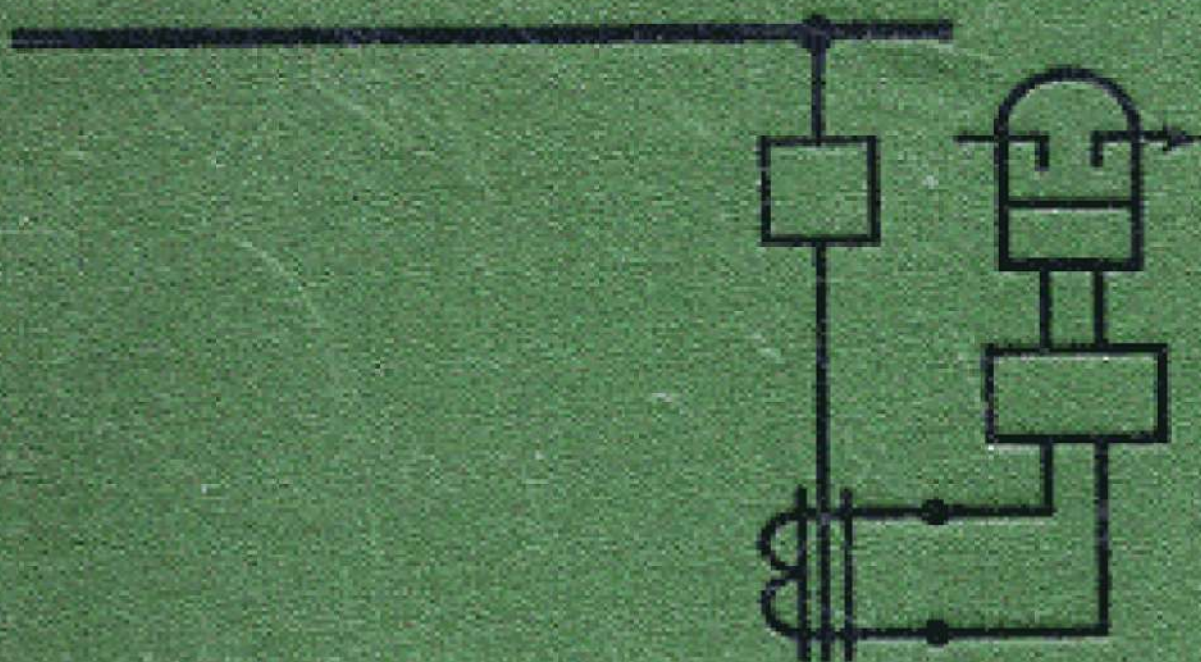


А.В. Гайдай

# ОСНОВИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ





**А.В. Гайдай**

# **ОСНОВИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ**

Луцьк  
2013

УДК 621.316  
ББК 31.27  
Г13

Основи релейного захисту та автоматики: конспект лекцій для студентів усіх форм навчання за напрямком підготовки 6.050701 “Електротехніка та електротехнології”/А.В. Гадай. – Луцьк: ЛДНТУ, 2013.– 87 с.

Подані основні відомості про елементи пристроїв релейного захисту та автоматики, захист та автоматику розподільчих електричних мереж напругою до 1000 В, триступеневий струмовий захист, пристрої автоматики, струмовий направлений, дистанційний, диференційний захисти, захист ліній від однофазних замикань на землю в мережах напругою понад 1000 В.

Укладач: А.В. Гадай

Рецензенти: М.В. Пестухов

Відповідальний за випуск: Л.Н. Добровольська

Затверджено науково–методичною радою ЛНТУ,  
протокол № \_\_ від \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.2013 р.

Рекомендовано до друку науково–методичної радою ФЕПЕС,  
протокол № \_\_ від \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.2013 р.

Затверджено на засіданні кафедри електропостачання,  
протокол № \_\_ від \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.2013 р.

© А.В.Гадай, 2013

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ І АВТОМАТИКУ .....   | 6  |
| 1.1. Призначення пристроїв захисту і автоматики, їх складові елементи та функціональні частини .....     | 6  |
| 1.2. Основні вимоги до пристроїв РЗА.....  | 7  |
| 1.3. Техніка безпеки при роботі з пристроями РЗА.....  | 8  |
| 2. ЕЛЕМЕНТИ ПРИСТРОЇВ РЗА .....  | 10 |
| 2.1. Первинні вимірювальні перетворювачі струму.....   | 10 |
| 2.2. Схема з'єднань ТС .....   | 11 |
| 2.3. Оцінка схем з'єднань ТС і сфери їх використання.....  | 15 |
| 2.4. Первинні перетворювачі напруги .....  | 16 |
| 2.5. Захист кіл ТН.....  | 17 |
| 2.6. Насичувальні ТС (НТС) .....   | 19 |
| 2.7. Трансреактори (ТР).....   | 20 |
| 2.8. Фільтри симетричних складових .....   | 20 |
| 2.8.1. Фільтр струму зворотної послідовності .....   | 20 |
| 2.8.2. Фільтри струму нульової послідовності .....   | 22 |
| 2.8.3. Фільтри напруги зворотної послідовності .....   | 23 |
| 2.8.4. Фільтр напруги нульової послідовності.....  | 25 |
| 2.9. Блоки живлення.....   | 26 |
| 3. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ ПРИСТРОЇВ РЗА .....   | 28 |
| 3.1. Загальні відомості про електромеханічні системи .....   | 28 |
| 3.2. Використання електромагнітного принципу для виконання реле .....                                    | 28 |
| 3.3. Використання індукційного принципу для виконання реле .....   | 29 |
| 3.4. Індукційні вимірювальні реле. Реле струму РТ – 80, РТ – 90 .....                                    | 30 |
| 3.5. Реле на пряму потужності типу РБМ.....  | 31 |
| 3.6. Електромеханічні реле з постійним магнітом .....  | 32 |
| 3.7. Реле на герконах.....   | 33 |
| 3.8. Напівпровідникові реле.....   | 33 |
| 3.9. Мікропроцесорний захист.....  | 33 |
| 3.10. Загальні відомості про електротеплові елементи .....   | 34 |
| 3.11. Керовані запобіжники .....   | 34 |
| 4. ЗАХИСТ І АВТОМАТИКА МЕРЕЖ НАПРУГОЮ ДО 1 КВ.....   | 36 |
| 4.1. Вимоги до запуску мереж до 1 кВ та їх реалізації.....   | 36 |
| 4.2. Захист плавкими запобіжниками, їх вибір з урахуванням забезпечення селективності і чутливості ..... | 36 |
| 4.3. Захист з допомогою автоматичних повітряних вимикачів.....   | 38 |
| 4.4. Чутливість і селективність розчіплювачів автоматичних вимикачів.....                                | 39 |
| 4.5. Захист від однофазних КЗ на землю в чотирипровідній мережі з глухозаземленою нейтраллю .....        | 40 |
| 4.6. Вимоги до пристрою АВР та їх реалізація в мережах до 1кВ.....                                       | 41 |
| 5. СТРУМОВИЙ ЗАХИСТ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В МЕРЕЖАХ НАПРУГОЮ ВИЩЕ 1КВ .....                               | 43 |
| 5.1. Триступеневий струмовий захист і його основні органи .....  | 43 |
| 5.2. МСЗ при вмиканні вимірних органів на повні струми фаз .....   | 43 |
| 5.3. МСЗ нульової послідовності мереж з заземленою нейтраллю.....  | 45 |

|  |    |
|--|----|
| 5.4. Схема й оцінка МСЗ.....   | 46 |
| 5.5. Вибір параметрів струмової відсічки без витримки часу і з витримкою часу                                  | 48 |
| 5.6. Розширення зони захисту струмової відсічки .....  | 50 |
| 5.6.1. Неселективна відсічка .....   | 50 |
| 5.6.2. Комбінована відсічка за струмом і напругою .....  | 51 |
| 5.7. Характеристики струмових відсічок.....  | 53 |
| 5.8. Струмовий захист зі ступеневою характеристикою витримки часу .....  | 53 |
| 5.9. Схеми струмових захистів .....  | 54 |
| 5.10. Струмовий захист з залежною від рівня третьої гармоніки струму<br>витримки часу .....                    | 55 |
| 6. СПОСОБИ ВИКОНАННЯ, ОСНОВНІ ОРГАНИ, РОЗРАХУНОК<br>ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЇВ АВТОМАТИКИ .....                      | 57 |
| 6.1. Пристрої автоматичного введення резерву (АВР).....  | 57 |
| 6.2. Пристрій АПВ .....  | 59 |
| 6.3. Пристрій автоматичного частотного розвантаження .....   | 60 |
| 7. СТРУМОВІ НАПРАВЛЕНІ ЗАХИСТИ .....   | 61 |
| 7.1. Принцип дії і основні органи струмового направленого захисту .....  | 61 |
| 7.2. Вибір параметрів максимального струмового направленого захисту.....                                       | 62 |
| 7.3. Схеми вмикання реле напрямку потужності .....   | 63 |
| 7.4. Схеми і сфера використання максимального струмового направленого<br>захисту .....                         | 64 |
| 7.5. Струмові направлені відсічки без витримки часу і з витримкою часу.....                                    | 65 |
| 7.6. Струмовий направлений захист із ступінчатою характеристикою витримки<br>часу.....                         | 67 |
| 8. ДИСТАНЦІЙНИЙ ЗАХИСТ .....   | 68 |
| 8.1. Призначення, принцип дії, основні органи дистанційного захисту .....                                      | 68 |
| 8.2. Вибір параметрів спрацювання дистанційного захисту з триступеневою<br>характеристикою витримки часу ..... | 68 |
| 9. ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ ЗАХИСТ .....  | 71 |
| 9.1. Види і способи виконання захисту .....  | 71 |
| 9.2. Принцип дії поздовжнього диференційного захисту .....   | 72 |
| 9.3. Струм небалансу в реле з циркулюючими струмами.....   | 73 |
| 9.4. Способи підвищення чутливості.....  | 74 |
| 9.4.1. Вмикання реле струму через проміжний насичувальний трансформатор<br>струму .....                        | 74 |
| 9.4.2. Використання диференційного реле струму з гальмуванням.....   | 75 |
| 9.5. Поздовжній диференційний захист ліній і особливості його виконання .....                                  | 76 |
| 9.6. Оцінка поздовжнього диференційного захисту.....   | 77 |
| 9.7. Поперечний диференційний захист .....   | 77 |
| 9.8. Схема і сфера використання поперечних диференційних захистів .....  | 78 |
| 10. ЗАХИСТ МЕРЕЖ ВІД ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ В МЕРЕЖАХ З<br>ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ .....                              | 80 |
| 10.1. Короткі відомості .....  | 80 |
| 10.2. Розподіл струмів при замиканні на землю.....   | 80 |
| 10.3. Вимоги до захистів від замикань на землю .....   | 81 |
| 10.4. Пристрій загальної неселективної сигналізації .....  | 82 |

|   |    |
|---|----|
| 10.5. Струмові захисти нульової послідовності, які реагують на струми<br>усталеного режиму..... | 82 |
| 10.6. Захист ТН контролю ізоляції .....   | 85 |
| 10.7. Схема загальної неселективної сигналізації без використання ТН.....                       | 85 |

# **1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ І АВТОМАТИКУ**

## **1.1. Призначення пристроїв захисту і автоматики, їх складові елементи та функціональні частини**

Пристрої захисту призначені для запобігання розвитку аварій із зменшенням розмірів пошкоджень при КЗ з дією на вимкнення пошкодженого елемента. При вимкненні пошкодженого елемента захист діє на сигнал, найнебезпечнішими пошкодженнями є багатofазні КЗ з заземленою нейтраллю, міжвиткові КЗ

До особливих режимів відносяться однофазні замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю, перевантаження обладнання струмами зовнішніх КЗ, збільшення і зменшення напруги, зменшення частоти, режим коливання паралельно працюючих енергосистем ліній електромашин.

Пристрій АВР відновлює електропостачання при пошкодженні однієї з живлячих ліній. На ПЛ і змішаних ПЛ і КЛ встановлюється пристрій АПВ, що повторно вмикає лінію після самоліквідації пошкодження.

Відновлення частоти можна отримати шляхом вимкнення частини споживачів за допомогою пристроїв АЧР. Для підтримання напруги застосовується пристрій АРЗ синхронних машин, РПН для трансформаторів, а також автоматична зміна реактивної потужності, виробленої конденсаторними батареями.

Пристрої релейного захисту й автоматики складаються з окремих функціональних елементів пов'язаних між собою спільною схемою.

Кожен елемент перетворює вхідні сигнали, отримані від попереднього елемента, і передає їх наступному елементу. Елементи поєднують в функціональні частини. Розрізняють логічну і передавальну частини.

Елементи передавальної частини контролюють параметри СЕП (напругу, опори, частоту, кут зсуву).

Найпростіші вимірювальні органи релейної дії, а саме: вимірювальні реле струму КА; реле напруги KV; реле потужності KW; реле опору KZ.

Електричне реле – це апарат, який призначений проводити стрибкоподібні зміни в вихідному колі при заданих величинах (тобто коли реле спрацює).

Розрізняють максимальні і мінімальні вимірювальні реле, первинні і вторинні реле, прямої і непрямої дії. Первинні реле вмикаються безпосередньо в головне електричне коло (електромагнітний розчіплювач електромагнітного вимикача). Вторинні реле вмикаються через трансформатори струму або напруги (реле струму: РТ–40, РТ–80, РТ–90, РТВ, РТМ, реле напруги: РН–53, РН–54, РНВ, реле напряму потужності РБМ та інші). В реле прямої дії рухома система механічно пов'язана з вимикаючим пристроєм; до них відносяться РТВ, РТМ, РНВ. Реле непрямої дії керує колом електромагніта вимкнення вимикача через виконавчий елемент; до них відносяться РТ–40, РТ–80, РН–53, РН–54, РБМ тощо.

Сигнал на виході вимірювального реле з'являється, якщо вихідні сигнали задовольняють певні умови, тобто здійснюються порівнювання сигналів за амплітудою або за фазою.

Логічна частина має кілька логічних елементів, тому поява сигналу на виході залежить від комбінації вхідних сигналів, логічних операцій АБО, І, НІ, ЗАБОРОНА.

Логічна частина виконується на проміжних реле типу РП–13, РП–200, РП–300; реле часу РВМ–12, РВМ–13, РВ–100, РВ–200.

Виконавча частина — це відносно потужні електромагнітні реле і контактори, які вмикають електромагніти вимкнення і ввімкнення приводів вимикачів, магнітні підсилювачі. Для цього використовуються проміжні реле; до виконавчої частини відносяться пристрої світлової і звукової сигналізації вимірної прилади.

У разі необхідності передавати сигнал на значні віддалі використовують передавальну частину пристрою РЗА, основним елементом якого є канал зв'язку.

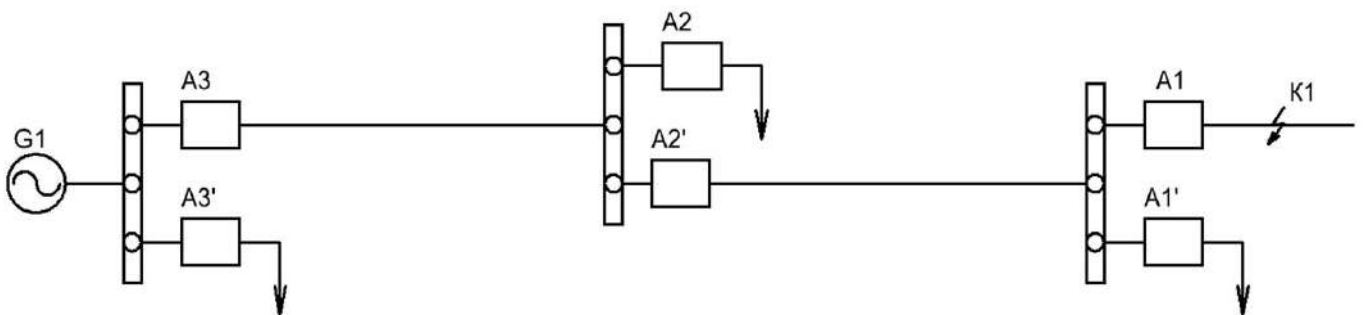
## **1.2. Основні вимоги до пристроїв РЗА**

З метою обмеження функціонування захист повинен задовольняти певні вимоги, а саме селективності, стійкості і т.д.

Під селективністю розуміють властивість релейного захисту, що діє на вимкнення, визначати пошкоджений елемент і вимикати лише його.

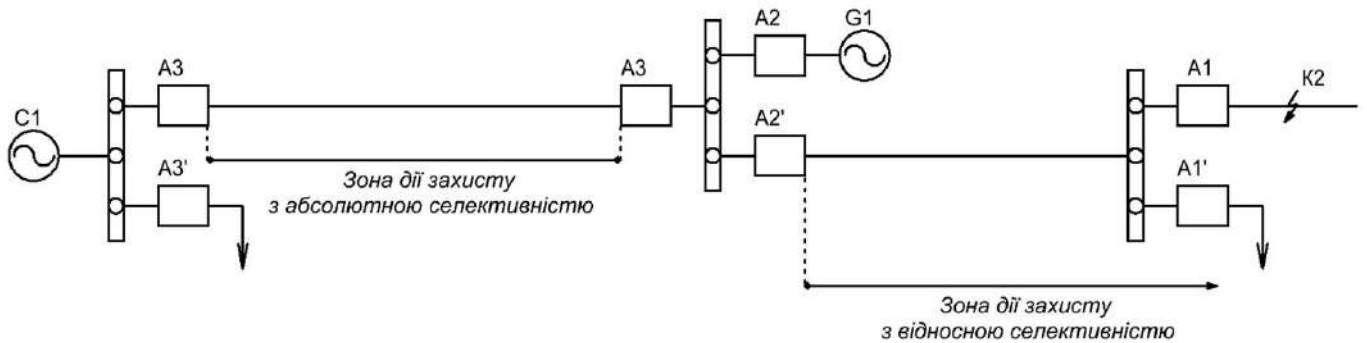
Для захисту, що діє на сигнал — це властивість однозначно діяти на режим і конкретно елементи системи електропостачання, що вимагають втручання персоналу.

Якщо захист спрацьовує лише при КЗ на елементі, що захищається, то він називається абсолютно селективним. Захист, який може спрацьовувати як резервний при пошкодженні на попередньому елементі, якщо це пошкодження не вимкнулось, називається захистом з абсолютною селективністю. До захистів з абсолютною селективністю відносяться струмовий, струмовий направлений дистанційний захист. Селективність спрацювання пристроїв захисту при виникненні КЗ характеризується її захистоздатністю (властивістю захищати весь елемент).





Внутрішнім КЗ називаються пошкодження в межах елемента, що захищається даним захистом. Зовнішнім КЗ називаються пошкодження на попередньому елементі.



Захист називається швидкодіючим, якщо його час спрацювання не перевищує 0,05 с.

Швидкодія при КЗ забезпечує зменшення ймовірності порушення синхронної роботи генераторів компенсаторів двигунів зменшення часу роботи при пониженій напрузі, зменшення руйнування ізоляції і струмопровідних частин, зменшення кількості нещасних випадків, поліпшення ефективності дії пристроїв АПВ і АВР.

Стійкість функціонування при КЗ характеризується чутливістю і стійкістю.

Під чутливістю захисту розуміється його властивість реагувати на можливі пошкодження в мінімальних режимах СЕП.

Чутливість оцінюють коефіцієнтом чутливості. Для максимального захисту коефіцієнт чутливості – це відношення мінімальної вхідної величини до встановленої величини параметру на захисті

$$K_{\text{ч}} = \frac{X_{\text{min}}}{X_{\text{с.з}}}$$

Коефіцієнт чутливості для мінімального захисту – це відношення величини параметру спрацювання захисту до максимальної вхідної величини

$$K_{\text{ч}} = \frac{X_{\text{с.з}}}{X_{\text{max}}}$$

Під надійністю розуміють властивість захисту виконувати задані функції в повному обсязі при певних умовах експлуатації. Захист не повинен працювати при нормальних режимах роботи.

### 1.3. Техніка безпеки при роботі з пристроями РЗА

При проведенні робіт в колах пристроїв РЗА всі вторинні обмотки трансформаторів напруги і трансформаторів струму слід постійно заземлювати. За необхідності розриву коло струму вимірювального реле, кола вторинної обмотки трансформатора струму попередньо закорочується на спеціально призначених для цього затискачах. Розривати кола ввімкненні до вторинної обмотки

трансформаторів струму забороняється. За необхідності розриву цих кіл, вони мають бути попередньо замкнуті перемичкою встановленою до передбачуваного місця розриву. Під час встановлення перемикачі слід застосовувати інструмент з ізоляційними ручками.

Під час роботи на трансформаторах струму або в колах, приєднаних до їх вторинних обмоток, слід виконувати такі заходи безпеки:

Затискачі вторинних обмоток мають бути замкнені на коротко до закінчення моменту вторинних кіл.

Після приєднання змонтованих кіл до трансформаторів струму, закоротку слід перенести на найближчу збірку затискачів і знімати лише після повного закінчення монтажу та перевірки обладнання, правильності приєднання змонтованих кіл.

Під час перевірки полярності до подання струму в первинну обмотку прилади і реле слід приєднати до вторинної обмотки.

Шини первинних обмоток забороняються використовувати як струмопровідні частини під час монтажних і зварювальних робіт. Робота в колах пристроїв РЗА проводиться за монтажними схемами слюсарно-монтажним інструментом з ізольованими ручками.

Під час перевірки кіл керування сигналізації і захисту за необхідності в приміщеннях електроустановок напругою понад 1 кВ дозволяється залишатись члену бригади з групою III для проведення робіт.

Під час робіт в колах трансформаторів напруги з поданням напруги від стороннього джерела необхідно зняти запобіжники з високої і низької напруги, а також від'єднати автоматичні вимикачі від вторинної обмотки.

У разі необхідності проведення будь-яких робіт в колах або на апаратурі РЗА при ввімкненому основному обладнанні слід вжити додаткових заходів для запобігання його випадковому виникненню. Забороняється проводити роботи на панелях або на місцях близьких до релейної апаратури, якщо при цьому може виникнути сильний струм релейної апаратури, що може спричинити помилкову дію реле. Будь-які роботи в колах РЗА проводять лише оперативні працівники. Перевірка пристроїв РЗА виконується за нарядом, які допускається видавати на почергове проведення однотипних робіт на кількох ПС або на одному чи кількох приєднаннях кожної ПС. Термін дії наряду – одна доба.

За розпорядженням в електроустановках до 1 кВ можна виконувати роботи з монтажу, перевірки, регулювання зняття для ремонту і встановлення пристроїв РЗА, які проводяться:

- у приміщеннях, де немає струмопровідних частин напругою понад 1 кВ;
- у приміщеннях струмопровідні частини напругою понад 1 кВ розташовують за постійними огороженнями, а також в релейних відсіках КРУ і КТП;
- у шафах релейного захисту відкритих РУ.

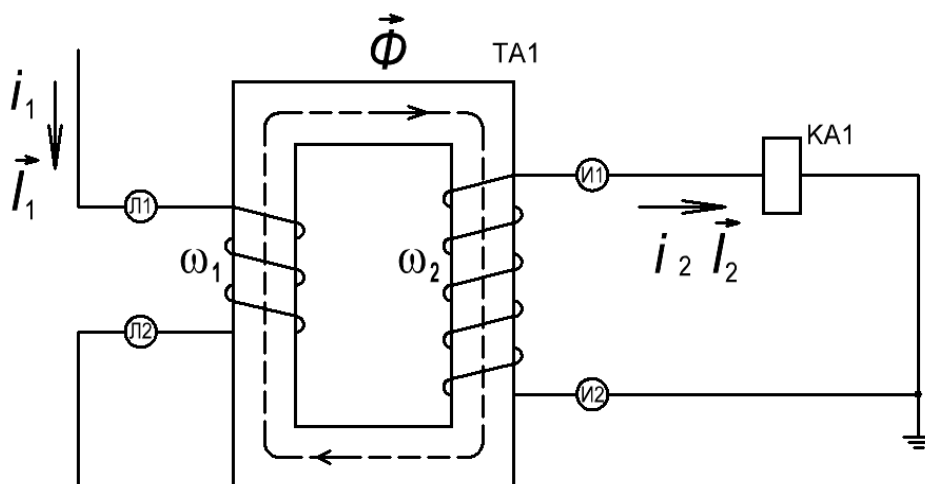
Такі роботи повинні проводитись не менше як 2-ма ремонтними працівниками, один з яких повинен мати групу IV, другий – III.

Одноосібно допускається проводити роботи оперативному працівнику з групою – IV.

## 2. ЕЛЕМЕНТИ ПРИСТРОЇВ РЗА

### 2.1. Первинні вимірювальні перетворювачі струму

Через первинний перетворювач струму проводиться струм до вимірювальних органів. Найпоширенішими є трансформатори струму (ТС), які забезпечують ізоляцію кіл струму вимірювальних органів від кіл високої напруги і дозволяють незалежно від первинного струму отримати вторинним струмом не більше 5 А.



Згідно з законом повного струму,

$$I_1 W_1 - I_2 W_2 = F_\mu.$$

Результуюча магніторушійна сила  $F_\mu$  визначається частиною первинного струму, яка називається струмом намагнічування.

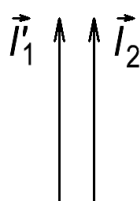
$$F_\mu = I_\mu \cdot W_1.$$

В ідеальному ТС

$$I_1 W_1 - I_2 W_2 = 0, \text{ тому}$$

$$I_2 = I_1 \frac{W_1}{W_2}$$

і тому вектори струму первинної і вторинної обмоток співпадають за фазою.

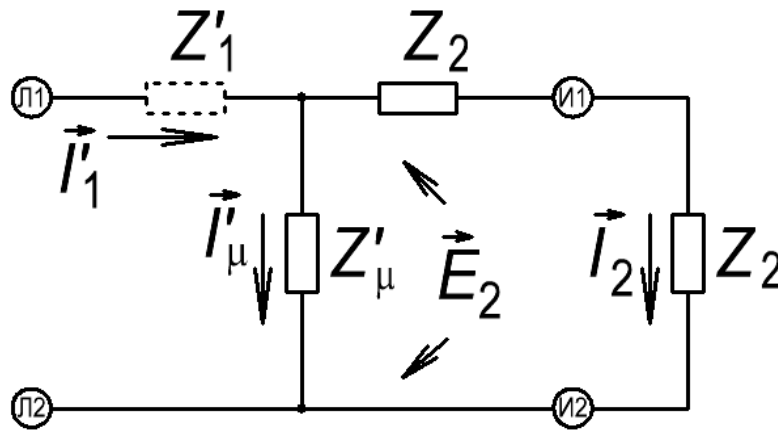


В реальних ТС:

$$I_1 W_1 - I_2 W_2 = I_\mu W_1,$$

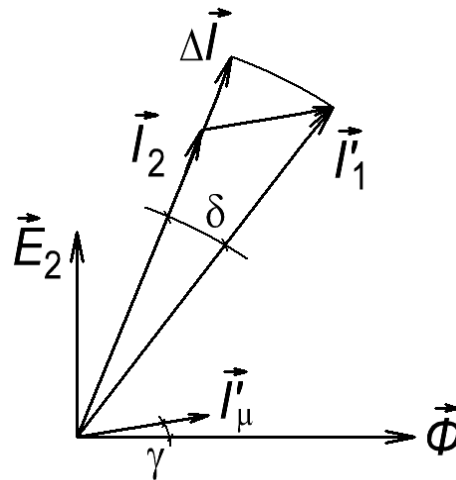
$$I_1 \frac{W_1}{W_2} - I_\mu \frac{W_1}{W_2} = I_1' - I_\mu'.$$

Опір обмотки не впливає на струмозподіл між вторинною обмоткою і намагнічування.



ТС характеризується такими похибками:

1. Струмовою похибкою  $f_i = \frac{I_2 - I'_1}{I'_1} * 100\%$ .
2. Кутовою похибкою  $\delta$ , тобто кутом зсуву, між векторами  $I'_1$  і  $I_2$ .
3. Повною похибкою  $\varepsilon$ , яка пропорційна струму намагнічування.



Для класу точності 5Р і 10Р повна похибка повинна бути менша відповідно 5%, 10% при заданому вторинному навантаженні і розрахунковій граничній кратності первинного струму.

Гранична кратність  $K_{10}$  – це найбільше відношення первинного струму ТС до його номінального струму при повній похибці менше 10%. ТС вибирають так, щоб повна похибка була менша 10% при заданому вторинному навантаженні і кратності первинного струму, яка відповідає умові спрацювання захисту.

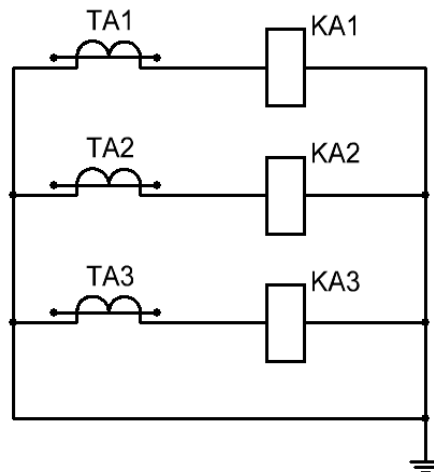
## 2.2. Схема з'єднань ТС

Живлення пристроїв РЗА струмом мережі здійснюється за типовими схемами з'єднання ТС і обмоток реле.

Схеми характеризуються відношенням струму в реле до вторинного струму, яке називається коефіцієнтом схеми

$$K_{cx} = \frac{I_p}{I_2}$$

## I. Схема повної зірки

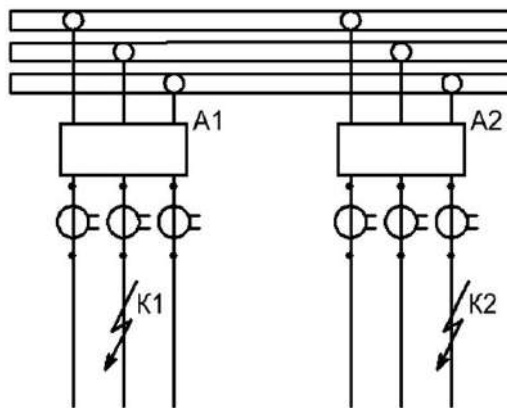


Властивості схеми:

При усіх видах КЗ струми пошкоджень проходять через усі або щонайменше 1 реле, тому захист, виконаний за такою схемою, реагує на усі види КЗ, має однакову чутливість при різних комбінаціях 2 фазних КЗ.

Струм в реле дорівнює вторинному струму, тому коефіцієнт схеми дорівнює 1.

При подвійних замиканнях на землю в мережах з ізолюваною нейтраллю, якщо замикання відбулося на різних лініях, то захисти з однаковими витратами часу обох ліній будуть діяти на їх вимкнення. Це є недоліком, оскільки достатньо вимкнути одну з ліній.

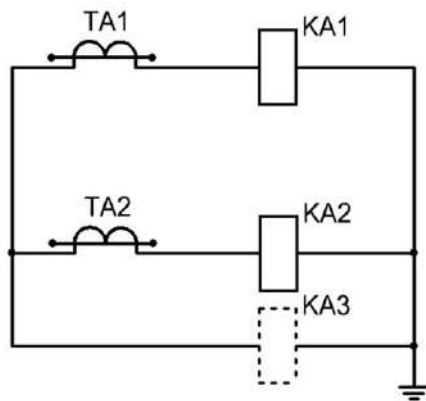


Струм в нульовому проводі дорівнює сумі фазних струмів, тому в нормальному режимі і при усіх багатофазних КЗ в ньому протікає струмом небалансу. В таких випадках обрив нульового проводу не впливає на роботу схеми. При пошкодженні на землю через нього створився шлях до протікання струму пошкодження. При обриві нульового проводу струм пошкодженої фази може замикатись лише через вторинні обмотки ТС непошкоджених фаз, які мають дуже великий опір для нього. Тому використання схеми повної зірки без нульового проводу не допускається.



## II. Схема неповної зірки

Звичайно для виконання цієї схеми виконуються ТС, встановлені у фазах А і С.



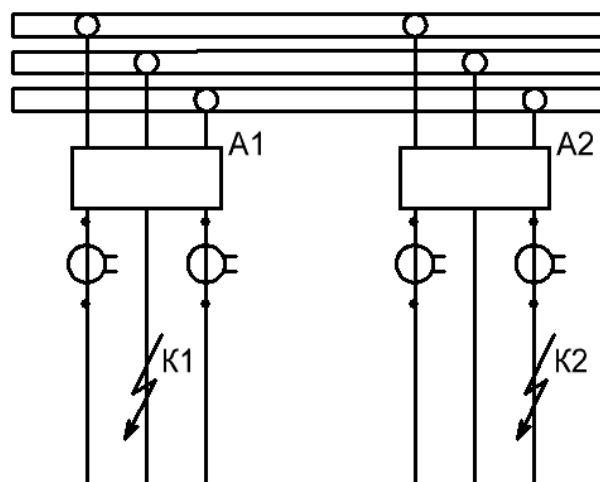
Властивості:

Схема реагує на усі види пошкоджень, крім одного фазного КЗ на землю тієї фази у якій немає ТС. Тому схема викликається лише для захистів від багатофазних КЗ

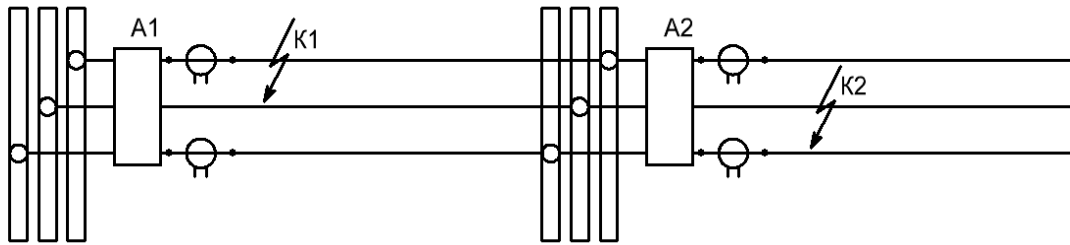
У симетричних режимах через реле проходять вторинні фазні струми, тому коефіцієнт схеми дорівнює 1.

Струм в зворотному проводі проходить не лише при пошкодженні на землю, але і в нормальному режимі, що забезпечує нормативну роботу захисту. Тому виконувати схему без зворотного проводу не допускається.

У мережах з ізолюваною нейтраллю при подвійних замиканнях на землю, коли точки пошкодження на різних лініях і одна точка на фазі В на вимкнення діє лише один захист, який ввімкнений на фазу з пошкодженням, тобто захист А1. Таким чином в двох третіх випадках подвійних замикань на землю вимикається лише одна пошкоджена лінія.

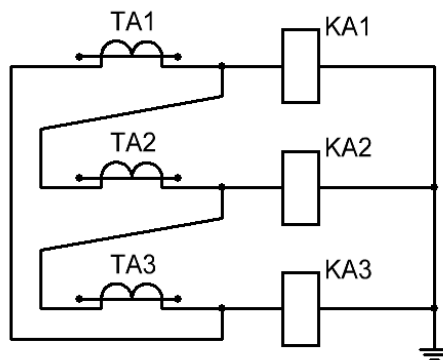


У мережах з ізолюваною нейтраллю при подвійних замиканнях на землю захист може діяти не ефективно. Якщо пошкодження виникли на суміжних ділянках і на попередній ділянці пошкоджена фаза без ТС, тобто в такому випадку подіє захист А1.



Чутливість захисту при 2-му КЗ між фазами А і В. З схемою з'єднань обмоток  $Y/\Delta$  або,  $\Delta/Y$  зменшується вдвічі порівняно з чутливістю схеми повної зірки. Якщо чутливість дворелейної схеми неповної зірки недостатньо, то в зворотній провід вимикається реле струму КА3. Така схема називається трифазною трирелейною схемою неповної зірки. Через реле КА3 проходить сума струмів фаз А і С. Чутливість такої схеми така сама як для схеми повної зірки.

