

**РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ВИСОКОВОЛЬТНИХ
ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ**

Частина 2

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ВИСОКОВОЛЬТНИХ
ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ**

Частина 2

**Електронний навчальний посібник
комбінованого (локального та мережного) використання**

Вінниця
ВНТУ
2022

УДК [621.316.925:621.313.3.027.3](075.8)

Р36

Автори:

Тептя В. В., Комар В. О., Нетребський В. В., Рубаненко О. О.

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

Рецензенти:

Черкашина В. В., доктор технічних наук, доцент

Лисенко О. В., доктор технічних наук, доцент

Розводюк М. П., кандидат технічних наук, доцент

Релейний захист високовольтних електродвигунів. Частина 2 :
Р36 електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / В. В. Тептя, В. О. Комар, В. В. Нетребський, О. О. Рубаненко. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 136 с.

В посібнику розглянуто питання релейного захисту високовольтних електричних двигунів. Викладено загальні технічні вимоги до релейного захисту, розглянуто основні елементи пристроїв релейного захисту. Висвітлено питання, присвячені основним характеристикам і режимам електродвигунів.

Посібник призначений для студентів закладів вищої освіти електроенергетичних спеціальностей, які вивчають питання релейного захисту й автоматики електричних станцій та мереж.

УДК [621.316.925:621.313.3.027.3](075.8)

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	5
1 ЗАХИСТ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВІД АСИНХРОННОГО РЕЖИМУ	6
2 ЗАХИСТ ВІД ВТРАТИ ЖИВЛЕННЯ.....	18
3 ЗАХИСТ ВІД НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ ТА ВИТКОВИХ ЗАМИКАНЬ.....	32
4 СХЕМИ ЗАХИСТІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	43
4.1 Загальні відомості	43
4.2 Схема захисту асинхронного двигуна номінальною потужністю менше 2000 кВт	44
4.3 Схема захисту асинхронного двигуна номінальною потужністю менше 5000 кВт	46
4.4 Схема захисту двохшвидкісного асинхронного двигуна номінальною потужністю менше 5000 кВт	46
4.5 Схема захисту асинхронного двигуна номінальною потужністю менше 5000 кВт з розвантаженням перед самозапуском.....	49
4.6 Схема захисту синхронного двигуна номінальною потужністю менше 5000 кВт	51
4.7 Схема захисту синхронного двигуна номінальною потужністю менше 5000 кВт з реакторним пуском	53
4.8 Схема захисту синхронного двигуна номінальною потужністю більше 5000 кВт з реакторним пуском.....	55
4.9 Схема захисту синхронного двигуна номінальною потужністю більше 5000 кВт з різкозмінним навантаженням на валу та динамічним гальмуванням	58
4.10 Схеми захисту електродвигунів на змінному оперативному струмі ...	60
5 ВИБІР УСТАВОК СПРАЦЮВАННЯ ЗАХИСТІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ.....	65
5.1 Загальні положення.....	65
5.2 Розрахунок захистів від замикання на землю (корпус) обмотки статора	66
5.3 Розрахунок струмової відсічки	73
5.4 Розрахунок диференціального струмового захисту	78
5.5 Розрахунок захисту лінії динамічного гальмування	84
5.6 Розрахунок максимального струмового захисту в колі пускового реактора.....	85
5.7 Розрахунок захисту від струмів перевантаження	86
5.8 Розрахунок захисту від асинхронного режиму	87
5.9 Розрахунок захисту від втрати живлення	87
6 РОЗРОБКИ ПРИСТРОЇВ ЗАХИСТУ ДВИГУНІВ	89
6.1 Загальні положення.....	89

6.2 Структурна схема комплектного пристрою захисту	
електродвигунів	90
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	96
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	98
ДОДАТКИ	99
ДОДАТОК А Довідковий матеріал	100
ДОДАТОК Б Розрахунок уставок захистів електродвигунів 3-6 кВ в прикладі і задачах	103
ДОДАТОК В Технічні дані реле часу	127

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

- АБ – акумуляторна батарея;
- АВР – автоматичне введення резерву;
- АД – асинхронний двигун;
- АЕС – атомна електрична станція;
- АПВ – автоматичне повторне вмикання;
- АР – асинхронний режим;
- АРЗ – автоматичне регулювання збудження, автоматичний регулятор збудження;
- АЧР – автоматичне частотне розвантаження;
- БПЗ – безщитковий пристрій збудження;
- ВО – вимірювальний орган;
- ВП – власні потреби;
- ЕД – електродвигун;
- ЕРС – електрорушійна сила;
- КЗ – коротке замикання;
- КРУ – комплектна розподільна установка;
- МРС – магніторушійна сила;
- МСЗ – максимальний струмовий захист;
- ОЗЗ – однофазне замикання на землю;
- ПЗП – підзарядний пристрій;
- ПО – пусковий орган;
- ПП – пункт перемикавання;
- ПС – підстанція;
- ПУЕ – правила улаштування електроустановок;
- РЗ – релейний захист;
- РЗА – релейний захист та автоматика;
- РП – розподільний пункт;
- РУ – розподільна установка;
- СВС – система випрямленого оперативного струму;
- СД – синхронний двигун;
- СНП – струм нульової послідовності;
- ТВП – трансформатор власних потреб;
- ТН – трансформатор напруги;
- ТНП – трансформатор струму нульової послідовності з підмагнічуванням;
- ТПЗ – тиристорний пристрій збудження;
- ТС – трансформатор струму;
- ТСНП – трансформатор струму нульової послідовності;
- ЦАП – цифровий аналоговий перетворювач;

1 ЗАХИСТ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВІД АСИНХРОННОГО РЕЖИМУ

Основні вимоги до захисту синхронних двигунів від асинхронного режиму (АР) не залежать від способу його конкретної реалізації і містять [2, 7]:

1. Захист має розрізняти, збуджений чи не збуджений синхронний двигун перейшов в асинхронний режим. Необхідність цього впливає з великої небезпеки асинхронного ходу для СД з непогашеним полем від значних пульсуючих струмів та різких змін обертового моменту;

2. Щоб не викликати зайвої дії при короткочасних самоусуванних асинхронних режимах. Коли збуджений СД надійно втягується в синхронізм після усунення причини, яка викликала асинхронний хід, доцільно, щоб захист діяв тільки при ковзанні більшому за критичне $S > S_k$. При цьому витримку часу потрібно вибрати якомога маншою, однак більшою ніж, наприклад, час вимикання КЗ, який не призводить до порушення підсумкової стійкості СД;

3. Якщо асинхронний режим не пов'язаний з втратою збудження, захист має діяти на гасіння поля;

4. Враховуючи, що допустимий час перебування в асинхронному режимі незбудженого синхронного двигуна достатньо великий і складає десятки секунд, потрібно, якщо це виявляється можливим за умовами роботи приводу, здійснити автоматичне розвантаження синхронних двигунів, які не розраховані на втягування в синхронізм при повному завантаженні;

5. При невдалій ресинхронізації захист має діяти на вимикання СД від мережі. Витримку часу захисту, який діє на вимикання незбудженого синхронного двигуна, потрібно брати не меншою часу спрацювання захисту від перевантаження, яке відповідає кратності струму статора в асинхронному режимі з усталеним ковзанням S_a ;

6. Пуск, самозапуск, форсування збудження та інші експлуатаційні перехідні режими не мають викликати спрацювання захисту.

Правильне функціонування захисту має забезпечуватися незалежно від виду пристрою збудження.

Виконання усіх цих основних вимог відносно просто здійснюється для СД, які працюють зі «спокійним» навантаженням на валу.

Значно складніша реалізація захисту від асинхронного режиму для синхронних двигунів приводів механізмів з ударним навантаженням. Потужні кидки навантаження на валові є причинами коливання ротора. Амплітуди відхилення кута навантаження сягають приблизно $80-85^\circ$, а в деяких випадках 90° . Додаткові труднощі у фіксації асинхронного режиму таких СД полягають в обмеженості інтервалу ударного навантаження – часу, за який потрібно розпізнати асинхронний режим на фоні значних періодичних змін електричних величин, які супроводжують кидок потужності. Під

час паузи між двома кидками синхронний двигун, як правило, входить в синхронізм і невиявлений своєчасно асинхронний хід під час природного технологічного перевантаження може призвести до значного перегріву обмоток СД.

Всі сучасні пристрої захисту від асинхронного режиму можуть бути розділені на дві основні групи. До першої відносять ті, які фіксують настання асинхронного ходу після виходу внутрішнього кута синхронного двигуна за граничні значення або при його періодичній зміні. Другу складають захисти, які використовують непряму інформацію: збільшення кута статора, появу змінної складової в струмі ротора, зміну знака реактивної потужності, опору машини або фазового кута. Захисти цієї другої групи отримали велике розповсюдження в силу простоти, незалежності від виду пристрою збудження, через надійність давачів інформації – трансформаторів струму та напруги.

Захист, який реагує на збільшення струму статора. Враховуючи симетричний характер асинхронного режиму, захист виконують з використанням одного вимірювального реле струму, яке контролює струм будь-якої фази обмотки статора. Як правило, реле вмикається в зворотний провід трансформаторів струму, які зібрано за схемою неповної зірки.

Оскільки струмовий захист від перевантаження також використовує для роботи інформацію про значення струму статора, ці захисти об'єднують в один. Це має певний недолік, пов'язаний з тим, що перевантаження синхронного двигуна не завжди призводить до виходу з синхронізму, і тому дія захисту на розбудження СД, який не перейшов в АР, є невиправданою. Крім того, характер зміни струму статора при перевантаженні та в асинхронному режимі є різним.

При випаданні СД з синхронізму в реле може протікати пульсуючий в часі струм на відміну від приблизно постійного за амплітудою при перевантаженні, яке викликано технологічними причинами. Реле спрацьовує в точці *a* (рис. 6.1) і починає повернення в точці *b*. Для отримання безперервного сигналу на виході вимірювального органу необхідно, щоб або його час повернення t_n перевищував паузу Δt між точками *b* і *a'*, або імпульс замкненого стану контактів реле струму був розширений до $t_i > \Delta t$. Синхронні двигуни з відношенням короткого замикання $ВКЗ > 1$ мають достатньо м'яку характеристику середнього асинхронного моменту, і їх асинхронний хід, який виникає при більших значеннях ковзання, ніж у СД з $ВКЗ < 1$, супроводжується значними коливаннями струму статора при малих паузах Δt . Це дозволяє застосовувати для захисту таких СД за вимірювальний та логічний орган реле серії РТ-80. Однак таке рішення може вважатися задовільним тільки у невідповідальних СД або для електродвигунів, ресинхронізація яких неможлива або недопустима. Вимушений вибір часу спрацювання реле в незалежній частині його характеристики $t_{cp} > t_n$, де t_n – час пуску синхронного двигуна, призводить до достатньо тривалого

асинхронного режиму збудженого СД, що потрібно віднести до суттєвих недоліків захисту з реле серії РТ-80.

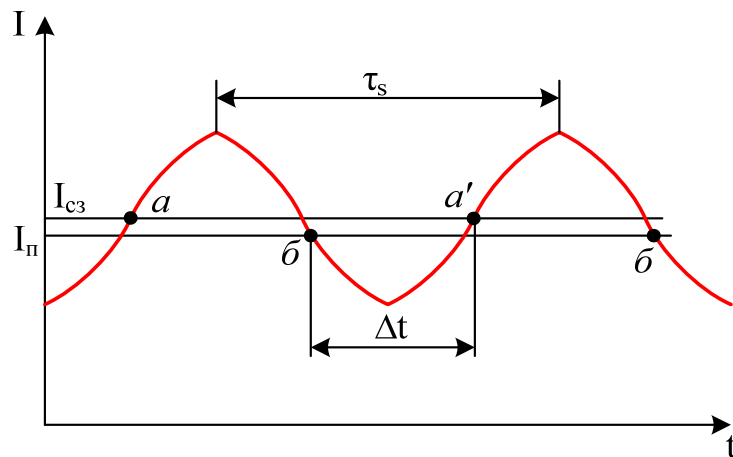


Рисунок 1.1 – Дія струмового захисту від асинхронного режиму

Найбільш простим за виконанням і достатньо ефективним є захист, в якому використовуються реле струму серії РТ-40 (рис. 1.2).

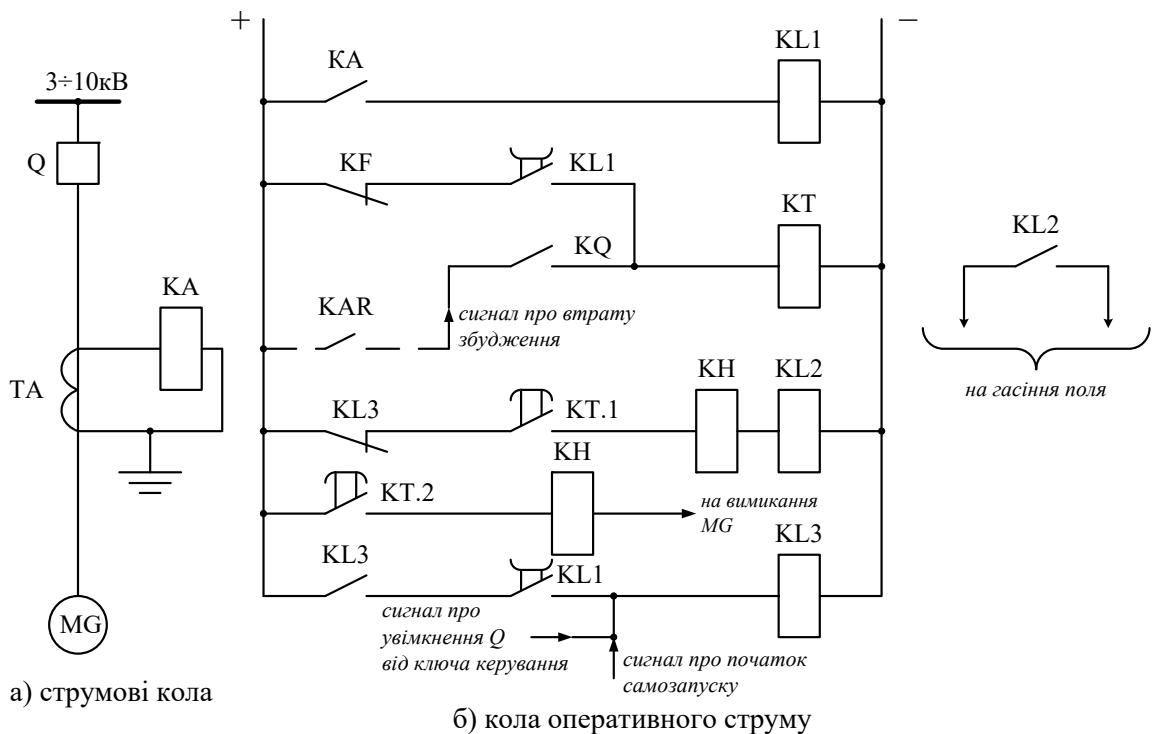


Рисунок 1.2 – Схема струмового захисту від асинхронного режиму

Для розширення сигналу на виході вимірювального органу встановлено проміжне реле KL1 типу РП-252, яке має витримку часу на повернення. При форсуванні збудження дія контакту реле KL1 на запуск реле часу КТ блокується розмиканням контакту KF. Для прискорення виведення збудженого синхронного двигуна з небезпечного асинхронного режиму в

менш небезпечний – без збудження, витримка часу першого ступеня захисту, яка діє на проміжне реле KL2, приймається меншою тривалості пуску або самозапуску. Для запобігання спрацювання KL2 під час пуску або самозапуску цей ступінь захисту виводиться з роботи за допомогою реле KL3, яке контролює процес пуску або самозапуску за рівнем струму статора, що задається уставкою реле КА.

Захист, який виконано за схемою рисунка 1.2, може відмовити в дії при асинхронних режимах малоавантажених синхронних двигунів з жорсткими характеристиками $M_a(S)$, пов'язаних з втратою збудження. В цих умовах середнє значення струму статора може бути меншим струму спрацювання реле КА, а час повернення реле KL1 $t_{п, KL1}$ – меншим паузи Δt .

Оскільки при $f_{ном} = 50$ Гц усталене ковзання AP, %

$$S = 1/\tau_s,$$

а $t_{п, KL1} = 1,1 \text{ с} > 0,5 \cdot \tau_s$, отримаємо, що надійна фіксація струмовим захистом AP недозбудженого СД можлива, якщо $S \geq 0,5\%$.

Задовільне рішення при $S < 0,5\%$ отримується, якщо доповнити струмовий захист за рис. 1.4 захистом, що реагує на втрату збудження.

Захист, який реагує на втрату збудження. Для СД з електромашинними пристроями збудження як вимірювальний орган захисту використовується встановлене в коло обмотки збудження реле нульового струму, яке фіксує зникнення струму збудження. Контакт реле KAR можна підключити до реле часу КТ (див. рис. 1.2) з тим, щоб було забезпечене неспрацювання захисту при пуску СД.

В тиристорних пристроях збудження серії ВТЕ-320 функції реле нульового струму виконує реле струму збудження, сигнал від якого подається в схему захисту СД.

У безщіткових пристроях збудження для виявлення втрати збудження використовується реле направлення потужності, яке реагує на фіксацію змінювання знака реактивної потужності в колі статора СД. Захист придатний для СД, які в усіх можливих реальних режимах працюють з випереджаючим cosφ, видаючи в мережу реактивну потужність. Під час пуску захист виводиться з дії.

Захист, який реагує на поява змінної складової в струмі збудження. При асинхронному ході СД поле статора наводить в обмотці збудження ЕРС, полярність якої змінюється з частотою ковзання. Під її дією в обмотці протікає змінний струм тієї ж частоти.

В сучасних серійних тиристорних пристроях збудження захист виконується на принципі фіксації протікання струму в колі пускового опора (рис. 1.3), який забезпечується відкриттям по черзі тиристорів VD1 та VD2. Герконове реле, яке знаходиться в колі $R_{п}$, або захисний пристрій БЗП, що підключено до ТС, спрацьовує та подає з витримкою часу команду на вимикання синхронних двигунів. Цей захист одночасно виконує функції кон-

тролю тривалості пуску, і тому його час спрацювання великий – більше часу пуску, що позбавляє можливості здійснювати автоматичне розвантаження СД. Захист спрацьовує при ковзаннях, які перевищують S_k , і автоматично виконує переведення СД в режим гасіння поля. При малих S_a захист працює нестійко. Одним з суттєвих недоліків цих захистів є можливість їх неправильної роботи в режимах кидків потужності, що характерно для СД з ударним циклічним навантаженням, під час якого в струмі збудження з'являється змінна складова.

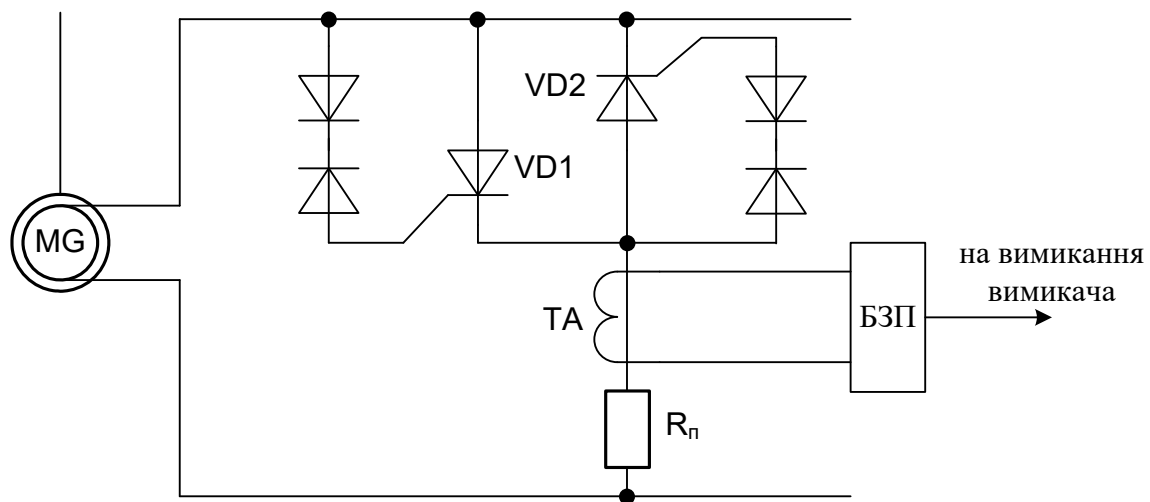
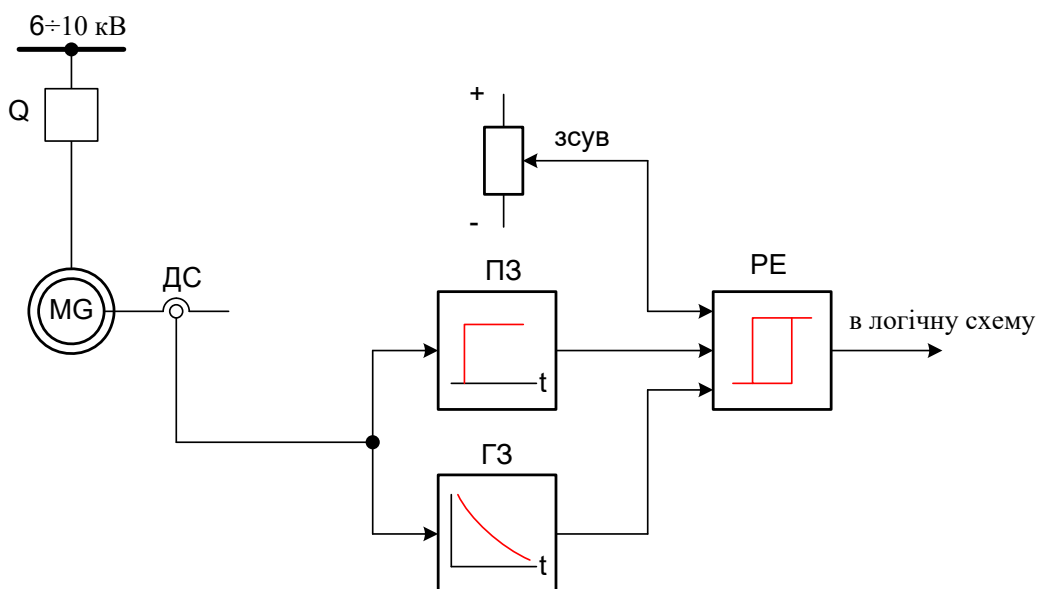


Рисунок 1.3 – Захист від асинхронного режиму в складі ТПЗ

Разом з тим особливість змінювання струму збудження при різних коливаннях на валові полягає в тому, що кидки струму ніколи не досягають значення струму збудження при холостому ході, дає можливість виконати захист від АР, структурна схема якого наведена на рисунку 1.4.

Захист фіксує струм у визначеній зоні поблизу нуля, в яку він не входить в робочих режимах. Логічна частина захисту або підраховує число імпульсів (заходів струму в зону спрацювання), або виконується аналогічно захисту, показаному на рис. 1.2. Захист має за принципом дії бути налаштованим від режиму пуску та зовнішніх КЗ.

Застосування налаштування шунта замість ТС знімає питання, які пов'язані з незадовільною трансформацією змінної складової, але призводить до конструктивних труднощів реалізації схеми.



ДС – давач струму; ГЗ – ланка гнучкого зв'язку;
 ПЗ – ланка пропорційного зв'язку; РЕ – релейний елемент

Рисунок 1.4 – Структурна схема захисту від асинхронного режиму, який реагує на зміну струму ротора

Захисти, які реагують на змінування фазового кута. Використовується факт змінування кута між фазним струмом статора СД та напругою, який має місце в асинхронному режимі.

В захисті, схема якого наведена на рисунку 1.5, а), за вимірювальний орган використовується реле направлення потужності KW1 з внутрішнім кутом 30° . При підключенні струмового кола реле до фази А, обмотки напруги до $U_{ва}$ реле приходить до дії при відставанні струму статора від напруги мережі на кут $\varphi > 30^\circ$. Друге реле направлення потужності використовується для запобігання роботі захисту при скиданні навантаження і короткочасному переході в генераторний режим. Діаграма роботи реле KW1 та KW2 наведена на рисунку 1.5, б). При спрацюванні цих реле спрацьовує двопозиційне реле KL1, яке виконує функцію пам'яті, і включає реле часу КТ1. Через $2 \div 3$ с тимчасово замикальний контакт цього реле запускає реле КТ2 та К1, які самоутримуються по колу контактів KL1 і К1. При замкненні або періодично замкнених контактах реле направлення потужності не пізніше, ніж через $3 \div 4$ с з моменту спрацювання KL1 замикається коло реле К2, яке дає команду на гасіння поля. Одночасно спрацьовує реле К3. Після замикання з витримкою часу $t = 2 \div 3$ с тимчасово замикального контакту реле КТ2 здійснюється запуск схеми пускової автоматики на подачу збудження. При успішній ресинхронізації контакт реле КТ2 повертає усю схему в початковий стан. Якщо синхронізацію здійснити не вдалося, реле КТ1 з витримкою часу $12 \div 15$ с відключить СД. При часі пуску СД більше $9 \div 10$ с захист обладнується другим двопозиційним реле KL2, яке виводить його з дії на весь час пуску. Незважаючи на складність захисту та велику

кількість в ньому реле, він успішно працює незалежно від причин виходу СД в АР, виду пристрою збудження та жорсткості асинхронної характеристики.

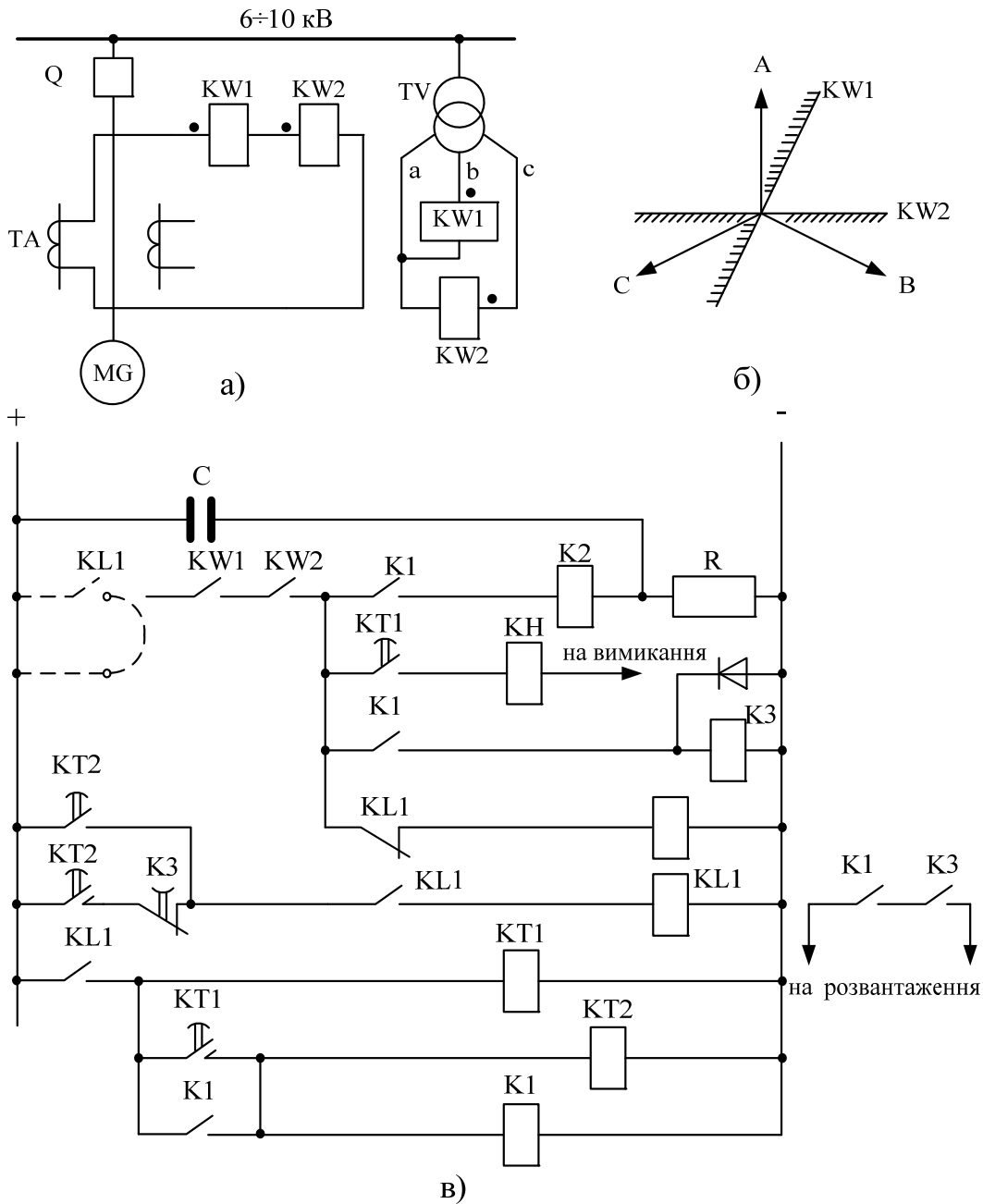


Рисунок 1.5 – Схема та діаграма роботи захисту від асинхронного режиму

На рисунку 1.6 наведена схема захисту, який використовує виявлення асинхронного режиму СД за кутом зсуву фаз між напругою і струмом статора.

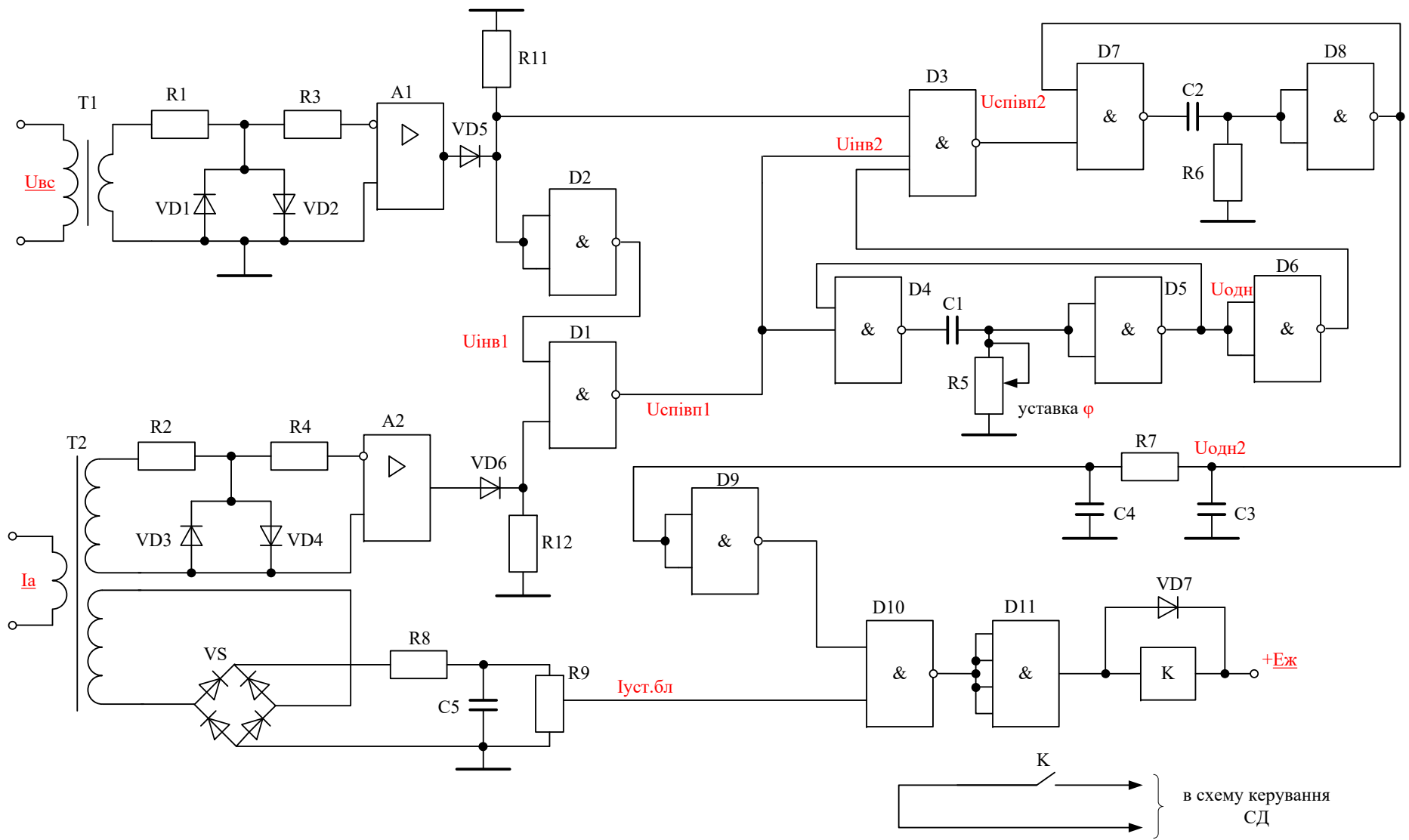


Рисунок 1.6 – Схема захисту від асинхронного режиму, яка реагує на кут зсуву фаз

Він має такі функціональні блоки [7]:

- перетворювач напруги T1, R1, VD1, VD2;
- перетворювач струму T2, R2, VD3, VD4;
- підсилювачі-формувачі A1, A2;
- схеми збігу на логічних елементах D1, D3, D10;
- інвертори D2, D6, D9;
- одинівбратори D4, D5, C1, R5 та D7, D8, C2, R6;
- фільтр низької частоти C3, R7, C4;
- формувач модуля струму статора VS, R8, C5, R9;
- виконавчий блок D11, K.

Лінійна напруга \underline{U}_{bc} і фазний струм статора \underline{I}_a , між якими контролюється кут, подаються на вхідний трансформатор T1 та давач струму T2, які здійснюють їх гальванічне розв'язування до рівнів, що забезпечують надійну роботу пристрою. У вхідних перетворювачах здійснюється і обмеження сигналів діодними обмежувачами VD1, VD2 та VD3, VD4 до рівня, який є безпечним для роботи аналогових мікросхем.

З виходів перетворювачів напруги та струму сигнали подаються на входи підсилювачів-формуваців, де перетворюються в біполярні прямокутні імпульси, амплітуда яких практично не залежить від амплітуди вхідних сигналів. З виходу підсилювача-формувача струму високого логічного рівня надходять на вхід логічного елемента «2I-HE» D1, а з виходу підсилювача-формувача напруги імпульси $U_{инв1}$ через інвертор D2 надходять на другий вхід D1. На виході цього логічного елемента під час збігу імпульсів високого рівня формується імпульс $U_{спів1}$ низького рівня, тривалість якого залежить від фазового зсуву між струмом та напругою. Сформований імпульс надходять на вхід логічного елемента «I-HE» D3 і одночасно запускає одинівбратор D4, D5, який виробляє імпульс низького рівня $U_{одн}$, тривалість якого регулюється резистором R5 (задавач уставки спрацювання за ϕ). Імпульс одинівбратора інвертується інвертором D6, $U_{инв2}$ надходять на другий вхід D3. Імпульс на виході D3 $U_{спів2}$ з'являється лише в тому випадку, якщо тривалість імпульсу одинівбратора більше тривалості імпульсу з D1, що при подачі на входи \underline{I}_a і \underline{U}_{bc} свідчить про AP СД. На третій вхід D3 надходять сигнали з підсилювача-формувача напруги A1, завдяки чому імпульс на виході D3 з'являється тільки за споживання активної потужності.

Наявність зв'язку між A1 і A2 дозволяє налаштовуватися від неселективних спрацювань захисту при глибоких синхронних качаннях перезбудженого СД та при деяких видах несиметричних КЗ. Імпульс з виходу D3 розширюється другим одинівбратором D7, D8 ($U_{одн2}$), згладжується фільтром C3, R7, C4 і після інвертора D9 у вигляді потенціалу високого логічного рівня надходить на вхід логічного елемента «2I-HE» D10. На другий вхід D10 надходить сигнал з формувача модуля \underline{I}_a . Уставка спрацювання пристрою за струмом статора задається потенціометром R9. У випадку збільшення ϕ вище уставки, але при струмі $|I_{ст}| < I_{уст.бл.}$ потенціал на R9 нижчий напруги логічної одиниці мікросхеми D10 і спрацювання пристрою не

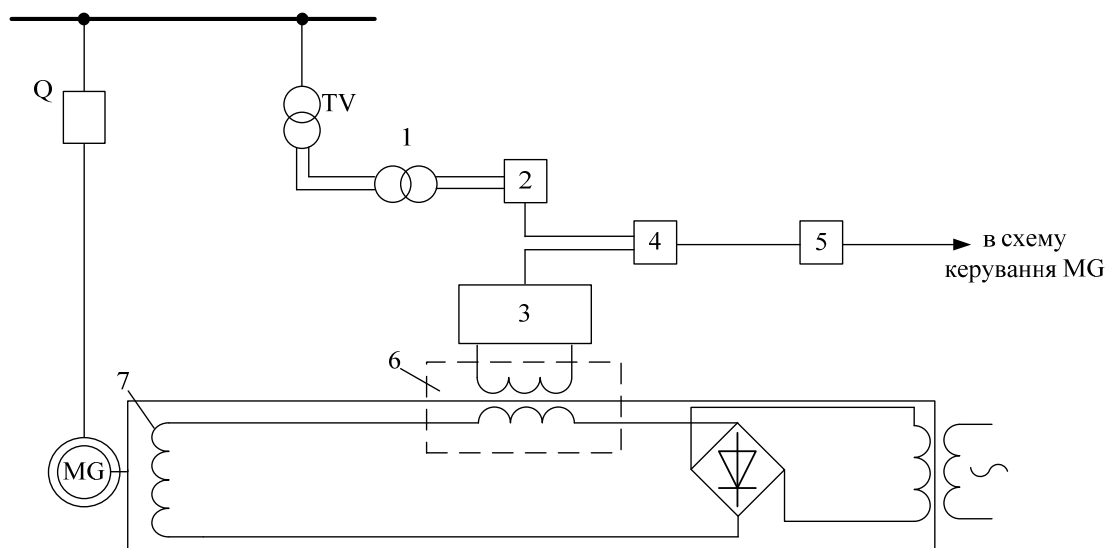
буде. При значеннях струму, який перевищує уставку блокування, на виході D10 з'являється сигнал низького логічного рівня, і силовий вентиль D11 здійснює комутацію реле К, яке видає сигнал в схему керування СД.

Очевидно, при асинхронному пуску СД, захист буде спрацьовувати. Налаштування від пуску можна здійснити шляхом введення блокування або витримки часу. В останньому випадку відповідний орган може виконувати і функції захисту від затягнутого пуску ЕД.

Захисти, які реагують на змінювання внутрішнього кута синхронного електродвигуна, здатні при надійному їх виконанні найбільш вірогідно виявляти асинхронний режим шляхом реагування на змінювання кута між вектором ЕРС СД та вектором напруги мережі. Більшість пристроїв захисту використовує або фотодавач, або давачі, які механічно зв'язані з валом СД.

Для реєстрації кута δ за допомогою фотодавача на валові закріплюється доріжка з чергуванням чорних та білих відрізків. Давач та його джерело світла встановлюють в безпосередній близькості від вала СД на окремій конструкції. В реальних умовах роботи СД доріжка забруднюється, що призводить до нечіткості меж між чорними та білими відрізками. Крім того, в АР вал СД вібрує, що робить сигнал, який потрапляє на фотодавач, нестійким та нечітким.

Для СД з БПЗ за давач просторового положення вектора ЕРС можна використовувати безконтактний давач струму збудження (рис. 1.7).



- | | |
|---------------------------------------|--------------------------------|
| 1 – роздільний трансформатор; | 5 – блок логіки; |
| 2, 3 – перетворювачі; | 6 – індуктивна обмотка давача; |
| 4 – блок порівняння величин за фазою; | 7 – обмотка збудження СД. |

Рисунок 1.7 – Захист від асинхронного режиму з використанням безконтактного давача кута δ

Індукторна обмотка давача 6 увімкнена послідовно з обмоткою збудження 7 СД. Якірня обмотка давача та вторинна обмотка роздільного тра-

нсформатора 1, який є давачем просторового положення вектора напруги мережі, підключені до перетворювачів 2 і 3, виходи яких заведено в блок порівняння величин за фазою 4. Блок логіки 5 формує сигнали на гасіння поля, ресинхронізацію та вимикання СД.

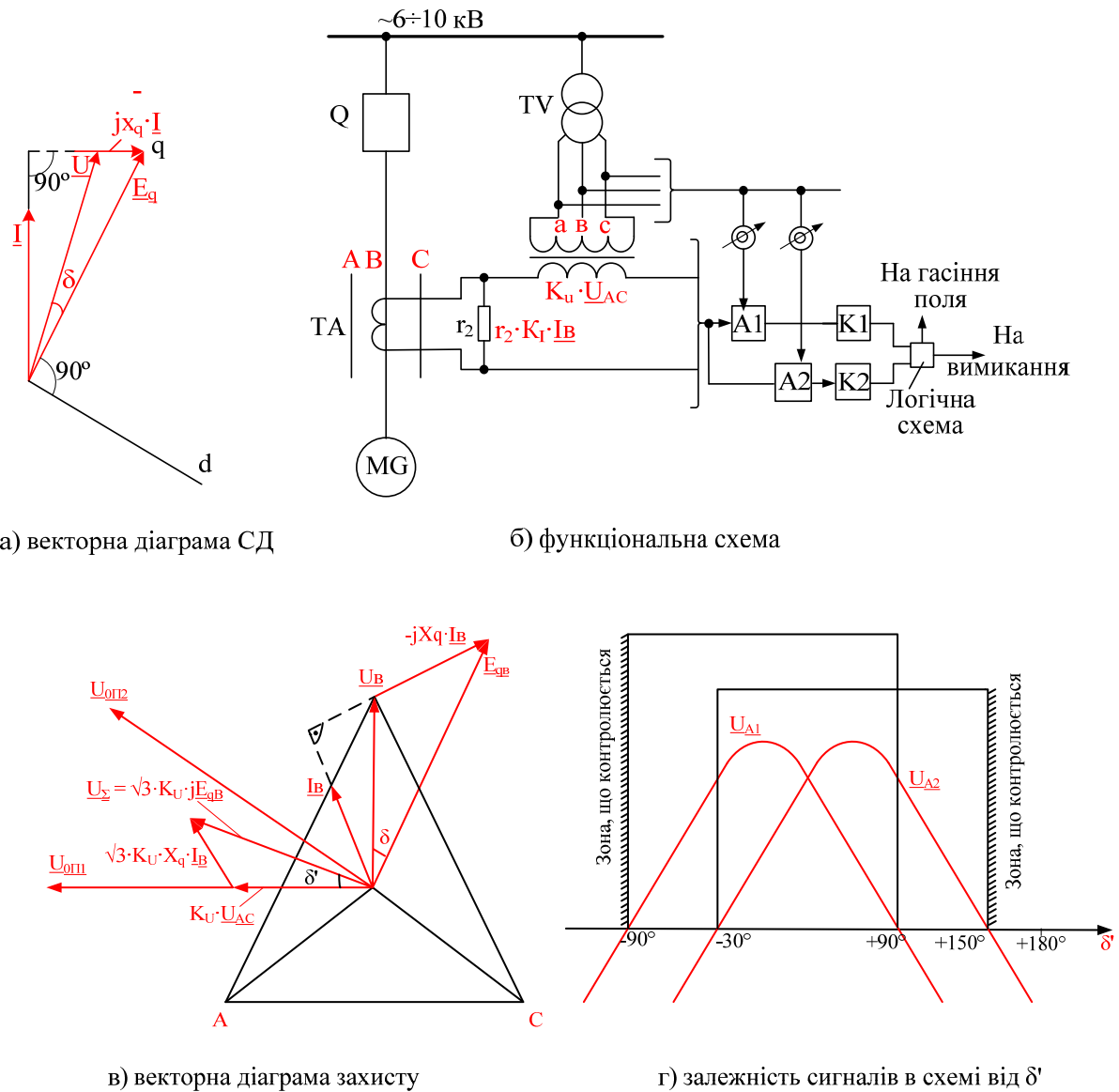


Рисунок 1.8 – Принцип дії та функціональна схема захисту від асинхронного режиму, який реагує на фіктивний внутрішній кут δ' синхронного двигуна

Складність отримання інформації про положення вектора ЕРС СД за допомогою давачів, так або інакше зв'язаних з валом СД, призвела до створення захисту, який реагує на кут δ' , що відповідає куту δ на векторній діаграмі СД в усталеному режимі (рис. 1.8, а). На рисунку 1.8, б) наведена функціональна схема, яка пояснює принцип дії захисту. На входи вимірювальних елементів А1 та А2 подається сума двох напруг:

– напруги, яка пропорційна струму статора (наприклад, струму фази В), і знімається з резистора, що ввімкнений у вторинне коло ТС:

$$U_1 = r_2 \cdot K_I \cdot \underline{I}_B ;$$

– напруги, яка пропорційна міжфазній напрузі двох інших фаз статора (наприклад, \underline{U}_{AC}) та отримується від вимірювального трансформатора напруги:

$$\underline{U}_2 = K_U \cdot \underline{U}_{AC} .$$

Сума цих напруг

$$\underline{U}_\Sigma = K_U \cdot \underline{U}_{AC} + r_2 \cdot K_I \cdot \underline{I}_B = \sqrt{3} \cdot K_U \cdot j\underline{U}_B + r_2 \cdot K_I \cdot \underline{I}_B .$$

При виконанні умови

$$r_2 \cdot K_I / \sqrt{3} \cdot K_U = x_q$$

отримаємо

$$\underline{U}_\Sigma = \sqrt{3} \cdot K_U \cdot (j\underline{U}_B + x_q \cdot \underline{I}_B) = \sqrt{3} \cdot K_U \cdot j(\underline{U}_B - j \cdot x_q \cdot \underline{I}_B) = \sqrt{3} \cdot K_U \cdot j\underline{E}_{qB}$$

Таким чином, вектор \underline{U}_Σ пропорційний ЕРС фази В та зсунутий на 90° відносно неї (див. рис. 1.8, в). Полярність напруги на виході кожного вимірювача потужності визначається зсувом фаз між вхідною та опорною напругами. За опорну напругу для А1 вибрано $\underline{U}_{оп1} = \underline{U}_{AC}$, а для А2 – $\underline{U}_{оп2} = \underline{U}_{BC}$. При цьому напруга на виході А2 позитивна при $-30^\circ < \delta' < 150^\circ$, а на виході А1 – при $-90^\circ < \delta' < 90^\circ$. Сигнали з виходів А1 і А2 надходять в логічну схему через високочутливі релейні елементи К1 та К2.

На рис. 1.8, г) наведена зона змінювання δ' , в якій є сигнали на виході К1 та К2, що дозволяє судити про відсутність АР. При змінюванні δ' від 150 до 270° видається сигнал на ресинхронізацію або (і) на вимикання СД. В асинхронних режимах кут δ' не може вважатися таким, що дорівнює куту δ .

2 ЗАХИСТ ВІД ВТРАТИ ЖИВЛЕННЯ

Захист від втрати живлення встановлюється для запобігання пошкодження електродвигунів (які загальмувалися в результаті короткочасного або тривалого зниження напруги) при відновленні живлення та при несинхронному ввімкненні (для СД), а також для полегшення умов самозапуску електродвигунів відповідальних механізмів, забезпечення умов техніки безпеки і технологічного процесу. Іншими словами, він виконує декілька функцій, з яких тільки запобігання пошкодження є функцією захисту, а дві інші належать до автоматики мережі та автоматики безпеки. Можливість такого поєднання функцій в одному захисті зумовлюється загальною для всіх вихідною інформацією та загальними об'єктами, на які потрібно впливати, – електродвигун, його вимикачі, а у СД ще й пристрій гасіння поля. Оскільки для декількох електродвигунів, підключених до однієї розподільної установки, реакція на режим втрати живлення, як правило, має бути однаковою, захист від втрати живлення виконується груповим. При цьому вимикання та, за необхідності, роззбудження СД здійснюється за допомогою встановлених в схемах захисту окремих ЕД груп проміжних реле, що підключені шляхом магістральних шинок в КРУ до вихідних кіл захисту від втрати живлення.

