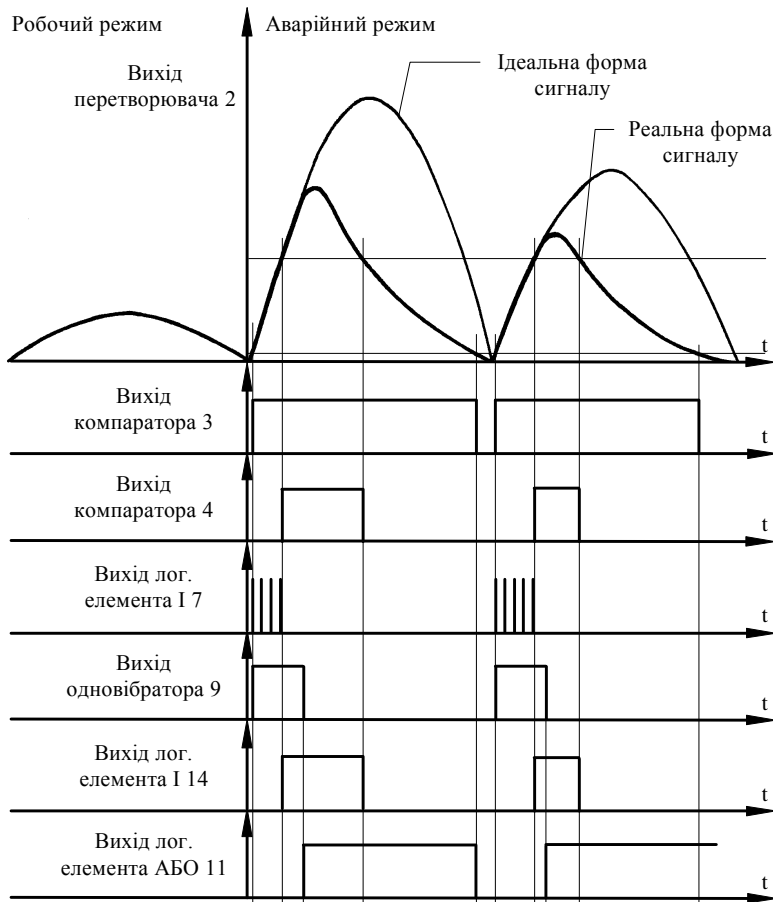


Рис. 20. Діаграма сигналів, що пояснює роботу пристрою для вимірювання робочого ресурсу вимикачів

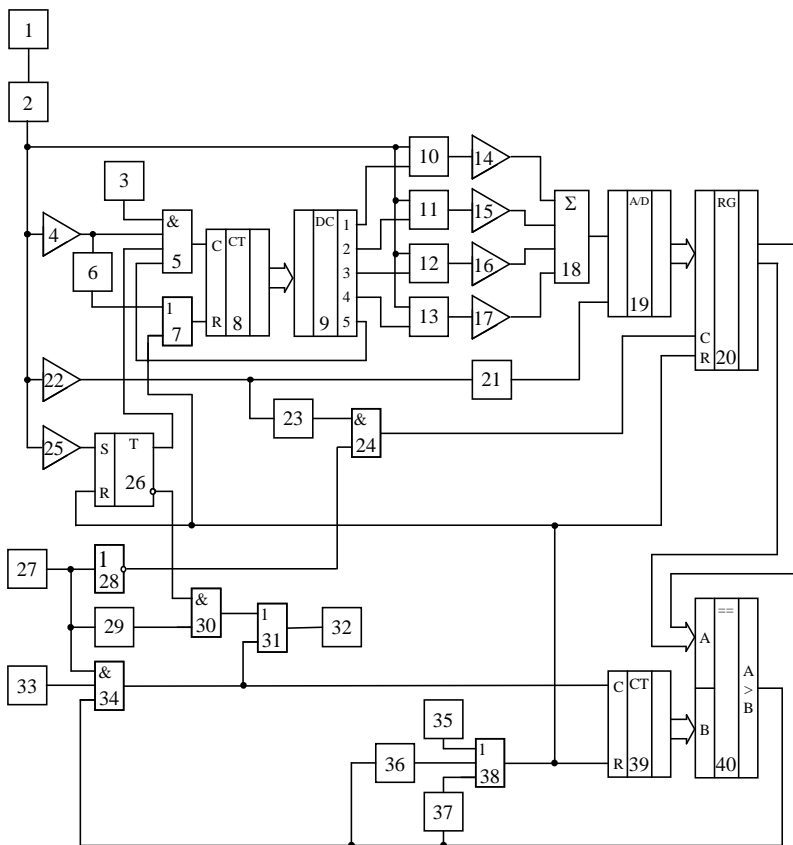


Рис. 21. Структурна схема системи контролю комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів

В цій системі реалізована ідея, яка полягає в наступному.

Відомо, що при проходженні через трансформатор струму, що використовується як датчик, великих струмів, значення яких перевищує в десятки разів номінальний робочий струм, форма вихідного сигналу трансформатора струму спотворюється через насичення магнітопровода останнього.

Позначимо ідеальний вихідний сигнал трансформатора струму

$$i_2(t) = A \cdot \sin \omega t, \quad (5.1)$$

де  $A$  - амплітуда вторинного струму,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 50$  Гц - частота електричної мережі. Реальний спотворений вихідний сигнал

трансформатора струму позначимо  $y(t)$ . Для того, щоб, знаючи  $y(t)$ , знайти дійсну амплітуду вторинного струму, виконаємо апроксимацію характеристики трансформатора струму за МНК [50], використовуючи вирази для ідеального і реального вихідних сигналів. Одержимо

$$\sum_{i=1}^n (A \cdot \sin \omega t_i - y_i)^2 \rightarrow \min. \quad (5.2)$$

Відповідно до МНК

$$\frac{d}{dA} \left[ \sum_{i=1}^n (A \cdot \sin \omega t_i - y_i)^2 \right] = 0. \quad (5.3)$$

Шляхом нескладних перетворень одержимо

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sin \omega t_i}{\sum_{i=1}^n \sin^2 \omega t_i}. \quad (5.4)$$

З (5.4) витікає, що, якщо в кожній напівсинусоїді вторинного струму трансформатора струму вимірювати значення вторинного струму  $y_i$  в моменти часу  $t_i$ , то можна визначити дійсну амплітуду вторинного струму, а, отже, і струм, що протікає через вимикач в момент комутації.

З досвіду експлуатації відомо, що для того, щоб відновити з необхідною точністю амплітуду вторинного струму трансформатора струму необхідно зробити хоча б чотири виміри ( $n=4$ ) вторинного спотвореного струму. Відомо також, що до найменшого впливу спотворень за рахунок насиченості магнітопровода трансформатора струму схильна висхідна частина синусоїди вторинного струму. Тому, обравши фіксовані чотири значення часу виміру вторинного струму на висхідній частині синусоїди, можна вважати відомими коефіцієнти

$$k_i = \frac{\sin \omega t_i}{\sum_{i=1}^4 \sin^2 \omega t_i}. \quad (5.5)$$

Слід зазначити, що найбільший час  $t_i$ , рахуючи від моменту переходу синусоїди через вісь часу, не повинен перевищувати декількох мілісекунд. Тепер вираз для визначення амплітуди вторинного струму має вид

$$A = y_1 k_1 + y_2 k_2 + y_3 k_3 + y_4 k_4. \quad (5.6)$$

Таким чином, вимірюючи чотири значення спотвореного вторинного струму у фіксовані моменти часу, що задаються коефіцієнтами відповідно до виразу (5.5), і складаючи їх, одержуємо шукане дійсне значення амплітуди вторинного струму трансформатора струму в момент комутації вимикачем аварійного струму.