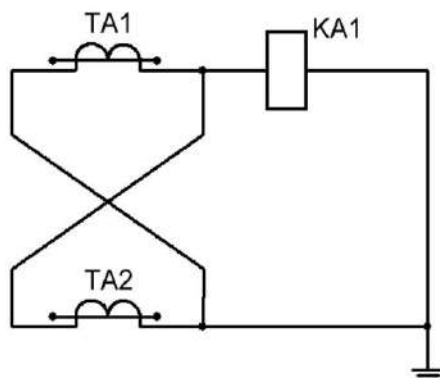
### III. Схема з'єднання ТС $\Delta$ , а реле струму $Y$



Властивості:

1. Струми в реле проходять при усіх видах КЗ тому захист, виконаний за такою схемою, реагує на усі види пошкоджень.
2. В електричних режимах коефіцієнт схеми дорівнює  $\sqrt{3}$ .
3. Струми нульової послідовності не виходять за межі  $\Delta$  трансформаторів струму, тому захист на них не реагує і при однофазному КЗ в реле потрапляють лише струми прямої і зворотної послідовності, тобто лише частина струму пошкоджень.
4. Відношення струму в реле до фазного струму залежить від виду КЗ. Тому від нього залежить і коефіцієнт чутливості.

### IV. Двофазна однорелейна схема



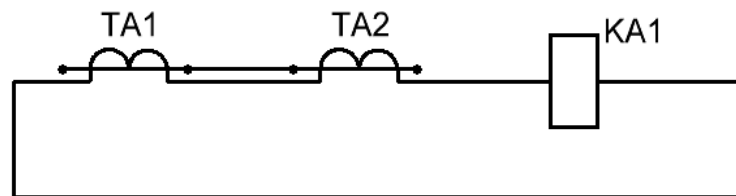
У реле проходить геометрична сума або різниця струмів фаз А і С, в яких встановлені ТС. Властивості схеми:

1. Схема захисту реагує на усі види КЗ, за винятком КЗ на землю фази, в якій немає ТС. Тому схема використовується лише при дії між фазних пошкоджень. Суттєвим недоліком схеми є те, що при двофазному КЗ за трансформатором з з'єднанням обмоток зірка трикутник захист не буде працювати, оскільки струм в фазах з ТС однакові за величиною.

2. В нормальному режимі і при трифазному КЗ коефіцієнт схеми рівний  $\sqrt{3}$ .

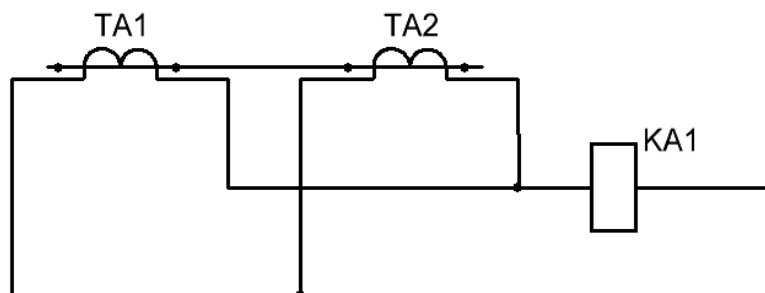
3. Відношення між струмом в реле і фазним струмом залежить від виду КЗ. Тому захист, виконаний за такою схемою, має різну чутливість при різних видах пошкоджень і при пошкодженні різних фаз. Захист має найменшу чутливість при двофазних КЗ між фазами А і В та В і С. В таких випадках його чутливість в  $\sqrt{3}$  разів менша, ніж чутливість захисту виконаного за схемою повної чи неповної зірки.

#### *V. Схема послідовного вмикання вторинних обмоток ТС*



При такому з'єднанні навантаження на кожен ТС зменшується вдвічі. В таку схему вмикаються малопотужні ТС вбудовані у виводи вимикачів і трансформаторів.

#### *VI. Схема паралельного вмикання вторинних обмоток ТС*



Коефіцієнт схеми залежить від схеми вмикання ТС. Коефіцієнт трансформації струму вдвічі менший, ніж коефіцієнт трансформації одного ТС. Схема паралельного вмикання використовується для отримання нестандартних коефіцієнтів трансформації.

### **2.3. Оцінка схем з'єднань ТС і сфери їх використання**

У мережах з малими струмами замикання на землю захист повинен вимикати пошкоджену ділянку на землю при багатофазних КЗ і подвійних замиканнях на землю.

Тому захист таких мереж можна виконувати за схемою неповної зірки або двофазною однорелейною. Обидві схеми при подвійних замиканнях на землю можуть діяти неселективно. Захист, виконаний за схемою повної зірки, може вимикати при такому пошкодженні обидва місця КЗ, що не бажано. Тому ця схема в мережах з ізольованою нейтраллю не має переваг порівняно з іншими схемами.

Краще схема неповної зірки, яка реагує на всі пошкодження за трансформатором зі з'єднанням обмоток зірка/трикутник і чутливіша до двофазних КЗ. Захист, виконаний двофазним однорелейним, використовується для максимального струмового захисту в мережах до 10 кВ з трансформаторами, які мають схему з'єднань зірка, або зірка із заземленою нейтраллю, для захисту електроустановок споживачів або якщо резервування не забезпечується за чутливістю іншими схемами.

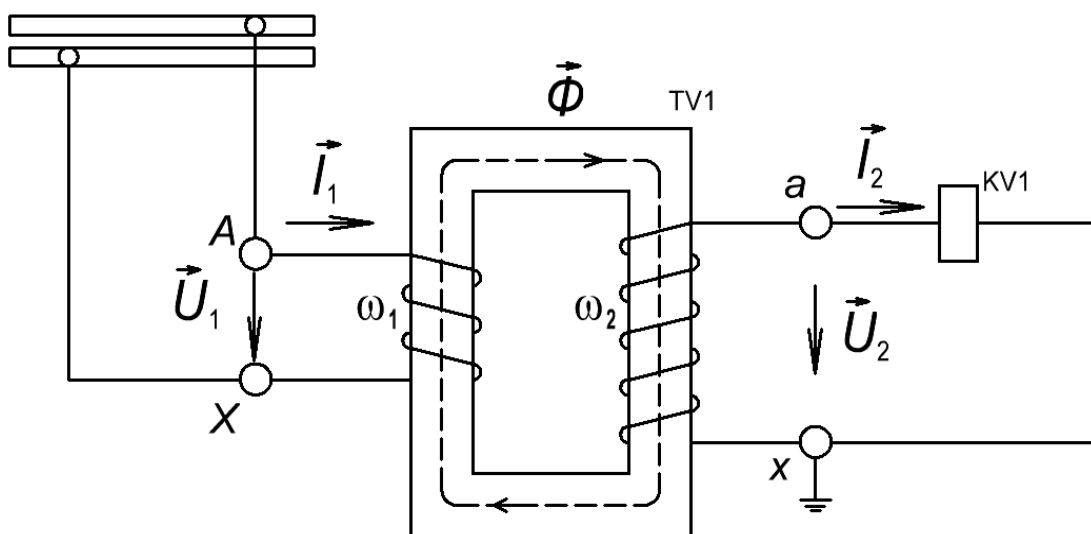
У мережах з великими струмами замикання на землю захист повинен діяти на вимкнення елемента, що захищається при усіх видах КЗ. Такий захист може виконуватися двома способами:

1. За схемою повної зірки.
2. У вигляді двох комплектів:
  - а) від багатофазних КЗ;
  - б) від КЗ на землю.

Схема повної зірки може використовуватися лише за наявності трьох ТС, вбудованих у втулки вимикачів на перших захистах мережі найвіддаленіших від джерела живлення для кращої ліквідації подвійних КЗ на землю.

Схема повного трикутника використовується лише на понижувальних трансформаторах з глухо заземленою нейтраллю для запобігання надлишкового спрацювання струмових захистів під впливом струму нульової послідовності.

#### 2.4. Первинні перетворювачі напруги



Найпоширенішими первинними перетворювачами напруги є трансформатори напруги (ТН), які забезпечують ізоляцію вимірювальних органів

від високої напруги і подають стандартну номінальну напругу вторинної обмотки 100В незалежно від первинної. Коефіцієнт трансформації:  $K_U = \frac{W_1}{W_2}$ .

У режимі х.х. коли  $I_2=0$  коефіцієнт трансформації рівний:

$$K_U = \frac{U_1}{U_2}.$$

При вмиканні навантаження до вторинної обмотки з'являється струм  $I_2$ , який викликає втрату напруги  $\Delta U$  у вторинній обмотці. Тому дійсна напруга на виводах вторинної обмотки рівна  $U_2 = U_1 - \Delta U$ .

ТН характеризується такими похибками:

1. Напругова похибка:  $f_U = \frac{K_U U_2 - U_1}{U_1}$ .

2. Кутова похибка.

Із збільшенням навантаження збільшуються втрати напруги  $\Delta U$  і похибки. Тому нормальний режим ТН близький до хх.

При вмиканні первинних обмоток ТН на фазні напруги початки обмоток вмикаються до фаз, кінці об'єднуються в зірку, нульова точка заземлюється. Це потрібне для того, щоб при однофазному КЗ на землю і замиканні на землю мережі де встановлюється ТН, реле правильно вимірювало напругу фаз відносно землі. Вторинна обмотки ТН заземлюються незалежно від схеми їх з'єднань. Заземлення приєднується до кінця обмоток. Таке заземлення є захисним і гарантує безпеку персоналу при порушенні ізоляції первинних і вторинних обмоток. Крім заземлення нульової точки зірки може заземлятися один з кінців вторинної обмотки, як правило фази В. Фаза заземляється при використанні ТН для синхронізації і за необхідності переведення навантаження з одного ТН на інший, коли одну фазу кількох ТН об'єднують. Заземлення виконується якомога ближче до ТН. Але найчастіше воно встановлюється в одній точці (наприклад, на спільній шинці фази В) кількох ТН. В заземлюючих проводах комутаційно-захисна апаратура не встановлюється.

## **2.5. Захист кіл ТН**

Первинні обмотки ТН до 35кВ вмикаються до мережі через високовольтні запобіжники й обмежуючі опори. Запобіжники повинні швидко вимикати пошкоджені ТН від мережі. Опори встановлюються для зменшення струмів КЗ, якщо вимикаюча здатність запобіжників недостатня. Якщо виникнення КЗ в колі первинної обмотки малоймовірне, або наслідки такого КЗ не спричиняють порушення електропостачання споживачів, то запобіжники на стороні високої напруги можна не встановлювати.

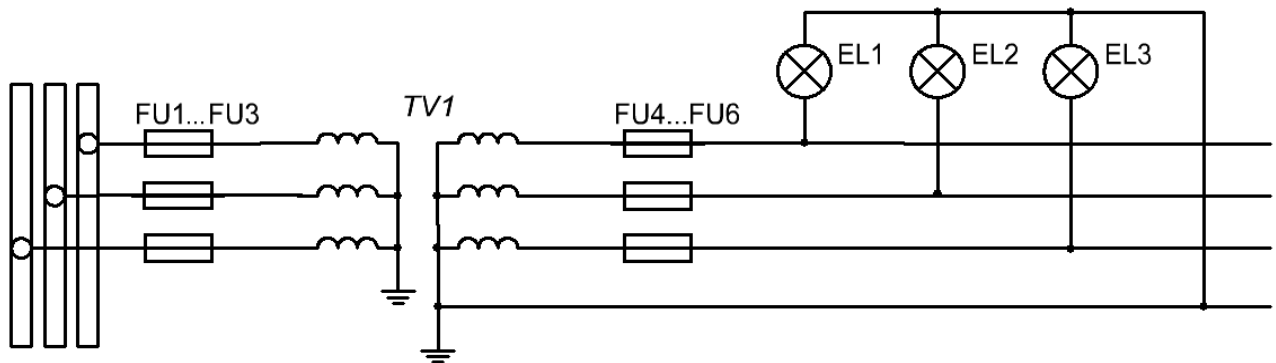
Для захисту ТН від тривалого протікання струму КЗ при пошкодженні у вторинних колах на виводи ТН встановлюються запобіжники або автоматичні вимикачі. Запобіжники встановлюються лише в колах тих ТН, які не живлять швидкодіючі захисти, що можуть неправильно спрацювати при порушенні цих кіл. Захисні пристрої вмикаються в усі не заземлені проводи вторинних обмоток,



крім кіл напруги нульової послідовності ТН, які працюють в мережах з заземленою нейтраллю.

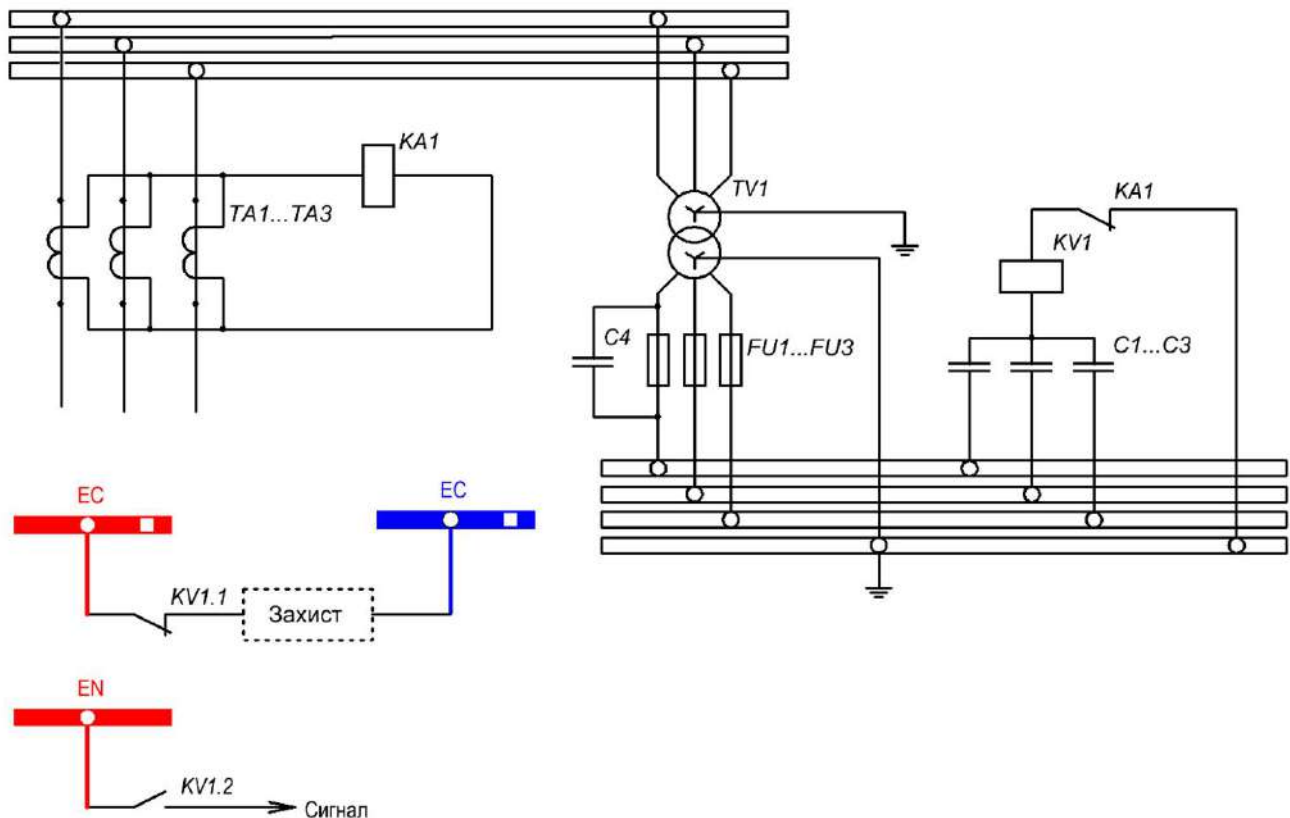
Вторинні обмотки двообмоткових ТН і з'єднані зіркою основні обмотки триобмоткових ТН захищаються триполюсними автоматичними вимикачами з комбінованими розчіплювачами. Обмотки вторинної напруги, які з'єднані в розімкнений трикутник, захищаються однополюсними автоматичними вимикачами з комбінованими розчіплювачами.

Зникнення напруги від ТН при перегорянні запобіжників, спрацювання автоматичних вимикачів, несправності допоміжних контактів сприймається РЗ як зменшення напруги при КЗ в захисній зоні і спричиняє його неправильну дію. Тому захисти, які реагують на зменшення напруги, обладнуються спеціальним блокуванням. Якщо такі порушення безпосередньо не спричиняють хибної роботи захисту, тоді встановлюється пристрій, що сигналізує про зникнення напруги. Сигналізація у схемах зі з'єднанням обмоток зіркою і відкритим трикутником може виконуватися лампами або мінімальним реле напруги. Такі пристрої можуть спрацювати і при КЗ в мережі.

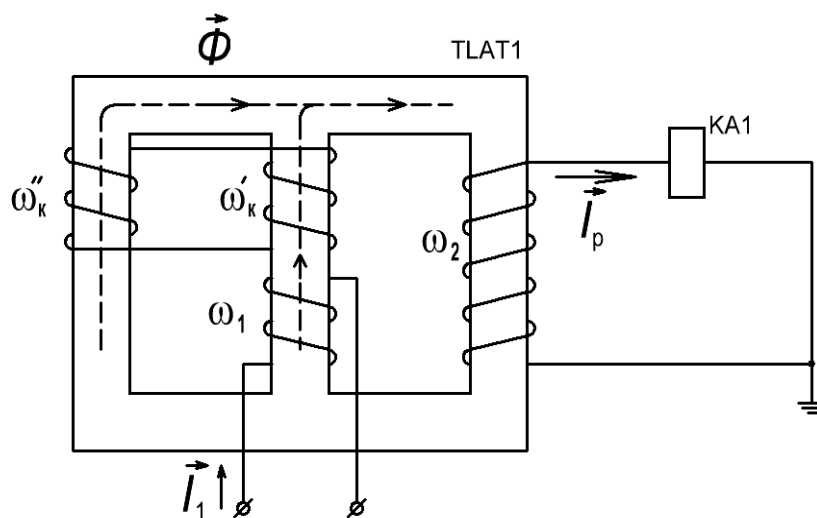


У схемах зі з'єднанням обмоток зіркою за замкненою нульовою точкою використовується вмикання реле KV через конденсатори C1, C2, C3. В нормальному режимі сума фазних напруг рівна нулю. Тоді напруга нульових точок конденсаторів і вторинної обмотки ТН також рівна нулю. Тому струм в обмотці KV відсутній. При перегорянні одного або двох запобіжників напруга нульової точки зірки конденсаторів рівна сумі напруг непошкоджених фаз, а напруга нульової точки зірки вторинної обмотки ТН залишається рівна нулю. Тоді через реле KV пройде струм, воно спрацює і контактом KV.1 зніме напругу з комплексу живлення захисту.

При КЗ на землю симетрія фазних напруг порушується, блокування може спрацювати і виведе захист з дії. Для запобігання неправильної дії встановлене реле струму КА, яке розмикає коло обмотки KV, запобігаючи його спрацюванню. На такому принципі побудоване блокування типу КРБ-12. Такі пристрої не будуть працювати при перегорянні запобіжників в усіх трьох фазах або при обриві нульового проводу. Для створення блокування вмикається конденсатор C4, який забезпечує підведення напруги до реле KV.



## 2.6. Насичувальні ТС (НТС)



НТС використовуються в диференційному струмовому захисті. При зовнішньому КЗ і при вмиканні елементів цей захист не повинен діяти, що досягається використанням НТС. Такий трансформатор має тристержневе феромагнітне осердя. При синусоїдному струмі він працює як звичайний ТС. Аперіодична складова, яка виникає при зовнішньому КЗ, вмиканні елемента, що захищається, насичує магнітопровід. Обмотки  $\omega'_k$  і  $\omega''_k$  з'єднані так, що магнітні потоки лівого і середнього стержня сумуються, підсилюючи дію аперіодичної складової. Тому частина струму робочої обмотки  $\omega_{роб}$  попадає в обмотку  $\omega_2$  шляхом подвійної трансформації. Тобто, аперіодична складова погіршує

трансформацію періодичної складової. В результаті подвійної трансформації струм  $I_2$  стає досить малим і реле КА при такому струмі не спрацює.

Змінювати характеристику НТС можна, використовуючи струм керування, для чого передбачається обмотка керування, вона ще називається гальмівною і такий НТС називається ТС з магнітним гальмуванням. При збільшенні струму керування збільшується ступінь намагнічування магнітопроводу і для отримання одного і того ж вторинного струму, при якому реле КА спрацює, необхідно збільшувати струм  $I_{роб}$ . На основі НТС побудовані диференційні реле серії РНТ, а на основі ТС з магнітним гальмуванням реле серії ДЗТ.

## **2.7. Трансреактори (ТР)**

Останнім часом з переходом на інтегральну мікроелектронну базу, вхідний опір вимірних органів яких досить великий, використовується ТР (позначаються ТАВ) замість ТС. ТР – це вимірювальний перетворювач, в якому вимірна інформація про первинний струм представляється за допомогою вторинної напруги. Коефіцієнт трансформації рівний  $K_{I,U}=I_1/U_2$ .

Опір навантаження вибирається так, що ТР працюють в режимі близькому до х.х. Тому коефіцієнт трансформації більше залежить від опору магнітопроводу, ніж в ТС. Для зменшення похибок трансформації магнітопровід виконується з великими проміжками. В зв'язку зі складністю виготовлення магнітопроводів з однаковими магнітними характеристиками первинні магнітні ТР не набули великого поширення.

Для приєднання 6–10кВ розроблені ТР з феритовими магнітопроводами. Різновидом ТР є магнітні вимірні перетворювачі, в яких кожне навантаження приєднується до окремого вимірного перетворювача струму. Цей пристрій має обмотку, яка індуктивно зв'язана з проводом, струм в якому необхідно виміряти. Електрорушійна сила кожної фази залежить від струму усіх трьох фаз. Такі перетворювачі використовуються на ПС 110кВ, виконаних за спрощеною схемою.

## **2.8. Фільтри симетричних складових**

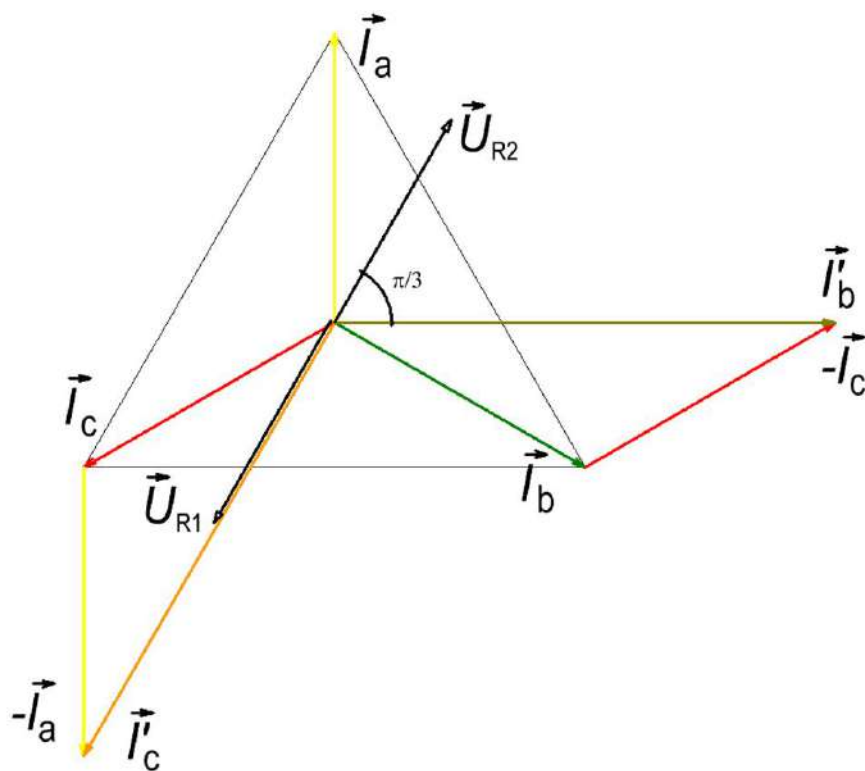
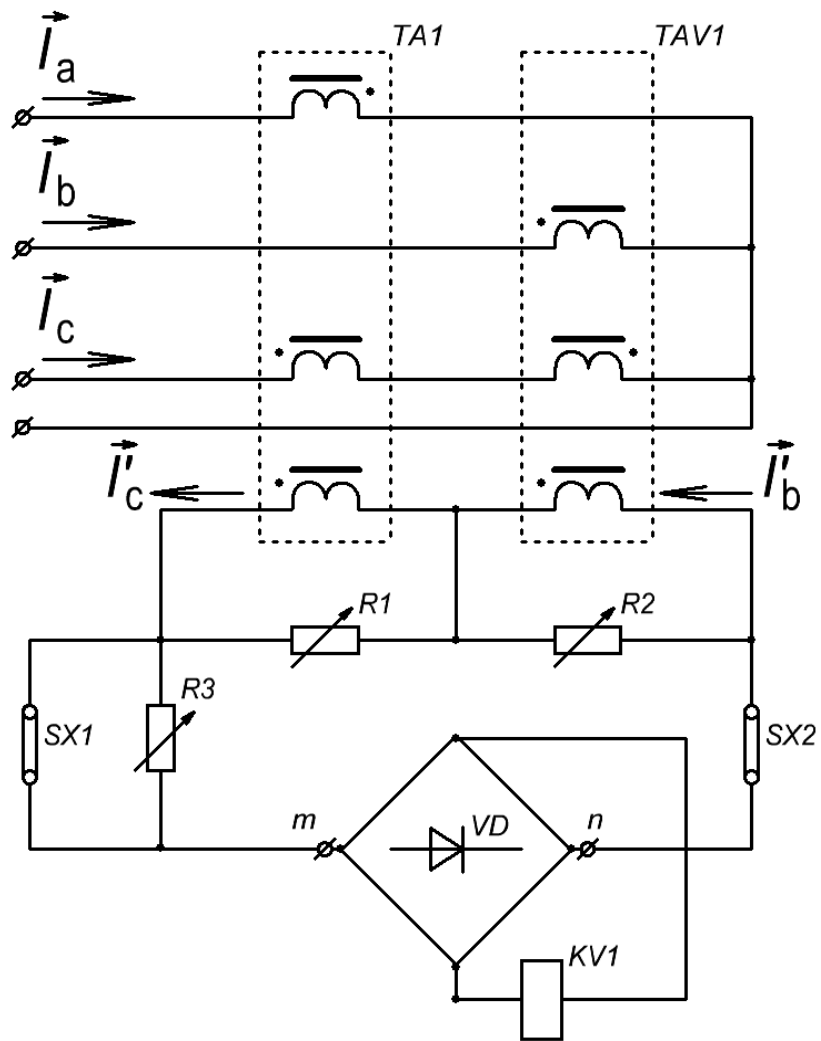
Фільтри симетричних складових струму і напруги виділяють струм або напругу прямої, зворотної або нульової послідовності при порушенні симетричного режиму трифазної системи.

### **2.8.1. Фільтр струму зворотної послідовності**

Фільтр струму зворотної послідовності типу РТФ–1М складається з трансформатора струму ТА і трансреактора ТАВ, кожний з яких має по дві первинні обмотки, ввімкнені для конденсації струмів зворотної послідовності на різницю струмів двох фаз. Напруга на реостаті R1 рівна:

$$U_{R1}=K1I_C R1=K1(I_C-I_A)R1$$

і співпадає з вектором струму  $I_C$ .



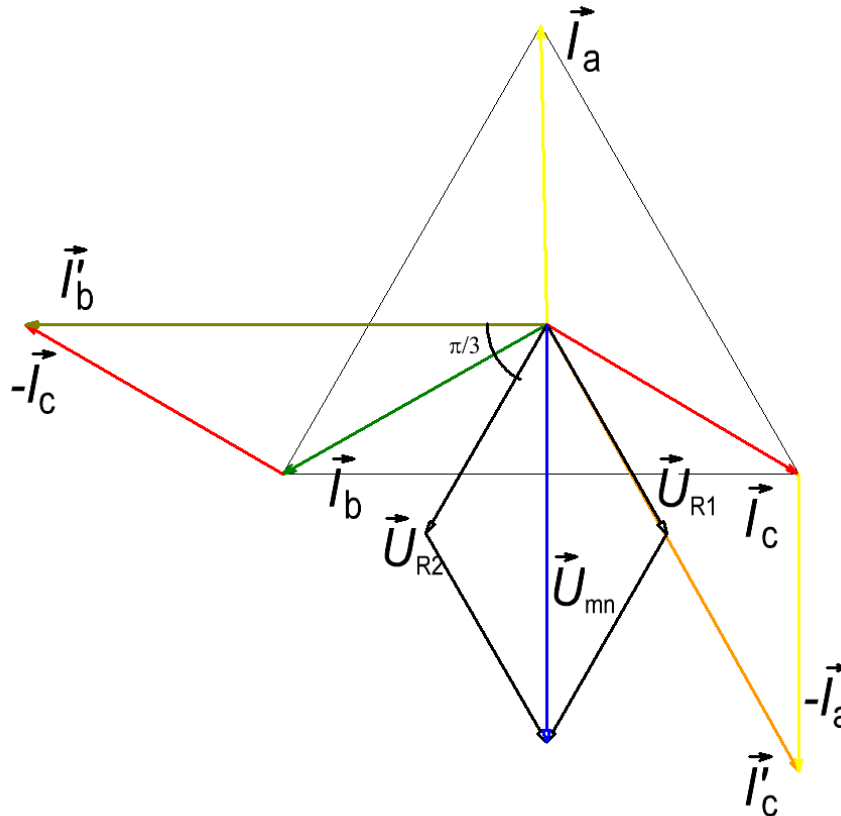
Напряга на реостаті  $R2$  випереджує  $I'_b$  на  $60^\circ$ :

$$U_{R2} = K_{I,U} \cdot I'_B \cdot R2 \cdot e^{-j\pi/3} = K_{I,U} \cdot (I_B - I_c) \cdot R2 \cdot e^{-j\pi/3}.$$

При поданні на фільтр струму прямої послідовності струм на виході  $m-n$  відсутній за умови, якщо:

$$\frac{W_{1TA}}{W_{2TA}} R1 = 0,5 \frac{W_{1TAV}}{W_{2TAV}} R2 \cdot$$

При поданні струму зворотної послідовності сума напруг на реостатах  $R1$  і  $R2$  рівна  $E_{mn}$ , яка пропорційна струму зворотної послідовності.



### 2.8.2. Фільтри струму нульової послідовності

Для виділення струму нульової послідовності використовують сумування фазних струмів.

Струми можна додавати, якщо вторинні обмотки ТС з'єднати паралельно однойменними виводами, а до точок з'єднання під'єднати реле КА. Такий фільтр називається тритрансформаторним первинним фільтром струму нульової послідовності. Для нього струм реле рівний сумі вторинних струмів ТС.

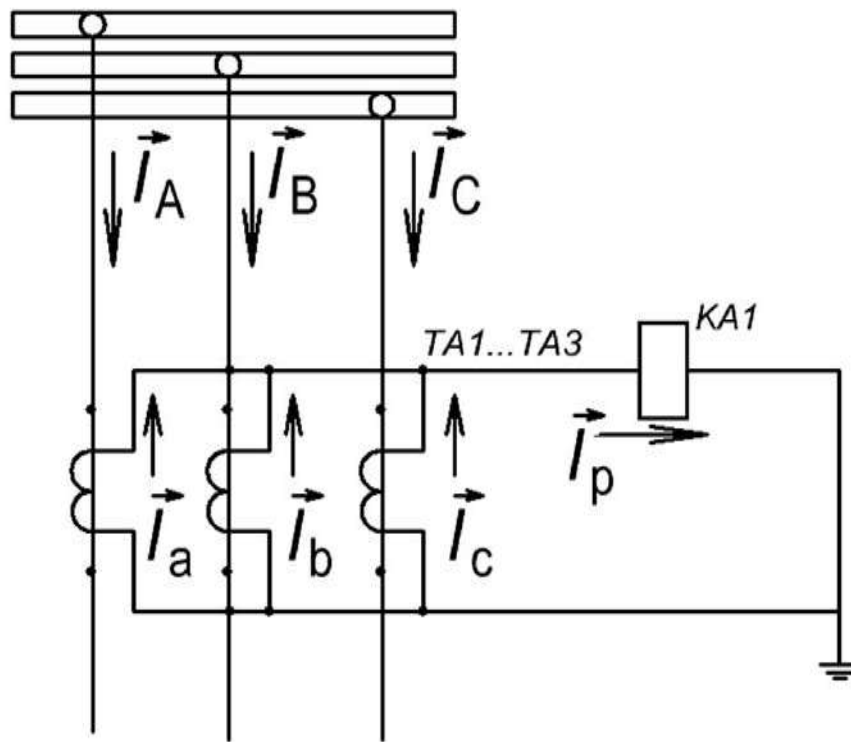
$$I_P = I_a + I_b + I_c.$$

$$\text{У реальних ТС } I_P = (I_a + I_b + I_c) 1/K_I - (I_{a\mu} + I_{b\mu} + I_{c\mu}) * 1/K_I = 3I_0/K_I - I_{HВ}$$

Струм нульової послідовності з'являється при пошкодженні на землю. В інших режимах коли він відсутній, через реле проходить лише струм небалансу, який збільшується із збільшенням первинного струму та появи в ньому аперіодичної складової. Такий фільтр використовується для захисту елементів мереж з глухозаземленою нейтраллю. В мережах з ізольованою нейтраллю застосовується однострансформаторний первинний фільтр – вимірний ТС нульової послідовності, який складається з тороподібного магнітопровода на якому розташовано вторинна обмотка. Трифазний кабель є первинною обмоткою. При

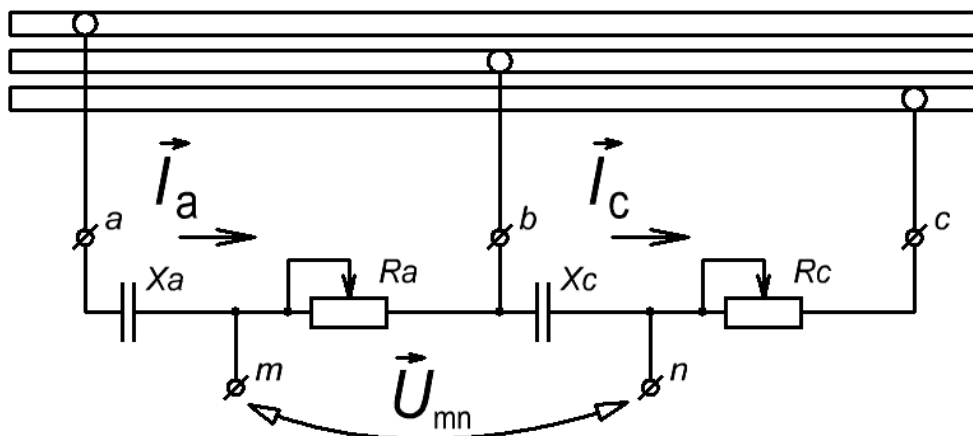


замиканні на землю еквівалентний первинний струм визначається струмами нульової послідовності. Він обумовлює в магнітопроводі потік, який наводить електрорушійну силу у вторинній обмотці і викликає струм в реле. В інших режимах сума фазних струмів рівна нулю.



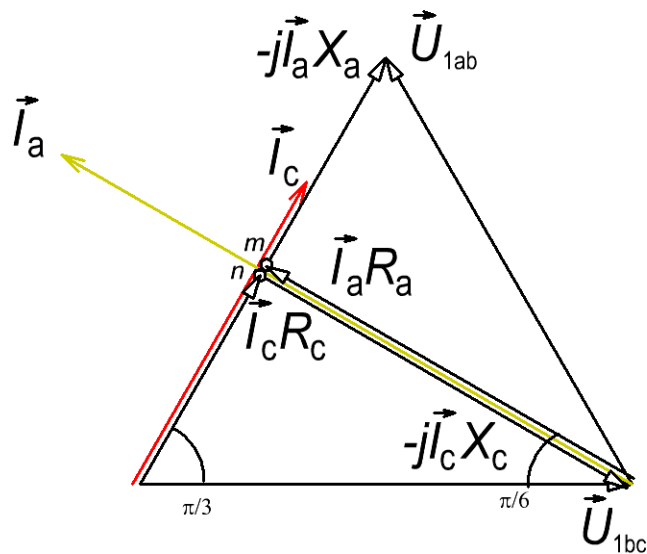
Суттєвою різницею між цими фільтрами є те, що струм небалансу ТС нульової послідовності визначається лише несиметрією розташування проводів фаз кабелю відносно магнітопровода і вторинної обмотки. Тому він значно менший і не перевищує 8–10мА. Для збільшення чутливості захисту замикань на землю ТС нульової послідовності виконують з підмагніченням.