Інформація про втрату живлення може бути отримана двома різними шляхами [7]: від допоміжних контактів вимикача лінії, яка живить секцію збірних шин РУ, до яких підключені електродвигуни, а також вихідних кіл релейних захистів, що діють на вимикання цього вимикача, або від вимірювальних реле: мінімальної напруги, мінімальної частоти, направлення потужності. Потрібно відмітити, що якщо перший спосіб забезпечує фіксацію втрати живлення практично зразу, як тільки настає цей режим, то другий відрізняється тим, що з моменту втрати живлення до отримання інформації про нього від вимірювальних реле має пройти деякий час t_0 , за який параметр, що вимірюється, змінюється від значення, що характеризує нормальний режим, до уставки спрацювання реле.

В більшості сучасних електроустановок обидва способи поєднують таким чином, щоб мати можливість за найменших затрат реалізувати вимоги щодо часу та логіки дії захисту. Самі вимоги визначаються поведінкою електродвигуна при втраті живлення, а також необхідністю (з точки зору технологічного процесу), можливістю (з точки зору безпеки) та технологічним здійсненням (з точки зору параметрів мережі і захисної апаратури) самозапуску ЕД.

Захист діє на вимикання електродвигунів, які, з або інших причин, не беруть участі в самозапуску, і на гасіння поля СД, які підлягають самозапуску. На багатошвидкісному двигуні, для якого передбачено самозапуск, захист діє на автоматичне перемикачання його на меншу швидкість.

Залежно від вимог щодо швидкодії та від співвідношення синхронних і асинхронних електродвигунів, які приєднано до одної електрично зв'язаної мережі, груповий захист від втрати живлення виконується у вигляді захисту мінімальної напруги або захисту мінімальної напруги та мінімальної частоти з блокуванням стосовно направлення потужності [1, 2, 4, 7].

Захист мінімальної напруги передбачається при відсутності в мережі, для якої розглядається режим втрати та відновлення живлення дією АВР і АПВ, синхронних електродвигунів або коли їх сумарна потужність не перевищує 5÷10% загальної потужності всіх одночасно працюючих ЕД, а вимоги до скорочення перерви живлення (наприклад, з точки зору забезпечення самозапуску) не висуваються.

Захист виконується [7]:

а) з однією уставкою за напругою та однією за часом спрацювання, якщо до секції шин РУ не підключені СД, а всі АД, які загальмувалися при короткочасному зниженні напруги або перерві електропостачання, або успішно самозапускаються, або не підлягають самозапуску;

б) з однією уставкою за напругою та двома за часом спрацювання, якщо поряд з АД, що призначені для самозапуску, до секції шин підключені також СД, що підлягають вимиканню або розбудженню перед відновленням живлення. Вказане здійснюється ступенем з меншою витримкою часу. Другий ступінь, з більшою витримкою часу, передбачений для вимикання ЕД при тривалій відсутності напруги за умовою техніки безпеки або технології виробництва;

в) з двома уставками за напругою та трьома за часом спрацювання, коли, крім електродвигунів, які самозапускаються та відключаються перед відновленням живлення електродвигунів, до збірних шин розподільної установки приєднано двигуни, які можуть зупинитися при зниженні напруги в результаті КЗ в мережі або самозапуску інших ЕД і тому підлягають вимиканню у вказаних режимах. Це здійснюється окремим ступенем захисту, який діє при такій напрузі на збірних шинах та з такою витримкою часу, при яких ЕД, що розглядаються, вже не можуть розкрутитися. Два інших ступеня захисту, які мають однакову уставку за напругою і різні за часом, діють аналогічно пункту «б»;

г) з двома уставками за напругою та двома за часом спрацювання в тих випадках, коли при короткочасних зниженнях напруги або перервах живлення, а також в процесі самозапуску допускається одночасне вимикання, крім ЕД, які можуть зупинятися в розглядуваних режимах, також і інших ЕД невідповідальних механізмів резервної секції збірних шин або коли це вимикання є необхідним.

Захист мінімальної напруги та мінімальної частоти з блокуванням за направленням потужності передбачається, якщо в мережі, для якої розглядається режим втрати і відновлення живлення дією АВР або АПВ, є СД, причому до скорочення часу перерви живлення висуваються високі вимоги.

У вказаних випадках захист від втрати живлення виконується комбінованим, який поєднує функції захисту мінімальної напруги та захисту мінімальної частоти з органом направлення потужності, який блокує його роботу при направленні потужності «до шин». Захист мінімальної частоти діє з уповільненням аналогічно ступеню захисту мінімальної напруги з меншою витримкою часу.

Використання в схемі захисту реле мінімальної частоти дозволяє суттєво скоротити час t_0 від моменту настання втрати живлення до отримання інформації про це логічними органами захисту. Зменшення t_0 виникає за рахунок того, що уставка спрацювання реле мінімальної частоти може бути значно більш високою (у відносних одиницях $f_{cp*} = f_{cp} / f_{ном} = 0,96 \div 0,98$), ніж уставка реле мінімальної напруги ($U_{cp*} \leq 0,5 \div 0,7$), а на секції РУ, яка втратила живлення, частота досягає значення уставки спрацювання раніше, ніж рівень напруги становиться рівним U_{cp} . Вказане справедливе для більшості випадків спільного вибігу синхронних та асинхронних двигунів, незважаючи на те, що швидкість зниження частоти при втраті живлення df/dt не обов'язково більша, а часто і менша швидкості зниження напруги.

Необхідно відмітити, що зниження частоти може виникати не тільки при втраті живлення, а й при аварії в енергосистемі живлення, що супроводжується дефіцитом активної потужності. Якщо вимикання невідповідальних ЕД захистом від втрати живлення під час дефіциту потужності в енергосистемі або пристроєм АЧР в режимі втрати живлення ще можна було б допустити, то відносно відповідальних ЕД таку дію потрібно визнати неправильною. Більше того, враховуючи, що дія захисту від втрати живлення направлена на гасіння поля електродвигунів, які самозапускаються, тобто на переведення їх в асинхронний режим, робота захисту в той час, коли має діяти АЧР, може призвести до збільшення дефіциту реактивної потужності. Так з'являється додаткова вимога до захисту від втрат живлення – неспрацювання в умовах системних аварій, які супроводжуються зниженням частоти.

Узгодити дію захисту та АЧР шляхом вибору відповідних уставок спрацювання за частотою та часом, як правило, не вдається. Найбільш дієвим виявляється використання в захисті реле направлення потужності, яке ввімкнено за схемою фіксації знака активної потужності в лінії, що живить секцію РУ з підключеними до неї ЕД. Коли зниження частоти виникає в умовах подачі активної потужності до шин, це означає, що змінювання частоти – результат системної аварії: дія АЧР дозволяється. Якщо зниження частоти збігається з припиненням подачі активної потужності до шин, то це свідчить про втрату живлення.

Використання реле направлення потужності в захисті від втрати живлення не вирішує всіх проблем, які пов'язані з налаштуванням від режиму роботи АЧР та забезпеченням потрібної, в більшості випадків, високої швидкодії.

З метою економії апаратури реле мінімальної частоти зазвичай передбачається загальним для захисту від втрати живлення та пускових органів АВР на підстанції або РУ.

Розглянемо деякі особливості виконання типових схем захисту від втрати живлення на постійному оперативному струмі.

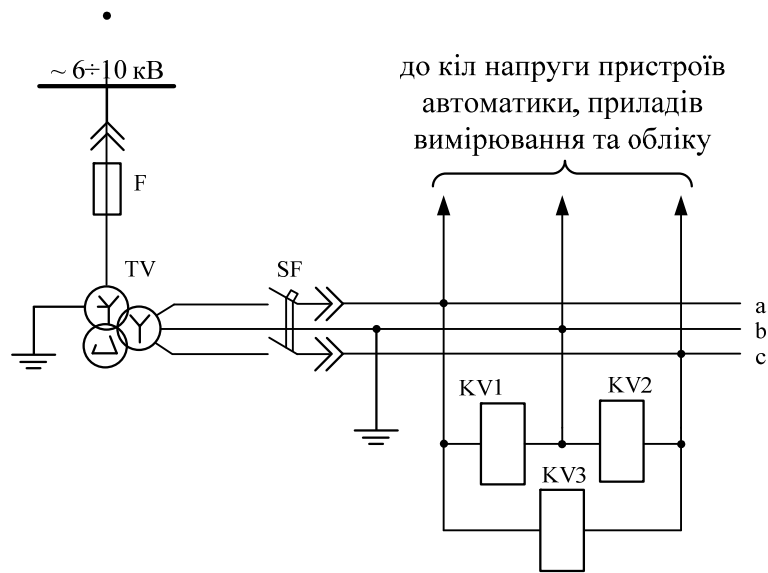
На рис. 2.1 наведена схема одноступінчастого групового захисту мінімальної напруги. Схема виконана з трьома реле (KV1÷KV3) типу РН-54/160, що дозволяє одночасно використовувати їх і для контролю кіл трансформатора напруги. Встановлення трьох реле напруги та підключення оперативних кіл захисту через контакти автомата SF та кінцевого вимикача візка трансформатора напруги SQ унеможлиблює зайве спрацювання захисту при перегоранні будь-якого запобіжника на стороні 6÷10 кВ, несправностях вторинних кіл та викачуванні візка TV з КРУ. Витримка часу захисту створюється реле часу КТ1, яке тривало витримує напругу на своїй обмотці до 110% номінального значення. Спрацювання захисту фіксується вказівним реле КН1 паралельного ввімкнення.

На рис. 2.2 наведена схема групового захисту мінімальної напруги з одною уставкою за напругою та двома за часом спрацювання. Ця схема відрізняється від схеми на рис. 2.1 встановленням двох реле часу замість одного.

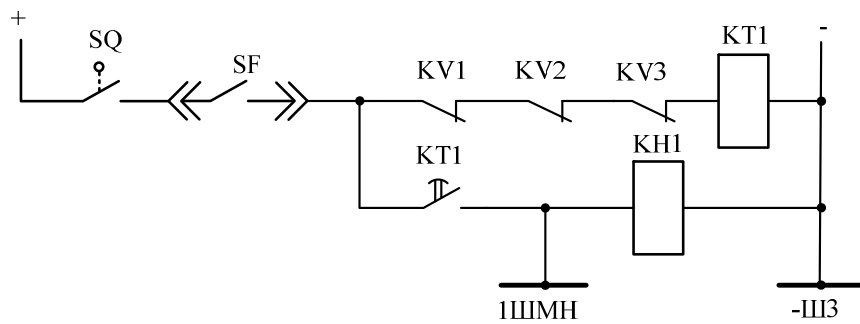
Реле КТ1 з малою витримкою часу призначено для здійснення вимикання електродвигунів, які не самозапускаються, та розбудження виділених до самозапуску ЕД, а реле КТ2 – для вимикання ЕД при тривалому зникненні напруги. Спрацювання першого ступеня за часом фіксується вказівним реле КН1, а другого – вказівним реле КН2.

В схемі групового захисту мінімальної напруги з двома уставками за напругою та часом спрацювання (рис. 2.3) перший ступінь з великою уставкою за напругою та меншою за часом виконано з реле напруги KV1÷KV3 та реле часу КТ1, а другий – з меншою уставкою за напругою та великою за часом спрацювання – з реле KV4 і реле часу КТ2. Прийняте ввімкнення розмикального контакту реле KV4 після трьох з'єднаних послідовно розмикальних контактів реле KV1÷KV3 дозволяє запобігти зайвої роботи другого ступеня захисту при перегоранні будь-якого з запобіжників на стороні 6÷10 кВ трансформатора напруги.

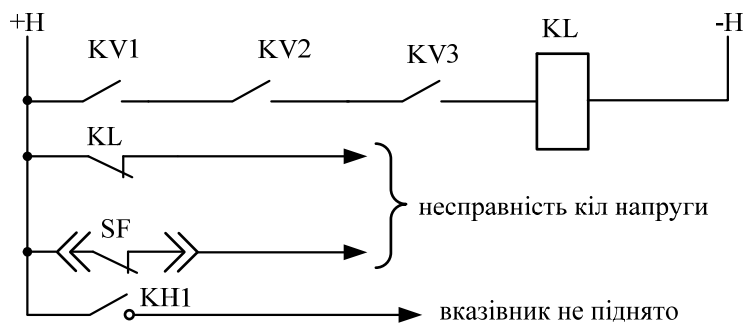
В системі власних потреб ТЕС і АЕС часто використовується схема групового захисту мінімальної напруги з використанням фільтр-реле напруги оберненої послідовності типу РНФ-1М (рис. 2.4). Такий варіант захисту доцільно використовувати, коли для підключення реле мінімальної напруги застосовується трансформатор напруги типу НТМІ, який захищається від міжфазних КЗ запобіжниками на стороні ВН вказаного трансформатора. У цьому випадку контроль справності кіл напруги, що передбачено в схемі рис. 2.2, виявляється неефективним при перегоранні запобіжника в одній фазі. Це зумовлює застосування для контролю фільтр-реле напруги оберненої послідовності KVZ.



а) кола напруги



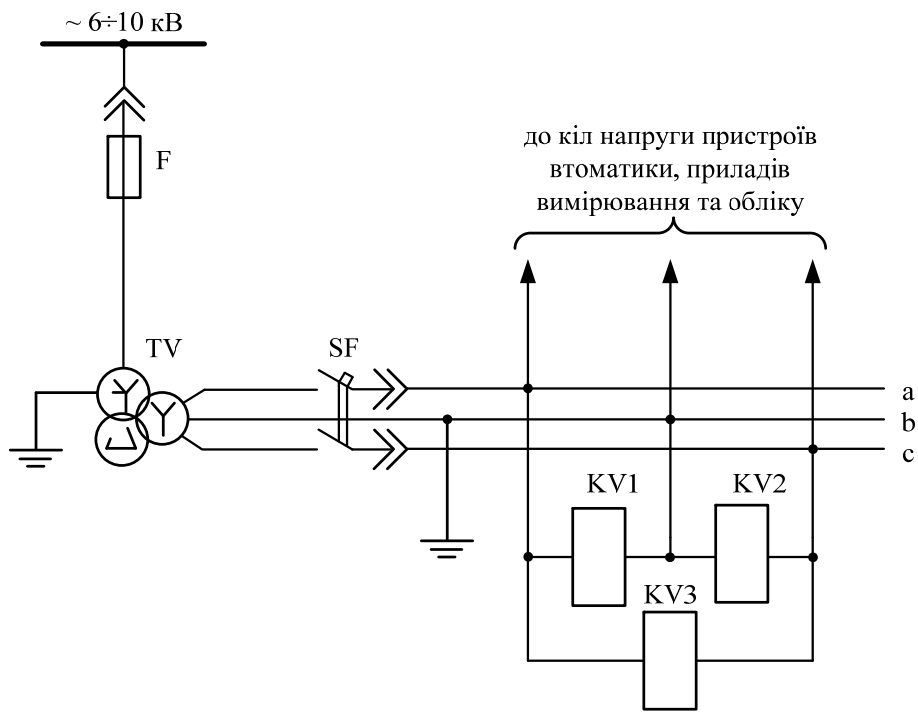
б) кола оперативного струму



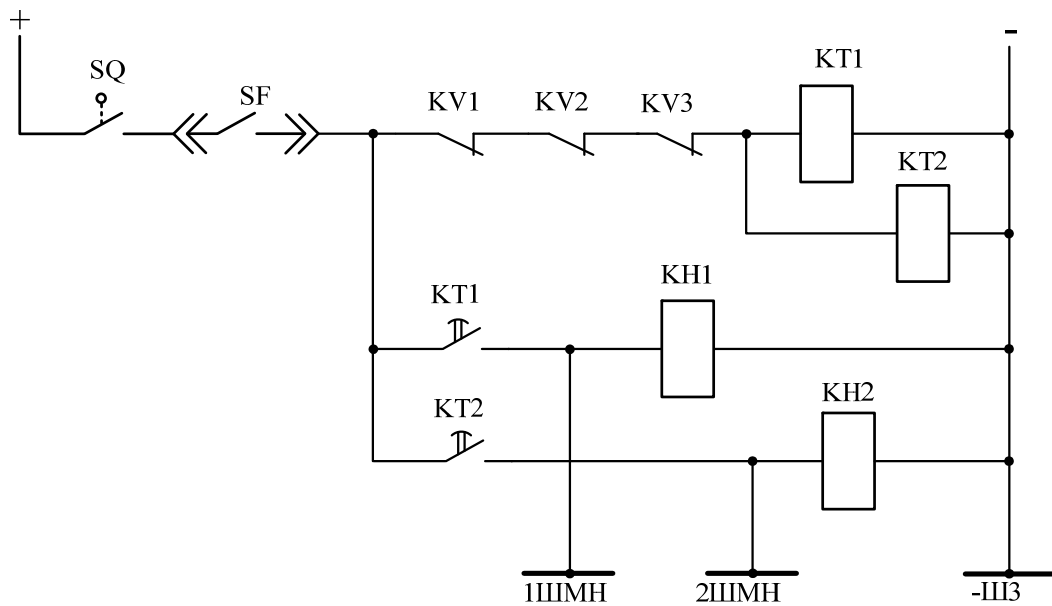
в) кола сигналізації

TV – трансформатор напруги; F – високовольтний запобіжник;
 KV1÷KV3 – реле напруги типу РН-54/160; SF – автомат;
 KT1 – реле часу типу РВ-133; KL – реле проміжне типу РП-23;
 KH1 – реле вказівне типу РУ-1; SQ – кінцевий вимикач візка TV;

Рисунок 2.1 – Схема одноступінчастого групового захисту мінімальної напруги



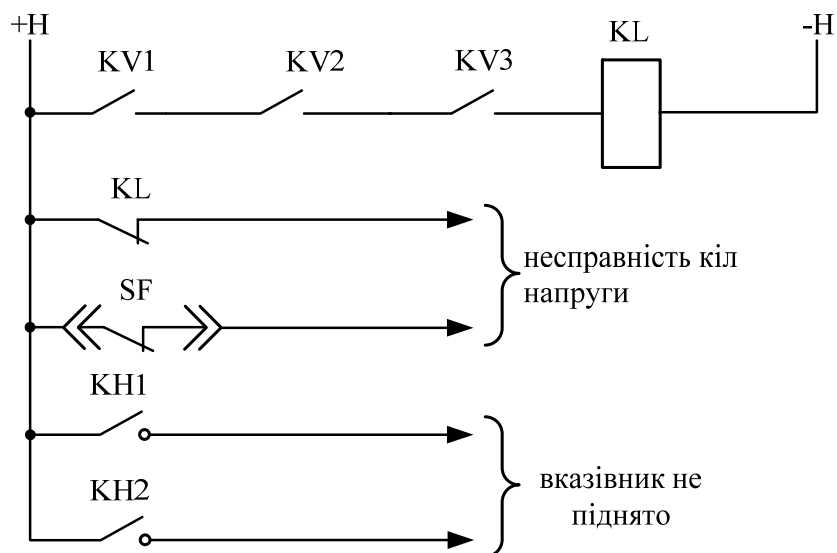
а) кола напруги



б) кола оперативного струму

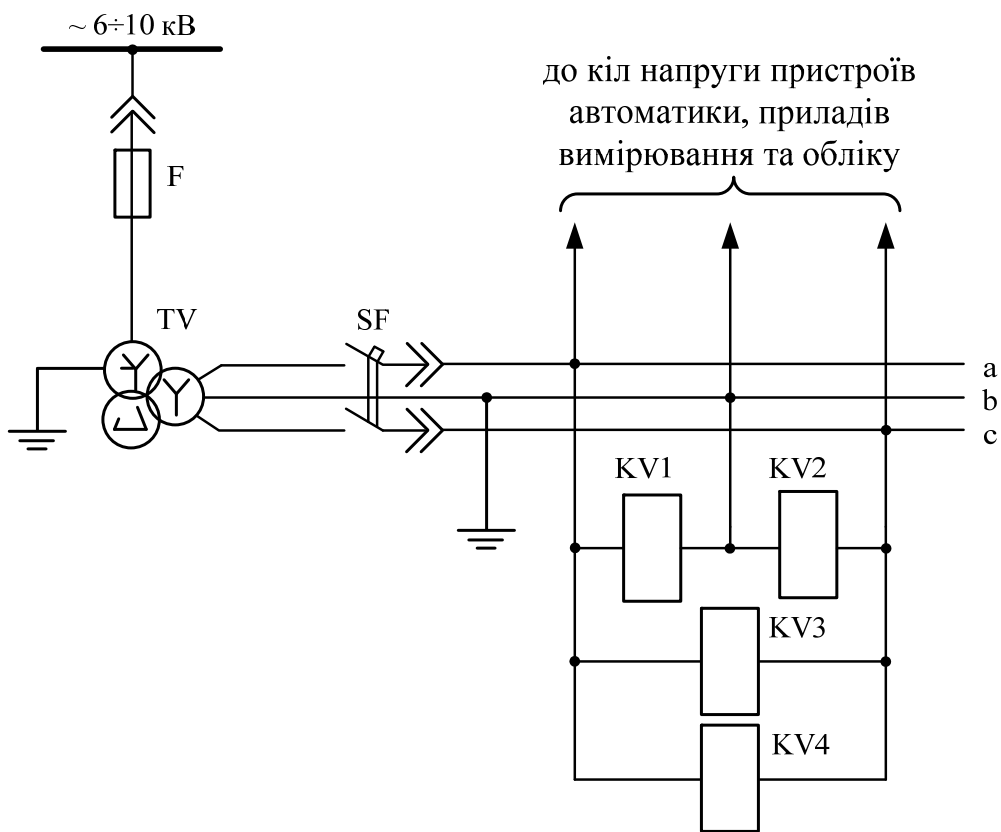
- TV – трансформатор напруги; F – високовольтний запобіжник;
 KV1÷KV3 – реле напруги типу РН-54/160;
 KT1 – реле часу типу РВ-123; KT2 – реле часу типу РВ-133;
 KL – реле проміжне типу РП-23; KH1, KH2 – реле вказівне типу РУ-1;
 SQ – кінцевий вимикач візка TV; SF – автомат;

Рисунок 2.2 – Схема групового захисту мінімальної напруги з однією уставкою за напругою та двома – за часом спрацювання



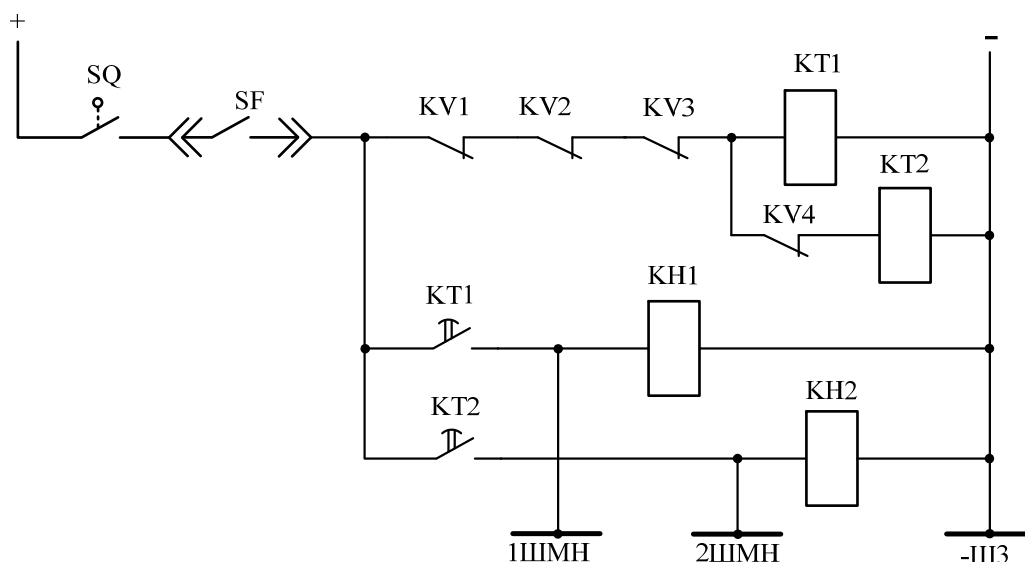
в) кола сигналізації

Рисунок 2.2 (продовження)

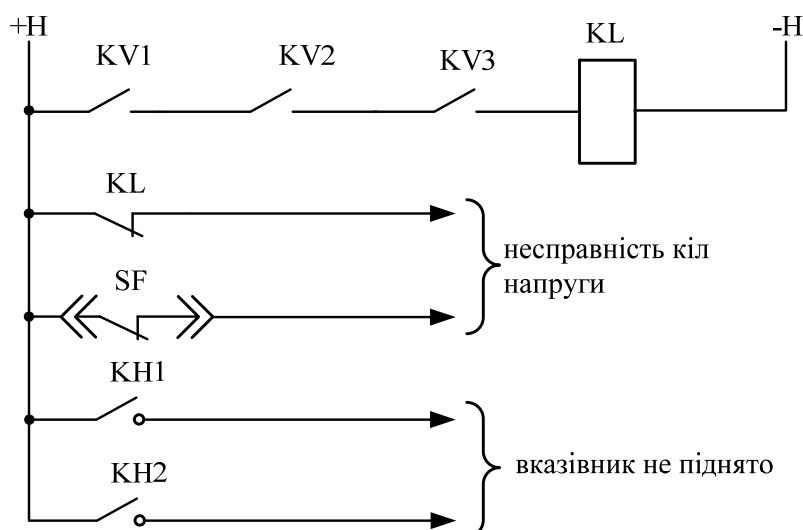


а) кола напруги

Рисунок 2.3 – Схема групового захисту мінімальної напруги з двома уставками за напругою та часом спрацювання



б) кола оперативного струму



в) кола сигналізації

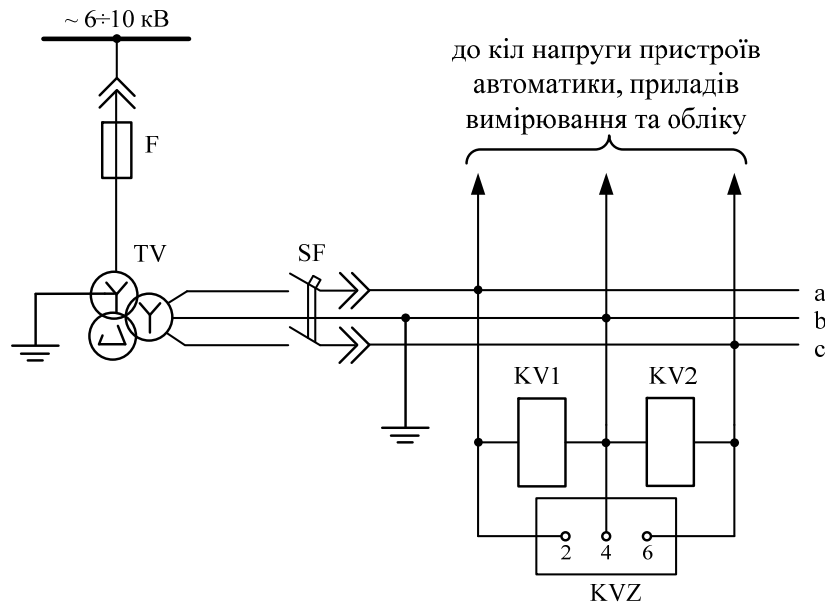
TV – трансформатор напруги; F – високовольний запобіжник;
 KV1÷KV4 – реле напруги типу РН-54/160;
 KT1 – реле часу типу РВ-123; KT2 – реле часу типу РВ-133;
 KL – проміжне реле типу РП-23; КН1, КН2 – реле вказівне типу РУ-1;
 SQ – кінцевий вимикач візка TV; SF – автомат;

Рисунок 2.3 (продовження)

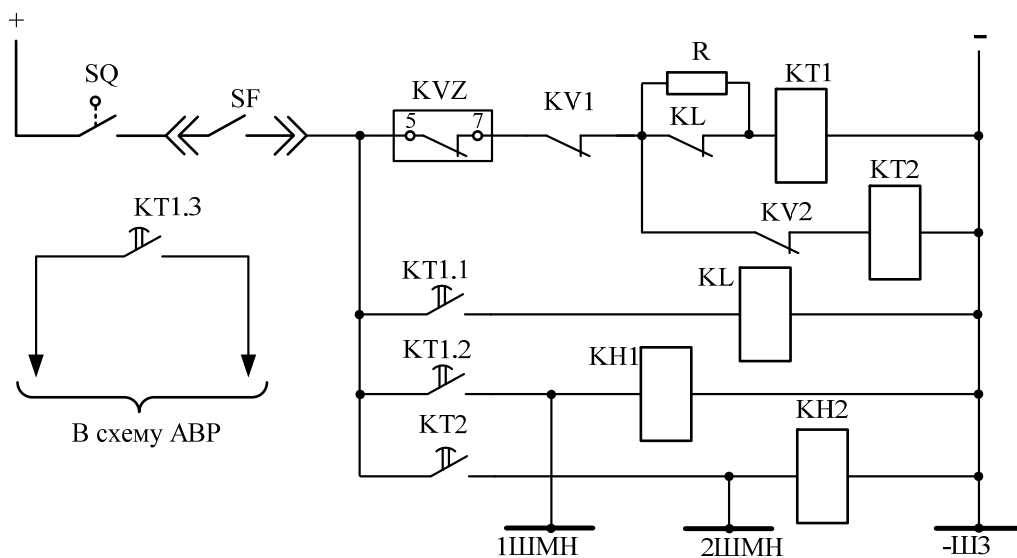
Встановлення цього реле дозволяє виконати захист мінімальної напруги з використанням всього двох реле напруги [7, 8]: KV1 – для першого ступеня з великою уставкою та KV2 – для другого ступеня з меншою уставкою за напругою. Як реле часу першого ступеня використовується реле KT1, тимчасово-замикальний контакт якого застосовується в схемі АВР

елементів живлення власних потреб. В зв'язку з тим, що реле цього типу не розраховано на тривале ввімкнення на номінальну напругу оперативного струму, в схемі передбачено додатковий резистор R, який вводиться в роботу після спрацювання проміжного реле KL.

За необхідності здійснити груповий захист мінімальної напруги з двома уставками за напругою та трьома за часом спрацювання за один ступінь захисту використовують пусковий орган мінімальної напруги АВР.

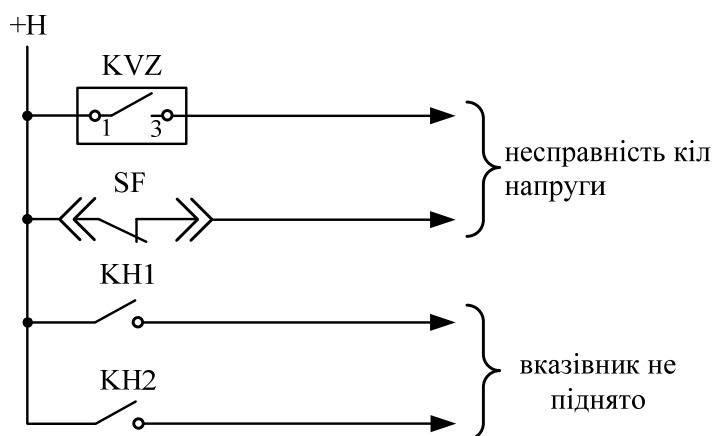


а) кола напруги



б) кола оперативного струму

Рисунок 2.4 – Схема групового захисту мінімальної напруги з двома уставками за напругою та часом спрацювання з використанням реле РНФ-1М



в) кола сигналізації

TV – трансформатор напруги; F – високовольтні запобіжники;
 KVZ – фільтр-реле напруги оберненої послідовності типу РНФ-1М;
 KV1, KV2 – реле напруги типу РН-54/160;
 KT1 – реле часу типу РВ-122; KT2 – реле часу типу РВ-133;
 KL – проміжне реле типу РП-23; КН1, КН2 – реле вказівне типу РУ-1;
 SQ – кінцевий вимикач візка TV; SF – автомат типу АП-50-3М;
 R – резистор типу ПЭВ-50, 3000 Ом

Рисунок 2.4 (продовження)

На рисунку 2.5 наведена схема групового захисту мінімальної напруги та мінімальної частоти з блокуванням за направленням потужності для підстанції з двообмотковими трансформаторами або розподільного пункту, коли до шин 6÷10 кВ не приєднані ЕД, які можуть зупинитися в результаті КЗ в мережі або самозапуску інших ЕД. Захист мінімальної напруги виконано аналогічно схемі на рисунку 2.3. Захист мінімальної частоти з блокуванням за направленням потужності, крім функцій захисту від втрати живлення, виконує також функції пускового органу АВР «за частотою». В захисті передбачено напівпровідникове реле зниження частоти КF типу РЧ1, живлення якого здійснюється від джерела постійного оперативного струму, реле направлення потужності KW1 і KW2, струмові обмотки яких підключені до ТС камер вимикачів вводів на секцію шин. Обмотки напруги реле направлення потужності увімкнені у вторинні кола TV через замикальні контакти реле KL2 – повторювача реле КF. Це виконано для зниження навантаження на TV і для запобігання «приварювання» контактів реле KW1 і KW2. В нормальному режимі електропостачання для забезпечення працездатності захисту в режимі, коли вимикач вводу на дану секцію відключено, а електродвигуни отримують живлення від другої секції через увімкнений секційний вимикач, в коло обмотки реле часу КТ увімкнені контакти проміжного реле – повторювача реле направлення потужності від втрати живлення суміжної секції і контакти, які фіксують те або інше положення секційного вимикача. Захист мінімальної частоти з блокуванням

за направленням потужності діє на вимкання або розбудження ЕД через шинки першого, діючого з меншою витримкою часу, ступеня захисту мінімальної напруги. Передбачена аналогічна дія на ЕД при вимкнанні вимикача.

Для підстанцій з триобмотковими (напругою 110-220/10/6 кВ) або двообмотковими (напругою 110-220/6-10/6-10 кВ) трансформаторами схема групового захисту мінімальної напруги та мінімальної частоти з блокуванням за напрямом потужності виконується дещо інакше.

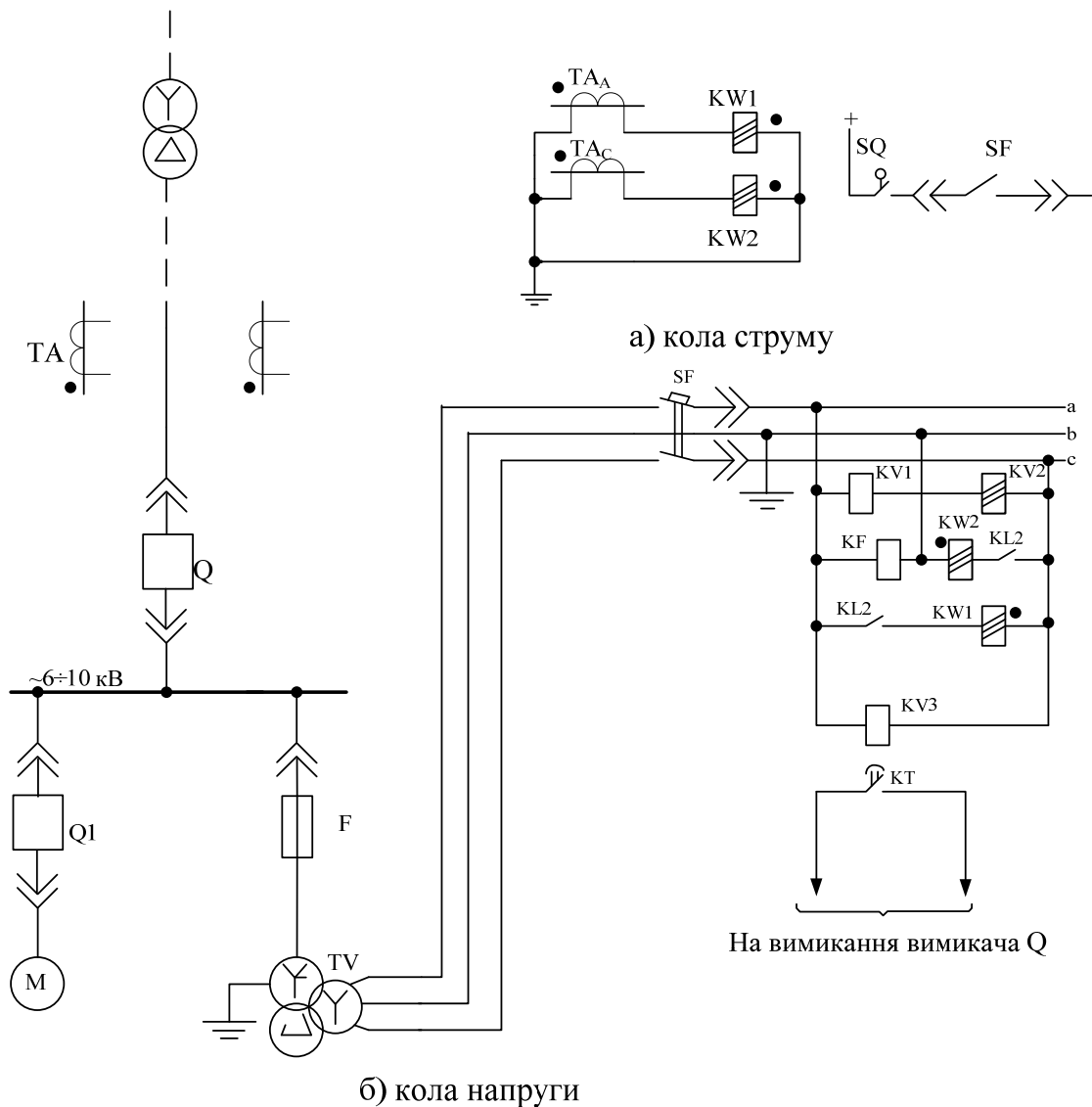
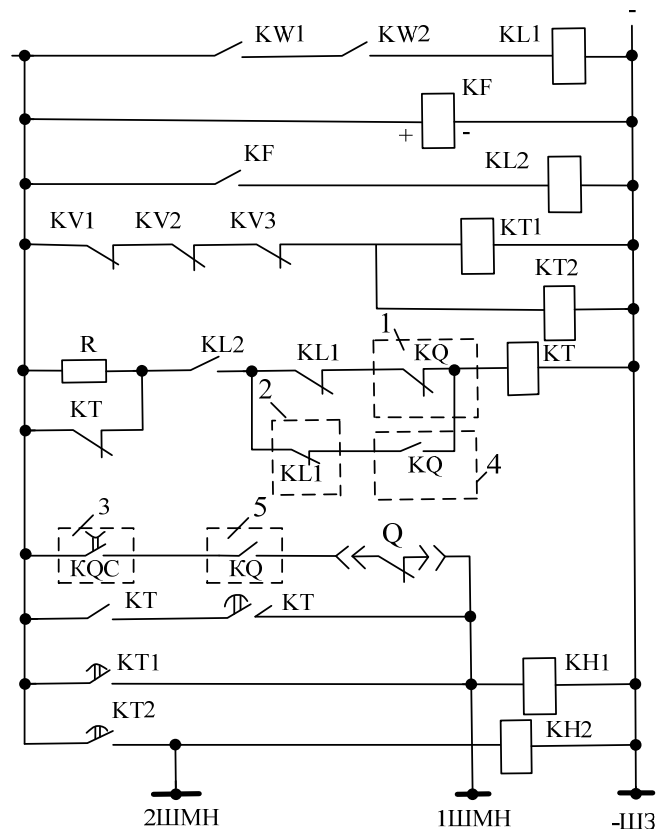


Рисунок 2.5 – Схема групового захисту мінімальної напруги та мінімальної частоти з блокуванням за напрямом потужності



в) кола оперативного струму



г) кола сигналізації

- ТА – трансформатори струму; TV – трансформатор напруги;
 Q1, Q – вимикачі; F – високовольтні запобіжники;
 KW1, KW2 – реле потужності типу РБМ-171/1;
 KF – реле частоти типу РЧ-1;
 KV1÷KV3 – реле напруги типу РН-54/160;
 KL1÷KL3 – проміжні реле типу РП-23; КТ – реле часу типу РВ-122;
 КТ1 – реле часу типу РВ-123; КТ2 – реле часу типу РВ-133;
 KH1, KH2 – реле вказівне типу РУ-1; R – резистор типу ПЭВ-50;
 SQ – кінцевий вимикач візка TV; SF – автомат;
 1, 4 – контакти реле фіксації увімкненого положення секційного вимикача;
 2 – контакт реле KL1 зі схеми захисту від втрати живлення другої секції;
 3 – контакт реле положення вимикача Q «увімкнено»;
 5 – контакт реле фіксації увімкненого положення вимикача Q

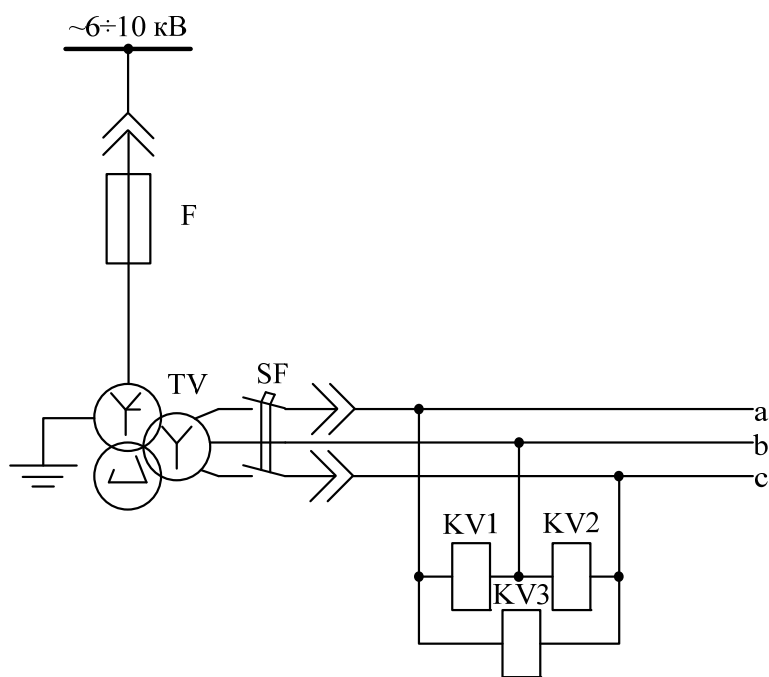
Рисунок 2.5 (продовження)

Для кожної з секцій збірних шин передбачається окремий комплект захисту мінімальної напруги та загальний для обох секцій, які отримують живлення в нормальному режимі від одного і того ж трансформатора, комплект захисту мінімальної частоти з блокуванням за направленням потужності. Таке виконання захисту прийнято з метою економії релейної апаратури. В зв'язку з цим розділено кола оперативного струму цих захистів. Для перемикання кіл напруги захисту мінімальної частоти з блокуванням за направленням потужності при несправності ТН однієї секції на ТН другої секції передбачено перемикач.

На підстанції та РП з випрямленим або змінним оперативним струмом застосовується схема групового захисту мінімальної напруги з використанням енергії попередньо заряджених конденсаторів (рис. 2.6).

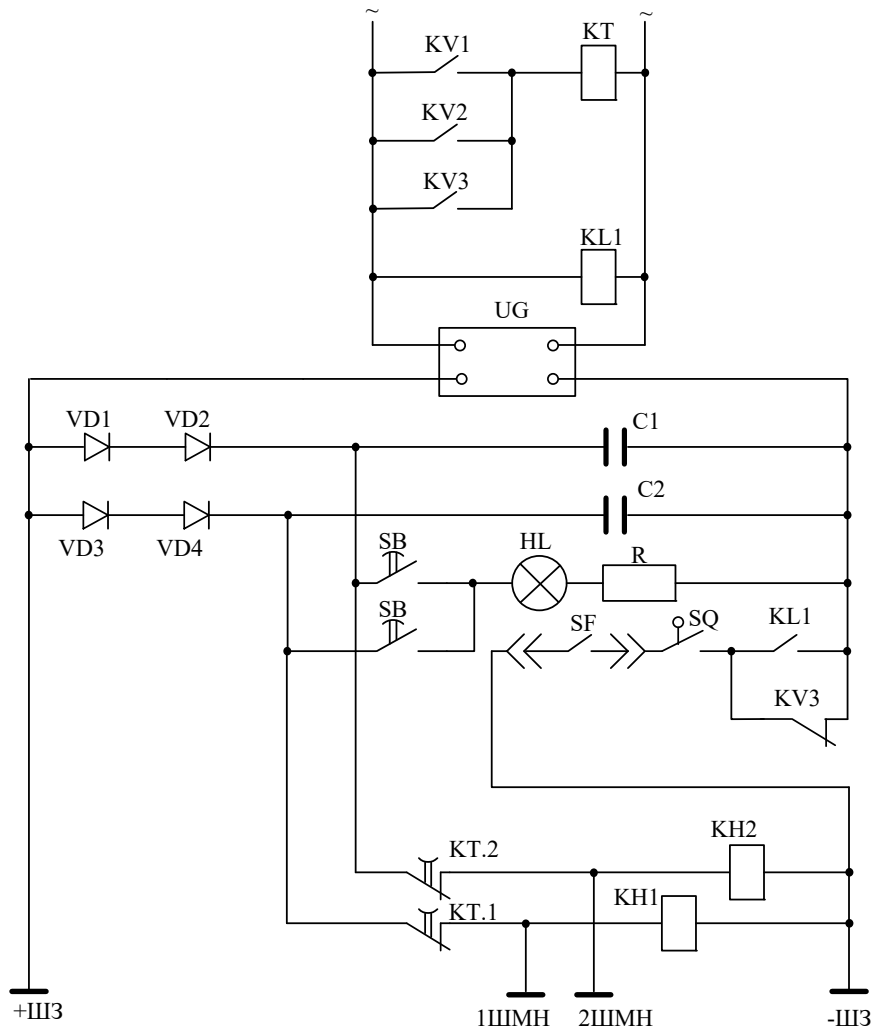
Захист виконано з реле напруги KV1÷KV3, які в нормальному режимі утримують котушку реле часу КТ. При зниженні напруги до уставки спрацювання реле KV1÷KV3 контакти реле часу, яке має витримку на повернення, замикають кола розряду конденсаторів C1 і C2. В схемі передбачено виведення захисту з дії при викочуванні TV з камери КРУ.

При втраті оперативного струму захист виводиться з дії контактом проміжного реле KL1. Для забезпечення надійної дії захисту при одночасному зниженні напруги в мережі і в колах оперативного струму цей контакт зашунтовано розмикальним контактом реле KV3.