Запропонована система працює так. При подачі напруги живлення на схему блок установки нуля 35 коротким імпульсом через елемент АБО 38 встановлює в нульове положення тригер 26, лічильники імпульсів 8, 39 і регістр 20.

Якщо діагностований вимикач відключає коло зі струмом, значення якого, що подається на схему через датчик струму 1 і перетворювач струму в напругу 2, не перевищує порога спрацьовування компаратора 25, то при цьому спрацьовує датчик комутації 27, сигнал логічної одиниці через диференціальний елемент 29 подається на один вхід елемента І 30, на другому вході якого є присутнім сигнал логічної одиниці з інверсного виходу RS-тригера 26. З виходу елемента І 30 короткий імпульс через елемент АБО 31 надходить у лічильник імпульсів 32, збільшуючи показання останнього на одиницю рахунку і тим самим фіксуючи спрацьовування вимикача при відключенні струму, що не перевищує номінальний робочий струм вимикача.

Якщо діагностований вимикач відключає струм, значення якого перевищує номінальний робочий струм вимикача, то з виходу датчика струму 1 сигнал надходить на вхід перетворювача струму в напругу 2 і з виходу останнього випрямлена напруга, що відповідає струмові, що протікає через вимикач, надходить на входи компараторів 4, 22 і 25. Компаратор 25 спрацьовує і на прямому виході RS-тригера 26 встановлюється сигнал логічної одиниці. Поріг спрацьовування компаратора 4 обраний таким чином, що він відкривається при додатному, близькому до нуля, сигналі на висхідній лінії напівсинусоїди, що знімається з виходу перетворювача струму в напругу 2. Одночасно зі спрацьовуванням компаратора 4 відкривається елемент І 5 і імпульси з виходу генератора імпульсів 3 починають надходити в лічильник імпульсів 8. При проходженні першого імпульсу на першому виході функціонального перетворювача 9, підключеного до виходу лічильника імпульсів 8, з'являється сигнал логічного нуля, що закриває БВЗ 10, фіксуючи в ньому значення напруги  $u_1$ , пропорційне вторинному струму трансформатора струму, виміряне в момент часу  $t_1$ . При надходженні другого, третього і четвертого імпульсів на вхід лічильника імпульсів 8 на другому, третьому і четвертому виходах функціонального перетворювача 9 з'являються послідовно сигнали логічного нуля і в

БВЗ 11, 12 і 13 фіксуються значення напруги  $u_2$ ,  $u_3$ ,  $u_4$ , виміряні в моменти часу  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  відповідно. П'ятий імпульс, що подається на вхід лічильника імпульсів 8, приводить до появи логічного нуля на п'ятому виході функціонального перетворювача 9, внаслідок чого на четвертому вході елемента І 5 з'являється сигнал логічного нуля і він закривається. Надходження імпульсів з генератора імпульсів 3 у лічильник імпульсів 8 припиняється. З виходів БВЗ 10, 11, 12 і 13 сигнали через МП 14, 15, 16 і 17, коефіцієнти підсилення яких рівні  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  і  $k_4$  відповідно, надходять на входи суматора 18, на виході якого встановлюється аналоговий сигнал, що дорівнює амплітуді вторинного струму датчика струму відповідно до виразу (5.6).

В момент появи логічної одиниці на виході компаратора 22, поріг спрацьовування якого досягається після запису значення напруги в БВЗ 13, на виході диференціювального елемента 21 з'являється короткий імпульс, що приводить до спрацьовування АЦП 19, внаслідок чого на його виходах встановлюється цифровий код, що відповідає амплітуді вторинного струму датчика струму.

При закриванні компаратора 22, в момент, коли значення напруги першої напівсинусоїди сигналу з виходу перетворювача струму в напругу 2 зменшується, на виході формувача сигналу 23 з'являється короткий імпульс, що через відкритий елемент І 24 (на одному вході присутній сигнал логічної одиниці з виходу елемента НІ 28) подається на п'ятий вхід регістра 20, внаслідок чого в ньому запам'ятовується цифровий код, одержуваний з виходу АЦП 19.

В момент досягнення напругою першої напівсинусоїди на виході перетворювача струму в напругу 2 нульового значення компаратор 4 закривається, на виході формувача сигналу 6 з'являється короткий імпульс, який через елемент АБО 7 надходить на другий вхід лічильника імпульсів 8 і обнуляє його. З моменту виникнення аварійного струму до його відключення звичайно проходить декілька десятків, а іноді і сотень мілісекунд. Тому за цей час через датчик струму 1 проходить декілька періодів аварійного струму, що у вигляді двохнапівперіодної випрямленої напруги подається з виходу перетворювача струму в напругу 2 на входи компараторів 4, 22 і 25. При цьому цифровий код, що відповідає амплітуді кожної напівхвилі напруги, послідовно заноситься в регістр 20, з виходу якого подається на А - входи компаратора 40, на виході якого з'являється сигнал логічної одиниці, оскільки на В - входи подається нульовий код.

В момент відключення вимикача в регістрі 20 зберігається інформація про останню амплітуду напівхвилі струму, що протікає через вимикач і при спрацьовуванні датчика комутацій 27 вхід запису в регістр 20 блокується. Одночасно подається сигнал логічної одиниці на один із входів елемента І 34 і з виходу генератора імпульсів 33



через елемент І 34 імпульси починають надходити у лічильник імпульсів 39, а також через елемент АБО 31 - у лічильник імпульсів 32. Коли кількість імпульсів, що надходять, досягає такого значення, що коди на виході регістра 20 і на виході лічильника імпульсів 39 зрівнюються, на виході компаратора 40 з'являється сигнал логічного нуля, який закриває елемент І 34, внаслідок чого подача імпульсів від генератора імпульсів 33 припиняється. Одночасно на виході формувача сигналу 36 з'являється імпульс, що через елемент АБО 38 обнуляє RS-тригер 26, регістр 20 і лічильники імпульсів 8 і 39. Цикл роботи системи на цьому закінчується. Кількість імпульсів, занесених у лічильник імпульсів 32, залежить від значення струму, що відключається, і показує, як витрачається комутаційний ресурс вимикача при різних значеннях струму, що відключається, в перерахунку на кількість відключень номінального робочого струму вимикача.

В даній системі формувач сигналу 36 і елемент затримки 37 працюють як і в системі, зображеній на рис. 19.

Для коректної роботи пристрою постійну часу диференціовального елемента 29 необхідно вибрати менше періоду проходження імпульсів генератора імпульсів 33, постійна часу диференціовального елемента 21 вибирається у відповідності з часом перетворення АЦП 19.

Період проходження імпульсів генератора імпульсів 3 вибирається відповідно до тривалості циклу роботи вимірювальної частини системи.

Оскільки комутаційний ресурс вимикача спрацьовується не тільки в момент відключення вимикача, а і в момент його ввімкнення, особливо на СКЗ, авторами розроблено систему для контролю ресурсу вимикача з врахуванням цієї особливості.

Структурна схема такої системи зображена на рис. 22.

