

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Факультет інженерії

Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

**до магістерського проекту
освітньо-кваліфікаційного рівня магістр**

галузі знань 14 Електрична інженерія

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

на тему **Проектування напівпровідникових реле струму і напрямку
потужності для систем максимального струмового
спрямованого захисту**

Виконав: студент групи

ЕЕ-22 зм

Котов Л.
(прізвище, та ініціали)



(підпис)

Керівник Мелконова І.В.
(прізвище та ініціали)

.....
(підпис)

Завідувач кафедри Руднєв Є.С.
(прізвище та ініціали)

.....
(підпис)

Рецензент Мазнєв Є.О.
(прізвище та ініціали)

Київ 2023

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Факультет _____ інженерії _____
 Кафедра _____ електричної інженерії _____
 Освітньо-кваліфікаційний рівень _____ магістр _____
 (бакалавр, спеціаліст, магістр)
 Галузь знань _____ 14 Електрична інженерія _____
 (шифр і назва)
 Спеціальність _____ 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка _____
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри
«Електрична інженерія»**

_____ Руднев Є.С.
 “ _____ ” _____ 2023 року

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ**

_____ Котов Леонід Миколайович _____
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Проектування напівпровідникових реле струму і напрямку потужності для систем максимального струмового спрямованого захисту

Керівник проекту (роботи) _____ Мелконова Інна Вікторівна, к.т.н., доц., _____
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “23” жовтня 2023 року
 №564/15.23-С

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____ 11.12.2023 _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Вихідні данні визначені в переліку питань, що підлягають розробці в магістерській роботі

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Аналітичний огляд засобів максимального струмового спрямованого захисту. Аналіз завдання на магістерську роботу та постановка задачі дослідження. Визначення параметрів перехідного процесу методом еквівалентних ЕРС. Розрахунок методом типових кривих зміни в часі періодичної складової струму КЗ для точки пошкодження. Визначення методом симетричних складових для заданого виду несиметричного КЗ напруги та струму в точці КЗ та побудова векторних діаграм. Зіставлення і аналіз отриманих розрахункових величин.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників)
Плакати, що пояснюють суть магістерської роботи, в кількості 3 шт.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділи 1-5</i>	<i>доц. Мелконова І.В.</i>		

7. Дата видачі завдання 06.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проектування	Строк виконання етапів	Примітка
1.	<i>Аналітичний огляд засобів максимального струмового спрямованого захисту</i>	<i>01.10.2023</i>	
2.	<i>Аналіз завдання на магістерську роботу та постановка задачі дослідження.</i>	<i>10.10.2023</i>	
3.	<i>Визначення параметрів перехідного процесу методом еквівалентних ЕРС.</i>	<i>2.11.2023</i>	
4.	<i>Розрахунок методом типових кривих зміни в часі періодичної складової струму КЗ для точки пошкодження.</i>	<i>3.11.2023</i>	
5.	<i>Визначення методом симетричних складових для заданого виду несиметричного КЗ напруги та струму в точці КЗ та побудова векторних діаграм.</i>	<i>10.11.2023</i>	
6.	<i>Зіставлення і аналіз отриманих розрахункових величин.</i>	<i>2.12.2023</i>	
7.	<i>Оформлення графічного матеріалу.</i>	<i>5.12.2023</i>	
8.	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>15.12.2023</i>	
9.	<i>Захист магістерської роботи</i>	<i>22.12.2023</i>	

Студент

Керівник проекту (роботи)

Котов Л.

(підпис)

Мелконова І.В.

(прізвище та ініціали)

Примітки:

1. Форму призначено для видачі завдання студенту на виконання дипломного проекту (роботи) і контролю за ходом роботи з боку кафедри
2. Розробляється керівником дипломного проекту (роботи). Видається кафедрою.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра містить 79 сторінок, 36 рисунків, 23 літературних джерела, 4 сторінки додатків.

Електроенергетична система, максимальний струмовий спрямований захист, реле максимального струму, реле напрямку потужності, індукційне реле, самохід, напівпровідникове реле, вимірювальний перетворювач, аналоговий перемножувач сигналів, інтегратор, виконавчий пристрій.

У кваліфікаційній роботі магістра спроектовані напівпровідникові реле струму і напрямку потужності для систем максимального спрямованого струмового захисту. На відміну від струмового захисту струмовий спрямований завдяки реле напрямку потужності реагує не лише на абсолютне значення струму в елементі, що захищається, але і діє залежно від напрямку потужності при коротких замиканнях.

Відмінністю розробленого напівпровідникового реле напрямку потужності від тих, що випускаються серійно, являється інший принцип визначення знаку активної потужності, ґрунтований на використанні аналогового перемножувача сигналів, що дозволило спростити схему реле і підвищити надійність роботи.

У роботі виконаний огляд аналогів проектування, розроблені структурні і принципові схеми, запропонована методика перевірки і налаштування реле.

РЕФЕРАТ

An explanation message to qualifying work of master's degree contains 79 pages, 36 pictures, 23 literary sources, 4 pages of appendixes.

Electroenergy system, maximal current directed defence, relay of peak current, relay of direction of power, induction relay, self-operation, semiconductor relay, measuring transformer, an analog multiplier of signals, integrator, executive device..

In qualifying work of master's degree the semiconductor relays of current and direction of power are projected for the systems of the maximal directed current defence. Unlike current defence current directed due to the relay of direction of power reacts not only on the absolute value of current in the protected element but also operates depending on direction of power at short circuits.

By the difference of the worked out semiconductor relay of direction of power from mass-produced, there is another principle of determination of sign of active-power, based on the use analog multiplier of signals, that allowed to simplify the chart of relay and promote reliability of work.

The review of planning analogues is in-process executed, flow and fundamental diagrams are worked out, methodology of check and tuning of relay offers.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1. Аналітичний огляд засобів максимального струмового спрямованого захисту.....	11
1.1. Принцип дії струмового спрямованого захисту.....	11
1.2. Функціональна схема спрямованого захисту.....	18
1.3. Конструкції індукційних реле напряму потужності	20
1.4. Напівпровідникові реле напряму потужності	30
1.5. Схеми включення реле напряму потужності.....	36
1.6. Конструкції реле струму максимального струмового захисту.....	38
2. Аналіз завдання на магістерську роботу та розробка структурних схем реле напряму потужності і реле максимального струму.....	43
2.1. Основні задані характеристики реле напряму потужності і реле максимального струму.....	43
2.2. Вибір принципу роботи реле напряму потужності	44
2.3. Розробка структурної схеми реле напряму потужності.....	46
2.4. Розробка структурної схеми реле максимального струму.....	47
3. Проектний розділ.....	50
3.1. Розробка принципової електричної схеми реле напряму потужності.....	50
3.2. Розрахунок функціональних блоків принципової електричної схеми реле напряму потужності.....	50
3.2.1. Вимірювальний пристрій.....	50
3.2.2. Фільтр низької частоти.....	53
3.2.3. Підсилювач-обмежувач	54
3.2.4. Аналоговий перемножувач сигналів	56
3.2.5. Інтегратор.....	57

	7
3.2.6. Тригер Шмитта.....	60
3.2.7. Виконавчий пристрій.....	62
3.2.8. Вузол живлення	64
3.3. Принципова схема реле максимального струму.....	66
4. Технологічний розділ.....	73
4.1. Порядок установки і роботи реле напряду потужності.....	73
4.2. Налаштування реле напряду потужності	75
Висновок.....	77
Список літературних джерел.....	78
Додатки	

ВСТУП

Енергетична система є складною багатоланковою технічною системою, призначеною для виробництва, розподілу і споживання електроенергії. Процеси, що відбуваються в енергосистемі, відрізняються швидкістю, взаємозв'язаністю, єдністю процесів виробництва, розподілу і споживання електроенергії. Управління ними без застосування спеціальних технічних засобів, що називаються засобами автоматичного управління, у більшості випадків виявляється неможливим.

Управління енергосистемою при порушенні її нормальних режимів тісно пов'язано з роботою релейного захисту. Вимога безаварійності і надійності енергопостачання закладається вже на стадії проектування енергосистеми за рахунок оптимального вибору джерела електроенергії (вугілля, газ, вода або інше), розташування електростанцій, передачі потужності, обліку характеристик навантажень і перспектив їх зростання, способів регулювання напруги і частоти, плануванням режимів роботи і тому подібне. Та все ж повністю виключити факт відмови устаткування із-за коротких замикань не можна.

Актуальність теми. У енергетичних системах на електроустаткуванні електростанцій (ЕС) в електричних мережах і на електроустановках споживачів електроенергії можуть виникати ушкодження і не нормальні режими, які порушують роботу енергосистеми і споживачів енергосистеми і створюють можливість виникнення ушкоджень або розладу роботи енергосистеми. Для забезпечення нормальної роботи енергетичної системи і споживачів електроенергії необхідно можливо швидше виявляти і відділяти місце ушкодження від неушкодженої мережі, відновлюючи таким шляхом нормальні умови роботи енергосистеми і споживача.

У зв'язку з цим і виникає необхідність у створенні і застосуванні автоматичних пристроїв, що виконують вказані операції і що захищають

систему і її елементи від небезпечних наслідків ушкоджень і не нормальних режимів.

Релейний захист є основним видом електричної автоматики, без якої неможлива нормальна і надійна робота енергетичних систем. Вона здійснює безперервний контроль за станом і режимом роботи усіх елементів енергосистеми і реагує на виникнення ушкоджень і не нормальних режимів.