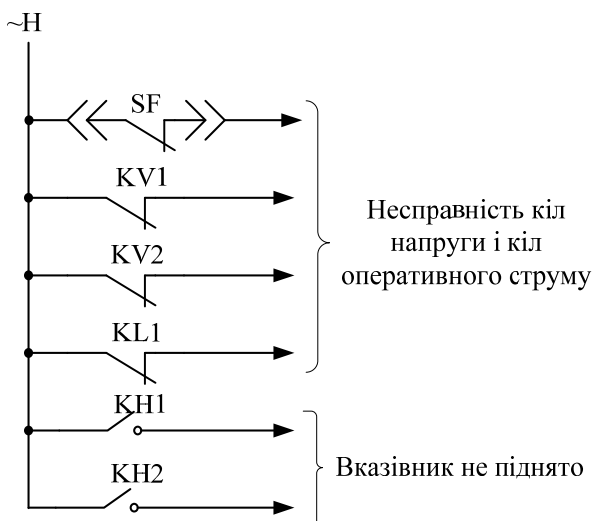


а) кола напруги

Рисунок 2.6 – Схема групового захисту мінімальної напруги з використанням енергії попередньо заряджених конденсаторів



б) кола оперативного струму



TV – трансформатор напруги;
 F – високовольний запобіжник;
 KV1÷KV3 – реле напруги типу РН-54/160;
 KL1 – проміжне реле типу РП-25;
 KH1, KH2 – реле вказівне типу РУ-1;
 SQ – кінцевий вимикач візка TV;
 KT – реле часу типу РВ-235;
 SB – кнопка типу КЕ-011;
 C1, C2 – конденсатори типу МБГО;
 VD1÷VD4 – діоди типу Д-226Б;
 HL – лампа типу ЛС-53;
 UG – блок живлення типу БПЗ-401

в) кола сигналізації

Рисунок 2.6 (продовження)

3 ЗАХИСТ ВІД НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ ТА ВИТКОВИХ ЗАМИКАНЬ

Характерною особливістю несиметричних режимів (міжфазних несиметричних КЗ поза двигуном або всередині нього, обривів лінійних проводів, пошкоджень роторних стержнів ЕД, порушення симетрії повітряного зазору тощо) і виткових замикань є поява складових струму та напруги оберненої послідовності, які в нормальних умовах відсутні. Відомо, що захисти, які реагують на складові струму, є більш селективними, ніж ті, що реагують на складові напруги, оскільки по пошкодженому елементу проходить найбільший струм. В цих умовах напруга на пошкодженому та непошкодженому елементах може бути практично однаковою і захист двигунів втрачає селективність [1, 2, 4, 7].

Більшість КЗ є несиметричними, при яких рівень струму КЗ нижчий, ніж при трифазних. Тому чутливість захистів, які реагують на фазні струми, в цьому випадку виявляється меншою. Якщо ж несиметричні КЗ виявляти за складовими струму, характерними для несиметричного режиму, які практично відсутні в нормальному режимі, то чутливість захистів суттєво підвищується.

Порушення симетрії струмів характерно також і для неповнофазного режиму (обриву фази), який може виникнути як при обриві проводу безпосередньо в колі самого ЕД або лінії, що його живить, так і при несиметрії на стороні ВН підстанції живлення.

Потрібно зауважити, що при неповнофазному режимі на стороні ВН при схемі з'єднання трансформаторів підстанції У/Д ні в одній з фаз двигуна струм не зникає. Таким чином, ознакою неповнофазного режиму не є повне зникнення струму в одній з фаз.

Виткові замикання обмоток статора ЕД є відносно розповсюдженим видом пошкоджень. Це визначає доцільність застосування захистів від виткових замикань для виявлення їх на ранній стадії розвитку з метою зменшення обсягу руйнування обмотки і сталі статора електродвигуна. При цьому доцільно забезпечити вимикання ЕД в небезпечних несиметричних режимах, які приводять до його пошкодження.

Експериментальними дослідженням встановлено, що КЗ всього 3÷5% витків однієї фази обмотки статора синхронного або асинхронного ЕД приводить до недопустимого перегріву ізоляції, що викликає її руйнування.

Пристрої захисту від виткових замикань поділяють на три групи [2, 7]:

- 1) засновані на контролі несиметрії фазних струмів;
- 2) засновані на контролі симетрії магнітного поля ЕД;
- 3) засновані на контролі вищих гармонік в струмах ротора, зокрема п'ятої гармоніки ($f = 250$ Гц).

Пристрої другої групи є, в принципі, вельми чутливими, оскільки вони налаштовані від зовнішньої несиметрії. Для їх реалізації потрібно встановлювати спеціальний трансформатор струму в лобових частинах обмотки статора, що викликає певні труднощі. Це пояснює їх порівняно рідке застосування навіть в дослідних установках.

Пристрої третьої групи застосовують тільки для синхронних двигунів з електромашинним та тиристорним збудженням і не застосовують при безщітковому збудженні. У асинхронних двигунах з короткозамкненим ротором виділення гармонік струму ротора дуже проблематичне.

Основне застосування знайшли пристрої першої групи, в яких використовують як джерела інформації симетричні складові фазних струмів, результат порівняння значень або фаз струмів, вихідний сигнал трифазного випрямленого містка, який увімкнено на фазні струми.

Захисти цієї групи можуть діяти при внутрішніх та зовнішніх пошкодженнях ЕД, які супроводжуються несиметрією фазних струмів, виткових КЗ, обривів фаз.

Основною ознакою ефективності захисту електродвигунів від виткових замикань є мінімальне руйнування при виткових КЗ в обмотці статора. Воно визначається тепловим імпульсом в короткозамкнених витках обмотки статора. Тому доцільно, щоб захист від виткових замикань безпосередньо реагував на струм короткозамкнених витків та мав залежну від струму витримку часу згідно з виразом

$$t_{сз} \leq V_{к,доп} / (I_a^{(1)})^2, \quad (3.1)$$

де $t_{сз}$ – час спрацювання захисту;

$V_{к,доп}$ – допустимий тепловий імпульс в короткозамкнених витках;

$I_a^{(1)}$ – струм в короткозамкнених витках при витковому замиканні.

Пристрої захисту від виткових замикань першої групи реагують не на струм в короткозамкнених витках, а на струм, який споживається ЕД з мережі, що утруднює побудову ефективного захисту. Тому при зіставленні захистів доцільно визначати тепловий імпульс в короткозамкнених витках в умовах спрацювання $V_{к,спр}$ і порівняти його з допустимим значенням. Захист, який спрацює при мінімальному значенні $V_{к,спр}$, є за принципом дії найкращим [7].

Значення допустимого теплового імпульсу $V_{к,доп}$ залежить від виду ізоляції ЕД, щільності струму в короткозамкнених витках тощо. Руйнування при виткових замиканнях значно залежить також від безпосередньої дії електричної дуги, перехідного опору в місці КЗ. Подальший аналіз проведемо для випадку бездугового, тобто металевого КЗ. У цьому випадку величина $V_{к,доп}$ визначається за умовою допустимого перегріву ізоляції короткозамкнених витків [7, 16]

$$t_{\text{доп}} = T_{\text{н}} \cdot \frac{K_{\text{У,к}} - 1}{K_{\text{I,к}}^2 - 1} = \frac{\Delta u_{\text{гр.кр}} - 1}{K_{\text{I,к}}^2 - 1},$$

де $T_{\text{н}}$ – стала часу нагріву обмоток статора, с;
 $\Delta u_{\text{гр.кр}}$ – допустимий перегрів обмотки в короткочасному режимі;
 $\Delta u_{\text{ном}}$ – номінальний перегрів обмотки;
 $K_{\text{I,к}} = I_{\text{а}}^{(1)} / I_{\text{ном}}$ – кратність струму в короткозамкнених витках;
 $I_{\text{ном}}$ – номінальний струму обмотки статора.

Значення $\Delta u_{\text{ном}}$ і $\Delta u_{\text{гр.кр}}$ для кожного класу ізоляції різні, тому значення $t_{\text{доп}}$ для різних ЕД будуть неоднакові. З урахуванням сказаного вище умова (3.1) набуває вигляду

$$t_{\text{сз}} \leq t_{\text{доп}}. \quad (3.2)$$

Параметри спрацювання захисту від небезпечних несиметричних режимів та виткових замикань в загальному випадку визначаються налаштуванням від таких режимів [7]:

- тривалого (при допустимій несиметрії статора і ротора, а також напруги живлення, змінюванні частоти струму ЕД);
- пуску та самозапуску;
- зовнішнього двофазного КЗ.

Налаштування від неселективної дії захисту при зовнішньому двофазному КЗ здійснюється двома методами:

- 1) налаштування за часом;
- 2) введення гальмування за несиметрією напруги.

В першому методі час спрацювання захисту вибирають за умовою

$$t_{\text{доп}} \geq t_{\text{сз}} \geq t_{\text{вим}}^{(2)}, \quad (3.3)$$

де $t_{\text{вим}}^{(2)}$ – час вимикання зовнішнього двофазного КЗ.

Значення $t_{\text{вим}}^{(2)}$ може становити в реальних умовах 1,5 с і більше, що не завжди припустимо. Деяке покращення характеристик захисту від виткових замикань можна отримати шляхом використання залежної від струму витримки часу. Часо-струмова характеристика захисту має задовольняти дві суперечні вимоги. З одної сторони, має виконуватися рівність

$$I_{\text{сз}}^2 \cdot t_{\text{сз}} = B_{\text{к.доп}}^{(2)}, \quad (3.4)$$

де $I_{\text{сз}}$ – струм оберненої послідовності, при якому спрацьовує захист;
 $B_{\text{к.доп}}^{(2)}$ – допустимий тепловий імпульс струму оберненої послідовності для цього ЕД за відсутності в ньому пошкодження.

З іншої – має забезпечуватися селективність дії захисту. При цьому захист має бути налаштованим від несиметрії при пуску, тобто, має виконуватися нерівність

$$I_{c3}^2 \cdot t_{c3} \geq I_{2п}^2 \cdot t_{п}, \quad (3.5)$$

де $I_{2п}$ – струм оберненої послідовності при пуску.

Потрібно також забезпечити селективність дії захисту при зовнішніх несиметричних КЗ.

$$I_{c3}^2 \cdot t_{c3} \geq (I_2^{(2)})^2 \cdot t_{вим}^{(2)}, \quad (3.6)$$

де $I_2^{(2)} \approx I_{п} / 2$ – струм оберненої послідовності, який проходить через електродвигун, що захищається, при зовнішньому двократному КЗ.

Час вимикання зовнішнього двофазного КЗ $t_{вим}^{(2)}$ береться вищим найбільшою витримки захисту електроустановки, яка підключена до тих самих шин, що і ЕД.

Потрібно відмітити, що при виконанні умови (3.4) всі захисти від виткових замикань, які використовують налаштування за часом, за швидкодією виявляються еквівалентними. Тому вибір найбільш доцільного принципу побудови захисту з налаштуванням за часом полягає у виявленні оптимального за чутливістю захисту (який спрацьовує при мінімальній кількості короткозамкнених витків) при обмеженнях:

- тепловий імпульс, що оцінюється за допомогою $t_{доп}$, який отримується короткозамкненими витками від моменту виникнення пошкодження до вимикання ЕД, не перевищує допустимого значення;
- спрацювання захисту здійснюється на всьому діапазоні замикання від мінімального значення до 100 % витків в одній фазі.

Захисти, які використовують гальмування за несиметрією напруги, виявляються більш швидкодійними. Внаслідок цього на їх роботу може впливати аперіодична складова струму в фазі статора, яка викликає нерівність півхвиль струму за амплітудою та тривалістю, а також насичення ТС. Вказану складову можна не враховувати, якщо виконується умова [7]

$$\left. \begin{aligned} t_{c3} &> 3 \cdot T_a; \\ t_{c3} &> t_{п.сх}, \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

де T_a – стала часу згасання аперіодичної складової;

$t_{п.сх}$ – час згасання перехідного процесу в схемі захисту.

При виконанні умови (3.7) захисти з гальмуванням за несиметрією напруги мають однакову швидкодію. Тому вибір найкращого принципу побудови таких захистів полягає в оптимізації за чутливістю при тих самих обмеженнях, як і при виборі захистів, які не мають гальмування.

Поріг спрацьовування захистів, що реагують на струм оберненої послідовності, можна визначити за допомогою розрахункового коефіцієнта несиметрії $\varepsilon_p = I_2 / I_{\text{ном}}$, де ε_p складає

$$\varepsilon_p = K_f \cdot K_{\Pi} \cdot (\varepsilon_u + \varepsilon_z), \quad (3.8)$$

де $\varepsilon_u, \varepsilon_z$ – коефіцієнти несиметрії напруги та фазних опорів відповідно;
 K_f – коефіцієнт, який враховує вплив на ε_p відхилення частоти мережі від номінального значення.

Аналіз показує, що значення величин в (3.8) і тих, що визначають мінімальне число витків $\omega_{a,\text{min}}$, на КЗ яких реагує захист, складають

$$\varepsilon_u \leq 0,02; \quad \varepsilon_z \leq 0,04; \quad K_f \leq 1,03; \quad K_{\Pi} = 5 \div 8.$$

Число витків $\omega_{a,\text{min}}$ можна знайти по кривих $I_2 = f(\omega_a/\omega_{\phi})$, де ω_{ϕ} – число витків в обмотці фази статора, які визначаються розрахунковим шляхом або експериментально. Значення $\omega_{a,\text{min}}^* = \omega_{a,\text{min}}/\omega_{\phi}$ є показником ефективності принципу дії захисту.

Аналогічним чином можна визначити ефективність принципів дії інших захистів.

Зіставлення принципів ілюструється в таблиці 3.1, де видно, що гальмування за несиметрією напруги дійсно підвищує чутливість захисту. Якщо захисти виконуються без гальмування за несиметрією напруги, то найбільш чутливим є пристрій, який виконано за алгоритмом 5 (табл. 3.1).

Подальше підвищення чутливості захистів можна досягти шляхом автоматичного загрублення їх під час пуску та самозапуску і подальшому відновленню чутливості після встановлення нормального режиму.

Як приклад виконання захисту, який реагує на несиметрію фазних струмів статора електродвигуна, розглянемо максимальний струмовий фільтровий захист типу МТФЗ [7]. Призначенням захисту є формування команди на вимикання ЕД при нижченаведених видах пошкоджень та аномальних режимах:

- міжфазні симетричні та несиметричні КЗ в обмотці статора і на кабелі живлення електродвигуна;
- обрив фаз або порушення контакту в електродвигуні або мережі живлення;
- пошкодження роторних стержнів асинхронного двигуна;
- технологічні перевантаження.

Таблиця 3.1 – Зіставлення принципів захистів електродвигунів від виткового замикання в обмотці статора

Сутність принципу	Алгоритм функціонування	Характеристика порога спрацювання		$\omega_{a \min}$, %	Час спрацювання
		формула	Значення		
1. Вимірювання струму оберненої послідовності	$I_2 \geq I_{c3}$	$\varepsilon_p = K_f (K_{\Pi} \cdot \varepsilon_u + \varepsilon_z)$	0,309	5,5	$t_{c3} \geq t_{\text{ВИМ}}^{(2)}$
2. Вимірювання різниці між максимальним та мінімальним струмами трьох фаз	$ I_{\max} - I_{\min} \geq I_{c3}$	$\Delta I_p = K_{\Pi} \cdot \Delta U + \Delta Z$	0,72	5	аналогічно
3. Вимірювання різниці між максимальним та мінімальним струмами трьох фаз і гальмування різницею між максимальною і мінімальною напругами цих фаз	$(I_{\max} - I_{\min}) - (U_{\max} - U_{\min}) \geq I_{c3}$	$\Delta I_p = K_{\Pi} (1 - K_{\Gamma}) \cdot \Delta U + \Delta Z$	0,24 при $K_{\Gamma} = 1$	2	$t_{c3} \geq 3 \cdot T_a$
4. Вимірювання різниці між часом зсуву за фазою між струмами фаз та заданим часом	$\frac{\Psi_{\max}}{\omega} - t_3 \geq t_{c3}$	$\Delta \psi_p = K_f (\Delta \psi_I + \Delta \psi_z + \Delta \psi_{\Pi})$	30°	6,2	$t_{c3} \geq t_{\text{ВИМ}}^{(2)}$
5. Вимірювання різниці між максимальним та мінімальним часом зсуву за фазою між струмами фаз	$\frac{\Psi_{\max}}{\omega} - \frac{\Psi_{\min}}{\omega} \geq t_{c3}$	$\Delta \psi_p = \Delta \psi_I + \Delta \psi_z + \Delta \psi_{\Pi}$	29°	5	аналогічно
6. Вимірювання різниці між максимальним та мінімальним часом зсуву за фазою між струмами фаз і гальмування за несиметрією напруги	$\left[\frac{\Psi_{\max,i}}{\omega} - \frac{\Psi_{\min,i}}{\omega} \right] - K_{\Gamma} \left[\frac{\Psi_{\max,u}}{\omega} - \frac{\Psi_{\min,u}}{\omega} \right] \geq t_{c3}$	$\Delta \psi_p = (1 - K_{\Gamma}) \cdot \Delta \psi_I + \Delta \psi_z + \Delta \psi_{\Pi}$	10° при $K_{\Gamma} = 1$	1 ÷ 3	$t_{c3} \geq 3 \cdot T_a$

Захист типу МТФЗ є комплексним, тобто здійснює захист ЕД від декількох видів пошкоджень та аномальних режимів.

Схема захисту наведена на рисунку 3.1.

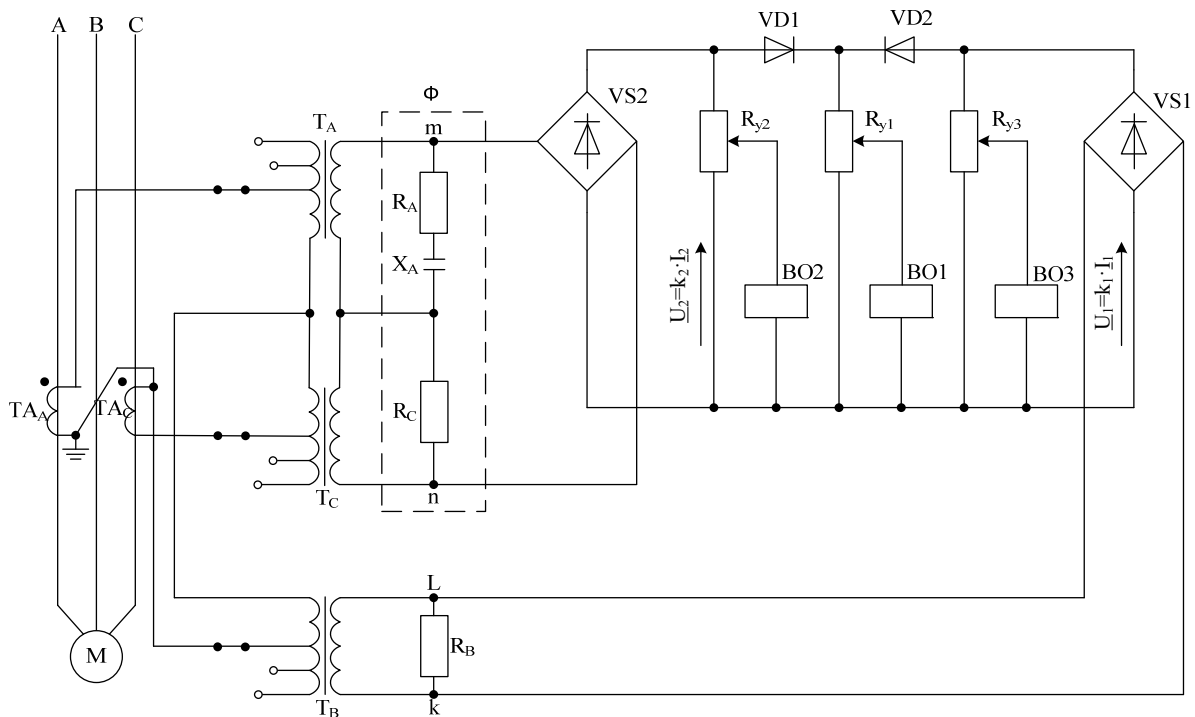


Рисунок 3.1 – Принципова схема фільтрового струмового захисту типу МТФЗ

Проміжні трансформатори струму T_A і T_C увімкнені в фазні проводи основних трансформаторів струму ЕД, який захищається, T_{AA} і T_{AC} , а третій проміжний трансформатор T_B – в обернений провід цих трансформаторів, внаслідок чого по його первинній обмотці проходить струм: $\underline{I}_B = -(\underline{I}_A + \underline{I}_C)$.

До трансформаторів T_A і T_C підключено фільтр струму оберненої послідовності Φ . Напряга $K_1 \cdot I_1$, яка пропорційна струму прямої послідовності, знімається з випрямлювача $VS1$, підключеного до затискачів kl трансформатора, а напряга $K_2 \cdot I_2$, яка пропорційна струму оберненої послідовності, – з випрямлювача $VS2$, підключеного до затискачів mn фільтра Φ . Опори елементів фільтра X_A , R_A та R_C і резистора R_B , підключеного до проміжного трансформатора T_B , вибрані таким чином, щоб забезпечити рівність $K_2 = 2 \cdot K_1$, при якій досягається однакова оптимальна чутливість захисту до симетричних і несиметричних КЗ.

Дійсно, коефіцієнти чутливості фільтрових захистів при три- та двофазних КЗ дорівнюють

$$K_{\text{ч}}^{(3)} = \frac{K_1 \cdot I_{\text{К}}^{(3)}}{I_{\text{спр}}}; \quad K_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{K_2 \cdot I_{2\text{К}}^{(2)}}{I_{\text{спр}}} = \frac{K_2 \cdot 0,5I_{\text{К}}^{(3)}}{I_{\text{спр}}},$$

де $I_{\text{К}}^{(3)}$ – струм трифазного КЗ;

$I_{2\text{К}}^{(2)} = 0,5 \cdot I_{\text{К}}^{(3)}$ – струм оберненої послідовності двофазного КЗ;

$I_{\text{спр}}$ – заданий струм спрацювання захисту.

Рівність $K_{\text{ч}}^{(3)}$ та $K_{\text{ч}}^{(2)}$ забезпечується за умови $K_2 = 2 \cdot K_1$, тобто параметри фільтра $R_A = 0,5 \cdot R_C$; $X_A = \sqrt{3} \cdot R_A$; $K_2 = \sqrt{3} \cdot R_C$; $R_B = \sqrt{3} \cdot R_C / 2$.

Маючи три виконавчих органи, схема дозволяє здійснити роздільне вимикання КЗ (орган відсічки ВО1), симетричних перевантажень (орган перевантаження ВО3) і пошкоджень, які супроводжуються струмами оберненої послідовності, – обриви фаз, виткові замикання, пошкодження роторних стержнів двигуна (чутливий орган оберненої послідовності ВО2).

Виконавчий орган ВО1 спрацює без витримки часу, а ВО2 та ВО3 – з залежною витримкою часу. Перші два діють на вимикання двигуна безпосередньо, а третій – ВО3 – на вимикання або на сигнал, або, за необхідності, на розвантаження основного механізму електродвигуна на розсуд експлуатаційного персоналу.

У схемі передбачена роздільна сигналізація органу відсічки, органу навантаження і чутливого органу оберненої послідовності, яка зберігає інформацію про спрацювання після зникнення сигналу керування та напруги живлення.

Уставка виконавчих органів ВО1, ВО2 та ВО3 регулюється установочними реостатами R_{y1} , R_{y2} , R_{y3} (тонке регулювання) та анцапфами проміжних трансформаторів струму (ступінчасте регулювання). Проміжні трансформатори струму забезпечують приведення реального номінального вторинного струму ЕД від 2 до 5 А до постійного значення 5 А. Ступені регулювання: 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5 А.

Діоди VD1 та VD2 не пропускають струм прямої послідовності через ВО2 і струм оберненої послідовності через ВО3. Одночасно діоди VD1 та VD2 забезпечують увімкнення ВО1 за схемою «АБО» до струмів прямої та оберненої послідовностей.

Підсумкові часострумові характеристики захисту за струмами прямої і оберненої послідовностей наведені на рисунку 3.2. Тут:

I_{1*} і I_{2*} – струми прямої та оберненої послідовності електродвигуна, що захищається, в. о.;

$t_{\text{сз}}$ – час спрацювання захисту;

$I_{\text{с.відс.1}}$ та $I_{\text{с.відс.2}}$ – уставки спрацювання органу відсічки за струмами прямої та оберненої послідовностей (за первинним струмом), відповідно дорівнюють

$$I_{\text{с.відс.1}} = K_{\text{нал}} \cdot I_{\text{п}}; \quad I_{\text{с.відс.2}} = K_{\text{нал}} \cdot I_{\text{п}} / 2,$$

де $K_{\text{нал}} = 1,5 \div 2$ – коефіцієнт налаштування;

$I_{п}$ – пусковий струм ЕД;

I_{C1} та I_{C2} – струми спрацювання чутливого органу оберненої послідовності та органу перевантаження, які дорівнюють

$$I_{C2} = K_{нал} \cdot \varepsilon_I \cdot I_{НОМ} \approx 2 \cdot 0,1 \cdot I_{НОМ} = 0,2 \cdot I_{НОМ};$$

$$I_{C1} = K_{пер} \cdot I_{НОМ} = (1,2 \div 1,5) \cdot I_{НОМ},$$

де ε_I – коефіцієнт несиметрії за струмом в мережі в нормальному режимі роботи двигуна ($\varepsilon_I = 0,05 \div 0,1$);

$I_{НОМ}$ – номінальний струм ЕД;

$K_{пер} = 1,2 \div 1,4$ – допустимий для заданого електродвигуна коефіцієнт перевантаження.

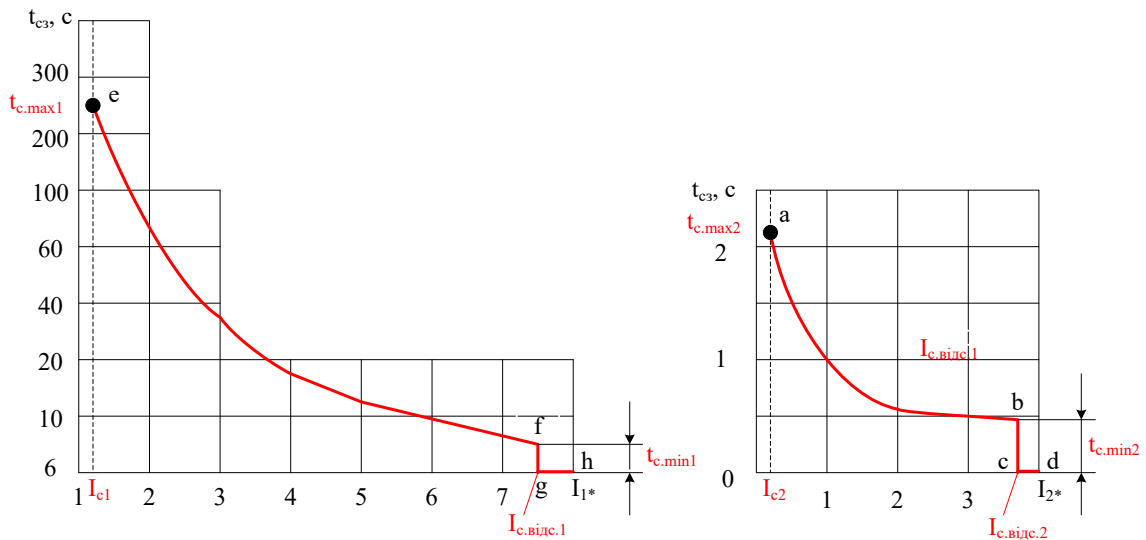


Рисунок 3.2 – Підсумкові часострумові характеристики за струмами прямої I_{1*} та оберненої I_{2*} послідовностей захисту типу МТФЗ

На рисунку 3.2 крива $abcd$ – обмежено залежна характеристика захисту за струмами оберненої послідовності; $efgh$ – прямої послідовності. Криві ab та ef – залежні характеристики, відповідно, чутливого органу оберненої послідовності (ВО2) та органу перевантаження (ВО3). Позначення $t_{c,min2}$ і $t_{c,max2}$ відповідають мініимальному та максимальному часу спрацювання чутливого органу оберненої послідовності; $t_{c,min1}$ і $t_{c,max1}$ – мініимальному та максимальному часу спрацювання органу перевантаження.

Характеристика органу ВО2 має задовольняти дві суперечливі вимоги. З одної сторони, для локалізації аварії при внутрішніх пошкодженнях та з метою безпеки її витримка має бути мініимальною. З іншої – для запобігання неселективних вимикань при зовнішніх двохкратних КЗ вона має бути на ступінь вищою найбільшої витримки захисту електроустановок, які приєднано до даних шин. Якщо захисти всіх електроустановок вико-

нано відсічками, то, очевидно, мінімальна витримка характеристики ВО2 $t_{c.min2} = 0,4 \div 0,5$ с, а максимальна $t_{c.max2} = 2 \div 2,5$ с. При такій витримці часу захист буде працювати таким чином. У випадку зовнішніх КЗ, наприклад на затискачах суміжного двигуна, через захист непошкодженого двигуна буде протікати струм $0,5 \cdot I_n$, що при $K_n = 5$ буде відповідати $I_2 = 2,5 \cdot I_{ном}$. При цьому орган відсічки непошкодженого двигуна не спрацює, оскільки він налаштований від цього струму ($I_{c.відс} = 3,75 \cdot I_{ном}$), а ВО2 спрацювати не встигне, оскільки до цього пошкоджений ЕД відключиться своїм захистом без витримки часу.

На рисунку 3.3 наведена схема захисту від несиметричного режиму, до складу якої входять такі функціональні блоки [7]:

- вхідний перетворювальний пристрій ВПП;
- реле виткового замикання РВЗ;
- реле обриву фази РОФ;
- блок світлової сигналізації БСС.

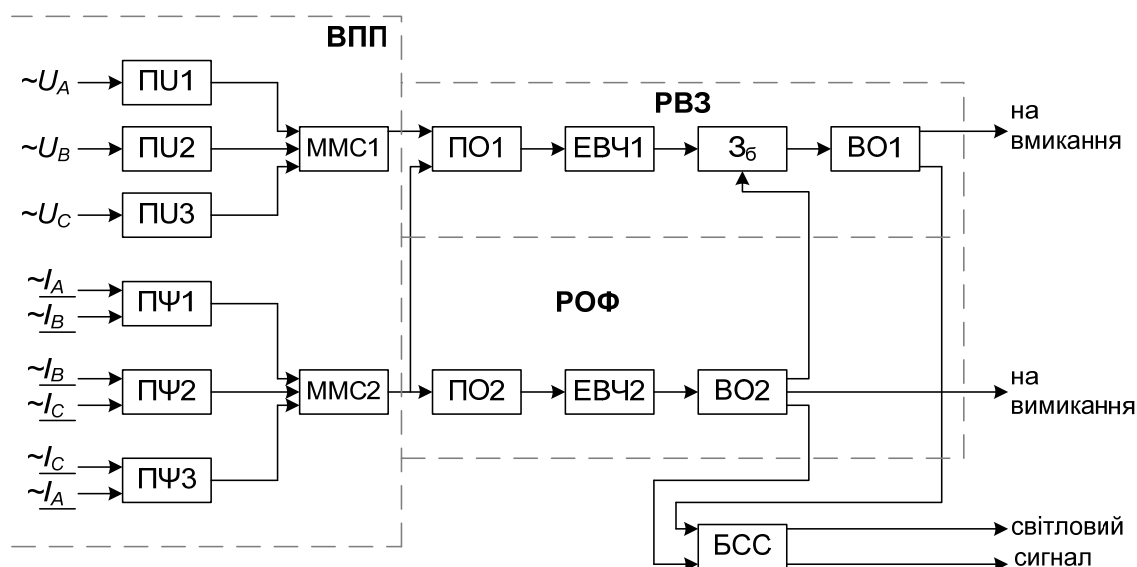


Рисунок 3.3 – Структурна схема захисту від несиметричного режиму

Блок ВПП здійснює перетворення кутів зсуву за фазою між векторами фазних струмів в постійну напругу (перетворювачі ПЦ1, ПЦ2, ПЦ3) і виділяє різницю між найбільшим та найменшим їх значеннями $\Delta\psi_i$ (міні-максі селектор ММС2), а також перетворює фазні напруги в постійні (перетворювачі ПУ1, ПУ2, ПУ3) і виділяє різницю між найбільшим і найменшим значеннями $\Delta\psi_U$ (міні-максі селектор ММС1).

Реле виткового замикання має пороговий орган ПО1 з гальмівним (від ММС1) і робочим (від ММС2) входами, елемент витримки часу ЕВЧ1, логічний елемент Зб («Заборона») і виконавчий орган ВО1. Елемент «Заборона» здійснює блокування РВЗ при неповнофазному режимі роботи ЕД або обриві струмових кіл захисту.

Реле обриву фази має пороговий орган ПО2, елемент витримки часу ЕВЧ2 та виконавчий орган ВО2.

Уставки спрацювання становлять для РВЗ $\Delta\psi_{i\text{спр}} \approx 30^\circ$, а для РОФ $\Delta\psi_{i\text{спр}} = 165^\circ$. Час спрацювання РВЗ становить 1,2 с, а РОФ – приблизно 0,5 с. При виникненні виткового КЗ в електродвигуні з невеликим числом короткозамкнених витків спрацює РВЗ, а в неповнофазному режимі спрацює РОФ та блокує роботу РВЗ, завдяки чому блок БСС забезпечує селективну сигналізацію причини вимикання ЕД. Гальмування РВЗ за несиметрією напруги підвищує чутливість захисту та дозволяє виявити виткові замикання з 3% і більше замкнених витків. Захист використовується в складі комплектного пристрою ЗРКД1.

4 СХЕМИ ЗАХИСТІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

4.1 Загальні відомості

Наведені в цьому розділі принципові схеми релейного захисту ЕД напругою вище 1 кВ є типовими і відповідають вимогам ПУЕ. Ці схеми реалізуються з використанням окремих електромеханічних та напівпровідникових реле, які серійно виготовляються вітчизняною електротехнічною промисловістю. Кожне реле являє собою конструктивно закінчений виріб, який розташовується в релейній шафі або на релейній панелі КРУ.

Більша частина схем надається з застосуванням постійного та випрямленого оперативного струму, як найбільш часто використовуваного на підстанціях та розподільних пунктах, до яких підключено електродвигуни. Живлення кіл захисту оперативним струмом, як правило, здійснюється від загального з колами керування вимикачем високої напруги автомата.

У вихідних колах кожного з автономних захистів, які діють на вихідні проміжні реле і безпосередньо на електромагніт вимикання вимикача, передбачаються вказівні реле послідовного ввімкнення, що сигналізують про дію цих захистів. Фіксація спрацювання групового захисту від втрати живлення здійснюється вказівними реле послідовного та паралельного ввімкнення у вихідних колах цього захисту.

В схемах захистів від контактів вказівних реле подається сигнал «Вказівник не піднято». Для забезпечення надійної роботи вказівних реле, які ввімкнено в коло кожного з автономних захистів, у випадку одночасної дії декількох захистів на загальне вихідне проміжне реле в схемах передбачено додатковий резистор, який вмикається паралельно обмотці цього реле.

З метою полегшення експлуатаційних перевірок та випробувань захистів в колах вимикання від вихідного проміжного реле передбачаються роз'ємні затискачі. Затискачі також встановлюються в струмових колах захистів та в колах приймальних реле групового захисту від втрати живлення.

У вихідних колах захистів, які здійснюють декілька різних впливів, передбачаються контактні перемички, що дозволяють, за необхідності, вимкнути ту або іншу дію захисту в період експлуатації [1, 2, 3].

Схеми на змінному оперативному струмі на практиці використовуються для електродвигунів потужністю не більше 5000 кВт.

Досвід проектування та експлуатації показав, що застосування змінного оперативного струму недоцільно для електродвигунів з частими ввімкненнями (через низьку надійність пружинних приводів вимикачів) а також на підстанціях та розподільних пунктах за наявності відповідальних механізмів, самозапуск яких потрібно і можливо забезпечити. Остан-

не пояснюється складністю виконання електроавтоматики, яка здійснює керування перемикачами, що потрібні для підготовки електродвигунів до відновлення живлення, а також тим, що існуюча релейна апаратура не може забезпечити надійний та ефективний захист розгортуваних електродвигунів в умовах зниженої в режимі самозапуску напруги мережі. У зв'язку з зазначеним однією з головних особливостей виконання схем релейного захисту на змінному оперативному струмі є відсутність самозапуску захищуваних електродвигунів після перерви живлення. Другою особливістю цих схем є те, що вони базуються на використанні пружинних приводів типів ППВ-10 та ПП-67, які застосовуються для вимикачів КРУ.

4.2 Схема захисту асинхронного двигуна номінальною потужністю менше 2000 кВт

Схема захисту асинхронного двигуна, який використовується для привода невідповідального механізму та потребує, за умовою техніки безпеки, відключення при однофазних замиканнях на землю (ОЗЗ), наведена на рисунку 4.1.

Струмова відсічка виконана з одним реле КА1, яке ввімкнено на різницю струмів двох фаз.

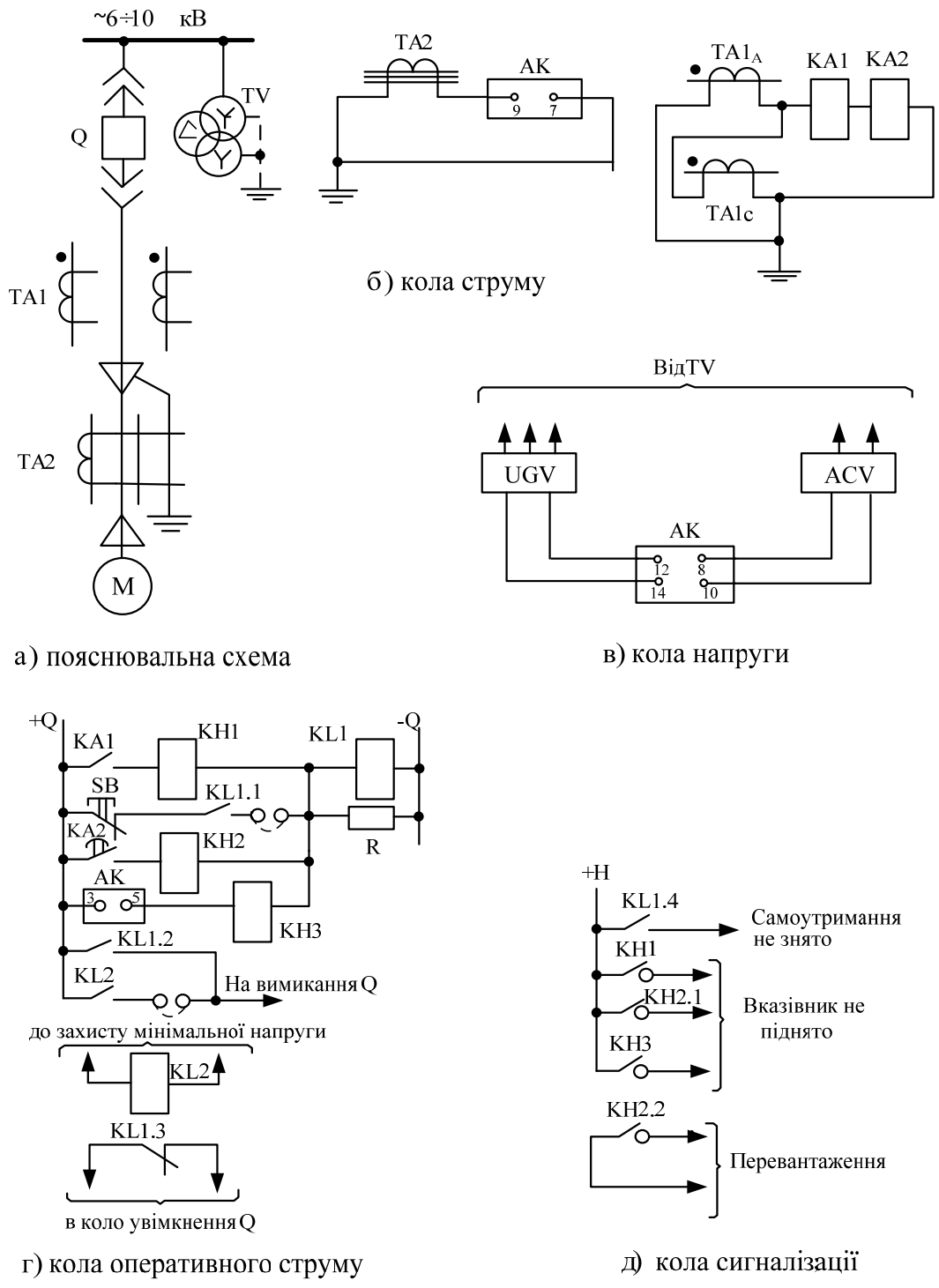
Для направленої захисту від замикань на землю АК застосовано пристрій типу ЗЗП-1, який приєднано до ТСНП ТА2 типу ТЗЛМ. Напруга нульової послідовності для АК подається від розімкненого трикутника ТН секції, до якої підключений ЕД через допоміжний пристрій АСВ, призначений для захисту елементів пристрою типу ЗЗП-1 від перенапруг.

Захист від струмів перевантаження виконано з залежною від струму характеристикою витримки часу з реле струму КА2; діє на вимикання.

Живлення пристрою типу ЗЗП-1 здійснюється від джерела випрямленого оперативного струму – блока живлення UGV з номінальною вихідною напругою 24 В, а інших захистів – від джерела постійного оперативного струму.

Для забезпечення самозапуску інших, більш відповідальних ЕД, передбачено вимикання розглядуваного ЕД за допомогою першого ступеня групового захисту від втрати живлення. З цією метою в схемі на рис. 4.1 передбачено реле КЛ2.

Вихідне проміжне реле КЛ1 після спрацювання самоутримується (по колу контакта КЛ1.1), а його розмикальний контакт КЛ1.3 розриває коло ввімкнення вимикача Q. Цим запобігається повторне ввімкнення ЕД, який відключено захистом. Зняття самоутримання здійснюється кнопкою SB, яка розташована в КРУ. Контакт КЛ1.4 подається сигнал «самоутримання не знято». Резистор R встановлюється для забезпечення надійної роботи вказівних реле КН1÷КН3, які фіксують спрацювання окремих захистів.



TV – трансформатор напруги;
 TA1, TA2 – трансформатори струму;
 SB – кнопка керування типу КЕ-011;
 UGV – блок живлення типу БПН-11;
 KL1, KL2 – проміжне реле типу РП-23;
 АК – пристрій захисту від замикань на землю типу ЗЗП-1;
 ACV – допоміжний пристрій типу ВУ-1

Q – вимикач;
 R – резистор типу ПЭВ-50;
 КА1 – реле струму типу РТ-40;
 КА2 – реле струму типу РТ-82;
 КН1÷КН3 – вказівні реле типу РУ-1;

Рисунок 4.1 – Схема захисту асинхронного двигуна потужністю менше 2000 кВт

4.3 Схема захисту асинхронного двигуна номінальною потужністю менше 5000 кВт

Для електричних двигунів відповідальних механізмів промислових підприємств застосовується захист, схема якого наведена на рисунку 4.2.

Струмова відсічка виконана на реле КА1 та КА2, які ввімкнено на фазні струми ТС ТА1, що з'єднані в неповну зірку.

Захист від замикань на землю виконано з реле КА4, яке підключено до ТСНП типу ТЗЛМ, що встановлено в шафі КРУ. Припускається, що ємнісний струм замикання на землю в мережі, до якої підключено АД, більший 5 А.

Захист від перевантаження з незалежною характеристикою витримки часу (реле струму КА3 і реле часу КТ), виходячи з важких умов пуску та самозапуску, виконано з дією на вимикання.

Кола цих захистів отримують живлення від джерела випрямленого оперативного струму, за який може бути взято комбінований блок, що складається з блоків типів БПТ-1002 і БПНС-2 (дод. А, рис. А.1).

Захист мінімальної напруги в цьому випадку виконується з використанням енергії попередньо заряджених конденсаторів. Від цього захисту (див. рис. 2.6), який встановлено звичайно в камері ТН, до камери вимикача ЕД йдуть три шинки. Через шинки +ШЗ, -ШЗ конденсатор С (рис. 4.2) постійно заряджається. До шинки 2ШМН підключено реле KL2, призначене для вимикання АД при тривалій відсутності напруги в колі статора АД. Спрацьовуючи при появі імпульсу на цій шинці, KL2 замикає свої контакти KL2.1 і KL2.2 в колі електромагніта вимикання вимикача Q і тим самим підключає його до конденсатора С. Під дією струму розряду конденсатора здійснюється вимикання вимикача. Щоб забезпечити достатньо тривалий час замкненого стану кола розряду конденсатора, який потрібний для надійної дії електромагніта вимикання, реле KL2 прийнято з витримкою часу на повернення.

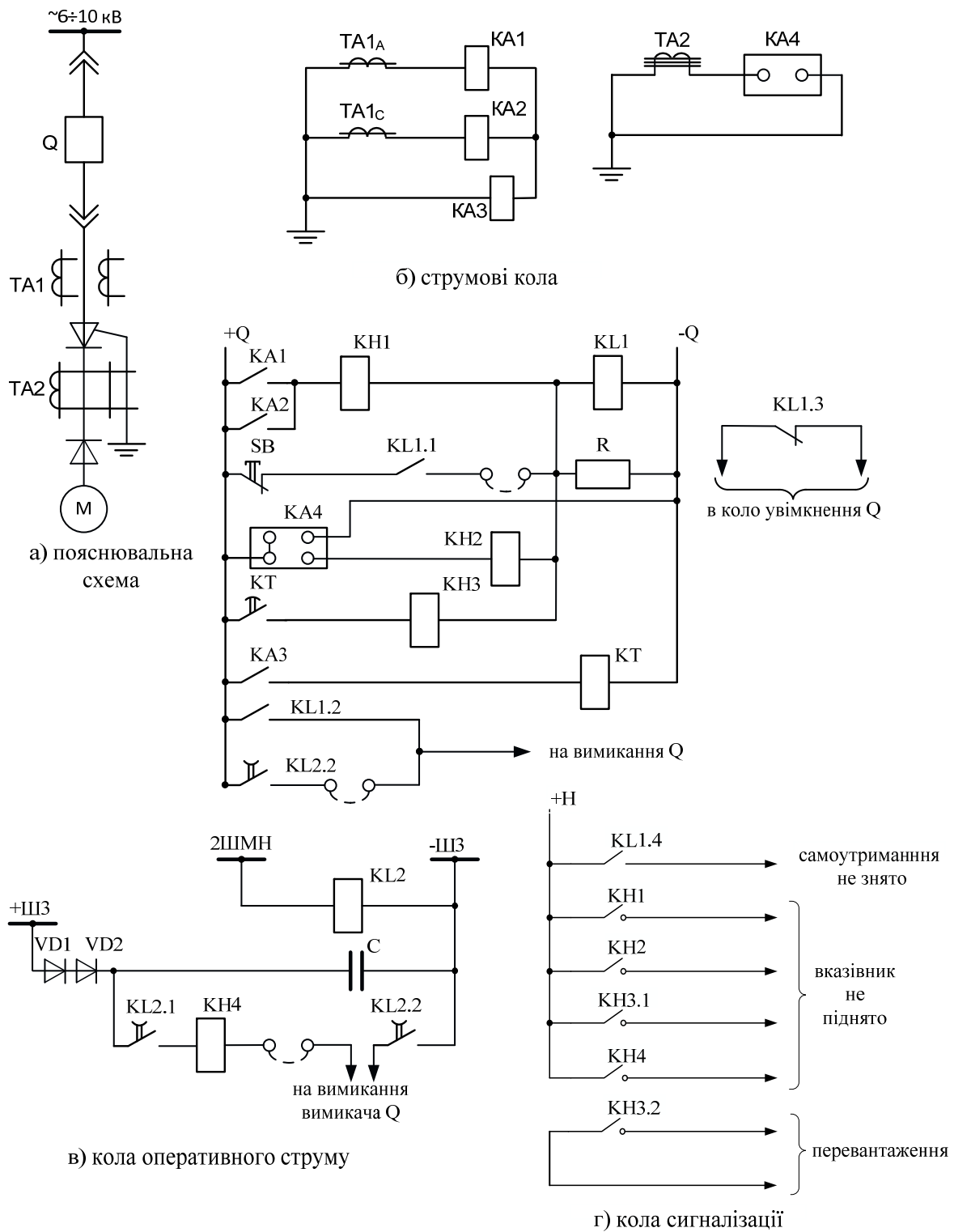
Діоди VD1, VD2 запобігають саморозряду конденсатора при втраті живлення. В іншому схема аналогічна наведеній на рисунку 4.1.

