

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

з навчальної дисципліни «Основи релейного захисту та автоматизації систем»  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(Електромеханіка)***

**За темою № 8 - Релейний захист силових трансформаторів і  
автотрансформаторів**

**Кременчук 2023**

### **ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023 № 7

### **СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного коледжу  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.2023 № 1

### **ПОГОДЖЕНО**

Секцією Науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1.

### ***Розробники:***

*Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, викладач вищої категорії, Шокарьов Д.А.*

### ***Рецензенти:***

- 1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю. М.*
- 2. К.т.н., професор, завідувач кафедри електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Лазуренко О.П.*

### **План лекції:**

1. Види пошкоджень і ненормальних режимів роботи трансформаторів
2. Струмові й струмові спрямовані захисти трансформатора від коротких замикань

### **Рекомендована література:**

#### **Основна:**

Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. - Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2013. – 533 с.

2. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем/ Чернобровов Н.В., Семенов В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.

3. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита/ Шнеерсон Э.М. – М.: Энергоатомиздат, 2007. -549.

#### **Допоміжна література:**

1. Андрев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб.для вузов/ В.А.Андреев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш.шк., 2006 – 639 с.

2. Басс Э.И. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб.пособие/ Басс Э.И., Дорогунцев В.Г.; под ред. А.Ф.Дьякова. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 296 с.

3. Дьяков А.Ф. Микропроцессорная автоматикаи рлейная защита электроэнергетических систем: учеб. пособие для вузов./ А.Ф.Дьяков, Н.И.Овчаренко. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 336 с.

4. Циглер Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение/ Циглер Г.; пер. с англ. под ред. Дьякова А.Ф. – м.: Энергоиздат, 2005. – 322 с.

5. Перехідні процеси в системах електропостачання/ [Півняк Г.Г., Винославський В.М., Рибалко А.Я., Несен Л.І.]; за ред. академіка НАН України Г.Г.Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2002. – 597 с.

6. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учеб.пособие/ Куликов Ю.А. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 283 с.

7. Reimert D.Protective relaying for power generation/ Donald Reimert/ - USA, FL, Boca Raton: CRC Press, 2006/ - 561 p.

8. Preve C. protection of electrical networks/ Christophe Preve/ - GB: Antony Rowe Ltd, Chippenham, Wiltshire, 2006. – 508 p.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

9. Офіційний сайт Міністерство енергетики

## 8.1 ВИДИ ПОШКОДЖЕНЬ І НЕНОРМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРІВ

У процесі експлуатації можливі ушкодження в трансформаторах і на їх з'єднаннях з комутаційними апаратами. Можуть бути також небезпечні ненормальні режими роботи, не пов'язані з ушкодженням трансформатора або його з'єднань. Можливість ушкоджень і ненормальних режимів обумовлює необхідність установки на трансформаторах захисних пристроїв.

**Основними видами ушкоджень** є багатофазні й однофазні короткі замикання в обмотках і на виводах трансформатора, а також «пожежа сталі» магнітопровідника. Однофазні ушкодження бувають двох видів: на землю й між витками обмотки (виткові замикання). Найбільш ймовірні багатофазні й однофазні короткі замикання на виводах трансформаторів і однофазні виткові замикання в обмотках. Значно рідше виникають багатофазні короткі замикання в обмотках. Для груп однофазних трансформаторів вони взагалі виключені. Захист від коротких замикань виконується з дією на відключення ушкодженого трансформатора. Для обмеження розмірів руйнувань її виконують швидкодіючої.

Замикання однієї фази на землю небезпечно для обмоток, приєднаних до мереж із глухозаземленими нейтралями. У цьому випадку захист повинен відключати трансформатор і при однофазних коротких замиканнях у його обмотках на землю. У мережах з нейтралями, ізольованими або заземленими через дугогасні реактори, захист від однофазних замикань на землю з дією на відключення встановлюється на трансформаторі в тому випадку, якщо такий захист є у мережі. При виткових замиканнях у витках, що замкнули, виникає значний струм, що руйнує ізоляцію й магнітопровід трансформатора, тому такі ушкодження повинні відключатися швидкодіючим захистом. Але використати для цього струмові, диференційні або дистанційні захисти не представляється можливим. Насправді, при малому числі витків, що замкнули, струм в ушкодженій фазі її сторони живлення може виявитися навіть меншим значення номінального струму, а напруга на виводах трансформатора практично не зміниться.