### 2.8.3. Фільтри напруги зворотної послідовності



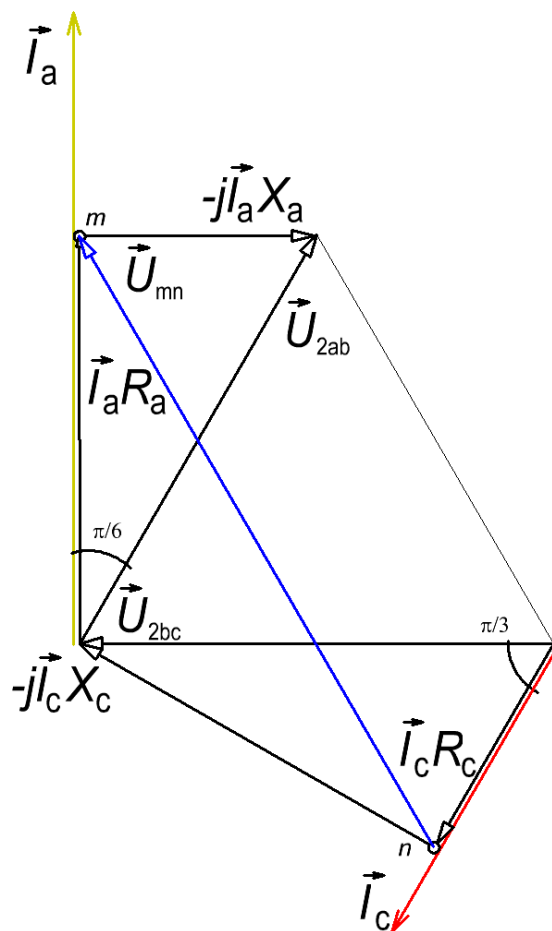
Міжфазні напруги не мають складових нульової послідовності, тому фільтр виконується на лінійні напруги.

Опори  $R_a$ ,  $X_a$ ,  $R_c$ ,  $X_c$  вибираються так, щоб у разі відсутності на вході фільтра напруги зворотної послідовності, напруга на виході  $U_{mn}=0$ . Ці опори вибираються з умови віддачі максимальної потужності.



У разі появи на вході фільтри напруги зворотної послідовності, на виході з'являється напруга пропорційна напрузі зворотної послідовності:

$$U_{mn}=1,5U_{ab}2e^{-j\pi/6}.$$

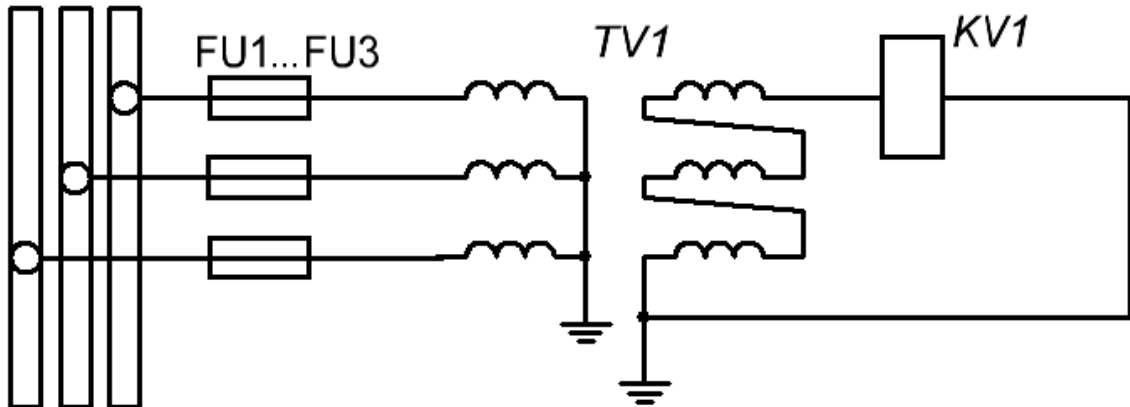


Напруга небалансу визначається похибкою в роботі фільтра і наявністю деякої несиметрії системи вхідних напруг. Похибка збільшується при відхиленні частоти до номінальної величини. При цьому змінюється опір на конденсаторі і

порушується відношення між активними і реактивними опорами. На такому принципі побудовано фільтр – реле РНФ–1М.

Якщо поміняти місцями входні затискачі, то можна отримати фільтр напруги прямої послідовності. Порушивши вказані співвідношення між активними і реактивними опорами можна отримати комбінований фільтр, який одночасно виділяє пряму і зворотну послідовність.

#### 2.8.4. Фільтр напруги нульової послідовності



Для отримання напруги нульової послідовності використовуються однофазні (в мережах понад 35 кВ) і трифазні 5–стержневі (в мережах до 35 кВ) ТН. Для отримання напруги нульової послідовності обмотки ТН з'єднують у схему

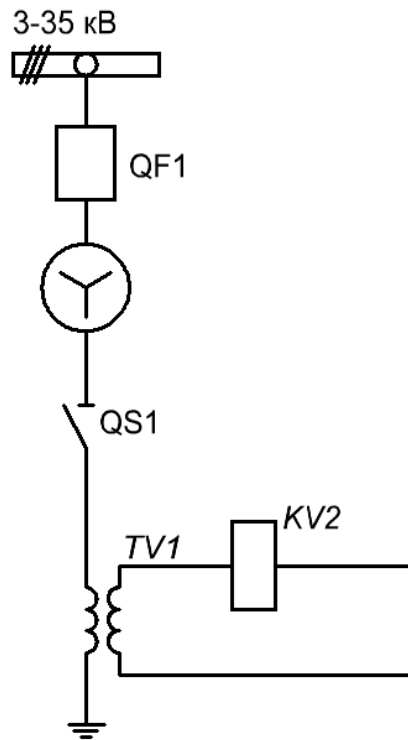
У разі появи напруги нульової послідовності напруга на реле рівна:

$$U_p = U_a + U_b + U_c = 3U_0 / K_U.$$

Напруга небалансу обумовлена вищими гармоніками і неоднаковою провідністю фаз системи відносно землі. Напругу нульової послідовності можна отримати, безпосередньо заземливши нейтраль системи через однофазний ТН.

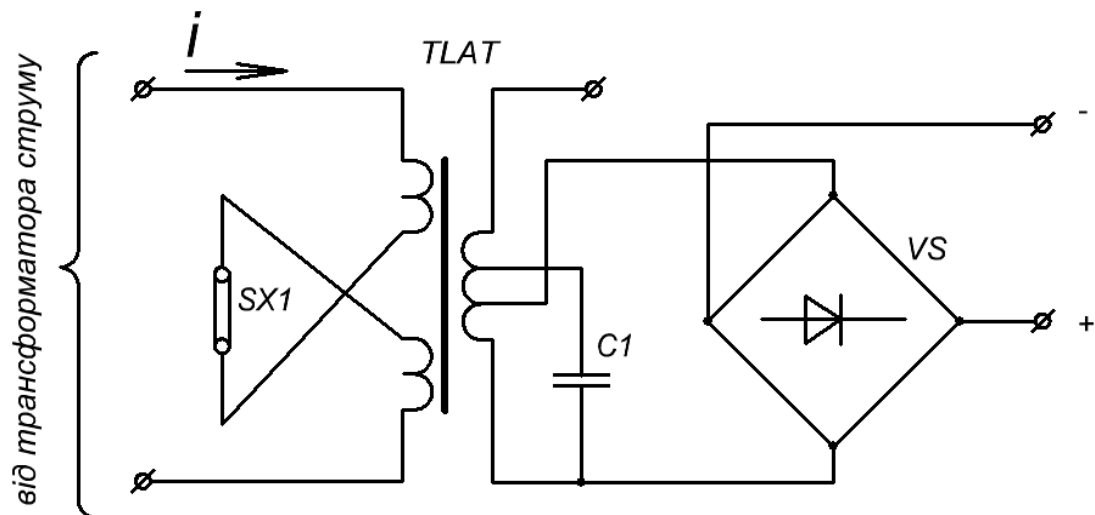
При замиканні на землю нейтраль зміщується на деяку величину  $U_p = U_0 / K_U$ .

Така схема інколи використовується в мережах до 10 кВ. Вторинні фільтри нульової послідовності виконуються за допомогою з'єднання резисторів або конденсаторів зіркою і приєднання їх до вторинної обмотки первинного ТН. Крім того, може використовуватись проміжний ТН зі схемою з'єднань обмоток зірка/трикутник.

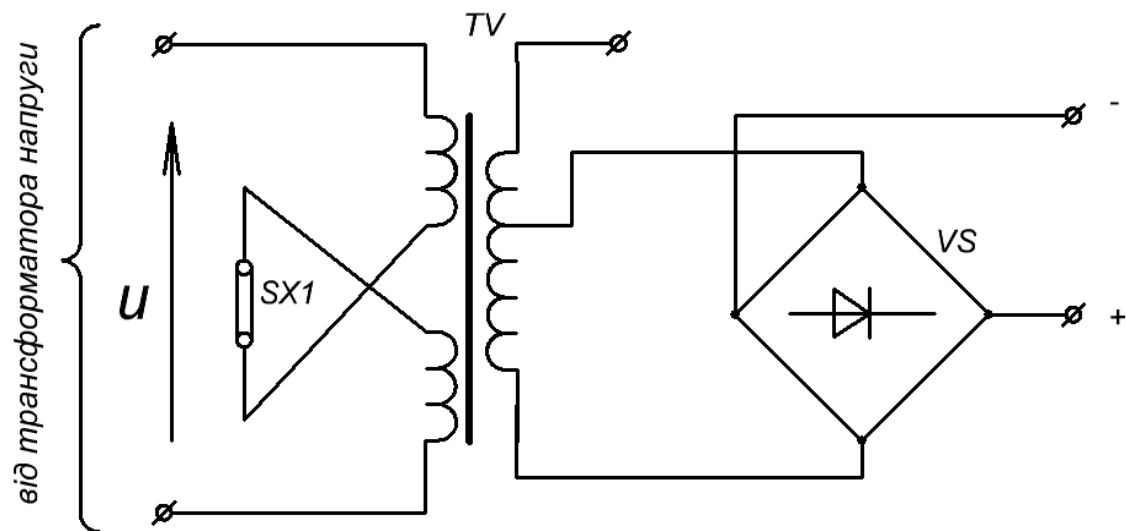


## 2.9. Блоки живлення

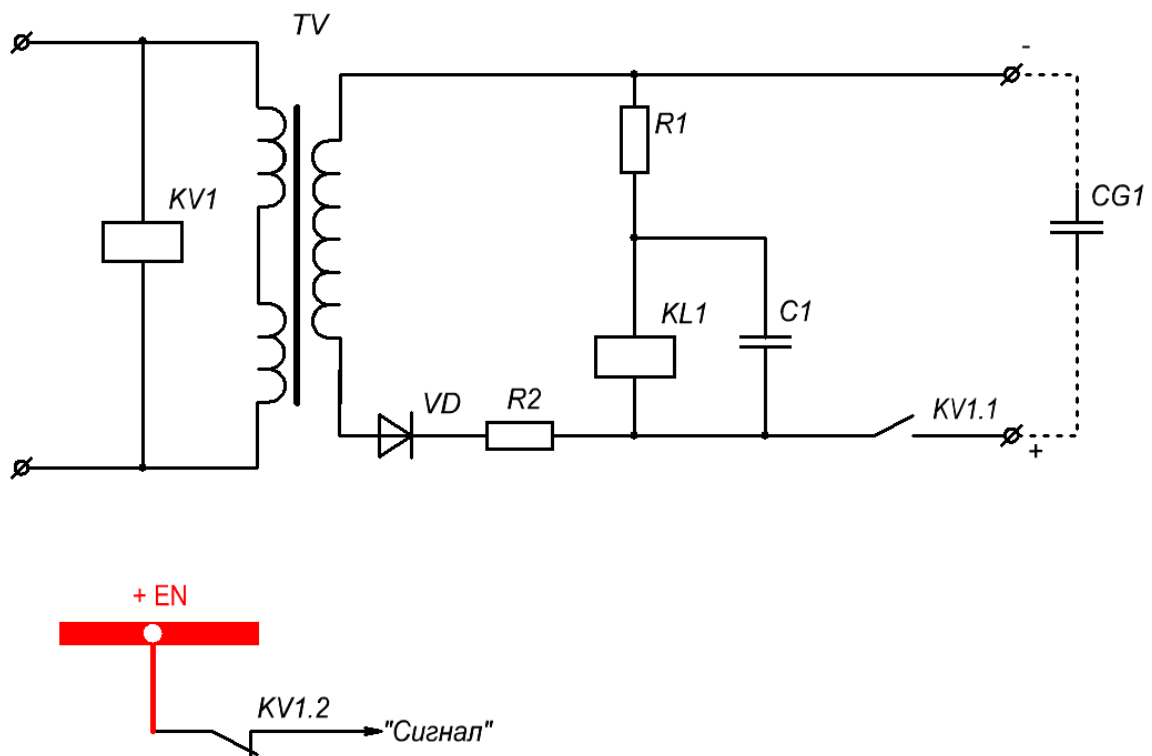
Блоки живлення призначені для забезпечення оперативним виправленим струмом пристроїв РЗА. Вони вмикаються до первинних ТС або ТН і до трансформаторів власних потреб.



Блоки живлення мають проміжний насичувальний ТС і двопівперіодний випрямляч. Насичувальний ТС забезпечує досить стабільну напругу на виході блока живлення при зміні первинного струму в широких межах. Конденсатор  $C_1$  забезпечують з колом намагнічувального трансформатора ферорезонансну стабілізацію напруги на виході блока. За такою схемою побудовані блоки живлення струму (БПТ) і блоки живлення напруги (БПН).



Як короточасні джерела оперативного струму використовуються конденсаторні батареї заряджені в нормальному режимі роботи за допомогою зарядних пристроїв (на схемі пунктиром).



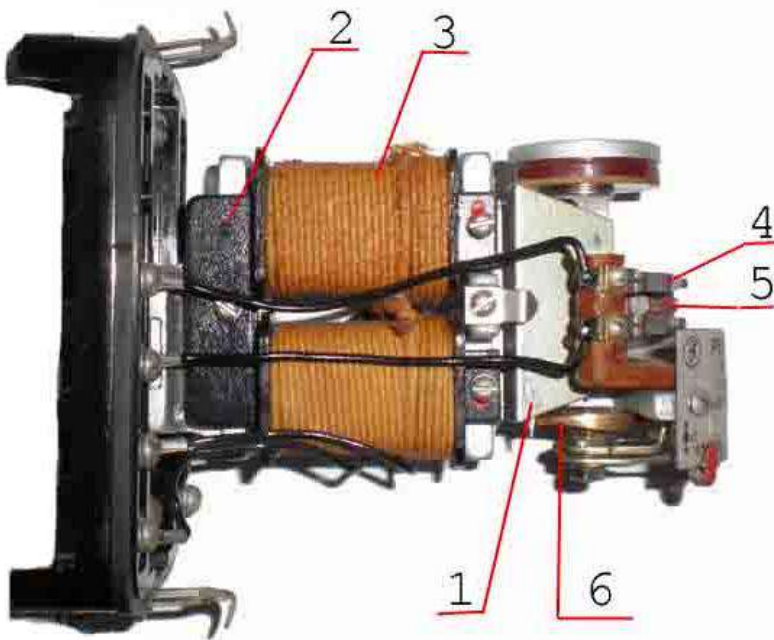
Для сповільнення розряду конденсатора  $C_2$  вмикається резистор  $R$ , діод  $VD$  не допускає розряду конденсатора при зниженні струму на вході блока. За такою схемою побудовані блоки живлення і заряду типу БПЗ.

### 3. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ ПРИСТРОЇВ РЗА

#### 3.1. Загальні відомості про електромеханічні системи

До електромеханічних реле відносяться електромагнітні, індукційні і магнітоелектричні реле. За призначенням вони поділяються на вимірні і логічні. Під електромеханічними реле розуміють електричне реле, робота якого ґрунтується на використанні відносного переміщення його механічних елементів під дією струму, що проходить через його обмотку. Реле логічної частини (проміжні і реле часу) виконуються електромагнітними. Магнітоелектричні реле виконуються як реагуючі елементи схем порівняння.

#### 3.2. Використання електромагнітного принципу для виконання реле



Для побудови електромагнітного реле використовуються системи з поворотним якорем, з якорем, що втягується із поперечним рухом якоря. Дія таких реле ґрунтується на притяганні сталюого осердя рухомого якоря 1 до електромагніта 2 через обмотку 3 якого проходить струм  $I_R$ . Реле непрямої дії має контактну систему, яка складається з нерухомої 4 і рухомої 5 частини.

За відсутності струму в обмотці якорь втримується у вихідному положенні пружиною 6. При цьому одна пара контактів замкнена, а друга розімкнена (для реле типу РТ – 40 РН–50).

При проходженні через обмотку реле струму виникає магнітний потік, який замикається через магнітопровід і повітряний проміжок довжиною  $\delta$ . Електромагнітна сила визначається:

$$F = \frac{I_p^2 W_p^2}{\delta^2} K,$$

де  $I_p$  – струм, який проходить через реле;  $W_p$  – кількість витків обмотки реле

Умова дії реле:

$$F_{ED} \geq F_n + F_t,$$

де  $F_n$  – сила пружності пружини;  $F_t$  – сила тертя в підшипниках реле

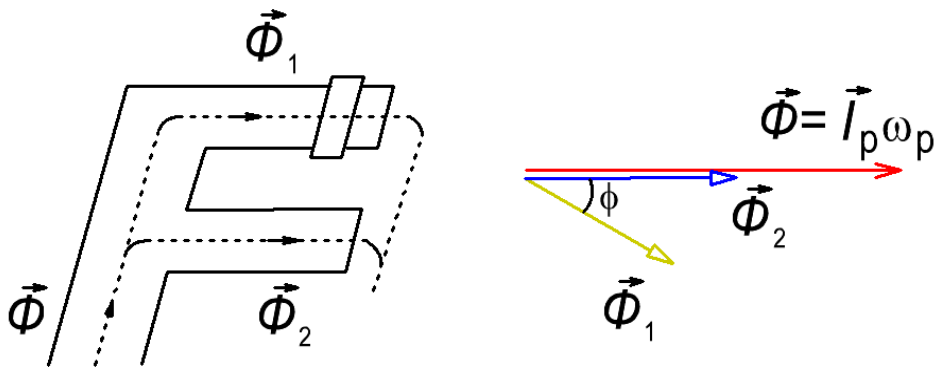
Мінімальний струм, за якого виконується ця умова, називається струмом дії реле. Максимальний струм, за якого виконується умова:

$$F_{\text{ед}} \leq F_{\text{п}} - F_{\text{т}},$$

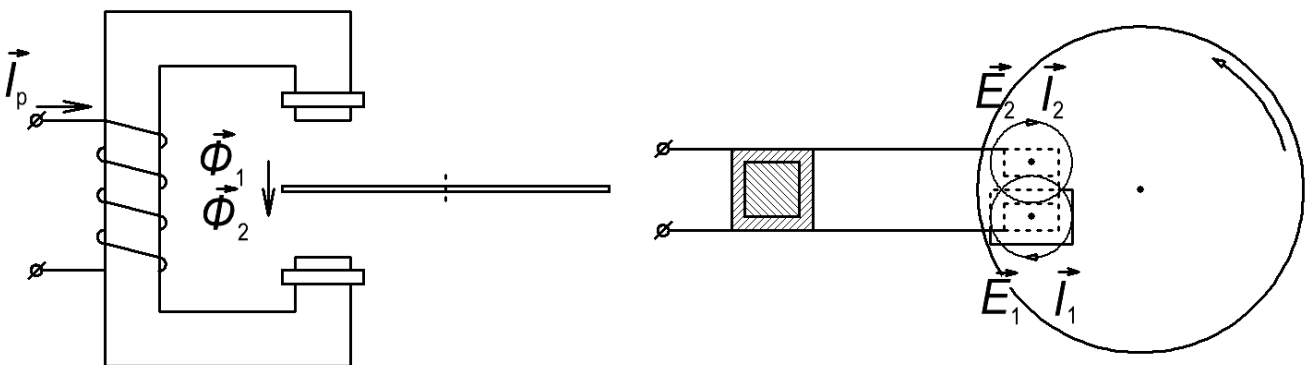
називається струмом відпускання реле. Коефіцієнт відпускання – це відношення струму відпускання до струму спрацювання реле.

$$K_{\text{в}} = \frac{I_{\text{вп}}}{I_{\text{сп}}}$$

Максимальне реле виконують свої функції при збільшенні струму. Тому їх спрацювання співпадає з дією, а струм дії називається струмом спрацювання. Струм відпускання – це струм повернення. Коефіцієнтом відпускання називається коефіцієнт повернення. Він завжди більший за одиницю для максимального реле. Для мінімального реле напруги спрацювання співпадає з відпусканням, тому напруга спрацювання рівна напрузі відпускання, а напруга повернення напрузі дії. Для них коефіцієнт повернення більший 1. Надлишкова дія повинна бути достатньою для надійної роботи обладнання, але не впливати на коефіцієнт повернення. Це досягається застосуванням П – подібної схеми з поперечним рухом якоря. Оскільки миттєва величина електромагнітної сили пропорційна квадрату струму, то вона не залежить від його знака. Для уникнення вібрації використовують розділення магнітного потоку за допомогою короткозамкненого витка.



### 3.3. Використання індукційного принципу для виконання реле



Робота індукційних реле ґрунтується на взаємодії змінних магнітних полів нерухомих обмоток із струмом, індукованим цими обмотками в рухомому елементі циліндричного барабана або диску. Тому такі реле використовуються лише на змінному струмі. Умовою виникнення обертального моменту є наявність не лише двох магнітних потоків, зсунутих у просторі і за фазою. Обертальний момент визначається:  $M_{\text{об}} = K\Phi_1\Phi_2\sin\varphi = KI_p^2$ .



Умови спрацювання реле:

$$M_{об} \geq M_{ін} + M_r + M_{п.м},$$

$$M_{ін} = J \frac{d^2 \alpha}{dt^2},$$

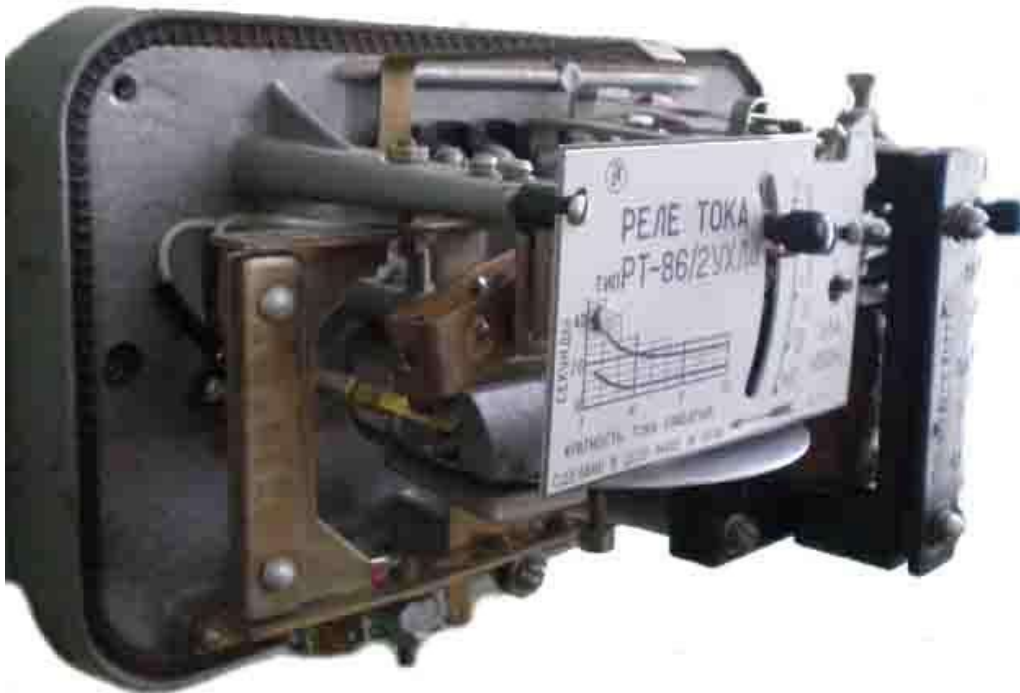
$$M_r = K \frac{d\alpha}{dt} I_p^2,$$

$$M_{п.м} = K_{п.м} d\alpha/dt,$$

де  $M_{ін}$  – момент інерції диска або барабана;  $M_r$  – гальмівний момент, зумовлений взаємодією потоку і струму викликаного іншим потоком;  $M_{пм}$  – момент постійного магніту, який використовується для сповільнення обертання диска.

Для зменшення часу спрацювання необхідно кут повороту  $\alpha$  прийняти мінімальним, циліндричний ротор вибрати малого діаметра і створити максимальний надлишковий момент. Ці вимоги виконуються в реле напрямку потужності. Для сповільнення спрацювання крім встановлення постійних магнітів як рухома частина використовується диск. Ці заходи стосуються реле струму РТ – 80, РТ – 90.

### 3.4. Індукційні вимірювальні реле. Реле струму РТ – 80, РТ – 90



Ці реле є комбінованими. Індукційний елемент з диском створює обмежено залежну витримку часу, а електромагнітний елемент миттєвої дії спрацьовує при великій кратності струму в обмотці реле. Вони використовуються для захисту від перевантажень і КЗ. Чим більший струм, тим менша витримка часу. Обмежено залежна характеристика витримки часу означає, що при збільшенні струму більше ніж на  $7 I_{ср}$  для РТ – 80 і  $4 I_{ср}$  для РТ – 90, витримка часу не залежить від кратності струму, що проходить через обмотку. Реле РТ – 85,

РТ– 86, РТ – 95 мають підсиленні перемикаючі контакти, завдяки яким можна дешунтувати електромагніт вимкнення. За допомогою гвинта встановлюється кратність струму спрацювання відсічки до струму спрацювання МСЗ, а не величина струму. При спрацюванні електромагнітного елемента реле діє без витримки часу.

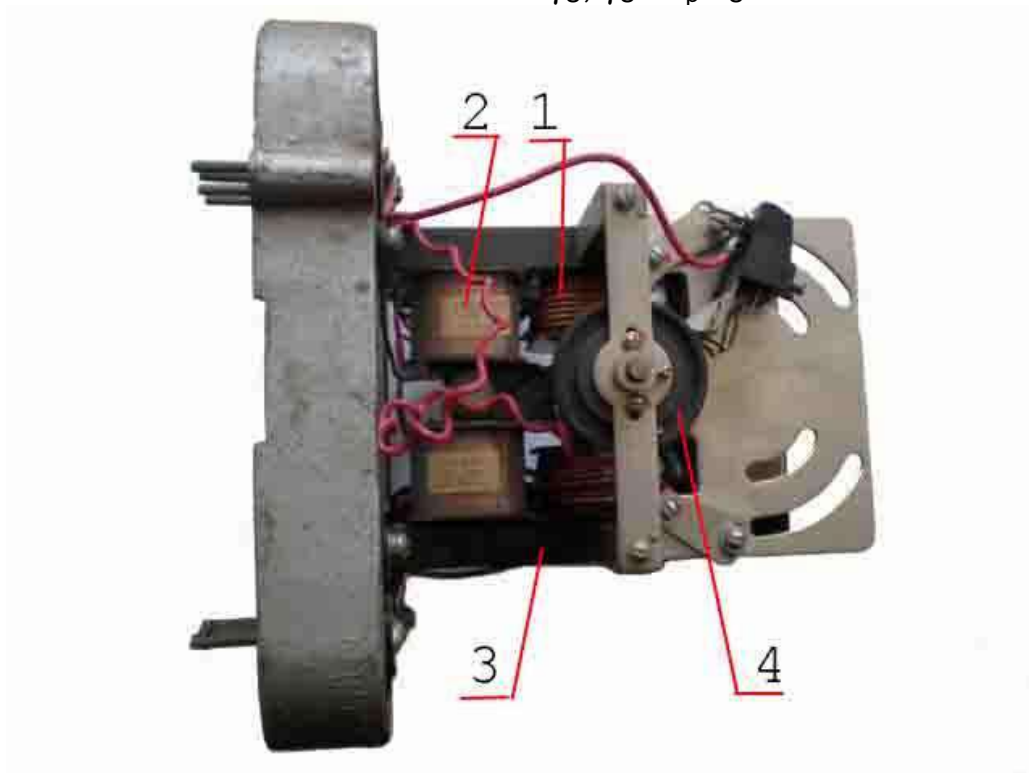
Переваги реле: можливість виконання захисту на одному реле, швидкодіючий від КЗ, а від перевантажень з витримкою часу, яка пропорційна струму перевантажень. Недоліки: складність, значна споживана потужність при спрацюванні.

### 3.5. Реле напряду потужності типу РБМ

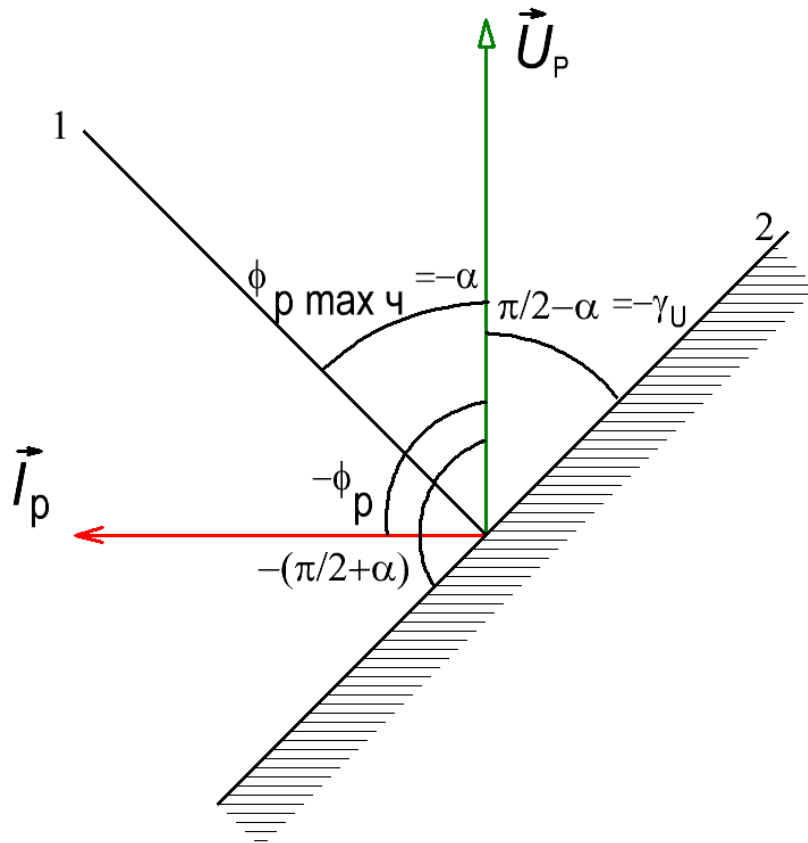
Це реле є вимірним органом з двома діючими величинами, що порівнюються за фазою. Обертальний момент:

$$M_{об} = KU_p I_p \cos(\varphi_p + \alpha),$$

$$\alpha = \pi/2 - \gamma_U, \gamma_U = U_p \wedge I_U.$$



Розрізняють реле косинусні, які реагують на  $\cos \varphi_p$ , тобто на напрям активної потужності, і синусні, які реагують на  $\sin \varphi_p$ , тобто на напрям реактивної потужності та змішаного типу. Пряма 1 – це лінія максимальної чутливості, 2 – лінія нульової чутливості.



Зона роботи реле обмежується кутами  $-(\pi/2+\alpha)$  і  $(\pi/2+\alpha)$ . При розташуванні вектора струму в цій зоні, тобто зліва від лінії нульової чутливості, реле спрацює.

### 3.6. Електромеханічні реле з постійним магнітом

Такі реле мають мале споживання потужності, високу чутливість і швидкодію. Завдяки постійному магніту вони реагують на напрям постійного струму. Ці реле використовуються як реагуючі елементи (0 – індикатори) напівпровідникових схем порівняння. А в релейному захисті використовуються поляризовані і магнітоелектричні реле. Поляризованими називаються електричні реле постійного струму, зміна стану якого залежить від полярності його вхідної діючої величини.

Переваги реле:

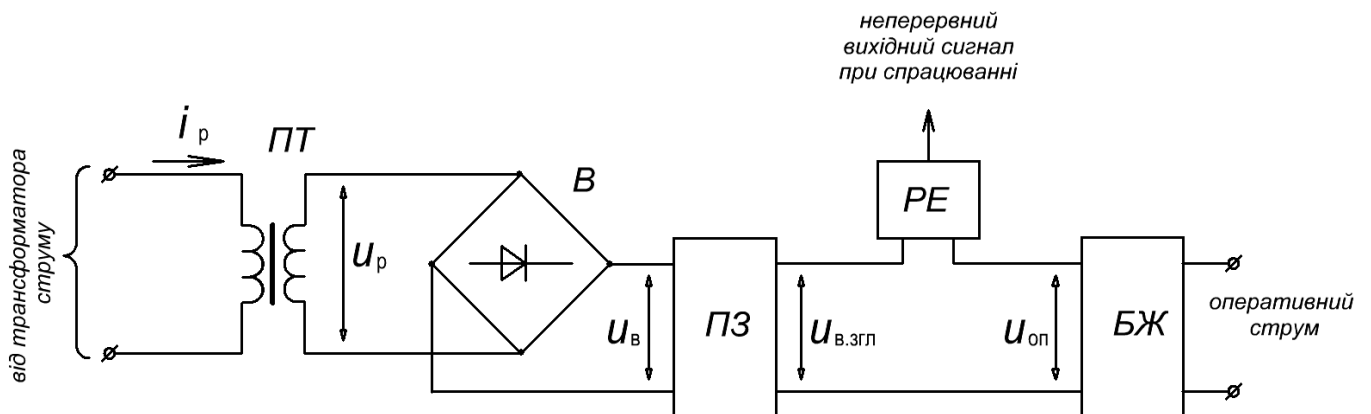
1. Надійна робота реле при малих підведених величинах, а при великих – відсутні вібрації і удари рухомої частини.
2. Висока чутливість і швидкодія.
3. Споживання потужності при спрацюванні мале.

Магнітоелектрична дія ґрунтується на взаємодії магнітного поля постійного магніту і струму в обмотці, яка розташована на рухомій рамці. Як і в поляризованих реле сила лінійно залежить від струму. Із зміною напрямку постійного струму змінюється напрям сили. Тому на таких реле будуються реле напрямку потужності. Їх перевагами є висока чутливість і мала потужність спрацювання.

### 3.7. Реле на герконах

Основним елементом реле є герметизований магнітокерований контакт. Воно складається із заповненої інертним газом скляної колби, впаяних в неї пружинних пластин з феромагнітного матеріалу і обмотки, яка намотана поверх колби. Струм в обмотці викликає магнітний потік, що проходить через пластину й утворює електромагнітну силу, яка притягує пластину. Реле розраховане на постійний струм, оскільки контакти пластини мають малу інерційність. Переваги: висока надійність комутації; малий час спрацювання; тривалий час роботи; відсутність впливу навколишнього середовища.

### 3.8. Напівпровідникові реле



У напівпровідникових реле порівнюється підведений струм або відповідно йому напруга з еталонною опорною величиною. Є два способи порівняння. В першому випадку вимірна величина випрямляється і порівнюється з постійним опорним струмом або напругою.

У другому випадку миттєва величина струму або напруги порівнюється з параметром спрацювання якого-небудь однопорогового елемента.

Структурна схема першого способу.

Проміжний трансформатор ТП перетворює вхідний струм до виду  $i$  рівня, який зручний для роботи напівпровідникової частини і гальванічно розділяє кола первинного ТС і напівпровідникового кола. Параметр після двопівперіодного випрямляча В і пристрою згладжування ПЗ порівнюється з опорною величиною. Схема порівняння має реактуючий елемент РМ, який ввімкнений на різницю вимірної і опорної величини і після спрацювання дає неперервний вихідний сигнал, коли ця різниця досягає його рівня спрацювання. Реактуючий елемент підсилює подані на нього сигнали і стрибкоподібно змінює струм в керованих колах.

### 3.9. Мікропроцесорний захист

Програмний захист реалізується на мікроЕОМ або мікропроцесорних системах. За їх допомогою можна проводити багатосторонню обробку інформації по роботі, пускові та аварійні режими елементів. Мікропроцесорна система

захисту можуть доповнюватися вихідними каналами для керування режимами. Мікропроцесорний захист ґрунтується на вимкненні не діючих, а миттєвих величин усіх симетричних складових струмів через певний проміжок часу ( $1/40$  періоду) з одночасним аналізом динаміки зміни струму. При аналізі можуть використовуватися дані вимірювань напруги. Висновок про необхідність вимкнення елемента, що захищається, виробляється на основі 3–5 послідовних вимірювань, що забезпечує набагато більшу швидкодію захисту, ніж у випадку використання інших систем реле.