При виникненні ушкоджень захист виявляє і відключає від системи пошкоджену ділянку, впливаючи на вимикач. При виникненні не нормальних режимів захист виявляє їх і залежно від характеру порушення робить операції, необхідні для відновлення нормального режиму, або подає сигнал черговому персоналу. Релейний захист тісно пов'язаний з електричною автоматикою, призначеною для швидкого автоматичного відновлення нормального режиму і живлення споживачів. Правильне проектування релейного захисту і автоматики має бути обов'язкове комплексним.

Нині все частіше впроваджуються облаштування релейного захисту і автоматики (РЗА) з широким застосуванням інтегральних мікросхем, як у вимірювальних органах, так і в логічній частині. Застосування інтегральних мікросхем (ІМС) зробило можливою реалізацію складніших алгоритмів вимірювальних і пускових органів. Ефективніші характеристики спрацьовування дозволяють підвищити відстроєність захистів від режимів без вимог до спрацьовування при задовільній чутливості до КЗ з урахуванням умов резервування, що ускладнилися.

Наявність ряду недоліків індукційних реле, таких, як трудність відстроєння від "самохода", вібрація контактної системи, низька механічна стійкість, поставили питання про необхідність їх заміни на напівпровідникові реле.

Об'єкт дослідження – релейний захист і автоматика.

Предмет дослідження – засоби максимального струмового спрямованого захисту.

Мета роботи: удосконалити реле напряду потужності та реле струму, що використовуються у системах максимального струмового спрямованого захисту.

Для цього необхідно вирішити такі **завдання:**

- провести аналітичний огляд засобів максимального струмового спрямованого захисту;
- розробити структурні схеми напівпровідникових реле напряду потужності та реле струму;
- розробити електричні принципові схеми реле
- виконати розрахунок функціональних блоків принципових електричних схем реле;
- розробити методику налаштування та перевірки реле.

Методи дослідження - теоретичний аналіз і систематизація науково-теоретичних і методичних джерел; математичні методи; емпіричні методи (стандартизовані методики); методи обробки даних.

Структура роботи складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, списку джерел посилання та додатків.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЗАСОБІВ МАКСИМАЛЬНОГО СТРУМОВОГО СПРЯМОВАНОГО ЗАХИСТУ

1.1. Принцип дії струмового спрямованого захисту.

Для селективної дії в мережах з двостороннім живленням струмовий захист доповнюється вимірювальним органом напрямку потужності КВ. Такий захист називається *струмовим спрямованим*. Він, як і струмовий, зазвичай виконується триступеневим з відносною селективністю. Перша і друга ступені струмового захисту зберігають селективність в мережах з двостороннім живленням, тому вони можуть і не мати органів напрямку потужності.

На відміну від струмового захисту струмовий спрямований завдяки реле КВ реагує не лише на абсолютне значення струму в елементі, що захищається, але і на його фазу щодо напруги на шинах у місця установки захисту, тобто діє в залежності від напрямку потужності при коротких замиканнях. Селективна дія захисту забезпечується відповідним включенням органу напрямку потужності і вибором витримки часу. Розміщення захистів А1-А4 показано на рис. 1.1, а. З розгляду векторних діаграм напруги і струму (рис. 1.1, б, в) випливає, що фаза струму в місці включення захистів А2 і А3 щодо напруги U_B на шинах підстанції Б при переміщенні пошкодження з точки К1 в точку К2 дискретно змінюється на кут π . При побудові векторних діаграм за позитивний напрямок миттєвого значення струму прийнято напрямок від шин в сторону лінії (рис. 1.1,а).

Захист А2 необхідно виконати так, щоб він діяв на відключення тільки при кутах зсуву фаз між струмом і напругою, відповідних до короткого замикання в точці К₁, а захист А3 - при пошкодженні в точці К₂. З цього випливає, що реле напрямку потужності при підведенні до нього напруги $U_p = U_B$ та струму $I_p = I'_K$ (рис. 1.1,б) і $I_p = I''_K$ (рис. 1.1, в) повинно спрацьовувати при куті φ_p між U_p і I_p рівному φ_n і не спрацьовувати при $\varphi_p = (\varphi_n + \pi)$. При короткому замиканні в точці К₁ векторна діаграма напруги і

струму у місця установки захисту А4 така ж, як і у місця установки захисту А2, у зв'язку з чим приходить в дію і захист А4.

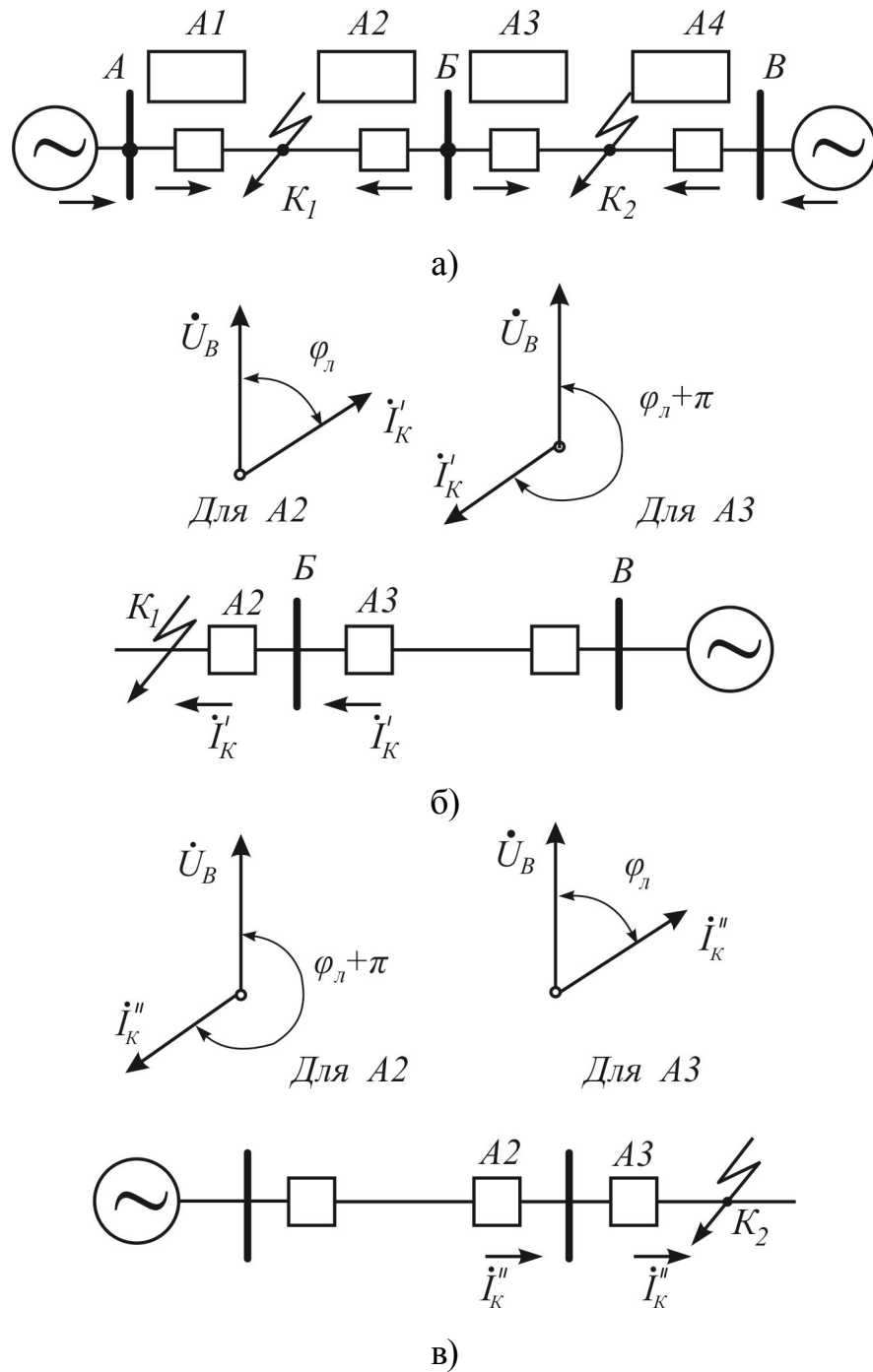


Рис. 1.1 - Розміщення захистів в мережі і векторні діаграми

Перший ступінь захисту. У струмового спрямованого захисту перший ступінь може бути ненаправленим, залишаючись звичайним струмовим відсіченням без витримки часу. Деякі особливості має струмовий спрямований захист на лініях постійного струму електрифікованого

транспорту. Для виконання струмового спрямованої захисту застосовують швидкодіючі поляризовані автоматичні вимикачі типу, наприклад АБ 2/3, повний час відключення яких не перевищує 0,08 с. Пост секціонування (ПС) розташовують приблизно в середині лінії (рис. 1.2).