4.4 Схема захисту двошвидкісного асинхронного двигуна номінальною потужністю менше 5000 кВт

Захист двошвидкісних асинхронних двигунів, які працюють в системі власних потреб ТЕС і АЕС, може бути виконано за схемою рис. 4.3.

Для кожної з двох обмоток статора, які забезпечують при їх увімкненні першу та другу швидкості АД, передбачені окремі комплекти захистів.

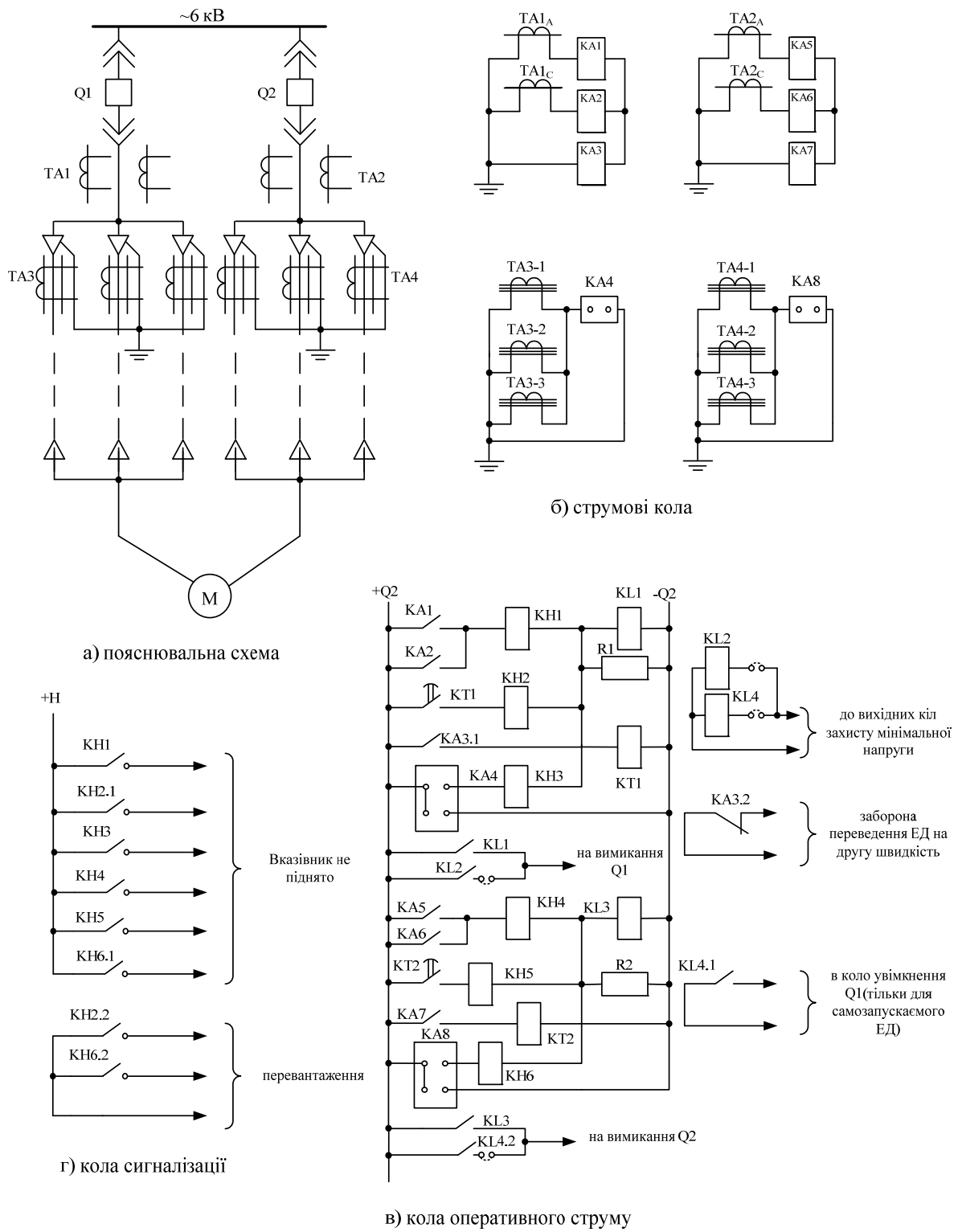
Струмова відсічка виконана двома реле струму типу РТ-40, які ввімкнено на фазні струми ТС (реле КА1 та КА2 для першої обмотки статора, КА5 та КА6 для другої) з дією на вимикання вимикача пошкодженої обмотки.



TA1, TA2 – трансформатори струму;
 KA1÷KA3 – реле струму типу РТ-40;
 KL1 – реле проміжне типу РП-23;
 KL2 – реле проміжне типу РП-252;
 KH1÷KH4 – реле вказівне типу РУ-1;
 SB – кнопка керування типу КЕ-011;

Q – вимикач;
 KA4 – реле струму типу РТЗ-51;
 KT – реле часу типу ВЛ-23;
 VD1, VD2 – діоди типу Д226Б;
 C – конденсатор типу МБГО;
 R – резистор типу ПЭВ-50

Рисунок 4.2 – Схема захисту асинхронного двигуна потужністю менше 5000 кВт



ТА1÷ТА4 – трансформатори струму; Q1, Q2 – вимикачі;
 КА1÷КА3, КА5÷КА7 – реле струму типу РТ-40;
 КА4, КА8 – реле струму типу РТ3-51; КТ1, КТ2 – реле часу типу ВЛ-23;
 КЛ1÷ КЛ4 – реле проміжне типу РП-23;
 КН1÷КН6 – реле вказівне типу РУ-1; R1, R2 – резистори типу ПЭВ-50

Рисунок 4.3 – Схема захисту двошвидкісного асинхронного двигуна потужністю менше 5000 кВт

Реле струму захисту від замикань на землю КА4 та КА8 підключені до ТСНП кабельного типу (ТА3 для першої, ТА4 для другої обмотки), які встановлено в шафах КРУ вимикачів відповідних швидкостей. Кількість ТС вказана умовно і відповідає кількості кабелів до АД. Захист від замикань на землю діє на вимикання АД, що фіксується вказівними реле КН3 для першої та КН6 для другої швидкостей.

Захист від перевантаження для кожної швидкості виконано за допомогою одного реле струму і часу типу ВЛ-23 (реле КА3 та КА1 для першої, КА7 та КА2 для другої обмотки). Дія захисту на вимикання ЕД від мережі фіксується вказівними реле КН2 для першої та КН5 для другої швидкості, які подають сигнал про перевантаження на пост керування ЕД. Розмикальними контактами реле КА3.2 захисту від перевантаження першої швидкості виконується заборона передчасного переведення ЕД на другу швидкість.

В схемі передбачені проміжні реле КЛ2 та КЛ4, які підключені до вихідних кіл другого ступеня захисту мінімальної напруги. Кількість реле зумовлено зручністю комутації реле в КРУ. В схемі наведено два варіанти виконання дії захисту мінімальної напруги: для ЕД, який не сам запускається, захист діє на вимикання при його роботі на будь-якій швидкості; на двигуні, який призначено до самозапуску, здійснюється перемикання на першу швидкість, якщо до втрати живлення ЕД працював на другій (контактом реле КЛ4.1). Живлення кіл оперативного постійного струму захистів передбачено від шафи другої швидкості. Самоутримання вихідних реле захисту АД, які встановлено в системі власних потреб електростанцій, не виконується.

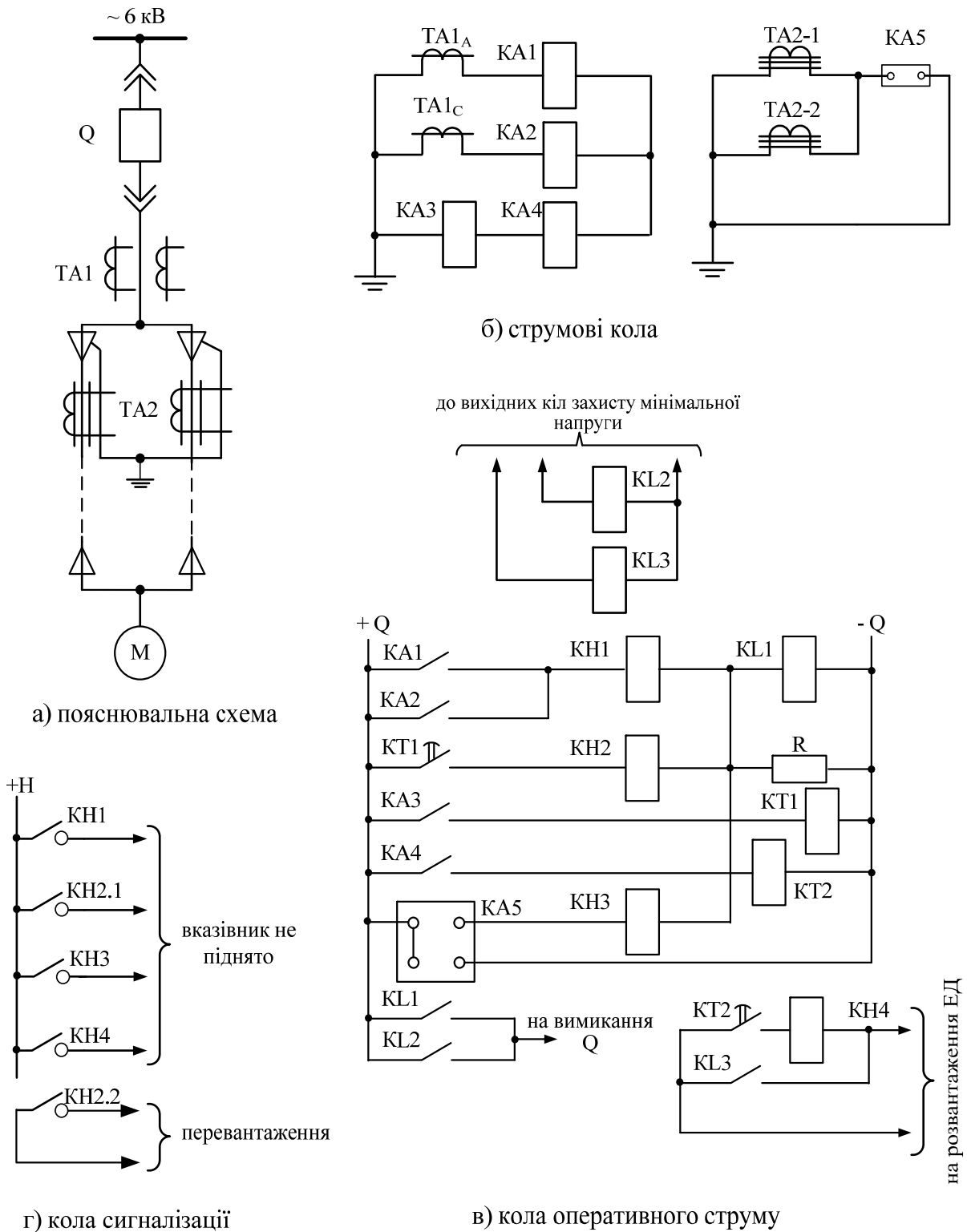
4.5 Схема захисту асинхронного двигуна номінальною потужністю менше 5000 кВт з розвантаженням перед самозапуском

Схема рисунка 4.4 призначена для асинхронного двигуна, який встановлено в системі власних потреб теплових електростанцій та бере участь в самозапуску. Захист здійснено на постійному оперативному струмі.

Струмова відсічка та захист від замикань на землю виконано аналогічно тому, що наведено на рисунку 4.3 для кожної швидкості.

В схемі передбачено двоступінчастий захист від перевантаження (реле струму КА3 та КА4, реле часу КТ1 та КТ2). Перший ступінь захисту (реле КА4, КТ2) призначений для усунення короточасного перевантаження АД шляхом здійснення розвантаження. Якщо перевантаження не усунулося, то другий ступінь захисту (реле КА3, КТ1) відключає ЕД від мережі. При спрацьовуванні другого ступеня захисту від перевантаження подається сигнал на пост керування АД (контактом реле КН2.2).

У вихідних колах захисту мінімальної напруги є проміжні реле КЛ2 та КЛ3.



Q – вимикач; TA1,TA2 – трансформатори струму; KA1÷KA4 – реле струму типу РТ-40; KA5 – реле струму типу РТЗ-51; КТ1,КТ2 – реле часу типу ВЛ-23; KL1÷KL3 – реле проміжне типу РІП-23; КН1÷КН4 – реле вказівне типу РУ-1; R – резистор типу ПЭВ-50

Рисунок 4.4 – Схема захисту асинхронного двигуна потужністю менше 5000 кВт з розвантаженням перед самозапущом

Реле KL3, яке підключено до першого ступеня захисту мінімальної напруги, діє на розвантаження ЕД для забезпечення успішного самозапуску після перерви живлення. Реле KL2, яке підключено до другого ступеня захисту мінімальної напруги, діє на вимикання вимикача Q.

4.6 Схема захисту синхронного двигуна номінальною потужністю менше 5000 кВт

На рисунку 4.5 наведено приклад виконання схеми захисту синхронного двигуна, який встановлено на промисловому підприємстві.

ЕД увімкнено в мережу з точною компенсацією ємнісного струму замикання на землю, причому резонансне налаштування дугогасного реактора забезпечується автоматично.

Самозапуск СД не передбачається з технологічних причин.

Струмова відсічка виконана в двох фазах з реле струму КА1, КА2.

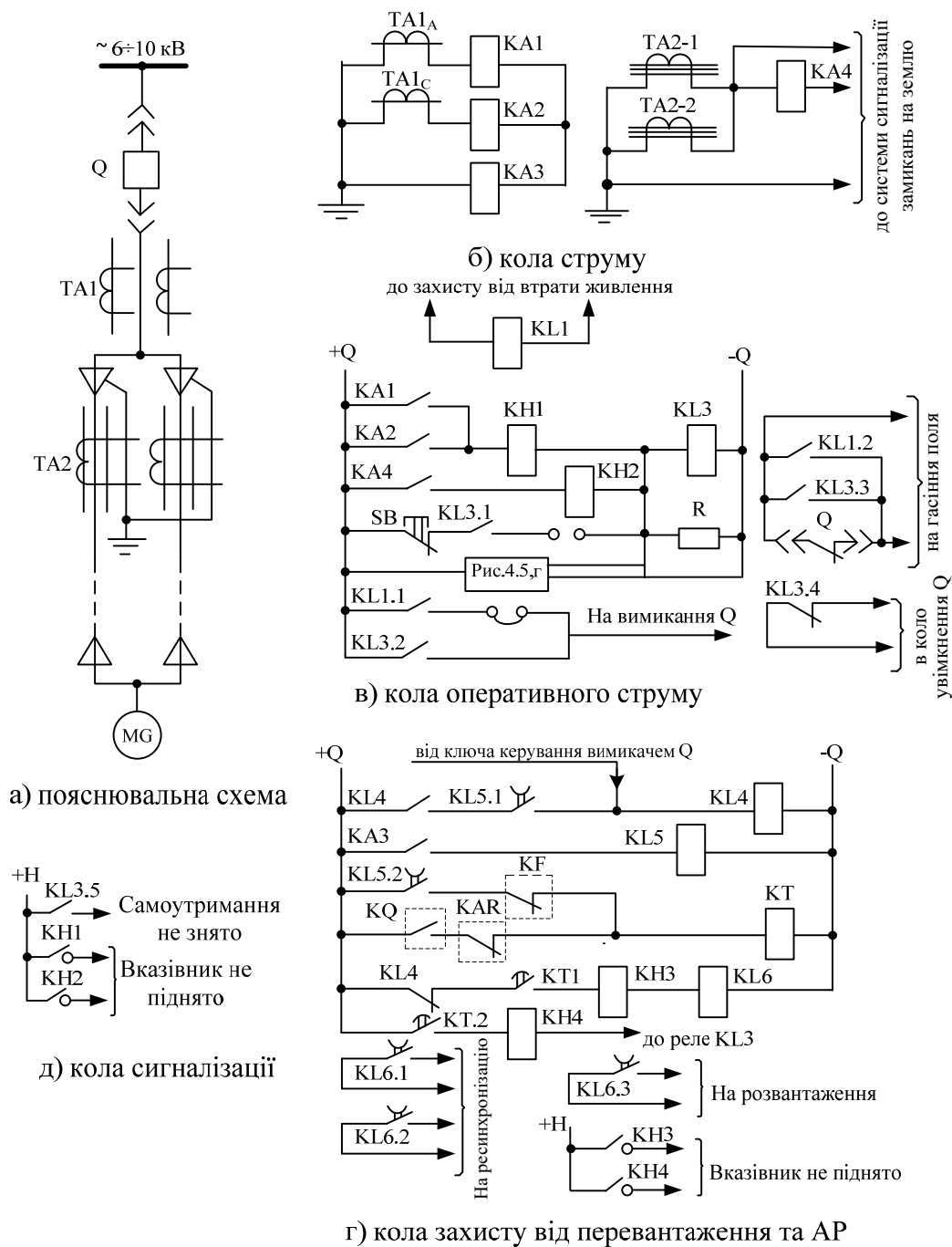
Вторинні обмотки ТСНП (ТА2-1 та ТА2-2) з'єднано паралельно для підключення їх до загальної для РУ системи сигналізації замикань на землю, наприклад, з використанням пристрою УСЗ-3М. В схемі передбачено реле КА4, яке забезпечує миттєве вимикання СД при подвійних замиканнях на землю (одне в статорі ЕД, а друге – в мережі).

Захист від перевантаження та АР виконано суміщеним.

В коло контакту KL5.2 реле-повторювача KL5 реле струму КА3, яке спрацьовує при збільшенні струму статора ЕД, увімкнено контакт КФ, що розмикається при форсуванні збудження. Це унеможливорює непотрібне спрацювання захисту у вказаному режимі.

У вихідних колах захисту від втрати живлення передбачено проміжне реле KL1, яке діє на вимикання вимикача Q та гасіння поля.

Захист виконано на постійному оперативному струмі.



ТА1, ТА2 – трансформатори струму; Q – вимикач;
 КА1÷КА4 – реле струму типу РТ-40; КТ – реле часу типу ВЛ-34;
 КЛ1, КЛ3, КЛ4 – реле проміжне типу РП-23;
 КЛ5, КЛ6 – реле проміжне типу РП-252;
 КН1÷КН4 – реле вказівне типу РУ-1; R1 – резистор типу ПЭВ-50;
 SB – кнопка керування типу КЕ-011;
 KF – контакт, який розмикається при форсуванні збудження;
 KQ – контакт, який замикається при ввімкненні Q;
 KAR – контакт, який замикається при зниженні струму збудження

Рисунок 4.5 – Схема захисту синхронного двигуна потужністю менше 5000 кВт

4.7 Схема захисту синхронного двигуна номінальною потужністю менше 5000 кВт з реакторним пуском

Синхронний двигун, схема захисту якого наведена на рисунку 4.6, встановлено на промисловому підприємстві.

Реакторний пуск здійснюється ввімкненням вимикача Q2 при відключеному Q1.

Самозапуск СД не допускається.

Захист виконано на постійному оперативному струмі.

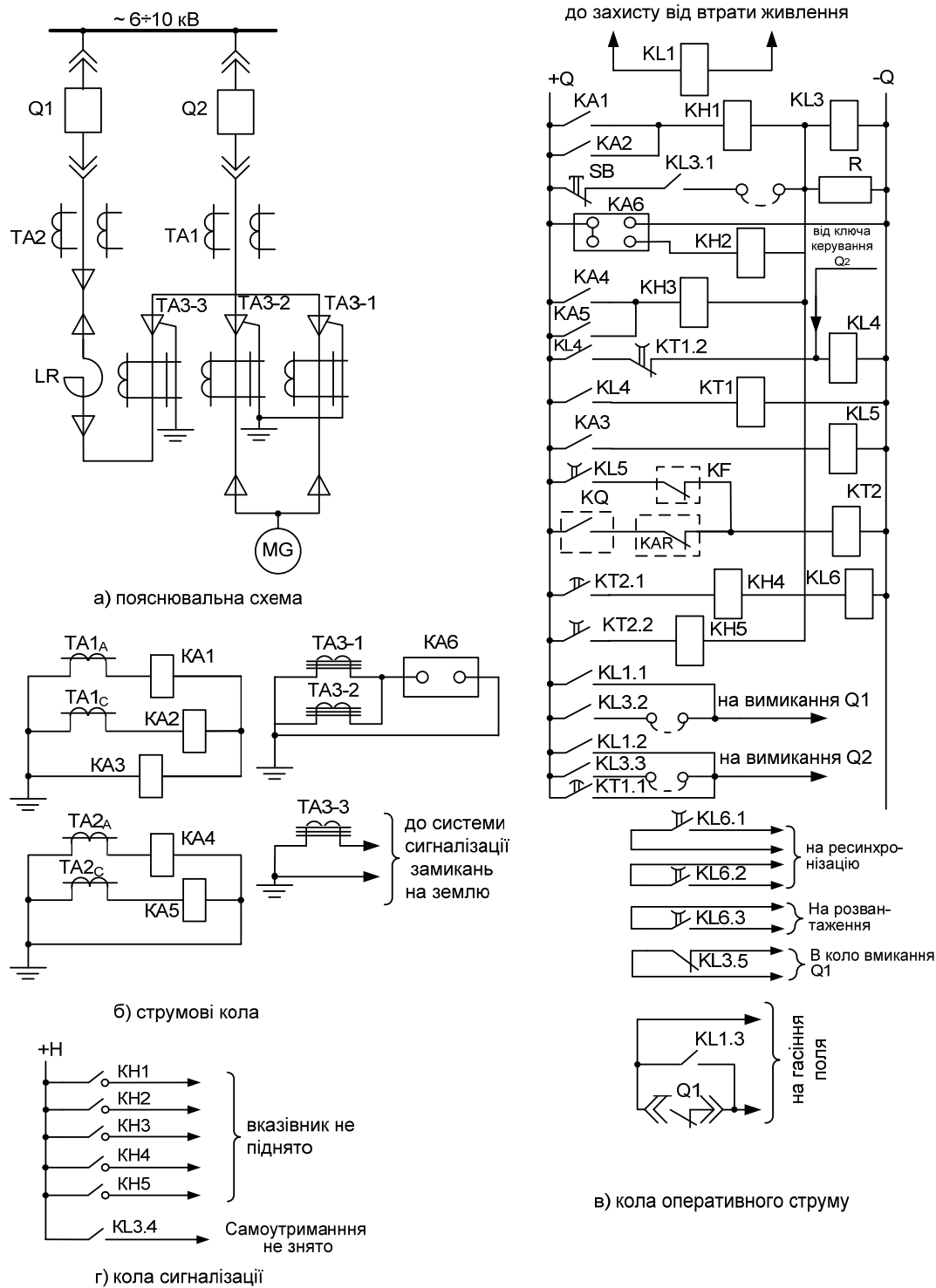
Комплекти захистів від багатофазних КЗ (струмові відсічки на реле КА1, КА2, КА4, КА5) передбачені окремо для кола, по якому пускається СД, і для кола основного живлення.

Захист від перевантаження та асинхронного режиму підключено до ТС камери вимикача основного живлення. Тому жоден зі ступенів захисту на час пуску виводити з дії немає потреби.

Реле КТ1 контролює час пуску СД.

Захист від замикання на землю в обмотці статора виконано з використанням реле струму КА6. Реле підключено до з'єднаних паралельно двох з трьох ТСНП: ТА3-1, ТА3-2. Третій ТСНП ТА3-3 встановлено на кабелі кола пускового реактора.

Увімкнення цього трансформатора в систему сигналізації замикань на землю, яка прийнята для всієї підстанції, дозволяє фіксувати «землю» і в кабелі, і в реакторі LR.



LR – пусковий реактор; Q1, Q2 – вимикачі; TA1÷TA3 – трансформатори струму; KA1÷KA5 – реле струму типу РТ-40; KA6 – реле струму типу РТ3-51; KL1, KL3, KL4 – реле проміжне типу РП-23; KL5, KL6 – реле проміжне типу РП-252; КТ1, КТ2 – реле часу типу ВЛ-34; КН1÷КН5 – реле вказівні типу РУ-1; R – резистор типу ПЭВ-50; SB – кнопка керування типу КЕ-011; КF – контакт, який розмикається при форсуванні збудження; КQ – контакт, який замикається при ввімкненні Q; KAR – контакт, який замикається при зниженні струму збудження

Рисунок 4.6 – Схема захисту синхронного двигуна потужністю менше 5000 кВт з реакторним пуском

4.8 Схема захисту синхронного двигуна номінальною потужністю більше 5000 кВт з реакторним пуском

Схема захисту потужного синхронного двигуна, який встановлено на промисловому підприємстві в мережі з ізольованою нейтраллю і підключено до підстанції, де є джерело постійного оперативного струму, наведено на рисунку 4.7. Пуск синхронного двигуна здійснюється через реактор. Електричний двигун значно віддалений від розподільної установки, до якої підключений чотирма кабелями. На кожному з цих кабелів і на кабелі до реактора в камері вимикача LR встановлені ТСНП ТА2-1÷ТА2-5.

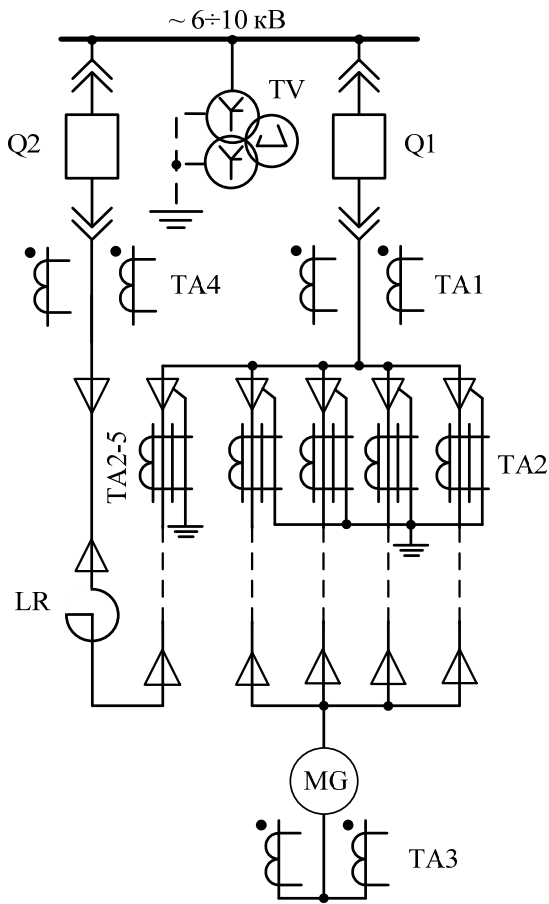
Диференціальний струмовий захист виконано в двох фазах з реле КАВ1 та КАВ2. В зону дії захисту входить пусковий реактор. В плече диференціального захисту в коло ТС ТА4 камери пускового вимикача ввімкнені реле КА1 та КА2 струмового захисту від багатofазних КЗ в зоні між ТС ТА4 та вимикачем Q2. Передбачено виведення з дії цього захисту на час пуску контактом КQ2, який замкнено при відключеному вимикачі Q2.

Захист від однофазних замикань на землю передбачено направленим з використанням пристрою АК з дією на вимикання. Таке виконання захисту прийнято в припущенні, що кидок власного емнісного струму СД при зовнішніх пошкодженнях, які пов'язані з землею, настільки значний, що уставка ненаправленого захисту з реле типу РТЗ-51, вибрана за умовою налаштування від вказаного режиму, не задовольняє вимоги необхідної чутливості. Захист АК приєднано до ТСНП ТА2-1÷ТА2-4 типу ТЗЛМ.

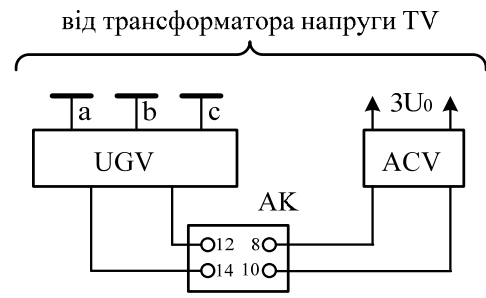
Напряга нульової послідовності та живлення для АК подається аналогічно схемі на рисунку 4.1.

ТСНП ТА2-5 передбачено для підключення до системи сигналізації замикань на землю, яка прийнята для даного РУ.

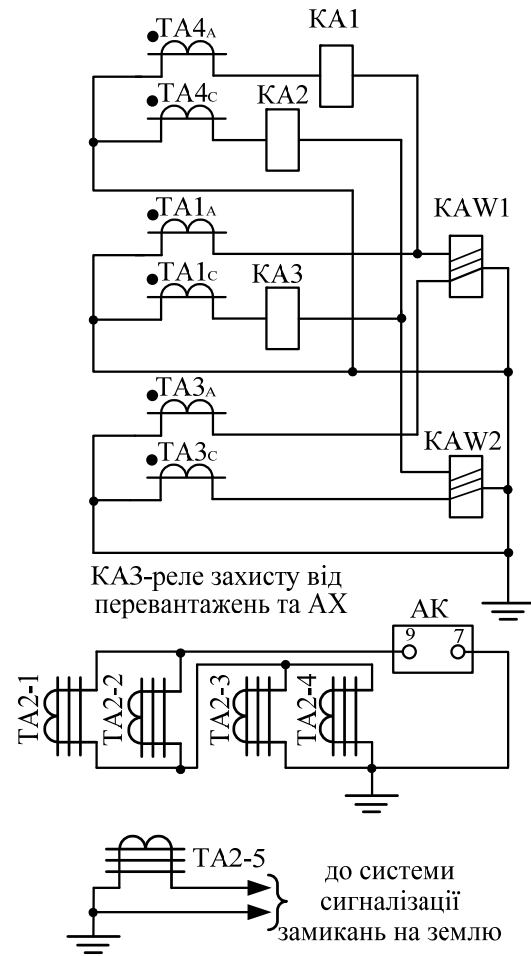
Захист від перевантаження та асинхронного режиму і кола захисту від втрати живлення аналогічні наведеним на рисунку 4.5, г).



а) пояснювальна схема



б) кола напруги

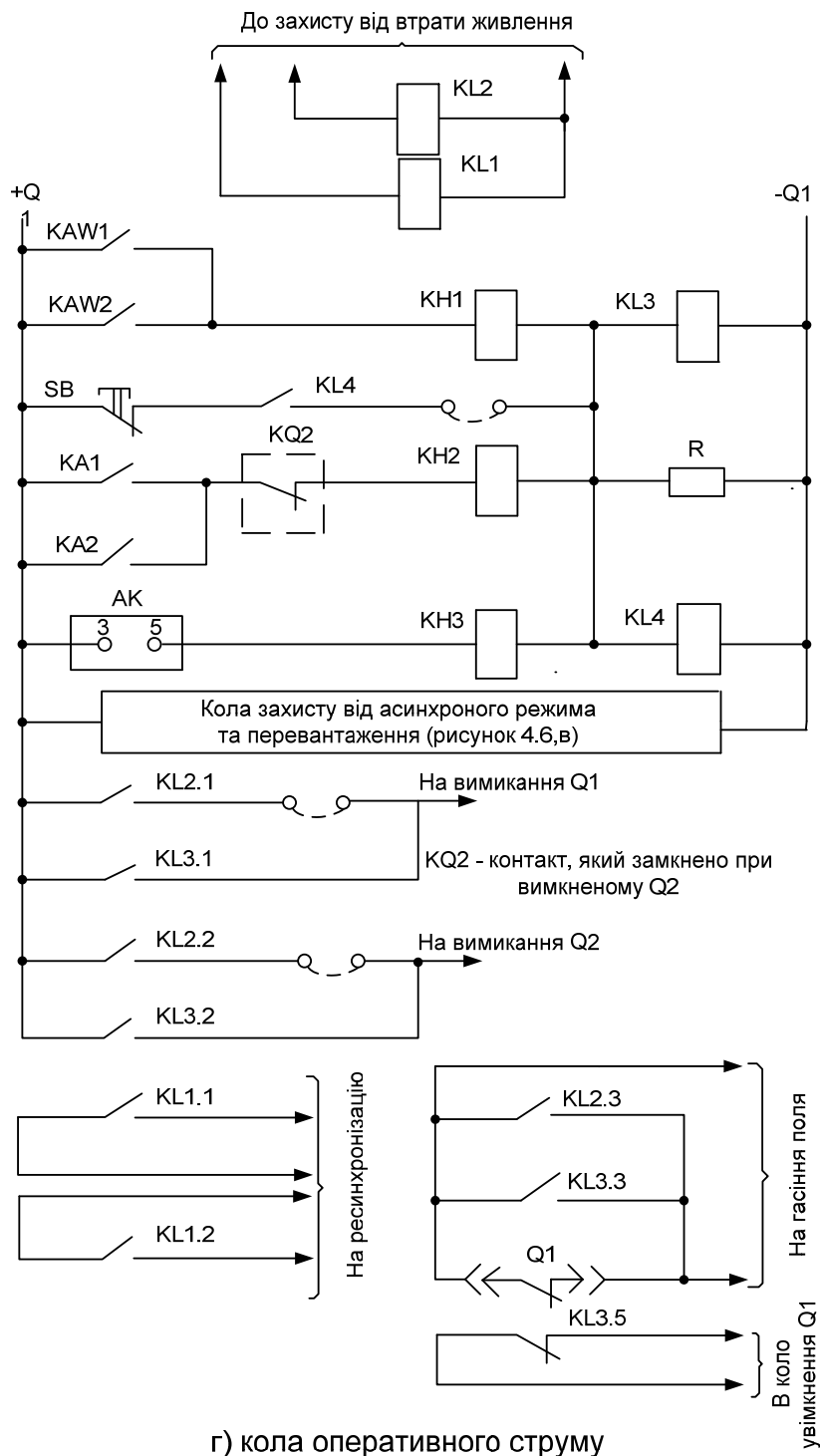


KA3-реле захисту від перевантажень та АХ

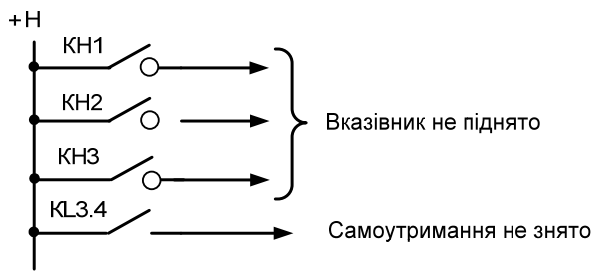
в) кола струму

LR – пусковий реактор; TV – трансформатор напруги; Q1, Q2 – вимикачі;
 TA1÷TA4 – трансформатори струму; SB – кнопка керування типу КЕ-011;
 KAW1, KAW2 – реле струму диференціальне типу ДЗТ-11;
 KA1÷KA3 – реле струму типу РТ-40; KL1÷KL4 – реле проміжні типу РП-23;
 КН1÷КН3 – реле вказівні типу РУ-1; R – резистор типу ПЭВ-50;
 АК – пристрій захисту від замикань на землю типу ЗЗП-1;
 UGV – блок живлення типу БПН-11/2; ACV – допоміжний пристрій типу ВУ-1

Рисунок 4.7 – Схема захисту синхронного двигуна потужністю більше 5000 кВт з реакторним пуском



г) кола оперативного струму



д) кола сигналізації

Рисунок 4.7 (продовження)

4.9 Схема захисту синхронного двигуна номінальною потужністю більше 5000 кВт з різкозмінним навантаженням на валу та динамічним гальмуванням

На рисунку 4.8 наведена схема захисту синхронного двигуна приводу валків кліті прокатного стану металургійного підприємства. Електричний двигун підключено до мережі з нейтраллю, яка заземлена через дугогасний реактор. Для захисту прийнято постійний оперативний струм.

Диференціальний струмовий захист виконано в двох фазах з реле КAW1 та КAW2. З зони дії захисту усунута лінія динамічного гальмування. На вказаній лінії встановлено максимальний струмовий захист без витримки часу (реле КА3 та КА4 і проміжне реле KL3), який діє на вимикання вимикача Q2.

Захист від однофазних замикань на землю виконано з реле КА6, підключених до ТСНП ТА2 з підмагнічуванням типу ТНП-7. Для зниження струму спрацювання захисту, який вибирається за умовою налаштування від власного ємнісного струму та струму небалансу трансформатора ТА2 при зовнішніх замиканнях, пов'язаних з землею, в схемі передбачено уповільнення приблизно $1\div 2$ с, що виконано з застосуванням реле часу КТ1. Для зниження струму небалансу послідовно з реле у вторинну обмотку ТА2 ввімкнено резистор. R2.

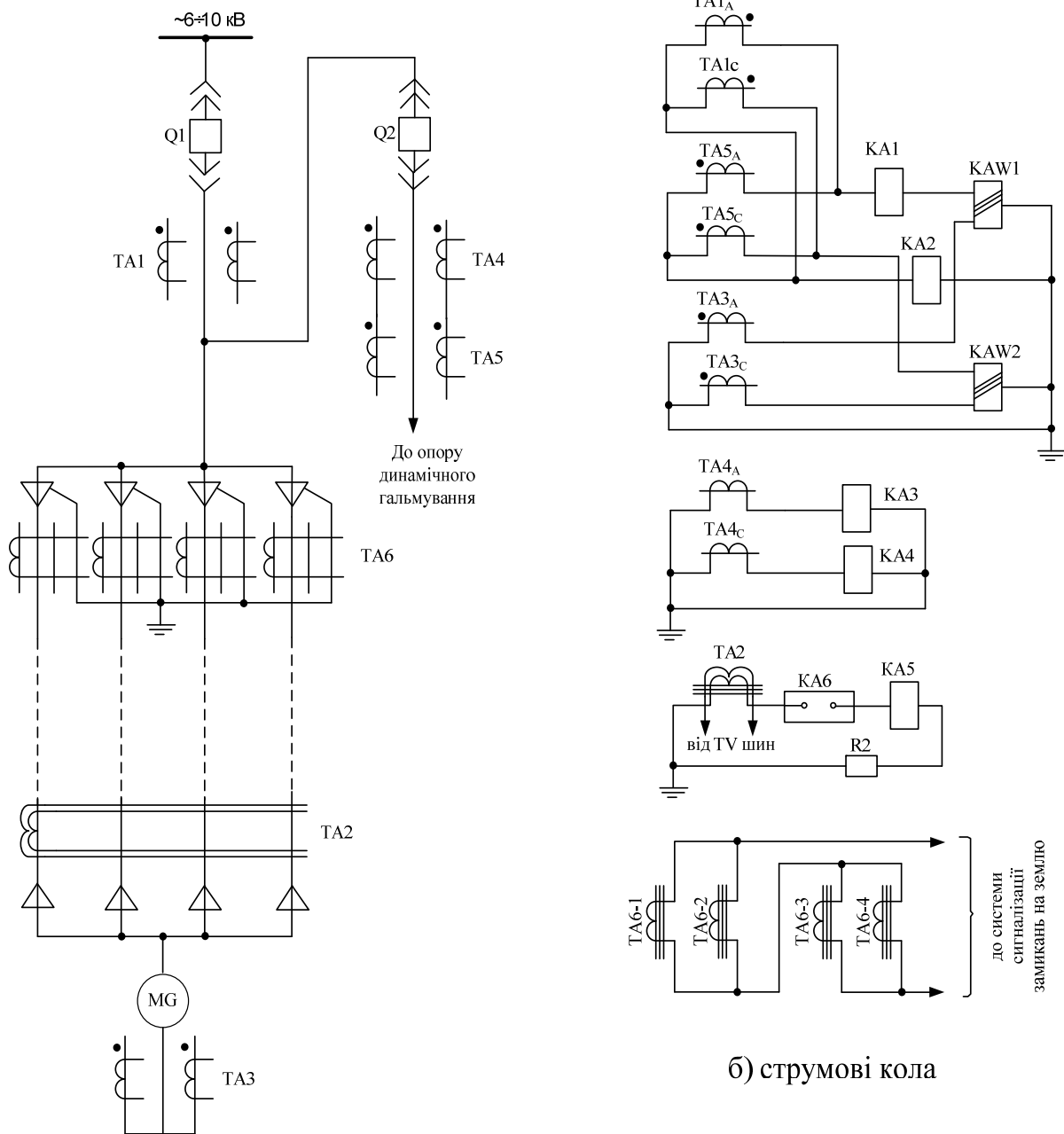
Для вимикання СД при подвійних замиканнях на землю (одне в обмотці статора ЕД, а друге – в мережі) передбачено струмовий захист нульової послідовності (реле струму КА5), який діє без уповільнення.

Захист від струмів перевантаження виконано двоступінчастим, в однофазному виконанні.

Перший ступінь захисту (реле струму КА1 та реле часу КТ) має незалежну від струму характеристику витримки часу і вводиться в дію одразу після закінчення пуску СД. Другий ступінь (реле КА2) має обернено залежну часострумову характеристику.

Захист від асинхронного режиму виконано таким, що реагує на зниження струму збудження СД. Дію захисту здійснено з двома витримками часу (реле КТ2): з першою, меншою, – на сигнал експлуатаційному технологічному персоналу, з другою – на вимикання. Вказане прийнято для того, щоб персонал міг вжити заходів до вимикання ЕД вручну під час паузи графіка навантаження та тим самим унеможливити пошкодження механізму при раптовій зупинці СД.

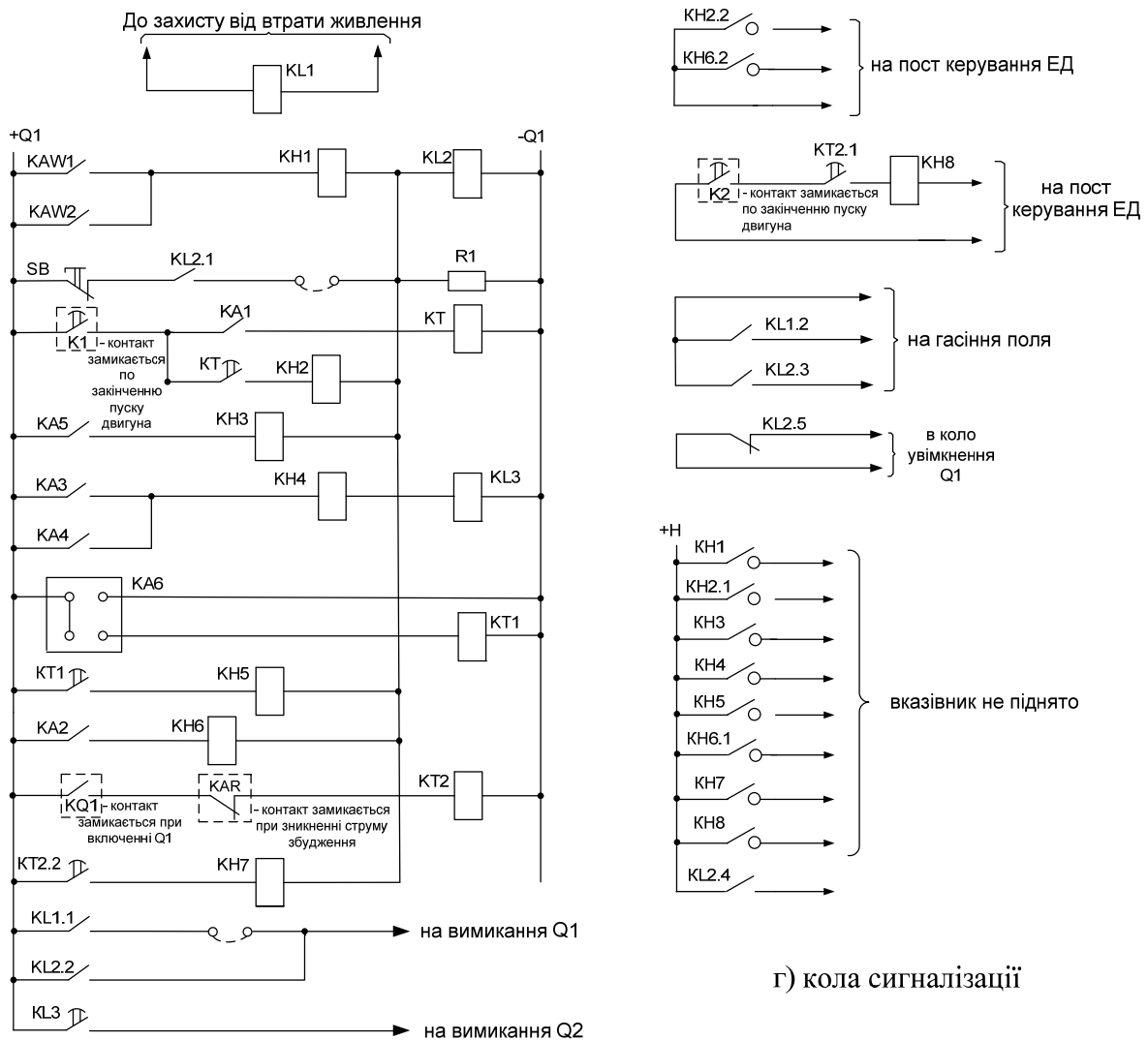
Кола захисту від втрати живлення виконано аналогічно, як на рисунку 4.6.