Небезпечним внутрішнім ушкодженням є також «пожежа сталі» магнітопровідника, що виникає при порушенні ізоляції між листами магнітопровідника, що призводить до збільшення втрат струму перемагнічування й вихрових струмів. Втрати викликають місцеве нагрівання сталі, ведучого до подальшого руйнування ізоляції. Захисти, засновані на використанні електричних величин, на цей вид ушкодження теж не реагують, тому виникає необхідність у застосуванні спеціального захисту від виткових замикань і від «пожежі стали». Для маслonaповнених трансформаторів таким захистом є газовий, заснований на використанні явищ газоутворення. Утворення газу є наслідком розкладання масла та інших ізолюючих матеріалів під дією електричної дуги при виткових замиканнях або неприпустимому нагріванні при «пожежі сталі». Електрична дуга виникає

й при багатофазних коротких замиканнях в обмотках. Тому газовий захист є універсальним захистом від усіх внутрішніх ушкоджень трансформатора.

**Ненормальні режими роботи трансформаторів** обумовлені зовнішніми короткими замиканнями й перевантаженнями. У цих випадках в обмотках трансформатора з'являються більші струми (надструми). Особливо небезпечні струми, що проходять при зовнішніх коротких замиканнях; ці струми можуть значно перевищувати номінальний струм трансформатора. У випадку тривалого проходження струму (що може бути при коротких замиканнях на шинах або при ушкодженні, що не відключилося, на приєднанні, що відходить від шин) можливе інтенсивне нагрівання ізоляції обмоток та її ушкодження. Разом з цим при короткому замиканні знижується напруга у мережі. Тому на трансформаторі повинен передбачатися захист, що відключає його з появою надструмів, обумовлених коротким замиканням, що не відімкнулися зовнішнім.

Перевантаження трансформаторів не впливає на роботу системи електропостачання в цілому, тому що вона звичайно не супроводжується зниженням напруги. Крім того, надструми перевантаження відносно невеликі та їхнє проходження припустиме протягом деякого часу, достатнього для того, щоб персонал вжив заходів до розвантаження. Так, відповідно до норм, перевантаження струмом  $I_{\text{пер}} = 1,6 I_{\text{т.ном}}$  можна допускати протягом  $t = 45$  хв. У зв'язку з цим захист трансформатора від перевантаження при наявності чергового персоналу повинен виконуватися з дією на сигнал. На підстанціях без чергового персоналу захист від перевантаження повинен діяти на розвантаження або відключення.

До ненормальних режимів роботи трансформаторів відноситься також неприпустиме зниження рівня масла, що може спливати, наприклад, внаслідок ушкодження бака.

## **8.2 СТРУМОВІ Й СТРУМОВІ СПРЯМОВАНІ ЗАХИСТИ ТРАНСФОРМАТОРА ВІД КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ**

Газовий захист не діє при к. з. на виводах трансформатора й у його з'єднаннях з вимикачами, тому для відключення трансформатора при цих ушкодженнях на трансформаторах невеликої й середньої потужності (менш 6,3 МВА) передбачається струмовий захист від багатофазних к. з. Він звичайно містить два щаблі: перший - струмова відсічка без витримки часу, третій - максимальний струмовий захист. У ряді випадків він доповнюється захистом від однофазних к. з. на виводах нижчої напруги трансформатора, що живить чотирьохпровідну мережу напругою 0,4-0,23 кВ. У міських замкнених мережах напругою до 1 кВ для селективного відключення ушкодженого трансформатора повинен передбачатися струмовий направлений захист.

**Струмовий захист зі східчастою характеристикою витримки часу від багатофазних к. з.** Захист встановлюється з боку джерела живлення безпосередньо біля вимикача, при цьому в зону дії захисту входять трансформатор і його з'єднання вимикачами. Спрацьовуючи, захист діє на відключення вимикачів. Він може бути виконаний за допомогою вторинних

реле прямої й непрямої дії на змінному й постійному оперативному струмі. Схема з'єднання трансформаторів струму й реле вибирається відповідно до вказівок, наведених вище, з урахуванням дії захисту при всіх можливих видах коротких замикань.