На схемі: 1 - датчик струму; 2 - перетворювач струму в напругу; 3, 4, 5 - компаратори; 6 - генератор імпульсів; 7 - логічний елемент І; 8 - логічний елемент НІ; 9 - одновібратор; 10 - логічний елемент НІ; 11 - логічний елемент АБО; 12 - лічильник імпульсів; 13 - тригер; 14 - логічний елемент І; 15 - регістр; 16 - датчик комутацій; 17 - логічний елемент НІ; 18 - диференціовальний елемент; 19 - логічний елемент І; 20 - логічний елемент АБО; 21 - лічильник імпульсів; 22 - генератор імпульсів; 23 - логічний елемент І; 24 - формувач сигналу; 25 - блок установки нуля; 26 - блок затримки сигналу; 27 - логічний елемент АБО; 28 - лічильник імпульсів; 29 - цифровий суматор; 30 - цифровий комутатор; 31 - одновібратор; 32 - цифровий компаратор.

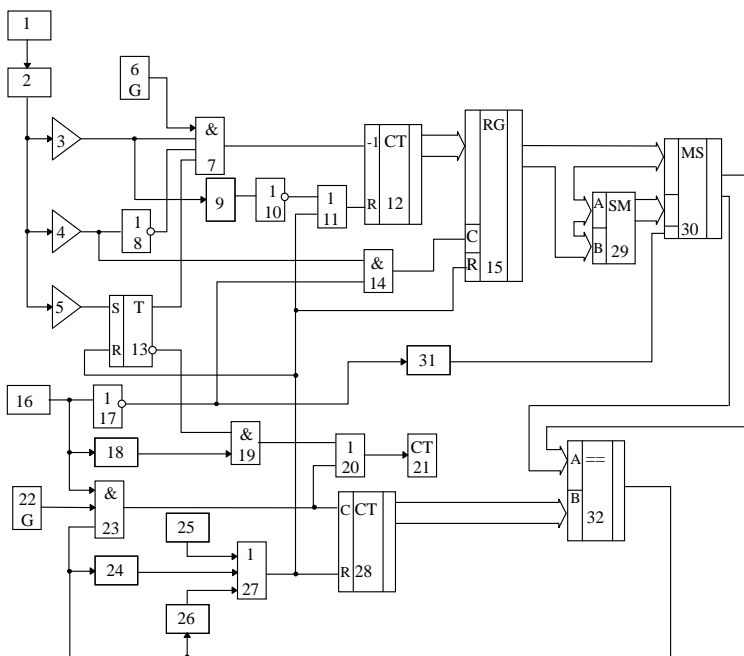


Рис. 22. Структурна схема системи контролю комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів з врахуванням спрацювання ресурсу при ввімкненні вимикача

Ця система функціонує за алгоритмом, майже адекватним тому, за яким функціонує система, структурна схема якої представлена на рис. 19. Відмінність полягає лише в тому, що з виходу регістра 15 цифровий код подається на вхід цифрового компаратора 32 через цифровий суматор 29 та цифровий комутатор 30 при ввімкненні високовольтного вимикача на стійке коротке замикання. Після цього значення цифрового коду подвоюється, що відповідає подвійному спрацюванню комутаційного ресурсу вимикача.

В даному випадку система контролю працює так. Якщо високовольтний вимикач вмикається, а в електричній мережі присутнє коротке замикання, то при ввімкненні вимикача на виході датчика комутацій 16 встановлюється сигнал логічного нуля, яким через логічний елемент НІ 17 по передньому фронту запускається одинвібратор 31, який вихідним сигналом логічної одиниці, що подається на цифровий комутатор 30, підключає вихідну шину регістра 15 до цифрового компаратора 32 через цифровий суматор 29, в якому подвоюється значення струму, що записується в регістрі 15

після вимкнення високовольтного вимикача системою релейного захисту. Таким чином, в пристрої враховується подвійне спрацювання робочого ресурсу вимикача при ввімкненні останнього на коротке замикання в електричній мережі.

Час роботи одновібратора 31  $t_{\text{одн}}$  визначається за формулою:

$$t_{\text{одн}} = t_{\text{вкл}} + t_{\text{рз}} + t_{\text{викл}} + \Delta t < t_{\text{АПВ}}, \quad (5.7)$$

де  $t_{\text{вкл}}$  - час, необхідний для роботи приводу вимикача на ввімкнення, та власний час ввімкнення вимикача;

$t_{\text{рз}}$  - час роботи системи релейного захисту;

$t_{\text{викл}}$  - час, необхідний для роботи приводу вимикача для вимкнення, та власний час вимкнення вимикача;

$\Delta t$  - час, необхідний для того, щоб найбільшу можливу кількість імпульсів, що відповідає найбільшому значенню контрольованого струму, записати в лічильник імпульсів 21;

$t_{\text{АПВ}}$  - час, при якому спрацьовує автоматика повторного ввімкнення високовольтного вимикача.

Тактова частота генератора імпульсів 22 вибирається з міркувань, щоб не перевищувати час  $\Delta t$ , опис якого приведений вище.

Авторами також розроблено таку систему контролю, яка дозволяє задавати вагові коефіцієнти, якими враховується вичерпання робочого ресурсу вимикача при його ввімкненні на коротке замикання, або при відключенні аварійного струму.

Як правило, в розподільчому пристрої електростанції або підстанції знаходиться декілька вимикачів. Для оцінки їх комутаційного ресурсу можна застосовувати окрему систему контролю на кожен вимикач або одну систему, яка враховувала б залишковий робочий ресурс всіх вимикачів. Авторами розроблено структуру такої системи контролю ресурсу групи комутаційних апаратів [71], структурна схема якої зображена на рис. 23.

На схемі: 1, 2, 3 - датчики струму; 4,5,6 - компаратори; 7, 8, 9 - елементи І; 10, 11, 12 - електронні ключі; 13 - елемент АБО; 14 - елемент НІ; 15 - генератор імпульсів; 16 - елемент І; 17 - лічильник імпульсів; 18 - дешифратор; 19, 20 - компаратори; 21, 22, 23 - RS-тригери; 24 - шифратор; 25,26,27- елементи І; 28 - елемент АБО; 29, 30, 31 - елементи І; 32 - блок установки нуля; 33 - елемент АБО; 34 - формувач імпульсів; 35 - елемент АБО; 36 - лічильник імпульсів; 37, 38, 39 - елементи НІ; 40 - елемент затримки сигналу; 41 - елемент АБО; 42 - RS-тригер; 43, 44, 45 - датчики комутації; 46, 47, 48 - одновібратори; 49, 50, 51 - елементи І; 52, 53 - елементи АБО; 54- диференціальний елемент; 55, 56, 57 - елементи І; 58, 59, 60 - лічильники імпульсів.