Мікропроцесорна база дозволяє одночасно реалізувати захисти будь-якої складності, практично від усіх видів пошкоджень та особливих режимів, з урахуванням вимог до гнучкості захисних характеристик.

### **3.10. Загальні відомості про електротеплові елементи**

Найрозповсюдженіший електротепловий елемент – це плавка вставка, яка є вимірювальною і виконавчою частиною плавкого запобіжника. Захист тим ефективніший, якщо плавка вставка сплавиться раніше, ніж температура елемента який захищається, досягне недопустимих величин. Захисна характеристика запобіжника – це залежність повного часу перегорання вставки від струму, що проходить через неї. Недоліки плавкої вставки:

1. Не захищає при перевантаженні, тобто при малій кратності струму (час перегорання більший, ніж допустимий).
2. Нестабільність часу перегорання, який залежить від довжини, перерізу, матеріалу, форми, величини окислення навколишніх умов.

В РЗ використовуються дві металічні пластини, робота яких ґрунтується на виділенні теплоти при проходженні струму. В електротеплових реле захисні характеристики кращі при малій кратності струму ніж запобіжники.

Недоліки біметалічних пластин:

1. Мала швидкодія, тому вони не використовуються для захисту від КЗ.
2. Залежність захисної характеристики від навколишнього середовища.

Для захисту низьковольтних двигунів використовуємо температурні реле на основі біметалічних елементів і терморезисторів. Опір терморезисторів при певній температурі змінюється стрибками. В температурних реле використовуються позистори, опір яких збільшується.

### **3.11. Керовані запобіжники**

Вони побудовані на основі принципу механічного розриву струмопровідного кола запобіжника з сигналом релейного захисту. В одних конструкціях розривається плавка вставка, в інших розмикається контакт, ввімкнений послідовно з плавкою вставкою. У запобіжниках до 1 кВ на основі запобіжника типу ПМ2 при перевантаженнях спрацьовує пристрій релейного

захисту і приводить в рух привод. При КЗ вони працюють як звичайні запобіжники, оскільки перегорять швидше ніж працює релейний захист і подіє привод.

У керованих запобіжниках на основі кварцового запобіжника типу ПКТ об'єднана плавка вставка і біметалічний елемент (мембрана), які діють відповідно при КЗ і перевантаженнях. Вигинаючись, мембрана розмикає коло вставок і через кожен вставку по чергово проходить струм перевантаження.

## **4. ЗАХИСТ І АВТОМАТИКА МЕРЕЖ НАПРУГОЮ ДО 1 КВ**

### **4.1. Вимоги до запуску мереж до 1 кВ та їх реалізації**

Вимоги до захисту:

1. Швидкодія захисту від струмів КЗ.

2. Забезпечення необхідною чутливістю і по можливості селективне вимкнення ділянки.

3. Наявність за необхідності захисту від перевантажень.

Від перевантажень захищаються:

1. Мережі в середині приміщень виконані відкрито прокладеними провідниками з горючою зовнішньою оболонкою або ізоляцією.

2. Освітлювальні мережі в житлових і громадських будівлях, торгових приміщеннях, службово-побутових приміщеннях, промислових підприємствах, включаючи мережі для побутових і переносних електроприймачів, а також мережі пожежонебезпечних зон.

3. Силові мережі на промислових підприємствах, в житлових і громадських будівлях, торгових приміщеннях, якщо за умовами технологічного процесу або за режимом роботи мережі може виникати тривале перевантаження провідників.

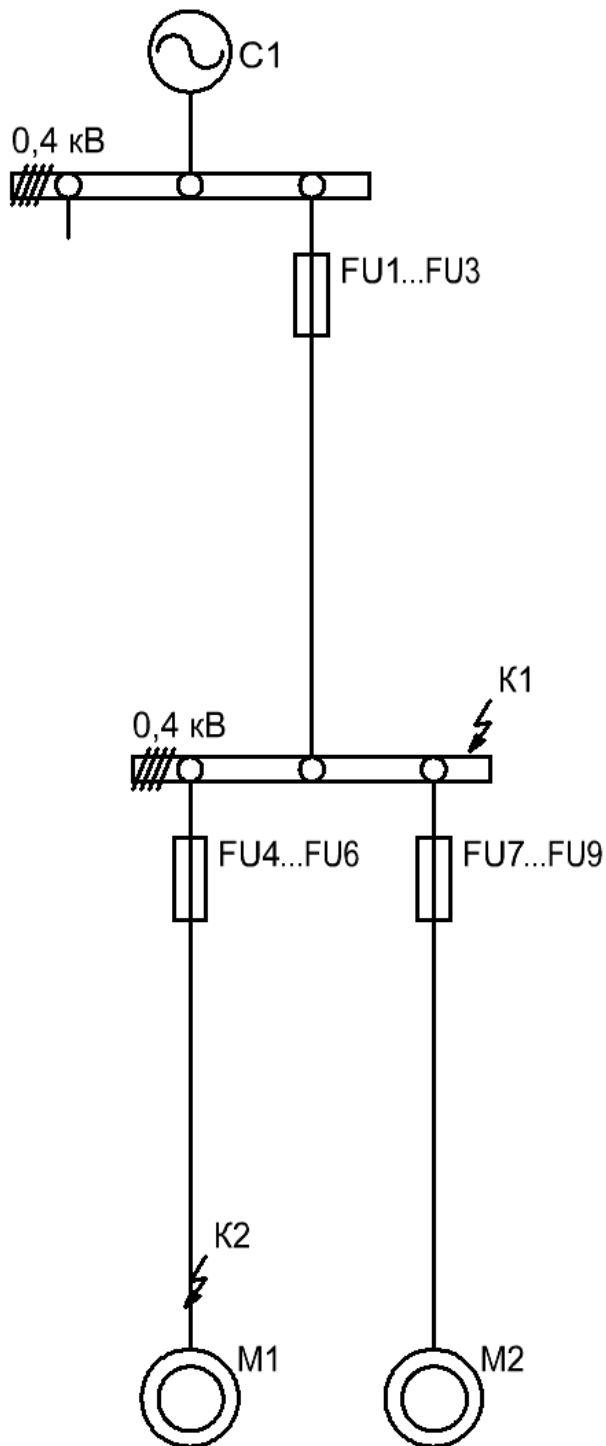
4. Мережі усіх видів вибухонебезпечних приміщеннях.

Найпоширенішою є чотирьохпровідна мережа з глухозаземленою нейтраллю, в якій основним пошкодженням є замикання між фазами й окремих фаз на землю, пошкодження ізоляції, яке приводить до однофазного КЗ, обрив фазного або нульового проводу. Неселективність вимкнення допускається, якщо це призводить до виникнення аварії, важких порушень технологічного процесу, великих збитків. Перевантаження можуть викликати перегрів провідників, згоряння ізоляції і пожежі.

Основним захистом є струмовий захист. Використовуються плавкі запобіжники, автоматичні вимикачі, причому перевага надається запобіжникам, якщо немає необхідності в автоматичному введенні резерву та швидкому відновленні живлення від перевантажень, запобіжники економічно неефективні. При виконанні спеціального захисту використовуються контактори або керовані запобіжники. З автоматики використовуються лише пристрій АВР, що забезпечує необхідну надійність електропостачання споживачів першої категорії.

### **4.2. Захист плавкими запобіжниками, їх вибір з урахуванням забезпечення селективності і чутливості**

Плавка вставка – це найпростіший струмовий захист з залежною характеристикою витримки часу. Вона повинна захищати елемент від КЗ і тривалих перевантажень. Плавка вставка не повинна перегоряти в нормальних режимах роботи і при короткочасних перевантаженнях тривалістю 5 – 10 с.



Коефіцієнт перевантаження  $K_{\text{пер}}$  – це відношення струму перевантаження до номінального струму плавкої вставки, для важких умов пуску (часті пуски) з тривалістю розгону двигуна 10 с. і більше  $K_{\text{пер}}=1,5 - 2$  для запобігання відпускання контакторів або магнітних пускачів плавка вставка повинна перегоріти за 0,1 – 0,3 с., при КЗ в найвіддаленішій точці мережі для даного запобіжника (для запобіжників FU1...FU3 – це точка К1)

Для вибору номінального струму плавкої вставки повинні виконуватись умови:

$$I_{\text{вс. ном}} \geq K_{\text{від}} I_{\text{роб. макс.}}, \quad (1)$$

$$I_{\text{вс. ном}} \geq \frac{I_{\text{пер}}}{K_{\text{пер}}}, \quad (2)$$

$$I_{\text{вс. ном}} \leq \frac{I_{\text{к. min}}}{10 \dots 15}, \quad (3)$$

де  $I_{\text{роб. макс}}$  – максимальний робочий струм, що проходить через запобіжник;  $K_{\text{від}} = 1,1 - 1,25$ ;  $I_{\text{пер}}$  – струм короточасного перевантаження, який вибирається більшим з двох умов:

$$I_{\text{пер}} = i_{\text{п. макс.}} + I_{\text{роб. макс.}} - K_{\text{вик}} \cdot i_{\text{ном}},$$

$$I_{\text{пер}} = \sum i_{\text{пуск}},$$

де  $i_{\text{п. макс}}$  – пусковий струм двигуна, який має найбільший пусковий струм з усієї групи двигунів;  $i_{\text{ном}}$  – номінальний струм

двигуна з найбільшим пусковим струмом;  $K_{\text{вик}}$  – коефіцієнт використання;  $\sum i_{\text{пуск}}$  – сума пускових струмів усіх двигунів, які вмикаються одночасно.

Струм плавкої вставки вибирається за умовами (1), (2), приймається найближча більша стандартна і за наявності пускачів або контакторів перевіряється за умовою (3).

Для забезпечення чутливості:

1. При захисті мереж від КЗ:

$$3 I_{\text{вс. ном}} \leq I_{\text{к.}}^{(1)} \text{ min.}$$

2. За першою умовою запобіжник можна не перевіряти, якщо мережа захищається лише від КЗ при виконанні умови:

$$0,33 I_{\text{вс. ном}} \leq I_{\text{тр. доп.}}$$



де  $I_{\text{тр. доп}}$  тривало допустимий струм елемента, що захищається.

3. При захисті від перевантажень, крім виконання вимоги п.1, повинна виконуватись умова:

$$K_3 I_{\text{вс. ном}} \leq I_{\text{тр. доп}},$$

де  $K_3$  – кратність струму перевантаження плавкої вставки; для провідників з гумовою і аналогічною за тепловими характеристиками ізоляцією, прокладених у вибухо- і пожежонебезпечних приміщеннях, а також в торгівельних приміщеннях  $K_3=1,25$ ; для провідників з гумовою і аналогічною за тепловими характеристиками ізоляцією, прокладеною у вибухобезпечних і пожежобезпечних приміщеннях, а також для провідників з паперовою ізоляцією  $K_3=1$ .

Селективність запобіжників забезпечується, якщо виконується умова

$$t_{3(n)} \geq 3t_{3(n-1)}.$$

Для запобіжників низьковольтних і однотипних виконання цієї умови забезпечується, якщо струм плавких вставок відрізняється більше, ніж на дві ступені шкали. Для різнотипних низьковольтних запобіжників більш ніж на 3 ступені шкали. В усіх випадках повинні виконуватися умови (1), (2), (3).

Для різнотипних запобіжників селективність перевіряється для усіх струмів в нормальному режимі і при КЗ.

#### **4.3. Захист з допомогою автоматичних повітряних вимикачів**

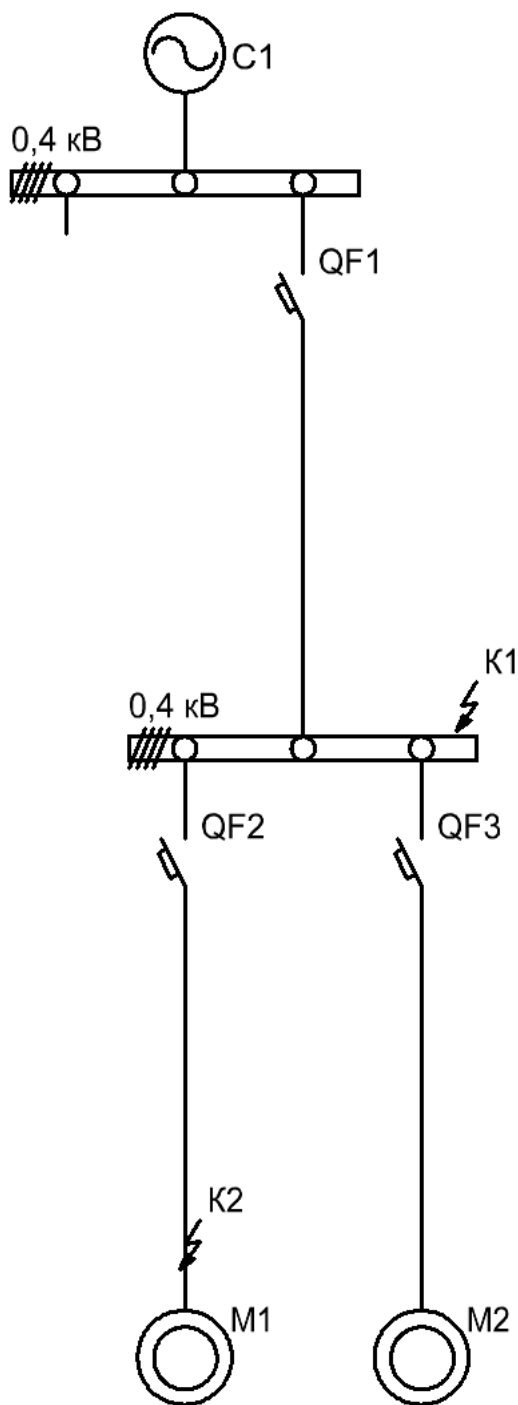
Номінальний струм розчіплювача вибирається за умовою:

$$I_{\text{роб. ном}} \geq I_{\text{роб. max}}.$$

Струм спрацювання розчіплювачів без витримки часу при КЗ і розчіплювача з витримкою часу від перевантажень вибирається так, щоб коло не розмикалося в нормальному режимі і при перевантаженнях. Струм короточасного перевантаження визначається, як при виборі плавких вставок. Струм спрацювання миттєвого розчіплювача повинен задовольняти виконання умови:

$$I_{\text{с.р}}^1 \geq (1,1 \dots 1,35) I_{\text{пер}},$$
$$I_{\text{с.р}}^1 = K_{\text{с.р}}^1 I_{\text{р. ном}},$$

де  $K_{\text{с.р}}^1$  – кратність струму спрацювання миттєвого розчіплювача.



Струм спрацювання сповільненого розчіплювача повинен забезпечувати виконання умови:

$$I_{c.p}^{III} \geq (1 \dots 1,2) I_{роб. max.}$$

Переваги автоматичних вимикачів:

1. При будь-яких режимах вони вимикають усі три фази, виключаючи можливість появи неповнофазного режиму.
2. Будучи апаратами багаторазової дії, на їх базі можна виконувати автоматичне введення резерву.
3. Їх розчіплювачі досконаліші, ніж плавки вставки.

#### 4.4. Чутливість і селективність розчіплювачів автоматичних вимикачів

Вимоги чутливості в мережах, що захищаються лише від струмів КЗ:

$$1. 3I_{c.p}^1 \leq I_{к. min}^{(1)}.$$

2. Для автоматичних вимикачів з номінальним струмом до 100 А.

$$1,4 I_{c.p}^1 \leq I_{к. min}^{(1)}.$$

Для усіх інших автоматичних вимикачів:

$$1,25 I_{c.p}^1 \leq I_{к. min}^{(1)}.$$

3. За кратністю струму КЗ допускається не перевіряти чутливість, якщо:

а) вимикач має лише миттєво діючий розчіплювач та для уставки миттєвого

спрацювання виконується умова:

$$0,66 I_{c.p}^1 \leq I_{тр. доп};$$

б) для відлагоджувального розчіплювача сповільненого спрацювання повинна виконуватися умова:

$$0,66 I_{c.p}^{III} \leq I_{тр. доп}.$$

За наявності миттєво діючого розчіплювача кратність струму не обмежується.

в) для невідлагоджувального розчіплювача сповільненого спрацювання незалежно від наявності миттєво діючого розчіплювача повинна виконуватися умова:

$$I_{р. ном} \leq I_{тр. доп}.$$

Для мереж, що захищаються від перевантажень, повинні виконуватись умови:

1. Для вимикача, що має лише миттєво діючий розчіплювач,

$$K_3 I_{c.p}^I \leq I_{тр. доп};$$

де  $K_3 = 1,25$  для провідників з гумовою та аналогічною за тепловими характеристиками ізоляцією прокладеними в вибухо- і пожежонебезпечних приміщеннях та в торгових приміщеннях:  $K_3=1$  для провідників з гумовою та аналогічною за тепловими характеристиками ізоляцією прикладених у вибухо- і в пожежонебезпечних приміщеннях і для провідників з паперовою ізоляцією.

2. Для автоматичних вимикачів з підлагодженим розчіплювачем сповільненого спрацювання:

$$K_3 I_{c.p}^{III} \leq I_{тр. доп},$$

$K_3 = 0,8$  для провідників з паперовою ізоляцією і  $K_3 = 1$  в усіх інших випадках

3. Для вимикачів з невідлагодженим розчіплювачем сповільненого спрацювання:

$$I_{р. ном} \leq I_{тр. доп}.$$

Для забезпечення селективності захисні характеристики послідовно ввімкнених автоматичних вимикачів не повинні перетинатися. Причому уставка струму спрацювання вимикача, який розташований ближче до джерела живлення, повинна бути більшою, ніж для автоматичного вимикача віддаленішого від джерела живлення.

Якщо характеристика розчіплювача, вибрана раніше, не задовольняє вимогам селективності, вона приймається більше розрахункової. При будь-яких струмах перевантаження і  $K_3$  селективність забезпечується, якщо виконується умова:

$$t_{ср. (п)} \geq 1,5 t_{с.р (п-1)}.$$

Якщо до джерела живлення ближче автоматичний вимикач, то селективність досягається використанням селективних, а в деяких випадках і неселективних автоматичних вимикачів, якщо струм найбільшої уставки відсічки більший, ніж струм  $K_3$  при пошкодженні за запобіжниками. Якщо до джерела живлення ближче запобіжник, то вимоги ті ж самі, що і при пошкодженні захисних характеристик запобіжників. При цьому допускається:

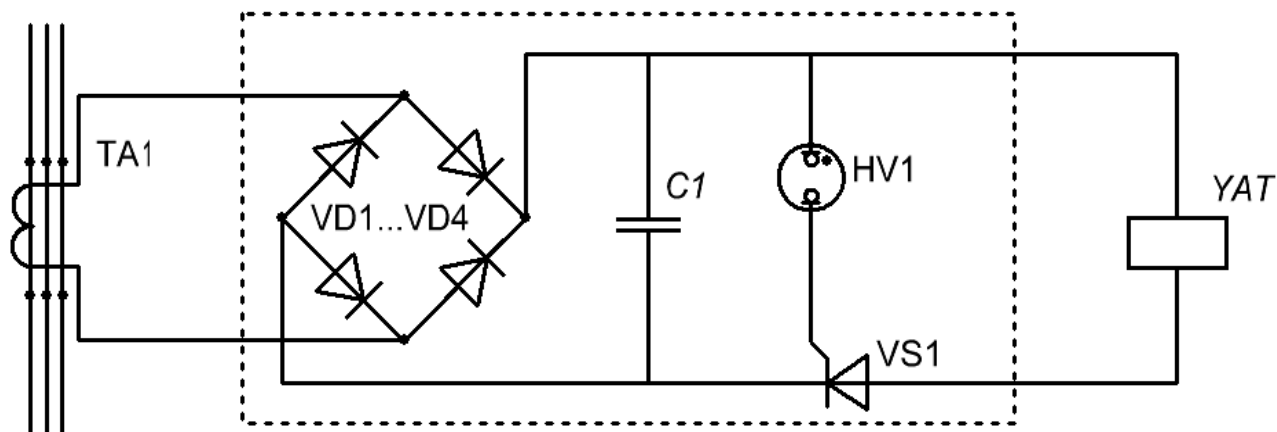
$$t_3 \geq 1,7 t_{с.р}.$$

#### **4.5. Захист від однофазних КЗ на землю в чотирипровідній мережі з глухозаземленою нейтраллю**

Плавкі запобіжники і розчіплювачі автоматичних вимикачів, які ввімкнені на повні струми фаз, відлагоджуються від максимального струму лінії, що захищається. Цей струм може бути рівний струму однофазного КЗ при пошкодженні в кінці лінії довжиною біля 1км, з іншої сторони струми однофазних КЗ менші, ніж струми пошкоджень між фазами. Тому чутливість запобіжників і розчіплювачів автоматичних вимикачів при виникненні однофазних КЗ не достатньо. Використання струму нульової послідовності

дозволяє отримати чутливіший захист, оскільки немає необхідності відлагоджувати його від максимального робочого струму. Такий захист є в автоматичних вимикачах типу ВА, але розчіплювач не дозволяє відлагодити струм спрацювання захисту, оскільки він встановлюється заводом і складає  $(0,5-1)I_{p.ном.}$ , а витримка часу регулюється лише пристроєм відсічки.

Тому використовують захист нульової послідовності, розроблений спеціально для мереж до 1 кВ з глухозаземленою нейтраллю ФО-0.4.



Цей пристрій вмикається до одностансформаторного ТС нульової послідовності TAZ. При рівності напруги на конденсаторі С і постійної напруги неонові лампи НВ остання відкриває тиристор VDT в колі електромагніта вимкнення УА (незалежного розчіплювача). Швидкість збільшення напруги на конденсаторі визначається струмом пошкодження, тому захист має залежну від струму витримку часу.

Недоліки пристрою:

1. Необхідність відлагодження струму спрацювання від струму робочої несиметрії, який може досягати половини максимального робочого струму лінії.
2. Мінімальна уставка пристрою становить 30 А, а струм КЗ на землю може бути кілька ампер.

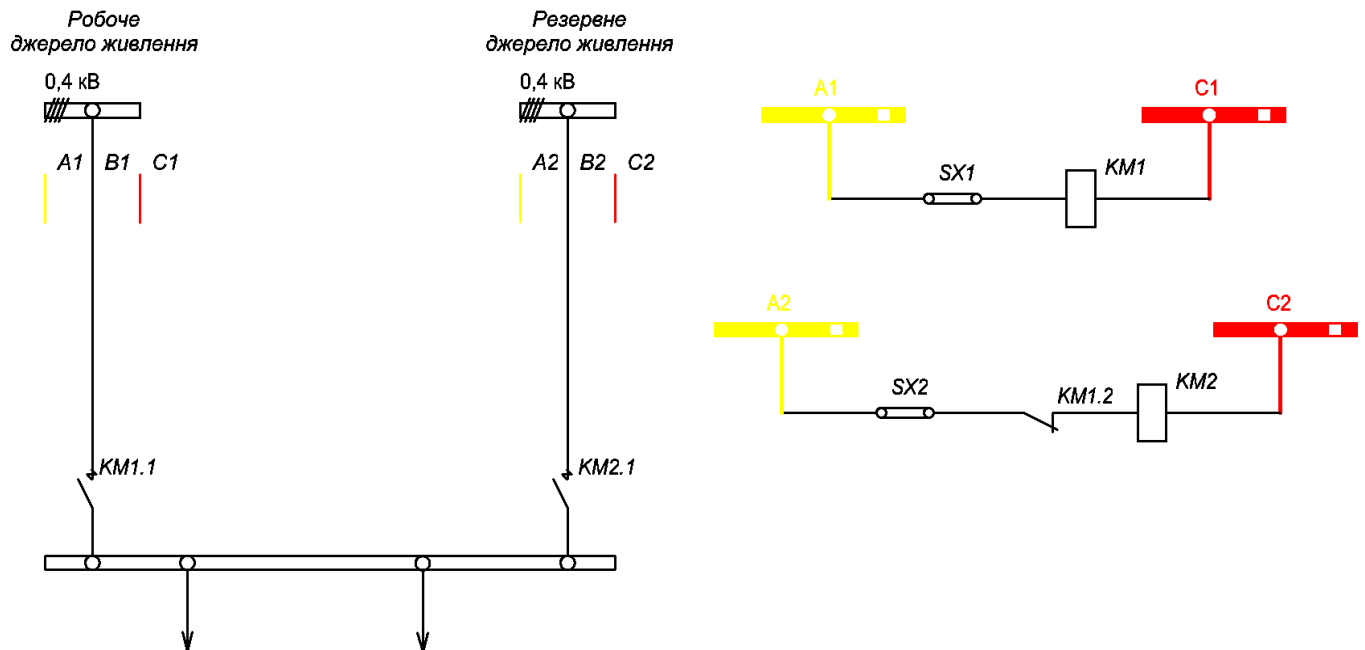
Для збільшення малого струму КЗ, використовуються короткозамикачі, виконані на базі автоматичного вимикача типу АП –50. Як діюча величина застосовується струм у нульовому проводі або напруга зворотної послідовності. Недоліком є необхідність створення штучного КЗ.

#### **4.6. Вимоги до пристрою АВР та їх реалізація в мережах до 1кВ**

Вимоги:

1. Повний час дії (час вимкнення робочого і ввімкнення резервного джерел живлення) повинен бути мінімальним.
2. Постійна готовність до дії.
3. Одноразовість дії для запобігання багаторазового вмикання резервного джерела на стійке КЗ.
4. Забезпечення швидкого вимкнення резервного джерела і його споживачів від пошкодженої секції шин для забезпечення їх нормальної роботи.

Пристрій АВР повинен спрацювати при припинення живлення споживачів і наявності нормальної напруги на резервному джерелі живлення. Лінія робочого джерела до моменту дії пристрою АВР повинна вимкнутися зі сторони шин споживача. Пристрій АВР повинен діяти при зменшенні напруги до певної величини.



В установках до 1кВ пристрій АВР найпростіше виконується на контакторах. Додатковий пусковий орган не потрібний, оскільки при зменшенні напруги на лінії, що резервується, контактор розмикається самостійно. Контактор КМ1 ввімкнений, оскільки його котушка перебуває під повною робочою напругою лінії. Допоміжний контакт КМ1.2 розімкнений, тому контактор КМ2 вимкнений. Це трапиться при зникненні напруги від робочого джерела живлення, оскільки при цьому припиниться живлення котушки контактора КМ1. Пристрій АВР автоматично відновлює живлення від робочого джерела після появи напруги на ньому. Накладки SX1, SX2 знімаються на час ремонту. Час перегорання запобіжників менший, ніж час вимкнення контакторів, тому при короточасному зниженні напруги внаслідок КЗ пристрій АВР не спрацює.

Недоліки пристрою АВР на контакторах:

Можливе багаторазове ввімкнення резервної лінії на пошкоджені шини, якщо запобіжник цієї лінії не встигне перегоріти.

2. У ввімкненому стані контактор втримується котушкою, яка перебуває під повною робочою напругою, тому виникає нагрів, вібрація і додаткові втрати електричної енергії.

## **5. СТРУМОВИЙ ЗАХИСТ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В МЕРЕЖАХ НАПРУГОЮ ВИЩЕ 1КВ**

### **5.1. Триступеневий струмовий захист і його основні органи**

Струмовим називається захист, для якого діючою величиною є струм, що проходить в місці його вмикання. Триступеневий струмовий захист є відносно селективний. Він може здійснювати як близьке резервування (резервувати основний захист, який захищає весь елемент) і далеке резервування (може спрацювати при пошкодженні на попередньому елементі, якщо його власний захист відмовив). Швидкодіючий перший ступінь, яка ще називається струмовою відсічкою без витримки часу, має лише вимірний орган. Другий і третій – струмова відсічка з витримкою часу і максимальний струмовий захист, мають два органи – вимірний і витримки часу. Другий ступінь виконується з незалежною від струму витримкою часу, а третій ступінь може мати залежну і не залежну характеристику витримки часу.

Вимірний орган реле струму реагує на пошкодження або порушення нормального режиму роботи і приводить в дію орган витримки часу другий і третій ступені, і виконавчий орган першого ступеня. Для збільшення чутливості використовують комбінований вимірний орган, який складається з максимального реле струму і мінімального реле напруги. Орган витримки часу – це або окреме реле часу, або одне реле струму, в якому об'єднані обидва органи захисту. Допоміжні реле: проміжне реле полегшує роботу контактів основних органів захисту і вводячи деякі сповільнення запобігає дії струмової відсічки без витримки часу при спрацюванні трубчастих розрядників; вказівне реле дозволяє контролювати спрацювання захисту.

### **5.2. МСЗ при вмиканні вимірних органів на повні струми фаз**

Струм спрацювання захисту – це мінімальний струм, при якому захист спрацює. Струм спрацювання вимірного органу – це мінімальний струм в вимірному органі, при якому він спрацює.

Струм спрацювання реле визначається за формулою:

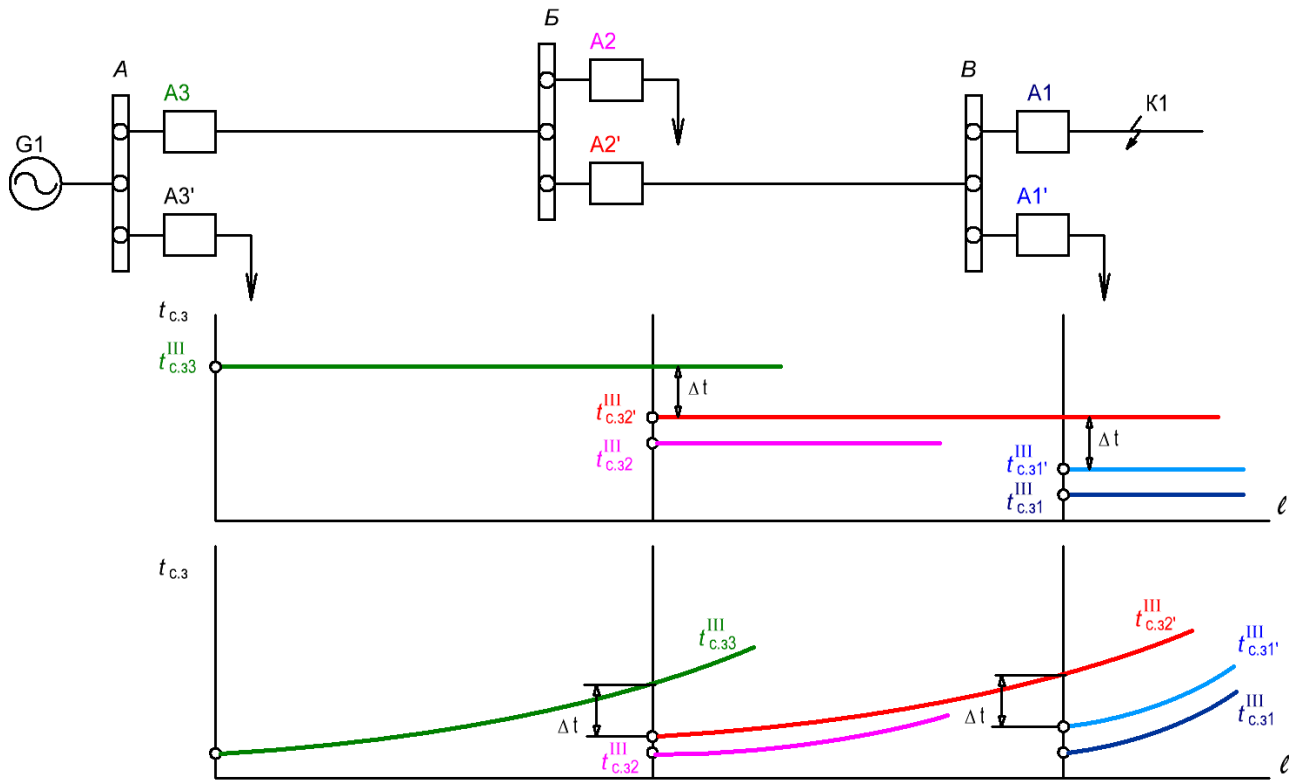
$$I_{с.р.}^{III} = I_{с.з.}^{III} * K_{сх} / K_I.$$

Селективність забезпечується вибором струму спрацювання і витримки часу.

Вибір параметрів починається з захисту елемента, найвіддаленішого від джерела живлення (захистів А1, А1'). Для селективного спрацювання ці захисти мають деякі витримки часу  $t_1$ ,  $t_1'$ . Час спрацювання МСЗ (витримка часу) визначається згідно із ступеневим принципом:

$$t_{(n)}^{III} = t_{(n-1)max}^{III} + \Delta t,$$

де  $t_{(n-1)max}^{III}$  – найбільша витримка часу МСЗ попереднього елемента;  $\Delta t$  – ступінь селективності(0,5с).



Витримка часу може створюватись окремим реле часу, тоді час спрацювання МСЗ не залежить від місця КЗ і таке МСЗ називається МСЗ з незалежною характеристикою витримки часу. Якщо МСЗ виконується на реле РТ-80, РТ-90, РТВ, тоді це МСЗ з обернено залежною характеристикою витримки часу. Такий захист дозволяє прискорити вимкнення великих струмів КЗ. Струм спрацювання завжди більший ніж максимальний робочий струм лінії, що захищається. Для визначення струму спрацювання МСЗ захисту АЗ розглядається два випадки:

1. К.з. на одному з елементів, що відходить від шин підстанції Б

$$I_{c.3}^{III} \geq \frac{K_{\text{від}} \cdot K_{\text{сзп}}}{K_{\text{п}}} I_{\text{роб.мах}}.$$

2. К.з. на лінії АБ її вимкнення і наступне АПВ.

$$I_{c.3.3}^{III} \geq K_{\text{від}}' \cdot K_{\text{сзп}}' \cdot I_{\text{роб.мах}}.$$

Вибирається більший з розрахованих струмів і перевіряється за чутливістю:

$$I_{c.3.3}^{III} \geq K_{\text{від}}^{III} \cdot I_{c.3.(n-1).\text{мах}}^{III},$$

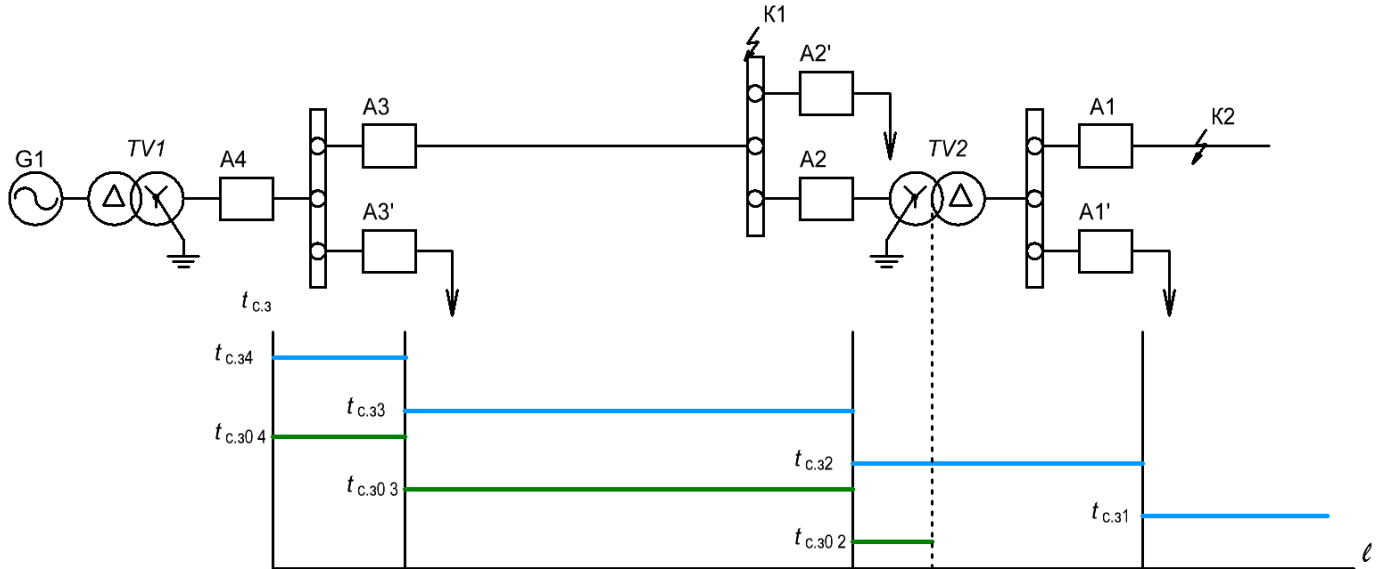
де  $K_{\text{від}}$  – коефіцієнт відлагодження; для реле не прямої дії рівний 1,2–1,3, для реле прямої дії рівний 1,5–1,8; коефіцієнти  $K_{\text{від}}$  і  $K_{\text{від}}^{III}$  приймаються трохи більшими, щоб врахувати струм який проходить через захист елемента, що захищається від непошкодженого відгалудження;  $K_{\text{сзп}}$  – коефіцієнт самозапуску;  $I_{c.3.(n-1).\text{мах}}^{III}$  – максимальний струм спрацювання МСЗ попереднього елемента.