Селективність відсічки забезпечується вибором її струму спрацьовування по виразу  $I_{с.з} = k_{відстр}^I I_{к.зовн.мах}^{(3)}$ . Максимальний струм зовнішнього короткого замикання  $I_{к.зовн.мах}^{(3)}$  визначається при ушкодженні на шинах нижчої напруги в точці  $K_1$  (Рис. 8.1, а), Коефіцієнт відстройки  $k_{відстр}^I$  залежно від типу реле, як і для відсічки лінії, приймається  $k_{відстр}^I = 1, 2 \dots 2, 0$ , при цьому відсічка без витримки часу виявляється відстроєною від кидків струму намагнічування. Опір трансформатора звичайно досить великий, тому при к. з. з боку живлення (точка  $K_2$ ) струм ушкодження значно перевищує  $I_{к.зовн.мах}^{(3)}$ . Зазначене співвідношення струмів дає можливість використати струмову відсічку без витримки часу як захист трансформаторів, причому вона звичайно має достатню чутливість до коротких замикань із боку живлення ( $k_{ч} \geq 2, 0$ ). Недолік відсічки без витримки часу складається в неповному захисті трансформаторів. У її зону дії входить тільки частина обмотки. Захист не реагує на короткі замикання на виводах і у з'єднаннях з вимикачем з боку нижчої напруги (точка  $K_3$ ).

Для відключення коротких замикань на виводах і у з'єднаннях з вимикачем з боку нижчої напруги (точка  $K_3$ ) струмова відсічка без витримки часу доповнюється максимальним струмовим захистом, що повністю захищає трансформатор і захистом, що є разом з тим його, від надструмів зовнішніх коротких замикань. Отримуємо захист зі східчастою характеристикою витримки часу без другого ступеня. Схема такого захисту на оперативному змінному струмі розглянута вище.

При установці на трансформаторі захист діє на відключення вимикача з боку вищої напруги. Його допоміжний контакт  $Q1.1$  управляє ланцюгом електромагніту  $YAT2$  відключення вимикача  $Q2$ , встановленого з боку нижчої напруги (як показане на Рис. 8.1, а). Параметри максимального струмового захисту вибирають відповідно до викладеного вище: витримка часу — на ступінь  $\Delta t$  більше максимальної витримки часу  $t_{ел.мах}$  захистів попередніх елементів, а струм спрацьовування - з умови запобігання спрацьовування захисту при перевантаженнях по виразу  $I_{с.з}^{III} = k_{відстр}^{III} k_{сзп} I_{роб.мах} / k_{п}$ . При цьому коефіцієнт чутливості повинен бути  $k_{ч} \geq 1, 5$  при коротких замиканнях на нижчій стороні трансформатора та  $k_{ч} \geq 1, 2$  при коротких замиканнях наприкінці ліній, що відходять від шин нижчої напруги.