а) пояснювальна схема

Q1, Q2 – вимикачі; TA1÷TA6 – трансформатори струму; KAW1, KAW2 – реле струму диференціальне типу ДЗТ-11; KA1, KA3, KA4 – реле струму типу РТ-40; KA2 – реле струму типу РТ-82; KA5 – реле струму типу РТ-40/6; KA6 – реле струму типу РТ3-51; KL1, KL2 – реле проміжне типу РП-23; KL3 – реле проміжне типу РП-251; КТ – реле часу типу РВ-123; КТ1 – реле часу типу РВ-124; КТ2 – реле часу типу ВЛ-34; КН1÷КН8 – реле вказівне типу РУ-1; SB – кнопка керування типу КЕ-011; R1, R2 – резистор типу ПЭВ-50

Рисунок 4.8 – Принципова схема захисту синхронного двигуна номінальною потужністю більше 5000 кВт з різкозмінним навантаженням та динамічним гальмуванням



в) кола оперативного струму

г) кола сигналізації

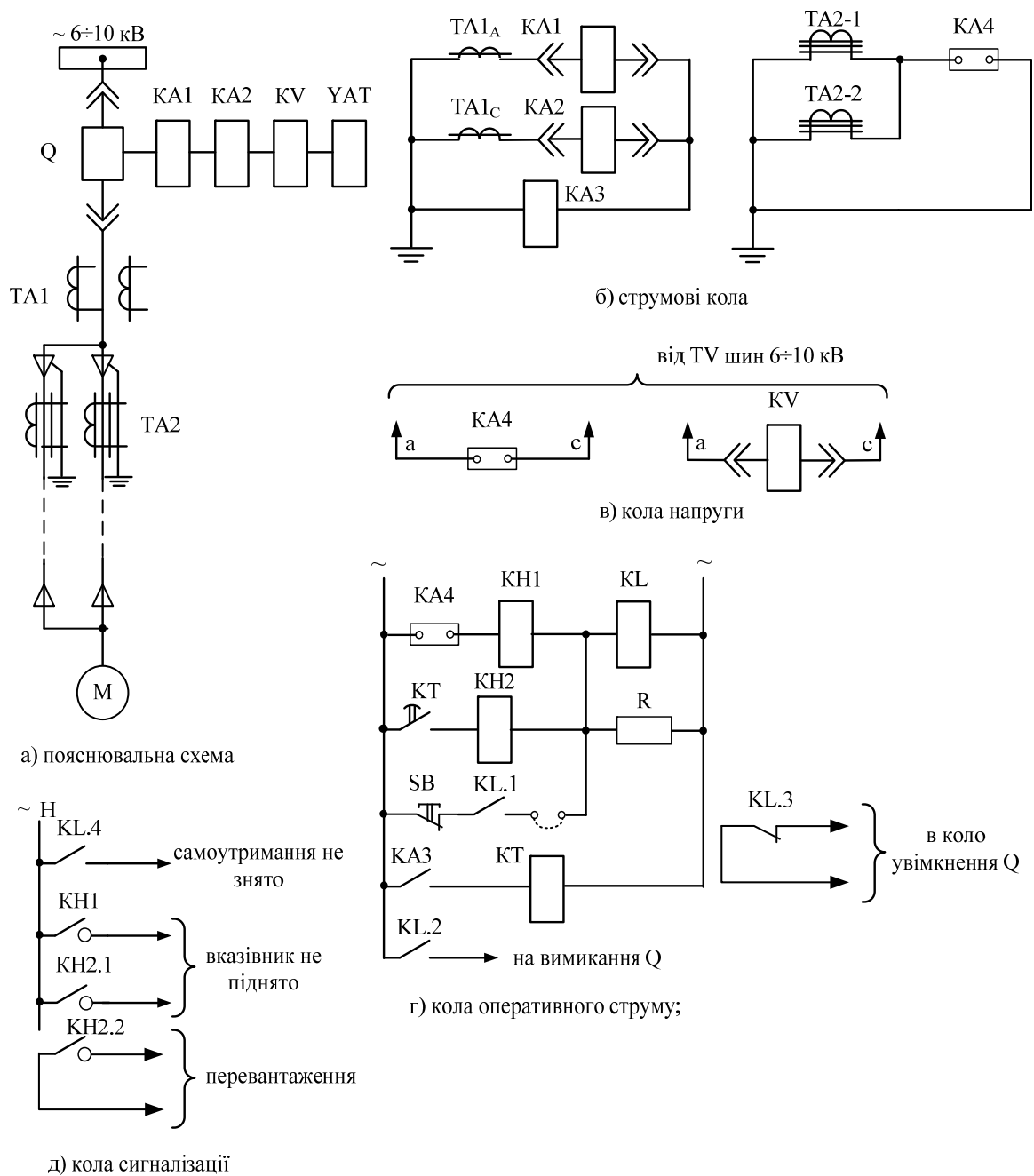
Рисунок 4.8 (продовження)

4.10 Схеми захисту електродвигунів на змінному оперативному струмі

За джерело живлення оперативних кіл захистів у схемі на рисунках 4.9 та 4.10 використовуються вимірювальні трансформатори струму і напруги, а також трансформатори власних потреб (ТВП).

Живлення безпосередньо від трансформаторів струму прийнято для електромагнітів вимикання та реле прямої дії струмової відсічки.

Живлення від трансформатора напруги прийнято для захисту мінімальної напруги в схемі на рисунку 4.9 та реле захисту від однофазних замикань на землю типу РТЗ-51 в схемі на рисунку 4.10 [7].



Q – вимикач; TA1, TA2 – трансформатори струму; KA1, KA2 – реле струму типу РТМ; KA3 – реле струму типу РТ-40; KA4 – реле струму типу РТЗ-51; KV – реле напруги типу РНВЛ; КТ – реле часу типу ВЛ-34; KL – реле проміжне типу РП-25; KH1, KH2 – реле вказівне типу РУ-1; R – резистор типу ПЭВ-50; SB – кнопка керування типу КЕ-011; YAT – електромагніт вимикання

Рисунок 4.9 – Принципова схема захисту асинхронного двигуна номінальною потужністю менше 5000 кВт на змінному оперативному струмі

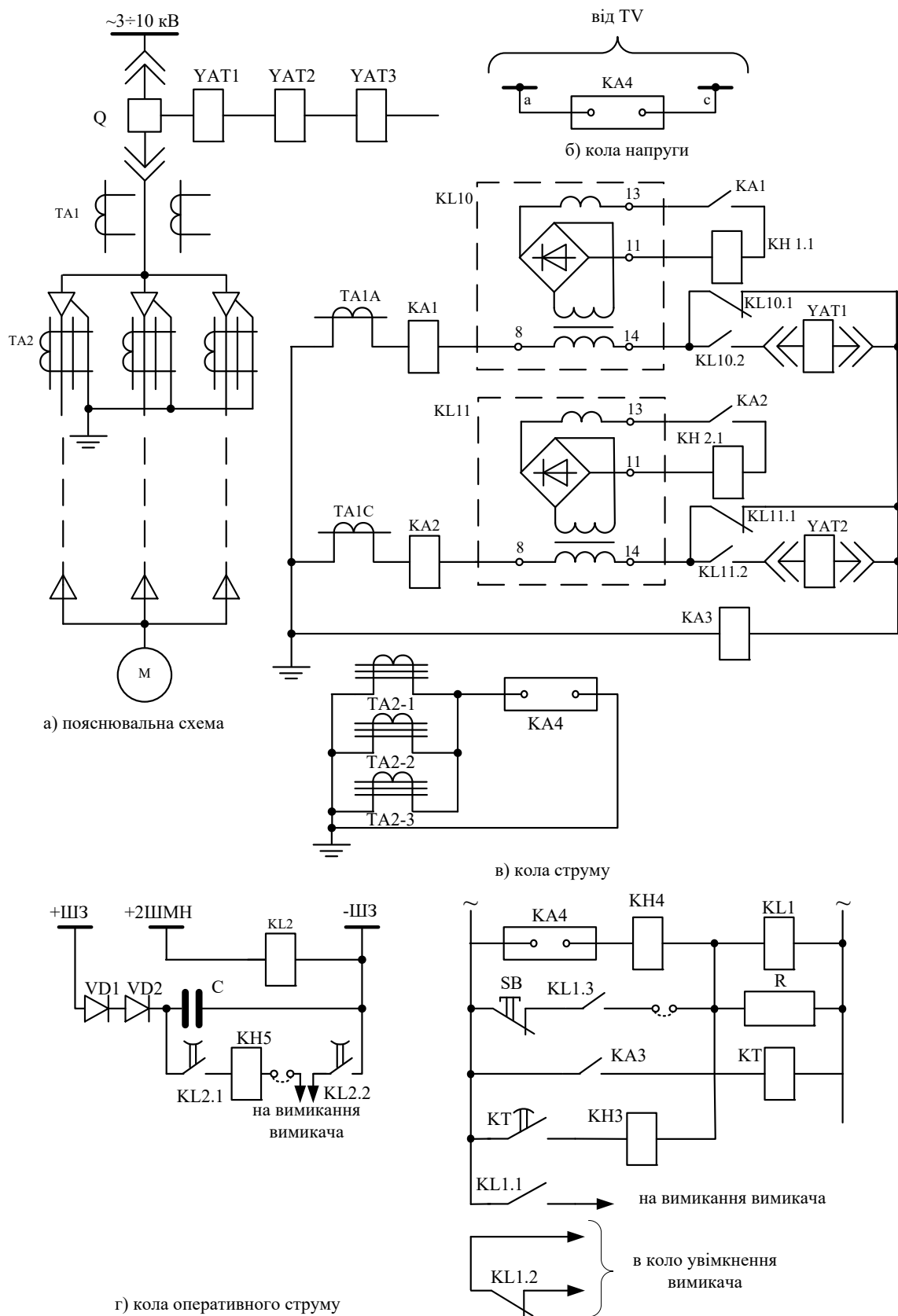
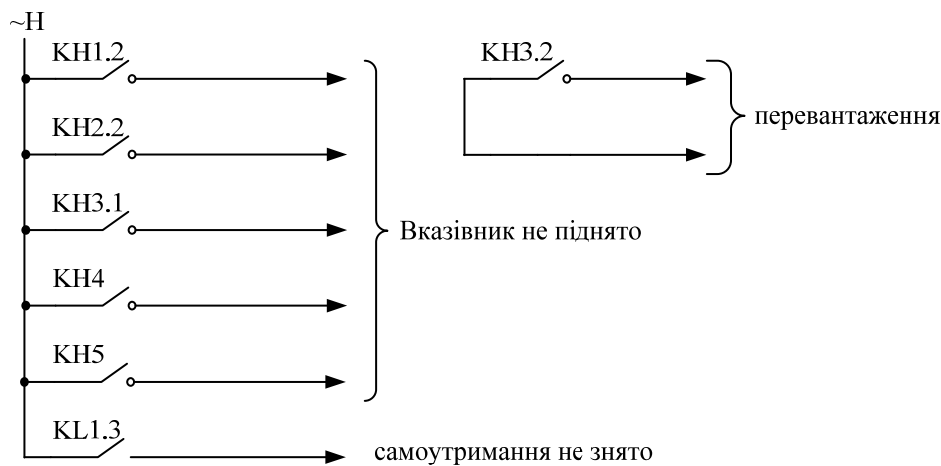


Рисунок 4.10 – Принципова схема захисту асинхронного двигуна номінальною потужністю менше 5000 кВт на змінному оперативному струмі (варіант з дешунтуванням електромагнітів вимикання)



д) кола сигналізації

Q – вимикач; ТА1, ТА2 – трансформатори струму; YAT1÷YAT3 – електромагніти вимикання; КА1÷КА3 – реле струму типу РТ-40; КА4 – реле струму типу РТЗ-51; КТ – реле часу типу ВЛ-34; KL10, KL11 – реле проміжне типу РП-341; KL1 – реле проміжне типу РП-252; KL2 – реле проміжне типу РП-256; КН1÷КН5 – реле вказівне типу РУ-1; R – резистор типу ПЭВ-50; SB – кнопка керування типу КЕ-011; С – конденсатор типу МБГО; VD1, VD2 – діоди типу Д226Б

Рисунок 4.10 (продовження)

Кола вимикання захистів від ОЗЗ, від струмів перевантаження та АР впливають на електромагніт релейного вимикання з незалежним живленням від ТВП. При цьому для запобігання відмови захисту від замикань на землю, а також для забезпечення надійного і швидкого вимикання подвійних замикань на землю (одне на фазі В статора ЕД, а друге – на будь-якій з двох інших фаз в мережі), враховуючи, що захист від багатofазних замикань виконано у двох фазах, використовують лінійну напругу U_{ac} вторинної обмотки трансформатора.

На рисунку 4.9 наведено схему захисту невідповідального ЕД, який встановлено на промисловому підприємстві, в мережі з ізольованою нейтраллю. Вимикач Q, який обладнано пружинним приводом типу ПП-67/11460, має такі вбудовані елементи захисту: два реле максимального струму миттєвої дії (КА, КА2), одне реле мінімальної напруги з витримкою часу (KV) та один електромагніт релейного вимикання (YAT). Передбачена в схемі струмова відсічка виконана на двох вбудованих в привод вимикача реле прямої дії типу РТМ (КА1 та КА2), які ввімкнено на фазні струми ТС ТА1, з'єднаних в неповну зірку. Захист від замикань на землю виконано за допомогою реле струму КА4, підключеного до ТСНП ТА2 типу ТЗЛМ, встановленого в шафі КРУ. Тип і кількість ТС захисту показані умовно і знаходяться залежно від числа кабелів до ЕД.

Захист від перевантаження, який діє на вимикання, виконано з використанням реле струму КА3 і реле часу КТ. При спрацюванні захисту спрацьовує вказівне реле і подається сигнал про перевантаження на пост

керування ЕД. Для електродвигунів, які не перевантажуються, апаратура від перевантаження (реле КА3, КТ, КН2) зазвичай не встановлюється. Захист мінімальної напруги виконано за допомогою вбудованого в привод вимикача реле прямої дії КV.

Наведена на рисунку 4.10 схема захисту АД, який встановлено на промисловому підприємстві і має потужність менше 5000 кВт, що підключений до мережі з ізольованою нейтраллю і не допускає зниження напруги в мережі більше ніж на 30% $U_{ном}$. Вимикач Q має пружинний привод ПП-67/455000 і вбудовані елементи захисту: два струмових електромагніти вимикання (УАТ1, УАТ2) та один електромагніт релейного вимикання (УАТ3). Передбачена в схемі відсічка виконана двома реле струму (КА1 та КА2). Реле КА1 та КА2 діють через проміжні реле КЛ10, КЛ11, які дешунтують струмові електромагніти вимикання вимикачів УАТ1 та УАТ2. Умови встановлення захисту від замикань на землю такі ж, як і в схемі на рисунку 4.9. Кола захисту мінімальної напруги виконані аналогічно схемі на рисунку 4.2.

5 ВИБІР УСТАВОК СПРАЦЮВАННЯ ЗАХИСТІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

5.1 Загальні положення

Розрахунки захистів зводяться до визначення параметрів спрацювання (уставок), які відповідають вимогам селективності та необхідної швидкодії, а також до перевірки чутливості при розрахункових видах пошкодження та режимах роботи мережі, до якої підключено ЕД [2, 7, 8].

Зазначені в розділі рекомендації з розрахунків подані в припущенні, що трансформатори струму, які використовуються для струмової відсічки та диференціального струмового захисту, задовольняють криві граничної кратності при 10%-ій похибці в режимах пуску та зовнішніх КЗ. При КЗ в зоні дії захисту від багатофазних КЗ допускається робота ТС з суттєво великими похибками (50% і більше).

Згідно з ПУЕ оцінювання чутливості здійснюється тільки щодо захистів від багатофазних замикань та ОЗЗ. При цьому струмова відсічка має мати значення коефіцієнта чутливості при КЗ у лінійних виводах обмотки статора в мінімальному режимі не нижче 2,0. Для диференціального струмового захисту у випадках, якщо передбачено прямий або реакторний пуск ЕД від мережі, і якщо струм спрацювання не перевищує номінальний струм ЕД, в перевірці чутливості цього захисту при КЗ у лінійних виводах ЕД немає потреби. Для ЕД з реакторним пуском захист від багатофазних замикань перевіряється і за умовою чутливості до КЗ на виводах реактора. При цьому мінімальне значення коефіцієнта чутливості також має бути біля двох.

Чутливість струмових відсічок на змінному оперативному струмі, які виконано за схемою з дешунтуванням вимикальних електромагнітів приводу, має перевірятися з урахуванням дійсної струмової похибки ТС після дешунтування. При цьому мінімальне значення коефіцієнта чутливості вимикальних електромагнітів, яке визначається для умов їх надійного спрацювання, має бути не менше 2,4 [7].

Чутливість струмового ненаправленого захисту нульової послідовності від ОЗЗ визначається його первинним струмом спрацювання, який має бути не більше 5 А.

Для струмових захистів нульової послідовності, в зону дії яких входить лінія, що з'єднує ЕД з РУ, крім умови, вказаної вище, потрібно виконати вимогу чутливості згідно з ПУЕ щодо захистів від замикань на землю кабельних і повітряних ліній, а саме: для ненаправлених захистів мінімальний коефіцієнт чутливості має становити приблизно 1,25 для кабельних та приблизно 1,5 для повітряних ліній, а для направленого струмового захисту – приблизно 2.

Для струмових ненаправлених захистів, трансформатори струму нульової послідовності яких встановлюють безпосередньо біля лінійних виводів обмотки статора, крім обов'язкового виконання вимоги мати струм спрацювання з запасом, меншим, ніж 5 А, доцільно виконувати також умову

$$I_{C\Sigma} - I_C \geq I_{c3},$$

де $I_{C\Sigma}$ – сумарний ємнісний струм замикання на землю;
 I_C – власний ємнісний струм замикання на землю;
 I_{c3} – струм спрацювання захисту.

5.2 Розрахунок захистів від замикання на землю (корпус) обмотки статора

Уставки реле струму захисту від замикання на землю розраховуються, як правило, в первинних струмах.

Струм спрацювання ненаправленого струмового захисту, який виконано з використанням реле типу РТЗ-51, підключеного до кабельних ТСНП без підмагнічування, розраховується за умовою неспрацювання захисту при зовнішньому однофазному замиканні на землю [7, 8]

$$I_{c3} \geq K_{\text{нал}} \cdot K_{\delta} \cdot I_C, \quad (5.1)$$

де I_C – усталене значення власного ємнісного струму приєднання, що захищається;

$K_{\text{нал}} = 1,2 \div 1,3$ – коефіцієнт налаштування;

K_{δ} – коефіцієнт, який враховує кидок власного ємнісного струму в момент запалювання дуги, для реле типу РТЗ-51 $K_{\delta} = 2 \div 2,5$, а для РТЗ-50 $K_{\delta} = 3 \div 4$.

Значення I_C визначається як сума ємнісних струмів в ЕД ($I_{C,д}$) та лінії ($I_{C,л}$) від місця встановлення ТСНП до лінійних виводів ЕД

$$I_C = I_{C,д} + I_{C,л}. \quad (5.2)$$

Власний ємнісний струм ЕД визначається за формулою

$$I_{C,д} = \frac{2\pi \cdot f_{\text{ном}} \cdot 3 \cdot C_{д} \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}. \quad (5.3)$$

Значення $I_{C,д}$ за (5.3) отримується в амперах, якщо номінальна частота мережі $f_{\text{ном}}$ вимірюється в герцах, ємність фази статора $C_{д}$ – у фарадах, а номінальна напруга ЕД $U_{\text{ном}}$ – у вольтах.

Ємність фази статора вибирається за даними заводу-виробника. Для синхронних турбодвигунів типу СТД значення $3C_{д}$ наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Значення ємності фази статора 3С_д турбодвигунів типу СТД

Тип турбодвигуна	Потужність, кВт	Розрахункові значення ємності обмотки статора на три фази, мкФ
СТД-5000-2	5000	0,110/0,085
СТД-6300-2	6300	0,110/0,110
СТД-8000-2	8000	0,170/0,110
СТД-10000-2	10000	0,170/0,150
СТД-12500-2	12500	0,220/0,150

Примітки: 1. В чисельнику наведено значення ємності для СТД з номінальною напругою 6 кВ, в знаменнику – з номінальною напругою 10 кВ;
2. Частота обертання СТД – 3000 об/хв.

Для орієнтовних розрахунків за відсутності відомостей заводу-виробника можна використовувати нижченаведені наближені формули [7]:

– для неявнополюсних СД та АД з короткозамкненим ротором

$$C_d \approx \frac{0,0187 \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{U_{\text{НОМ}} \cdot (1 + 0,08 \cdot U_{\text{НОМ}})}},$$

де $S_{\text{НОМ}}$ – номінальна повна потужність електродвигуна, МВА;
 $U_{\text{НОМ}}$ – номінальна напруга ЕД, кВ;
– для інших електродвигунів

$$C_d \approx \frac{40 \cdot \sqrt[4]{S_{\text{НОМ}}^3} \cdot 10^{-6}}{3 \cdot (U_{\text{НОМ}} + 3600) \cdot \sqrt[3]{n_{\text{НОМ}}}},$$

де $U_{\text{НОМ}}$ – номінальна напруга електродвигуна, В;
 $n_{\text{НОМ}}$ – номінальна частота обертання ротора, об/хв.

Власний ємнісний струм лінії, яка входить в зону захисту, визначається за виразом:

$$I_{C,л} = I_{C_0} \cdot l \cdot m, \quad (5.4)$$

де I_{C_0} – власний ємнісний струм одиниці довжини лінії, А/км;
 l – довжина лінії, км;
 m – число проводів (кабелів) у фазі лінії.

Визначене за (5.1) значення I_{C_3} може виявитися менше мінімального струму спрацювання захисту $I_{C_3,\text{min}}$, який вказано в таблиці 5.2. В цьому випадку струм спрацювання приймається за умовою:

$$I_{C_3} = I_{C_3,\text{min}}.$$

Таблиця 5.2 – Струми спрацювання захисту від замикання на землю

Тип ТСНП	Кількість ТСНП та їх з'єднання							
	1	послідовне			паралельне			
		2	3	4	2	3	4	5
ТЗЛ	$\frac{0,68}{3,96}$	$\frac{1,25}{6,80}$	$\frac{1,95}{9,83}$	$\frac{2,48}{14,6}$	$\frac{0,97}{4,25}$	$\frac{1,19}{4,80}$	$\frac{1,43}{5,95}$	немає даних
ТЗЛМ	$\frac{0,60}{3,26}$	$\frac{1,08}{6,35}$	$\frac{1,60}{9,60}$	$\frac{2,16}{13,00}$	$\frac{0,89}{4,62}$	$\frac{1,08}{5,10}$	$\frac{1,33}{5,66}$	$\frac{1,67}{6,60}$
ТЗР	$\frac{0,90}{3,80}$	$\frac{1,26}{6,20}$	немає даних	немає даних	$\frac{1,41}{6,10}$	немає даних	немає даних	немає даних
ТЗРЛ	$\frac{0,81}{4,17}$	$\frac{1,34}{7,90}$	$\frac{1,95}{11,70}$	$\frac{2,56}{15,44}$	$\frac{1,00}{5,00}$	$\frac{1,20}{6,10}$	$\frac{1,52}{7,20}$	немає даних

- Примітки: 1. Струми спрацювання наведено при номінальній частоті $f_{\text{ном}} = 50$ Гц.
 2. В чисельнику наведено мінімальні, а в знаменнику – максимальні струми спрацювання.

При визначенні остаточної уставки захисту з реле, яке підключено до ТСНП в КРУ, потрібно пам'ятати, що струм спрацювання захисту має бути не тільки з певним запасом ($K_{\text{зап}} = 1,2 \div 1,3$) – менше небезпечного для ЕД струму 5 А, а й забезпечувати чутливість захисту лінії. Враховуючи рекомендовані значення коефіцієнтів у формулі (5.1), неважко підрахувати, що ці умови в мережі без компенсації ємнісного струму замикання на землю виконуються за умови

$$4 \text{ А} \geq I_{\text{сз}} \geq 3I_{\text{с}}; \quad I_{\text{сз}} \geq (4 \div 5) \cdot I_{\text{с}}. \quad (5.5)$$

Якщо умова (5.5) не виконується через великий власний ємнісний струм лінії, то ТСНП потрібно перенести до лінійних виводів ЕД, а розрахунок повторити, взявши $I_{\text{с}} = I_{\text{с,д}}$.

Приклад. Визначити уставки струмового захисту від замикання на корпус обмотки статора СД типу СТД-5000-2 ($U_{\text{ном}} = 10$ кВ), який підключено до мережі з ізольованою нейтраллю, сумарний ємнісний струм якої $I_{\text{сз}} = 6$ А. Розрахункове значення ємності обмотки статора на три фази (див. табл. 5.1) становить 0,085 мкФ. ЕД зв'язаний з КРУ лінією, яка складається з трьох кабелів перерізом 150 мм² кожний. Довжина лінії 35 м. Реле захисту підключено до трьох з'єднаних паралельно ТСНП типу ТЗЛМ.

Власний ємнісний струм ЕД СТД-5000-2 за (5.3) дорівнює

$$I_{\text{с,д}} = \frac{2\pi \cdot f_{\text{ном}} \cdot 3C_{\text{д}} \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 3 \cdot (0,085/3) \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \approx 0,16 \text{ А.}$$

Власний ємнісний струм лінії за (5.4) –

$$I_{C,л} = I_{C_0} \cdot 1 \cdot m = 1,3 \cdot 0,035 \cdot 3 \approx 0,14 \text{ А.}$$

Первинний струм спрацювання захисту з (5.1) з урахуванням (5.2) становить

$$I_{C3} = K_{\text{нал}} \cdot K_{\delta} \cdot (I_{C,д} + I_{C,л}) = 1,25 \cdot 2,5(0,16 + 0,14) = 0,94 \text{ А.}$$

Оскільки отримане значення $I_{C3} = 0,94 \text{ А}$ виявляється меншим $I_{C3,\text{min}} = 1,08 \text{ А}$ (див. табл. 5.2) для трьох з'єднаних паралельно ТСНП типу ТЗЛМ, захист доводиться загрубляти, прийнявши $I_{C3} = I_{C3,\text{min}} = 1,08 \text{ А}$. Прийняте значення первинного струму спрацювання захисту задовольняє умови чутливості до однофазних замикань на землю і в лінії, і в обмотці статора:

$$I_{C3} \leq \frac{I_{C\Sigma} - I_C}{K_{\text{ч. min}}} = \frac{6 - (0,14 + 0,16)}{1,25} = 4,56 \text{ А;}$$

$$I_{C3} \leq 4 \text{ А.}$$

Значно складніше виявляється виконання розрахунку захисту, який ввімкнено на ТСНП з підмагнічуванням.

Струм спрацювання захисту з використанням реле типу РТЗ-51, який підключено на ТСНП з підмагнічуванням, розраховується за умови налаштування від струму у вторинній обмотці ТСНП в режимі зовнішнього переміжного замикання на землю при струмі зовнішнього КЗ між двома фазами

$$I_{C3,п} \geq K_{\text{нал}} (K'_{\text{нал}} \cdot I_C + K''_{\text{нал}} \cdot I_{\text{нб.п}}), \quad (5.6)$$

де $K_{\text{нал}} = 1,2$ – коефіцієнт налаштування;

I_C – усталений власний ємнісний струм замикання на землю;

$I_{\text{нб.п}}$ – первинний струм небалансу ТСНП.

$$I_{\text{нб.п}} = I_{\text{нб.в}} \cdot \omega_{\text{в}} \cdot \left(1 + \frac{Z_{\text{р}}}{Z_{\text{е.нам}}} \right), \quad (5.7)$$

де $I_{\text{нб.в}}$ – вторинний струм небалансу ТСНП;

$\omega_{\text{в}}$ – число витків вторинної обмотки ТСНП (для ТСНП типу ТНП-7 $\omega_{\text{в}} = 27$);

$Z_{\text{р}}$ – опір вторинного кола ТСНП, Ом;

$Z_{\text{е.нам}} = 10 \text{ Ом}$ – еквівалентний опір намагнічування, який приведено до вторинного кола, Ом;

$K'_{\text{нал}} = 2$ – коефіцієнт налаштування від кидка власного ємнісного струму;

$K''_{\text{нал}} = 1,5$ – коефіцієнт налаштування від струму небалансу.

Вторинний струм небалансу ТСНП за наявності підмагнічування визначається формулою

$$I_{\text{нб.в}} = \frac{K \cdot E_{\text{нб.нес}}}{Z_{\text{с.нам}} + Z_p} + \frac{E_{\text{нб.підм}}}{Z_p}, \quad (5.8)$$

де

$$K = \frac{0,87 \cdot I_{\text{ном}}}{X_d \cdot I_{\text{каб}}}, \quad (5.9)$$

$E_{\text{нб.нес}}$ – ЕРС небалансу у вторинному колі, яка зумовлена несиметричним розташуванням первинних струмів при нормальному навантаженні кабелів, мВ (для ТСНП типу ТНП-7 $E_{\text{нб.нес}} = 14$ мВ);

$E_{\text{нб.підм}} = 150$ мВ – ЕРС небалансу у вторинному колі, що зумовлена підмагнічуванням;

$I_{\text{каб}}$ – струм в кабельній лінії, який проходить через вікно ТСНП і при якому визначено ЕРС небалансу (для ТСНП типу ТНП-7 $I_{\text{каб}} = 7 \cdot 300 = 2100$ А).

Підставляючи в (5.9) конкретні дані серійних ЕД можна знайти межі змінювання K . Для ЕД з номінальною напругою 6 кВ $K = 3 \div 6,7$, а при $U_{\text{ном}} = 10$ кВ: $K = 2,8 \div 5,2$.

При знятому підмагнічуванні

$$I_{\text{нб.в}} = K \cdot I_{\text{нб.нес}} / Z_p. \quad (5.10)$$

Порівнюючи (5.8) та (5.10) при вказаних вище значеннях ЕРС та K , можна переконатися, що вторинний струм небалансу за наявності підмагнічування завжди більший, ніж за його відсутності.

Первинний струм небалансу ТСНП типу ТНП-7, мА

$$\begin{aligned} I_{\text{нб.п}} &= \left(\frac{K \cdot I_{\text{нб.нес}}}{Z_{\text{с.нам}} + Z_p} + \frac{E_{\text{нб.підм}}}{Z_p} \right) \cdot \omega_B \left(1 + \frac{Z_p}{Z_{\text{с.нам}}} \right) = \\ &= \left(\frac{14 \cdot K}{10 + Z_p} + \frac{150}{Z_p} \right) \cdot 27 \cdot \left(1 + \frac{Z_p}{10} \right) = 27 \left(1,4 \cdot K + 15 + \frac{150}{Z_p} \right). \end{aligned}$$

Первинний струм спрацювання захисту

$$\begin{aligned} I_{\text{сз.п}} &\geq 1,2 \cdot \left[2 \cdot I_C + \frac{1,5 \cdot 27 \cdot \left(1,4 \cdot K + 15 + \frac{150}{Z_p} \right)}{1000} \right] = \\ &= 2,4 \cdot I_C + 0,05 \cdot \left(1,4 \cdot K + 15 + \frac{150}{Z_p} \right). \end{aligned}$$

Враховуючи реальний діапазон К, отримуємо:

– для ЕД з $U_{\text{ном}} = 6$ кВ:

$$I_{\text{сз.п}} \geq 2,4 \cdot I_C + (0,96 - 1,22) + \frac{7,5}{Z_p} \approx 2,4 \cdot I_C + 1,2 + \frac{7,5}{Z_p};$$

– для ЕД з $U_{\text{ном}} = 10$ кВ:

$$I_{\text{сз.п}} \geq 2,4 \cdot I_C + (0,95 - 1,11) + \frac{7,5}{Z_p} \approx 2,4 \cdot I_C + 1,1 + \frac{7,5}{Z_p}.$$

Граничні значення первинного струму спрацювання реле типу РТЗ-51, виходячи з його діапазону уставок, $0,02 \div 0,12$ А

$$I_{\text{сз.макс}} = I_{\text{ср.макс}} \cdot \omega_2 \left(1 + \frac{Z_p}{Z_{\text{е.нам}}} \right) = 0,12 \cdot 27 \cdot \left(1 + \frac{Z_p}{10} \right) = 0,32(10 + Z_p);$$

$$I_{\text{сз.мін}} = I_{\text{ср.мін}} \cdot \omega_2 \left(1 + \frac{Z_p}{Z_{\text{е.нам}}} \right) = 0,02 \cdot 27 \cdot \left(1 + \frac{Z_p}{10} \right) = 0,054(10 + Z_p).$$

Таким чином, маємо подвійну нерівність, яка визначає вимоги до опору Z_p вторинного кола ТСНП. Для ЕД з $U_{\text{ном}} = 6$ кВ

$$0,054 \cdot (10 + Z_p) \leq 2,4 \cdot I_C + 1,2 + \frac{7,5}{Z_p} \leq 0,32 \cdot (10 + Z_p). \quad (5.11)$$

Для ЕД з $U_{\text{ном}} = 10$ кВ

$$0,054 \cdot (10 + Z_p) \leq 2,4 \cdot I_C + 1,1 + \frac{7,5}{Z_p} \leq 0,32 \cdot (10 + Z_p). \quad (5.12)$$

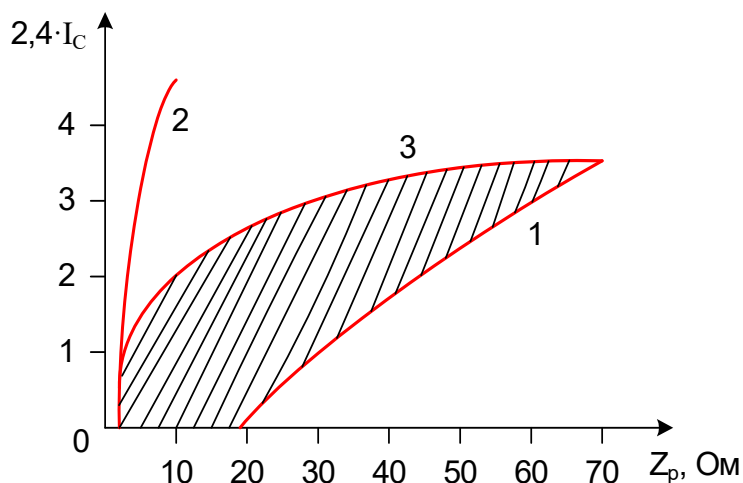
Нерівності (5.11) та (5.12) мають розв'язуватися спільно з нерівністю $I_{\text{сз.п}} \leq 4$ А, яка відповідає вимозі до чутливості захисту

$$\left. \begin{aligned} 2,4 \cdot I_C + 1,2 + \frac{7,5}{Z_p} &\leq 4; \\ 2,4 \cdot I_C + 1,1 + \frac{7,5}{Z_p} &\leq 4. \end{aligned} \right\} \quad (5.13)$$

Результатом спільного розв'язування (5.11) з (5.13) та (5.12) з (5.13) є заштрихована на рисунку 5.1 зона. Аналіз показує, що найкращі характеристики захисту забезпечуються при $Z_p \geq 10$ Ом.

У цьому випадку А, $I_{\text{сз.п}} \approx 2,4 \cdot I_C + 2$.

Мінімальний вхідний опір реле типу РТЗ-51 складає приблизно 1,0 Ом. Тому для використання цього реле спільно з ТСНП з підмагнічуванням потрібно додатково встановити у вторинне коло $R_{\text{дод}} \geq 9$ Ом.



1, 2 – криві, які відповідають нерівності (5.12);
3 – крива, що відповідає нерівності (5.13)

Рисунок 5.1 – До вибору додаткового опору в колі вторинної обмотки ТСНП для ЕД з $U_{\text{ном}} = 10$ кВ

Вибір уставок направленої струмового захисту нульової послідовності типу ЗЗП-1 здійснюється за первинним струмом [7]. Пристрій ЗЗП-1 має три уставки, на яких струм спрацювання захисту за первинним струму відповідно дорівнює:

- а) на уставці 1 – $0,07 \text{ А} \pm 30\%$;
- б) на уставці 2 – $0,5 \text{ А} \pm 30\%$;
- в) на уставці 3 – $2 \text{ А} \pm 30\%$.

Первинний струм спрацювання визначається, виходячи з вимоги забезпечення потрібного коефіцієнта чутливості

$$I_{\text{сз}} \leq \frac{I_{\text{сз}} - I_{\text{с}}}{K_{\text{ч}}},$$

де $K_{\text{ч}} = 2$ – коефіцієнт чутливості.

За отриманим значенням $I_{\text{сз}}$ приймається найближча менша уставка пристрою за струму $I_{\text{сз.min}}$, а потім перевіряється умова забезпечення $K_{\text{ч}} \geq 2$, виходячи з прийнятої уставки та 30% розкиду,

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{сз}} - I_{\text{с}}}{1,3 \cdot I_{\text{сз.min}}} \geq 2.$$

В мережах, де сумарний ємнісний струм великий, дозволяється загрузити захист за струмом спрацювання, якщо $K_{\text{ч}} \geq 2$.

Відмітимо, що умова $I_{сз.min} \leq 4 \text{ А}$, необхідна для того, щоб захист викивав однофазні замикання на корпус при небезпечному струмі 5 А, забезпечується автоматично, оскільки найгрубша уставка захисту дорівнює 2 А.

5.3 Розрахунок струмової відсічки

Визначення струму спрацювання $I_{сз}$ відсічки, яка діє миттєво, з часом дії $2 \div 3$ періоди промислової частоти потрібно здійснювати з урахуванням аперіодичної складової первинного струму та вільних аперіодичних складових струмів, що з'являються у вторинних колах ТС [1, 2, 4]. Практичний вибір $I_{сз}$ здійснюється, виходячи з діючих значень періодичної складової струму, який протікає в реле при пуску, самозапуску або зовнішньому КЗ. Наявність аперіодичних складових враховується відповідним вибором апробованого в експлуатації значення коефіцієнта налаштування $K_{нал}$ в розрахунковій формулі визначення струму спрацювання реле [7]

$$I_{спр} = K_{нал} \cdot K_{сх} \cdot I''_{max} / n_c, \quad (5.14)$$

де $K_{нал}$ – коефіцієнт налаштування, який враховує, крім аперіодичних складових у струмі реле при перехідних режимах, ще і похибки реле та потрібний запас;

$K_{сх}$ – коефіцієнт схеми, який враховує з'єднання ТС та реле;

n_c – коефіцієнт трансформації ТС;

I''_{max} – найбільше діюче значення періодичної складової струму зовнішнього трифазного металевого КЗ або струму, що протікає через ТС захисту в режимах самозапуску, пуску (при номінальній напрузі та ковзанні $S=1$) та при виведених пускових пристроях.

Значення $K_{нал}$ при виконанні струмової відсічки з реле РТ-40 приймається рівним $1,4 \div 1,5$ для АД та $1,7 \div 1,8$ для СД. Якщо відсічка здійснена на реле РТ-80 або РТМ, то $K_{нал} = 2$.

Для синхронних двигунів, що не підлягають самозапуску, визначальним за умовою неспрацювання відсічки є режим зовнішнього трифазного КЗ, при якому в місці встановлення захисту протікає струм,

$$I''_{max} = I_{к.д}^{(3)} = I''(0), \quad (5.15)$$

де $I_{к.д}^{(3)} = I''(0)$ визначається за виразами, наведеними в підрозділі 2.6 [7].

Для асинхронних двигунів, які не беруть участі в самозапуску, значення I''_{max} розраховується за виразом

$$I''_{max} = K_{П} I_{ном}, \quad (5.16)$$

де K_{Π} – кратність пускового струму при повному зникненні напруги на виводах ЕД;

$I_{\text{ном}}$ – номінальний струм АД.

Якщо в електрично зв'язаній мережі відсутні асинхронні двигуни, то для синхронних двигунів, які підлягають самозапуску, I''_{max} вважається таким, що дорівнює більшому з двох розрахункових значень: отриманому для режиму зовнішнього КЗ з (5.15) та за формулою

$$I''_{\text{max}} = I_{\text{нс.і}}, \quad (5.17)$$

для початкового моменту самозапуску (підрозділ 1.5 [7]).

Струм несинхронного увімкнення $I_{\text{нс.і}}$ для СД потужністю більше 2000 кВт, які не допускають прямий пуск від повної напруги мережі, не має перевищувати $I''(0)$. Тому для таких СД завжди приймається $I''_{\text{max}} = I''(0)$.

Для асинхронних двигунів, які самозапускаються за відсутності синхронних двигунів, розрахунковим для вибору уставки спрацювання відсічки може виявитися будь-який з трьох режимів: пуск, самозапуск, зовнішнє КЗ. Тому під час перерви живлення, що менша 0,5 с, значення I''_{max} , яке підставляється у формулу (5.14), має прийматися більшим з двох отриманих за (5.16) та (5.17). При перерві живлення, що більша 0,5 с, або у випадку, коли засобами автоматики (АВР) забезпечується увімкнення живлення після зниження напруги на виводах ЕД до $0,5U_{\text{ном}}$, режим самозапуску не є розрахунковим і I''_{max} визначається за (5.16).

При спільному самозапуску СД та АД значення I''_{max} приймається рівним більшому з розрахункових: для СД – за виразами (5.15) і (5.17), а для АД – за (5.16) і (5.17) з урахуванням ЕРС та напруг, які відповідають конкретним умовам роботи, і допустимих значень струму несинхронного увімкнення (рис. А.2).

Чутливість струмової відсічки визначається при металевому КЗ між двома фазами на лінійних виводах ЕД в умовах, які зумовлюють протікання найменшого струму в реле в мінімальному режимі роботи системи живлення [7]

$$K_{\text{ч.мін}} = \frac{I_{\text{к.мін}}^{(2)}}{I_{\text{спр}} \cdot n_{\text{с}}}, \quad (5.18)$$

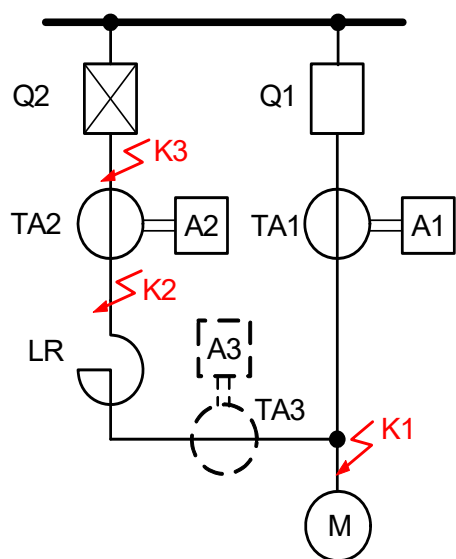
де $I_{\text{к.мін}}^{(2)}$ – періодична складова струму двофазного КЗ в початковий момент часу у вказаному режимі роботи.

При увімкненні реле на різницю струмів фаз А і С розрахунковим видом КЗ є двофазне між фазами А і В або В і С, коли реле обтікається струмом одної фази.

Значення $K_{\text{ч.мін}}$ може бути порядку двох або більше. Потрібно відмітити, що в тих випадках, коли чутливість струмової відсічки з реле РТ-40

виявляється недостатньою, може стати доцільним виконати відсічку на реле РНТ-565, яке має краще налаштування від аперіодичних складових у вторинному струмі ТС. Чутливість захисту при цьому підвищується за рахунок зниження $I_{спр}$, який розраховується за (5.14) при $K_{відс} = 1,3$.

Чутливість струмової відсічки ЕД з реакторним пуском (рис. 5.2) потрібно перевіряти і при двофазному КЗ на виводах пускового реактора LR (точка К2). Якщо значення мінімального коефіцієнта чутливості виявляється при цьому меншим двох, потрібно або зробити перехід на диференціальний струмовий захист (за наявності шістьох виводів обмотки статора), або встановити додатковий комплект А3 максимального струмового захисту, струм спрацювання якого вибирається таким же чином, як і комплекта А2 (підрозділ 5.6).



А1 – комплект струмової відсічки в колі основного живлення;
 А2, А3 – комплекти МСЗ в колі пускового реактора LR;
 М – електродвигун;
 Q1, Q2 – вимикачі;
 ТА1÷ТА3 – трансформатори струму

Рисунок 5.2 – До вибору уставок та розрахунку чутливості захистів електродвигунів з реакторним пуском

Коефіцієнт чутливості дешунтовних вимикальних електромагнітів або реле типу РТМ визначається за виразом [7]

$$K_{ч.д} = \frac{I_{к.мін}^{(2)} \cdot K_{сх} \cdot \left(1 - \frac{f_i}{100 \cdot K_{зап}}\right)}{m \cdot I_{ном.ТС}}, \quad (5.19)$$

де $I_{к.мін}^{(2)}$ – аналогічно виразу (5.18);

$K_{сх}$ – коефіцієнт схеми підключення дешунтовних реле або електромагнітів до ТС; для наведених схем, де ТС з'єднано за схемою неповної зірки, $K_{сх} = 1$;

f_i – дійсна струмова похибка ТС при первинному струмі $I_{к.мін}^{(2)}$ після дешунтування;

$K_{зап} = 1,2$ – коефіцієнт запаса, який враховує наближений характер визначення струмової похибки;

m – мінімальна кратність надійної роботи дешунтовного електромагніта або реле, яка визначається за кривими [7, рис. 6.3] для Z_{Σ} , визначеного за (5.22) або (5.23);

$I_{ном.ТС}$ – номінальний первинний струм ТС.

Величина f_i визначається по кривій рисунка 5.3 для коефіцієнта α , який знаходиться за виразом

$$\alpha = m_d / m_{50}; \quad (5.20)$$

$$m_d = I_{к.мін}^{(2)} / I_{ном.ТС}, \quad (5.21)$$

де m_{50} – кратність первинного струму при 50%-ій похибці ТС, яка визначається за кривими [7, рис. 6.5] при навантаженні Z_{Σ} на ТС після дешунтування, де:

– для схеми повної зірки

$$Z_{\Sigma} = r_{пр} + Z_p + Z_{ел} + R_{пер}; \quad (5.22)$$

– для схеми неповної зірки

$$Z_{\Sigma} = 2r_{пр} + Z_p + Z_{ел} + Z_{р.об.} + R_{пер}; \quad (5.23)$$

де $r_{пр}$ – активний опір з'єднувальних проводів (в один кінець);

Z_p – повний опір реле в фазному проводі найбільш завантаженої вторинної обмотки ТС;

$Z_{р.об.}$ – повний опір реле або інших апаратів (наприклад, вимірювальних приладів) в оберненому проводі;

$Z_{ел}$ – повний розрахунковий опір дешунтовного електромагніта або реле, приймається рівним $0,8Z_B$;

Z_B – повний опір електромагніта або реле при втягнутому осерді;

$R_{пер} = 0,1$ Ом – перехідний опір контактів та затискачів в колі ТС.

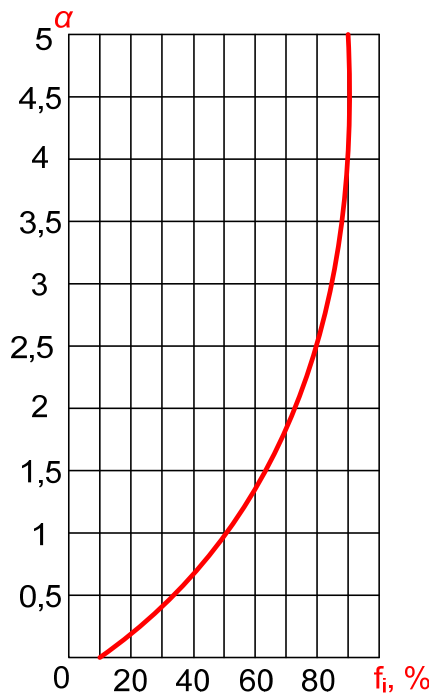


Рисунок 5.3 – Крива для визначення f_i

Приклад 1. Виконати розрахунок струмової відсічки ЕД типу СДНЗ-2-18-51-12 ($U_{\text{ном}} = 10$ кВ, $I_{\text{ном}} = 222$ А, $S_{\text{ном}} = 2310$ кВА, $x''_d = 0,177$, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,9$). Струм трифазного КЗ на шинях РУ, до якої підключено СД в мінімальному режимі роботи мережі живлення, складає $I_{\text{к.мін}}^{(3)} = 2$ кА. ЕД знаходиться в безпосередній близькості від РУ та не підлягає самозапуску. Коефіцієнт трансформації трансформаторів струму: $n_c = 400/5$. Для захисту використовується постійний оперативний струм.

Розв'язання

Визначаємо ЕРС

$$E_q'' = \sqrt{\cos^2 \varphi_{\text{ном}} + \left(\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{ном}}} + x_d''\right)^2} = \sqrt{0,9^2 + \left(\sqrt{1 - 0,9^2} + 0,177\right)^2} = 1,09.$$

Найбільше діюче значення періодичної складової струму, який протікає через ТС захисту в режимі зовнішнього металевого трифазного КЗ, становить

$$I_{\text{к.макс}}'' = I''(0) = \frac{E_q''}{x_d''} \cdot I_{\text{ном}} = \frac{1,09}{0,177} \cdot 222 = 1367 \text{ А.}$$

Розрахункове значення струму спрацювання реле захисту з (5.14)

$$I_{\text{спр.розр}} = K_{\text{нал}} \cdot K_{\text{сх}} \cdot \frac{I_{\text{макс}}''}{n_c} = 1,8 \cdot 1 \cdot \frac{1367}{400/5} = 30,1 \text{ А.}$$

Приймаємо $I_{\text{спр}} = 31 \text{ А}$. Для здійснення захисту вибираємо реле типу РТ-40/100 (з послідовним з'єднанням секцій обмоток реле).

Визначається чутливість захисту

$$K_{\text{ч. min}} = \frac{I_{\text{к. min}}^{(2)}}{I_{\text{спр}}} = \frac{0,87 \cdot I_{\text{к. min}}^{(3)}}{I_{\text{спр}} \cdot n_c} = \frac{0,87 \cdot 12000}{31 \cdot 400/5} = 4,21 > 2.$$

5.4 Розрахунок диференціального струмового захисту

Диференціальний струмовий захист електродвигуна виконується за допомогою реле типів РНТ-565 та ДЗТ-11.