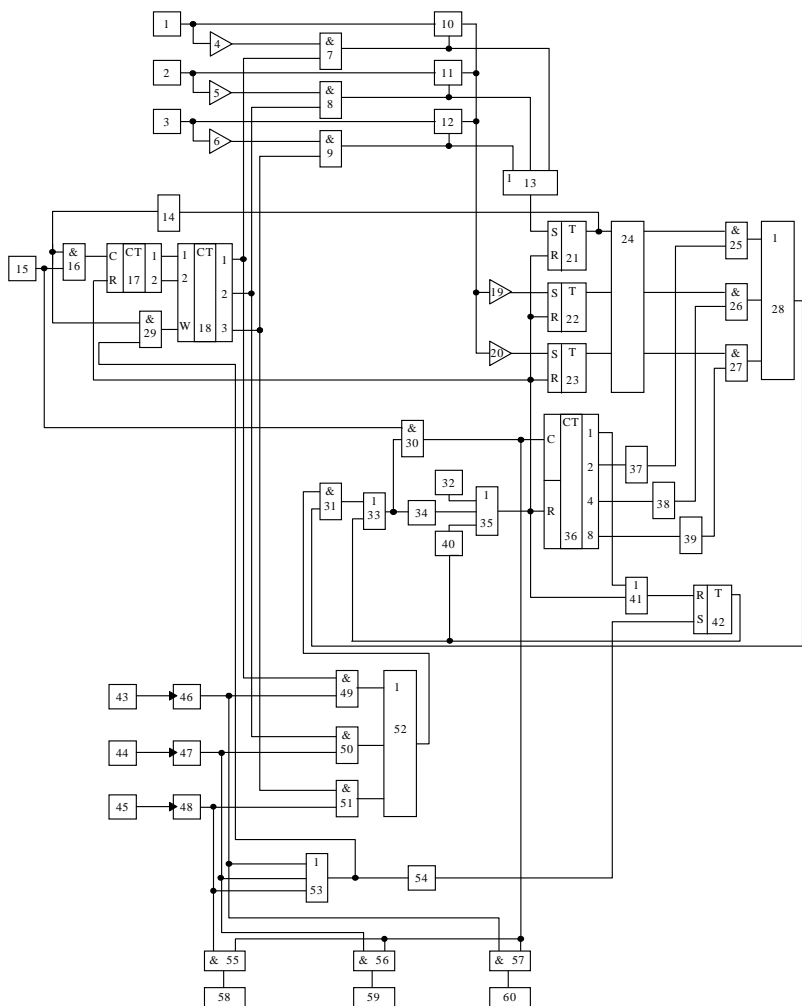


Рис. 23. Структурна схема системи контролю ресурсу групи комутаційних апаратів

Ця система працює так. При подачі напруги живлення на схему блок установки нуля 32 коротким імпульсом через елемент АБО 35 встановлює RS-тригери 21, 22, 23, лічильники імпульсів 36, 17, а також через елемент АБО 41 RS-тригер 42 у нульовий (початковий) стан. Одночасно генератор імпульсів 15 починає виробляти послідовність імпульсів, що через відкритий елемент І 16 (RS-тригер

21 обнулений, тому на виході елемента НІ 14 присутній сигнал логічної одиниці) надходить в лічильник імпульсів 17, під впливом вихідних сигналів якого на першому, другому і третьому виходах дешифратора 18 утворюються сигнали логічної одиниці, що чергуються. Необхідно відзначити, що для прикладу система реалізована для контролю комутаційного ресурсу трьох комутаційних апаратів.

Якщо будь-який з вимикачів (наприклад, другий, на якому встановлений датчик струму 2 і датчик комутації 44) відключає коло зі струмом, значення якого не перевищує номінального робочого струму, то в цьому випадку на виході датчика комутації 44 з'являється сигнал логічної одиниці, що переднім фронтом запускає одновібратор 47, з виходу якого сигнал надходить на вхід елемента АБО 53. З виходу останнього сигнал логічної одиниці подається на вхід елемента І 29, вихідний сигнал якого переводить в стан логічного нуля усі виходи дешифратора 18. Одночасно з виходу елемента АБО 53 сигнал у вигляді короткого імпульсу через диференціальний елемент 54 надходить на S-вхід RS-тригера 42 і встановлює його в одиничний стан. Одразу ж на виході елемента АБО 33 з'являється сигнал логічної одиниці, який відкриває логічний елемент І 30, дозволяючи проходження імпульсів від генератора імпульсів 15 в лічильник імпульсів 36. Проте після проходження одного імпульсу на першому виході лічильника 36 з'являється сигнал логічної одиниці, яким через логічний елемент АБО 41 обнуляється RS-тригер 42. На виході елемента АБО 33 з'являється сигнал логічного нуля, елемент І 30 закривається, а формувач імпульсів 34 виробляє імпульс, який через елемент АБО 35 обнуляє лічильник імпульсів 36. В момент, коли імпульс з виходу елемента І 30 надходить у лічильник імпульсів 36, відкритий також і елемент І 56, тому одиничний імпульс подається також в лічильник імпульсів 59, що свідчить про зміну робочого ресурсу другого вимикача на одиницю при відключенні вимикачем струму, що не перевищує значення номінального робочого струму. Після описаних операцій на виході одновібратора 47 з'являється сигнал логічного нуля, робота дешифратора 18 розблокується і на його виходах відновлюється чергування сигналів логічної одиниці.

Якщо в електричній системі виникає струм короткого замикання, який необхідно відключити, наприклад, за допомогою першого вимикача, на якому встановлені датчик струму 1 і датчик комутації 43, то в цьому випадку на виході датчика струму 1 з'являється постійна напруга, пропорційна струму, що відключається, яка надходить на вхід компаратора 4. Оскільки поріг спрацьовування компаратора 4 незначно перевищує значення номінального робочого струму, який протікає через вимикач, то на виході компаратора 4

з'являється сигнал логічної одиниці, що подається на вхід елемента І 7. При збігу цього сигналу з сигналом з виходу дешифратора 18 на виході елемента І 7 з'являється сигнал логічної одиниці, що через елемент АБО 13 встановлює в одиничний стан RS-тригер 21, вихідним сигналом якого через елемент НІ 14 закривається елемент І 16 і подача імпульсів від генератора імпульсів 15 в лічильник 17 припиняється. На першому виході дешифратора 18 зберігається сигнал логічної одиниці, що підтримує у відкритому стані елемент І 7. Одночасно з виходу елемента І 7 сигнал логічної одиниці подається на керуючий вхід першого електронного ключа 10 і сигнал з виходу датчика струму 1 надходить також на входи компараторів 19 і 20. В залежності від значення струму, що відключається, спрацьовують або обидва, або тільки компаратор 19, встановлюються в одиничний стан RS-тригери або 22 і 23, або лише RS-тригер 22. В залежності від кількості RS-тригерів, що спрацювали, на одному з виходів шифратора 24 встановлюється сигнал логічної одиниці. Наприклад, якщо встановилися в одиничний стан RS-тригери 21 і 22, то сигнал логічної одиниці буде на другому виході шифратора 24. Оскільки на виходах лічильника імпульсів 36 мають місце сигнали логічного нуля, а на виходах елементів НІ 37, 38 і 39 присутні сигнали логічної одиниці, то елемент І 26 відкривається. Його вихідний сигнал через елемент АБО 28 подається на вхід елемента затримки сигналу 40 і на вхід елемента І 31. Якщо струм короткого замикання через вимикач пройшов, але вимикач не відключився (а таке часто трапляється в електричних мережах), то через якийсь час з виходу елемента затримки сигналу 40 надходить сигнал, що через елемент АБО 35 обнуляє RS-тригери 21, 22 і 23 і відновляється чергування одиничних сигналів на виходах дешифратора 18. Якщо ж після проходження струму короткого замикання через вимикач останній відключається, то спрацьовує датчик комутації 43, вихідний сигнал якого переднім фронтом запускає одновібратор 46, з виходу якого подається сигнал на елементи І 57 і 49. Внаслідок цього елемент І 49 відкривається (на його першому вході присутній сигнал логічної одиниці з першого виходу дешифратора 18), з його виходу сигнал через елемент АБО 52 подається на вхід елемента І 31, який вихідним сигналом через елемент АБО 33 відкриває елемент І 30, тим самим дозволяючи проходження імпульсів від генератора імпульсів 15 в лічильник імпульсів 36. Тому в лічильник імпульсів 36 надходить їх визначена кількість, яка відповідає кількості компараторів, що спрацювали, а відповідно, і значенню струму, який відключається вимикачем в перерахунку на кількість відключень номінального робочого струму вимикача. Після проходження певної кількості імпульсів в лічильник імпульсів 36 на його третьому виході з'являється сигнал логічної