Чутливість характеризується коефіцієнтом чутливості:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мін}}}{I_{c.3.}}; K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{р.мін}}}{I_{c.р.}}$$

Якщо коефіцієнт схеми не дорівнює 1, то перевага надається другому виразу. Необхідно мати  $K_{\phi}$  не менше 1.5 при пошкодженні в кінці ділянки, що захищається, і не менше 1.2 при пошкодженні в кінці попереднього елемента.

### 5.3. МСЗ нульової послідовності мереж з заземленою нейтраллю



Пусковим органом запуску є реле струму, яке ввімкнене на фільтр струму нульової послідовності.

Струми нульової послідовності будуть протікати через лінію і замикатись через заземлену нейтраль і точку КЗ лише при пошкодженні на землю на ділянці між трансформаторами, обмотки яких з'єднані зіркою (точка К1). При пошкодженні поза цією ділянкою (точка К2) струми нульової послідовності в лінії відсутні. Тому захист нульової послідовності на трансформаторі підстанції Б можна виконати без витримки часу, тобто  $t_{3,0}=0$ .

Час дії захисту А1 та А2 визначається за ступеневим принципом. Таким чином захист нульової послідовності можна виконати швидкодіючим ніж МСЗ ввімкнений на повні струми фаз. Струм небалансу захисту збільшується із збільшенням первинного струму і буде максимальним при трифазному КЗ. Тому якщо  $t_{3,0} \leq t_4$ , то струм спрацювання реле при захисті нульової послідовності:

$$I_{c/p} = K_{\text{від}} * I_{\text{нб.розр.}}$$

Струм небалансу:

$$I_{\text{нб.розр}} = I_{\text{нб.мах}} = K_{\text{одн}} \varepsilon / 100 * I_{\text{к.зовн.мах}}^{(3)},$$

де  $K_{\text{від}}=1,25$ ;  $K_{\text{одн}}$  – коефіцієнт однотипності ТС (0.5–1);  $\varepsilon$  – повна похибка (10%);  $I_{\text{к.зовн.мах}}^{(3)}$  – максимальний струм зовнішнього КЗ при пошкодженні на початку попередньої ділянки. Для захисту А2 це точка К1.

Якщо  $t_{3,0} < 0,3$ сек, тоді:

$$I_{\text{нб.мах}} = K_{\text{одн}} * K_{\text{ап}} \varepsilon / 100 * I_{\text{к.зовн.мах}}^{(3)},$$

де  $K_{\text{ап}}=2$ , якщо  $t_{3,0} < 0,1$ сек і  $K_{\text{ап}}=1,5$  якщо  $t_{3,0} < 0,3$ сек.

Чутливість захисту нульової послідовності можна збільшити, якщо прийняти  $t_{3,0} > t_4$ . Тоді зовнішні багатofазні КЗ будуть вимикатися з меншою



витримкою часу, ніж час спрацювання струмового захисту нульової послідовності. Струм спрацювання реле:

$$I_{с.р} = K_{від} * I_{нб .норм},$$
$$I_{нб .норм} << I_{нб max},$$

де струм  $I_{нб .норм}$  – струм небалансу в нормальному режимі. Визначається за допомогою вимірювань і знаходиться в межах 0,01–0,1 А. Тобто струм спрацювання захисту набагато менший, ніж робочий струм в лінії, що захищається. Струмовий захист нульової послідовності використовується в мережах 110 кВ і вище від однофазних КЗ на землю;  $K_{ап}$  – коефіцієнт, який враховує аперіодичну складову струму КЗ.

#### **5.4. Схема й оцінка МСЗ**

Дана схема МСЗ виконується на РТ–40, РТ–80, РТ–90 (крім РТ–85, РТ–86, РТ–95). У схему входять КА і КТ.

Якщо захист виконується на змінному оперативному струмі з дешунтуванням електромагніта вимкнення за допомогою індукційних реле, з підсиленими перемикаючими контактами.

У схему МСЗ на реле прямої дії типу РТВ входить лише реле струму КА, яке безпосередньо діє на вимкнення вимикача.

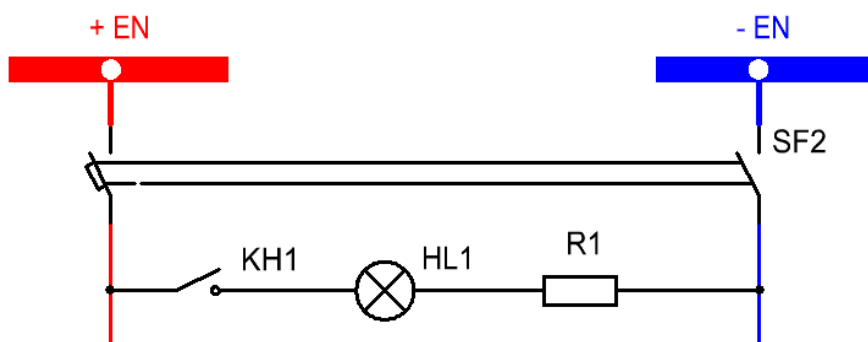
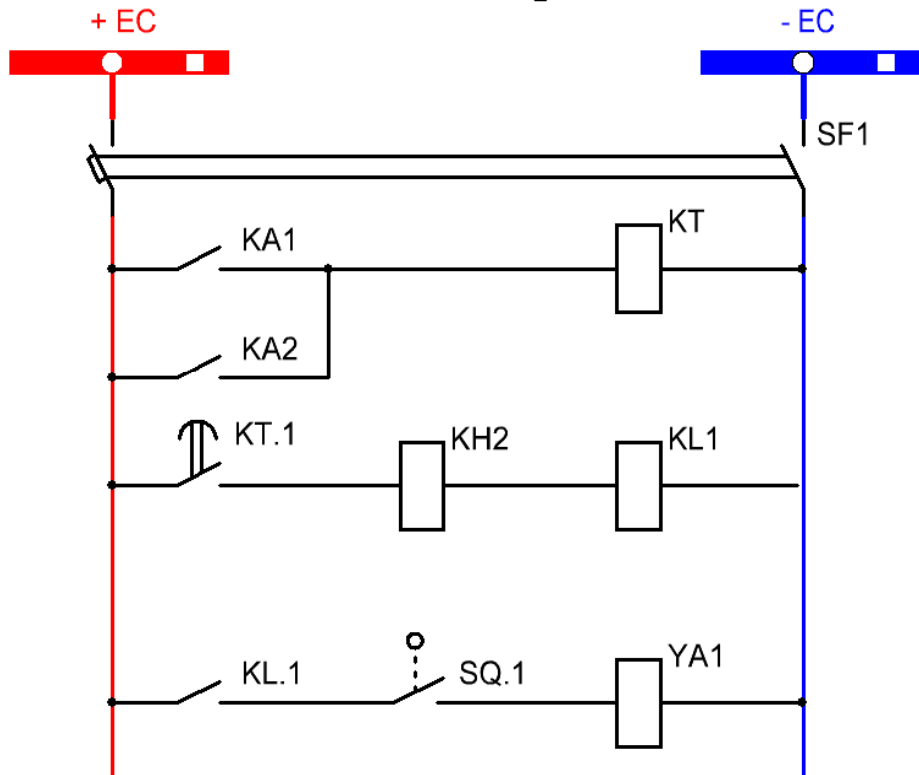
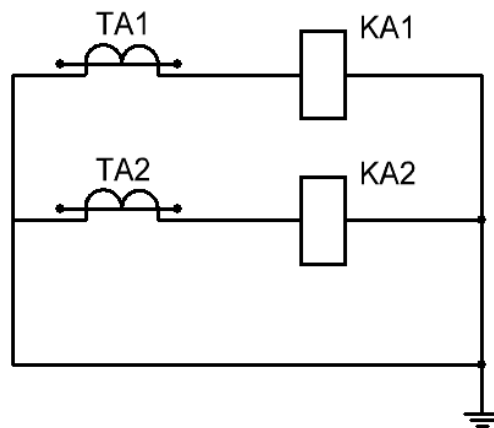
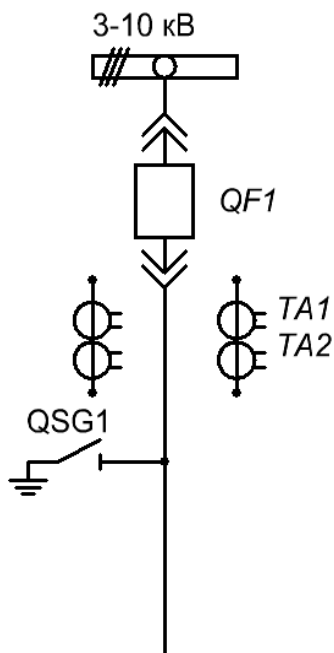
Переваги МСЗ: простота і надійність.

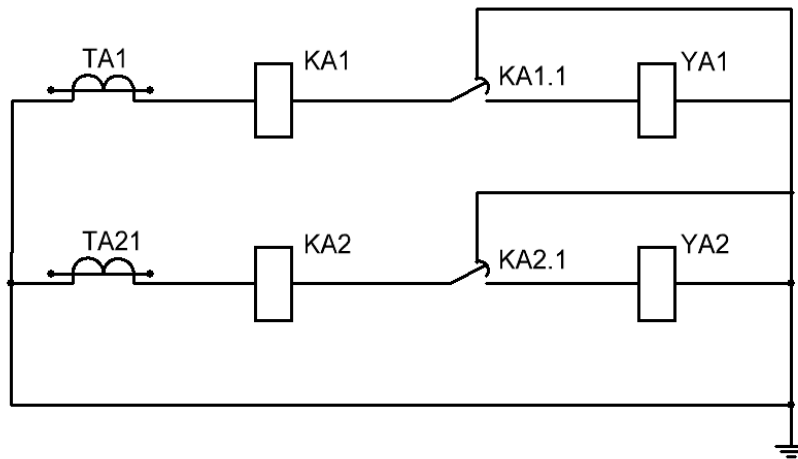
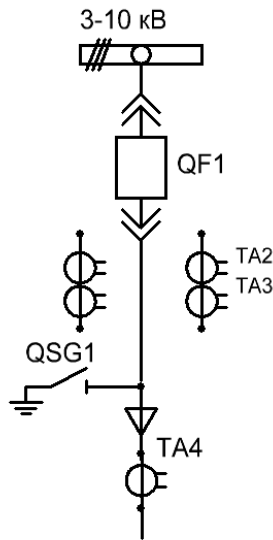
Недоліки:

1. Селективність забезпечується лише в радіальних мережах з одним джерелом живлення.

2. Захист не швидкодіючий; найбільша витримка часу в головній ділянці мережі, де необхідне швидке вимкнення КЗ для забезпечення надійності електропостачання споживачів.

Захист нульової послідовності швидкодіючий і має підвищену чутливість. Тому досить поширений в мережах з глухозаземленою нейтраллю, як захист від КЗ на землю. МСЗ з вимиканням вимірних органів на повні струми фаз використовується у розподільчих мережах до 10 кВ і для захисту окремих приймачів без витримки часу.





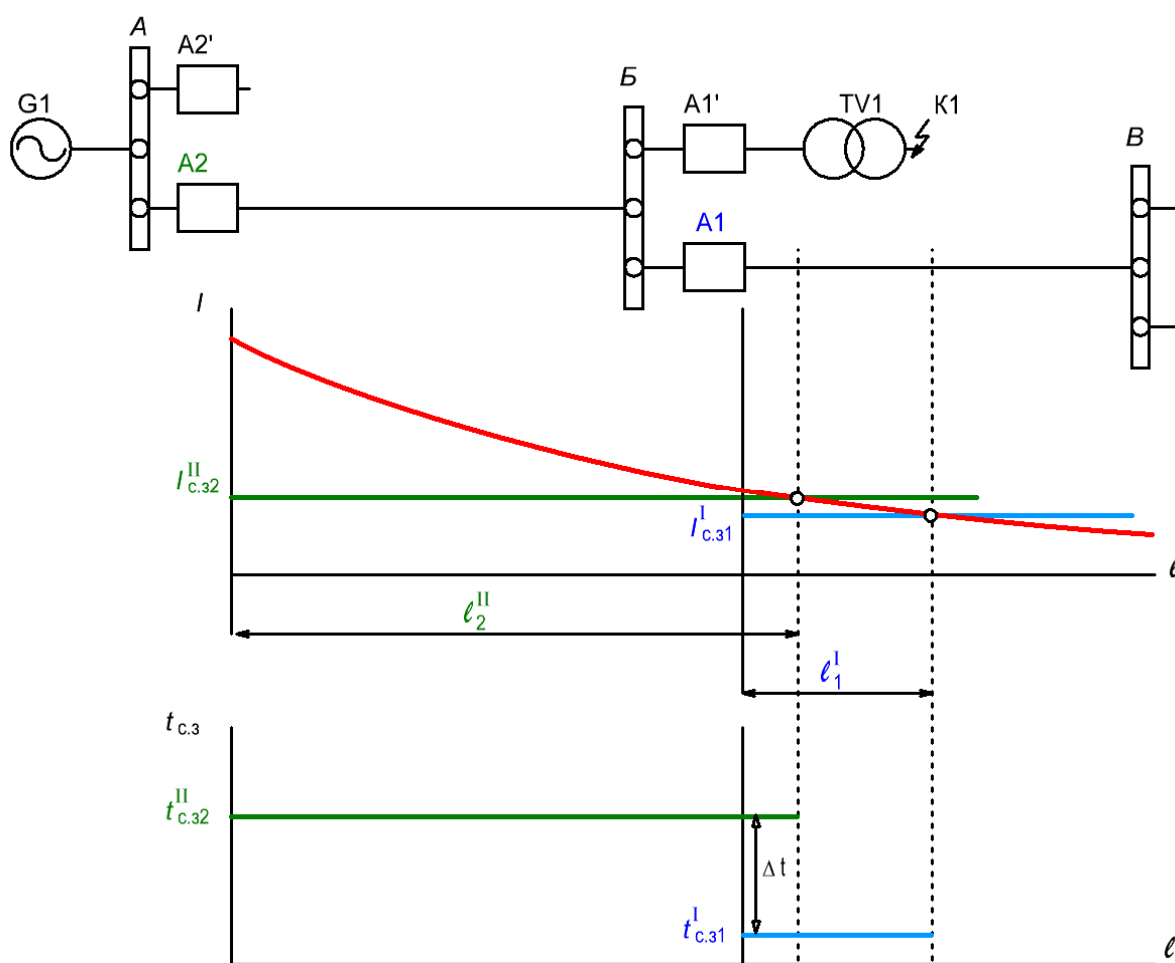
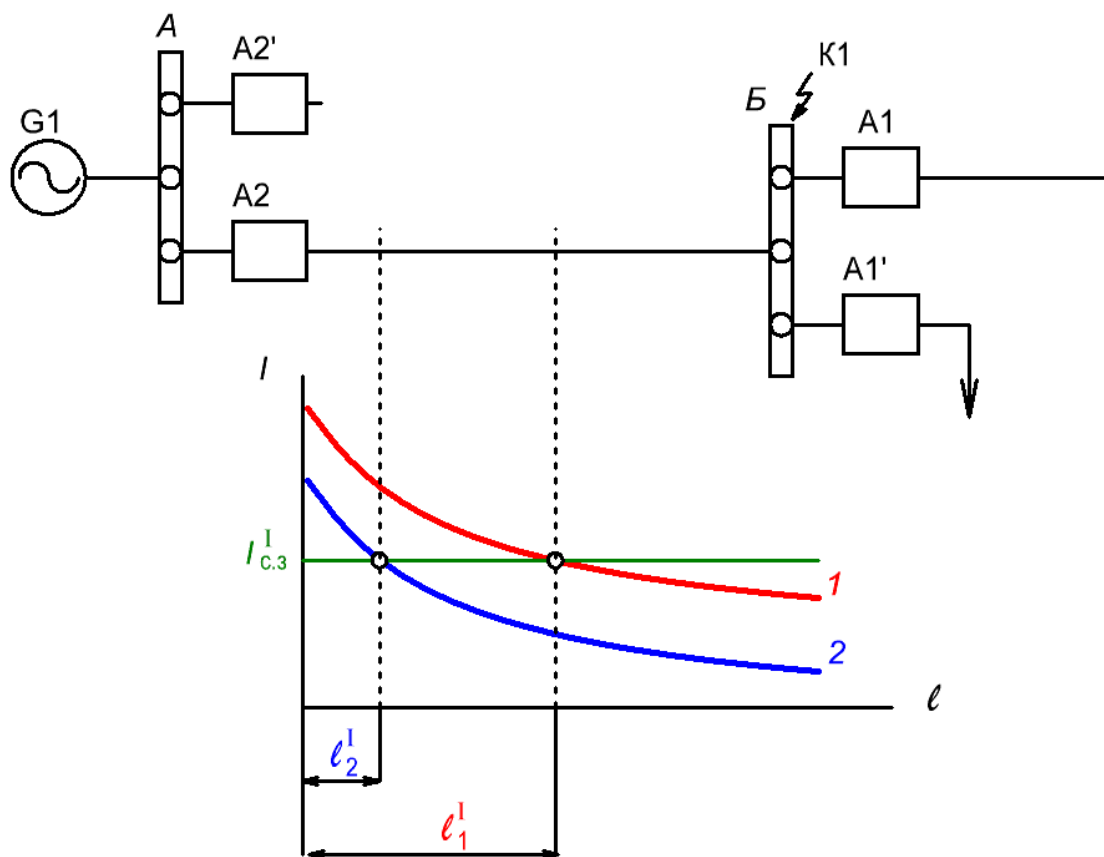
### 5.5. Вибір параметрів струмової відсічки без витримки часу і з витримкою часу

МСЗ має порівняно велику витримку часу, тому доповнюється струмовою відсічкою без витримки часу. Струм спрацювання першого ступеня:

$$I_{с.з}^{(1)} = K_{від}^{(3)} * I_{к.з.овн\ max}^{(3)},$$

де  $K_{від}^{(3)}$  приймається як і для МСЗ;  $I_{к.з.овн\ max}^{(3)}$  – максимальний струм трифазного КЗ в кінці лінії, що захищається.

Крива 1 характеризує зміну струму КЗ в максимальному режимі роботи системи. Крива 2 – в мінімальному режимі. Віддалі  $\ell_1^I$ ,  $\ell_2^I$  – це зони захисту струмової відсічки без витримки часу відповідно в максимальному і мінімальному режимі. Чутливість першого ступеня, оцінюється коефіцієнтом чутливості, який повинен бути не менше 2 при мінімальному двофазному КЗ в місці встановлення захисту (для захисту А1 – КЗ на шинах А) і зоною захисту  $\ell^I$ , яка повинна бути  $\geq (0.15 \dots 0.2) \ell$ .



Оскільки другий ступінь є відносно селективний, тому в її дію вводиться витримка часу:

$$t_2^{II} = t_1^I + \Delta t,$$

де  $\Delta t$  – ступінь селективності (0,4–0,6 с).

Перший ступінь може бути відсутній, якщо витримка часу другого ступеня є такою, що забезпечує стійкість роботи системи. Струм спрацювання другого ступеня відлагоджується від струму спрацювання першого ступеня попереднього захисту. Цим забезпечується неспрацюванням другого ступеня при пошкодженні в кінці зони захисту першого ступеня попереднього захисту.

$$I_{с.з.2}^{II} \geq K_{від} I_{с.з.1}^I.$$

Другий ступінь не повинен спрацювати при пошкодженні за трансформатором підстанції Б^

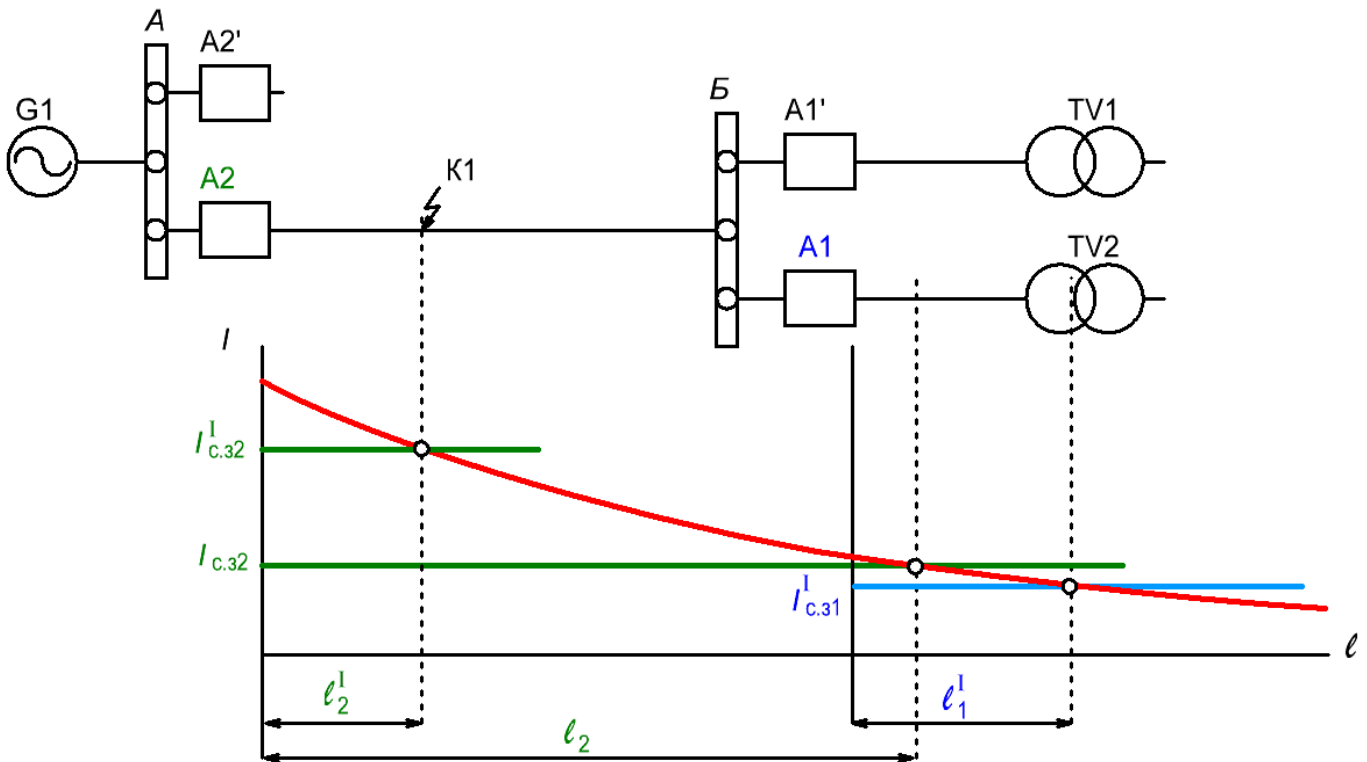
$$I_{с.з.2}^{II} \geq K_{від} * I_{к.т.мах}^{(3)}.$$

Приймається більше з двох розрахованих величин.  $K_{від} = (1,05–1,1)$ .

В зону дії другого ступеня захисту лінії АБ входить ділянка шин підстанції Б. Це забезпечує далеке резервування за відмови струмової відсічки захисту А1 при пошкодженні поблизу шин підстанції Б і близьке резервування за відмови струмової відсічки без витримки часу – захист А2. Чутливість перевіряється за мінімальним струмом пошкодження при металічному КЗ в кінці лінії, що захищається. Коефіцієнт чутливості повинен бути не менше 1,5.

## 5.6. Розширення зони захисту струмової відсічки

### 5.6.1. Неселективна відсічка



Неселективною відсічкою називається відсічка, яка діє за межами своєї лінії. Вона використовується для швидкого вимкнення КЗ в межах усієї лінії, що

захищається, коли це необхідно, згідно з умовами забезпечення стійкості, тобто коли при трифазному КЗ в кінці зони захисту першого ступеня залишкова напруга на шинах, де встановлений захист, менша за допустиму величину:

$$U_{\text{к.зал.}}^{(3)} = \sqrt{3} I_{\text{к}}^{(3)} l_2^1 X_{\text{пит.}} = \sqrt{3} I_{\text{с.32}}^1 l_2^1 X_{\text{пит.}}$$

Струм спрацювання неселективної відсічки захисту А2 відлагоджується від кінця зони захисту відсічок А1 і А1' попередніх елементів (в нашому випадку це Т1, Т1'):

$$I_{\text{с.32}} = K_{\text{від}} I_{\text{с.31}}^1 \text{ (або } K_{\text{від}} I_{\text{с.31}'}^1),$$

де  $K_{\text{від}} = 1, 1-1, 2$ .

При такій уставці відсічка захисту А2 охоплює лінію АБ, але не виходить за межі трансформаторів Т1 і Т1'. При КЗ біля будь-якого трансформатора (наприклад, Т1) в межах зони дії неселективної відсічки А2, остання спрацює одночасно з відсічкою пошкодженого трансформатора, оскільки їх час спрацювання однаковий і рівний 0,1. Тому крім трансформатора Т1 неселективно вимикається лінія АБ. При цьому запускається пристрій АПВ, який вмикає лінію і відновлює живлення шин підстанції Б.

### 5.6.2. Комбінована відсічка за струмом і напругою

Комбінована відсічка складається з максимального реле струму і трьох мінімальних реле напруги, які ввімкнені на відповідні лінійні напруги. Шляхом узгодження струму і напруги дається розширити зону захисту, забезпечуючи селективність при зовнішніх КЗ і будь-яких режимах роботи мережі. Струм спрацювання можна зменшити, забезпечивши мінімально допустиму чутливість при трифазному КЗ в кінці лінії (точка К1) в мінімальному режимі.

$$I_{\text{с.3}} \geq \frac{I_{\text{к1min}}^{(2)}}{K_{\text{чл}}}$$

де  $K_{\text{чл}}$  – коефіцієнт чутливості за струмом ( $K_{\text{чл}} = 1,5$ ).

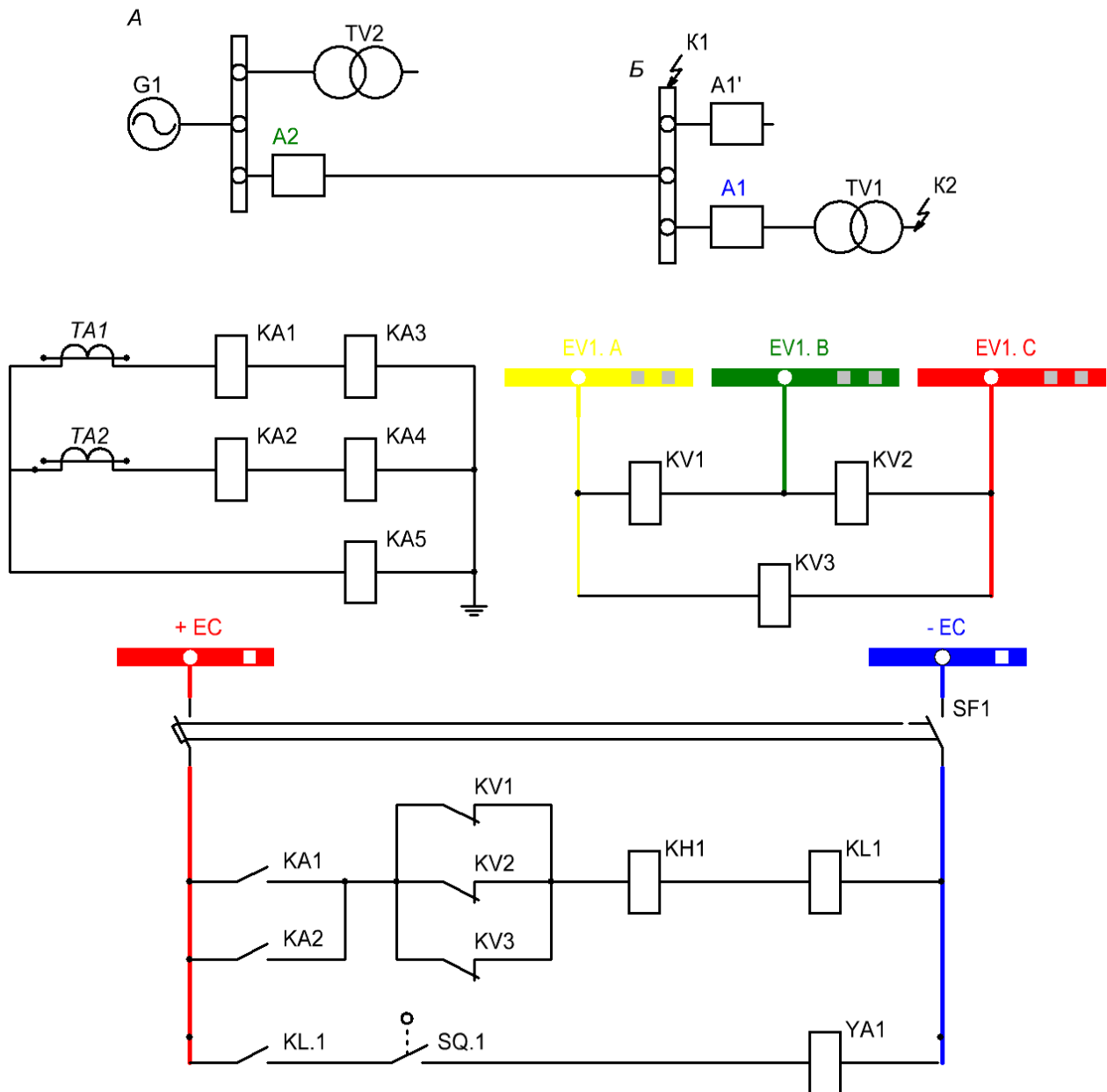
При цьому повинна забезпечуватись умова:

$$I_{\text{с.3}} \geq \frac{K_{\text{від}}}{K_{\text{п}}} I_{\text{роб.мах}}$$

Приймається більший з двох струмів спрацювання. Для запобігання неправильного спрацювання захисту при КЗ за трансформатором спрацювання захисту блокується (забороняється) за допомогою мінімального реле напруги. Для цього напруги спрацювання відлагоджується від залишкової напруги в місці встановлення захисту (шини підстанції А) при трифазному КЗ за трансформатором (точка К2).

$$U_{\text{с.3}} \leq \frac{\sqrt{3} * I_{\text{с.3}} (X_{\text{пит.}} * l + X_{\text{Т}})}{K_{\text{від}}} \quad (1)$$

$K_{\text{від}} = 1, 2$ .



Другою умовою є відлагодження від мінімальної робочої напруги:

$$U_{c.3.} \leq 0,7 U_{ном.} \quad (2)$$

Приймається менша з двох напруг спрацювання. Напруга спрацювання мінімального реле напруги:

$$U_{c.p.} = \frac{U_{c.3.}}{K_U}$$

Коефіцієнт чутливості перевіряється за максимальною вторинною напругою при трифазному КЗ в кінці лінії (точка K1) в максимальному режимі  $K_{\text{ч}}$  не менше 1,2

$$K_{\text{ч}U} = \frac{U_{c.p.}}{U_{2\max}^{(3)}}$$

Якщо за умовою чутливості напругу спрацювання необхідно прийняти більшою ніж розраховану, то треба збільшити і струм спрацювання захисту, щоб забезпечилося виконання умови (1). Комбінована відсічка спрацює, коли спрацюють обидва вимірні органи, тобто коли струм в лінії більший ніж струм

спрацювання захисту, а напруга на шинах менша, ніж напруга спрацювання захисту.

### **5.7. Характеристики струмових відсічок**

Переваги струмової відсічки без витримки часу:

1. Селективність дії в мережах складної конфігурації з будь-якою кількістю джерел живлення (забезпечується вибором струму спрацювання).
2. Швидке вимкнення найважчих КЗ біля шин станцій і підстанцій.
3. Простота схеми.

Недоліки:

1. Захист лише частини лінії.
2. Залежність зони захисту від режиму роботи системи і перехідного опору в місці КЗ

Тому перший ступінь застосовується для зменшення часу вимкнення найважчих пошкоджень. Струмова відсічка з витримкою часу має порівняно невеликий час спрацювання і здійснює близьке й далеке резервування, селективна в мережах з двостороннім живленням. Але її чутливість буває недостатньою, оскільки залежить від режиму роботи мережі. Струмові відсічки з витримкою часу і без витримки часу поширені в розподільчих мережах з одним джерелом живлення напругою до 35кВ інколи і при 110 кВ, коли захист виконується без витримки часу.

### **5.8. Струмовий захист зі ступеневою характеристикою витримки часу**

Захист зі ступеневою характеристикою витримки часу – це поєднання струмових відсічок і МСЗ, що забезпечує надійний захист усієї лінії. Такий захист може бути дво– і триступеневим. У двоступеневому – перший ступінь – це струмова відсічка без витримки часу, а друга – МСЗ. В триступеневому – перший ступінь без витримки часу, другий ступінь – відсічка з витримкою часу, третій ступінь – МСЗ.

Розглянемо радіальну схему з одностороннім живленням. Захист А1 обладнаний струмовою відсічкою без витримки часу і з витримкою часу. Захисти А2, А3 виконані триступеневими:

$$\begin{aligned} I_{с.з.2}^I &= K_{від}^* I_{к1max}^{(3)}, \\ I_{с.з.3}^I &= K_{від}^* I_{к2max}^{(3)}, \quad (t=0,1сек). \end{aligned}$$

Параметри спрацювання другого ступеня:

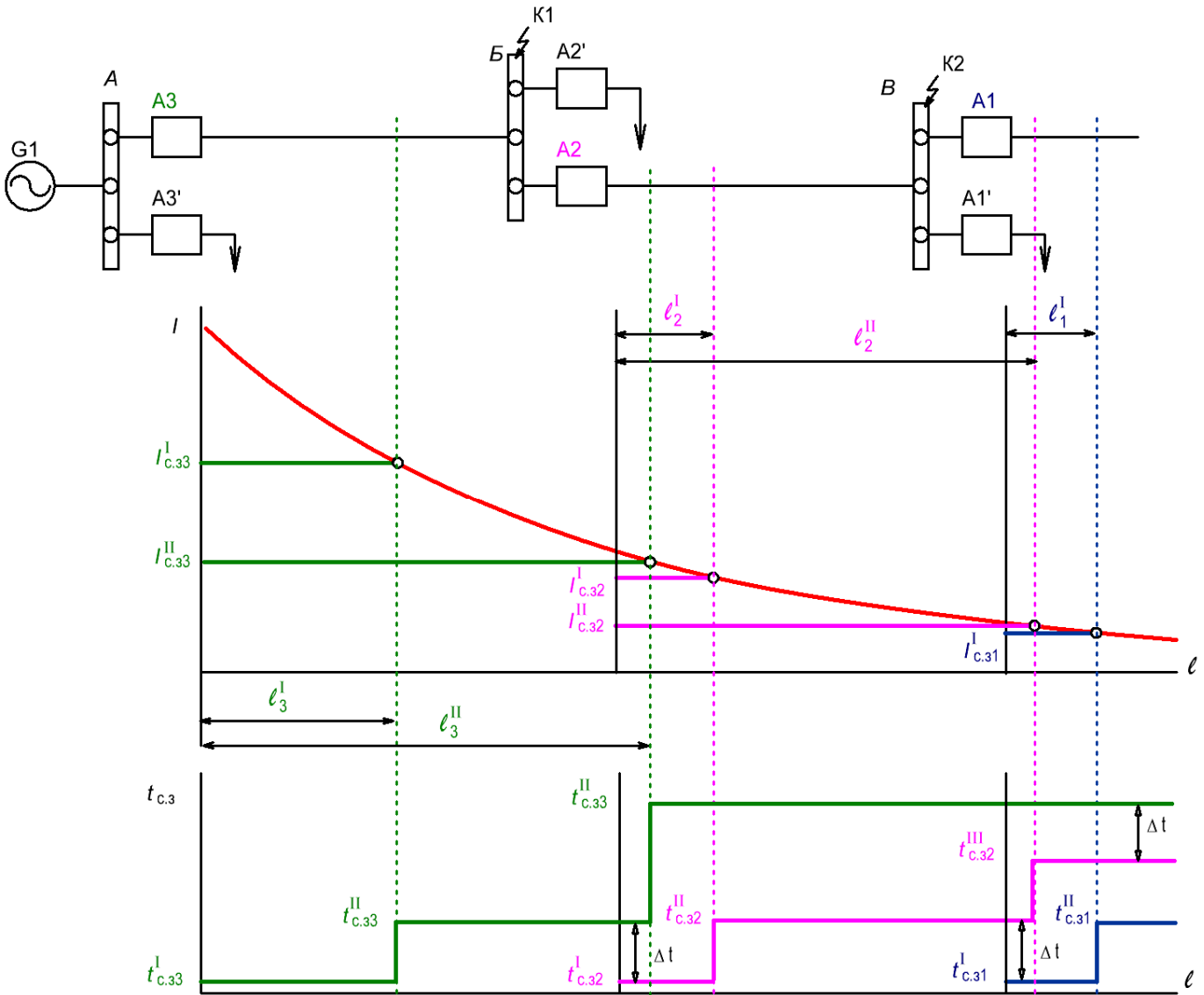
$$\begin{aligned} I_{с.з.2}^{II} &= K_{від}^* I_{с.з.1}^I, \\ I_{с.з.3}^{II} &= K_{від}^* I_{с.з.2}^I, \\ t_2^{II} &= t_3^{II} = t_1^I + \Delta t = t_2^I + \Delta t \approx 0,5 \dots 0,6 \text{ с.} \end{aligned}$$

Струм спрацювання третього ступеня вибирається як і для МСЗ. Витримка часу усієї ступені визначається за ступеневим принципом :



$$t_3^{III} = t_2^{III} + \Delta t.$$

При КЗ на початку лінії діє перший ступінь, в кінці лінії – другий ступінь, третій ступінь є резервним захистом при пошкодженнях на попередніх ділянках. Таким чином, струмовий захист зі степеневою характеристикою витримки часу є селективним і відносно швидкодіючим захистом.