Параметри захисту вибираються за умовою надійного неспрацювання його в режимах пуску, самозапуску і при зовнішніх КЗ.

Струм спрацювання реле типу РНТ-565

$$I_{\text{спр}} = K_{\text{нал}} \cdot I_{\text{нб}^* \text{розр}} \cdot I_{\text{max}}'' / n_c. \quad (5.24)$$

В реальних умовах на величину $K_{\text{нал}}$ впливають такі фактори [7, 9, 11]:

а) добуток $I_{\text{пит}} \cdot Z_{\text{пит}}$ більш завантаженого плеча в реальних умовах не відповідає $\varepsilon = 10\%$, а значно нижче його. При цьому струм небалансу може зменшитися в 1,5 раза, тобто $K_{\text{відс}}$ достатньо взяти 0,66;

б) внаслідок несприятливого поєднання залишкових індукцій в осердях ТС струм небалансу може збільшитися в 1,5 раза, при цьому $K_{\text{відс}}$ доцільно взяти 1,5.

Дія обох вказаних факторів взаємно компенсується, таким чином в (5.24) $K_{\text{нал}}$ можна припускати таким, що дорівнює одиниці. Однак, враховуючи можливі похибки реле, потрібно брати $K_{\text{відс}} = 1,1$.

Число витків робочої обмотки реле визначається виразом

$$\omega_{\text{р.розр}} = F_{\text{спр}} / I_{\text{спр}} = 100 / I_{\text{спр}}, \quad (5.25)$$

де $F_{\text{спр}} = 100 \text{ А}$ – МРС спрацювання реле типу РНТ-565.

Для встановлення на комутаторі реле вибирається ціле число витків $\omega_{\text{р}}$, що є найближчим меншим до $\omega_{\text{р.розр}}$.

Перевірка чутливості захисту здійснюється за тих же умов, що і для струмової відсічки, коли при двофазному КЗ на лінійних виводах обмотки статора в реле протікає найменший струм

$$I_{\text{р.к}} = I_{\text{к. min}}^{(2)} / n_c. \quad (5.26)$$

При цьому найменший коефіцієнт чутливості

$$K_{\text{ч. min}} = I_{\text{р.к}} \cdot \omega_{\text{р}} / 100 \geq 2. \quad (5.27)$$

У процесі виконання розрахунку доцільно дотримуватися певного порядку [7].

1. Спочатку визначається навантаження $Z_{2п}$ на ТС малонавантаженого плеча захисту з урахуванням місця їх встановлення та відстані до точки з'єднання в диференціальну схему. З урахуванням спрощень, зумовлених встановленням ТС і реле в КРУ,

$$Z_{2п} = \sqrt{(R_2 + R_{пер})^2 + X_2^2}, \quad (5.28)$$

де R_2 і X_2 – параметри вторинної обмотки ТС;

$R_{пер} = 0,1$ Ом.

2. Потім визначається добуток $I_{1пит} \cdot Z_{2пит}$ для того ж плеча

$$I_{1пит} \cdot Z_{2пит} = \frac{I''_{max}}{n_c} \cdot Z_{2п} \cdot \frac{1}{q \cdot \omega_2}, \quad (5.29)$$

і за кривою рисунка А.3 знаходиться значення $I_{нб*}$, яке відповідає $I_{1пит} \cdot Z_{2пит}$ і сталій часу згасання аперіодичної складової $T_a = 0,05$ с.

3. Визначається дійсне значення T_a , яке відповідає прийнятому розрахунковому режиму, за якого в первинному колі протікає струм I''_{max} ,

$$T_a = x_{\Sigma} / (\omega \cdot r_{\Sigma}),$$

де x_{Σ} та r_{Σ} – відповідно, індуктивний та активний опори кола, по якому протікає I''_{max} .

4. Уточнюється значення $I_{нб*}$, яке відповідає визначеному значенню T_a ,

$$I_{нб*розр} = I_{нб*} \cdot \gamma, \quad (5.30)$$

де γ – коефіцієнт, який визначається по рисунку 5.4.

5. Визначається струм спрацювання реле захисту за (5.24) і далі кількість витків робочої обмотки за (5.25). Потім за (5.27) перевіряється чутливість захисту.

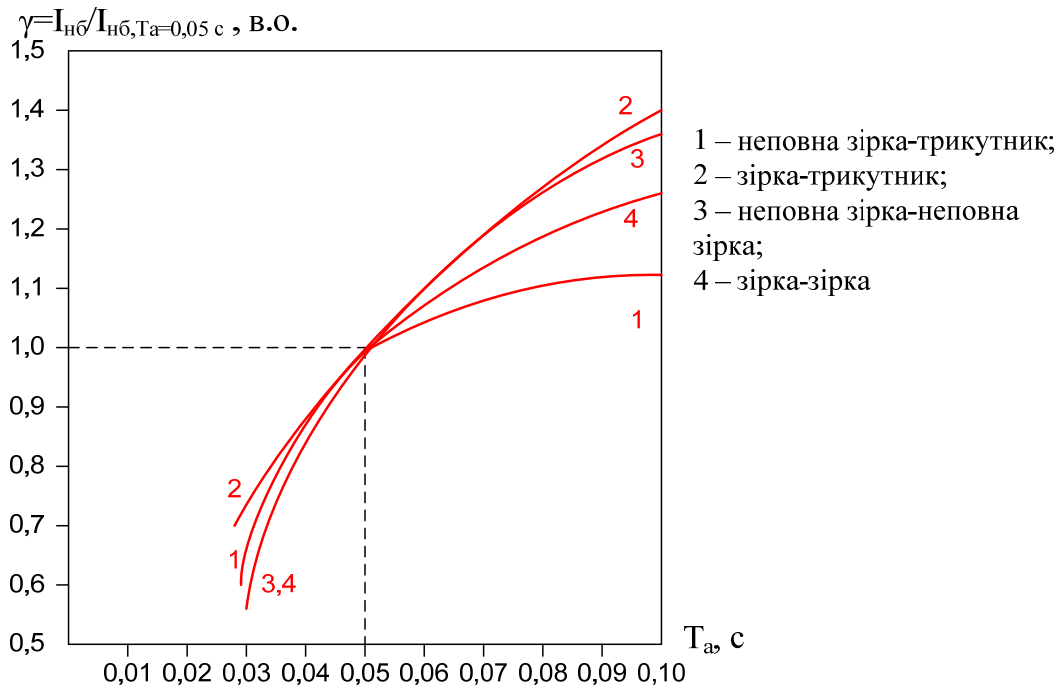


Рисунок 5.4 – Вплив на струм небалансу диференціального захисту постійної часу згасання аперіодичної складової

Приклад 2. Виконати розрахунок диференціального захисту АД типу АДТ-8000/6000 ($I_{ном} = 875 \text{ А}$, $K_{п} = 5,6$). Струм двофазного КЗ на шинах РУ, до яких підключено АД, становить в мінімальному режимі $I_{к.мін}^{(2)} = 12 \text{ кА}$. Захист прийнято в двофазному дворелейному виконанні на реле РНТ-565. Апаратура захисту та ТС сторони живлення встановлені в КРУ. ТС типу ТВЛМ-10 ($I_{номТС} = 1000 \text{ А}$, $I_{2ном} = 5 \text{ А}$, $n_c = 200$, осердя класу 10Р, переріз магнітопроводу $q = 12,4 \text{ см}^2$, число витків вторинної обмотки $\omega_2 = 199$, $R_2 = 0,27 \text{ Ом}$, $X_2 = 0$). Довжина мідного проводу ($\zeta = 0,0176 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$) від ТС до точки з'єднання в диференціальну схему $l = 2 \text{ м}$, переріз проводу – $2,5 \text{ мм}^2$. ЕД не підлягає самозапуску; $T_a = 0,05 \text{ с}$.

Розв'язання

Не враховуючи опір з'єднувальних проводів в КРУ, отримуємо опір вторинного кола ТС за (5.28)

$$Z_{2п} = \sqrt{(R_2 + R_{пер})^2 + X^2} = R_2 + R_{пер} = 0,27 + 0,1 = 0,37 \text{ Ом.}$$

Добуток $I_{1пит} \cdot Z_{2пит}$ згідно з (5.29) становить

$$\begin{aligned} I_{1пит} \cdot Z_{2пит} &= \frac{I_{max}''}{n_c} \cdot Z_{2п} \cdot \frac{1}{q \cdot \omega_2} = \frac{K_{п} \cdot I_{ном}}{n_c} \cdot Z_{2п} \cdot \frac{1}{q \cdot \omega_2} = \\ &= \frac{5,6 \cdot 875}{200} \cdot 0,37 \cdot \frac{1}{199 \cdot 12,4 \cdot 10^{-4}} = 37 \frac{\text{В}}{\text{м}^2 \cdot \text{ВИТОК}} \end{aligned}$$

Значення відносного струму небалансу по кривій рисунка А.3

$$I_{\text{нб}^*} = 0,37.$$

Оскільки $T_a = 0,05$ с, то $\gamma = 1,0$ і $I_{\text{нб}^*\text{розр}} = I_{\text{нб}^*}$. Таким чином, струм спрацювання реле типу РНТ-565, згідно з (5.24),

$$I_{\text{спр}} = K_{\text{нал}} \cdot I_{\text{нб}^*\text{розр}} \cdot I''_{\text{max}} / n_c = K_{\text{нал}} \cdot I_{\text{нб}^*\text{розр}} \cdot \frac{K_{\text{п}} \cdot I_{\text{ном}}}{n_c} = \frac{1,1 \cdot 0,37 \cdot 5,6 \cdot 875}{200} \approx 10 \text{ А.}$$

Число витків робочої обмотки реле за (5.25)

$$\omega_p = F_{\text{спр}} / I_{\text{спр}} = 100 / 10 = 10.$$

Чутливість захисту визначається за формулою (5.27)

$$K_{\text{ч. min}} = \frac{I_{\text{р.к}} \cdot \omega_p}{100} = \frac{I_{\text{к. min}}^{(2)} / n_c}{100} \cdot \omega_p = \frac{12000 \cdot 10}{200 \cdot 100} = 6 > 2.$$

Таким чином, захист задовольняє нормативні вимоги чутливості, однак захистоспроможність його невелика. Дійсно, струм спрацювання захисту складає, відносно номінального струму ЕД,

$$\frac{I_{\text{сз}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{F_{\text{спр}} / \omega_p}{I_{\text{ном}} / n_c} = \frac{100 / 10}{875 / 200} = 2,28,$$

що є недоліком даного захисту.

Розрахунок диференціального струмового захисту можна ще більше спростити, якщо при $T_a = 0,05$ с прийняти значення $I_{\text{нб}^*}$ максимальними, які відповідають добутку $I_{1\text{пит}} \cdot Z_{2\text{пит}} = 25 \div 50 \text{ В}/(\text{мм}^2 \cdot \text{виток})$, що є характерним практично для всіх ТС, які використовуються в КРУ.

У цьому випадку для схеми «неповна зірка–неповна зірка» можна вважати $I_{\text{нб}^*} = 0,37$, для схеми «зірка–зірка» $I_{\text{нб}^*} = 0,3$, для схеми «зірка–трикутник» $I_{\text{нб}^*} = 0,32$, а для схеми «неповна зірка–трикутник» $I_{\text{нб}^*} = 0,45$. Ці дані підтверджуються аналізом реальних уставок захистів на теплових електростанціях [7, 8].

Розрахунок диференціального захисту, який виконано з використанням реле типу ДЗТ-11, ведеться з урахуванням того, що обмотка гальмування реле підключена до ТС, встановлених на стороні нульових виводів обмотки статора. Таке ввімкнення доцільно, оскільки при розрахунковому КЗ на виводах ЕД гальмування практично не впливає на робочу МРС і таким чином забезпечується найкраща чутливість захисту.

Число витків диференціальної обмотки реле ω_d вибирається за умови надійного неспрацювання захисту в режимах пуску, самозапуску, зовніш-

нього КЗ або несинхронного ввімкнення СД, коли через ТС обох пліч захисту проходить струм I''_{\max} [7]

$$\omega_d \leq \frac{1}{K_{\text{відс}}} \cdot \frac{I_{\Gamma} \cdot \omega_{\Gamma}}{I_{\text{нб.розр}}} \cdot \text{tg}\alpha, \quad (5.31)$$

де $\omega_{\Gamma} = 24$ – число витків обмотки гальмування реле, яке береться таким, що дорівнює найбільш можливому значенню;

$K_{\text{нал}} = 1,5$ – коефіцієнт налаштування, який враховує помилку реле та необхідний запас;

$\text{tg}\alpha = 0,8$ – тангенс кута нахилу до осі абсцис дотичної, яка проведена з початку координат до характеристики спрацювання реле, що відповідає мінімальному гальмуванню;

I_{Γ} – струм гальмування;

$I_{\text{нб.розр}}$ – розрахункове значення струму небалансу, яке визначено з урахуванням неоднакового насичення ТС пліч, сталої часу T_a та реального опору диференціального кола.

Під диференціальною обмоткою реле тут розуміється з'єднані послідовно робоча та перша зрівнювальна обмотки реле типу ДЗТ-11 (рис. А.4, б).

Розрахункове значення струму небалансу визначається за виразом, який враховує, що опір диференціального кола відрізняється від нуля, а в плече захисту зі сторони нульових виводів статора ЕД увімкнена обмотка гальмування

$$I_{\text{нб.розр}} = \gamma \cdot I_{\text{нб}^*} \cdot \frac{I_{\text{нб}^*} \cdot Z_{2\text{нул}}}{n_c \cdot Z'_{2\text{нул}}}, \quad (5.32)$$

де $Z_{2\text{нул}} = \sqrt{(K \cdot R_{\text{пр.нул}} + R_2 + R_{\Gamma} + R_{\text{пер}})^2 + (X_2 + X_{\Gamma})^2}$ – опір найбільш завантаженого плеча захисту;

$R_{\text{пр.нул}} = \rho \cdot l_{\text{нул}} / q_{\text{нул}}$ – активний опір жили контрольного кабеля довжиною $l_{\text{нул}}$, м, і перерізом $q_{\text{нул}}$, мм², від ТС, що встановлені біля нульових виводів, до точки з'єднання в диференціальну схему;

ρ – питомий опір жили контрольного кабеля, Ом·мм²/м;

X_2, R_2 – відповідно, індуктивний та активний опори вторинної обмотки ТС;

X_{Γ}, R_{Γ} – відповідно, індуктивний та активний опори обмотки гальмування реле типу ДЗТ-11;

$R_{\text{пер}} = 0,1$ Ом – перехідний опір контактів;

$Z'_{2\text{нул}} = \sqrt{(K \cdot R_{\text{пр.нул}} + R_2 + R_{\Gamma} + R_{\text{пер}} + R_d)^2 + (X_2 + X_{\Gamma} + X_d)^2}$ – опір того ж плеча з урахуванням індуктивного X_d та активного R_d опорів диференціального кола.

Опори реле $R_d = R_r = 0,1$ Ом, а X_d та X_r визначаються за характеристиками споживання реле відповідно при $I_d = I_{нб*}/n_c$ та максимальному вторинному струмі $I_2 = I''_{max}/n_c$.

Значення струму гальмування I_Γ , яке входить у вираз (5.31), визначається, виходячи з умови, що між вторинним струмом ТС та струмом небалансу є кут зсуву, який дорівнює 90° , за виразом

$$I_\Gamma = I_{2нул} = \sqrt{\left(\frac{I''_{max}}{n_c}\right)^2 - I_{нб.розр}^2} \quad (5.33)$$

Початковий струм спрацювання захисту після визначення ω_d за (5.31) визначається за формулою

$$I_{сз0} = F_{спр0} \cdot n_c / \omega_d, \quad (5.34)$$

де $F_{спр0} = 100$ А – МРС реле типу ДЗТ-11 при відсутності гальмування. Відносне значення початкового струму спрацювання складає

$$I_{сз0*} = I_{сз0} / I_{ном} \quad (5.35)$$

Як правило, $I_{сз*}$ отримується близьким до одиниці, тому перевірка чутливості при розрахунковому двофазному КЗ на виводах ЕД не потрібна.

Розрахунок за виразами (5.31)÷(5.34) достатньо трудомісткий, хоча і дає результати, близькі до практичних. Спростити його можна, прийнявши, крім умови $I_{нб} = I_{нб,max}$, ще і припущення: $Z_{2нул} / Z'_{2нул} = 1$.

При вказаних припущеннях вираз (5.33) перетворюється у

$$\begin{aligned} I_\Gamma = I_{2нул} &= \sqrt{\left(\frac{I''_{max}}{n_c}\right)^2 - I_{нб.розр}^2} = \sqrt{\left(\frac{I''_{max}}{n_c}\right)^2 - \left(\frac{I''_{max}}{n_c}\right)^2 \cdot \gamma^2 \cdot I_{нб*max}^2} = \\ &= \frac{I''_{max}}{n_c} \cdot \sqrt{1 - \gamma^2 \cdot I_{нб*max}^2} \end{aligned} \quad (5.36)$$

З урахуванням (5.36) спрощується і розрахунок числа витків диференціальної обмотки за (5.31)

$$\begin{aligned} \omega_d &\leq \frac{1}{K_{нал}} \cdot \frac{I_\Gamma \cdot \omega_\Gamma}{I_{нб.розр}} \cdot \text{tg}\alpha = \frac{\omega_\Gamma \cdot \text{tg}\alpha \cdot \sqrt{1 - \gamma^2 \cdot I_{нб*max}^2}}{K_{нал} \cdot \gamma \cdot I_{нб*max}} = \\ &= \omega_\Gamma \cdot \frac{0,8 \cdot \sqrt{1 - \gamma^2 \cdot I_{нб*max}^2}}{1,5 \cdot \gamma \cdot I_{нб*max}} = n \cdot \omega_\Gamma = 24 \cdot n \end{aligned} \quad (5.37)$$

Значення n для різних схем з'єднання трансформаторів струму, постійних часу T_a , а також отриманого при цих n числа витків диференціальної обмотки реле ДЗТ-11 наведено в таблиці 5.3.

Як випливає з (5.37) спрощений метод не тільки полегшує визначення параметрів диференціального захисту ЕД, а й не потребує практично ніяких вихідних даних, зокрема щодо ТС та довжини з'єднувальних проводів. Відносний початковий струм спрацювання захисту, за потреби, можна знайти за (5.35).

Таблиця 5.3 – Значення n для різних схем з'єднання ТС

T_a, c	Зірка–зірка		Неповна зірка–неповна зірка		Неповна зірка–трикутник		Зірка–трикутник	
	n	ω_d	n	ω_d	n	ω_d	n	ω_d
0,10	1,25	30	0,86	20	0,92	22	1,02	24
0,05	1,68	40	1,33	32	1,05	25	1,57	37
0,03	2,99	69	2,47	59	1,88	45	2,36	56

Приклад 3. Визначити параметри спрацювання диференціального захисту, який виконано в двофазному дворелейному виконанні, що встановлено на СД типу СТД-6300-2 ($U_{ном} = 10$ кВ, $I_{ном} = 417$ А, $x''_d = 0,177$, $T_a = 0,085$ с), не підлягає самозапуску. Коефіцієнт трансформації ТС: $n_c = 600/5$.

З таблиці 5.3 для $T_a = 0,1$ с знаходимо $\omega_d = 20$.

Відносний початковий струм спрацювання захисту становить

$$I_{сз0*} = \frac{100}{20} \cdot \frac{600}{5} \cdot \frac{1}{417} = 1,44.$$

5.5 Розрахунок захисту лінії динамічного гальмування

Первинний струм спрацювання захисту вибирається за умовою налаштування від найбільшого значення струму статора ЕД при ввімкненні його на опір динамічного гальмування за виразом

$$I_{сз} = K_{нал} \cdot I_{д,мах}, \quad (5.38)$$

де $K_{нал} = 1,3$ – коефіцієнт налаштування;

$I_{д,мах}$ – найбільше значення струму статора ЕД в розглядуваному режимі, яке визначається за формулою

$$I_{д,г,мах} = \frac{E_q \cdot \sqrt{R_{с*}^2 + X_q^2}}{R_{с*}^2 + X_q \cdot X_d} \cdot I_{ном},$$

де E_q – ЕРС електродвигуна по поперечній осі, яка визначається за характеристикою холостого ходу при струмі збудження, який відповідає режиму динамічного гальмування, приймається рівною 1,2;

R_{c^*} – відносне значення активного опору кола динамічного гальмування, приймається рівним 0,4;

X_q, X_d – синхронні індуктивні опори електродвигуна, відповідно, по поперечній та повздовжній осях;

$I_{ном}$ – номінальний струм електродвигуна.

Приклад 4. Розрахувати захист лінії динамічного гальмування синхронного двигуна типу СДСЗ-19-59-16 ($U_{ном} = 10$ кВ, $I_{ном} = 460$ А, $x_d = 0,78$, $x_q = 0,56$, $R_{c^*} = 0,4$).

Найбільше значення струму статора в режимі динамічного гальмування

$$I_{д.мах} = \frac{E_q \sqrt{R_{c^*}^2 + X_q^2}}{R_{c^*}^2 + X_q \cdot X_d} \cdot I_{ном} = \frac{1,2 \cdot \sqrt{0,4^2 + 0,56^2}}{0,4^2 + 0,78 \cdot 0,56} \cdot 460 = 636,5 \text{ А.}$$

Струм спрацювання захисту

$$I_{сз} = K_{нал} \cdot I_{д.мах} = 1,3 \cdot 636,5 = 828 \text{ А.}$$

5.6 Розрахунок максимального струмового захисту в колі пускового реактора

Первинний струм спрацювання захисту, який встановлено на лінії пускового реактора, коли як захист від багатofазних замикань обмотки статора ЕД передбачена струмова відсічка, вибирається за умовою налаштування від пускового струму, з урахуванням опору реактора, за виразом [7]

$$I_{сз} \geq K_{нал} \cdot I_{п.р}, \quad (5.39)$$

де $K_{нал}$ – коефіцієнт налаштування за (5.14);

$I_{п.р}$ – найбільше діюче значення струму в місці встановлення захисту в режимі, який розглядається.

Чутливість захисту має бути перевірена при двофазному металевому КЗ поблизу лінійних виводів ЕД за виразом (5.18), значення $K_{ч.мін}$ має бути порядку двох або більше.

Якщо на ЕД передбачено диференціальний струмовий захист, то розрахунок струму спрацювання реле, які встановлено в плече цього захисту, за (5.39) може призвести до недостатньої чутливості максимального захисту до двофазних КЗ в зоні між пусковим вимикачем та його ТС.

Тому захист виводиться з дії на час пуску ЕД, а первинний струм спрацювання вибирається за умови забезпечення необхідної чутливості до КЗ у вказаній точці

$$I_{сз} \leq I_{к.мін}^{(2)} / K_{ч.мін}, \quad (5.40)$$

де $I_{к.мін}^{(2)}$ – струм у місці встановлення захисту в розглядуваному режимі;
 $K_{ч.мін} = 2$ – мінімальний коефіцієнт чутливості.

5.7 Розрахунок захисту від струмів перевантаження

Струм спрацювання реле МСЗ від перевантаження вибирається за виразом

$$I_{спр} = \frac{K_{нал} \cdot K_{сх} \cdot I_{ном}}{K_{пов} \cdot n_c}, \quad (5.41)$$

де $K_{нал}$ – коефіцієнт налаштування, який враховує помилку реле та необхідний запас, вибирається 1,05 при дії захисту на сигнал та 1,1÷1,2 при дії на вимикання;

$K_{сх}$ – коефіцієнт схеми, який враховує з'єднання ТС та реле;

$K_{пов}$ – коефіцієнт повернення реле, який вибирається 0,8 для реле серії РТ-80 та 0,85 для реле серії РТ-40;

$I_{ном}$ – номінальний струм ЕД;

n_c – коефіцієнт трансформації ТС.

Витримка часу захисту від перевантаження вибирається за умови надійного неспрацювання захисту при пуску або самозапуску ЕД за виразом

$$t_{сз} \geq K'_{нал} \cdot t_{п}, \quad (5.42)$$

де $K'_{нал} = 1,2 \div 1,3$ – коефіцієнт налаштування;

$t_{п}$ – час пуску для ЕД, які не підлягають самозапуску, або час самозапуску для ЕД, що самозапускаються.

Вибраний за (5.42) час спрацювання, у випадку виконання захисту з реле серії РТ-80, є часом спрацювання реле в незалежній частині його часо-струмової характеристики.

Струм спрацювання реле струмового захисту, який призначено для дії при заклинюванні механізму, вибирається за умови надійної дії захисту при зупинці ЕД, коли по обмотці статора протікає струм $I_3 \geq I_{п}$, за виразом

$$I_{сз} \leq I_{п} / K_{нал}, \quad (5.43)$$

де $K_{нал} = 1,5$ – коефіцієнт надійності спрацювання.

Витримка часу цього захисту при встановленні його на СД приймається на ступінь селективності більшою часу вимикання КЗ в мережі, де в місці встановлення захисту протікає струм $I \geq I_{сз}$. При встановленні захисту на АД час спрацювання захисту приймається для налаштування від перехідного процесу при зовнішніх КЗ біля $t = 0,5$ с.

5.8 Розрахунок захисту від асинхронного режиму

Струм спрацювання реле максимального струмового захисту (див. рис. 1.2 та 4.5) вибирається за виразом (5.41) з урахуванням $K_{відс} = 1,1 \div 1,2$.

Час дії ступеня захисту, що спрацьовує на переведення синхронного двигуна в асинхронний режим без збудження та розвантаження механізму, приймається на ступінь селективності більшим часу вимикання КЗ в мережі, що супроводжується протіканням в місці встановлення захисту струму $I \geq I_{сз}$, але не менше 1,5 с. Час дії ступеня захисту, що спрацьовує на вимикання, визначається за (5.42).

Час повернення проміжного реле, яке забезпечує стійку дію захисту при коливаннях струму статора в асинхронному режимі, береться найбільш можливим для цього типу реле (РП-252): $t_{пов} = 1,1 \div 1,4$ с.

Уставка спрацювання реле, яка реагує на зниження струму збудження ЕД:

$$I_{спр.р} = (1,3 \div 1,5) \cdot I_{f_0},$$

де I_{f_0} – струм збудження при холостому ході та номінальній напрузі.

5.9 Розрахунок захисту від втрати живлення

Для правильного вибору уставок спрацювання захисту від втрати живлення мають бути ретельно проаналізовані всі можливі режими, які призводять до короткочасних або тривалих зниженнях напруги та до перерв в електропостачанні всього вузла навантаження, де є захищені електродвигуни. Відносно кожного двигуна потрібно вирішити, чи має він вимикатися при втраті живлення або в процесі самозапуску, і якщо має, то коли та з якою витримкою часу. З цією метою доцільно розділити ЕД на групи за ступенем відповідальності механізмів, за їх можливістю брати участь в самозапуску після відновлення живлення. Приблизний перелік таких груп асинхронних двигунів та розрахункові формули для визначення параметрів спрацювання захисту мінімальної напруги для вузла навантаження, в якому відсутні синхронні двигуни, наведено в таблиці 5.4.

З урахуванням того, що для захисту використовуються реле напруги типу РН-54/160, уставка реле, яка визначається за виразом $U_{спр} = U_{сз} / n_n$, не може бути менше 40 В.

У вузлах навантаження, де є синхронні двигуни, в доповнення до захисту мінімальної напруги передбачається захист мінімальної частоти з блокуванням за направленням потужності. Частота спрацювання мінімального реле частоти вибирається за умови налаштування від найменшого можливого в нормальному режимі значення частоти в енергосистемі. За відсутності таких даних $f_{\text{спр}}$ приймається рівною приблизно 48,5÷49 Гц.

Витримка часу захисту мінімальної частоти при встановленні її на перших ступенях системи електропостачання може бути вибрана рівною 0,3÷0,5 с за умови неспрацювання захисту при короточасних зниженнях частоти під час КЗ, коли дія захисту не потрібна.

На розподільчих підстанціях та пунктах 6÷10 кВ час дії захисту залежить від можливості та допустимості самозапуску ЕД і має бути узгоджений з порядком та часовими характеристиками роботи автоматики (АВР, АПВ).

Таблиця 5.4 – Перелік груп асинхронних двигунів та розрахункові формули для визначення параметрів спрацювання захисту мінімальної напруги

Основна ознака групи ЕД	Умови вибору параметрів спрацювання	Розрахунок первинної напруги спрацювання	Розрахунок часу спрацювання
Самозапуск передбачається та забезпечується при будь-яких реальних режимах втрати живлення (час перерви живлення $t_{\text{п.ж.}}$)	Неспрацювання в умовах зниженої напруги при самозапуску $U_{\text{сзп}}$; вимикання ЕД за умовою техніки безпеки при тривалому зниженні напруги	$U_{\text{сз}} \leq \frac{U_{\text{сзп}}}{K_{\text{пов}} \cdot K_{\text{нал}}}$ $K_{\text{нал}} = 1,2$ $K_{\text{пов}} = 1,25$	$t > t_{\text{п.ж.}}$
Самозапуск неможливий за умовами технології при будь-яких перервах живлення тривалістю більше $t_{\text{п.ж.}}$ та зниженні напруги до $0,7U_{\text{ном}}$	Вимикання ЕД при $U \leq 0,7U_{\text{ном}}$ до настання само запуску	$U_{\text{сз}} = 0,7U_{\text{ном}}$	$t < t_{\text{п.ж.}}$
Самозапуск після вимикання КЗ поблизу двигунів з часом $t_{\text{к}}$ можливий і забезпечується, а після перерв в електропостачанні тривалістю $t \geq t_{\text{п.ж.}}$ не забезпечується або не передбачається	Неспрацювання в умовах зниженої напруги $U_{\text{сзп.к}}$ при самозапуску після вимикання КЗ; вимикання ЕД до настання самозапуску після перерви в електропостачанні тривалістю $t > t_{\text{п.ж.}}$	$U_{\text{сз}} \leq \frac{U_{\text{сзп.к}}}{K_{\text{пов}} \cdot K_{\text{нал}}}$ $K_{\text{нал}} = 1,2$ $K_{\text{пов}} = 1,25$	$t_{\text{к}} < t < t_{\text{п.ж.}}$

6 РОЗРОБКИ ПРИСТРОЇВ ЗАХИСТУ ДВИГУНІВ

6.1 Загальні положення

Електродвигуни напругою вище 1 кВ обладнуються комплектами релейного захисту від пошкоджень та аномальних режимів, які виконуються на основі окремих електромеханічних, напівпровідникових та мікропроцесорних реле. Електромеханічні реле чутливі до вібрації та тряски, мають в умовах запиленості, хімічно активного середовища та інших факторів відносно малий термін служби. Комплекти захистів нечутливі до неповнофазних режимів та виткових замикань, а реле захисту від перевантаження недостатньо точно відображають процеси нагріву та охолодження ЕД [4]. Тому різними організаціями проводяться роботи стосовно застосування напівпровідникових та мікропроцесорних приладів для створення більш досконалих комплектних пристроїв РЗА [5, 6, 14].

Була розроблена серія вимірювальних та логічних органів для КРУ та КРУЗ на мікроінтегральній основі, які об'єднано загальною назвою ЯРЭ2201. Залежно від характеру об'єкта захисту розрізняють комплекти ЯРЭ для двигуна, трансформатора, повітряної або кабельної лінії. При цьому габарити та маса пристроїв захисту суттєво знижуються, спрощується їх обслуговування та налагоджування.

Комплекти ЯРЭ2201 дозволяють забезпечити захист електродвигунів напругою вище 1 кВ з номінальною потужністю до 5000 кВт і вище від КЗ (струмова відсічка або диференціальний захист), від замикань на землю в колі статора (струмовий ненаправлений або направлений захист нульової послідовності), від перевантаження (струмовий орган з залежною витримкою часу) та асинхронного режиму, який суміщується з захистом від перевантаження.

Зараз в зв'язку з удосконаленням елементної бази намітилася тенденція до розробки та використання спеціалізованих комплектів РЗ окремих об'єктів (турбогенераторів єдиної серії, трансформаторів, блоків генератор-трансформатор тощо). Це пояснюється прагненням здійснити більш ефективний захист силового електрообладнання з більш точним врахуванням його перевантажувальних характеристик та режимів роботи.

Потрібно також відмітити, що за кордоном отримують розповсюдження комплектні пристрої захисту ЕД. Можна навести приклад фірми «Brown Boveri», яка випускає статичні реле захисту двигунів. До складу таких комплектів входять: струмова відсічка, захист від затягування пуску, захист від перевантаження, захист від несиметричних режимів і захист від замикання на землю. Для захисту потужних ЕД використовується комплект з диференціального захисту, комбінованого захисту від понадструмів, перевантаження та несиметричних режимів, а також захисту від замикань на землю і мінімальної напруги.

6.2 Структурна схема комплектного пристрою захисту електродвигунів

Основні анормальні та аварійні режими роботи електричних двигунів наведено в таблиці 6.1, з якої зрозуміло, що практика побудови системи релейного захисту ЕД не враховує можливості появи низки режимів, наслідком яких може бути пошкодження активної сталі: недозбудження та перезбудження СД, а також відхилення частоти. Не враховується також процес старіння ізоляції та, внаслідок цього, скорочення ресурсу ЕД. Не вирішено питання із захистом від замикання елементарних провідників обмотки статора, виткових замикань обмотки збудження, пошкодження демпферного контуру СД або короткозамкненого контуру ротора АД. Заслуговує уваги режим перенапруги. Міжнародна практика свідчить про пошкодження ізоляції при вимиканнях ЕД. У цьому випадку ефективно використання розрядників на виводах ЕД та вимикачів з шунтувальними резисторами. В деяких випадках може бути доцільним застосування захисту від підвищення напруги.

Таблиця 6.1 – Основні анормальні та аварійні режими роботи ЕД

Режим	Ефективно діють захисти	Примітка
1. Пуск ЕД 1.1. Заклинування ротора 1.2. Затягнутий пуск	– Від перевантаження	Потрібна розробка захисту від заклинювання ротора –
2. Неуспішний самозапуск	Від перевантаження	–
3. Перевантаження симетричне 3.1. Тривале 3.2. Короткочасне	Стумовий Стумовий з залежною витримкою часу	– –
4. Асинхронний режим 4.1. Без втрати збудження 4.2. З втратою збудження	– З контролем струму збудження	Вимагається спеціальний захист –
5. Несиметрія напруги живлення 5.1. Повнофазний режим 5.2. Неповнофазний режим 5.3. Несиметрія опорів ЕД	– – –	– Потрібно використовувати захист від несиметрії –
6. Втрата живлення	Мінімальної напруги (з контролем частоти або без цього)	–
7. Відхилення напруги 7.1. Перенапруги 7.2. Підвищення напруги 7.3. Зниження напруги	– Максимальної напруги Мінімальної напруги	Розрядники на виводах ЕД, вимикачі з шунтувальними резисторами – –

Продовження таблиці 6.1

Режим	Ефективно діють захисти	Примітка
8. Перезбудження СД	–	Режими 8,9 не враховуються
9. Недозбудження СД	–	
10. Відхилення частоти 10.1. Підвищення частоти 10.2. Зниження частоти	– –	Режим 10 контролює енергосистема живлення
11. Перевантаження несиметричне 11.1. Тривале 11.2. Короткочасне	– –	Потрібно використовувати захист від несиметрії за струмом Потрібно використовувати захист від несиметрії з залежною витримкою часу
12. Замикання на землю в колі статора 12.1. На виводах 12.2. Усередині ЕД	Струмівий захист нульової послідовності (направлений або ненаправлений) –	– Доцільно використовувати накладений струм або гармоніки напруги
13. Міжфазні КЗ усередині ЕД або на затискачах	Диференціальний захист При КЗ на затискачах і поблизу від виводів – струмова відсічка	– –
14. Виткові КЗ в ЕД	–	Потрібно використовувати захист від несиметрії за струмом
15. Подвійні замикання на землю	–	Потрібно використовувати захист від несиметрії за струмом
16. Зовнішнє КЗ	Захист мережі живлення, резервування – захист від перевантаження	–
17. Пошкодження активної сталі статора	–	Режим не враховується
18. Замикання елементарних провідників обмотки статора	–	Режим не враховується
19. Старіння ізоляції	–	Режим не враховується
20. Пошкодження кіл ротора 20.1. Замикання обмотки збудження на землю (корпус) 20.2. Замикання витків обмотки збудження 20.3. Пошкодження демпферного контура СД або короткозамкненого контура ротора АД	Від замикання обмотки збудження на землю – –	– Режим не враховується Режим не враховується
21. Перевантаження обмотки збудження СД	Захист обмотки збудження від перевантаження	–

Укомплектування високовольтних електродвигунів пристроями захисту визначається номінальною потужністю. При $P_{\text{ном}} > 5000$ кВт, згідно з ПУЕ двигун має мати диференціальний захист, а при меншій потужності основним захистом від КЗ є струмова відсічка. Встановлення диференціального захисту рекомендується і при меншій потужності, якщо ЕД має нульові виводи. Тому вибір структурних схем комплектних пристроїв захисту здійснюється для двох варіантів виконання ЕД: без нульових виводів та з нульовими виводами. При цьому припускається, що захист кіл збудження розташовується в пристрої збудження.

В таблиці 6.2 наводиться вибір структурної схеми захисту ЕД, який не має нульових виводів. Символ «0» означає недію захисту, «1» – його спрацювання, «1/0» – можливість спрацювання та неспрацювання. В останній колонці таблиці вказано умови, при яких забезпечується селективність дії захисту та виявлення причини вимикання ЕД.

Аналіз даних таблиці 6.2 показує, що для підвищення чутливості струмової відсічки та захисту від несиметричного режиму можна використовувати їх загрублення в режимі пуску та самозапуску, що здійснюється пусковим органом захисту від АР. Завдяки цьому уставка струмової відсічки вибирається за струмом зовнішнього КЗ (унеможливорюється умова налаштування від струму самозапуску). Захист від несиметричного режиму автоматично налаштовується від несиметрії струмів статора СД при пуску, яка зумовлена магнітною несиметрією ротора.

Заклинювання ротора та затягнутий пуск щодо дії захистів, які наведено в таблиці 6.2, еквівалентні, і для більш швидкого вимикання СД при пуску з заклиненим ротором потрібна додаткова інформація (частота обертання ротора, аналіз форми струму статора тощо). Недія захисту від перевантаження в умовах нормального пуску, а також захисту від АР забезпечується вибором витримки часу [7]

$$t_n < D_{2.2}(t), D_{4.1}(t), D_{4.2}(t),$$

де t_n – тривалість нормального пуску;

$D_n(t)$ – витримка часу n -го захисту.

Несиметричні режими виникають з різних причин. До них належать: несиметрія напруги живлення, зокрема і неповнофазний режим, несиметричні КЗ (міжфазні та виткові), несиметрія опорів фаз статора ЕД. Несиметрія струмів і напруг в колах захисту виникає також при обриві вторинних кіл захисту. В таблиці 6.2 наведено, що для забезпечення швидкодії, чутливості та селективності вимикання й сигналізації про причину вимикання ЕД можна використовувати такі ознаки [7,8]:

1) ввести до складу захисту три органи виявлення несиметричних режимів: за струмом з високою чутливістю (для знаходження виткових КЗ) орган РНТ, за струмом з низькою чутливістю (для виявлення неповнофазного режиму) орган РОФ і за напругою (для забезпечення гальмування захисту від виткових КЗ і для захисту від несиметрії за напругою);

Таблиця 6.2 – Вибір структурної схеми захисту електродвигуна, який не має нульових виводів

Режим роботи ЕД або його захисту	Діють захисти										Мають діяти захисти	Умова забезпечення селективності дії захистів та сигналізації про причину вимикання ЕД або несправності захисту
	1	2.1	2.2	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	5	6		
0.0. Нормальний режим	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–	–
1.0. Успішний пуск	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	–	$t_n < D_{2.2}(t), D_{4.1}(t), D_{4.2}(t)$
1.1. Заклинування ротора	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	2.2	$D_{2.2}(t) < D_{4.2}(t), D_{4.1}(t)$
1.2. Затягнутий пуск	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	2.2	$D_{2.2}(t) < D_{4.2}(t), D_{4.1}(t)$
2.0. Успішний самозапуск	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	–	$t_{сз} < D_{2.2}(t), D_{4.2}(t), D_{4.1}(t)$
2.1. Неуспішний самозапуск	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	2.2	$D_{2.2}(t) < D_{4.2}(t), D_{4.1}(t)$
3.1. Перевантаження симетричне тривале	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2.2	$t_{пер} > D_{2.2}(t)$
3.2. Перевантаження симетричне короткочасне	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2.2	$I_{сп}^2 \cdot t_{сп} < I^2 \cdot t_{пер}$
4.1. Асинхронний режим без втрати збудження	1/0	1	1/0	1	0	0	1	0	0	0	4.1	$L_a = 4.1 \cap \overline{4.2}$
4.2. Асинхронний режим з втратою збудження	0	1	1/0	1	0	0	1	1	0	0	4.1, 4.2	$L_a = 4.1 \cap 4.2$
5.1. Несиметрія напруги	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	3.3	$L_{HH} = 3.1 \cap 3.3$
5.2. Неповнофазний режим	0	1/0	1/0	1	1	1/0	0	0	0	0	3.2	$Q = 3.1 \cap \overline{3.2} + 3.2 \cap 2.1$ $D_{2.2}(t) > D_{3.2}(t)$
5.3. Несиметрія опорів ЕД	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3.1	$L = 3.1 \cap 3.2 \cap \overline{3.3}$
6. Втрата живлення	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	5	$L_{II,II} = 5 \cap \overline{3.3}$
7.3. Зниження напруги	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	5	$L = 5 \cap \overline{3.3}$
12. Замикання на землю в колі статора	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	$Q = 6$
13. Міжфазні КЗ	1	1	1	1	1/0	1/0	1/0	0	1/0	0	1	$Q = 1$
14. Виткові КЗ	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3.1	$L_B = 3.1 \cap \overline{3.2}$
15. Подвійні замикання на землю	1/0	1/0	1/0	1	1	1/0	0	0	0	1	6	$Q = 1 \cup (3.2 \cap 2.1) \cup 6$
16. Зовнішні КЗ	0	1/0	1/0	1	1/0	1/0	0	0	1/0	0	–	$t_{вим} < D_{3.2}(t)$
22. Обрив вторинних струмових кіл	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	–	$L_{TC} = 3.1 \cap 2.1$
23. Обрив вторинних кіл напруги	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	–	$L_{TH} = 3.3 \cap \overline{2.1}$

Примітка. Прийнято такі умовні номери захистів:

1 – струмова відсічка; 2.1 – реле струму з уставкою $1, I_{д,ном}$; 2.2 – реле струму з залежною витримкою часу; 3.1 – захист від несиметрії за струмом з уставкою, яка визначається тривалою несиметрією; 3.2 – захист від неповнофазного режиму; 3.3 – контроль несиметрії за напругою; 4.1 – захист від асинхронного режиму без втрати збудження; 4.2 – захист від АР з втратою збудження; 5 – захист від втрати живлення; 6 – захист від замикань на землю.

2) використовувати логічні зв'язки між окремими захистами з метою селективної сигналізації про причини вимикання ЕД та блокувань захистів при обриві вторинних кіл струму та напруги.

При цьому вимикання ЕД при обриві фази статора здійснюється, якщо виконується умова

$$Q = 3.2 \cap 2.1,$$

де 3.2, 2.1 – відповідно логічні вихідні сигнали елементів 3.2 та 2.1.

Кола селективної сигналізації при обриві фази та обриві вторинних струмових кіл виконуються згідно з виразами

$$L_{o.ф.} = 3.2 \cap 2.1;$$

$$L_{c.к.} = 3.2 \cap 2.1,$$

де $L_{o.ф.}$ – сигнал про обрив фази;

$L_{c.к.}$ – сигнал про обрив вторинних струмових кіл.

Оскільки одночасний збіг двох режимів, обриву фази та виткового замикання, малоімовірний, то сигналізацію про виткове замикання можна забезпечити при виконанні умови

$$L_{в.з.} = 3.1 \cap \overline{3.2}.$$

Доцільно вводити заборону (блокування) на спрацювання елемента 3.1 при спрацюванні елемента 3.2, тобто

$$Q = 3.1 \cap 3.2$$

і вживати додаткових заходів з підвищення селективності – вибрати витримку часу спрацювання РВЗ $D_{3.1}(t)$ та РОФ $D_{3.2}(t)$, тобто $D_{3.1}(t) < D_{3.2}(t) < D_{2.2}(t) > t_{п.}$

Таблиця 6.2 дозволяє побудувати структурну схему комплексного захисту (рис. 6.1). При цьому кола вимикання описуються логічною формулою

$$\overline{Q} = PO \cup (PNT \cap \overline{POF}) \cup (POF \cap PP) \cup ZAP \cup ZZZ \cup (ZPP \cap \overline{PNN}), \quad (6.1)$$

де \cup – логічна операція «АБО»;

\cap – логічна операція «І»;

РО, РП, РНТ, РОФ, ЗАР, ЗЗЗ, ЗПП – сигнали про спрацювання окремих реле.

Отримані вирази покладено в основу побудови структурної схеми комплексного захисту ЕД типу ЗРКД1 [7].

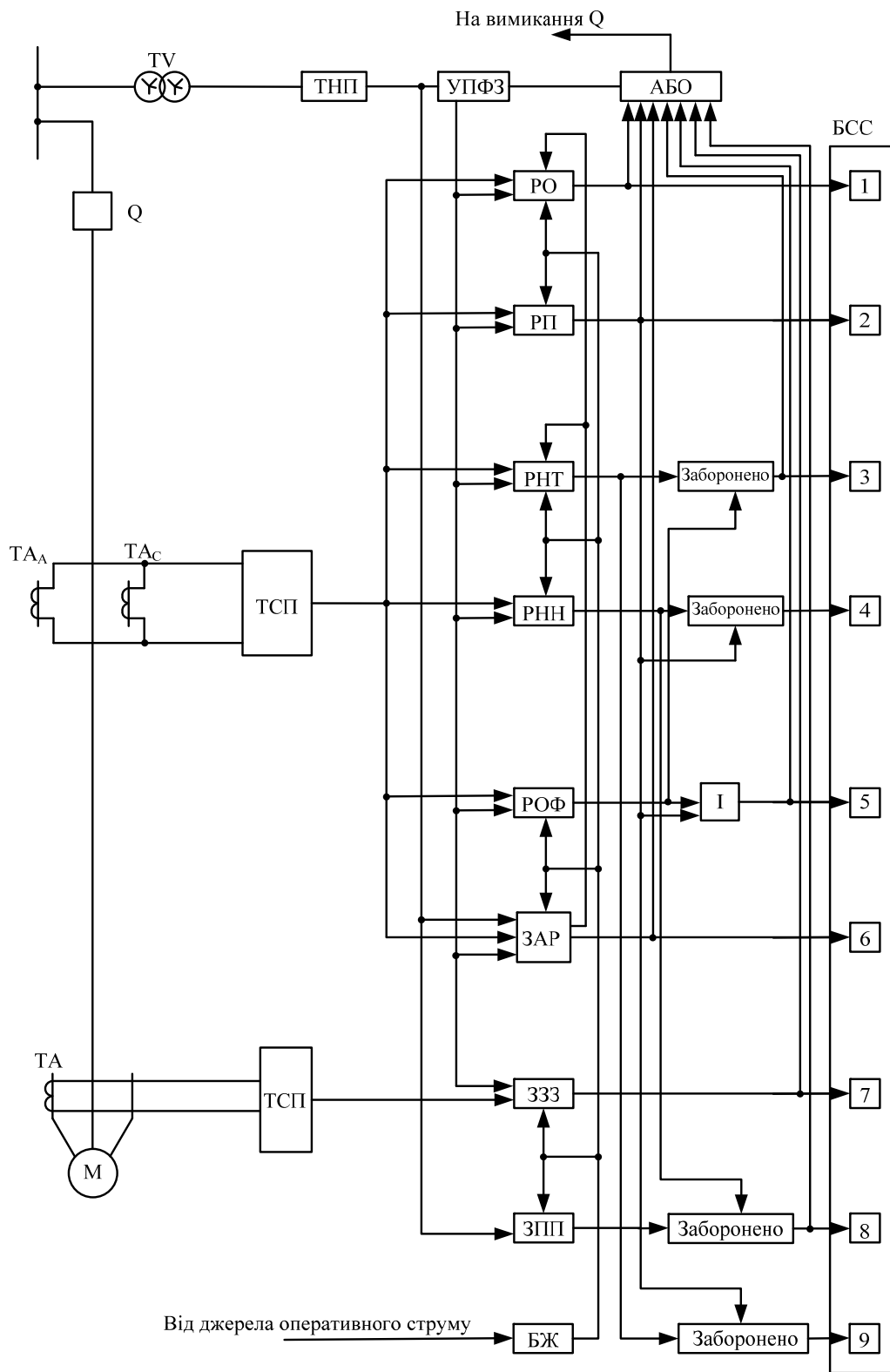


Рисунок 6.1 – Структурна схема комплексного захисту електродвигуна номінальною потужністю до 5000 кВт

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

До розділу 1

1. Як здійснюється захист СД від асинхронного режиму?
2. Як виконується захист СД від асинхронного режиму, який реагує на збільшення струму статора?
3. Як виконується захист СД від асинхронного режиму, який реагує на втрату збудження?
4. Як виконується захист СД від асинхронного режиму, який реагує на появу змінної складової в струмі збудження?
5. Як виконується захист СД від асинхронного режиму, який реагує на зміну фазового кута?
6. Як виконується захист СД від асинхронного режиму, який реагує на зміну внутрішнього кута δ ?