одиниці, що закриває елементи I 26, 31, 30, подача імпульсів в лічильник 36 припиняється, а формувач імпульсів 34 виробляє сигнал, який скидає всі RS-тригери, а також лічильники імпульсів 17 і 36. В момент проходження імпульсів в лічильник 36 елемент I 57 відкритий і через нього імпульси надходять також в лічильник імпульсів 60, збільшуючи показання останнього і тим самим засвідчуючи вичерпання ресурсу першого вимикача на величину, що відповідає значенню відключеного вимикачем струму в перерахунку на номінальний робочий струм вимикача. Після цього на виході першого однофазного 46 з'являється сигнал логічного нуля, на виходах дешифратора 18 відновлюється чергування сигналів логічної одиниці.

Якщо в електричній мережі виникає ситуація, коли струм короткого замикання протікає через один вимикач, а відключається інший, то в цьому випадку запропонований пристрій також працює коректно. Припустимо, що аварійний струм протікає через другий вимикач, значення струму запам'ятовується в 21, 22 і 23 RS-тригерах, але відбувається відключення третього вимикача. Внаслідок цього вихідний сигнал з датчика комутації 45 переднім фронтом запускає однофазного 48. Оскільки на жодному з елементів I 49, 50, 51 не відбувається збіг сигналів, то на виході елемента АБО 52 присутній сигнал логічного нуля, зате з виходу елемента АБО 53 через диференціувальний елемент 54 імпульсом встановлюється в одиничний стан RS-тригер 42, скидання якого відбувається після надходження в лічильник імпульсів 36 одного імпульсу. Одночасно цей же імпульс збільшує на одиницю показання, записані в лічильнику імпульсів 58, тим самим збільшуючи витрати робочого ресурсу третього вимикача. Після цього відновлюється вихідний режим роботи пристрою.

Така система контролю дозволяє визначити витрачений ресурс значної кількості вимикачів. Для цього необхідно зробити відповідні зміни в лічильнику імпульсів 17 і дешифраторі 18, збільшити кількість однофазних, ресурсних лічильників, компараторів, а також відповідних логічних елементів I, АБО.

Кількість розрядів лічильника імпульсів 36, а також кількість RS-тригерів вибирається в залежності від діапазону струму, що вимірюється, і від необхідного ступеня точності визначення витраченого вимикачем ресурсу.

Тривалість імпульсу диференціувального елемента вибирається дещо меншою тривалості імпульсу, який виробляється генератором імпульсів 15.

Тривалість імпульсів однофазних з прямим динамічним входом вибирається дещо більшою часу повного заповнення імпульсами лічильника імпульсів 36.

Час затримки сигналу в елементі затримки сигналу 40 вибирається на порядок більшим тривалості імпульсів одновібраторів.

Очевидно, що систему, яка реалізована згідно рис. 23, доцільніше реалізувати в мікропроцесорному виконанні, особливо, коли кількість вимикачів є суттєво більшою трьох (а це майже завжди має місце в розподільчому пристрої електростанції або підстанції), та необхідно відновлювати сигнал, що знімається з датчиків струму, за допомогою, наприклад, ФІМІ.

#### **4.2. Мікропроцесорна реалізація системи діагностики високовольтних вимикачів**

В основу функціонування системи діагностики групи високовольтних вимикачів (СДВ) закладені ті ж принципи, що й у синтезованій в попередньому параграфі структурі, проте вони максимально розв'язані програмним шляхом з урахуванням значної кількості контрольованих вимикачів.

Сформулюємо загальні вимоги до проектування СДВ для діагностування високовольтних вимикачів.

СДВ мусить:

1. Визначати момент вичерпання комутаційного ресурсу кожного вимикача шляхом вимірювання комутованих струмів кожним полюсом з наступним перерахуванням ресурсу за ваговими коефіцієнтами.

2. Відображати залишковий ресурс по кожному полюсу кожного з вимикачів.

3. Сигналізувати про вичерпання комутаційного ресурсу будь-якого з контрольованих вимикачів.

4. Забезпечити можливість ручного корегування залишкового ресурсу, а також зміну вагових коефіцієнтів (для адаптації під різні типи вимикачів і врахування стану конкретного вимикача після його технічного огляду або ремонту).

Враховуючи те, що на великих підстанціях може бути встановлено до 100 високовольтних вимикачів, СДВ мусить забезпечувати діагностування кожного з них.

Очевидно, що в цьому випадку кількість вхідних сигналів СДВ занадто велика (для 100 вимикачів буде 300 аналогових сигналів, які подаються з датчиків струму, оскільки всі вимикачі трифазні, і 100 бінарних сигналів, які подаються з датчиків комутації і свідчать про положення всіх вимикачів). Це призводить до надмірної кількості вхідних контактів і надмірних габаритів системи в цілому. Крім того кількість вимикачів не лімітується жорстко і може на різних підстанціях бути різною. Тому виготовляти систему на 100 вимикачів, коли постійно будуть працювати, наприклад, тільки 20, недоцільно.



Архітектура системи мусить бути такою, щоб можна було легко встановити потрібну її конфігурацію на конкретну підстанцію, а в подальшому при необхідності легко розширити систему, додавши необхідні блоки.

Таким вимогам відповідає розподілена система, структура якої зображена на рис 24. В такій системі кожний базовий блок діагностує деяку мінімальну кількість вимикачів. Центральний блок координує роботу всіх базових блоків. Змінюючи кількість базових блоків, легко можна задавати потрібну конфігурацію системи. Крім того такий підхід забезпечує просту локалізацію відмов апаратури і спрощує технічне обслуговування.

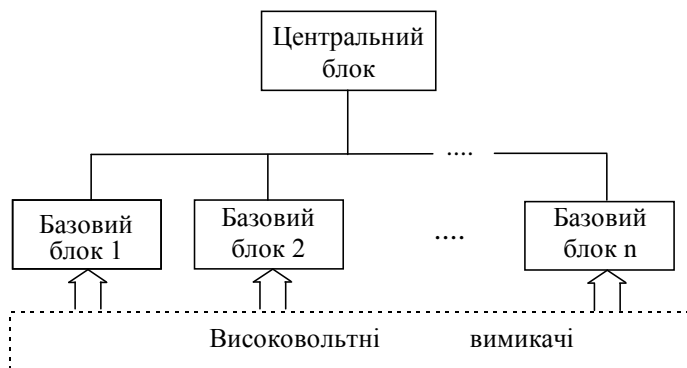


Рис. 24. Структура СДВ у вигляді розподіленої системи

Обмеження на кількість вимикачів, що підключаються до одного базового блока, накладає швидкодія мікропроцесора. Попередні розрахунки показали, що, застосовуючи сучасний мікропроцесор, можна діагностувати 8 вимикачів по 24 аналогових і 8 бінарних сигналах з достатнім запасом обчислювальної потужності мікропроцесора.