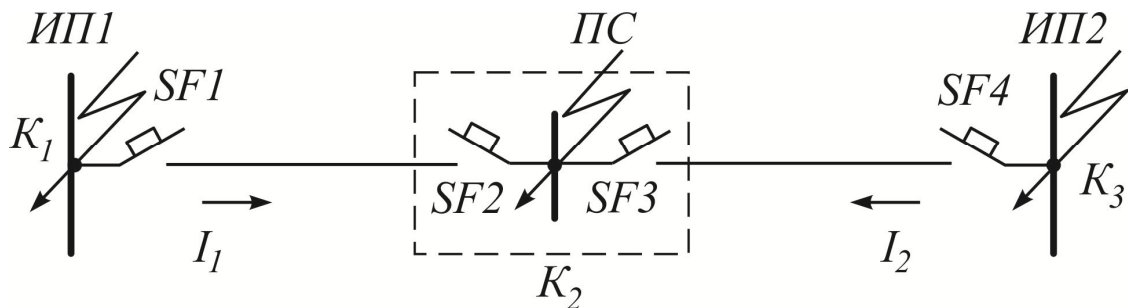


Рис. 1.2. Тягова мережа постійного струму

Для автоматичних вимикачів SF1-SF4 при виборі струму спрацьовування повинна виконуватися умова:

$$I_{\text{раб max}} + 150 \leq I_{\text{с.з}}^1 \leq I_{\text{К min}} - (250 \dots 350) \quad (1.1)$$

Струм визначається орієнтовно по ймовірному числу поїздів в межах лінії, що захищається, один з яких знаходиться в режимі рушання. Мінімальний струм ушкодження $I_{\text{К min}}$ - струм в місці установки автоматичного вимикача при КЗ визначається в розрахунковій точці. Для автоматичних вимикачів SF1 і SF4 розрахунковою точкою є точка K_2 , для вимикача SF2 - точка K_1 , а для SF3 - точка K_3 . При такому виборі струму спрацьовування можливі як неселективні дії автоматичних вимикачів SF1, SF4, так і наявність незахищених зон у поста секціонування.

Другий ступінь захисту. Умови вибору параметрів другої шаблі такі ж, як і умови вибору параметрів струмового відсічення з витримкою часу ненаправлених струмових захистів. Це означає, що другий ступінь захисту А1 (рис. 1.3) повинний бути відстроєний за часом від перших ступенів захистів А2 всіх ліній, що відходять від шин протилежної підстанції і від швидкодіючих захистів А3 трансформаторів, підключених до цих шин, а її струм спрацьовування повинен бути обраний по найбільшому з струмів КЗ $I_{\text{К}}^{(3)}$, що

проходять по лінії, що захищається, при пошкодженні в кінці захищаємих зон перших ступенів ліній, що відходять (точка K_1) і при короткому замиканні на шинах нижчої напруги трансформаторів (точка K_2).

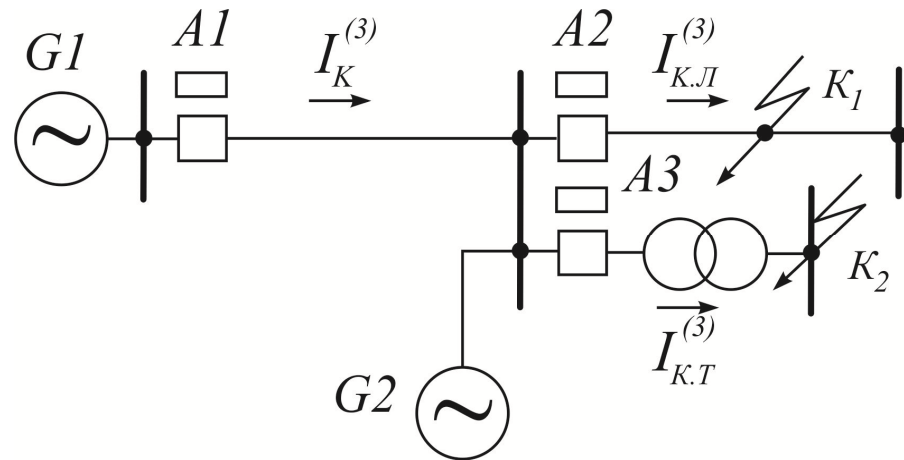


Рис.1.3. Облік коефіцієнтів струморозподілу при виборі струму спрацьовування

Витримка часу зазвичай не перевищує 0,5 с, а при виборі струму спрацьовування доводиться враховувати так звані струми «підживлення». З розгляду рис. 1.3 випливає, що при коротких замиканнях в точках K_1 і K_2 струм $I_K^{(3)}$, що проходить в місці установки захисту $A1$, виявляється менше струмів $I_{K.Л}^{(3)}$ і $I_{K.T}^{(3)}$ за рахунок струму «підживлення» від генератора $G2$. Відношення $I_K^{(3)} / I_{K.Л}^{(3)} = k_{p.л}$ і $I_K^{(3)} / I_{K.T}^{(3)} = k_{p.т}$ називаються *коефіцієнтами струморозподілу*. Їх необхідно врахувати при виборі струму спрацьовування другого ступеня захисту $A1$ лінії:

$$\begin{cases} I_{с.з.А1}^{II} \geq k_{отс}^{II} k_{p.л} I_{с.з.А2}^I \\ I_{с.з.А1}^{II} \geq k_{отс}^{II} k_{p.т} I_{к.т}^{(3)} \end{cases} \quad (1.2)$$

Третій ступінь захисту - максимальний струмовий спрямований захист. Вибір параметрів захисту розглянемо на прикладі мережі, показаної на рис. 1.4.

Вибір витримки часу. Стрілками вказано напрямок потужності, при якому органи напряду потужності дозволяють захисту спрацьовувати. З урахуванням цього захисту об'єднані в дві групи: $A2, A4, A6$ і $A5, A3, A1$. В

межах кожної групи витримки часу вибираються, як у максимального струмового захисту, за ступінчастим принципом.

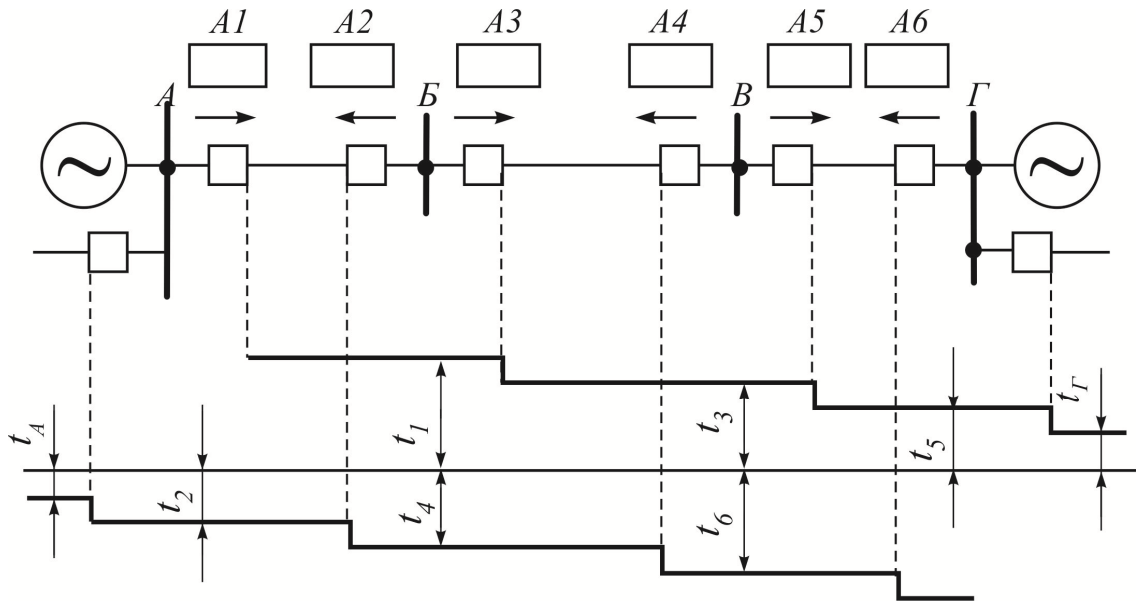


Рис. 1.4. Зустрічно-ступінчастий принцип вибору витримки часу максимального струмового спрямованого захисту

Мінімальну витримку часу мають захисти А2 і А5. Вони відстроюються по часу від захистів інших приєднань відповідно підстанцій А і Г. В кожній групі захистів витримка часу збільшується по мірі наближення до джерел живлення на величину Δt . На рис. 1.4 побудовані характеристики максимальних струмових спрямованих захистів з незалежною витримкою часу. Прийнято вважати, що витримки часу максимальних струмових спрямованих захистів вибираються за зустрічно-ступінчастим принципом.

У кільцевих мережах з одним джерелом живлення (рис. 1.5, а) витримки часу максимальних струмових спрямованих захистів також вибирають за зустрічно-ступінчастим принципом. При цьому, однак, захисти А2 і А5, встановлені на прийомних сторонах головних ділянок АБ і АВ, можна виконати такими, що діють без витримки часу.

Така можливість визначається напрямком потужності в цих захистах. При нормальній роботі, а також при зовнішніх коротких замиканнях на ділянках кільця і інших приєднаннях підстанцій Б і В, потужність у місця установки

захистів А2 і А5 завжди спрямована від ліній до шин, тому їх органи напрямку потужності перешкоджають спрацьовуванню.