До розділу 2

1. Як виконується захист від втрати живлення ЕД?
2. Як виконується захист мінімальної напруги?
3. Як виконується захист мінімальної напруги та мінімальної частоти з блокуванням за направленням потужності?
4. Наведіть схему одноступінчастого групового захисту мінімальної напруги.
5. Наведіть схему групового ЗМН з одною уставкою за напругою та двома – за часом спрацювання.
6. Наведіть схему групового ЗМН з двома уставками за напругою та часом спрацювання.
7. Наведіть схему групового ЗМН з використанням реле типу РНФ-1М.

До розділу 3

1. Як виконується захист від несиметричних режимів та виткових замикань ЕД?
2. На які групи розділяються захисти від виткових замикань в ЕД?
3. Як працює максимальний струмовий фільтровий захист типу МТФЗ?
4. Проведіть аналіз принципів захистів ЕД від виткових замикань в обмотці статора.
5. Наведіть структурну схему захисту ЕД від несиметричного режиму.

До розділу 4

1. Які загальні вимоги висуваються до схем захисту ЕД?
2. Наведіть схему захисту АД номінальною потужністю менше 2000 кВт.
3. Наведіть схему захисту АД номінальною потужністю менше 5000 кВт.

4. Як виконуються схеми захисту двошвидкісних АД номінальною потужністю менше 5000 кВт?
5. Як виконується схема захисту АД номінальною потужністю менше 5000 кВт з розвантаженням перед самозапуском?
6. Як виконується схема захисту СД номінальною потужністю менше 5000 кВт?
7. Як виконується схема захисту СД номінальною потужністю менше 5000 кВт з реакторним пуском?
8. Як виконується схема захисту СД номінальною потужністю більше 5000 кВт з реакторним пуском?
9. Як виконується схема захисту СД номінальною потужністю більше 5000 кВт з різкозмінним навантаженням на валу та динамічним гальмуванням?
10. Як виконуються схеми захисту ЕД на змінному оперативному струмі?

До розділу 5

1. Які загальні вимоги покладено в методики вибору уставок захистів ЕД?
2. Як розраховуються уставки спрацювання захисту від замикань на землю обмотки статора ЕД?
3. Як розраховуються уставки спрацювання струмової відсічки ЕД?
4. Як розраховуються уставки спрацювання диференціального захисту ЕД?
5. Як розраховуються уставки спрацювання захисту лінії динамічного гальмування?
6. Як розраховуються уставки спрацювання МСЗ в колі пускового реактора ЕД?
7. Як розраховуються уставки спрацювання захисту від перевантаження ЕД?
8. Як розраховуються уставки спрацювання захисту від АР?
9. Як розраховуються уставки спрацювання захисту від втрати живлення?

До розділу 6

1. Які нові розробки релейного захисту ЕД Вам відомі?
2. Назвіть, які основні анормальні та аварійні режими роботи ЕД Вам відомі та які релейні захисти потрібні для ліквідації недоліків існуючих нині захистів?
3. Як здійснюється вибір структурної схеми захисту ЕД?
4. Наведіть схему комплексного захисту ЕД номінальною потужністю до 5000 кВт типу ЗРКД1.

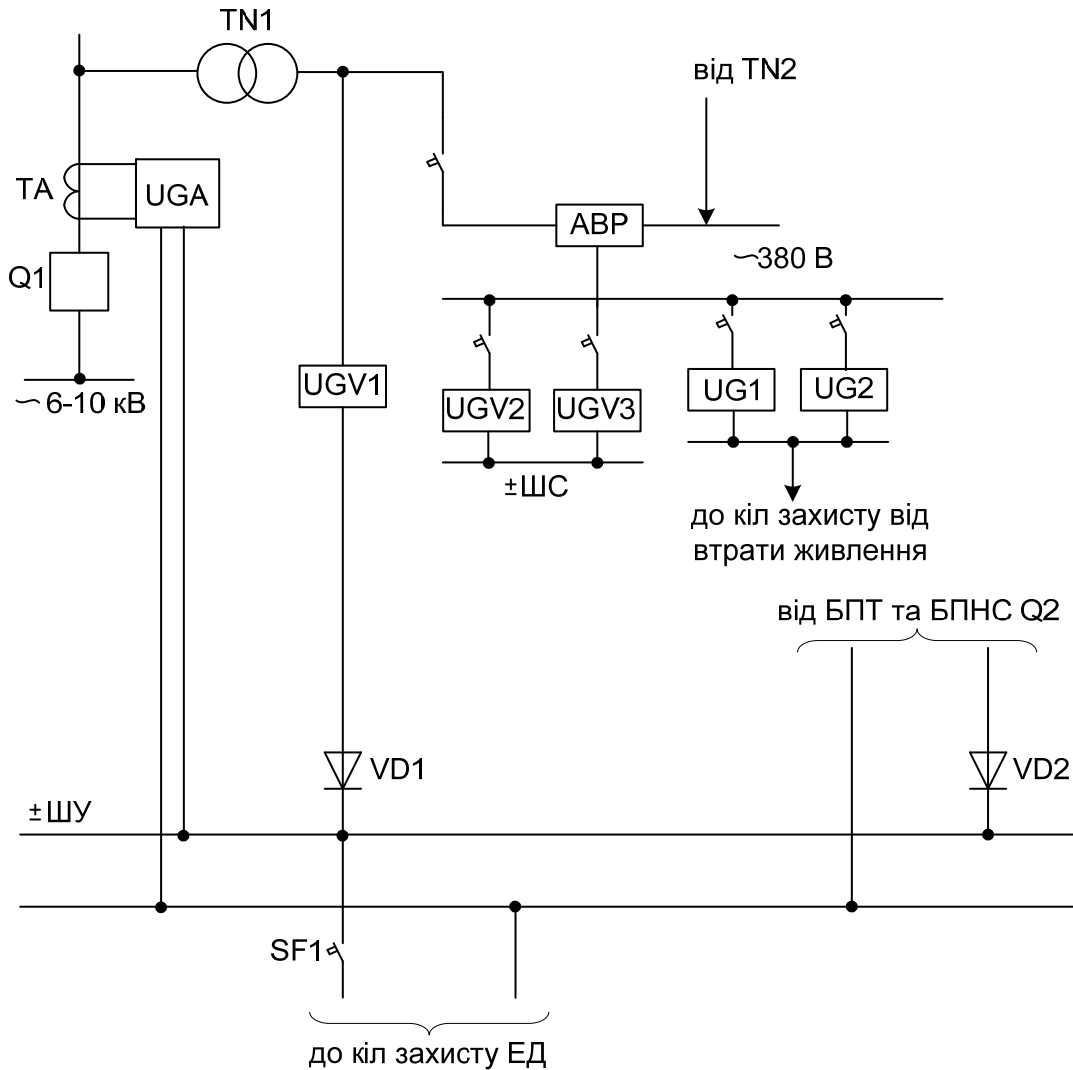
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чернобровов Н. В. Релейная защита. М. : Энергия, 1974. 680 с.
2. Беркович М. А., Молчанов В. В., Семенов В. А. Основы техники релейной защиты. М. : Энергоатомиздат, 1984. 580 с.
3. Беркович М. А. Основы техники и эксплуатации релейной защиты. М. : Энергия, 1971. 584 с.
4. Андреев В. А. Релейная защита, автоматика и телемеханика в системах электроснабжения. М. : Высшая школа, 1985. 391 с.
5. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. Т. 1. Электроснабжение ; под общ. ред. А. А. Федорова. М. : Энергоатомиздат, 1986. 568 с.
6. Справочник по проектированию электроснабжения ; под ред. Ю. Г. Барыбина и др. М. : Электроатомиздат, 1990. 576 с.
7. Корогодский В. Н., Кужеков С. Л., Паперно Л. Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. М. : Энергоатомиздат, 1987. 248 с.
8. Байтер Н. И. Защита и АВР электродвигателей собственных нужд. М. : Энергия, 1980. 104 с.
9. Фабрикант В. Л., Андреев В. А., Бондаренко Е. В. Задачник по релейной защите. М. : Высш. школа, 1971. 608 с.
10. Богаенко И. Н., Сердюк Ю. В., Шатунов М. А. Температурная защита асинхронных электродвигателей. К. : Техніка, 1987. 94 с.
11. Авербух А. М. Релейная защита в задачах с решениями и примерами. Л. : Энергия, 1975. 416 с.
12. Ванин В. К. Релейная защита на элементах вычислительной техники. Л. : Энергоатомиздат, 1991. 336 с.
13. Беляев А. В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ. Л. : Энергоатомиздат, 1988. 176 с.
14. Релейные схемы и системы. Каталог продукции. К. : РЕЛСiС, ПАО «Электротехнический завод», 2011. 135 с.
15. Лагутін В. М., Тептя В. В., Вишневський С. Я. Власні потреби електричних станцій : [навчальний посібник]. Вінниця : ВНТУ, 2009. 102 с.
16. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей ; под ред. Л. Г. Мамиконянца. М. : Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
17. Алексеев В. С., Варганов Г. П., Панфилов Б. И., Розенблюм Р. З. Реле защиты. М. : Энергия, 1976. 464 с.
18. Андреев В. А. Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах. Ульяновск, 2007. 391 с.

ДОДАТКИ

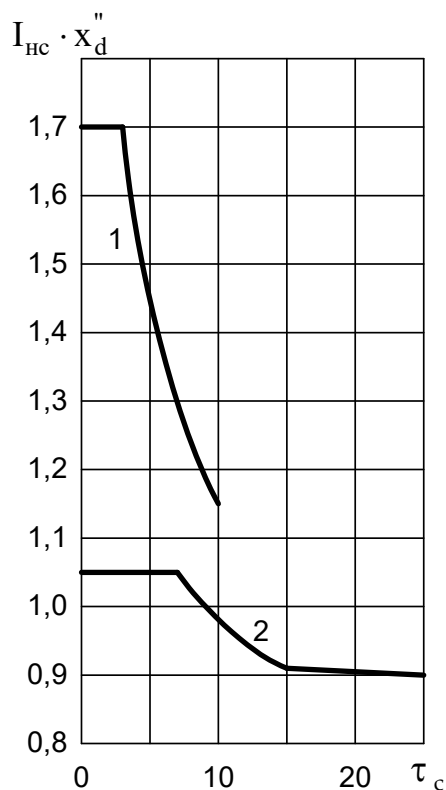
Додаток А

Довідковий матеріал



- Q1 – вимикач; TN1 – трансформатор власних потреб;
- ТАВ – трансформатор фази В;
- АВР – пристрій автоматичного введення резерву;
- UGA – блок живлення типу БПТ-1002;
- UGV1 – блок живлення типу БПНС-2;
- UGV2, UGV3 – блоки живлення типу БПН-1002;
- UG1, UG2 – блоки живлення та заряду типу БПЗ-401

Рисунок А.1 – Спрощена схема системи випрямленого оперативного струму



- 1 – для синхронних двигунів, які допускають пуск від повної напруги та номінальної потужності $P_{ном} \leq 2000$ кВт;
 2 – для синхронних двигунів, які не допускають пуск від повної напруги та номінальної потужності $P_{ном} > 2000$ кВт.

Рисунок А.2 – Криві допустимої кратності несинхронного ввімкнення

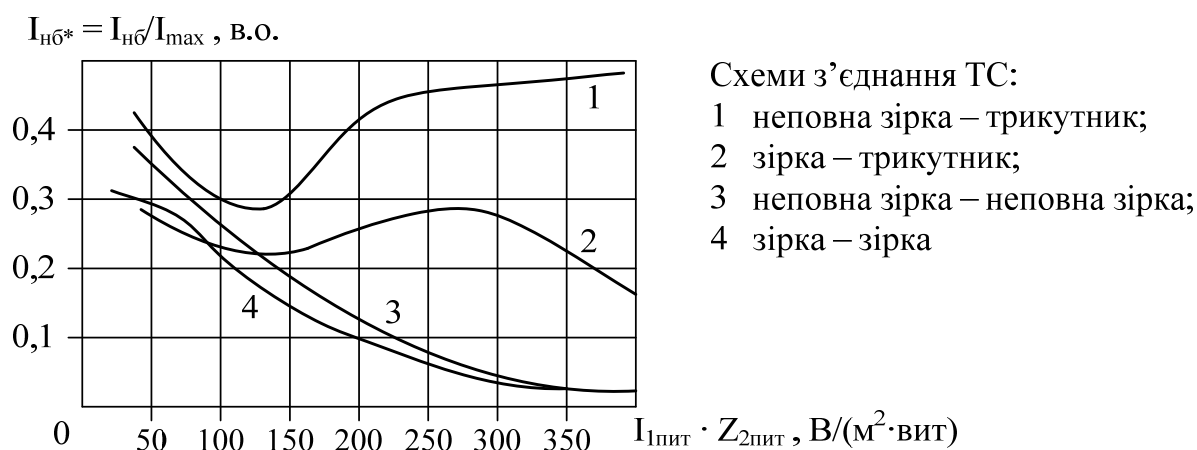
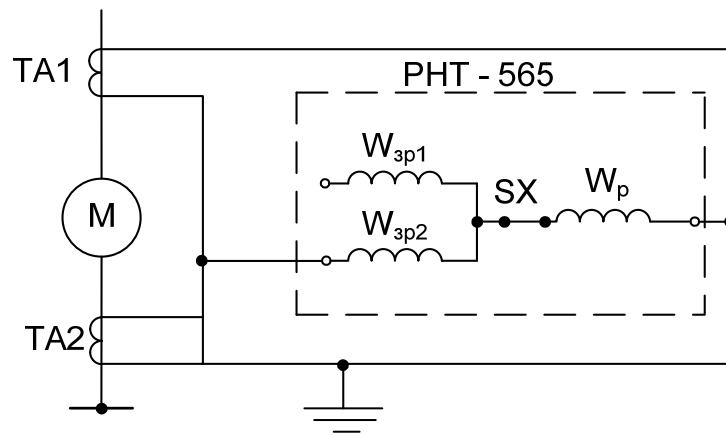
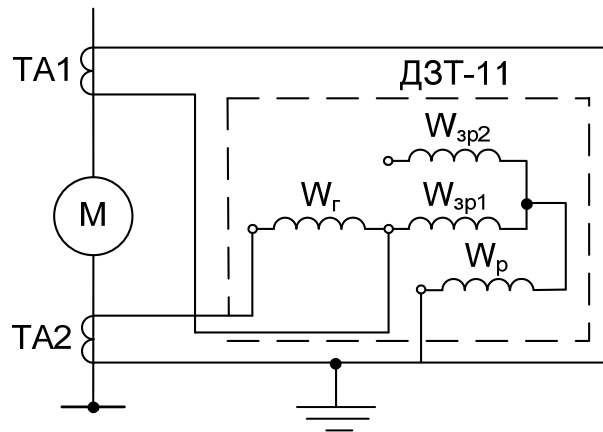


Рисунок А.3 – Узагальнені криві максимально можливих струмів небалансу диференціальних захистів електродвигунів



а) з реле типу РНТ – 565



б) з реле типу ДЗТ – 11

Рисунок А.4 – Схема однієї фази диференціального струмового захисту

Додаток Б

Розрахунок уставок захистів електродвигунів 3-6 кВ в прикладах і задачах

Б.1 Короткі відомості, які використовуються в задачах під час розрахунків захисту асинхронних електродвигунів напругою вище 1 кВ

Розрахунок струмів короткого замикання на виводах електродвигуна 3–6 кВ. Для перевірки чутливості захисту електродвигуна від міжфазних КЗ потрібно знати значення струму, що протікає через ТС захисту при КЗ на виводах електродвигуна. Розрахунок виконують для випадку трифазного КЗ. Цей вид КЗ є симетричним, тому достатньо розрахувати для однієї фази, оскільки всі три фази знаходяться в однакових умовах. Під час обчислення струму КЗ на виводах електродвигуна допускається розглядати КЗ безпосередньо на шинах РУ ВП 3-6 кВ, звідки живиться електродвигун, оскільки він під'єднаний до цих шин кабелем відносно невеликої довжини, опором якого можна знехтувати.

Для розрахунку струмів КЗ на шинах 3–6 кВ ВП потрібно скласти розрахункову схему зі всіма елементами, що живлять місце КЗ: системи, генераторів та підвищувальних трансформаторів станції, трансформатора або реактованої лінії ВП. Виходячи з розрахункової схеми складається схема заміщення, у якій всі елементи розрахункової схеми подані своїми індуктивними опорами, вираженими в омах, приведеними до розрахункової номінальної напруги шин 3–6 кВ. При цьому допускається не враховувати активні опори елементів розрахункової схеми через їх незначну величину.

Опори окремих елементів розрахункового кола в омах визначаються за такими виразами:

- для генератора

$$x_{Г} = \frac{x''_{d} \cdot U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}, \quad (Б.1)$$

де x''_{d} – надперехідний опір генератора у відносних одиницях;

$U_{НОМ}$ – номінальна напруга генератора, кВ;

$S_{НОМ}$ – номінальна потужність генератора, МВА;

- для трансформатора

$$x_{Т} = \frac{u_{к} \% U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}, \quad (Б.2)$$

де $u_{к} \%$ – напруга КЗ трансформатора;

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга, за якої визначається опір трансформатора, кВ;

$S_{\text{ном}}$ – номінальна потужність трансформатора, МВА.

При визначенні опору x_T для трансформаторів власних потреб блокових електростанцій, обладнаних пристроєм регулювання напруги під навантаженням (РПН), який може бути використаний в діапазоні $\pm 12\%$ для підтримки постійної напруги на шинах РУ ВП 6 кВ при коливаннях напруги в мережі живлення, треба мати на увазі, що в процесі регулювання напруги $u_k\%$ може значно змінюватися. Це приводить, як видно з виразу (Б.2), до зміни опору трансформатора x_T , а отже, і зміни струму КЗ на шинах 6 кВ РУ ВП. Тому для визначення мінімального значення струму КЗ на виводах електродвигуна 6 кВ потрібно у виразі (Б.2) підставити максимальне значення $u_k\%$ для відповідного трансформатора з РПН за даними каталога або довідника [8].

На трансформаторах із РПН, приєднаних до шин ГРУ 10 кВ, регулювання напруги використовується у незначних межах ($\pm 5\%$) у зв'язку з тим, що напруга на шинах 6 кВ РП ВП підтримується постійною через регулювання напруги на шинах 10 кВ за допомогою генераторів та РПН трансформаторів зв'язку цих шин із енергосистемою. Тому $u_k\%$ на таких трансформаторах ВП мало змінюється, а x_T для них визначається за значенням $u_k\%$, віднесеним до середнього відгалуження РПН (до $U_{\text{ном}}$).

Для трансформаторів ВП без РПН опір x_T можна визначити за виразом (Б.2).

Для визначення опору x_T трансформаторів ВП з розщепленими обмотками 6 кВ потрібно у вираз (Б.2) підставити значення $u_k\%$, віднесені до половини потужності трансформатора, що дорівнює потужності його розщепленої обмотки 6 кВ.

Опір реактора x_p беруть для розрахунку за каталожним значенням його реактивного опору. Опір системи визначається за потужністю КЗ на шинах станції, що пов'язані з системою,

$$x_c = \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_k}, \quad (\text{Б.3})$$

де $U_{\text{ср.ном}}$ – середня номінальна напруга на підвищувальних шинах станції, пов'язаних із системою, кВ;

S_k – потужність КЗ цих шин, МВА.

Для отримання значення струмів КЗ при розрахунковій напрузі шин РП ВП 3,15 або 6,3 кВ потрібно всі опори елементів розрахункової схеми

визначити при цій напрузі. Для цього потрібно в (Б.1), (Б.2) і (Б.3) підставити замість $U_{\text{ном}}$ напругу 3,15 або 6,3 кВ.

За схемою заміщення, що складається на підставі розрахункової схеми, визначається підсумковий опір до місця КЗ на шинах РП ВП 3–6 кВ

$$X_{\text{рез}} = X_{\text{зв}} + X_{\text{ВП}}, \quad (\text{Б.4})$$

де $x_{\text{зв}}$ – опір зовнішнього ланцюга, Ом;

$x_{\text{ВП}}$ – опір реактора чи трансформатора ВП, Ом.

Струм трифазного КЗ визначається як

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ф}}}{X_{\text{рез}}} = \frac{U_{\text{ср.ном}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} X_{\text{рез}}}, \quad (\text{Б.5})$$

де $U_{\text{ф}}$ – фазна напруга шин 3–6 кВ;

$U_{\text{ср.ном}}$ – середня розрахункова номінальна напруга шин 3–6 кВ, яка дорівнює 3,15 або 6,3 кВ.

За струмом трифазного КЗ визначається струм двофазного КЗ на виводах електродвигуна

$$I_{\text{к}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{к}}^{(3)} = 0,87 \cdot I_{\text{к}}^{(3)}.$$

Для сучасних потужних теплових електростанцій можна прийняти, що трансформатор і реактована лінія ВП приєднані до системи нескінченної потужності, тобто до такої потужної системи, яка підтримує незмінною напругу на стороні живлення трансформатора або реактованої лінії за короткого замикання за ними – на шинах РУ ВП 3–6 кВ. Розрахунок струмів КЗ на виводах електродвигуна високої напруги при цьому значно спрощується. У цьому випадку розрахунок зводиться до визначення максимально можливих струмів КЗ за трансформатором або за реактором, оскільки опір $x_{\text{зв}}$ приймається рівним нулю. Для визначення максимально можливого струму трифазного КЗ на виводах електродвигуна виходять з параметрів джерела живлення, користуючись такими виразами:

для реактора

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{U \cdot 10^3}{\sqrt{3} x_{\text{р}}}, \quad (\text{Б.6})$$

де U – напруга мережі, до якої підключений реактор, кВ;

$x_{\text{р}}$ – опір реактора, Ом;

для трансформатора

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{u_{\text{к}} \%} \cdot 100, \quad (\text{Б.7})$$

де $I_{\text{НОМ}}$ – номінальний струм трансформатора на стороні 3,15 або 6,3 кВ;
 $u_{\text{к}} \%$ – напруга КЗ трансформатора.

Для трансформатора з РПН у виразі (Б.7) потрібно підставляти номінальний струм трансформатора на стороні 6 кВ, який у процесі регулювання не змінюється, і мінімальне значення $u_{\text{к}} \%$.

Приклад Б.1. Визначити струми КЗ на виводах електродвигуна 6 кВ, що живиться від реактованої лінії з реактором типу РБ-1000-0,35, яка приєднана до системи нескінченної потужності.

Розв'язання

Визначаємо струм трифазного КЗ на виводах електродвигуна, що дорівнює струму трифазного КЗ за реактором, згідно з (Б.6)

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,35} = 10500 \text{ А.}$$

Струм двофазного КЗ

$$I_{\text{к}}^{(2)} = 0,87 \cdot 10500 = 9150 \text{ А.}$$

Приклад Б.2. Визначити мінімальне значення струму трифазного КЗ на виводах електродвигуна 6 кВ, що живиться від блокового трансформатора з розщепленими обмотками 6 кВ. Потрібні для розрахунку дані наведені на рис. Б.1.

Розв'язання

Опір системи за (Б.3)

$$x_{\text{с}} = \frac{6,3^2}{10\,000} = 0,004 \text{ Ом.}$$

Опір трансформатора струму за (Б.2)

$$x_{\text{Т}} = \frac{10,5 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 250} = 0,0167 \text{ Ом.}$$

Опір генератора за (Б.1)

$$x_{\text{Г}} = \frac{0,19 \cdot 6,3^2}{200/0,85} = 0,0324 \text{ Ом.}$$

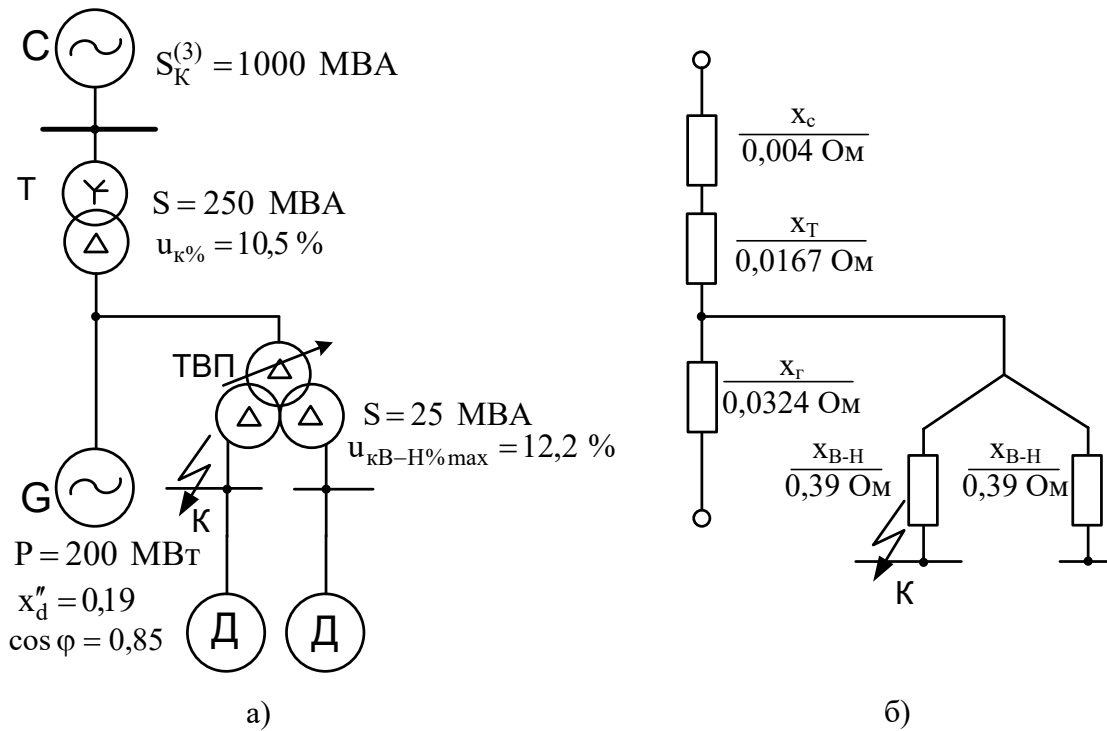


Рисунок Б.1 – До розрахунку струму КЗ:
а) – розрахункова схема, б) – схема заміщення

Максимальний опір трансформатора ВП, віднесений до потужності розщепленої обмотки 6 кВ, за (Б.2)

$$X_{T \max} = \frac{12,2 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 12,5} 0,39 \text{ Ом.}$$

Сумарний опір системи та блокового трансформатора

$$x_c + x_T = 0,004 + 0,0167 = 0,0207 \text{ Ом.}$$

Опір зовнішнього ланцюга, до якого підключений трансформатор ВП,

$$X_{зв} = \frac{0,0207 \cdot 0,0324}{0,0207 + 0,0324} = 0,0126 \text{ Ом.}$$

Підсумковий опір

$$x_{рез} = 0,0126 + 0,39 = 0,402 \text{ Ом.}$$

Струм трифазного КЗ на виводах електродвигуна за (Б.5)

$$I_K^{(3)} = \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,402} = 9100 \text{ А.}$$

Струм двофазного КЗ на виводах електродвигуна

$$I_{\text{к}}^{(2)} = 0,87 \cdot 9100 = 7950 \text{ А} .$$

Якщо визначити струм трифазного КЗ на виводах електродвигуна без урахування опору зовнішнього кола, оскільки він набагато менший опору трансформатора ВП, отримаємо

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,39} = 9350 \text{ А} .$$

Як видно з розрахунку, значення трифазного струму КЗ, пораховані в першому та другому випадках, незначно відрізняються одне від одного і тому допускається розрахунок струмів КЗ на шинах РУ ВП 6 кВ блокових електростанцій виконувати без урахування опору зовнішнього кола.

Розрахунок струмової відсічки. Первинний струм спрацьовування струмової відсічки обирається за умовою налаштування від пускового струму електродвигуна $I_{\text{пуск}}$ за виразом

$$I_{\text{сз}} = k_{\text{н}} I_{\text{пуск}}, \quad (\text{Б.8})$$

де $k_{\text{н}}$ – коефіцієнт надійності, що враховує помилку реле та наявність аперіодичної складової в $I_{\text{пуск}}$ електродвигуна; для реле РТ-40 береться таким, що дорівнює 1,4, а для реле РТ-80 – 1,8 [8];

$I_{\text{пуск}}$ – пусковий струм електродвигуна за номінальної напруги мережі живлення.

Пусковий струм електродвигуна визначається за номінальним струмом та кратністю пускового струму, значення яких вказуються в каталозі, за виразом

$$I_{\text{пуск}} = k_{\text{п}} I_{\text{д.ном}}, \quad (\text{Б.9})$$

де $k_{\text{п}}$ – кратність пускового струму двигуна.

Потрібно вказати, що пусковий струм електродвигуна можна визначити і дослідним шляхом (наприклад, виміряти при загальмованому електродвигуні).

На підставі виразу (Б.9) можна записати вираз (Б.8) у такому, зручному для розрахунку вигляді

$$I_{\text{сз}} = k_{\text{п}} k_{\text{н}} I_{\text{ном.дв}}, \quad (\text{Б.10})$$

Струм спрацьовування реле відсічки визначається за виразом

$$I_{c.p} = \frac{k_{cx} I_{c3}}{n_T} = \frac{k_{cx} k_{\Pi} k_H I_{д.ном}}{n_T}, \quad (Б.11)$$

де k_{cx} – коефіцієнт, що враховує схему з'єднання трансформаторів струму захисту: $k_{cx}=1$ при включенні реле на фазні струми, $k_{cx} = \sqrt{3}$ при включенні реле на різницю струмів двох фаз;

n_T – коефіцієнт трансформації ТС захисту;

I_{c3} – первинний струм спрацьовування захисту.

Струм спрацьовування відсічки, визначений за виразом (Б.10), достатній для налаштування захисту від струму, що надсилається електродвигуном у початковий момент зовнішнього короткого замикання в мережі живлення.

Чутливість струмової відсічки перевіряється при двофазному КЗ на виводах електродвигуна при мінімальному режимі мережі живлення і оцінюється коефіцієнтом чутливості

$$k_{ч} = \frac{I_p^{(2)}}{I_{c.p} n_T} = \frac{I_{k.min}^{(2)}}{I_{c.p} n_T}, \quad (Б.12)$$

де $I_p^{(2)}$ – струм, що протікає в реле при двофазному КЗ на виводах електродвигуна;

$I_{k.min}^{(2)}$ – мінімальне значення струму двофазного КЗ, що проходить через ТС захисту у разі пошкодження на виводах електродвигуна;

$I_{c.p}$ – струм спрацьовування реле захисту;

n_T – коефіцієнт трансформації ТС захисту.

Коефіцієнт чутливості захисту, відповідно до ПУЕ, має бути не меншим, ніж 2,0. Однак для забезпечення дії струмової відсічки при внутрішніх КЗ у витках обмотки статора, віддалених від виводів, бажано, щоб коефіцієнт чутливості був не меншим, ніж 3,0.

Для схеми включення реле струмової відсічки на різницю струмів коефіцієнт чутливості захисту при двофазному КЗ залежить від поєднання пошкоджених фаз та у загальному вигляді може визначатися за виразом

$$k_{ч} = \frac{I_p^{(2)}}{I_{c.p}} = \frac{I_{k.min} k}{I_{c.p} n_T}, \quad (Б.13)$$

де k – коефіцієнт, що враховує відношення струму, що протікає в реле при двофазному КЗ, до вторинного струму двофазного КЗ.

За короткого замикання між фазами А та В або В та С (ТС на фазі відсутній) $k = 1$, оскільки в реле надходить струм тільки одного ТС. При КЗ

між фазами А та С $k = 2$, оскільки у реле підсумовуються рівні струми від двох ТС фаз А та С [8].

Розрахунковим видом КЗ для визначення коефіцієнта чутливості для однорелейної схеми струмової відсічки є пошкодження між фазами А і В або В і С. Тому значення i для однорелейної схеми знаходиться за виразом (Б.12).

Розрахунок диференціального струмового захисту. Струм спрацьовування захисту вибирається за умовою налаштування від струму небалансу, що виникає в реле при пуску електродвигуна і за кидка струму, що посилюється електродвигуном в початковий момент КЗ у мережі живлення, який може бути прийнятий рівним пусковому струму електродвигуна,

$$I_{с.з} = k_n I_{нб.розр}, \quad (Б.14)$$

де $k_n = 1,3$ – коефіцієнт надійності;

$I_{нб.розр}$ – розрахунковий струм небалансу.

Розрахунковий струм небалансу визначається за виразом

$$I_{нб.розр} = k_{апер} k_{одн} f_i I_{пуск}, \quad (Б.15)$$

де $k_{апер}$ – коефіцієнт, який враховує збільшення пускового струму через наявність у ньому аперіодичної складової; для реле типу РНТ-565 з трансформатором насичення $k_{апер} = 1$;

$k_{одн}$ – коефіцієнт однотипності ТТ захисту, що береться таким, що дорівнює 0,5 при однотипних ТС з однаковим коефіцієнтом трансформації і 1,0 при різнотипних ТС;

$f_i = 1$ – допустима повна похибка ТС;

$I_{пуск}$ – пусковий струм електродвигуна.

За цією умовою струм спрацьовування захисту становить 0,3–0,4 номінального струму електродвигуна. Однак для захисту з реле РНТ-565 первинний струм спрацьовування з метою надійності налаштування від струмів небалансу під час перехідних режимів, а також від обриву в струмових колах ТС захисту рекомендується брати

$$I_{с.з} = 2I_{д.ном}. \quad (Б.16)$$

При цьому чутливість захисту залишається досить високою, оскільки електродвигуни потужністю 5000 кВт і більше живляться від потужних джерел власних потреб, що надсилають великі струми КЗ під час пошкоджень на виводах електродвигуна або його обмотці.

За первинним струмом спрацьовування визначається струм спрацьовування реле

$$I_{c.p.} = \frac{I_{c.з}}{n_T} = \frac{2I_{д.ном}}{n_T}, \quad (Б.17)$$

де n_T – коефіцієнт трансформації ТС захисту.

Розрахункове число витків обмоток реле при отриманому значенні $I_{c.p.}$ визначається за виразом

$$\omega_{розр} = \frac{F_{c.p.}}{I_{c.p.}} = \frac{100}{I_{c.p.}}, \quad (Б.18)$$

де $F_{c.p.}$ – мінімальна магніторухійна сила реле РНТ-565, яка дорівнює 100 А.

За розбіжності $\omega_{розр}$ з числом витків реле вибирається найближче менше число ω витків і визначається відповідний струм в цих витках

$$I_{c.p.} = \frac{100}{\omega}. \quad (Б.19)$$

Визначається коефіцієнт чутливості захисту для випадку двофазного КЗ на виводах електродвигуна за (Б.12). Коефіцієнт чутливості диференціального захисту має бути, згідно з ПУЕ, не меншим 2,0.

Розрахунок струмового захисту від навантаження. Струм спрацьовування захисту вибирається за умовою налаштування від номінального струму електродвигуна

$$I_{c.з} = \frac{k_H}{k_{пов}} I_{д.ном}, \quad (Б.20)$$

де $k_H = 1,2$ – коефіцієнт надійності;

$k_{пов} = 0,8$ – коефіцієнт повернення реле.

Струм спрацьовування реле

$$I_{c.p.} = \frac{k_{сх} I_{c.з}}{n_T} = \frac{k_H k_{сх} I_{д.ном}}{k_{пов} n_T}, \quad (Б.21)$$

де $k_{сх}$ – коефіцієнт схеми: $k_{сх} = 1,0$ при включенні реле на фазний струм і $k_{сх} = \sqrt{3}$ при включенні реле на різницю струмів двох фаз.

Чутливість захисту від перевантаження не перевіряється, оскільки він не призначений для дії за коротких замикань.

Витримка часу захисту вибирається відповідно до часу пуску захищеного електродвигуна. При застосуванні реле РТ-80 витримка часу неза-

лежної частини характеристики має бути близько 15–16 с. При застосуванні реле часу витримки часу на них мають бути більшими часу пуску та самозапуску електродвигуна.

Для реле струму в схемі захисту шахтного млина (див. рис. 10 [8]), що діє на розвантаження, уставка вибирається за виразом (Б.21), але при цьому беруть значення $k_n = 1,05$.

Розрахунок струмового захисту нульової послідовності. Згідно з ПУЕ струм спрацьовування захисту, що розглядається, має бути не більшим 10 А для електродвигунів потужністю до 2000 кВт та не більшим 5 А для електродвигунів потужністю 2000 кВт і більше. При цьому забезпечується надійне налаштування від ємнісного струму, що посилається електродвигуном при замиканні в мережі живлення.

Мінімальне значення первинного струму спрацьовування захисту залежить від кількості використовуваних ТТ нульової послідовності, схеми їх з'єднання та типу реле. При одному ТТ типу ТЗЛМ із застосуванням реле РТЗ-50 мінімальний струм спрацьовування захисту дорівнює 3А, при послідовному з'єднанні двох ТЗЛМ – 3,5 А.

Коефіцієнт чутливості захисту визначається за виразом

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_3}{I_{\text{с.з}}}, \quad (\text{Б.22})$$

де I_3 – струм замикання на землю, який визначається ємністю мережі (кількістю та довжиною кабелів).

Ємнісний струм у місці пошкодження при металевому замиканні однієї фази на землю може бути визначений орієнтовно за виразом

$$I_3 = 0,1 \cdot U_c \cdot l,$$

де U_c – номінальна напруга мережі, кВ;

l – довжина кабелю, км.

Мінімальний коефіцієнт чутливості має бути близько 1,25.

Вибір струму спрацьовування захисту від подвійних замикань на землю. Первинний струм спрацьовування захисту має бути достатнім для забезпечення вимкнення електродвигуна при подвійних замиканнях на землю, якщо одне з місць замикань знаходиться в обмотці статора електродвигуна. У зв'язку з використанням для даного захисту ТС нульової послідовності, до яких приєднується реле струму РТЗ-50, первинний струм спрацьовування захисту становить близько 100–200 А.

Уставки захисту мінімальної напруги. Напруга спрацювання першого ступеня захисту обирається за умови забезпечення самозапуску відпові-

дальних електродвигунів і повернення реле за відновлення напруги після відключення КЗ та приймається

$$U_{1c.p.} = 70 \text{ В.}$$

Витримка часу першого ступеня захисту налаштовується від дії струмових відсічок електродвигунів і береться

$$t_1 = 0,5 \text{ с.}$$

Напруга спрацьовування другого ступеня захисту налаштовується від зниження напруги на РУ ВП, викликаного самозапуском, і береться

$$U_{2c.p.} = 50 \text{ В.}$$

Витримка часу другого ступеня захисту t_2 обирається залежно від допустимого часу подачі палива в топку котла після моменту перерви живлення електродвигунів димотяга і дуттьового вентилятора і становить 3–9 с.

Напруга спрацьовування фільтра-реле напруги зворотної послідовності типу РНФ-1М, що застосовується в схемі на рис. 6 [8], має бути налаштована від напруги небалансу при нормальному режимі та при відхиленнях частоти вибирається

$$U_{2c.p.} = 11 \text{ В.}$$

Приклад Б.3. Вибрати уставки захисту електродвигуна багерного насоса гідрозоловидалення, що живиться від реактової лінії. Дані реактора і струм трифазного КЗ за реактором наведено в прикладі Б.1.

Дані електродвигуна: тип А-13-52-8; $P_{д.ном} = 500 \text{ кВт}$; $I_{д.ном} = 60 \text{ А}$; $k_{\Pi} = 5,5$; $U_{д.ном} = 6 \text{ кВ}$.

Захисти електродвигуна виконано за схемою на рис. 7 [8]. Для захисту використовуються ТС з коефіцієнтом трансформації $n_T = 150/5$.

Розв'язання

Струм спрацьовування відсічки згідно з (Б.11)

$$I_{c.p.} = \frac{1,73 \cdot 1,4 \cdot 5,5 \cdot 60}{150/5} = 30 \text{ А.}$$

Коефіцієнт чутливості відсічки згідно з (Б.12)

$$k_{\text{ч}} = \frac{9150}{0,8 \cdot 150/5} = 10,2 > 2.$$

Приймається реле струму типу РТ-40/50. Струм спрацьовування захисту від перевантаження згідно з (Б.21)

$$I_{c.p.} = \frac{1,73 \cdot 1,2 \cdot 60}{0,8 \cdot 150/5} = 5,15 \text{ А.}$$

Вибирається реле струму типу РТ-40/6. Первинний струм спрацьовування захисту від замикання на землю має бути не більшим 10 А. Електродвигун має відключатися від першого ступеня захисту мінімальної напруги.

Приклад Б.4. Вибрати уставки захисту електродвигуна млинового вентилятора, що живиться від трансформатора з розщепленими обмотками, що розглядається в прикладі Б.2. Захист виконано за схемою на рис. 8 [8]. Для захисту вибрано ТС із $n_T = 150/5$.

Дані електродвигуна: тип ДАЗО-13-50-4М; $P_{д.ном} = 630$ кВт;
 $U_{д.ном} = 6$ кВ; $I_{д.ном} = 73$ А; $k_{II} = 6$.

Розв'язання

Струм спрацьовування струмової відсічки згідно з (Б.11)

$$I_{с.р} = \frac{1 \cdot 1,4 \cdot 6 \cdot 73}{150/5} = 21 \text{ А.}$$

Коефіцієнт чутливості відсічки згідно з (Б.12)

$$k_{ч} = \frac{7950}{21 \cdot 150/5} = 12,6 > 2$$

Приймається реле типу РТ-40/50.

Струм спрацьовування захисту від перевантаження згідно з (Б.21)

$$I_{с.р} = \frac{1 \cdot 1,2 \cdot 73}{0,8 \cdot 150/5} = 3,7 \text{ А.}$$

Приймається реле струму РТ-40/6. Струмовий захист нульової послідовності не встановлюється, тому що струм замикання на землю менший 10 А. Електродвигун має відключатися від першого ступеня захисту мінімальної напруги.

Приклад Б.5. Вибрати уставки захисту електродвигуна циркуляційного насоса, який живиться від трансформатора з розщепленими обмотками, що розглядається в прикладі Б.2. Захисти виконано за схемою на рис. 11 [8]. Для захисту використовуються трансформатори струму з $n_T = 300/5$.

Дані електродвигуна: тип ВДД-213/54-16; $P_{д.ном} = 1700$ кВт;
 $U_{д.ном} = 6$ кВ; $I_{д.ном} = 215$ А; $k_{II} = 5,4$.

Розв'язання

Струм спрацьовування струмової відсічки згідно з (Б.11)

$$I_{с.р} = \frac{1 \cdot 1,4 \cdot 5,4 \cdot 215}{300/5} = 27 \text{ А.}$$

Коефіцієнт чутливості відсічки згідно з (Б.12)

$$k_{\text{ч}} = \frac{7950}{27 \cdot 300/5} = 4,9 > 2.$$

Вибирається реле струму РТ-40-50. Струмовий захист нульової послідовності не використовується, тому що струм замикання на землю менший 10 А, а при потужності до 2000 кВт захист від подвійних замикань на землю не потрібний. Електродвигун не має відключатися від захисту мінімальної напруги.

Приклад Б.6. Вибрати уставки захисту двошвидкісного електродвигуна димотяга, що живиться від трансформатора, який розглядали у прикладі Б.2. Захисти виконані за схемою на рис. 13 [8]. Для захисту прийняті ТС з коефіцієнтами трансформації $n_T = 150/5$ і $n_T = 300/5$.

Дані електродвигуна: тип ДАЗО-141410/12А; $P_{\text{д.ном}} = 1500/850$ кВт; $U_{\text{д.ном}} = 6$ кВ; $I_{\text{д.ном}} = 204/118$ А; $k_{\text{п}} = 6,1/5,5$.

Розв'язання

Струм спрацьовування відсічки для першої (меншої) частоти обертання згідно з (Б.11)

$$I_{\text{с.р}} = \frac{1 \cdot 1,4 \cdot 5,5 \cdot 118}{150/5} = 30 \text{ А.}$$

Коефіцієнт чутливості відсічки згідно з (Б.12)

$$k_{\text{ч}} = \frac{7950}{30 \cdot 150/5} = 8,9 > 2$$

Приймається реле струму РТ-40/50.

Струм спрацьовування захисту від перевантаження для першої частоти обертання, згідно з (Б.21),

$$I_{\text{с.р.}} = \frac{1 \cdot 1,2 \cdot 118}{0,8 \cdot 150/5} = 6 \text{ А.}$$

Приймаються реле струму РТ-40/6 і реле часу ВЛ-34.

Струм спрацьовування відсічки для другої (більшої) частоти обертання

$$I_{\text{с.р.}} = \frac{1 \cdot 1,4 \cdot 6,1 \cdot 204}{300/5} = 29 \text{ А.}$$

Коефіцієнт чутливості відсічки

$$k_{\text{ч}} = \frac{7950}{29 \cdot 300/5} = 4,5 > 2.$$

Приймається реле струму РТ-40/50. Струм спрацьовування захисту від перевантаження для другої частоти обертання

$$I_{\text{с.р}} = \frac{1 \cdot 1,2 \cdot 204}{0,8 \cdot 300/5} = 5,1 \text{ А.}$$

Приймаються реле струму РТ-40/6 та реле часу ВЛ-34.

Приклад Б.7. Вибрати уставки захисту електродвигуна живильного насоса типу АДТ-8000 з даними: $P_{\text{д.ном}} = 8000 \text{ кВт}$; $U_{\text{д.ном}} = 6 \text{ кВ}$; $I_{\text{д.ном}} = 900 \text{ А}$.

Електродвигун живиться від трансформатора ВП, що розглядався в прикладі Б.2. Для захисту прийняті ТС з коефіцієнтами трансформації $n_{\text{T}} = 1000/5$.

Захист електродвигуна виконаний за схемою на рис. 16 [8].