Центральний блок розподіленої системи доцільно реалізувати на базі ПЕОМ типу ІВМ РС або на базі промислового комп'ютера, наприклад фірми Octagon.

В такому виконанні СДВ можна реалізувати так, щоб базові блоки виконували всі операції реального часу, а персональний комп'ютер - лише розрахунок залишкового ресурсу по отриманих даних з наданням інформації обслуговуючому персоналу в зручній формі.

Останнім часом все більшу популярність набирають однокристальні мікроконтролери [72, 73], які суміщають в собі всі переваги мікропроцесорної системи. Такі мікроконтролери

спеціально розраховані для довгої і надійної роботи в автономному режимі.

Структурна схема базового блока СДВ зображена на рис. 25. На схемі: 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.

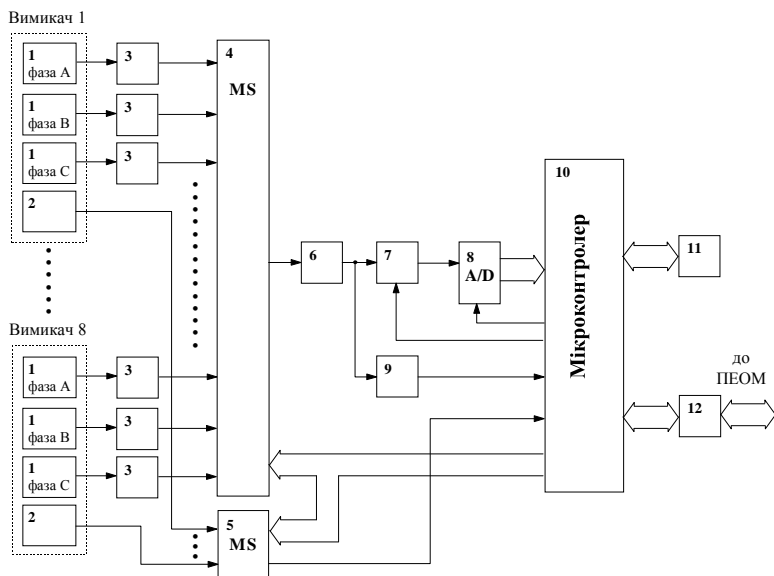


Рис. 25. Структурна схема базового блока СДВ

З метою забезпечення контролю групи високовольтних вимикачів по кожному полюсу в базовий блок СДВ введено аналоговий комутатор 4. На його входи подається напруга, пропорційна струму, який протікає в кожній фазі кожного вимикача. Для перетворення струму з датчика струму в напругу використовуються нормуючі перетворювачі 3.

Підсилювач 6 введено в схему базового блока СДВ для узгодження сигналів, а пристрій вибірки-зберігання 7 - для забезпечення незмінності напруги на вході АЦП на період перетворення сигналів.

Працює базовий блок СДВ так. Мікроконтролер 10 підключає до входу АЦП 8 через аналоговий комутатор 4, нормуючий

перетворювач 3, підсилювач 6 та пристрій вибірки-зберігання 7 напругу, пропорційну струмові в фазі А вимикача 1 і вимірює значення напруги, потім аналогічно підключається фаза А вимикача 2 і т.д. Після виміру струму в фазі А вимикача 8 процес повторюється для фази В, а потім С, після чого все починається спочатку. Таким чином відбувається основний цикл сканування значень струму вимикачів.

Крім основного циклу сканування працює програма підсинхронізації частоти. Для того, щоб вірно визначати інтервали часу, в які потрібно вимірювати струми в кожній з фаз, потрібно точно знати частоту вимірюваного сигналу. Відомо, що в електричній мережі частота сигналу 50 Гц. Але стабільність частоти не абсолютна і може коливатись в деяких межах. Крім того, в момент включення СДВ або при відновленні роботи після аварійної ситуації необхідно виконувати підсинхронізацію до вимірюваного сигналу. Для цього в базовий блок СДВ введено компаратор нуля 9, за допомогою якого ініціюється робота програми в перериваннях і в результаті корегуються значення моментів часу для виконання аналого-цифрового перетворення.

Для визначення положення вимикача по стану блок-контактів кожного з 8 вимикачів використовується комутатор 5. На його входи подаються бінарні сигнали і під дією керуючих сигналів з мікроконтролера один з цих сигналів підключається до виходу комутатора і подається в мікроконтролер 10.

Якщо в процесі первинної обробки інформації система визначає, що через вимикач протікає аварійний струм, то мікроконтролер посилає сигнал на комутатор 5 і перевіряється стан блок-контактів, щоб підтвердити, що саме цим вимикачем комутувався СКЗ. Після підтвердження інформація стає в чергу для відправки в центральний блок за допомогою блока інтерфейсу 12.

Обчислення залишкового ресурсу високовольтних вимикачів з попереднім відновленням реального значення струму за допомогою ФІМІ проводиться в центральному блоці.

Блок індикації і клавіатури 11 під'єднується до мікроконтролера 10 і забезпечує виведення оперативних даних про вичерпання ресурсу вимикачів, а також дозволяє організувати простий діалоговий режим обміну інформацією між контролером і оператором для виведення деяких найважливіших даних або з метою діагностики пристрою.

При отриманні переривань від блоку індикації і клавіатури 11 частина вільних квантів часу мікроконтролера віддається на обробку вводу з клавіатури і відображення інформації.

Алгоритм обміну інформацією базового блоку з центральним забезпечує передачу відліків про комутацію СКЗ і прийом деякої сервісної інформації.

Базовий блок СДВ для контролю ресурсу високовольтних вимикачів побудований на основі однокристалного мікроконтролера фірми ATMEL, модель AT90S8535. Вибір саме цього мікроконтролера обумовлений наявністю вбудованого АЦП, вбудованого UART, великого об'єму електрично-перепрограмованої пам'яті програм (8 КБайт), достатнього об'єму ОЗП (512 байт), а також великою швидкодією, досягнутою завдяки застосуванню RISC архітектури побудови мікроконтролерного ядра. Вбудований багатоканальний АЦП, поєднаний з пристроєм утримання аналогового сигналу під час аналого-цифрового перетворення, дозволяє значно зменшити розміри печатного вузла за рахунок відмови від застосування зовнішнього блоку АЦП.

Для забезпечення зв'язку з центральним блоком використовується асинхронний порт мікроконтролера, для гальванічної розв'язки сигналу і формування струмової петлі в каналі зв'язку застосовані оптопари як в приймальному, так і в передавальному блоках.

В роботі [74] запропонована одна з можливих реалізацій СДВ для діагностики високовольтних вимикачів.

Слід відзначити, що для радіальних електричних мереж з одностороннім живленням [75] структуру СДВ можна спростити, реалізувавши її тільки на одному мікроконтролеру. Датчики струму необхідно встановити лише на одному високовольтному вимикачу, через який напруга подається на шину живлення всіх інших вимикачів. Очевидно, що на аналоговий комутатор буде поступати лише три аналогових сигнали і значна частина обчислювальної потужності мікроконтролера вивільнюється.

Ознакою початку обчислень спрацювання комутаційного ресурсу того чи іншого високовольтного вимикача буде наявність зафіксованого значення СКЗ, що протікає через ввідний вимикач, та спрацьовування датчика комутацій того ж вимикача.

#### **4.3. Висновки**

1. Розроблено ряд пропозицій подальшого удосконалення системи діагностики вимикачів, котрі запропоновані в попередніх розділах.