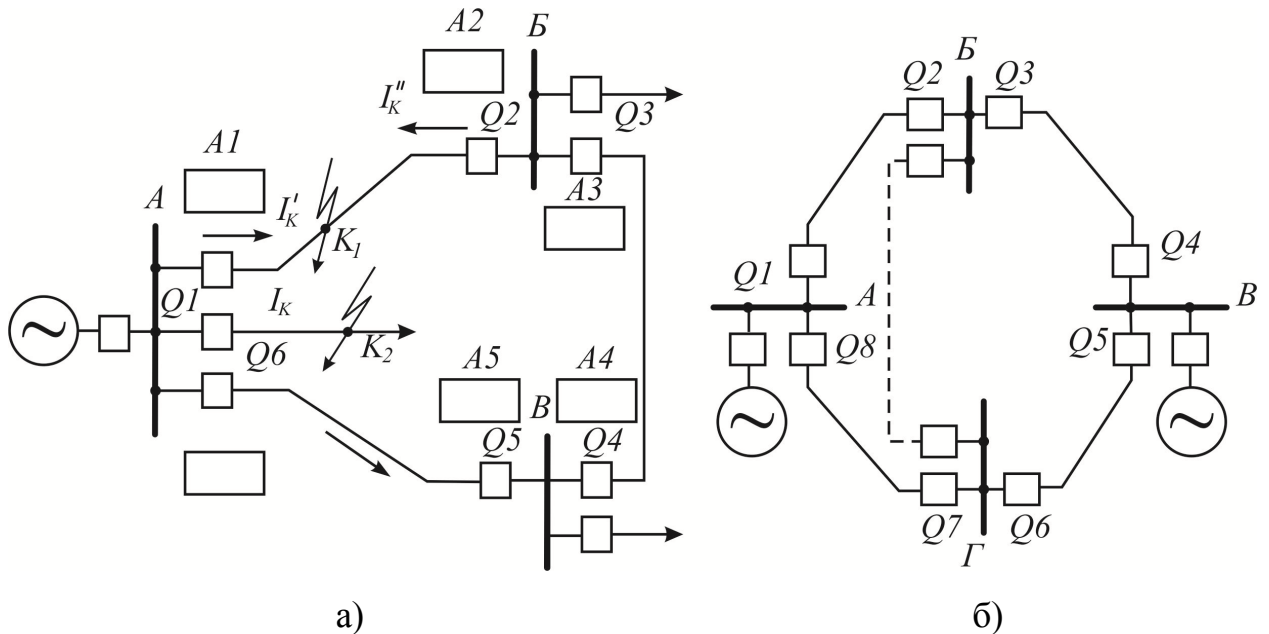


Рис. 1.5. Розміщення та особливості роботи максимального струмового спрямованого захисту в кільцевих мережах

На рис. 1.5,б показана кільцева мережа з двома джерелами живлення. У такій мережі зустрічно-ступінчастий принцип вибору витримки часу не забезпечує селективного дії захисту. Це важко здійснити і в кільцевій мережі з одним джерелом живлення, якщо є діагональні зв'язку, що не проходять через шини джерела живлення (зв'язок між шинами Б і Г, показана штриховою лінією).

Вибір струму спрацьовування. Струм спрацьовування максимального струмового спрямованого захисту, як і розглянутого вище максимального струмового (ненаправленого) захисту, повинен задовольняти умові

$$I_{с.з.}^{III} \geq (k_{отс}^{III} k_{с.з.П} / k_B) \cdot I_{раб.маx} \quad (1.3)$$

Однак на відміну від максимального струмового захисту при визначенні максимального робочого струму $I_{раб.маx}$ можна враховувати тільки максимальний режим, відповідний напрямку потужності від шин в лінію. При цьому може виявитися, що в режимі передачі потужності від лінії до шин

вимірювальний орган струму спрацює, проте захист в цілому не подіє через орган напряму потужності. Як вже зазначалося, в таких умовах знаходяться захисти А2 і А5 (рис. 1.5, а), встановлені з приймальної сторони головних ділянок кільцевої мережі.

При зниженні струму спрацьовування захисту необхідно враховувати можливість порушення ланцюгів напруги і внаслідок цього переорієнтацію органу напряму потужності. Тому в схему захисту включається пристрій контролю справності ланцюгів напруги, якщо струм спрацьовування вимірювального органу струму не відбудований від максимального навантаження при її напрямку до шин. Пристрій контролю справності ланцюгів напруги має при спрацьовуванні виводити захист з дії. Якщо режим максимального навантаження при її напрямку до шин проявляється рідко, то пристрій контролю справності ланцюгів напруги може діяти на сигнал. При цьому струм спрацьовування $I_{с.з.}^{III}$ повинен бути більше робочого струму при нормальній роботі незалежно від напрямку потужності:

$$I_{с.з.}^{III} \geq (k_{отс}^{III} / k_B) \cdot I_{раб.} \quad (1.4)$$

У мережах з глухозаземленими нейтраліями при короткому замиканні на землю можливі спрацьовування реле напрямку потужності, включених на струми неушкоджених фаз при напрямку потужності КЗ до шин. Тому при виборі струму спрацьовування захисту крім двох умов (1.3, 1.4) повинно виконуватися третя, за яким $I_{с.з.}^{III}$ повинен бути більше максимального струму непошкоджених фаз:

$$I_{с.з.}^{III} \geq k_{отс}^{III} \cdot I_{нп.маx} \quad (1.5)$$

Ця умова не враховується, якщо захист виконується так, що при коротких замиканнях на землю він автоматично виводиться з дії.

Як вже зазначалося, можливе порушення селективності захисту в режимі каскадної дії. Щоб уникнути цього при виборі струму спрацьовування необхідно узгоджувати чутливість захистів суміжних ділянок. Це узгодження,

як і вибір витримок часу, проводиться тільки для захистів, що входять в одну групу, наприклад А2, А4 і А6 (рис. 1.5, а), причому захист, що має меншу витримку часу, повинний мати і менший струм спрацьовування, тобто $I_{c.32}^{III} < I_{c.34}^{III} < I_{c.36}^{III}$. У загальному випадку в межах кожної групи захистів повинна виконуватися умова

$$I_{c.3.n}^{III} \geq k_{отс}^{III} \cdot I_{c.3.(n-1)}^{III} \quad (1.6)$$

Таким чином, струми спрацьовування, як і витримки часу, повинні задовольняти зустрічно-ступінчастому принципу і вибиратися за умовою, що дає більше значення струму.

Виходячи зі сказаного, можна сформулювати наступні принципи побудови селективного захисту в мережах з двостороннім живленням:

- захист повинен встановлюватися з обох сторін кожної ЛЕП і діяти на відключення при появі струму КЗ, якщо потужність КЗ позитивна (спрямована від шин в лінію);
- витримки часу захисту, що працюють при одному напрямку потужності, повинні узгоджуватися за зустрічно-ступінчастим принципом, наростаючи у напрямку до джерела живлення.

1.2. Функціональна схема спрямованого захисту

Спрямований струмовий захист (ССЗ) при КЗ повинен реагувати на значення струму і напрямок потужності в пошкоджених фазах ЛЕП, що захищається. Структурна схема спрямованого ССЗ показаний на рис. 1.6. Він включає в себе три основні елементи (органи):

- два пускових реле струму КА (вимірвальні органи струму - ВОС), які спрацьовують при появі струму КЗ і видають сигнал, який дозволяє РЗ діяти;
- два реле напрямку потужності КВ (органи напрямку потужності (ОНП), які спрацьовують при позитивному напрямку потужності (від шин в лінію) і подають сигнал, що дозволяє діяти (спрацьовувати) захисту;

- логічну схему (яка діє за заданою програмою: отримавши сигнал про спрацювання ВОС ОНП формує сигнал про спрацювання РЗ, який з заданою витримкою часу надходить на електромагніт відключення (ЕВ) вимикача (УАТ) і виробляє його відключення).

Пускове реле струму (КА) включають на повний струм фази ЛЕП, а реле напрямку потужності (РНП) - на струм тієї ж фази і відповідну міжфазну напругу. Поведінка РНП визначається знаком потужності S_p , підведеної до його затискачів.

При КЗ на ЛЕП, що захищається, потужність позитивна S_p , і РНП дозволяє ССЗ діяти на відключення. У цьому випадку реле КА і КВ, приходячи в дію, подають сигнали на вхід логічного елемента «И» (рис. 1.6). На виході елемента «И з'являється сигнал, який приводить в дію реле часу КТ. Через заданий час на виході КТ з'являється сигнал, що діє на виконавчий елемент КЛ, який подає команду на відключення вимикача.

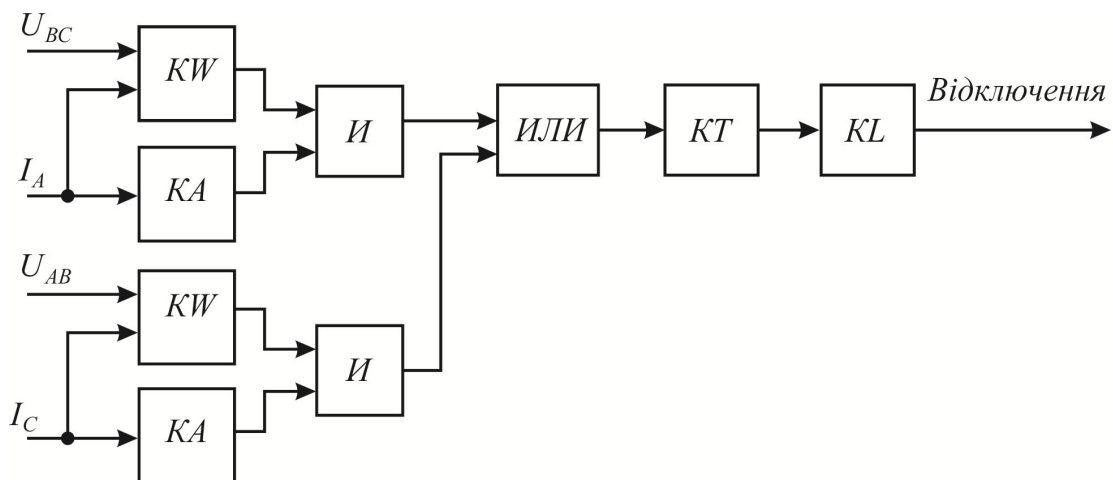


Рис. 1.6. Структурна схема спрямованого МСЗ

При КЗ на інших приєднаннях даної підстанції КА спрацює, якщо $I_k > I_{сз}$, але так як КВ не працює, елемент И, а отже, і ССЗ в цілому не діють.