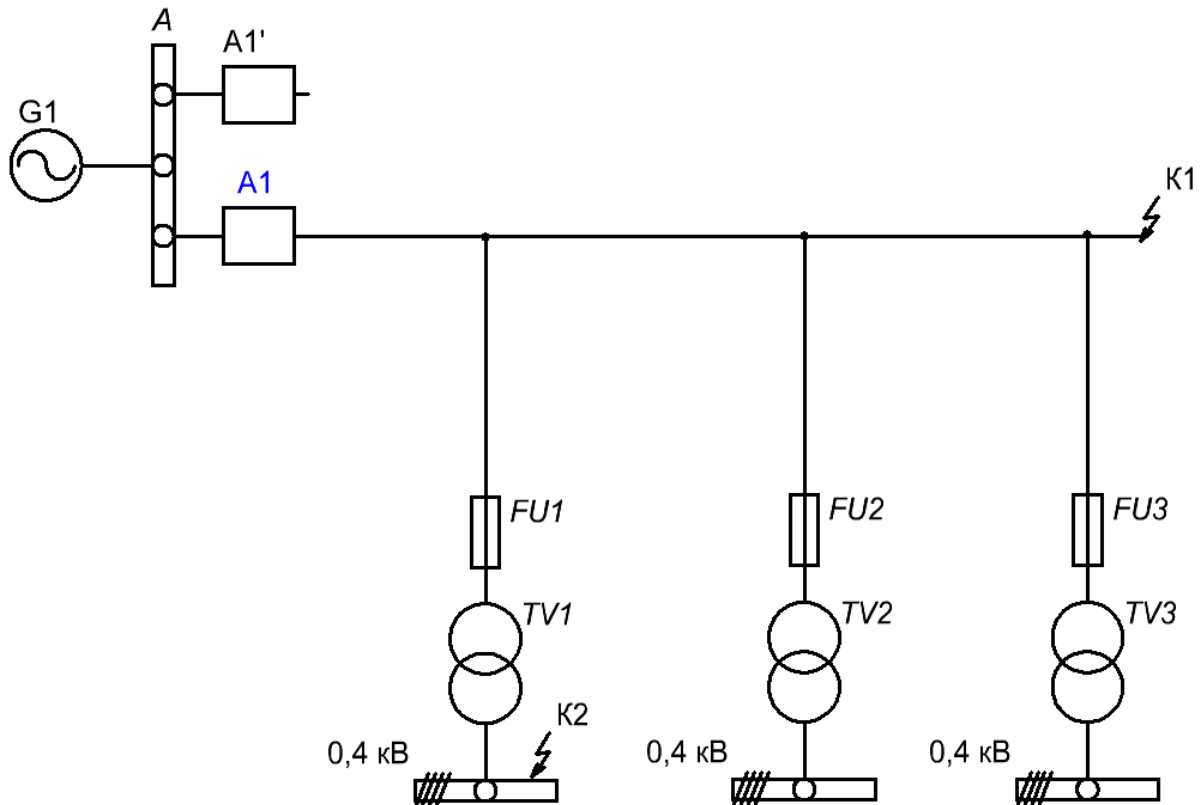
## 5.9. Схеми струмових захистів

Вимірна частина здійснюється за допомогою з'єднання ТС і вторинних вимірювальних органів. Вимірна частина усіх ступенів однакова, тому якщо захист має кілька ступенів, то їх вимірні органи з'єднуються послідовно. За наявності окремого органу витримки часу логічні частини другого і третього ступеня однакові. Тоді одна і та ж схема захисту може використовуватися для виконання струмової відсічки з витримкою часу або МСЗ. МСЗ і струмова відсічка без витримки часу мають однакові схеми, якщо вони виконані на вторинних реле прямої дії типу РТВ і РТМ. В системах електропостачання 6–10кВ

часто використовують комбіноване реле РТ–80 і РТ–90, які дозволяють виконати струмові захисти двоступеневими.

### 5.10. Струмовий захист з залежною від рівня третьої гармоніки струму витримки часу

Недоліки струмових відсічок особливо проявляються на лініях, виконаних сталевалюмінієвими стальними проводами малого перерізу з розташованими на цій лінії трансформаторами.



Пошкодження в кінці лінії, що захищається (точка K1), і K3 за трансформатором (точка K2) супроводжуються протіканням через захист А співмірних струмів. Тому важко отримати селективність і чутливість за необхідної швидкодії. Для виконання цих умов необхідно, щоб виконувалося одночасно дві умови:

$$I_{с.з} \leq \frac{I_{к1min}^{(3)}}{K_U}; \quad I_{с.з} \geq K_{від} * I_{к2max}^{(3)}.$$

Для цього необхідно, щоб відношення  $\frac{I_{к1min}^{(3)}}{I_{к2max}^{(3)}} \geq 2$ . Якщо це відношення

менше 2, то селективність вимкнення пошкодження за трансформатором можна отримати витримкою часу, що призводить до збільшення об'ємів рівноваги в місці пошкодження зменшення успішності АПВ і збільшення збитків від недовипуску електричної енергії. Тому в таких випадках використовуються захист з додатковою ознакою для визначення місця пошкодження за вищими

гармоніками. Їх основним джерелом є трансформатори мережі. При КЗ, особливо двофазному, на початку лінії (точка 3) трансформатори збуджуються несиметричною напругою і третя гармоніка струму х.х. досягає величини:

$$I_{3x}^{(2)} = (0,2 \dots 0,25) \sum I_{T.ном.}$$

Найінтенсивнішим джерелом вищих гармонік є дуга на стороні 0,4 кВ трансформатора, тоді через захист протікає струм :

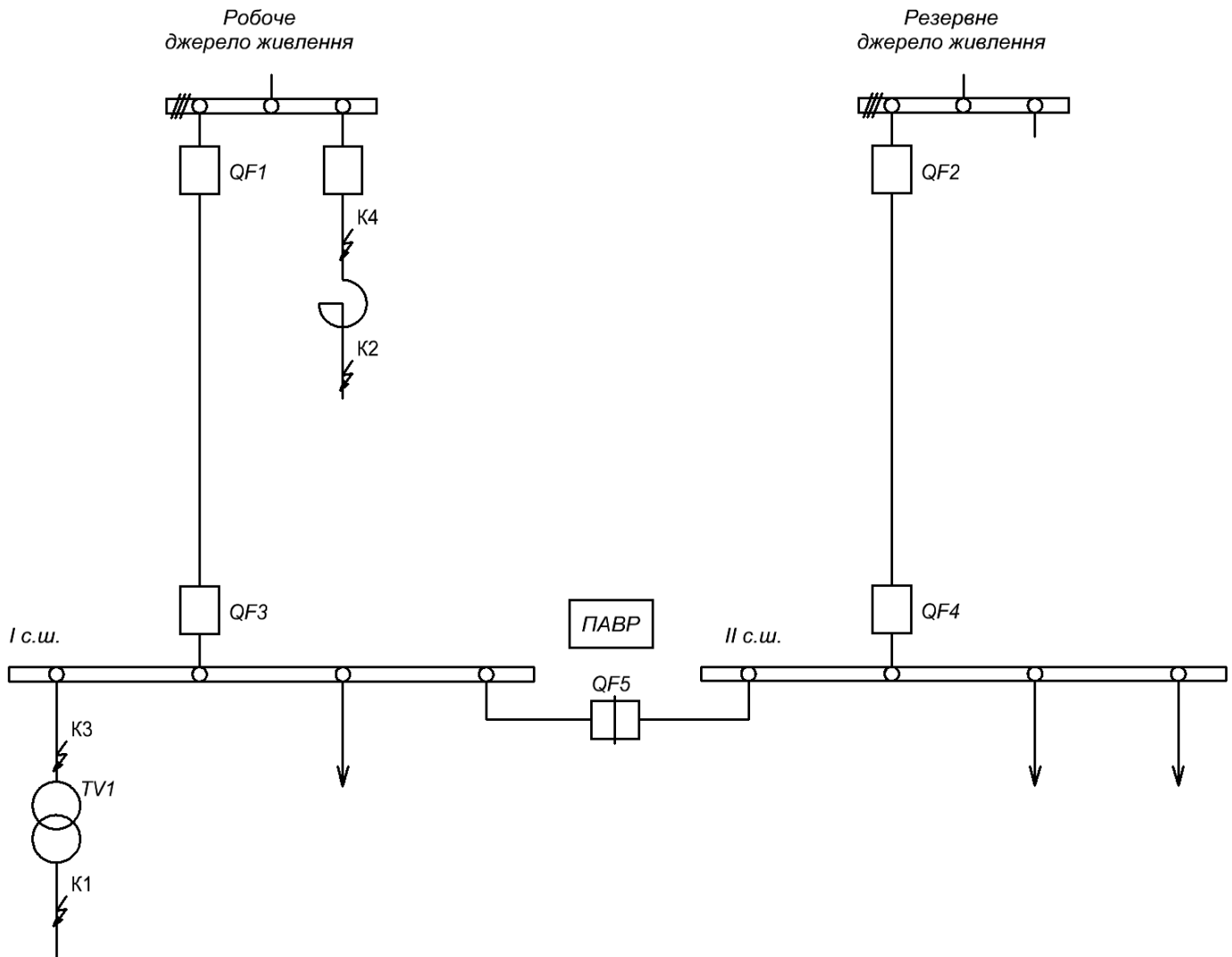
$$I_{з.д.}^{(2)} = (5 \dots 10) I_{3x}^{(2)}.$$

Таким чином величина третьої гармоніки струму в початковий момент пошкодження дозволяє відрізнити КЗ на лінії від пошкодження на трансформаторі. Перша ступінь виконується струмовою відсічкою без витримки часу, яка захищає головну ділянку в лінії. Струмовий захист з фільтром третьої гармоніки виконується як МСЗ з витримкою часу або без витримки часу. Щоб цей захист не працював при КЗ на лінії, що захищається, струм спрацювання приймається більшим ніж струм  $I_{3x}^{(2)}$ . При пошкодженні між запобіжником і трансформатором захист діє як і при КЗ на лінії без витримки часу. Селективність забезпечується сумісною дією захисту пристроєм АПВ. Після АПВ захист спрацьовує з витримкою часу.

## 6. СПОСОБИ ВИКОНАННЯ, ОСНОВНІ ОРГАНИ, РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЇВ АВТОМАТИКИ

### 6.1. Пристрої автоматичного введення резерву (АВР)

У системі електропостачання з двома і більше джерелами живлення доцільно працювати за розімкненою схемою. Це зменшує струм КЗ, спрощує релейний захист, зменшує втрати електричної енергії, але і зменшує надійність електропостачання. Відновити електропостачання споживачів, що втратили живлення, можна за допомогою пристрою АВР.



Розглянемо пристрій АВР на секційному вимикачеві QF5. Кожна секція живиться від окремого джерела. Пристрій АВР двосторонньої дії вмикає вимикач QF5, при вимкненні будь – якого джерела і зниженні напруги на будь – якій секції шин. Але перед цим пристрій АВР повинен вимкнути вимикач QF3 або QF4, якщо вони залишилися ввімкненими, при зникненні напруги на відповідній секції. Для цього вводиться пусковий орган у вигляді мінімального реле напруги. В загальному випадку пристрій АВР має і орган витримки часу. Пристрій АВР односторонньої дії використовується, якщо резервується одна секція (наприклад I). Тоді вимикач QF5 вмикається лише при зменшенні напруги на цій секції, але попередньо вмикається вимикач QF3. Мінімальний пусковий орган напруги не повинен працювати при зменшенні напруги на шинах, яке

викликане струмом КЗ і при перегорянні запобіжника в одній з фаз вимірного ТН. Напруга спрацювання реле визначається з двох умов:

$$U_{c.p1} \leq \frac{U_{к.зал.}}{K_{від} K_u}, \quad U_{c.p1} \leq \frac{U_{сзп}}{K_{від} K_u K_n},$$

де  $U_{к.зал.}$  – залишкова напруга на шинах, що резервується при КЗ за елементом з зосередженим опором (трансформатор, реактор; точка К1, К2);  $U_{сзп}$  – мінімальна робоча напруга на шинах, що резервуються при самозапуску двигунів;  $K_{від}=1,1 - 1,3$ ;  $K_n=1,25$

У практичних розрахунках приймають:

$$U_{c.p1} = (0,25 \dots 0,4) U_{ном} / K_u.$$

Витримка часу дії пристрою АВР:

$$t_{ABP1} \geq t_{с.з.мах} + \Delta t,$$

де  $t_{с.з.мах}$  – максимальна витримка часу захисту приєднань, які відходять від шин джерела живлення і від шин, що резервуються.

За наявності пристрою АВР  $t_{ABP1}$  необхідно збільшити на час дії АПВ, щоб автоматичне введення резерву здійснювалося лише після невдалого АПВ. Для запобігання невірних спрацювань при перегорянні запобіжників або інших несправностей в колі трансформатора напруги використовується два різних мінімальних реле напруги, які вмикаються на різні ТН. Додатково встановлюється мінімальне реле струму, яке вмикається на струм в лінії. Струм спрацювання реле:

$$I_{c.p} \leq \frac{I_{роб.мін}}{K_{від} K_I},$$

$$K_{від}=1,5.$$

Такий пусковий орган спрацює при одночасному зникненні напруги на шинах і струму в лінії. Дія пристрою АВР доцільна за наявності напруги на резервному джерелі живлення. Тому вмикається максимальне реле напруги, яке контролює наявність напруги на резервному джерелі. Воно вмикається до шин, які живляться від резервного джерела. При мінімальній робочій напрузі реле знаходиться в стані після спрацювання, дозволяючи дію пускового органу пристрою АВР

$$U_{c.p2} = (0,65 \dots 0,7) U_{ном} / K_u.$$

Для забезпечення одноразовості дії пристрою АВР і для того, щоб вимикач багаторазово не вмикався на існуюче КЗ, час дії на вмикання вимикача повинно бути:

$$t_{ABP2} = t_{вм.в} + t_{зап},$$

де  $t_{вм.в}$  – час ввімкнення вимикача;  $t_{зап}$  – час запасу (0,3–0,5)сек.

Якщо при дії АВР не забезпечується самозапуск двигунів, то необхідно вимкнути частину навантаження.

## 6.2. Пристрій АПВ

Згідно з ПУЕ, пристрої АПВ обладнуються повітряні і змішані повітрянокабельні лінії напругою понад 1кВ. За наявності відповідної комутаційної апаратури АПВ розрізняються:

- за кількістю фаз, що вмикаються пристроєм АПВ (три і однофазним);
- за наявністю перевірки синхронізму;
- за способом дії на привод вимикача (механічні і електричні);
- за кратністю дії (одно і багато разові).

Вимоги до АПВ:

1. Постійна готовність і спрацювання при усіх випадках аварійного вимкнення вимикача, крім випадків, коли вимикач вмикається резервним захистом відразу після вмикання його персоналом або при оперативних вимкненнях.

2. Мінімальний час спрацювання для зменшення тривалості перерви живлення. Для успішної дії АПВ необхідний час для відновлення готовності приводу до роботи, деіонізації середовища в точці пошкодження, готовності вимикача для відновлення вимикаючої здатності. Визначальним є час готовності приводу. Тоді час спрацювання АПВ визначається:

$$t_{\text{АПВ.с}} = t_{\text{гп}} + t_{\text{зап.}}$$

де  $t_{\text{АПВ.с}}$  приймається рівним (0,5–0,8)сек.

В окремих випадках, коли велика ймовірність пошкодження лінії при падінні дерев, витримка часу приймається завищеною (2–3 сек, що збільшує успішність АПВ).

3. Автоматичне повернення пристрою АПВ в стан готовності до нової дії після ввімкнення в роботу вимикача. Для цього необхідно, щоб пристрій багаторазового не вмикався на КЗ, що не зникло:

$$t_{\text{АПВ.п}} \geq t_{\text{АПВ.с}} + t_{\text{ВМВ}} + t_{\text{с.з.макс}} + t_{\text{в.в}} + t_{\text{зап.}},$$

де  $t_{\text{в.в}}$  – час вимкнення вимикача.

Крім цього, пристрій повинен бути готовим до дії не раніше ніж це допустимо згідно з умовою роботи вимикача після успішного вмикання його пристроєм АПВ. До одноразового АПВ вимоги третього пункту використовуються якщо  $t_{\text{АПВ.п}} = 15\text{--}25$  сек. Для АПВ багаторазової дії в час АПВ після другого циклу повинен бути 60–100 сек. Схеми електричного АПВ виконують на постійному або змінному оперативному струмі. Механічне АПВ вантажних і пружинних приводів не потребують оперативного струму. Вони діють при спрацюванні влаштованих реле прямої дії і вмикають вимикач, що вимкнувся без витримки часу. При встановленні АПВ на лінії з двостороннім живленням необхідно врахувати необхідність її вимкнення з двох сторін, тому АПВ встановлюється з двох сторін.

У загальному випадку необхідно врахувати недопустимість несинхронного повторного вмикання. Це забезпечується використанням АПВ з контролем механізму. Але, як правило, в СЕП є один шунтуючий зв'язок і вимкнення однієї лінії не призводить до зникнення синхронізму, тому в таких випадках можна використовувати прості АПВ.

АПВ дозволяє зменшити час спрацювання захисту при неможливості реалізації швидкодіючого захисту і за наявності не селективного захисту, селективно вимикати пошкоджену лінію.

### **6.3. Пристрій автоматичного частотного розвантаження**

У разі відсутності в системі резерву активної потужності вимкнення резерву генераторів ввімкненням нових споживачів, супроводжується зменшенням частоти. Для відновлення заданого режиму роботи автоматично вимикається частина найменш відповідальних споживачів з допомогою пристрою АЧР. Він виконується реагуючим на зміну абсолютної величини частоти або на швидкість її зміни. Вимірним органом є реле частоти. Щоб уникнути вимкнення лишніх споживачів при малих дефіцитах активної потужності, навантаження розбивається на черги. Пристрій АЧР1 є швидкодіючим з однією для усіх черг витримкою часу 0,3 сек., і різними уставками спрацювання за частотою від 49,2 до 46,5 Гц. Мінімально допустима ступінь селективності 0,1 Гц. Потужність споживачів, ввімкнених до АЧР1, визначається за формулою:

$$P_{*АЧР1} = \Delta P_{*д} - \Delta P_{*р} + 0,05,$$

де  $\Delta P_{*д}$  – дефіцит генерованої потужності;  $\Delta P_{*р}$  – резерв активної потужності на електричних станціях, що працюють

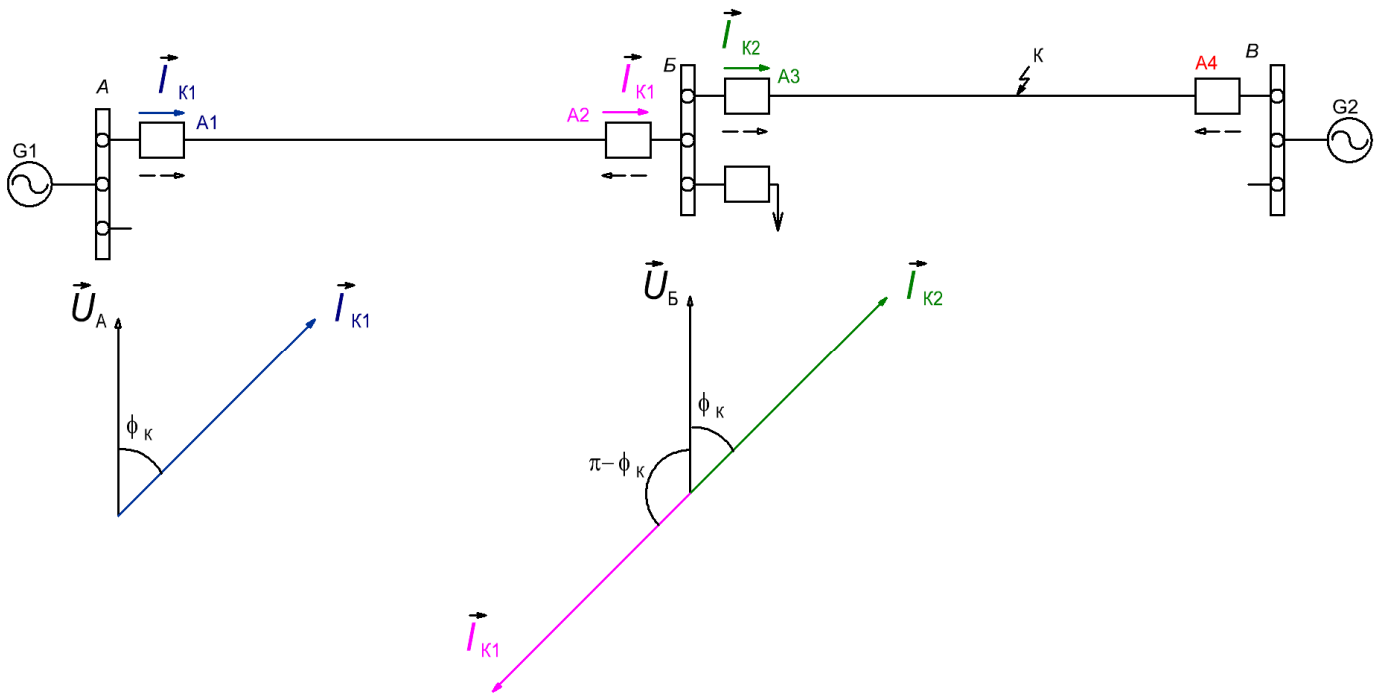
За базисну прийнята споживана потужність енергосистеми у вихідному режимі. Призначення АЧР1 є стримування зменшення частоти на початку аварії і недопускання навіть короточасного зменшення нижче 45 Гц. Пристрій АЧР2 має черги з однаковими уставками 49 Гц, які відрізняються витримками часу від 50–10 сек до 60–90 сек, ступеня селективності 3 сек. Якщо під час дії АЧР1 не вдається відновити і вона зависає на недопустимому рівні (менше 48 Гц) , то АЧР2 з відповідними витримками часу вмикає додаткове навантаження. Сумарне навантаження, яке вимикається до АЧР2:

$$P_{*АЧР2} = 0,4 * P_{*АЧР1}.$$

Відповідальніші споживачі під'єднуються до черг АЧР1 з меншими уставками за частотою, а до черг АЧР2 з більшими витримками часу. Для зменшення сумарної потужності, що вимикаються, суміщають дію АЧР1 і АЧР2. При цьому одне і те ж навантаження під'єднується до черг обох пристроїв. Після відновлення частоти діє пристрій частотного АПВ, що фіксується замиканням контактів реле частоти. Відбувається повторне вмикання споживачів. Уставки реле приймаються рівними 49,5–50 Гц, мінімальна витримка часу на вмикання становить 10–20 сек, ступінь селективності 5 сек. Пристрої АЧР і частотного АПВ застосовуються в мережах 6–10 кВ на приєднання з вимикачами, обладнаними пружинними і вантажними приводами.

## 7. СТРУМОВІ НАПРАВЛЕНІ ЗАХИСТИ

### 7.1. Принцип дії і основні органи струмового направленого захисту



Для селективної дії в мережах з двостороннім живленням струмовий захист доповнюється вимірним органом напрямку потужності. Захист називається направленим, якщо він реагує на величину струму і напрям (знак) потужності КЗ в місці його встановлення. Захист має, як правило, орган витримки часу. Такий захист спрацює у разі виконання двох умов:

1. Струм КЗ перевищує струм спрацювання.
2. Напрямок (знак) потужності КЗ відповідає КЗ в напрямку, що захищається.

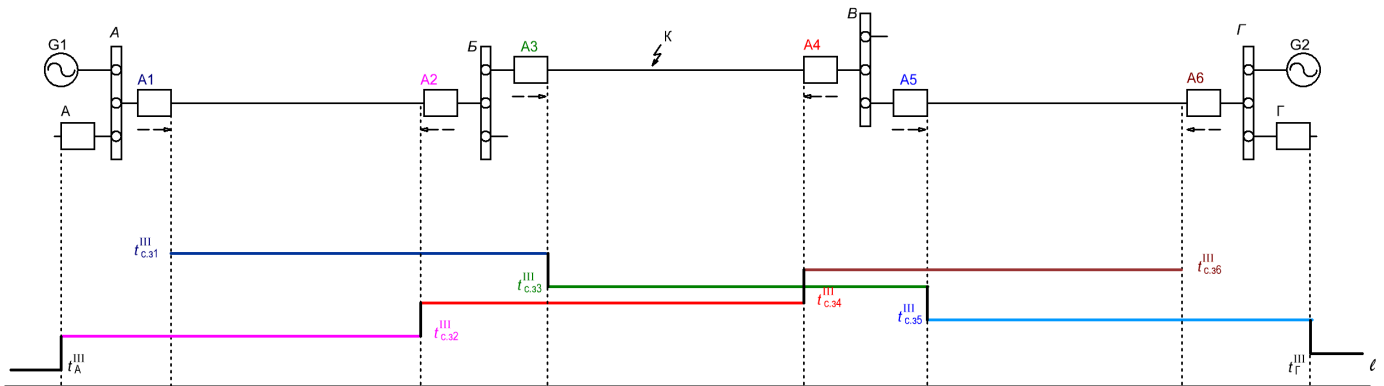
Умовно додатній напрям струму КЗ, що захищається, задається від шин в сторону лінії, яка захищається. Напрямок потужності КЗ характеризується кутом між струмом КЗ і напругою в місці встановлення захисту. Кут  $\phi_K$  зсуву струму КЗ відносно напруги вважається додатнім якщо вектор струму відстає від вектора напруги. Захист АЗ виконується так, щоб він діяв на вимкнення лише при кутах між струмом і напругою, які відповідають КЗ на лінії Л2 і не діє при пошкодженнях на лінії Л1. Тому реле напрямку потужності при підведенні до нього напруги  $U_B$  і струму  $I_{K2}$  спрацює при кутах  $\phi_K$  (рис. б). Захист А1 спрацює при підведенні напруги  $U_A$  і струму  $I_{K1}$  (рис. а). Захист А2 при пошкодженні в точці К не спрацює, оскільки струм  $I_{K1}$  направлений на зустріч заданому умовному додатньому напрямку. Кут між векторами  $U_B$  і струмом  $I_{K1}$  становить  $180^\circ - \phi_K$  (рис. б).

Для селективного вимкнення лінії Л2 необхідно узгодити параметри захистів А1 і АЗ. Завдяки органу напрямку потужності усі захисти розбиваються на дві групи, не пов'язані між собою. На схемі мережі, яка наведена на рисунку, можна розділити на такі групи:

- I група – захисти А1, АЗ,
- II група – захисти А2, А4.



## 7.2. Вибір параметрів максимального струмового направленого захисту



Для вибору витримки часу захист розбивається на дві групи:

1. A2, A4, A6,
2. A5, A3, A1.

У межах кожної групи витримки часу вибирається за ступеневим принципом. Мінімальну витримку мають захисти A2 і A5. Вони відлагоджуються від захисту приєднань підстанції A та Г. За наявності на підстанції кількох приєднань захист, що має найбільшу витримку часу, може не мати органу напрямку потужності, оскільки селективність його дії при КЗ менших приєднаннях забезпечуються витримкою часу. На підстанції Б  $t_3 > t_2$ . На підстанції В  $t_4 > t_5$ . Тому захисти A3 і A4 можна виконати без органу напрямку потужності. На кожній ділянці обов'язково повинен мати направлений орган лише один захист, той, який має меншу витримку часу. На лінії АВ  $t_1 > t_2$ , а на ВГ  $t_6 > t_5$ . Захисти A1 і A6 можна виконати без органу напрямку потужності.

При однаковій витримці часу обидва захисти обох кінців ліній можуть бути ненаправленими. На лінії БВ  $t_3 = t_4$ , тому захисти A3 і A4 можна виконати ненаправленими. Отже, захисти A1, A3, A4, A6 можуть виконуватися без органу напрямку потужності. Часто передбачається орган напрямку потужності, щоб при зміні уставок була можливість зробити захист при необхідності направленим.

Струм спрацювання відлагоджується:

1. Від надперехідного струму після вимкнення, після зовнішнього КЗ:

$$I_{c.3} \geq \frac{K_{\text{від}} * K_{\text{сзп}}}{K_{\text{п}}} * I_{\text{роб. max}}.$$

При визначенні струму  $I_{\text{роб. max}}$  враховується лише максимальний режим, який відповідає напрямку потужності від шин до лінії при вимкненні однієї з ділянок мережі.

2. Від струму навантаження:

$$I_{c.3} \geq \frac{K_{\text{від}}}{K_{\text{п}}} * I_{\text{нав.}}$$

де  $I_{\text{нав.}}$  – струм що проходить в нормальному режимі незалежно від напрямку потужності.

3. Від перехідних струмів після вдалого АПВ пошкодженої ділянки:

$$I_{с.з} \geq K_{від} * K_{сзп} * I_{роб.мах}.$$

4. Погодження захистів за чутливістю:

$$I_{с.36} > I_{с.34} > I_{с.32}, \\ I_{с.31} > I_{с.33} > I_{с.35}.$$

Тобто, захист, що має витримку часу, має і менший струм спрацювання. Таким чином, струм спрацювання, як і витримки часу, повинні задовольняти зустрічно ступеневому принципу і вибираються за умовою, яка дає більшу величину струму.

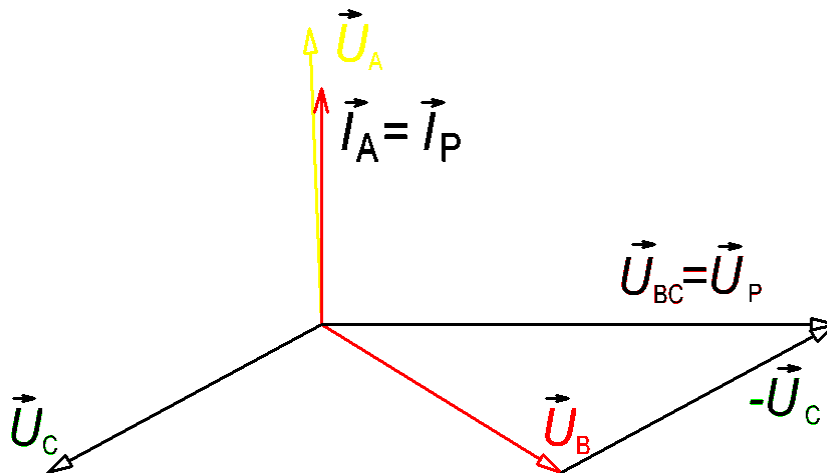
### 7.3. Схеми вмикання реле напрямку потужності

Під схемою вмикання реле напрямку потужності розуміють поєднання вхідних напруг і струму. Схема повинна забезпечувати:

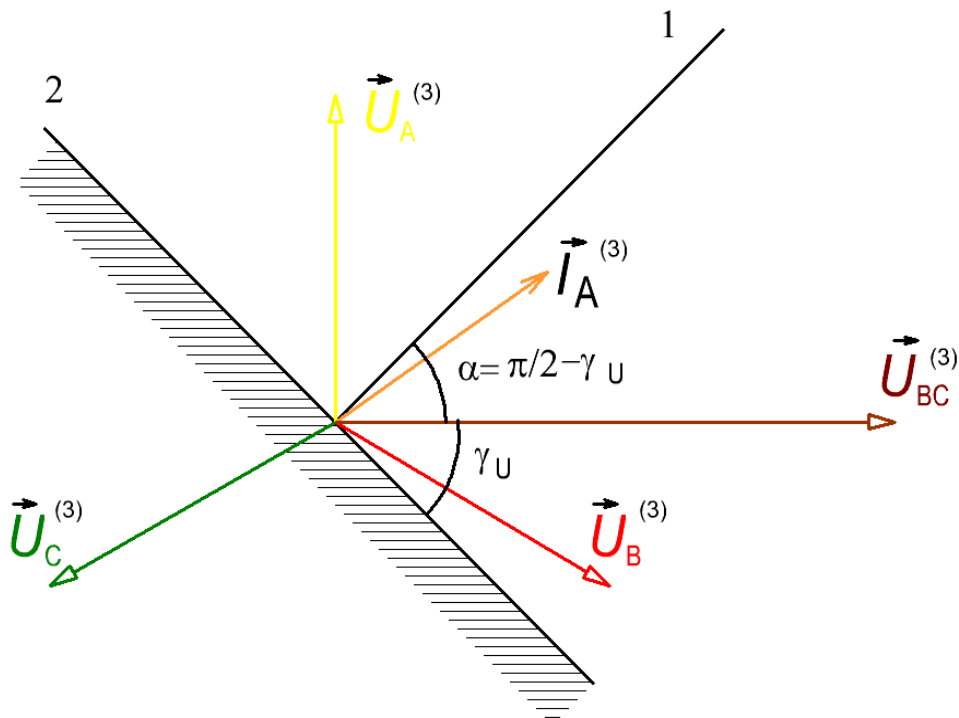
1. Правильну фіксацію напрямку потужності КЗ при усіх пошкодженнях, на які захист повинен реагувати.

2. Якомога більша потужність на вході реле при КЗ для збільшення чутливості і надійності її захисту.

У схемах струмового направленої захисту реле напрямку потужності вмикається на повні струму і напруги фаз. Використовується також схеми з вмиканням реле на складові усіх послідовностей. Найпоширенішою є  $90^0$  схема вмикання реле напрямку потужності. Схема називається за величиною кута між векторами струму і напруги, які підводяться до реле в нормальному симетричному режимі, коли вектор струму і напруги однойменних фаз співпадають.



При цьому використовується таке поєднання фазних струмів і міжфазних напруг: до одного реле підводиться струм  $I_A$ , напруга  $U_{BC}$ , до другого –  $I_B$ ,  $U_{AC}$  і до третього –  $I_C$ , і  $U_{AB}$ . (1 – лінія максимальної чутливості, 2 – лінія нульової чутливості);  $\gamma_U$  – кут між вектором напруги підведеної до реле і вектором струму, якій протікає через напругову обмотку.



При трифазному КЗ до реле напряму потужності підводяться струм  $I_A^{(3)}$  і напруга  $U_p^{(3)}$ . Зона роботи реле визначається положенням лінії нульової чутливості, яка проводиться під кутом  $\gamma_U$  до вектора  $U_p^{(3)}$ . Оскільки вектори  $I_A^{(3)}$  і  $U_p^{(3)}$  розташовані в зоні спрацювання реле при усіх можливих співвідношеннях активного і реактивного опору ділянки від місця вмикання реле до точки КЗ, то реле має завжди обертальний додатній момент. Воно може не спрацювати при КЗ в мертвій зоні, яка утворюється при металічному трифазному КЗ біля місця вмикання реле, коли напруга яка підводиться до реле, дорівнює нулю.