2. Розроблено структуру СДВ для діагностування всіх високовольтних вимикачів, встановлених на підстанції незалежно від їх кількості.

## ПІДСУМКИ

1. Проведено огляд методів та аналіз засобів технічної діагностики високовольтних вимикачів.
2. Розроблено математичну модель високовольтного вимикача як об'єкта діагностики.
3. Вибрано математичний апарат, придатний для синтезу СДВ.
4. Розроблено секвенціальну математичну модель структури СДВ.
5. Створено методику синтезу СДВ в однополюсному і триполюсному варіантах.
6. Модифіковано СДВ для різних способів визначення СКЗ.
7. Удосконалено СДВ для контролю групи високовольтних вимикачів.
8. Запропоновано мікропроцесорний варіант реалізації СДВ.
9. Представлені конкретні схеми на основі серійної елементної бази, що випускається підприємствами.

## ЛІТЕРАТУРА

1. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Основные термины и определения.
2. Мозгалевский А.В., Койда А.Н. Вопросы проектирования систем диагностирования. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. - 112 с., ил. - (Б-ка по автоматике ; Вып. 648).
3. Пархоменко П.П., Согомоян Е.С. Основы технической диагностики: (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / Под ред. Пархоменко П.П. - М.: Энергия, 1981. - 320 с., ил.
4. Мозгалевский А.В., Гаскаров Д.В. Техническая диагностика (непрерывные объекты). Учеб. пособие для вузов. - М.: Высш. школа, 1975. - 207 с.
5. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9-ти кн. Кн.5. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств: Учеб. пособие для вузов/ Пантюшин С.В., Назаретов В.М., Тягунов О.А. и др. ; Под ред. Макарова И.М. - М.: Высш. шк., 1986. - 175 с., ил.
6. Кузьмин И. В., Кедров В. А. Основы теории информации и кодирования. - 2-е изд., перераб. и доп. -К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. - 238 с.
7. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. - 2-е изд. - М.: Радио и связь, 1982. - 624 с.
8. Иган Джеймс П. Теория обнаружения сигналов и анализ рабочих характеристик. - М.: Наука, 1983. - 216 с., ил.
9. Мокін Б.І., Мокін В.Б. Математичні методи ідентифікації електромеханічних процесів. Ч.П. Ідентифікація ЕМП у лінійних стохастичних системах із зосередженими параметрами/ Навч. посібник. - Вінниця: "УНІВЕРСУМ-Вінниця", 1999.-99 с.
10. Доценко Б.И. Диагностирование динамических систем. -К.: Техника, 1983. - 158 с.
11. Белый О.В., Гофман В.И. Распознавание состояний контролируемого объекта// Сборник трудов II Всесоюзного совещания по технической диагностике. Часть II. Непрерывные объекты, прогнозирование и технические средства диагноза. - Л.- 1972. - 216 с.
12. Биргер И.А. Техническая диагностика.- М.: Машиностроение, 1978. - 240 с., ил.
13. Основы технической диагностики. В 2-х книгах /Под ред. Пархоменко П.П. - М.: Энергия, 1976.
14. Сердаков А.С. Автоматический контроль и техническая диагностика. - К.: Тэхніка, 1971. - 244 с.

15. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования. -К.: Тэхніка, 1983. - 200 с., ил.
16. Методические указания по определению расхода коммутационного ресурса выключателей при эксплуатации.- М.: СПО ОРГРЭС, 1992.- 18 с.
17. Авакян М.А. Прогнозирование межремонтных периодов выключателей // Изв. АН Арм. ССР. Сер. техн. н. - 1986. - 39, №2.- С.10-14.
18. Кусаинов А.К., Суворов А.С., Топилкин Г.И. Разработка элегазовых выключателей на основе глубокой модернизации масляных выключателей // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Создание комплексов электротехнического оборудования высоковольтной, преобразовательной и полупроводниковой техники". Ч.1. - М. - 1989. - С.75-76.
19. Yamashita Izumi // ОНМ.- 1988.- 75, N 2.- p. 55 - 58.
20. Service record of gas-insulated swichgear considered excellent // Power.- 1988.- 132, N 11.- p. G3 - G6, G10.
21. Switchgear at all voltages in moving away from oil // Elec. world.- 1989.- 203, N3.- p. 22.
22. Development of detecting method using magnetic fields sensor for bad contact parts in GIS / Fujinami Hideo of al. // Quart. Abstr./ Cent. Res. Inst. Elec. Power Ind.-1988.- N 45. p.21.
23. Iida I., Kanai Y., Matsunaga N., Orawa M. Circuits breaker with self diagnostic function// "CIRED.- 1987: 9th Int. Conf. Elec. Distrib., Liege, 4-8 May, 1987.[vol. 1/1]: Sess.1. Area e: Subst. equip." Liege, 1987, 10/1 - 10/6.
24. Goto K., Sakakibara T., Kamata I., Ikeda S. On-line monitoring and diagnostics of gas circuit - breakers // IEEE Trans. Power Deliv.- 1989.- N 1.- p.375-381.
25. Kulicke B., Schramm H.-H. Application of vacuum circuit-breaker to clear faults with delayed current zeros // IEEE Trans. Power Deliv.- 1988.- N 4.- p. 1417 - 1423.
26. Takanashi Y. Diagnostic methods for gas-insulated substation // IEEE Trans. Elec. Insul. - 1986. - 21, N6.- p. 1037 - 1043.
27. Pasteau J. Discussion meting summary for group 13 Swithching equipment // Irrig. and Power.- 1986.- 43, N 4.- p. 219 - 220.
28. Balan Gh., Curelaru Al., Onu V. A decade of experience on service behavior of reliability and maintenance of circuit-breakers. CIGRE. Int. Conf. Large High Voltage Elec. Syst., Paris, 27th Aug. - 4th Sept., 1986. Pap. N 13-07.

29. Выключатели высокого напряжения: Переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-86)/ Под ред. Шилина Н.В. - М.: Энергоиздат, 1988. - 136с.

30. Электрические машины. Выключатели высокого напряжения: Обзор и переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-84) /Под ред. Глебова И.А., Шилина Н.В. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 256 с.

31. ГОСТ 4.176-85. Аппараты электрические высоковольтные. Номенклатура показателей.

32. Выключатели высоковольтные трехполюсные серии ВК-10. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. - М.: Внешторгиздат. Изд. № 1581/81.

33. Штерн В.И. Испытание масляных выключателей 6-35 кВ, Изд. 2-ое перераб. Библиотека электромонтера. Вып. 400. - М.: Энергия, 1975.

34. Устройство комплектное распределительное (КРУН) К-102. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ОКИ.140.011.ТО. МЭИ и Э СССР, Главэнергостроймеханизация, 1983.

35. Счетчик отключений коротких замыканий СКЗ-6. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. - Рига, РОЗ "Энергоавтоматика". - 1981.

36. Комнатный В.Ф., Юренков В.Д. Многопредельный счетчик коротких замыканий // Электрические станции. - 1976. - № 1. -С.69-71.

37. Болотин И.Б., Эйдель Л.З. Измерение в переходных режимах короткого замыкания. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1981. - 192 с., ил.

38. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: Пер. с нем. / Под ред. Г.Гроше, В.Циглера. - Изд. перераб. - М.: Наука, Лейпциг: Гойбнер, 1981. - 718 с., ил.