Розглянута структурна схема може бути реалізована за допомогою як контактних, так і безконтактних (мікроелектронних) реле напрямку потужності у вигляді принципової схеми, представленої на рис. 1.7.

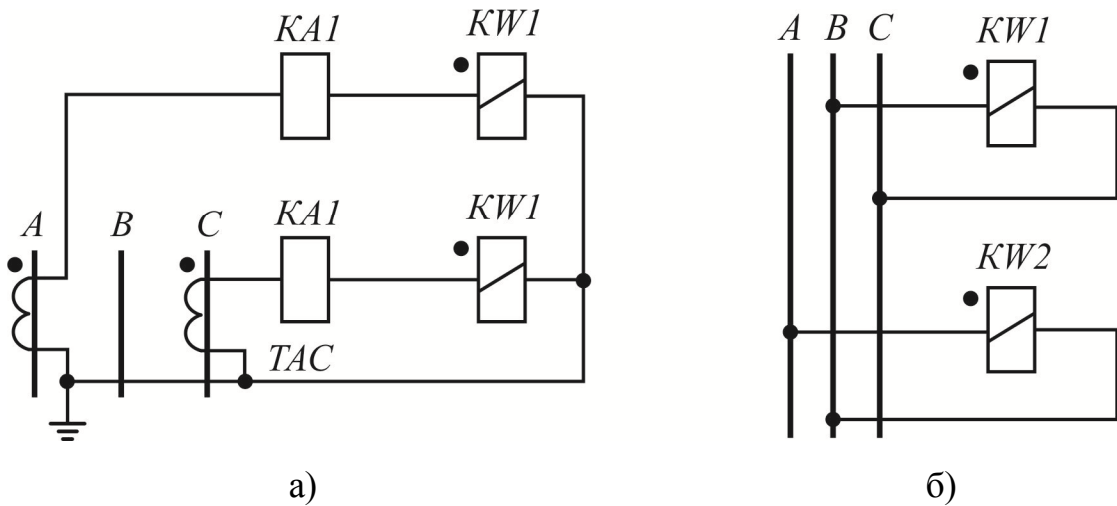


Рис. 1.7. Схема принципова (двохфазна) спрямованого МСЗ:

а) ланцюга струму; б) ланцюга напруги.

У нормальному режимі, якщо потужність навантаження спрямована від шин в ЛЕП, РНП може спрацювати (хибно). Для виключення помилкового спрацьовування СЗ його пусковий орган КА необхідно відстроювати від струму навантаження ($I_{сз} > I_{н.макс}$).

При хитаннях в енергосистемі НТЗ може також спрацювати помилково, якщо струм гойдання виявиться більше $I_{сз}$. Потужність S_p на затискачах реле KW буде спрямована від шин в ЛЕП, а період хитань буде більше витримки часу ССЗ. Для виключення дії ССЗ при хитаннях його час дії має бути більше 1 с.

У кільцевій мережі ССЗ може спрацьовувати каскадно, тобто послідовно спрацьовують РЗ і відключаються вимикачі, встановлені по кінцях ЛЕП, що захищається.

1.3. Конструкції індукційних реле напрямку потужності

Реле потужності призначені для використання у складі схем РЗ в якості чутливого органу, що реагує на знак напрямку потужності, до місця де виникло КЗ на ділянці мережі, що захищається. Електротехнічна промисловість виготовляє реле напрямку потужності двох типів:

- індукційні з циліндровим ротором (РБМ-170, РБМ-270);
- мікроелектронні (РМ-1, РМ-12).

Пристрій індукційного реле потужності з циліндровим ротором приведений на рис. 1.8. Індукційне реле напряду потужності має дві обмотки, розміщені на полюсах замкнутого сталевго магнітопровода 1.

Одна з них, струмова 4 включається у вторинні ланцюги ТТ, і струм в ній I_p визначається вторинним струмом трансформатора струму (ТА). Друга - потенційна (напруги) 5 - підключається до вторинної обмотки трансформатора напруги (ТН), і струм в ній I_n пропорційний підведеній напрузі U_n . Між полюсами розташований внутрішній сталевий сердечник 2 циліндричної форми і алюмінієвий ротор 3, що має форму склянки. На роторі укріплений контактний місток 6. При напямі потужності КЗ від шин в лінію цей місток замикає нерухомі вихідні контакти 7 (реле спрацьовує). Повернення реле відбувається під впливом протидіючої пружини 8.

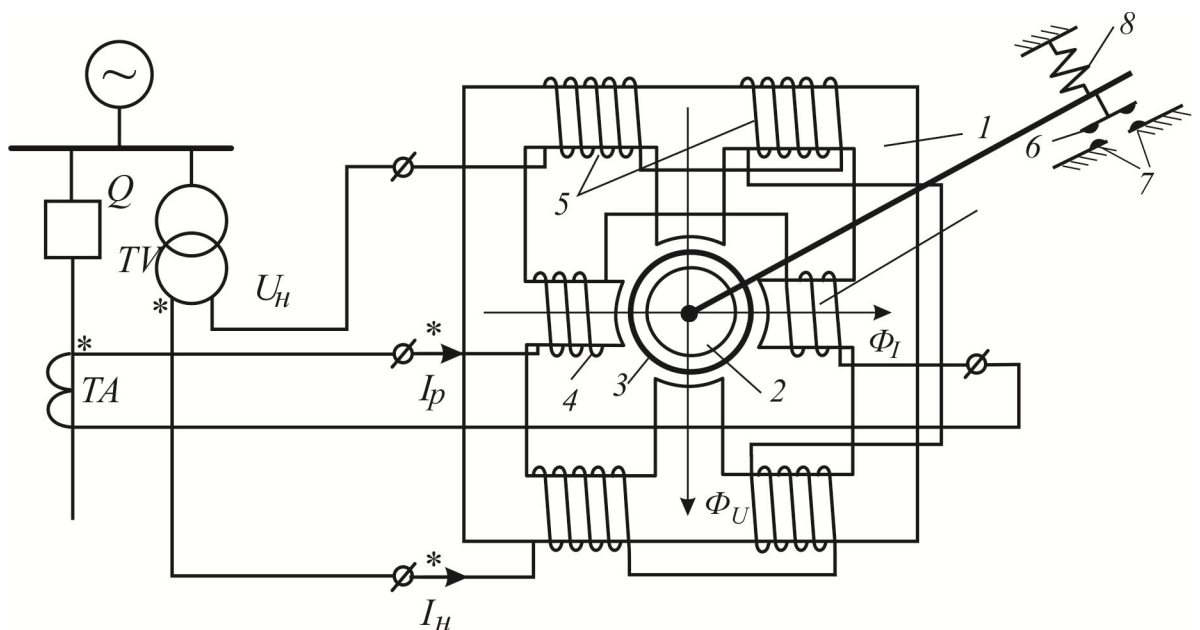


Рис. 1.8. Структурна схема індукційного реле напряду потужності

Реле напряду потужності (на відміну від індукційних реле струму) виконуються миттєвими. Час їх дії має бути мінімальним і практично складає величину 0,04 с.

При протіканні струму по обмоткам створюються магнітні потоки Φ_I і Φ_U . Під впливом магнітних потоків в рухливій частині реле наводяться вихрові струми. При взаємодії вихрових струмів з потоками на обмотці реле виникає електромагнітний момент $M_{вр}$, що обертає, залежний від величини вторинного струму, напруги і величини кута між ними.

$$M_{вр} = k \cdot \Phi_I \cdot \Phi_U \sin \psi ,$$

де Φ_I - потік, що створюється струмовою обмоткою;

Φ_U - потік, що створюється обмоткою напруги;

ψ - кут між потоками.

На рис. 1.9 показана векторна діаграма, що пояснює принцип дії реле.

Прийняті наступні позначення: \dot{I}_p і $\dot{U}_н$ - вектори струму і напруги, підведених до реле; φ_p - кут між векторами \dot{I}_p і \dot{U} , визначуваний параметрами силової електричної мережі і схемою включення реле; $\dot{I}_н$ - вектор струму в потенційній котушці реле; α - кут між векторами \dot{I}_p і \dot{U} (кут внутрішнього зсуву), визначуваний співвідношенням активного і реактивного опорів ланцюга потенційної котушки. Кут α називається *кутом внутрішнього зсуву реле* і залежить від параметрів мережі і фаз, підведених до реле.