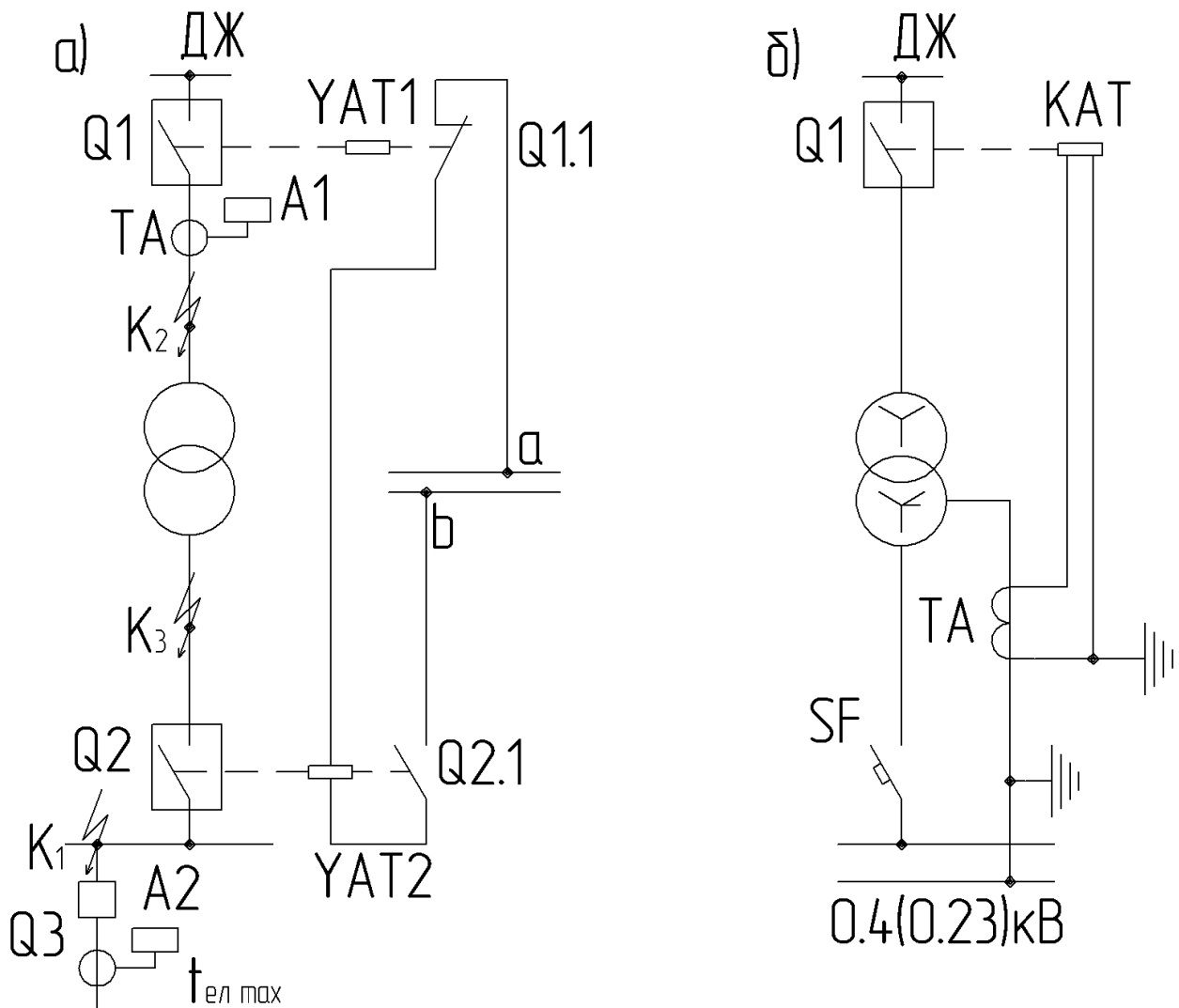


Рис. 8.1. Принципові схеми струмових захистів трансформатора

На паралельно працюючих трансформаторах захист зі східчастою характеристикою витримки часу зберігає селективність тільки при коротких замиканнях у зоні першого ступеня; селективна дія третього ступеня забезпечується лише при наявності на шинах нижчої напруги паралельно працюючих трансформаторів секційного вимикача із захистом, що має меншу витримку часу. Захист має недостатню чутливість до виткових замикань і не забезпечує необхідної швидкодії при багатofазних ушкодженнях в обмотці. Для підвищення чутливості до ушкоджень всередині бака захист зі східчастою характеристикою доповнюється газовим захистом.