Розв'язання

Струм спрацьовування реле РНТ-565 диференціального захисту, згідно з (Б.17),

$$I_{\text{с.р.}} = \frac{2 \cdot 900}{1000/5} = 9 \text{ А.}$$

Число витків трансформатора реле, що насичується, згідно з (Б.18),

$$\omega_{\text{розр}} = \frac{100}{9} = 11,8 \text{ вит.}$$

Приймається найближче менше число витків – $\omega = 11$ витків. Використовується робоча обмотка реле.

Уточнений струм спрацьовування захисту, згідно з (Б.19),

$$I_{\text{с.р.}} = \frac{100}{11} = 9,1 \text{ А.}$$

Коефіцієнт чутливості захисту, згідно з (Б.12),

$$k_{\text{ч}} = \frac{7950}{9,1 \cdot 1000/5} = 4,3 > 2$$

Струм спрацьовування захисту від перевантаження, згідно з (Б.21),

$$I_{\text{с.р.}} = \frac{1 \cdot 1,2 \cdot 900}{0,8 \cdot 1000/5} = 6,8 \text{ А.}$$

Вибирається реле струму РТ-40/10 та реле часу ВЛ-34. Первинний струм спрацьовування струмового захисту нульової послідовності від однофазних замикань на землю має бути не більшим 5 А. Електродвигун має відключатися від другого ступеня захисту мінімальної напруги для забезпечення дії АВР живильних насосів.

Приклад Б.8. На асинхронному електродвигуні напругою 6 кВ і потужністю 400 кВт потрібно встановити захист від КЗ – струмову відсічку, яка може виконуватись за допомогою вторинних струмових реле різних типів: РТ-40, РСТ-11, ЯРЭ-2201, РТ-80, РТМ. Кратність пускового струму електродвигуна $k_{\Pi} = \frac{I_{\text{пск}}}{I_{\text{д.ном}}} = 4$. Струм двофазного КЗ на шинах, до яких підключений електродвигун (на його виводах), $I_{\text{к}}^{(2)} = 1430 \text{ А}$. Порівняти за чутливістю захисти, виконані реле РТ-40, РТ-80 і РТМ.

Взяти:

- для реле РТ-40 коефіцієнт налаштування $k_{\text{нал}}^{\text{I}} = 1$;
- для РТ-80 – $k_{\text{нал}}^{\text{I}} = 1,8$;
- для реле РТМ – $k_{\text{нал}}^{\text{I}} = 2$, $\cos \varphi = 0,9$, $\eta = 0,95$.

Розв'язання

1. Визначимо номінальний струм електродвигуна і його струм

$$I_{\text{д.ном}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,95 \cdot 0,9} = 45,5 \text{ А};$$

$$I_{\text{пск max}} = 45,5 \cdot 4,3 = 196 \text{ А}.$$

2. Визначимо струм спрацьовування захисту, використовуючи вираз

$$I_{\text{сз}}^{\text{I}} = k_{\text{нал}}^{\text{I}} \cdot I_{\text{пск max}}$$

- для реле РТ-40

$$I_{\text{сз}}^{\text{I}} = 1,4 \cdot 196 = 274,4 \text{ А};$$

- для реле РТ-80

$$I_{\text{сз}}^{\text{I}} = 1,8 \cdot 196 = 352,8 \text{ А};$$

- для реле РТМ

$$I_{\text{сз}}^{\text{I}} = 2 \cdot 196 = 392 \text{ А}.$$

3. Визначимо коефіцієнти чутливості за виразом

$$k_{\text{ч}}^{(m)} = \frac{k_{\text{сх}}^{(2)} \cdot I_{\text{к.min}}^{\text{I}}}{k_{\text{сх}}^{(3)} \cdot I_{\text{сз}}}$$

Для електродвигунів потужністю 2000 кВт захист виконується однорелейним, тобто з включенням реле на різницю струмів двох фаз [18]. В цьому випадку коефіцієнт схеми $k_{сх}^{(3)} = \sqrt{3}$, а за двофазного КЗ в гіршому випадку $k_{сх}^{(m)} = k_{сх}^{(2)} = 1$.

З урахуванням цього для захисту:

- з реле РТ-40

$$k_{ч}^{(2)} = \frac{1 \cdot 1430}{\sqrt{3} \cdot 274,4} = 3;$$

- з реле РТ-80

$$k_{ч}^{(2)} = \frac{1 \cdot 1430}{\sqrt{3} \cdot 352,8} = 2,3;$$

- з реле РТМ

$$k_{ч}^{(2)} = \frac{1 \cdot 1430}{\sqrt{3} \cdot 392} = 2,1.$$

З аналізу випливає, що будь-яке реле можна використовувати для виконання струмової відсічки, оскільки в усіх випадках $k_{ч}^{(2)} > 2$, але, враховуючи, що на електродвигуні має бути захист від перевантажень, доцільно використовувати реле РТ-80.

Приклад Б.9. В прикладі Б.8 для струмової відсічки використано електромагнітний елемент реле РТ-80. За допомогою цього реле виконаний і захист від перевантаження. Потрібно вибрати його параметри і уточнити струм спрацювання відсічки. В розрахунках взяти коефіцієнт налаштування $k_{нал}^{III} = 1,1$, коефіцієнт повернення $k_{пов} = 0,8$ і коефіцієнт трансформації трансформаторів струму $n_T = 50/5 = 10$.

Розв'язання

1. Струм спрацювання реле захисту від перевантаження вибирається, виходячи з таких вимог [18]:

- реле не має спрацювати в нормальному режимі роботи електродвигуна, тобто

$$I_{с.р.}^{III} \geq \frac{k_{нал}^{III} \cdot k_{сх}^{(3)} \cdot I_{ном.дв}}{k_{пов} \cdot n_T};$$

- реле має спрацювати при пусках електродвигуна, тобто

$$I_{с.р.}^{III} \leq 0,75 \cdot \frac{k_{сх}^{(3)} \cdot I_{пск}}{n_T}.$$

Використовуючи ці вирази, знайдемо

$$I_{c.p.}^{III} \geq \frac{1,1 \cdot \sqrt{3} \cdot 45,5}{0,8 \cdot 10} = 10 \text{ А};$$

та

$$I_{c.p.}^{III} \leq 0,75 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 196}{10} = 25,43 \text{ А}.$$

Приймаємо струм спрацювання реле $I_{c.p.}^{III} = 10 \text{ А}$.

Використовуємо реле РТ-82/1 з уставкою за часом спрацювання 16 с, чим забезпечується неспрацювання реле при нормальних режимах пуску і самозапуску електродвигуна.

2. У реле РТ-80 струм спрацювання відсічки $I_{c.p.}^I$ пов'язаний зі струмом $I_{c.p.}^{III}$.

Відношення $I_{c.p.}^I / I_{c.p.}^{III} = 2 \dots 8$. З прикладу Б.8 $I_{c.з}^I = 352,8 \text{ А}$.

Знайдемо струм спрацювання реле

$$I_{c.p.}^I = \frac{k_{cx}^{(3)} \cdot I_{c.з}^I}{n_T} = \frac{\sqrt{3} \cdot 352,8}{10} = 60 \text{ А}$$

і кратність

$$I_{c.p.}^I / I_{c.p.}^{III} = 60 / 10 = 6.$$

Прийняте реле дозволяє встановити таку кратність. При цьому струм спрацювання відсічки залишається таким, що дорівнює розрахунковому.

Приклад Б.10. Група асинхронних електродвигунів напругою 6 кВ живиться від системи нескінченної потужності через трансформатор.

Перевірити наявність умови самозапуску електродвигунів після відключення струмової відсічки найбільш потужного електродвигуна і чи є необхідність в мінімальному захисті напруги. Самозапуск забезпечується за залишкової напруги $U_{зал} = 0,6 \cdot U_{ном}$. При визначенні опору електродвигуна в режимі самозапуску прийняти ковзання $s = 1$.

Дані для розрахунку вказано в табл. Б.1.

Таблиця Б.1 – Дані для розрахунку

Електродвигуни			Трансформатор	
№	$P_{д.ном}$, кВт	$I_{пск}$, А.	$S_{ном}$, МВ·А	U_K , %
1	630	369	6,3	10,5
2	800	468		
3	1000	575		
4	1250	753		
5	1600	990		

Розв'язання

Розрахунок самозапуску зводиться до визначення залишкової напруги на виводах електродвигуна в режимі, який відповідає трифазному КЗ за опором електродвигуна. А тому, перш за все, потрібно визначити розрахункові опори елементів схеми, тобто трансформатора і електродвигунів, що самозапускаються, скласти розрахункову схему, спростити її відносно точки КЗ, тобто виконати звичайний розрахунок трифазного КЗ з визначенням залишкової напруги на секції шин (на виводах електродвигунів).

Розв'язання

1. Визначимо розрахункові опори.

Для спрощення розрахунку в режимі самозапуску припустимо, що електродвигун зупинений (ковзання $s = 1$).

Самозапускаються електродвигуни № 1...4 після відключення пошкодженого електродвигуна № 5 струмовою відсічкою.

При цьому опір електродвигуна № 1

$$Z_{д1} = \frac{U_{д.ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{пск1}} = \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 0,369} = 9,4 \text{ Ом.}$$

Аналогічно визначаються опори інших електродвигунів

$$Z_{д2} = 7,4 \text{ Ом; } Z_{д3} = 6 \text{ Ом; } Z_{д4} = 4,6 \text{ Ом.}$$

Опір трансформатора

$$X_T = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{T.ном}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{6^2}{6,3} = 0,6 \text{ Ом.}$$

Підсумковий опір всіх електродвигунів, що самозапускаються,

$$Z_{д\Sigma} = \frac{1}{1/Z_{д1} + 1/Z_{д2} + 1/Z_{д3} + 1/Z_{д4}};$$
$$Z_{д\Sigma} = \frac{1}{1/9,4 + 1/7,4 + 1/6 + 1/4,6} = 1,6 \text{ Ом.}$$

Залишкова напруга на виводах електродвигунів

$$U_{зал} = \frac{Z_{д\Sigma} \cdot U_{ном}}{Z_{д\Sigma} + Z_T} = \frac{1,6 \cdot U_{ном}}{1,6 + 0,6} = 0,73 \cdot U_{ном}.$$

Отже, самозапуск забезпечується і мінімальний захист напруги не потрібний.

Приклад Б.11. На рис. Б.2, а) наведено захист синхронного електродвигуна від асинхронного режиму. У схему захисту включено проміжне реле KLT з затримкою при поверненні. Час затримки $t_{в,р}$ забезпечує спрацьовування захисту під час асинхронного режиму, коли через реле проходить зрівнювальний струм $I_{зр}$, змінюючись так, як показано на рис. Б.2, б).

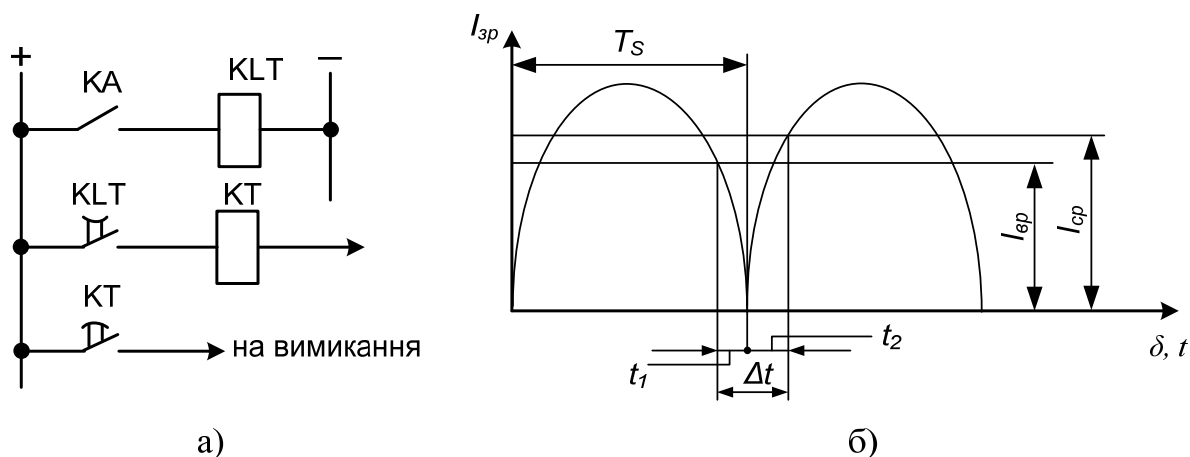


Рисунок Б.2 – Захист синхронного електродвигуна від асинхронного режиму (до прикладу Б.11)

Вибрати струм спрацьовування захисту $I_{с,з}$, час затримки $t_{в,р}$ реле KLT і визначити коефіцієнт чутливості $k_{ч}$ при асинхронному режимі роботи електродвигуна. Витримка часу реле КТ приймається, як зазвичай, більшою часу пуску і самозапуску електродвигуна.

Прийняти коефіцієнт налаштування $k_{нал} = 1,2$, коефіцієнт повернення $k_{пов} = 0,85$.

При визначенні $t_{в,р}$ взяти коефіцієнт налаштування $k'_{нал} = 1,5$. В асинхронному режимі частота в системі $f_{ном} = 50$ Гц, опір системи $x'_c = 4$ Ом, кутова швидкість обертання ротора електродвигуна відповідає частоті електричного струму $f'_d = 45$ Гц, ЕРС системи E'_c і двигуна E'_d дорівнюють за величиною фазній напрузі мережі $U_c = \frac{6}{\sqrt{3}}$ кВ, кут δ зсуву фаз векторів ЕРС E'_c і E'_d змінюється від 0 до 360° .

Параметри синхронного електродвигуна: $P = 630$ кВт, $U_{д,ном} = 6$ кВ, $I_{д,ном} = 71$ А. Опір електродвигуна під час асинхронного режиму прийняти рівним його опору при пуску. Характер зміни зрівнювального струму залежно від кута δ показано на рис. Б.2, б). Тут же вказані струм спрацьовування $I_{с,р}$ і струм повернення реле $I_{в,р}$.

Із рисунка випливає, що при асинхронному режимі реле струму КА періодично розмикає контакти в межах кожного циклу і тримає їх розімкну-

тими протягом часу Δt . Тому для забезпечення безперервної подачі напруги на обмотку реле часу КТ потрібно, щоб проміжне реле КЛТ мало витримку часу на розмикання свого контакту $t_{в,р}$ більшу, ніж час Δt .

Розв'язання

Розрахуємо зрівняльний струм і визначимо час Δt .

1. З рис. Б.2, б) випливає, що миттєве значення струму

$$i_{зр} = \frac{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot U_c}{\sqrt{3} \cdot (x'_d + x'_c)} \cdot \sin(\delta/2) = i_{зр.макс} \cdot \sin(\delta/2).$$

2. Опір електродвигуна під час асинхронного режиму

$$x'_d = \frac{U_{д.ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{пск}} = \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 8,65 \text{ Ом.}$$

3. Максимальний зрівнювальний струм

$$i_{зр.макс} = \frac{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot U_c}{\sqrt{3} \cdot (x'_d + x'_c)} = \frac{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot (8,65 + 4)} = 775 \text{ А.}$$

4. Струм спрацьовування захисту

$$I_{с.з} = \frac{k_{нал}}{k_{пов}} \cdot I_{д.ном} = \frac{1,2}{0,85} \cdot 71 = 100 \text{ А.}$$

5. Струм повернення захисту

$$I_{п.з} = k_{пов} \cdot I_{с.з} = 0,85 \cdot 100 = 85 \text{ А.}$$

6. Коефіцієнт чутливості захисту

$$k_{ч} = \frac{i_{зр.макс}}{I_{с.з}} = \frac{775}{100} = 7,75.$$

7. З виразу пункту 1 кути δ і час, що їм відповідає:

- при $i_{зр} = I_{п.з}$

$$\sin(\delta/2) = \frac{I_{п.з}}{i_{зр.макс}} = \frac{85}{775} = 0,11; \quad \delta = 12,63^\circ.$$

$$t_1 = \frac{\delta}{360} \cdot T_s = \frac{12,63}{360} \cdot T_s = 0,035 \cdot T_s \text{ с;}$$

-при $i_{yp} = I_{c.3}$;

$$\sin(\delta/2) = \frac{I_{п.з}}{i_{зр.маx}} = \frac{100}{775} = 0,13; \quad \delta = 14,94^\circ.$$

$$t_2 = \frac{\delta}{360} \cdot T_s = \frac{14,94}{360} \cdot T_s = 0,0415 \cdot T_s \text{ с.}$$

8. Час $\Delta t = t_1 + t_2 = 0,035 \cdot T_s + 0,0415 \cdot T_s = 0,0765 \cdot T_s$.

Тривалість одного періоду зрівнювального струму

$$T_s = \frac{1}{f_{ном} - f_d} = \frac{1}{50 - 45} = 0,2 \text{ с.}$$

Таким чином, час $\Delta t = t_1 + t_2 = 0,2 \cdot 0,0765 = 0,0153 \text{ с}$, а витримка часу $t_{в.р}$ реле KLT $t_{в.р} = 1,5 \cdot 0,0153 = 0,023 \text{ с}$.

Приклад Б.12. У схемі захисту від коротких замикань електродвигуна з параметрами $P_{д.ном} = 800 \text{ кВт}$, $U_{д.ном} = 6 \text{ кВ}$, $I_{д.ном} = 91 \text{ А}$ пропонується використовувати реле РТ-85 з посиленою контактною системою, що дозволяє комутувати струми до 150 А включно, а схему захисту створити в однорелейному виконанні з дешунтуванням електромагніта відключення вимикача. Потрібно визначити мінімальний коефіцієнт трансформації трансформаторів струму n_T , якщо при трифазному КЗ на виводах електродвигуна $I_k^{(3)} = 3200 \text{ А}$.

Відповідь: Розрахунковий коефіцієнт $n_T = 185/5$. Приймається найближчий більший $n_T = 200/5$.

Приклад Б.13. Для захисту асинхронного двигуна від теплового перевантаження пропонується використовувати мікропроцесорний комплектний пристрій SPAC802-01 з номінальним струмом $I_{р.ном} = 1 \text{ А}$ [18]. Потрібно визначити струм спрацьовування реле $I_{с.р}$ і час спрацьовування захисту $t_{сз}$.

Параметри електродвигуна:

$$P_{д.ном} = 750 \text{ кВт}; \quad U_{д.ном} = 6 \text{ кВ}; \quad I_{д.ном} = 91 \text{ А}.$$

Кратність пускового струму $k_{п} = \frac{I_{пск}}{I_{д.ном}} = 6$, час пуску разом із при-

водним механізмом $t_{пск} = 10 \text{ с}$.

Характеристики спрацьовування захисту подано на рис. Б.3 і Б.4. Коефіцієнт p впливає на крутизну характеристики.

Розв'язання

1. Для вибору параметрів спрацьовування та визначення $t_{сз}$ потрібно знати розрахунковий час $t_{розр}$ та відношення $\frac{I_{пск}}{I_{\Theta}}$ [18].

Тут I_{Θ} – струм повного навантаження. Він дорівнює відношенню найбільшого тривалого допустимого вторинного струму електродвигуна $\frac{I_{тр.доп}}{n_T}$ до номінального струму реле, тобто $I_{\Theta} = \frac{I_{тр.доп}}{n_T \cdot I_{р.ном}}$.

У розрахунках вважають $I_{тр.доп} = 1,1 \cdot I_{д.ном}$. Тоді

$$I_{\Theta} = \frac{1,1 \cdot I_{д.ном}}{n_T \cdot I_{р.ном}}.$$

Остаточно, з урахуванням похибок вимірювання струму і коефіцієнта повернення, струм повного навантаження

$$I_{\Theta} = \frac{1,12 \cdot I_{д.ном}}{n_T \cdot I_{р.ном}}.$$

В умові сказано, що $I_{р.ном} = 1$ А, тому $I_{\Theta} = \frac{1,12 \cdot I_{д.ном}}{n_T}$.

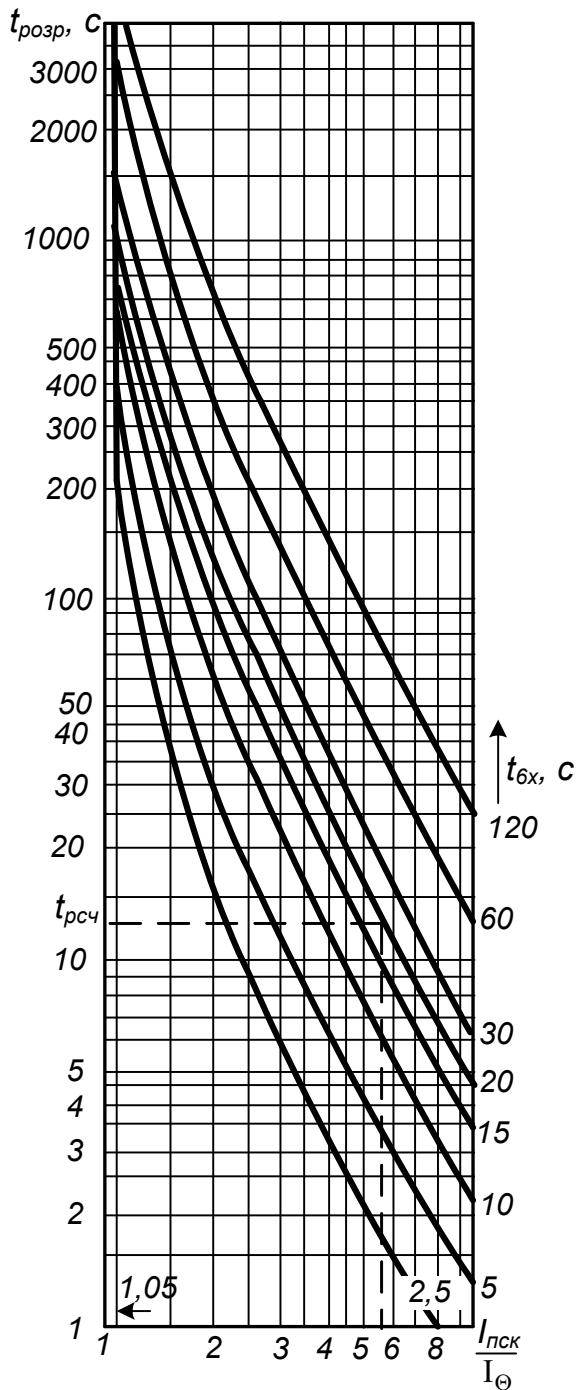


Рисунок Б.3 – До прикладу Б.13.
Криві спрацювання теплового захисту з попереднім навантаженням $1,0I_{\Theta}$ («гарячі криві»), $p = 50\%$

Пусковий струм

$$I_{\text{пск}} = \frac{k_{\text{пск}} \cdot I_{\text{д.ном}}}{n_{\text{T}}}$$

Потрібне відношення

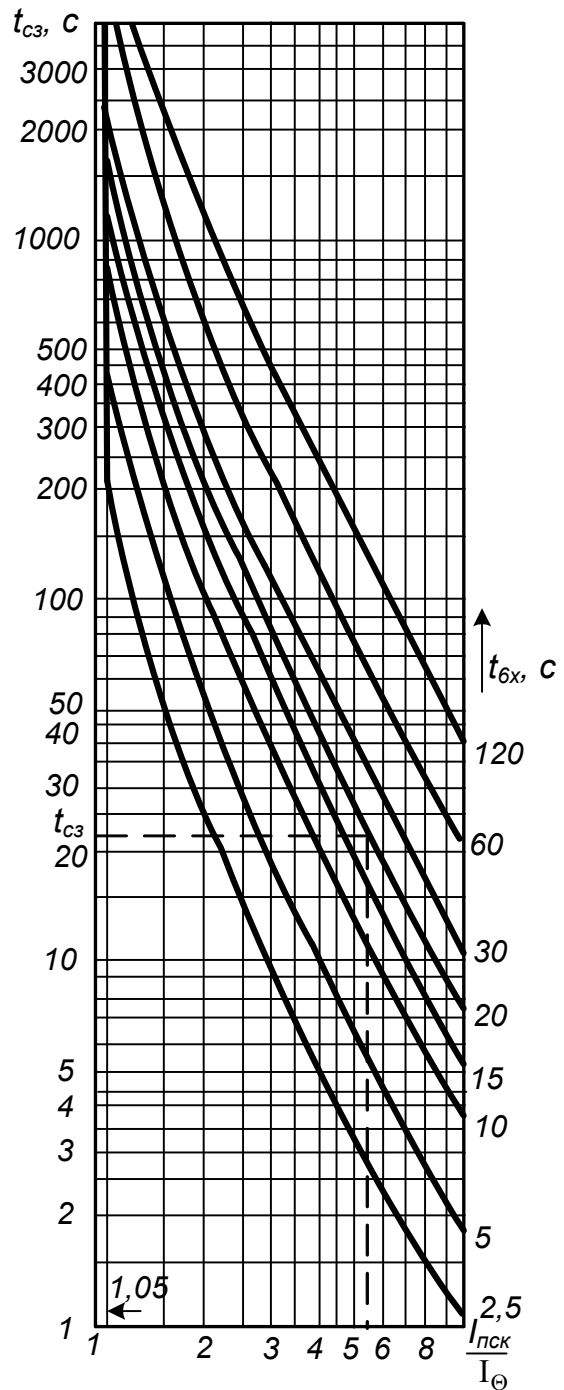


Рисунок Б.4 – До прикладу Б.13.
Криві спрацювання теплового захисту без попереднього навантаження («холодні криві»), $p = 0\%$

$$\frac{I_{\text{пск}}}{I_{\Theta}} = \frac{k_{\text{пск}} \cdot I_{\text{д.ном}}}{1,12 \cdot I_{\text{д.ном}}} = \frac{k_{\text{пск}}}{1,12}.$$

При $k_{\text{п}} = 6$ відношення $\frac{I_{\text{пск}}}{I_{\Theta}} = 5,4$.

2. Для визначення розрахункового часу $t_{\text{розр}}$ рекомендується використовувати співвідношення $t_{\text{розр}} = (1,3 \dots 1,5)t_{\text{пск}}$ або $t_{\text{розр}} = 1,3 \cdot 10 = 13$ с.

Далі вибираємо характеристику t_{6x} за кривими спрацьовування теплового захисту з попереднім навантаженням і коефіцієнтом крутизни $p = 50\%$ (див. рис. Б.3).

При кратності $\frac{I_{\text{пск}}}{I_{\Theta}} = 5,4$ і $t_{\text{розр}} = 13$ с – характеристика $t_{6x} = 20$ с.

3. За характеристиками спрацьовування захисту без попереднього навантаження (див. рис. Б.4.) для $\frac{I_{\text{пск}}}{I_{\Theta}} = 5,4$ і обраним значенням $t_{6x} = 20$ с визначаємо час спрацьовування захисту під час пуску електродвигуна з холодного стану $t_{\text{с.з}} = 22$ с.

Струм спрацьовування реле при $n_{\text{T}} = 100/5$

$$I_{\text{с.р}} = 1,05 \cdot I_{\Theta} = 1,05 \cdot \frac{1,12 \cdot I_{\text{д.ном}}}{n_{\text{T}}} = 1,05 \cdot \frac{1,12 \cdot 91}{20} = 5,4 \text{ А.}$$

Додаток В
Технічні дані реле часу

Тип реле	Діапазон витримок часу	Діапазон напруг живлення		Діапазон комутувальних напруг		Діапазон комутувальних струмів		Число контактів замик./розмик./перемик.
		Пост. струму	Змін. струму	Пост. струму	Змін. струму	Пост. струму	Змін. струму	
BC-43-3	1 с...60 год.	---	110...240	12...220	12...380	0,04...4		-/-/3
BC-43-6	1 с...60 год.	---	110...240	12...220	12...380	0,04...4		-/-/6
BC-44-1	28,7 с...	---	110...240	12...220	12...380	0,04...4		11/-/-
BC-44-2	125,17 год.	---	110...240	12...220	12...380	0,04...4		12/-/-
BC-33	0,2 с...60 год.	---	24...240	24...220	24...380	0,04...4		1/1/1
ВЛ-50	2...200 с	50...110	---	27...110	---	0,05...4		1/1/-
ВЛ-51	2...200 с	27	---	27...110	---	0,05...4		1/1/-
ВЛ-52	1...100 хв	75...110	---	27...110	---	0,05...4		1/1/-
ВЛ-54	0,1 с...30 год.	---	220	24...220	24...220	0,01...4	0,01...4	-/-/2
ВЛ-55	0,1...30 с	---	220	24...220	24...220	0,01...4	0,01...4	-/-/2
ВЛ-56	0,1 с...100 год.	24...220	110...220	24...220	24...380	0,01...4		-/-/3
ВЛ-59	0,1 с...1000 с	24...220	110...240	24...220	24...220	0,02...4	0,02...4	-/-/1
ВЛ-63	0,1 с...30 год.	24	---	5...30	---	0,12	---	1 ключ
ВЛ-64	0,1 с...30 год.	24...220	110...240	24...250	24...380	0,01...4		1/1/-
ВЛ-65	0,1 с...30 год.	---	110...220	24...250	24...380	0,01...4		1/1/-
ВЛ-66	0,1 с...99 год.	24...220	110...240	24...250	24...380	0,01...4		1/1/-
ВЛ-67	0,1 с...99 год.	24...220	110...240	24...250	24...380	0,01...4		1/1/-
ВЛ-68	0,1с...99,9год	24...220	110...240	24...250	24...380	0,01...4		1/1/-
ВЛ-69	0,1с...99с	24...220	110...240	24...250	24...380	0,01...4		1/1/-
ВЛ-70	0,1с...100 год	24...220	110...380	24...220	24...380	0,01...4		1/1/-
ВЛ-71	0,1...30с	110...220	110...380	24...220	24...380	0,01...4		1/1/-
ВЛ-73	0,1 с...99 год.	24...110	24...220	24...250	24...250	0,01...5		1/1/1
ВЛ-74	0,1 с...99 год.	24...110	24...220	24...250	24...250	0,01...5		-/-/2
ВЛ-75	0,1 с...99 год.	24...110	24...220	24...250	24...250	0,01...5		-/-/2
ВЛ-76	0,1 с...99 год.	24...110	24...220	24...250	24...250	0,01...5		-/-/2
ВЛ-77	0,1 с...99 год.	24...110	24...220	24...250	24...250	0,01...5		-/-/2
ВЛ-78	0,1 с...99 год.	110	110...220	24...250	24...250	0,01...5		1/1/-
ВЛ-79	0,1 с...29,7 с	110, 220	110...220	24...250	24...250	0,01...5		-/-/2
ВЛ-81	0,1 с...99 год.	24...220	110...240	24...220	24...380	0,01...4		-/-/3
РВ-01	0,1 с...30 с	24...220	100...380	24...220	100...380	0,01...2,5		-/-/2

PB-03	0,15 с...20 с	---	100...380	---	100...380	0,01...2,5		-/2/1
PB-100	0,1 с...20 с	24...220	---	24...250	24...250	0,01...1	0,01...5	1/-/1
PB-200	0,1 с...20 с	---	100...380	24...250	24...250	0,01...1	0,01...5	1/-/1
ZLD	Тижневе	---	220	---	0...220	---	0,01...8	-/-/1
MIL-72	Добове	---	200...240	0...250	0...250	8	16	-/-/1
MIL-2002	Добове	---	200...240	0...250	0...250	2	10	-/-/2
2PBM	Добове	---	220	0...220	0...220	1,5	15	2/-/-
PBП72М	0,4...180с	---	12...660	---	24...660	16		1..2/1..2/-
PЭB-811	0,25...1,5 с	24...220	---	---	---	---		1..2/1..2/-
PЭB-811T	0,25...1,5 с	24...220	---	---	---	---		1..2/1..2/-
PЭB-812	0,8...2,8 с	24...220	---	---	---	---		1..2/1..2/-
PЭB-812T	0,8...2,8 с	24...220	---	---	---	---		1..2/1..2/-
PЭB-813	2...3,8 с	24...220	---	---	---	---		1..2/1..2/-
PЭB-813T	2...3,8 с	24...220	---	---	---	---		1..2/1..2/-
PЭB-814	3...5,5 с	24...220	---	---	---	---		1..2/1..2/-
PЭB-814T	3...5,5 с	24...220	---	---	---	---		1..2/1..2/-
PЭB-815	0,25...0,9 с	24...220	---	---	---	---		1..2/1..2/-
PЭB-816	0,5...1,7 с	24...220	---	---	---	---		1..2/1..2/-
PЭB-817	1,2...2,7 с	24...220	---	---	---	---		1..2/1..2/-
PЭB-818	2...3,8 с	24...220	---	---	---	---		1..2/1..2/-
PЭB-881	4,5...9 с	24...220	---	---	---	---		1..2/1..2/-
PЭB-882	7...13 с	24...220	---	---	---	---		1..2/1..2/-
PЭB-883	3...7 с	24...220	---	---	---	---		1..2/1..2/-
PЭB-884	5...11 с	24...220	---	---	---	---		---

Реле часу PB-01

Реле часу PB-01 призначені для застосування в пристроях релейного захисту та системної автоматики електротехнічних об'єктів змінної напруги до 380 В частоти 50 і 60 Гц та постійної напруги до 220 В. Реле випускається в уніфікованому корпусі «СУРА» І габариту. Реле часу призначене для переднього чи заднього приєднання зовнішніх провідників лише гвинтом. Габаритні розміри реле часу – 66 × 152 × 181 мм. Реле мають два перемикальних контакти з витримкою часу. Маса реле – не більше 1 кг.

Діапазон витримок часу реле	0,1...3,0 с, 0,1...30 с
Напруга живлення реле, В постійного струму змінного струму 50 і 60 Гц	24, 48, 60, 110, 220 100, 127, 220, 380
Напруга реле, що комутується, В постійного струму змінного струму 50 і 60 Гц	24...220 100...380
Струм реле, що комутується, А	0,01...2,5

Реле часу РВ-03

Реле часу РВ-03 призначені для застосування в різних схемах релейного захисту і системної автоматики в ланцюгах змінного однофазного струму з метою отримання витримки часу після відключення напруги живлення або стрибкоподібного зниження його нижче 10 ... 55% від номінального значення. Реле випускається в уніфікованому корпусі «СУРА» І габариту. Габаритні розміри реле – 66 × 152 × 181 мм. Маса реле – не більше 1,2 кг. Реле призначене для переднього чи заднього приєднання зовнішніх провідників лише гвинтом. Реле мають один перемикальний контакт без нормованої витримки часу і два розмикальні контакти з незалежно регульованою витримкою часу на замикання.

Діапазон витримок реле	0,15...3,0 с, 0,5...10 с, 1,0...20 с
Напруга живлення реле, В, змінного струму 50 и 60Гц	100, 127, 220, 380
Струм реле, що комутуєтьсяА	0,01...2,5

Реле часу серій РВ-100 та РВ-200

Реле часу серій РВ-100 та РВ-200 застосовуються в схемах захисту та автоматики для отримання регульованої витримки часу.

Контактні пристрої реле типів РВ114, РВ124, РВ134, РВ144, РВ217, РВ227, РВ237, РВ247 мають один кінцевий замикальний контакт з регульованою витримкою часу і один миттєвий перемикальний;

Реле типів РВ113, РВ127, РВ133, РВ143 – один кінцевий з регульованою витримкою часу та один миттєвий замикальний контакти;

Реле типів РВ112, РВ128, РВ132, РВ142, РВ218, РВ228, РВ238, РВ248 – один ковзний і один кінцевий замикальні контакти з регульованою витримкою часу, а також один миттєвий перемикальний;

Реле типів РВ215, РВ225, РВ235, РВ245, що діють при зникненні напруги, – один ковзний і один кінцевий замикальні контакти з регульованою витримкою часу, а також один миттєвий перемикальний контакт;

Реле типів РВ215К, РВ225К, РВ235К, РВ245К – один ковзний та один кінцевий замикальні контакти з регульованою витримкою часу.

Тип реле	Діапазон витримок часу реле, с	Тип реле	Діапазон витримок часу реле, с
реле РВ112	0,1...1,3	реле РВ245	1...20
реле РВ128	0,25...3,5	реле РВ215К	0,1...1,3
реле РВ132	0,5...9	реле РВ225К	0,25...3,5
реле РВ142	1...20	реле РВ235К	0,5...9
реле РВ113	0,1...1,3	реле РВ245К	1...20
реле РВ127	0,25...3,5	реле РВ217	0,1...1,3
реле РВ133	0,5...9	реле РВ227	0,25...3,5
реле РВ143	1...20	реле РВ237	0,5...9
реле РВ124	0,25...3,5	реле РВ247	1...20
реле РВ134	0,5...9	реле РВ218	0,1...1,3
реле РВ144	1...20	реле РВ228	0,25...3,5
реле РВ215	0,1...1,3	реле РВ238	0,5...9
реле РВ225	0,25...3,5	реле РВ248	1...20
реле РВ235	0,5...9		

Основні характеристики реле

Напруга живлення реле, постійного струму змінного струму 50 та 60 Гц	24...220 100...380
Комутована напруга реле, постійного струму змінного однофазного струму змінного трифазного струму	24...220 100...380 100...220
Максимальний допустимий струм через контакти реле, А для замикаючих із витримкою часу для миттєвих контактів	5 3
Габаритні розміри реле, мм, не більше	67 × 128 × 110
Маса реле, кг, не більше	1,5

Програмний годинник ZLD

Програмні годинники ZLD призначені для автоматичного програмного управління пристроями та приймачами електричної енергії, а також для спільної роботи з двотарифними лічильниками електроенергії. Вони можуть використовуватися для програмного включення та вимкнення обігрівального обладнання, зовнішнього та внутрішнього освітлення будівель, управління дощувальними апаратами, кондиціонерами в теплицях тощо.

Основні характеристики

Напруга живлення, (при частоті 50...60 Гц), В	220
Максимальний струм, що комутується, А	8
Потужність, Вт	0,3
Добово-тижнева програма	6 програм ввімкнення та 6 програм вимкнення
Добовий хід годин, с	±0,5
Дозвіл налаштування, хвилин	1
Резервне джерело живлення	внутрішній акумулятор
Габаритні розміри, мм	90 × 150 × 60
Маса, кг	0,28

Програмне реле часу МІЛ-72

Програмне реле часу МІЛ-72 призначене для автоматичного управління електричним колом шляхом комутації цього кола за тимчасовими програмами з добовим циклом, що повторюється.

Основні характеристики

Номинальна напруга живлення реле, (при частоті 45...60 Гц), В	200...240
Добова хода реле, не більше, с	± 2,5
Резерв ходу при перервах електроживлення реле, годин	70
Максимальний струм контактів реле, А	16
Потужність реле, що споживається, Вт, не більше	2
Кількість каналів реле	1
Маса реле, кг, не більше	0,165
Габаритні розміри реле, мм, не більше	72×72×52

Програмне реле часу МІЛ-2002

Програмне реле часу МІЛ-2002 призначене для автоматичного управління двома незалежними електричними ланцюгами шляхом комутації цих ланцюгів за тимчасовими програмами з повторюваним добовим циклом.

Основні характеристики реле

Номинальна напруга живлення реле, (за частоти 45...65 Гц), В	200...240
Добова хода реле, не більше, с	± 2,5
Резерв ходу при перервах електроживлення реле, годин	70
Максимальний струм контактів реле, А	10
Споживана реле потужність, Вт, не більше	2
Кількість каналів реле	2
Маса реле, кг, не більше	0,185
Габаритні розміри реле, мм, не більше	72 × 72 × 62

Програмне реле часу 2РВМ

Програмне реле часу 2РВМ призначене для автоматичного управління двома незалежними електричними колами шляхом комутації цих ланцюгів за тимчасовими програмами добовим циклом, що повторюється. Завдання програм реле здійснюється установленням штифтів у відповідні різьбові отвори програмного диска.

Основні характеристики реле

Номинальна напруга живлення реле, (при частоті 50 Гц), В	220
Добова хода реле, не більше, хвилин	± 2
Резерв ходу при перервах електроживлення реле, годин	24
Похибка видачі команд без урахування добового ходу реле, хвилин	± 5
Число контактів у кожній програмі реле	1
Потужність реле, Вт, не більше	0,4
Максимальний струм контактів реле, А	15
Максимальний постійний струм реле за напруги 12...220В, А	1,5
Маса реле, кг, не більше	1,5
Габаритні розміри реле, мм, не більше	180 × 175 × 125

Реле часу пневматичне РВП-72М

Реле часу пневматичне РВП-72М (заміна РКВ-11) призначене для передачі команд з одного електричного кола в інше з певними попередньо встановленими витримками часу.

Реле має 5 типовиконань:

Реле РВП-72М-3121 з однією пневматичною приставкою з початком відліку витримки часу після замикання контакту керування;

Реле РВП-72М-3221 з однією пневматичною приставкою з початком відліку витримки часу після замикання контакту управління та додатковими контактами (1 нормально замкнутий та 1 нормально розімкнений), що спрацьовують без витримок часу;

Реле РВП-72М-3122 з однією пневматичною приставкою з початком відліку витримки часу після розмикання контакту управління;

Реле РВП-72М-3222 з однією пневматичною приставкою з початком відліку витримки часу після розмикання контакту управління та додатковими контактами (1 нормально замкнутий та 1 нормально розімкнений), що спрацьовують без витримок часу;

Реле РВП-72М-3323 з двома пневматичними приставками, з початком відліку витримки часу після замикання та розмикання контакту управління.

Основні характеристики реле

Напруга живлення реле змінного струму частоти 50 (60) Гц, В	12, 24, 36, 110, 115, 127, 220, 230, 240, 380, 400, 415, 440, 500, 550, 660
Діапазон витримки часу реле, с	0,4...180
Номинальний струм контактів реле, А	16
Потужність реле, що споживається, ВА, не більше	30
Час повернення реле, с, не більше	0,4
Час підготовки реле, с, не більше	2,0
Маса реле, кг, не більше	1,2
Габаритні розміри реле, мм	180 × 105 × 72

Реле часу РЕВ-811...818

Реле часу РЕВ-811...818 застосовуються як електромагнітні реле часу в колах постійного струму. Втягувальні котушки реле виготовляються на номінальні напруги: 24, 48, 110 та 220 В.

Реле для тепловозів виготовляються на номінальну напругу 75 і 110 В.

Реле поставляються відрегульованими на максимальну витримку часу, передбачену для цього типу реле. У разі потреби регулювання проводиться на місці замовником.

Основні характеристики реле

Тип реле	Кількість контактів реле замик / розмик	Межі регулювання витримки часу реле, с, отримані:	
		Відключенням котушки реле	Закорочуванням котушки реле
реле РЭВ-811	1 / 1	0,25...1	0,4...1,5
реле РЭВ-811Т	1 / 1	0,25...1	0,4...1,5
реле РЭВ-812	1 / 1	0,8...2,5	0,9...2,8
реле РЭВ-812Т	1 / 1	0,8...2,5	0,9...2,8
реле РЭВ-813	1 / 1	2...3,5	2,2...3,8
реле РЭВ-813Т	1 / 1	2...3,5	2,2...3,8
реле РЭВ-814	1 / 1	3...5	3,8...5,5
реле РЭВ-814Т	1 / 1	3...5	3,8...5,5
реле РЭВ-815	2 / 2	0,25...0,6	0,4...0,9
реле РЭВ-816	2 / 2	0,5...1,5	0,6...1,7
реле РЭВ-817	2 / 2	1,2...2,5	1,3...2,7
реле РЭВ-818	2 / 2	2...3,5	2,2...3,8

Реле РЕВ-880

Реле РЕВ-880 застосовуються в схемах автоматичного керування як реле часу.

Втягувальні котушки реле виготовляються на номінальні напруги 24, 48, 110 та 220 В.

Реле випускаються з 1"З" та 1"Р" або з 2"З" і 2"Р" контактами. Контакти реле дозволяють на місці експлуатації шляхом нескладного перескладання одних і тих же деталей змінити виконання контактів у межах загальної кількості 2 або 4 (застосування 4-х "Р" контактів не рекомендується, тому що при цьому надійна робота реле не забезпечується).

Приєднання зовнішніх проводів до котушок та контактів реле – передне.

У таблиці наведено для кожного типу реле межі регулювання витримки часу, що отримані при відключенні котушки реле від мережі та закорочуванні котушки реле.

Тип реле	Число контактів реле замик / розмик	Межі регулювання витримки часу реле, отримані		Примітки
		відключенням котушки реле	закороченням котушки реле	
реле РЭВ-881	1 / 1	4,5...8	5...9	
реле РЭВ-882	1 / 1	7...12	8...13	
реле РЭВ-883	2 / 2	3...6	4...7	
реле РЭВ-884	2 / 2	5...10	6...11	При 3-х "Р" контактах межі регулювання витримки часу реле знижуються

Габарити реле, мм 150 × 250 × 220

Маса реле, не більше 6,5 кг

Реле часу ВС

Реле часу ВС-33

Реле часу ВС-33 – електромеханічне, одноланцюгове, однокомандне призначене для комутації електричних кіл у пристроях автоматики з певними заздалегідь встановленими витримками часу.

Основні характеристики реле часу ВС-33

Номінальна напруга живлення змінного струму частоти 50 і 60 Гц, В	24, 40, 110, 220, 230, 240
Максимальна сила струму через контакти, А	4
Габаритні розміри, мм ВС-33-1 ВС-33-2	46 × 71 × 125 50 × 75 × 133
Маса реле, кг, не більше ВС-33-1 ВС-33-2	0,38 0,45
Діапазони витримок часу	0,2...6 с, 2...60 с, 0,2...60 хв, 2...60 хв, 0,2...6 год, 2...60 год

Реле часу ВС-43

Реле часу ВС-43 призначені для передачі команд з одного електричного кола в інше з певними попередньо встановленими витримками часу. Реле виготовляються з переднім приєднанням проводів у двох конструктивних виконаннях:

- ВС-43-3-з трьома незалежними колами з витримкою часу;
- ВС-43-6-з шістьма незалежними колами з витримкою часу.

Основні характеристики реле часу ВС-43

Номінальні напруги живлення змінного струму частоти 50 Гц, В	110, 220, 230, 240
Максимальна сила струму через контакти, А	4
Маса реле, кг, не більше ВС-43-3 ВС-43-6	1,5 1,8
Габаритні розміри, мм ВС-43-3 ВС-43-6	135 × 120 × 84 5 × 120 × 120
Діапазони витримок часу	(1...60)с, (0,159) хв, (1...60) хв, (0,15...9) год, (1...60) год

Реле часу ВС-44

Реле часу ВС-44 призначені для передачі команд з одного електричного кола в інше згідно з попередньо встановленою програмою по замкненому циклу, що повторюється, і застосовуються в схемах автоматичного управління.

Реле виготовляються у таких виконаннях:

- ВС-44-1, ВС-44-3-з дистанційним пуском та автоматичним зупиненням в кінці кожного циклу;
- ВС-44-2, ВС-44-4-з пуском при подачі напруги живлення, циклами, що безперервно повторюються, і зупином при знятті живлення.

Основні характеристики реле часу ВС-44

Номін. напруги живлення змінного струму частоти 50 Гц, В	110, 220, 230, 240
Максимальна сила струму через контакти, А	4
Габаритні розміри, мм ВС-44-1, ВС-44-2	198 × 127 × 128
ВС-44-3, ВС-44-4	145 × 125 × 128
Маса реле, кг, не більше ВС-44-1	1,8
ВС-44-2	1,7
ВС-44-3	1,4
ВС-44-4	1,3
Тривалість циклу	28,7с...125год17хв

*Електронне навчальне видання
комбінованого використання.
Можна використовувати в локальному та мережному режимах*

**Тептя Віра Володимирівна
Комар Вячеслав Олександрович
Нетребський Володимир Васильович
Рубаненко Олена Олександрівна**

РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЧАСТИНА 2

Навчальний посібник

Рукопис оформила *В. Тептя*

Редактор *В. Дружиніна*

Оригінал-макет виготовив *О. Ткачук*

Підписано до видання 14.09.2022.
Гарнітура Times New Roman.
Зам. № P2022-075.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua;
E-mail: irvc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.