39. Осциллограф светолучевой Н117. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.- М.: В/О "Машприборинторг", Зак. 789.- 74 с.

40. А.с. № 800892 СССР. Устройство для фиксации величины количества электричества в дуге быстродействующего выключателя/ В.Г. Бутарев, Н.Н. Василевский, В.И. Удод, В.М. Эрлих.- 4 с. ил; Опул. 30.01.81, Бюл. № 4.

41. А.с. 881797 СССР. Устройство для контроля ресурсов коммутационных аппаратов/ В.Ф. Ракитянский, В.П. Котов, И.Г. Котлубовский; Опул. 15.11.81. Бюл. № 42.



42. Бобыльков А.Н., Вишневский Ю.И., Загайкевич Б.Д. и др. Коммутационная износостойкость высоковольтных выключателей // Электрические станции. - 1986. - №4. - С.62-64.
43. Правила устройства электроустановок /Минэнерго СССР. -6-е изд. перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 648 с., ил.
44. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей / М-во энергетики и электрификации СССР. - 14-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 288 с.
45. Выключатели маломасляные серии ВМП-10. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. - М.: Внешторгиздат. Изд. № 1568/81.
46. Выключатель маломасляный серии ВМТ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. - М.: Внешторгиздат. Изд. № 2360СО.
47. Выключатель С-35М-630-10. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ОСЯ.463.006. - М.: Внешторгиздат. Изд. № 55100/82.
48. Усенко А.Ф. Воздушные выключатели с воздушнонаполненными отделителями. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 112 с.,ил. -(Б-ка электромонтера ; вып. 583).
49. Попов А.А., Шилин Н.В., Шлейфман И.Л. Испытания маломасляных выключателей 10, 35 кВ с целью определения допустимого числа отключений // Электрические станции. - 1976. - № 12. -С.53-56.
50. Турчак Л.И. Основы численных методов: Учеб. пособие. -М.: Наука, Гл.ред. физ.-мат. лит., 1987. - 320 с.
51. Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивость моделирования. - К.: Наук. думка, 1985. - 216 с.
52. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. MathCAD 7.0 в математике, физике и в Internet.- М.: Нолидж, 1998.- 352 с., ил.
53. Грабко В.В., Мокин Б.И. Об одном способе построения ресурсных характеристик высоковольтных выключателей // Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений). - 1989. - № 11. - С.39-42.
54. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешников Н.А. и др. Электрическая эрозия силовых контактов и электродов. -М.: Энергия, 1978. - 256 с., ил.
55. Грабко В.В., Мокин Б.И. Синтез устройств для измерения отключающего ресурса высоковольтных выключателей. // Устройства преобразования информации для контроля и управления в энергетике. Тез. докл. третьей Респ. конф. Харьков, 1988. - С. 209.
56. Захаров В.Н. Автоматы с распределенной памятью. - М.:Энергия, 1975. - 136 с., ил.

57. Григорьев В.С., Закревский А.Д., Перчук В.Л. Секвенциальные дискретные автоматы. - Тезисы докладов II Всесоюзного совещания по теории релейных устройств и конечных автоматов. Рига, 1971.

58. Лазарев В.Г., Пийль Е.И. Синтез управляющих автоматов. - М.: Энергия, 1978. - 408 с.

59. Поспелов Д.А. Логические методы анализа и синтеза схем. М.: Энергия, 1974. - 368 с.

60. Афанасьев В.В., Адоньев Н.М., Кибель В.М. и др. Трансформаторы тока. 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. - 416 с., ил.

61. Щербаков В.И., Грездов Г.И. Электронные схемы на операционных усилителях.: Справочник. - К.: Техника, 1983. - 213 с. ил.

62. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. Учебник для вузов. М.: Энергия, 1976. - 560 с., ил.

63. Справочник по интегральным микросхемам / Под общ. ред. Тарабрина Б.В., М.: Энергия, 1977.

64. Шило В.Л. Популярные цифровые микросхемы: Справочник. - М.: Радио и связь, 1987. - 352 с., ил. - (Массовая радиобиблиотека. Вып. 1111).

65. А.с. 1446637 (СССР). Устройство для контроля ресурса коммутационных аппаратов/ Б.И. Мокин, В.В. Грабко, В.В. Панасюк; Опубл. 23.12.88. Бюл. № 47.

66. Патент 2714 Україна. Пристрій для контролю ресурсу комутаційних апаратів/ Мокін Б.І., Головатюк М.О., Грабко В.В.; Опубл. 26.12.94. Бюл. № 5-1.- 2 с.

67. А.с. № 1656568 СССР. Устройство для контроля ресурса коммутационных аппаратов/ Б.И. Мокин, Н.А. Головатюк, В.В. Грабко.- 4 с. ил; Опубл. 15.06.91, Бюл. № 22.

68. Мокін Б.І., Мокін В.Б. Математичні методи ідентифікації електромеханічних процесів. Ч.І. Ідентифікація електромеханічних процесів в лінійних детермінованих системах з зосередженими параметрами/ Навч. посібник. - Вінниця: "УНІВЕРСУМ-Вінниця", 1998.-153 с.

69. Грабко В. Восстановление формы тока аварийного режима электрической сети // Книга за матеріалами четвертої міжнародної НТК "Контроль і управління в технічних системах (КУТС-97)", 21 - 23 жовтня 1997 р. - Вінниця, УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1997.- Т. 3.- С. 90 - 93.

70. А.с. 1785018 СССР. Устройство для контроля ресурса коммутационных аппаратов/ Б.И. Мокин, В.В. Грабко, Н.А. Головатюк.- 5 с. ил; Опубл. 30.12.92. Бюл. № 48.

71. Патент 22624А Україна. Пристрій для контролю ресурсу комутаційних апаратів/ Мокін Б.І., Грабко В.В., Юхимчук С.В. Опубл. 17.03.98.

72. Липовецкий Г.П., Литвинский Г.В., Оксінь О.Н. и др. Однокристалльные микро-ЭВМ. Семейство МК48 и МК51.- М.: МП "Бином".- 1992.- 339 с.

73. Гребнев В.В. Однокристалльные микро-ЭВМ семейства AT89 фирмы Atmel.- Санкт-Петербург: ЭФО.-1998.- 76 с.

74. Грабко В.В. Информационно-измерительная система для измерения отключающего ресурса группы высоковольтных выключателей. - Винница, Винниц. политехн. ин-т, 1990. - 13 с., ил. - Деп. в УкрНИИНТИ. - №489 - Ук 90 от 13.03.90 г.

75. Электрические системы и сети / Буслова Н.В., Винославский В.И., Денисенко Г.И. - К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. - 584 с.

*Наукове видання*

**Грабо Володимир Віталійович  
Мокін Борис Іванович**

**Моделі та системи технічної діагностики  
високовольтних вимикачів**

Монографія

Редактор Т. А. Ягельська

Видавництво «УНІВЕРСУМ-Вінниця»  
*21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 93,  
ВДТУ, головний корпус, 9-й поверх*  
Тел.: (0432) 44-05-32

Підписано до друку 25.11.99  
Формат 21x29.7 1/4  
Гарнітура Times New Roman  
Друк різнографічний  
Ум.-друк. арк. 4,26  
Зам. №  
Наклад 120 прим.

---

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому  
центрі Вінницького державного технічного університету  
*21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 93,  
ВДТУ, головний корпус, 9-й поверх*  
Тел.: (0432) 44-01-59