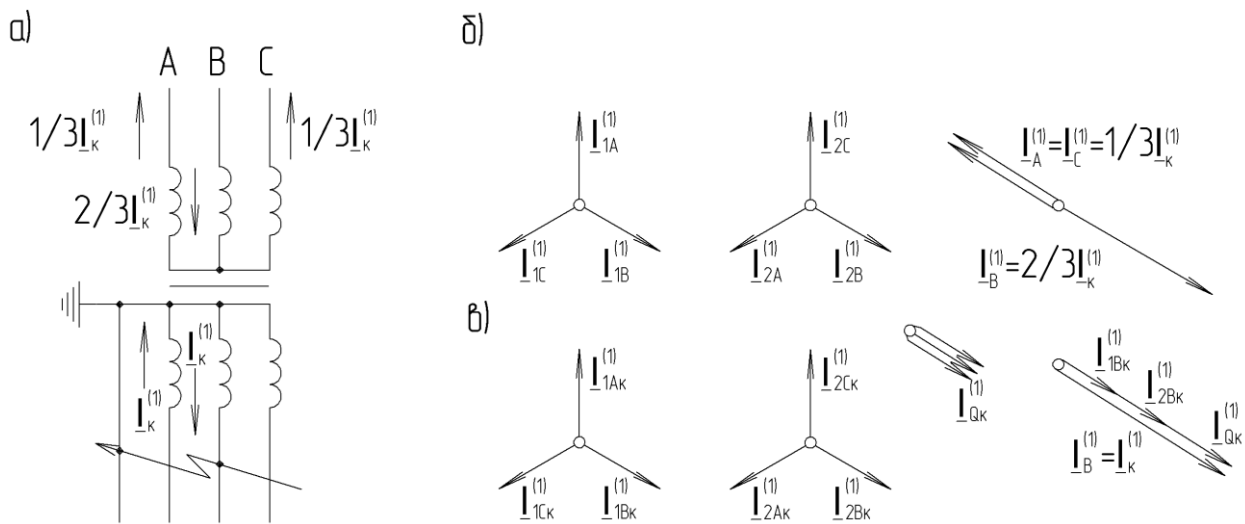


Рис. 8.2. Струми однофазного короткого замикання на стороні нижчої напруги трансформатора із з'єднанням обмоток Y/Y<sub>0</sub>-12

**Захист від коротких замикань на землю.** У розподільних мережах широко застосовуються понижуючі трансформатори із з'єднанням обмоток Y/Y<sub>0</sub> (зірка — зірка із заземленою нейтраллю) і чотирьохпроводною системою з боку нижчої напруги 0,4—0,23 кВ. У такій системі однофазні к. з. на землю й замикання фази на нейтральне проведення (Рис. 8.1, б і 8.2, а) супроводжуються значними струмами ушкодження й становлять небезпеку для трансформатора. Тому на понижуючих трансформаторах з вищою напругою до 35 кВ передбачають дію захисту на відключення при зазначених ушкодженнях на стороні нижчої напруги трансформатора в межах до шин 0,4 (0,23) кВ. При цьому короткі замикання на приєднаннях, що відходять від шин, повинні відключатися захистом цих приєднань.

При короткому замиканні, наприклад фази В, на нейтральне проведення струм  $I_K^{(1)}$ , як і будь-який струм однофазного к. з., містить складові прямої  $I_{1K}^{(1)}$ , зворотньої  $I_{2K}^{(1)}$  і нульової  $I_{0K}^{(1)}$  послідовностей, причому  $I_{1K}^{(1)} = I_{2K}^{(1)} = I_{0K}^{(1)}$  (Рис. 8.2 в).

Потужність розглянутих трансформаторів звичайно в багато разів менше потужності живильної енергосистеми, тому струм  $I_K^{(1)}$  можна визначити без обліку опорів системи:

$$I_K^{(1)} = 3U_{\Phi} / (X_{1T} + X_{2T} + X_{0T}), \quad (8.1)$$

де  $X_{1T}$ ,  $X_{2T}$ ,  $X_{0T}$  — відповідно опору прямої, зворотньої й нульової послідовності трансформатора, Ом.

Для трансформатора при будь-якій групі з'єднання обмоток  $X_{1T} = X_{2T}$ , опір  $X_{0T}$  для двообмоточного трансформатора із зазначеною схемою з'єднання обмоток визначається опором намагнічування  $X_{0, \text{нам}}$ , що значно більше опору  $X_{1T}$  [14]. Наприклад, для трансформатору потужністю 1000 кВа, напругою 10,5/0,4 кВ



опір  $X_{0T} \approx 9X_{1T}$ , тому струм  $I_K^{(1)}$  виявляється в кілька разів меншим струмів трифазного  $I_K^{(3)}$  та двофазного  $I_K^{(2)}$  коротких замикань:

$$I_K^{(3)} = U_\Phi / X_{1T} \quad \text{та} \quad I_K^{(2)} = \sqrt{3} U_\Phi / (X_{1T} + X_{2T}).$$

Звичайно струм однофазного короткого замикання недостатній для дії струмового захисту зі східчастою характеристикою витримки часу. При цьому, як відомо з розподілу струмів на стороні вищої напруги (Рис. 8.2, б), найбільш проста однорелейна схема захисту із включенням реле на різницю струмів двох фаз, наприклад А і С, взагалі непридатна, тому що відмовляє в дії при ушкодженні на землю фази В, а схема неповної зірки може виявитися недостатньо чутливою й тому повинна доповнюватися третім реле, включеним у зворотнє проведення. Через це у ряді випадків застосовується спеціальний струмовий захист нульової послідовності (див. Рис. 8.1, б), виконаний за допомогою, наприклад, вторинного реле КАТ прямої дії типу РТВ. Реле приєднується до трансформатора струму ТА, установленому в нульовому проведенні між силовим трансформатором і точкою заземлення нейтралі. При нормальній роботі струм у реле визначається асиметрією навантаження й струмами 3-ї гармонійної, що має найбільше значення при підключенні до трансформатора газорозрядних ламп.