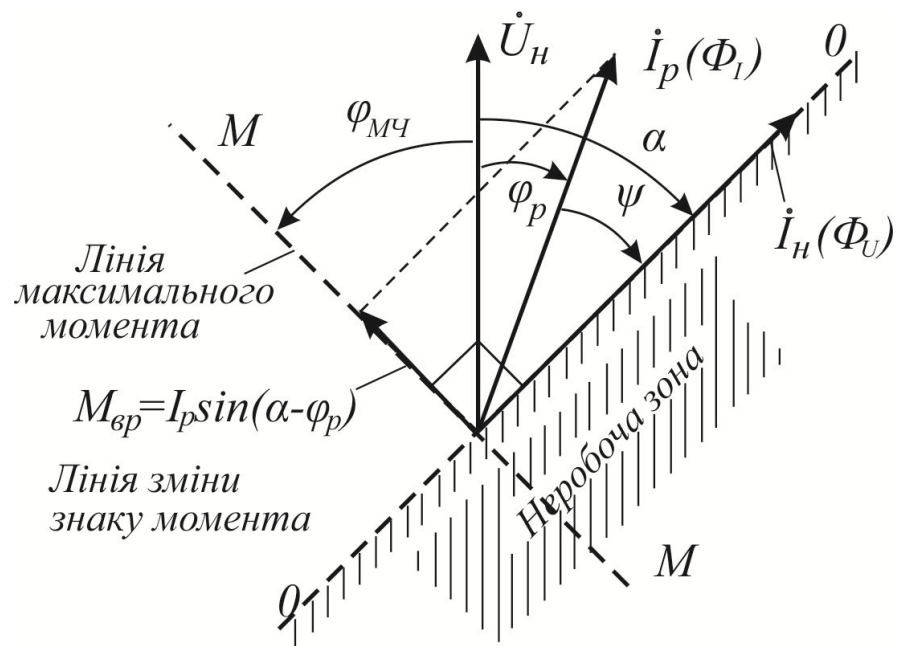


Рис. 1.9. Векторна діаграма індукційного реле напрямку потужності

За початковий для її побудови прийнятий вектор напруги \dot{U}_H . Струм \dot{I}_H зсунутий (відстає) по фазі відносно напруги \dot{U}_H на кут α , а струм \dot{I}_P - на кут зрушення по фазі φ_p . Магнітні потоки Φ_U і Φ_I зображені на діаграмі співпадаючими із струмами \dot{I}_H і \dot{I}_P , що створюють їх. З векторної діаграми виходить, що потоки Φ_U і Φ_I , а також струми \dot{I}_H і \dot{I}_P зсунуті по фазі на кут $\psi = \alpha - \varphi_p$.

Якщо у вираженні для моменту, що обертає, замінити потоки пропорційними величинами - Φ_I струмом в реле I_P , а струмом I_H і напругою U_H , а кут ψ , рівним йому куту $\psi = \alpha - \varphi_p$, то вираження для моменту матиме вигляд:

$$M_{BP} = k_p \cdot U_H \cdot I_P \cdot \sin(\alpha - \varphi_p)$$

У цьому виразі k_p - постійний коефіцієнт, визначуваний параметрами реле, а $U_H \cdot I_P \cdot \sin(\alpha - \varphi_p) = S_p$ - потужність на затисках реле. Отже, момент реле, що обертає, пропорційний потужності:

$$M_{BP} = k_p \cdot S_p,$$

тобто реле реагує на потужність.

Аналізуючи цей вираз, можна зробити наступні висновки:

- електромагнітний момент (обертання) реле пропорційний потужності на його затисках;

- знак електромагнітного моменту реле визначається знаком співмножника $\sin(\alpha - \varphi_p)$ і залежить від значення φ_p і кута внутрішнього зсуву α . Це ілюструється рис. 1.9, де зона негативних моментів заштрихована. Незаштрихована частина діаграми відповідає області позитивних моментів (де Φ_I випереджає Φ_U), а φ_p і його синус мають позитивний знак.

Момент реле, що обертає, дорівнює нулю, коли $\sin(\alpha - \varphi_p) = 0$. Звідси витікає, що $M_{BP} = 0$, якщо $\varphi_p = \alpha$ при відставанні і якщо $\varphi_p = (\alpha + 180^\circ)$ при випередженні вектором \dot{I}_P вектору \dot{U}_H . Лінія, розташована під цим кутом до

вектору \dot{U}_n , називається *лінією нульових моментів* або *лінією зміни знаку моменту* [2, 3]. Вона завжди розташована під кутом до вектору \dot{U}_n , тобто співпадає з напрямом векторів \dot{I}_n і $\dot{\Phi}_U$.

Кут між векторами \dot{I}_p і \dot{U}_n , при якому момент, що обертає, має максимальне значення, прийнято називати *кутом максимальної чутливості* $\varphi_{MЧ}$. Лінія, розташована до вектору \dot{U}_n під кутом, називається *лінією максимального моменту*. Таким чином, розглянуте реле реагує не лише на величину потужності, але і на її напрям, тобто є спрямованим.

Зміна знаків моменту відбувається при зміні напрямку струму в струмовій обмотці або обмотці напруги. Зміна напрямку I_p може відбуватися в струмовій обмотці реле при зміні напрямку первинного струму і при зміні схеми підключення струмової обмотки до трансформатора струму. Зміна напрямку струму I_n в обмотці напруги реле може бути при зміні схеми підключення цієї обмотки до трансформатора напруги.

Таким чином знак $M_{ер}$ залежить від схеми включення струму і напруги. При узгодженому включенні $M_{ер}$ позитивний, оскільки струм протікає від початку до кінця обмотки або навпаки від кінця до початку в обох обмотках. Затиски обмоток, на які виведені початок обмоток називаються *однополярними* і позначаються точками (зірочками).

Якщо внутрішній кут $\alpha = 0$ (рис. 1.10, а), то момент, що обертає

$$M_{BP} = k_p \cdot U_n \cdot I_p \cdot \sin(-\varphi_p)$$

у реле пропорційний реактивній потужності, підведений до реле (*синусне реле* або *реле реактивної потужності*). Ці реле виконують так, що $M_{ер}$ позитивний, якщо кут $\varphi_p < 0$, тобто

$$M_{BP} = k_p \cdot U_n \cdot I_p \cdot \sin \varphi_p.$$

Кут максимальної чутливості для синусного реле $\varphi_{MЧ} = 90^\circ$. Якщо внутрішній кут $\alpha = 90^\circ$ (рис. 1.10, б), то момент, що обертає

$$M_{BP} = k_p \cdot U_n \cdot I_p \cdot \sin(90^\circ - \varphi_p) = k_p \cdot U_n \cdot I_p \cdot \cos \varphi_p$$

пропорційний активній потужності, підведеній до реле (косинусне реле або реле активної потужності). Для косинусного реле $\varphi_{MЧ} = 0^\circ$.

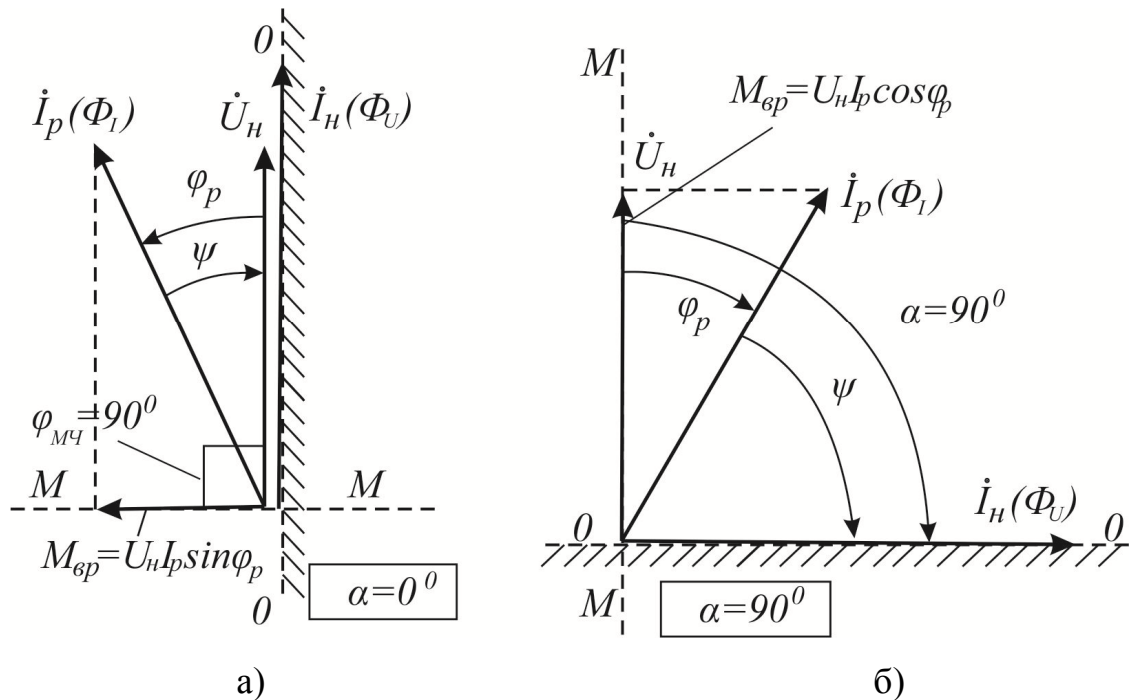


Рис. 1.10. Векторна діаграма синусного реле або реле реактивної потужності (а) і косинусного реле або реле активної потужності (б)

У реле змішаного типу (див. рис.1.9) кут $\varphi_{MЧ}$ може мати значення від 0° до 90° . У реле змішаного типу (РБМ- 171, РБМ- 271) кут α змінюється дискретно: $\alpha = 45^\circ (\varphi_{MЧ} = 45^\circ)$ або $\alpha = 60^\circ (\varphi_{MЧ} = 30^\circ)$.