Властивості схеми:

1. Чітке спрацювання при три- і двофазному КЗ для три- і двофазного захисту.
2. Наявність мертвої зони.

Можливе неправильне спрацювання при три- і однофазному КЗ на землю, коли реле ввімкнене на непошкоджену фазу.

Для реле повинна виконуватись умова:

$$+30^{\circ} \leq \varphi_{p.m.} \leq +60^{\circ}.$$

Тому застосовуються пофазний пуск, а струми спрацювання МСЗ вибираються з урахуваннями відлагодження від струмів у непошкоджених фазах. Мертва зона направленої захисту перекривається зоною дії ненаправленої струмової відсічки.

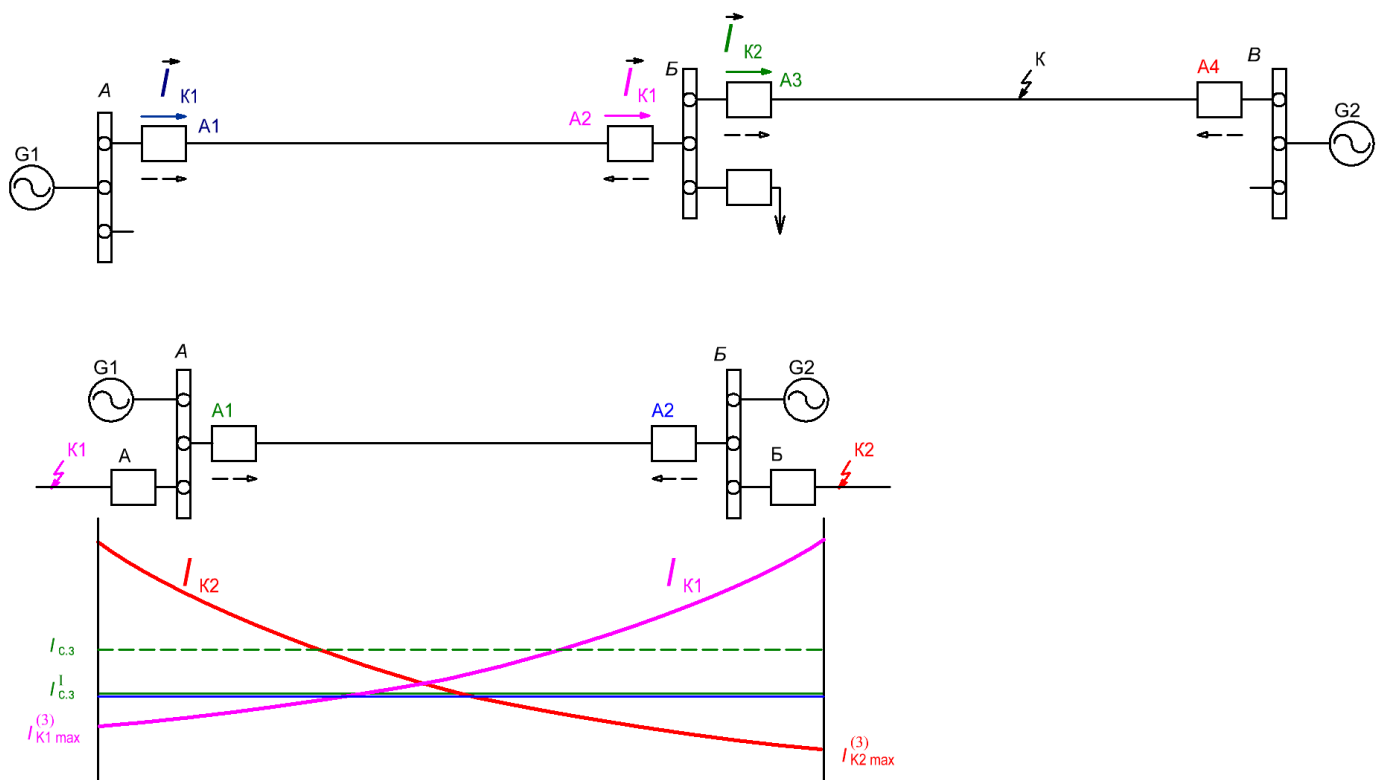
#### **7.4. Схеми і сфера використання максимального струмового направленої захисту**

У загальному випадку струмовий направлений захист – це струмовий ненаправлений захист, обладнаний органом напряму потужності. В розподільчих мережах до 35 кВ захист виконується двофазним і є основним захистом від

багатофазних КЗ В мережах з глухо заземленою нейтраллю він використовується як захист від багатофазних КЗ. Контакти вивідного реле струму з'єднуються послідовно з контактами реле напругу потужності. Це запобігає неправильному спрацюванню захисту при ввімкненні на струм непошкодженої фази. Орган напругу потужності може бути спільним для усіх або частини ступеней.

Максимальний струмовий наведений захист в поєднанні з ненаправленим забезпечують селективність спрацювання в мережі, що складається з ланцюжка одинарних ліній в простій кільцевій мережі з одностороннім живленням або з діагональними лініями, які з'єднують джерело живлення з іншими підстанціями. Даний захист застосовується як основний переважно в кільцевих мережах з однією точкою живлення до 35 кВ, якщо витримки часу не перевищують допустимі величини. В мережах з іншими напругами він використовується в основному як резервний. Вимоги до чутливості такі ж самі як ненаправленого струму захисту.

### 7.5. Струмові наведені відсічки без витримки часу і з витримкою часу



При КЗ в точці  $K_a$  від системи С2 через шини підстанції Б протікає струм  $I_B$ , який в трифазному максимальному режимі буде рівний  $I_{К.ЗОВ.М.А.Х.Б.}^{(3)}$ . При такому струмі захисти А1 і А2 не повинні спрацювати. Тому струми спрацювання вибираються за умовою:

$$I_{C.32} > I_{C.31} = I_{C.31}^{(3)},$$

При КЗ в точці  $K_B$  від системи С1 через шини підстанції А протікає струм  $I_A$ , від якого теж відлагоджується захист:

$$I_{с.3} \geq I_{к.зov.мах.Б}^{(3)}$$

Таким чином, струм спрацювання першого ступеня вибирається за більшим струмом пошкодження, тобто за струмом  $I_{к.зov.мах.Б}^{(3)}$ .

$$I_{с.3} \geq K_{від} I_{к.зov.мах.Б}^{(3)}$$

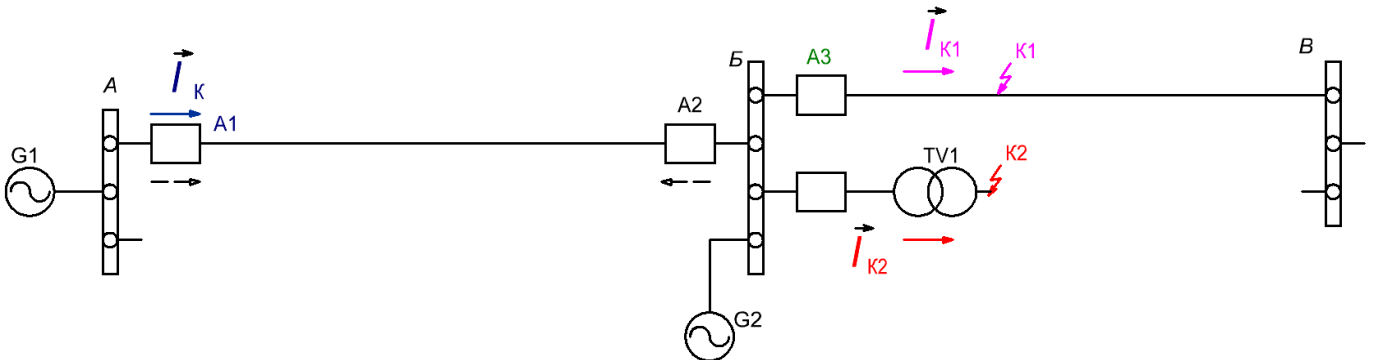
Другою умовою є відлагодження від максимального вирівнювального струму при коливаннях енергосистем:

$$I_{с.3} \geq K_{від} + I_{вир.мах},$$

$$I_{вир.мах} = \frac{2E}{X_{1A} + X_{1л} + X_{1Б}},$$

де  $X_{1A}$  – опір прямої послідовності системи С1 до шин підстанції А;  $X_{1Б}$  – опір прямої послідовності систем С2 до шин підстанції Б;  $X_{1л}$  – опір прямої послідовності лінії, що захищається.

За струмом спрацювання приймається більший струм визначений з двох умов. Для збільшення зони захисту, якщо струм спрацювання  $I'$  струмова відсічка доповнюється органом напряду потужності. Направленим доцільно виконати захист А1. Тоді для нього КЗ в точці К<sub>А</sub> можна не враховувати (захист відлагоджується за допомогою реле напряду потужності) і струм спрацювання першого ступеня відлагоджується від  $I_{к.зov.мах.А}^{(3)}$ . Захист А2, як і в попередньому випадку, відлагоджується від струму  $I_{к.зov.мах.Б}^{(3)}$ . Таким чином, на лінії з двостороннім живленням направлена лише перша відсічка зі сторони якої струм зовнішнього максимального КЗ менший.



Час спрацювання другої ступені захисту А1 відлагоджується від часу спрацювання першої ступені А2 усіх ліній, що відходять від шин протилежної підстанції Б і від швидкодіючого захисту А3, трансформаторів під'єднаних до цих шин. Витримка часу другого ступеня не перевищує 0,5 сек. Струм спрацювання вибирається за найбільшим струмом  $I_k^{(3)}$ , що проходить через лінію, яка захищається при пошкодженні в кінці захисної зони першої ступені попередньої лінії (точка К1) і при КЗ на шинах низької напруги трансформаторів (точка К2). Струм  $I_k^{(3)}$ , що проходить в місці встановлення А1 менший, ніж струми  $I_{к.л}^{(3)}$  і  $I_{к.т}^{(3)}$  за рахунок струму підживлення від генератора G2. Відношення

$$\frac{I_k^{(3)}}{I_{к.л}^{(3)}} = K_{р.л},$$

$$\frac{I_k^{(3)}}{I_{к.т}^{(3)}} = K_{р.т},$$

називається коефіцієнтами струморозподілу. Тоді струм спрацювання другої ступені захисту А1 визначається за умовами:

$$I_{с.31} \geq K_{від} * K_{р.л} * I_{с.32},$$

$$I_{с.31} \geq K_{р.т} * I_{к.т}^{(3)}.$$

## **7.6. Струмовий направлений захист із ступінчатою характеристикою витримки часу**

Цей захист створюється з поєднанням струмових направлений відсічок з максимальним струмовим направленим захистом. Наявність органу напряду потужності дозволяє при виборі струмів спрацювання враховувати лише ті режими, при яких потужність направлена від шин в лінію. Струмовий направлений захист із ступінчатою характеристикою витримки часу забезпечує селективне вимкнення пошкодженої ділянки в радіальних мережах з кількома джерелами живлення і в кінцевих мережах з одним джерелом живлення. Але у зв'язку з зустрічно–ступеневим принципом вибору витримки часу третього ступеня часу вимкнення пошкодженої ділянки біля джерела живлення є значним. Це обмежує застосування третьої ступені як окремого захисту.

## **8. ДИСТАНЦІЙНИЙ ЗАХИСТ**

### **8.1. Призначення, принцип дії, основні органи дистанційного захисту**

В СЕП залежно від режиму роботи і виду КЗ змінюються струми пошкоджень. Тому чутливість струмових і струмового направлених захистів зони дії відсічок не залишаються постійними. Можуть бути недостатніми для надійного вимкнення пошкодження і не завжди задовольняти вимогам селективності, та чутливості та швидкодії. Характеристична величина дистанційного захисту не залежить від режиму роботи СЕП, а час його дії визначається віддаллю від місця встановлення захисту до місця КЗ. Цей захист реагує на відношення напруги до струму в місці його встановлення, тобто на опір на затискачах реле опору. Дистанційний захист звичайно виконується триступеневим з відносною селективністю. На лініях з двостороннім живленням він виконується направленим, а витримки часу відповідних ступеней вибираються згідно з зустрічно ступеневим принципом.

Вимірні органи першого та другого ступеня – це ненаправлені або направлені реле опору (вони називаються дистанційними органами). Вимірним органом третього ступеня є максимальне реле струму або мінімальне реле опору. Воно є одночасно пусковим органом усього захисту і спрацює при пошкодженні в будь-якій зоні, здійснюючи пуск захисту. Простота пускового органу струму обумовлює в дистанційних захистах мереж до 35 кВ. Як правило, він вмикається на фазні струми. Для збільшення чутливості він інколи вмикається на струм зворотної послідовності.

Пусковий орган опору реагує на відношення напруги до струму, тому чітко відрізняє перевантаження (відношення мало змінюється) від КЗ (помітно зменшується). На лініях 35 кВ і коротких малозавантажених лініях 110 кВ застосовується пусковий орган повного опору. На довгих завантажених лініях 110 кВ і вище використовується направлений пусковий орган опору. Окремий орган напруги потужності встановлюється, якщо пусковий і дистанційний органи не мають напругу дії. Орган витримки часу формує триступеневу характеристику.

Окреме реле часу першого ступеня не застосовується і час її дії визначається лише власним часом спрацювання пускового і вимірного органів.

### **8.2. Вибір параметрів спрацювання дистанційного захисту з триступеневою характеристикою витримки часу**

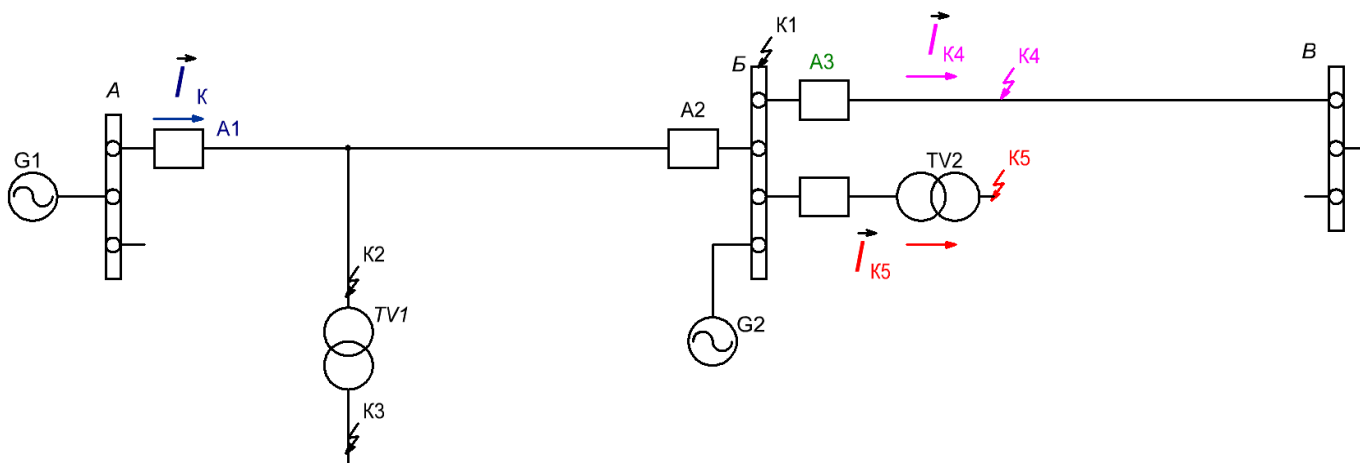
Опір спрацювання першого ступеня захисту  $A_2$  вибирається таким чином, щоб він не працював при:

Коротке замикання на шинах в кінці лінії, що захищається (т.К1):

$$Z_{с.32}^1 \leq K_{від} * Z_{пл} \quad (1)$$

При КЗ перед Т1 ввімкненням через вимикач, який вмикається власним захистом:

$$Z_{с.32} \leq K_{від} * Z_{діл} \quad (2)$$



3. При пошкодженні трансформатора Т1, який ввімкнений без вимикача на високій стороні (точка К3):

$$Z_{с.32}^1 \leq K_{від} (Z_{діл} + Z_{Т1}), \quad (3)$$

де  $Z_{л}$  – опір лінії АБ, що захищається;  $Z_{л}$  – опір ділянки лінії від місця встановлення захисту до точки приєднання трансформатора Т1;  $Z_{Т1}$  – опір трансформатора Т1;  $K_{від} = 0,8 \div 0,85$ .

Для лінії з відгалуженнями без високовольтичних вимикачів приймається найменша величина  $Z_{с.3}^I$  визначена за формулами (1) і (3), а для ліній, що мають відгалуження з вимикачами, визначальною є умова (2). Перший ступінь дистанційного захисту виконується без витримки часу.

Друга ступінь не повинна спрацювати при К3 в кінці першої зони захисту А1 попередньої лінії БВ (т. К4) і при К3 за трансформатором Т2 (т. К5):

$$Z_{с.32}^{II} \leq K_{від} (Z_{л} + K_{від} * Z_{с.31}^I / K_{р.н}),$$

$$Z_{с.32}^{II} \leq K_{від} (Z_{л} + (1 - \Delta K_{Тмакс})^2 Z_{Т2} / K_{р.т}),$$

де  $Z_{с.31}^I$  – найменший опір спрацювання I ступені суміжної лінії, яка відходить від шин ПС Б;  $Z_{Т.2}$  – опір найпотужнішого трансформатора підстанції Б;  $\Delta K_{Т.макс}$  – максимальне відносно відхилення коефіцієнта трансформації обумовлене регулюванням;  $K_{р.л}$ ,  $K_{р.т}$  – коефіцієнти струмозподілу, які враховують нерівність струмів в місці пошкодження і в місці встановлення захисту.

Витримка часу другого ступеня вибирається на ступінь селективності більшою, ніж час спрацювання першого ступеня дистанційного захисту лінії БВ і швидкодіючого захисту трансформаторів підстанції Б. Коефіцієнт чутливості:

$$K_{ч} = \frac{Z_{с.32}^{II}}{Z_{л}} \geq 1,25.$$

Якщо чутливість не забезпечується, тоді збільшують опір спрацювання захисту. Для запобігання спрацювання при К3 в межах зони другого ступеня дистанційного захисту лінії БВ витримка часу збільшується до величини:

$$t_2^{II} = t_1^{II} + \Delta t.$$

Струм спрацювання реле струму пускового органу визначається як і для реле струму максимального струмового направленої захисту. При використанні



направленого реле опору, третій ступінь відлагоджується від мінімального можливого опору в робочому режимі з урахуванням самозапуску двигунів:

$$Z_{с.32}^{III} \leq \frac{U_{роб. min}}{\sqrt{3} I_{роб. max} K_{від} K_{п} K_{СЗП} \cos(\varphi_{роб} - \varphi_{л})},$$

де  $U_{роб. min}$  – мінімальна робоча напруга мережі;  $I_{роб. max}$  – максимальний струм навантаження, що проходить через лінію;  $K_{п}$  – коефіцієнт повернення мінімального реле опору;  $K_{СЗП}$  – коефіцієнт самозапуску, який враховує зменшення опору підведеного до реле при збільшенні струму і зменшенні напруги при самозапуску;  $\varphi_{роб}$  – кут зсуву між векторами напруги і струму;  $\varphi_{л}$  – кут опору.

Для пускових реле повного опору  $\varphi_{роб} - \varphi_{л} = 0$ . Витримка часу третього ступеня визначається за зустрічно ступеневим принципом. При КЗ в кінці лінії, що захищається, коефіцієнт чутливості повинен бути не менше 1,5. При пошкодженні в кінці попередніх елементів коефіцієнт чутливості не менше 1,2.

## 9. ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ ЗАХИСТ

### 9.1. Види і способи виконання захисту

Диференційним струмовим захистом називається захист з абсолютною селективністю, який безпосередньо порівнює струм в даних місцях елемента, що захищається. При такому порівнянні через ланки зв'язку передаються величини, що контролюються. У повздовжньому диференційному захисті порівнюються струми на початку і в кінці елемента (рис. 9.1).

Вони виконуються для захисту довгих ліній, трансформаторів, генераторів, двигунів.

Поперечні диференційні захисти (рис. 9.2) слугують для захисту елементів, що мають паралельні вітки.

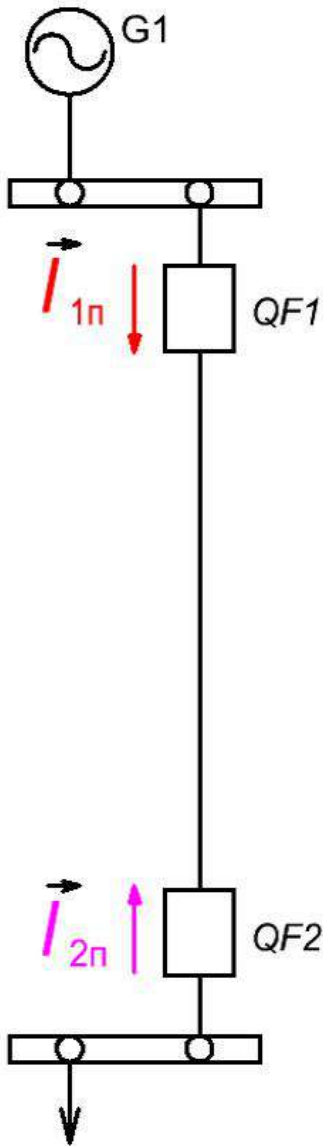


Рис. 9.1

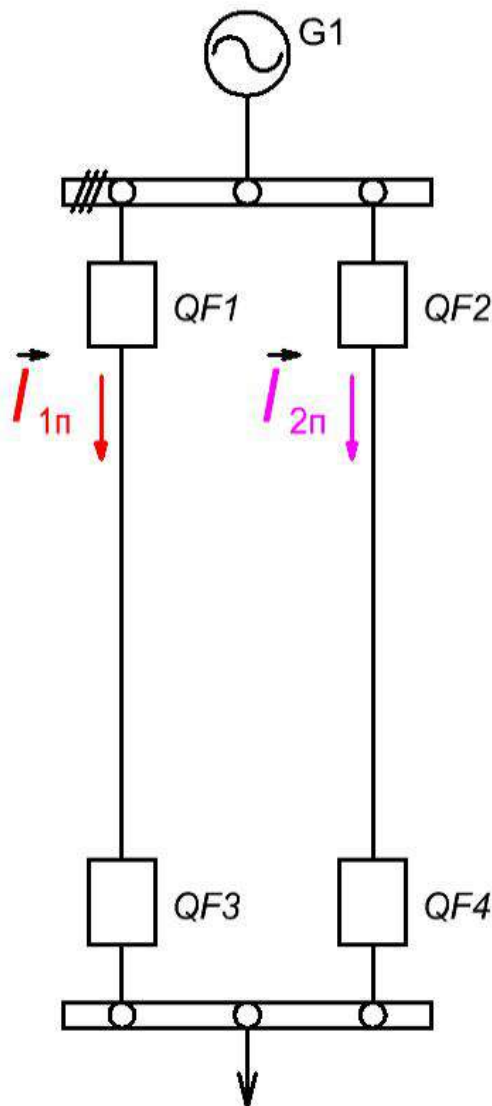
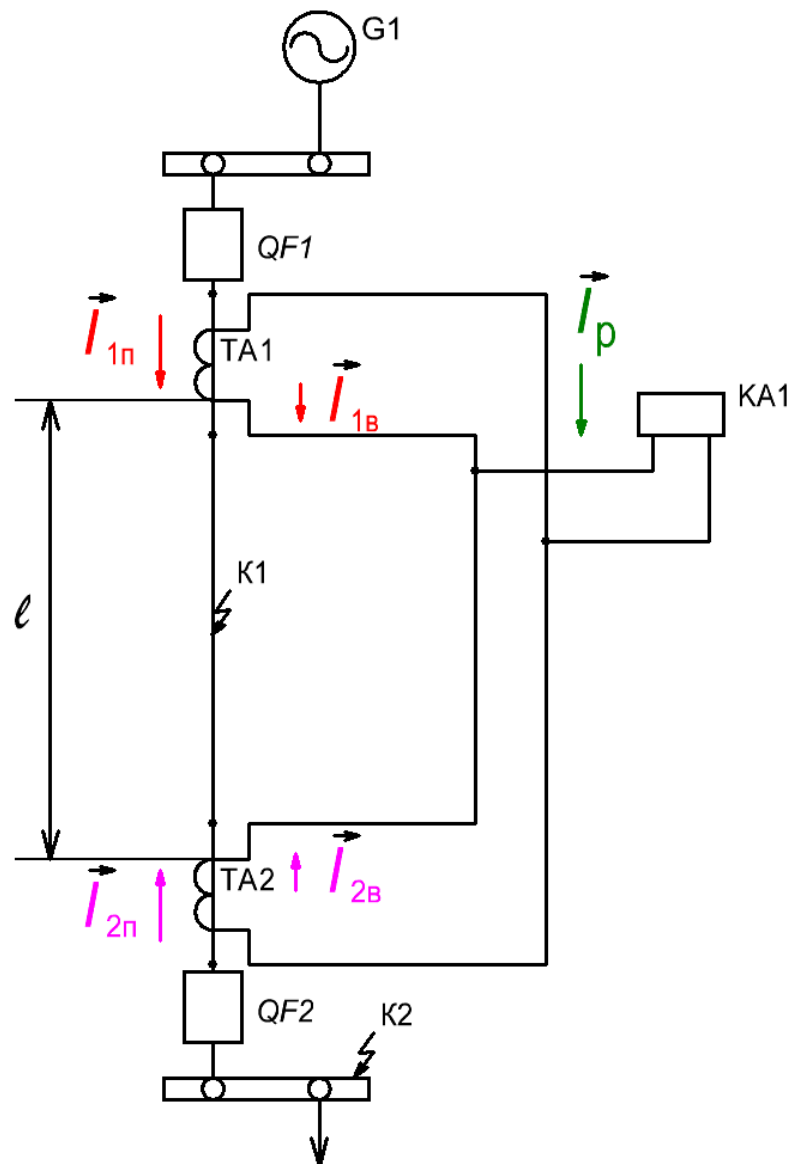


Рис. 9.2

Ланками зв'язку, через які передаються струми, є для повздовжнього захисту допоміжні провідники, проводи лінії, що захищається, а для поперечного захисту допоміжні провідники прокладені в межах електричної установки.

Захисти, які безпосередньо порівнюють миттєві струми, називаються диференційними струмовими. Їх різновидом є диференційно-фазні струмові захисти, в яких порівнюється фази струмів. При порівнянні знаків потужності захист називається направленим диференційним. Диференційний струмовий захист виконується без витримки часу і поєднується з резервними захистами з відносною селективністю.

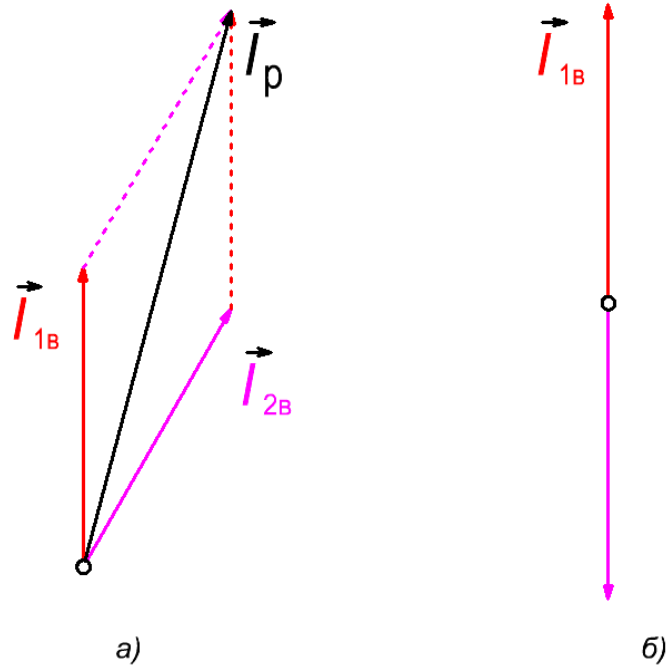
## 9.2. Принцип дії поздовжнього диференційного захисту



У такому захисті одночасно порівнюються модулі і фази струмів. На кінці лінії встановлюються вимірні ТС з однаковими коефіцієнтами трансформації. Вторинні обмотки і реле з'єднуються так, що при КЗ поза зоною захисту  $\ell$ , (яка обмежується ТС) струм в реле був відсутній. А при надходженні в середині зони довірнює струму КЗ.

Струм в реле за схемою з циркулюючими струмами:

$$I_p = I_{1B} + I_{2B}.$$



При КЗ в захисній зоні, точка К1 струми  $I_{1п}$  і  $I_{2п}$  направлені в точку пошкодження, тому струм, який протікає в реле дорівнює вторинному струму КЗ (рис. а). При односторонньому живленні один з струмів, наприклад  $I_{2п}=0$ , тому  $I_{2В}=0$ . Струм  $I_{1В}$  не може замыкатись через вторинну обмотку другого ТС, оскільки він працює в режимі джерела струму. Весь струм  $I_{1В}$  проходить через реле. Таким чином при пошкодженні в зоні  $\ell$  струм в реле визначається струмом пошкодження. Захист спрацює, якщо виконується умова:

$$I_p \geq I_{с.р.}$$

У нормальних режимах, при коливаннях, зовнішніх КЗ (точка К2) первинні струми рівні і зсунуті за фазою на кут  $\pi$  (мал. б). Якщо не враховувати похибки ТС, то :

$$I_{1В} = -I_{2В}.$$

Тому струм реле  $I_p=0$  і захист не спрацює. Ця принципова особливість дає змогу виконати захист без витримки часу, а при виборі струму спрацювання не враховуються струми коливань і нормального режиму.

### 9.3. Струм небалансу в реле з циркулюючими струмами

Реальні ТС мають похибки, тому струми  $I_1$  та  $I_2$  зсунуті на кут, відмінний від  $180^\circ$  і в реле з'являється струм небалансу перехідного процесу при зовнішніх пошкодженнях, коливаннях і нормальних режимах. Для запобігання неправильної роботи диференційного захисту струм спрацювання реле вибирається з його врахуванням:

$$I_{с.р.} = K_{від.} \cdot I_{нб.розр.мах},$$

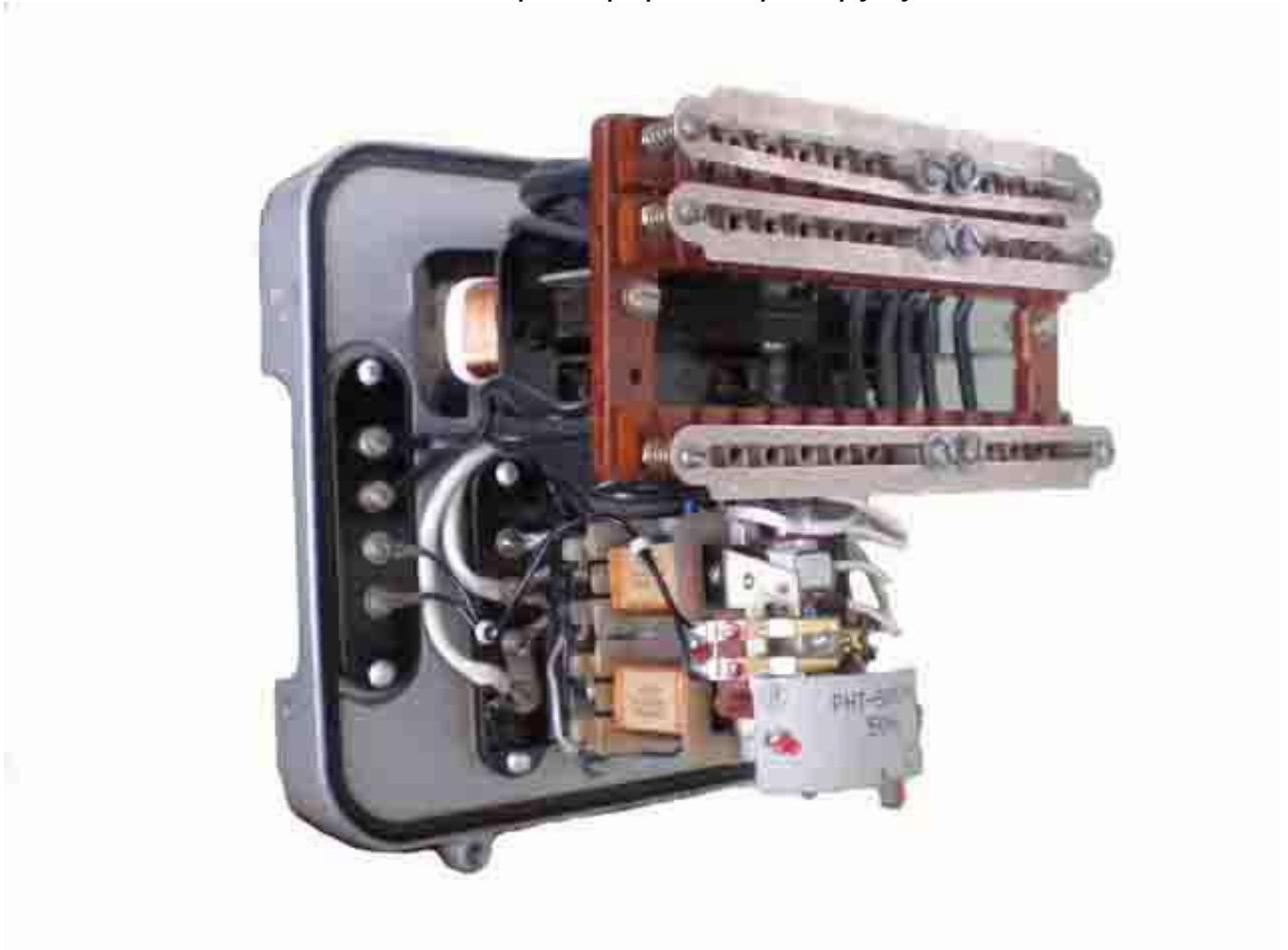
$$I_{нб.розр.мах} = \varepsilon / 100 K_{одн.} I_{к.зовн.мах}^{(3)} K_{ап} / K_I,$$

де  $\varepsilon=10\%$ ;  $K_{ап}=2$  враховує аперіодичну складову струму КЗ;  $K_{одн}=0,5-1$  – коефіцієнт однотипності ТС, для ТС однакового типу  $K_{одн}=0,5$ , для різних марок  $K_{одн}=1$ ;  $I_{к.зовн.мах}^{(3)}$  – максимальний струм кз в точці К2.

Коефіцієнт чутливості при мінімальному трифазному струмі  $K_3$  в точці  $K_2$  повинен бути не менше 2.

#### **9.4. Способи підвищення чутливості**

##### **9.4.1. Вмикання реле струму через проміжний насичувальний трансформатор струму**



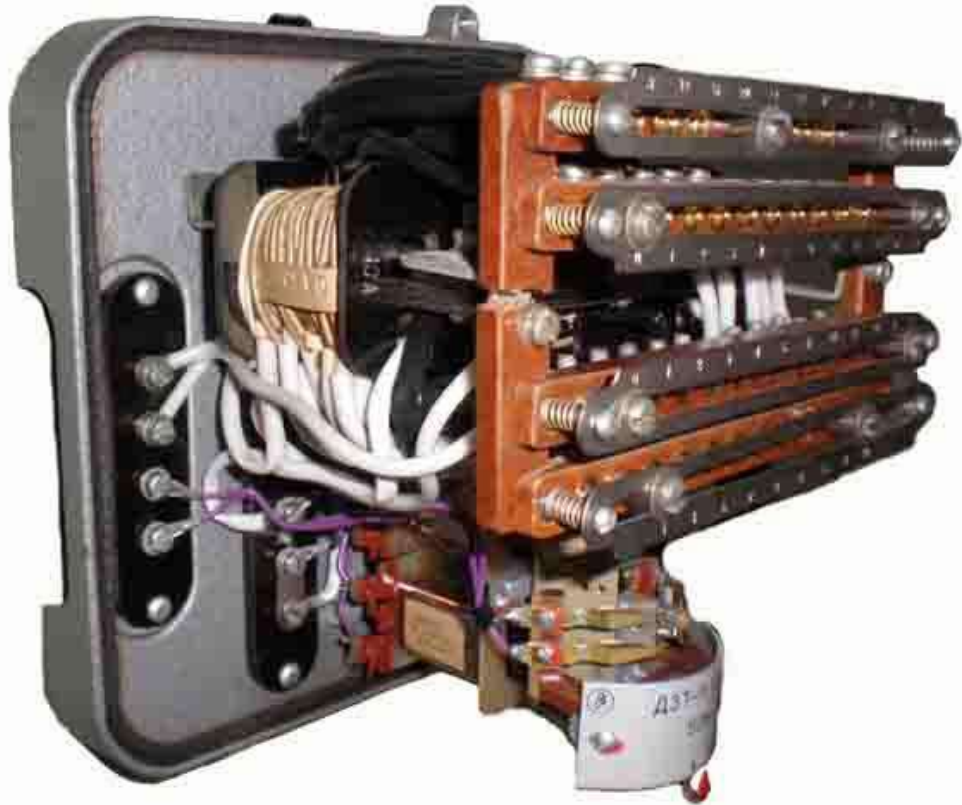
При синусоїдному струмі насичувальний трансформатор струму суттєво не впливає на роботу реле. При зовнішньому  $K_3$  аперіодична складова струму небалансу насичує магнітопровід насичувального трансформатора струму, опір намагнічування сильно зменшується, струм намагнічування збільшується і тому зменшується вторинний струм. Таким чином, коефіцієнт трансформації намагнічувального трансформатора струму збільшується і струм в реле зменшується і не реагує на зовнішнє  $K_3$ . Захист загробується на час дії перехідного струму небалансу. При цьому струм спрацювання реле приймається менший і відлагоджується лише від усталеного струму небалансу при  $K_{ap}=1,3$ . Такий спосіб реалізований в реле типу РНТ. При  $K_3$  в захисній зоні струм пошкодження має аперіодичну складову, але вона швидко затухає і захист через два періоди спрацьовує.