Двообмоточний трансформатор зі схемою з'єднання обмоток  $Y/Y_0$  розрахований на тривалий струм навантаження нейтралі не більше 25% номінального струму обмотки нижчої напруги. При цьому в жодній із фаз струм 2 не повинен перевищувати номінальне значення більш ніж на 5%, тому умова для вибору струму спрацьовування має вигляд

$$I_{с.з} = 0,25 k_{\text{відстр}} k_{\text{пер}} I_{\text{т.ном}} / (k_p K_I) \quad (8.2)$$

де  $k_{\text{пер}}$  — коефіцієнт, що враховує перевантаження; для масляних трансформаторів, згідно [3],  $k_{\text{пер}} = 1,4$ ;  $k_{\text{відстр}} = 1,1 \dots 1,2$ .

Витримка часу захисту узгодиться із часом дії захистів на лініях, що відходять. Чутливість захисту перевіряється за мінімальним значенням струму однофазного короткого замикання на шинах нижчої напруги, яке можна знайти по виразу  $I_K^{(1)} \approx U_\Phi / (\sqrt{Z_n + Z_T/3})$  при  $Z_n = 0$ ,

де  $U_\Phi$  - фазна напруга мережі, В;

$Z_T$  – повний електричний опір трансформатора, що живить мережу, Ом;

$Z_n$  - повний опір петлі фазної - нульове проведення лінії, Ом.

Чутливість вважається достатньою, якщо  $k_\chi \geq 1,5$ . Зазвичай захист приєднань, що відходять від шин 0,4 (0,23) кВ, виконується плавкими запобіжниками й автоматичними вимикачами із залежною характеристикою витримки часу, тому для захисту від коротких замикань на землю на стороні нижчої напруги трансформатора застосовують реле із залежною характеристикою (типу РТВ, РТ-80), тому забезпечується краще узгодження захистів.

Розглянутий захист повинен застосовуватися з урахуванням ймовірності однофазних ушкоджень на виводах трансформатора з боку нижчої напруги й у

з'єднаннях із шинами 0,4, (0,23) кВ. При незначних відстанях між трансформатором і розподільним щитом 0,4 (0,23) кВ (до 30м) і ретельному виконанні проводки між ними можливість ушкоджень невелика й захист допускається не застосовувати. У трансформаторів із з'єднанням обмоток за схемою  $\Delta/Y_0$  (трикутник — зірка із заземленою нейтраллю) опір нульової послідовності практично дорівнює опору прямої послідовності, тому струми однофазного й трьохфазного короткого замикання при ушкодженні у виводах нижчої напруги трансформатора мають приблизно однакове значення. І в тому і в іншому випадку ушкодження повинні відключатися третім щаблем струмового захисту трансформатора.