Швидкодіючі реле напрямку потужності типу РБМ- 170 нині знаходять широке застосування. Їх конструктивне виконання відповідає варіанту, показаному на рис. 1.11. Для захисту ліній промисловістю випускаються реле напрямку потужності двох основних типів:

- реле типу РБМ-171 одностороннього і РБМ-271 двосторонньої дії. Застосовується для схем захисту від міжфазних коротких замикань повітряних ліній. Ці реле залежно від схеми підключення ланцюга напруги мають кут максимальної чутливості: $\varphi_{MЧ} = -30^\circ$ і $\varphi_{MЧ} = -45^\circ$ - вектор I_p випереджає вектор U_p .

- реле типів РБМ- 177, 178 односторонньої дії і РБМ- 277, 278 двосторонньої дії. Ці реле мають кут максимальний чутливості, коли вектор струму відстає від вектору напруги на кут $\varphi_{МЧ} = 70^{\circ}$. При прийнятому заводом позначенні однополярних затисків обмоток струму і напруги фактичний кут максимальної чутливості цих реле повернений на кут 180° відносно вказаного в каталозі і рівний $\varphi_{МЧ} = 70^{\circ} - 180^{\circ} = -110^{\circ}$.

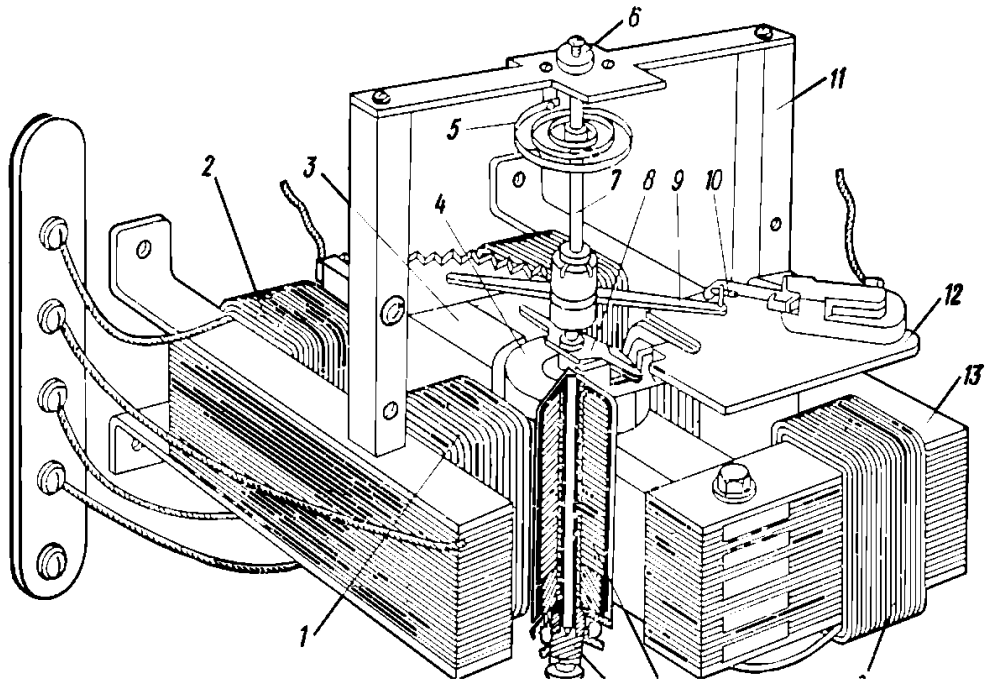


Рис. 1.11. Реле напрямку потужності серії РБМ :

- 1 - струмова обмотка; 2 - обмотка напруги; 3 - полюси; 4 - ротор;
 5 - спіральна пружина; 6 - підп'ятник; 7 - вісь; 8 - обмежувач кута;
 9 - рухливий контакт; 10 - нерухомий контакт; 11 - стійка;
 12 - площадка; 13 - ярмо

Спрацьовування реле напрямку потужності відбувається при виконанні умови:

$$M_{BP} \geq M_{IP},$$

де M_{IP} — протидіючий момент, який визначається силою протидії поворотної пружини, тертям в підшипниках реле і силою натиснення контактів при спрацьовуванні реле.

Оскільки момент реле, що обертає, пропорційний підведеній до нього потужності, те реле спрацьовує при певному добутку $U_n \cdot I_p$. Мінімальне значення потужності на затисках реле, при якому воно спрацьовує, прийнято називати *потужністю спрацьовування реле* S_{CP} . Для більшості індукційних реле $S_{CP} = (0,2 - 4)$ ВА.

Чутливість реле оцінюється за *вольтамперною характеристикою*, яка є залежністю напруги спрацьовування реле від струму (рис.1.12, а), при незмінному куті між векторами \dot{U}_n і \dot{I}_p . $U_{cp.min}$ - найменша напруга, необхідна для дії реле (при цих значеннях \dot{I}_p і φ_p). Зазвичай ця характеристика знімається при φ_p , рівному куті максимальної чутливості, т. е. для випадку, коли $\sin(\alpha - \varphi_p) = 1$.

Залежність потужності спрацьовування реле від кута між векторами \dot{U}_n і \dot{I}_p при незмінному струмі прийнято називати *кутовою характеристикою реле* (рис.1.12, б). Вона визначає зони спрацьовування і неспрацьовування реле. Як видно, при кутах, що відповідають зміні напрямку моменту, що обертає, потужність спрацьовування зростає і прагне до нескінченності. При $\varphi_p = \varphi_{мч}$ потужність спрацьовування реле має мінімальне значення.

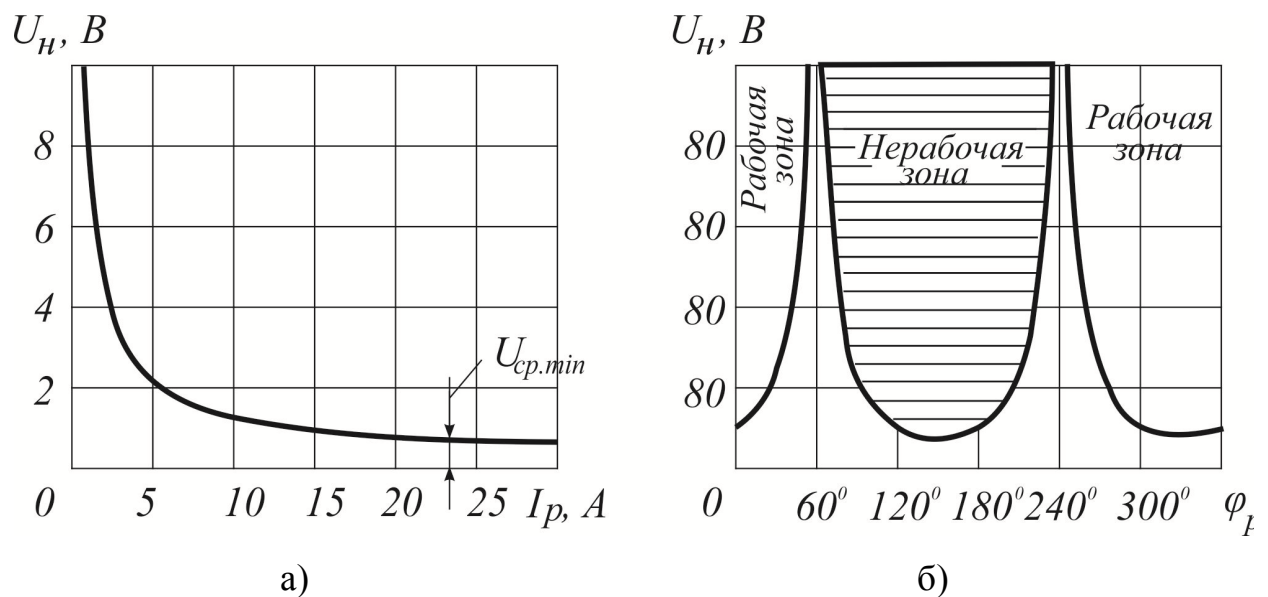


Рис. 1.12. Вольтамперна (а) та кутова (б) характеристики реле напрямку потужності

Кутова характеристика дозволяє визначити:

- зміну чутливості реле (що характеризується величиною U_{cp}) при різних значеннях кута φ_p ;
- мінімальне значення напруги $U_{cp.min}$ і найбільш вигідну зону кутів φ_p , в межах якої U_{cp} близько до $U_{cp.min}$;
- при яких кутах φ_p міняється знак електромагнітного моменту і межі кутів φ_p , яким відповідають позитивні і негативні моменти.

Реле напруги потужності зазвичай включається через вимірювальні трансформатори. Для їх правильного включення необхідно точно знати полярність обмоток реле, полярність обмоток трансформатора струму і напругу, до якої підключається реле. Виведення (затиски) обмоток напруги і струму реле маркуються на заводі, отримали умовне позначення "Н" і "К" (рис.1.13). Для однієї обмотки "Н" вибирається довільно, для другої обмотки "Н" приймається таким чином, що при підведенні до обох обмоток реле струму і напруги, зсунутих під кутом, при якому момент, що обертає позитивний, реле спрацювало.