Недоліки:

1. Відсутність загроблення при періодичному струмі небалансу.

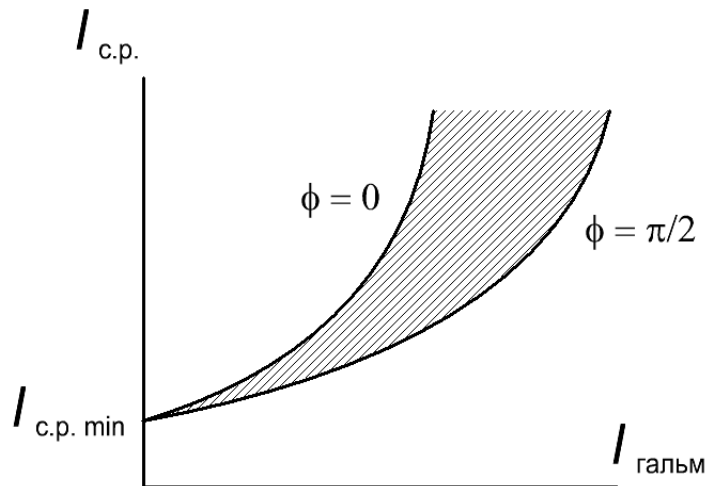
2. Малі закрублення при зміщеннях струму небалансу відносно осі часу.

#### 9.4.2. Використання диференційного реле струму з гальмуванням



У диференційному захисті струм небалансу може бути великим не тільки в перехідному, але й в усталеному режимі за відсутності аперіодичної складової. Реле РНТ стає непридатним для збільшення чутливості. Для отримання селективності захисту струм спрацювання реле відлагоджується від струму небалансу при максимально можливому струмі зовнішнього КЗ. Насправді струм зовнішнього КЗ менший ніж максимальний струм зовнішнього пошкодження, тому захист надто закрублений. Для збільшення чутливості необхідно із зміною зовнішнього струму КЗ автоматично змінювати струм спрацювання реле, зберігаючи необхідне відлагодження від струму небалансу.

$$I_{c.p.} = I_{c.p.min} + K_r \cdot I_r,$$
$$I_{роб.} = I_{1B} + I_{2B}, \quad I_r = 1/2(I_{1B} - I_{2B}).$$



Особливістю таких реле є залежність коефіцієнта гальмування від кута  $\phi$  зсуву фаз між векторами струму  $I_p$  і  $I_r$ , тому характеристика струму спрацювання реле розташовується в заштрихованій зоні. Для виконання диференційного захисту використовують реле типу ДЗТ, яке обладнане проміжним насичувальним трансформатором струму з гальмівною обмоткою. Ця обмотка дозволяє відлагодити захист від великих періодичних струмів небалансу.

### **9.5. Повздовжній диференційний захист ліній і особливості його виконання**

Особливість захисту зумовлена великою віддаллю між кінцями захисної зони. Між підстанціями прокладаються допоміжні провідники для з'єднання ТС. В схему захисту вмикається два комплекти реле струму по одному на кожному кінці лінії. Ці комплекти подають сигнали на вимкнення вимикачів з обох сторін лінії. Це ускладнює захист, збільшує затрати на його виконання і зменшує чутливість і надійність. Від вторинних струмів, що проходять через допоміжні провідники, залежить допустиме навантаження трансформатора струму. При вторинному струмі 5 А опір з'єднувальних проводів повинен бути меншим 2 Ом, тому диференційний захист можна використовувати лише на недовгих лініях. При великій довжині лінії навантаження первинних вимірювальних трансформаторів струму зменшується з допомогою проміжних насичувальних трансформаторів струму, які зменшують струм в з'єднувальних проводах. Це дозволяє збільшити довжину лінії, що захищається.

У першому комплекті проходить більша частина струму  $I_1$  вторинне і менша частина струму  $I_2$  вторинне. В другому комплекті навпаки. Тому при нормальній роботі і зовнішніх КЗ проходять струми небалансу, обумовлені не однаковим розподілом струмів між комплектами. При КЗ в зоні захисту струм в кожному реле складає частину струму пошкодження, друга частина проходить через інший комплект. Це зменшує чутливість захисту і вимагає використання реле типу ДЗТ.

## 9.6. Оцінка поздовжнього диференційного захисту

Преваги:

1. Захист не вимагає відлагодження за струмом і часом від захистів попередніх елементів.
2. Забезпечує селективне і без витримки часу вимкнення пошкодженої ділянки в мережі будь-якої конфігурації.
3. Для ділянок невеликої довжини захист простий, надійний і чутливий.

Недоліки:

1. На довгих ділянках сильно збільшується вартість захисту.
2. Підвищена ймовірність пошкодження допоміжних проводів і як наслідок неправильна робота або відмова захисту.
3. Необхідність вмикання пристроїв контролю справності допоміжних проводів, реле ДЗТ, що ускладнює захист.
4. Не реагує на зовнішні КЗ, тому використання диференційного захисту як єдиного не допускається.

Це обмежує сферу використання поздовжнього диференційного захисту як ліній електропередач довжиною до 20 км. В розподільчих мережах чутливість, селективність і швидкодія часто забезпечується простішими струмовими і струмовим направленими захистами в поєднанні з засобами автоматики.

## 9.7. Поперечний диференційний захист

Принцип дії поперечного диференційного захисту ґрунтується на порівнянні струму однойменних фаз паралельних кіл з параметрами, що мало відрізняються. Для захисту використовують трансформатори струму з однаковим коефіцієнтом трансформації, які встановлюються зі сторони живлячих шин станції А. Струм у реле:

$$I_p = I_{1B} - I_{2B}.$$

При нормальній роботі і зовнішніх КЗ (точка К2) є лише струм небалансу і реле не спрацює. Струм спрацювання реле:

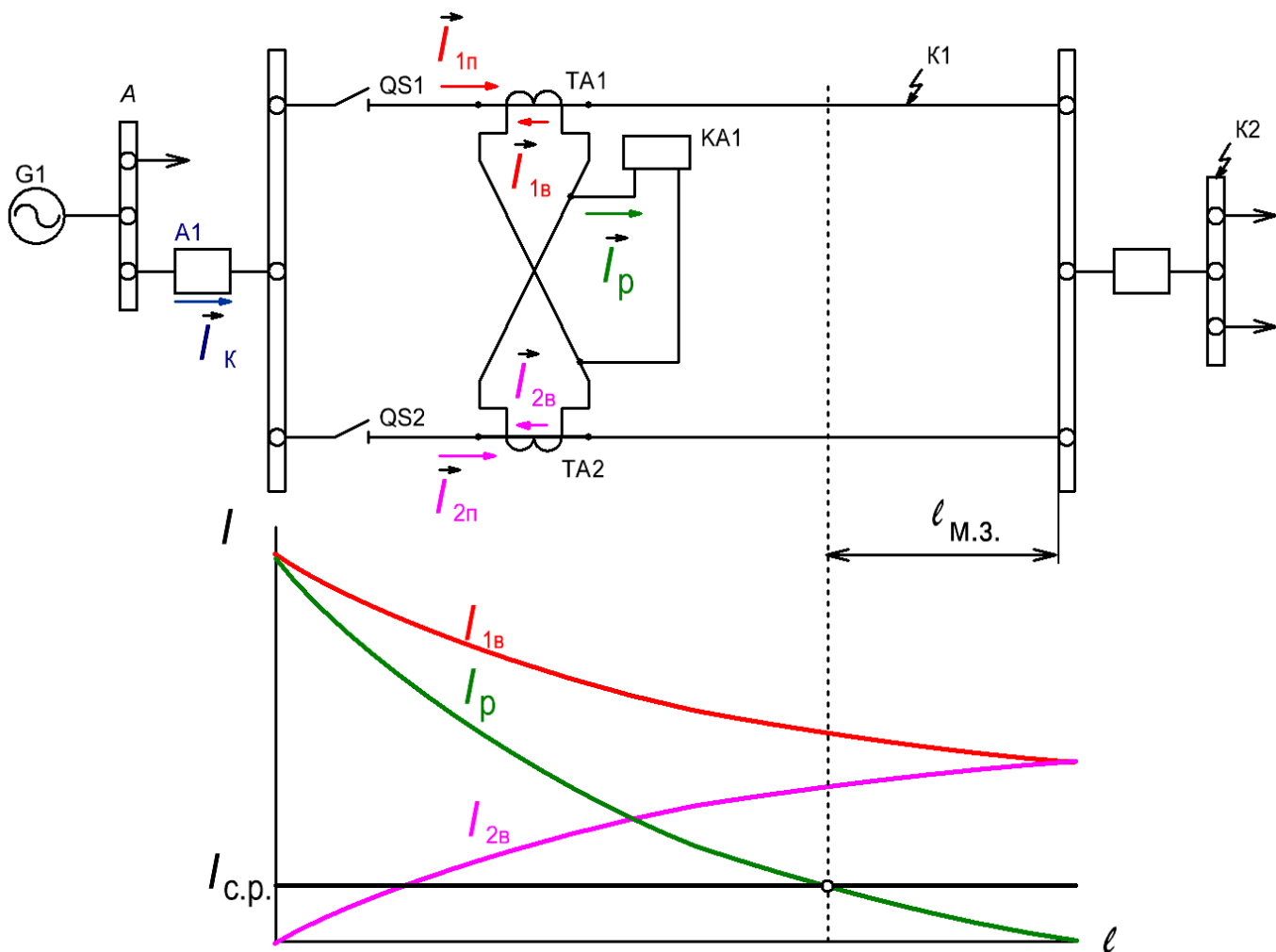
$$I_{c.p.} \geq K_{\text{від}} I_{\text{нб.розр.мах}},$$

$$I_{\text{нб.}} = \frac{\varepsilon}{100} K_{\text{одн}} K_{\text{ап}} \frac{I_{\text{к.зовн.мах}}}{2K_1}.$$

При КЗ на лінії Л1 в точці К1 в реле з'являються струми, оскільки порушується рівність струмів  $I_{1B}$  та  $I_{2B}$ . Якщо струм в реле більший, ніж струм спрацювання реле тоді реле спрацює і вимкне пошкодження. При віддаленій точці КЗ К1 від місця встановлення захисту струм пошкодженої лінії зменшується, а в непошкоджені – збільшується. Струм в реле зменшується і при пошкодженні поблизу шин підстанції Б стає меншим струму спрацювання реле. Захист не спрацює. Довжина ділянки  $\ell_{\text{м.з.}}$  при пошкодженні, в межах якої захист не працює через не достатній струм, в реле називається мертвою зоною поперечного диференційного захисту. Згідно з вимогами:

$$\ell_{\text{м.з.}} = \frac{I_{\text{с.з.}}}{I_k} \cdot \ell \leq 0,1\ell.$$





### 9.8. Схема і сфера використання поперечних диференційних захистів

ПО – пусковий орган, виконується на реле струму;

ОНП – орган напругу потужності, виконується на реле напругу потужності.

Пусковий орган забезпечує відлагодження від струму небалансу зовнішньому КЗ, коли чутливі органи напругу потужності можуть спрацювати під дією залишкової напруги і струму небалансу, а запобігає спрацюванню при вимкненні в робочих режимах вимикача одного з кіл з протилежної сторони. Передбачається виведення захисту з дії при вимкненні вимикача будь-якої лінії. Це здійснюється розривом кола оперативного струму контактом реле положенням „ввімкнено” КҚС.

Поперечні диференційні захисти використовуються для паралельних кіл з однаковими або маловідмінними параметрами, які приєднані до шин через окремі або спільні вимикачі, диференційні направлені захисти використовуються лише порівняно з додатковими захистами здвоєних ліній, які є резервними для захисту попередніх елементів. Це ж стосується і ненаправленого захисту. Він використовується для паралельних ліній з вимикачами на кожній з них, коли є

можливість вимикати лише пошкоджену лінію. Така можливість є на здвоєній лінії, якщо роз'єднувачі в паралельних колах обладнані приладами з дистанційним керуванням. В таких випадках дія захисту узгоджується з дією АПВ лінії.

## **10. ЗАХИСТ МЕРЕЖ ВІД ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ В МЕРЕЖАХ З**

### **ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ**

#### **10.1. Короткі відомості**

Замикання на землю в мережах з ізольованими нейтралями не є аварією, тому допускається робота мережі з таким пошкодженням; при струмі замикання на землю 10, 20, 30А в мережах відповідно 6,10,35 кВ без залізобетонних опор допускається робота до двох годин. За наявності залізобетонних опор струми не повинні перевищувати 10 А в усіх мережах. При більших струмах передбачається встановлення дугогасних реакторів. Допускається деяка перекомпенсація для зменшення пошкодження. Найчастіше захист виконується на сигнал. В окремих випадках вимагається дія захисту на вимкнення. Захист від замикань на землю вважається селективним, якщо він правильно визначає напрям приєднання, де виникло пошкодження.

#### **10.2. Розподіл струмів при замиканні на землю**

При замиканні на землю в місці пошкодження виникає напруга нульової послідовності  $U_0$ , під дією якої проходять струми нульової послідовності, що замикаються через ємності фаз кожної лінії і дугогасний реактор. Ємнісний струм нульової послідовності проходить через усі пошкоджені і не пошкоджені лінії мережі. Струм дугогасного реактора замикається лише через пошкоджену лінію Л1. В непошкоджених лініях Л2 і Л3 через ТС нульової послідовності захисту проходить ємнісний струм нульової послідовності, який замикається через ємності окремих фаз ліній і направлений до шин.

$$I_{02}=3U_0\omega C_2,$$

$$I_{03}=3U_0\omega C_3.$$

Ємнісний струм нульової послідовності, який проходить через ТС нульової послідовності пошкодженої лінії, направлений без шин і визначається як різниця ємнісного струму усієї мережі струму пошкодженої лінії

$$I^{(1)}=3U_0\omega C-3U_0\omega C_1,$$

де  $C$  – ємність фаз усієї електрично зв'язаної мережі

За наявності дугогасного реактора струм через трансформатор струму:

$$I^{(1)}=3I_0-(3I_{0c}-I_{01})=3U_0 / X_l 3U_0\omega (C-C_1).$$

Напрямок результуючого струму залежить від того, яка складова більша – індуктивна чи ємнісна. У некомпенсованій мережі можна використовувати направлений захист, який реагує на реактивну потужність нульової послідовності, зумовлену ємнісним струмом. В мережах з перекомпенсацією реактивний струм пошкодженої лінії і ємнісний на пошкодженій, мають однаковий напрям, тому направлений захист не використовується.



Селективність при зовнішніх замиканнях на землю при захисті, які діють на вимкнення.

81

Захист повинен реагувати на однофазні замикання через періодично зникаючу дугу і короточасні замикання на землю, якщо можливо і доцільно виявити їх місце виникнення.

Неперервність дії захисту, який повернений персоналом у вихідне положення для перевірки стійкості для замикання на землю при даному напрямку після вимкнення персоналом передбачуваного пошкодженого елемента .

#### **10.4. Пристрій загальної неселективної сигналізації**

Замикання на землю однієї фази в мережах 6–35 кВ не є аварією і споживачі, які ввімкнені на лінійну напругу, продовжують нормально працювати. Це дає можливість виконати захист від замикань на землю діючим на сигнал. В мережах простої конфігурації допускається використовувати лише пристрій загальної неселективної сигналізації, який контролює стан ізоляції. Схема складається з трьох мінімальних реле напруги, ввімкнених на напругу фаз відносно землі або одного максимального реле напруги, який ввімкнений на напругу нульової послідовності. Пристрій вмикається до трансформаторів напруги, які встановлені на шинах розподільчого пристрою.

#### **10.5. Струмові захисти нульової послідовності, які реагують на струми усталеного режиму**

Тривала робота мережі при однофазному замиканні на землю не допускається, оскільки:

Можливе порушення міжфазної ізоляції в місці пошкодження і перехід однофазного замикання в багатofазне КЗ

Можливі подвійні замикання на землю внаслідок збільшення напруги непошкоджених фаз відносно землі в  $\sqrt{3}$  разів.

Оскільки робочі струми звичайно більші, ніж допустимі струми замикань на землю, то струмовий захист виконується з вмиканням реле на фільтр струму нульової послідовності. Для забезпечення не дії захисту при пошкодженнях на інших елементах, коли через лінію, що захищається, проходить струм обумовлений ємнісним струмом цієї лінії. Струм спрацювання захисту приймається рівним:

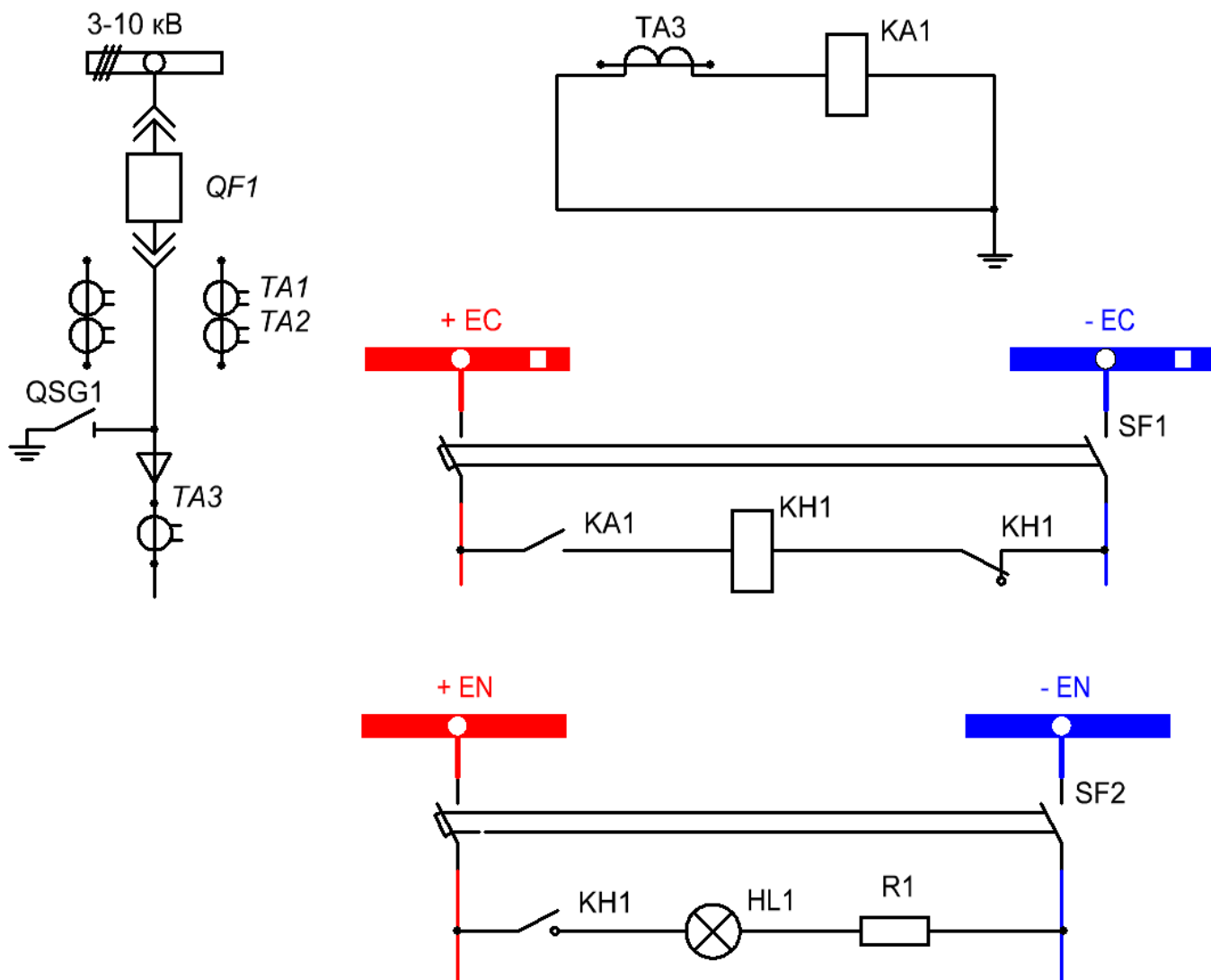
$$I_{с.з} = K_{Від} \cdot 3I_0,$$

де  $K_{Від} = 4 \div 5$  для захисту без витримки часу і  $2 \div 2,5$  для захисту з витримкою часу.

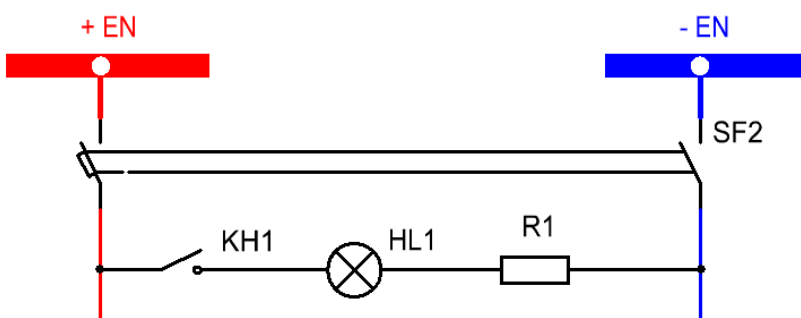
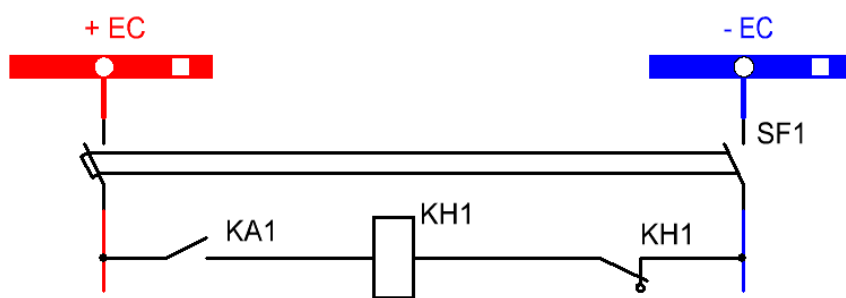
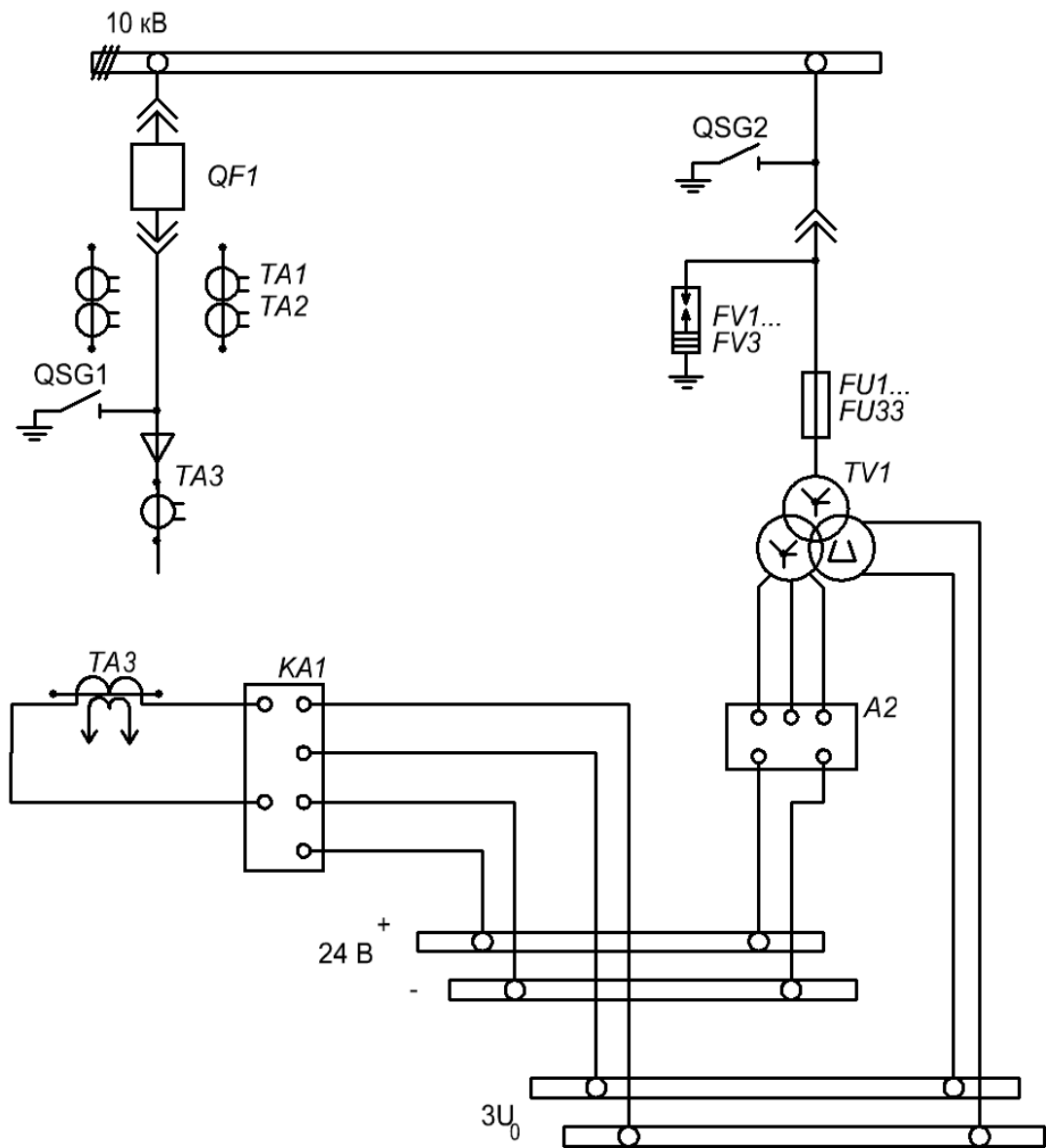
Чутливість захисту визначається за формулою:

$$K_{ч} = \frac{I^{(1)}}{I_{с.з}}.$$

Для ПЛ  $K_{ч} > 1,5$ , для КЛ  $K_{ч} > 1,25$ . Струм однофазного замикання визначається при мінімальній можливій кількості ввімкнених елементів.



Як фільтр нульової послідовності використовується в ТС нульової послідовності. Воронка і кабель ізолюються від землі. Тоді струм, що проходить через броню і оболонку кабелю компенсуються струмами, що протікають через заземлений провідник. Струмівий захист використовується лише в розгалуженні радіальної мережі, коли сумарний мінімальний ємнісний струм набагато перевищує ємнісний струм в лінії, що захищається. Якщо власний ємнісний струм лінії співмірний з струмом замикання на землю, то використовується направлений захист. Відлагодження від зовнішнього замикання на землю забезпечується напрямком дії захисту, а від струму і напруги небалансу, використання органу напрямку потужності. На такому принципі побудовані реле ЗЗП-11.



## 10.6. Захист ТН контролю ізоляції

Основною причиною пошкоджень ТН є ферорезонансні явища, внаслідок яких через обмотку ВН проходять струми набагато більші ніж номінальні. При ферорезонансі напруга будь-якої фази може збільшуватися до 4 номіналів. У результаті руйнується ізоляція, що призводить до однофазних замикань на землю, а часом і двофазних КЗ. Причиною ферорезонансних явищ є перехідний процес під час комутації в СЕП. При цьому ферорезонанс виникає не лише в основній і на вищих гармоніках, але і на нижчій.

Небезпечні струми виникають при вимкненні пошкодження приєднання або при самогасінні дуги, при наступній появі ферорезонансних коливань, тобто розряду ємностей непошкоджених фаз на обмотки ТН. Найнебезпечнішим для ТН тривалі однофазні замикання на землю через періодично зникаючу дугу.

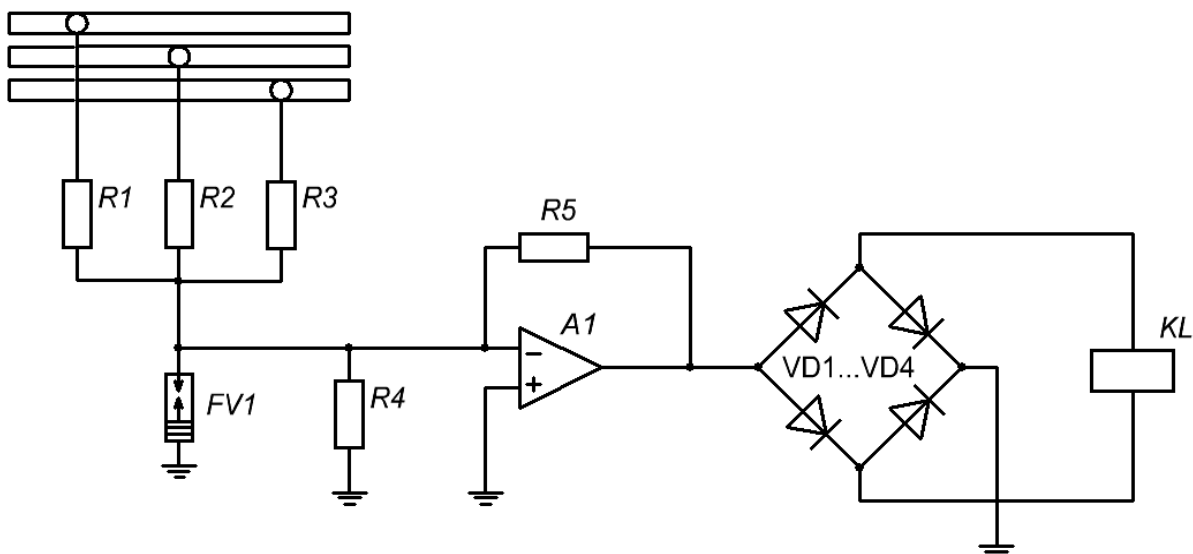
Для захисту ТН використовуються:

- вмикавання навантажувальних резисторів в коло вторинної обмотки, з'єднаної в розімкнений трикутник;
- вмикавання резистора в нейтраль обмотки ВН;
- використання розрядників;
- компенсація ємнісних струмів у мережі за допомогою дугогасних реакторів.

Найпростіший і найдоступніший перший спосіб. Резистор створює втрати енергії вільних коливань складових нульової послідовності. Ефективність цього способу збільшується, якщо використовувати резистор з опором і вмикати його в момент виникнення ферорезонансу і лише на час існування цього режиму.

## 10.7. Схема загальної неселективної сигналізації без використання

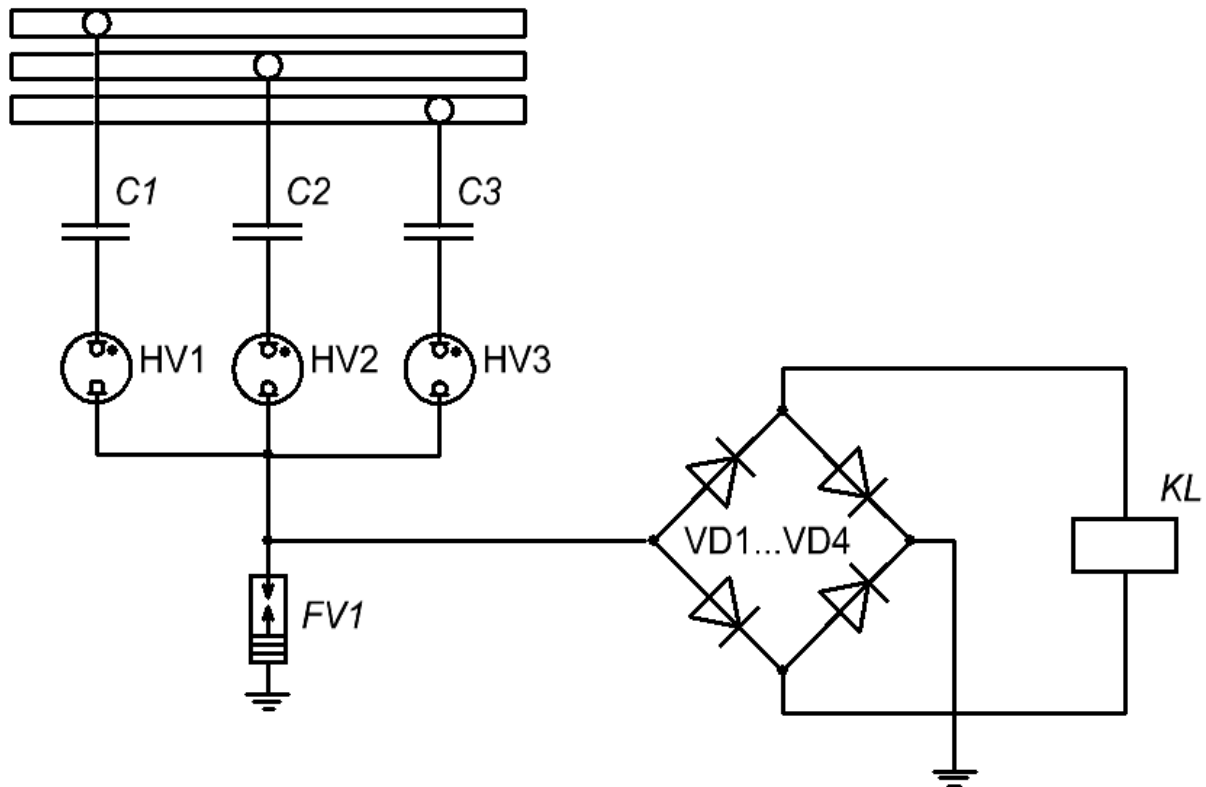
ТН



Якщо три ізолятори різних фаз закріпити до шин верхніми фланцями, а нижні об'єднати шинкою, то вона утворює нульову точку зірки витоку ізолятора. Між цією точкою і землею вмикається пристрій контролю ізоляції. Струм витоку



ізоляторів малий, але операційний підсилювач дозволяє зробити пристрій чутливішим до нього. Цей спосіб можливий, якщо зірка опорів витоку ізоляторів достатньо симетрична. Використання окремих підсилювачів на кожну фазу і сумарного підсилювача дозволяє визначити пошкоджену фазу.



Замість опорних ізоляторів можна використати високовольтні конденсатори. Це збільшує струм в променях зірки та для визначення пошкодженої фази можна послідовно з конденсатором встановити сигнальні неонові лампи. Послідовне вмикання двох конденсаторів збільшує вихідний струм зірки при замиканні на землю до величини, достатньої для дії захисту без підсилювача.

## НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНЕ ВИДАННЯ

Основи релейного захисту та автоматики. Конспект лекцій для студентів усіх форм навчання за напрямком підготовки 6.050701 “Електротехніка та електротехнології”

Комп'ютерний набір та верстка: А.В. Гадай

Редактор:

О. С. Гордіюк.

Підп. до друку \_\_\_\_\_. 2013р. Формат 60×84/16. Папір офс.  
Гарн. Таймс. Ум. друк.арк. 5,75. Обл.– вид.арк. 5,0.  
Наклад 50 прим. Зам. 439.

Редакційно-видавничий відділ  
Луцького національного технічного університету  
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75  
Друк – РВВ ЛНТУ