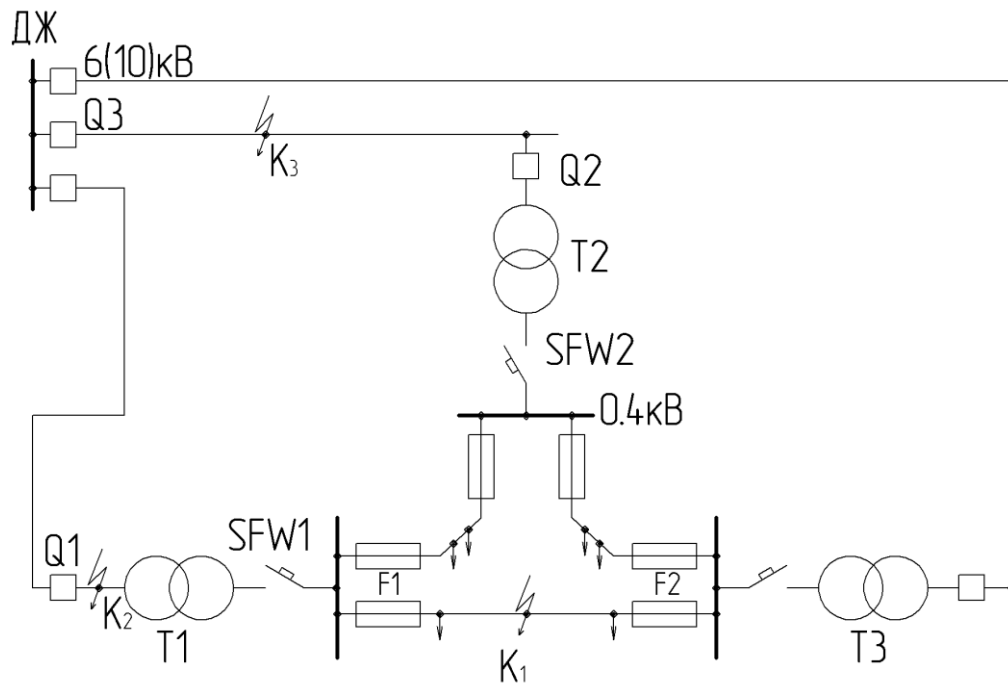


Рис. 8.3. Схема найпростішої замкненої мережі напругою до 1 кВ

### Захист трансформаторів у замкнених мережах напругою до 1 кВ.

Доцільність побудови міських замкнених мереж напругою до 1 кВ не викликає сумніву. У закордонній практиці такі мережі успішно експлуатуються досить тривалий час. У якості що відключають і захисних апаратів використовуються плавкі запобіжники в сукупності з автоматами зворотної потужності.

Селективне відключення елементів найпростішої замкненої мережі напругою до 1 кВ (Рис. 8.3) забезпечується запобіжниками, установленими по кінцях ліній, і автоматами SFM зворотної потужності, установленими на стороні нижчої напруги трансформаторів T1-T3. У нормальному режимі й при ушкодженні в мережі (точка  $K_1$ ) через всі трансформатори, а отже, і через автомати зворотної потужності проходить потужність у прямому напрямку, тобто від джерела живлення ИП до споживачів замкненої мережі. Автомати зворотної потужності при цьому не спрацьовують, ушкоджена лінія відключається своїми запобіжниками F1, F2.

Якщо ушкоджується який-небудь трансформатор, наприклад T1 (точка  $K_2$ ), то потужність через трансформатор T1 і автомат зворотної потужності

SFW1 змінює напрямок, проходячи із замкненої мережі до місця ушкодження. Автомат зворотної потужності SFW1 реагуючи на зміну напрямку потужності, відключає ушкоджений трансформатор Т1 з боку нижчої напруги. Зі сторони вищої напруги трансформатор відключається захистом, що діє на його вимикач Q1. Неушкоджені трансформатори залишаються в роботі, електропостачання споживачів зберігається повністю.

При ушкодженні однієї з живильних ліній, зокрема в точці Кз, електропостачання також повністю зберігається. Ушкоджена лінія з боку ИП відключається своїм вимикачем Q3 під дією релейного захисту, а з боку трансформаторного пункту - разом із трансформатором Т2 автоматом зворотної потужності SFW2. У нашій країні такі автомати не випускаються, тому у містах де застосовуються замкнені мережі напругою до 1 кВ, захист здійснюється переробленими лічильниками, реле напрямку потужності різних типів і інших апаратів, не призначеними для такої мети. У свій час був розроблений комплект захисту РОМ-3, що складається з електромеханічних реле. Однак експлуатація досвідченої партії показала його принципові й конструктивні недоліки [110]. Найбільш досконалий захист на напівпровідниках, розроблений Ризьким політехнічним інститутом [111]. У роботі брав участь Ульяновський політехнічний інститут. Створено три модифікації захисту відповідно до різних схем розподільних мереж.

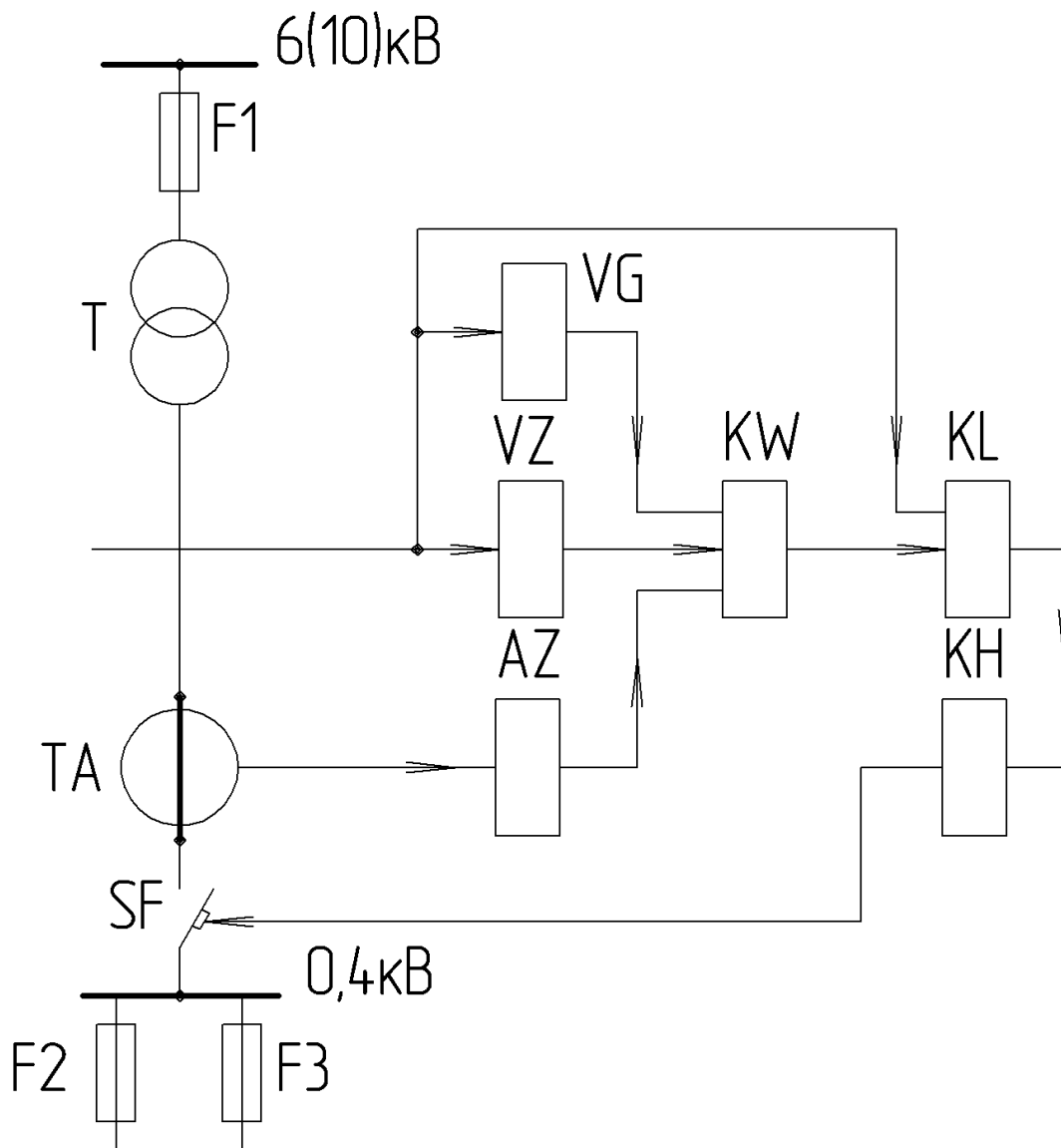


Рис. 8.4. Структурна схема напівпровідникового захисту

На Рис. 8.4 показана структурна схема найбільш простої модифікації, що рекомендується до установки в мережах розглянутого типу (див. Рис. 8.3). Комплект захисту призначений для роботи від трансформаторів струму ТА серій ТК-40 і ТК-20. Реле напрямку потужності KW включається на складовій прямій послідовності струму (фільтр AZ) і напруги (фільтр VZ). При цьому забезпечується його спрацьовування при всіх можливих видах короткого замикання в захищеній зоні. Реле створено на принципі порівняння фаз двох електричних величин. Кут максимальної чутливості реле  $\varphi_{\text{Рmax.год}} = \pi/12$ . Фільтр струму AZ і фільтр напруги VZ прямій послідовності можна виконати у відповідності зі схемами, розглянутими вище. Фільтр напруги включається безпосередньо у мережу.

Блок живлення VG забезпечує нормальну роботу схеми при значних коливаннях напруги мережі. Виконавчий релейний елемент KL виконаний на напівпровідниках і працює від залишкової напруги мережі. При спрацьовуванні реле напрямку потужності KW створюється ланцюг на котушку відключення автомата SF, у яку включене й вказівне реле KH.