Неправильне під'єднання ланцюгів до однієї з обмоток реле рівносильне зміні зони роботи і зони заклинювання. Обмотки трансформатора струму і напруги маркуються так, щоб при напрямі струму в первинній обмотці від "Н" до "К" у вторинній обмотці струм витікав з "Н". Як для трансформатора струму так і для трансформатора напруги за "Н" первинної обмотки береться виведення приєднане до шин високої напруги. При включенні трансформатора напруги на лінійну напругу за "Н" первинних обмоток беруться виведення, що підключаються до випереджаючих фаз, тобто в порядку їх електричного чергування (наприклад, при чергуванні А, В, С і при включенні первинної обмотки трансформатора напруги на фази С і А за початок береться виведення первинної обмотки, що підключається до фази С, при включенні на фази А і В за "Н" приймається до

фази А і так далі). Зазвичай з урахуванням полярності виведень трансформаторів струму і напруги реле включаються так, щоб струми в ланцюгах струму і напруги реле мали таку ж фазу начебто реле було включене в первинні ланцюги минувши трансформаторні обмотки.

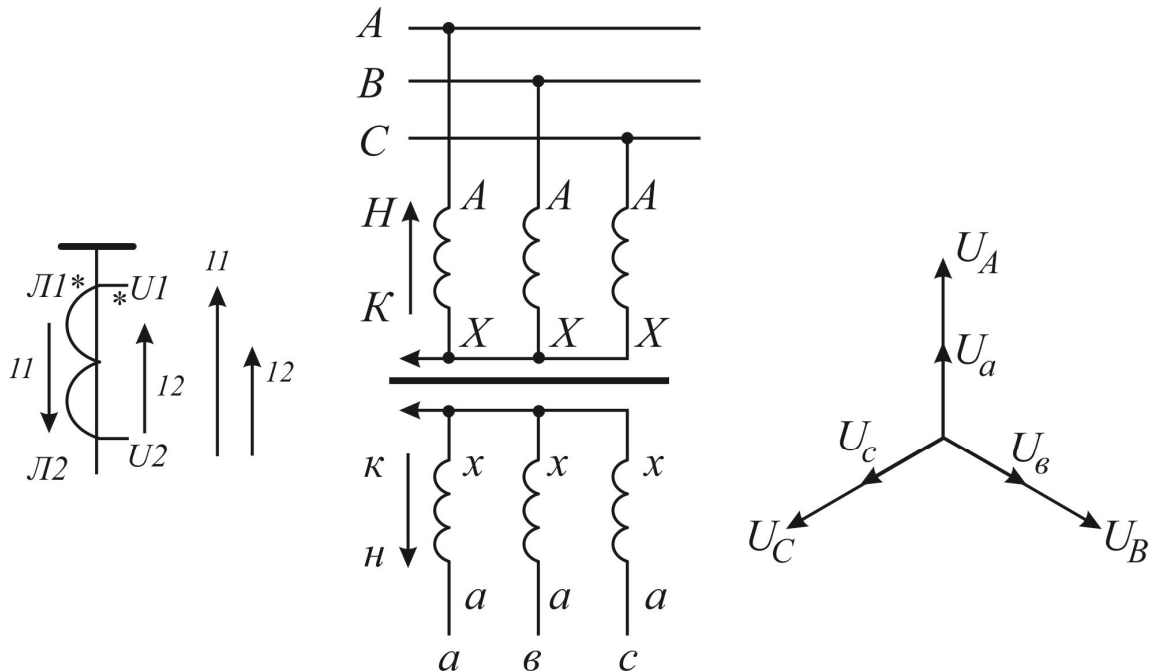


Рис.1.13. Схема маркування затисків трансформаторів струму і напруги

До реле напряду потужності в захистах від замикань на землю підводиться струм і напруга нульової послідовності. Струмова обмотка цього реле включається зазвичай в нульовий дріт трьох трансформаторів струму, сполучених в зірку (рис.1.14).

Для живлення обмотки напруги реле використовується у більшості випадків спеціальні обмотки трансформатора напруги, сполучені на суму фазної напруги (розімкнений трикутник).

Реле напряду потужності застосовується в струмових спрямованих захистах кільцевих мереж і мереж з двостороннім живленням напругою до 35 кВ, а також, у ряді інших захистів, таких як дистанційний захист, поперечний диференціальний захист і спрямований захист з високочастотним блокуванням. Необхідність використання реле напряду потужності в струмових спрямованих захистах обумовлена вимогою

селективності дії двох суміжних захистів, встановлених на одній підстанції. Для забезпечення цієї вимоги, захист повинен спрацьовувати тільки при одночасному виконанні двох умов:

- 1) струм в лінії більше струму спрацьовування захисту;
- 2) потужність спрямована від шин в лінію.

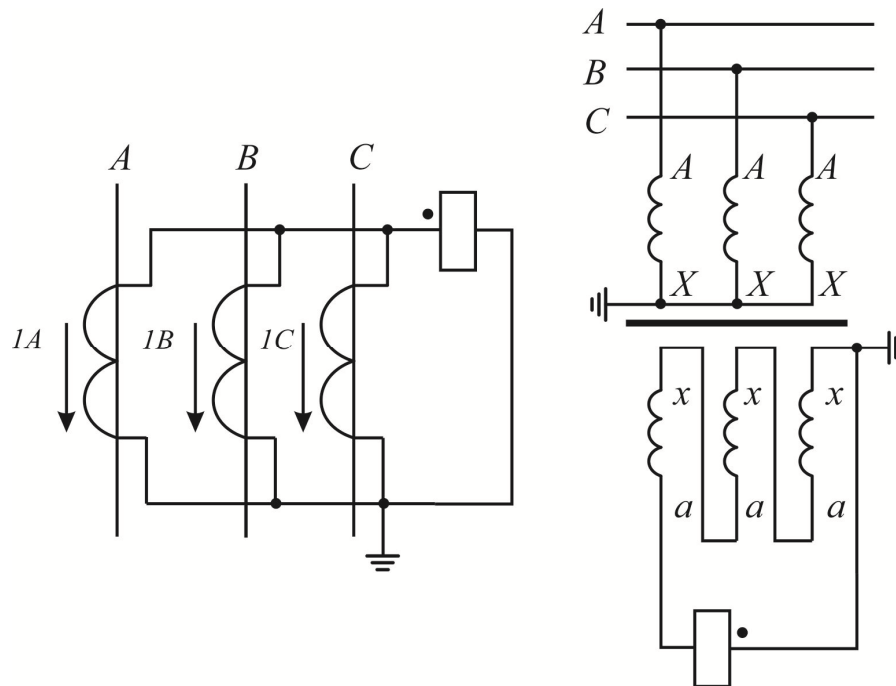


Рис. 1.14. Схема включення реле потужності на фільтри струму і напруги нульової послідовності

Перевірка останньої умови здійснюється за допомогою реле напругу потужності.

1.4. Напівпровідникові реле напругу потужності

Напівпровідникові реле напругу потужності виконуються у вигляді реле потужності (РМ - 11, РМ - 12) і реле опору (РО). Величинами, що впливають на них, також є дві вхідні величини: напруга і струм об'єкту (U_n і I_p), що захищається.

При побудові напівпровідникових РНП використовується в основному принцип порівняння фаз двох вхідних величин (U_I і U_{II}), що дозволяє отримати більшу швидкодію, ніж у реле, побудованих на порівнянні

абсолютних значень напруги. Нижче розглянемо реле серії РМ- 10 (РМ- 11, РМ- 12), що випускаються замість індукційних реле типів РБМ- 171 і РБМ- 177. Нові РНП типу РМ- 10 виготовляються з окремих електронних елементів, операційних підсилювачів (ОП) і інтегральних мікросхем (ІМС). У основі їх роботи лежить принцип роздільного порівняння часу збігу миттєвих значень двох електричних величин (напруги) з часом їх неспівпадіння в позитивному напівперіоді з аналогічними величинами в негативному напівперіоді. Цим досягається настроюванням реле від аперіодичних складових у вхідних порівнюваних величинах.

Структурна схема реле представлена на рис. 1.15. Її основними елементами є: вузол виміру (УИ), вузол формування (УФ), вузол порівняння (ВУС), вузол виходу (УВ), вузол живлення (УП). Вузли 1 і 2 включають блоки (вузли) виміру і перетворення. Блоки виміру є проміжними перетворювачами (датчиками) напруги (ДН) і струму (ДТ) відповідно. Вони забезпечують гальванічну розв'язку напівпровідникової частини реле від вторинних ланцюгів первинних вимірювальних перетворювачів. Вхідні сигнали (напруга U_n і струм I_p) на їх входи поступають від вимірювальних трансформаторів напруги ТН (ТВ) і струму ТТ (ТА) об'єкту, що захищається.

У вузлах виміру вхідні сигнали перетворюються в пропорційну їм напругу

$$\dot{U}_U = k_U U_n \text{ и } \dot{U}_I = k_I I_p.$$

Потім вони поступають у вузли формування. У вузлі формування ці сигнали наводяться до виду, зручного для роботи вузла порівняння (для реалізації необхідної характеристики спрацьовування реле). У вузлі формування блоку 1 напруга \dot{U}_U за допомогою фазообертальної схеми (фазообертального пристрою) зрушується по фазі відносно вектору \dot{U}_n на деякий постійний кут α .

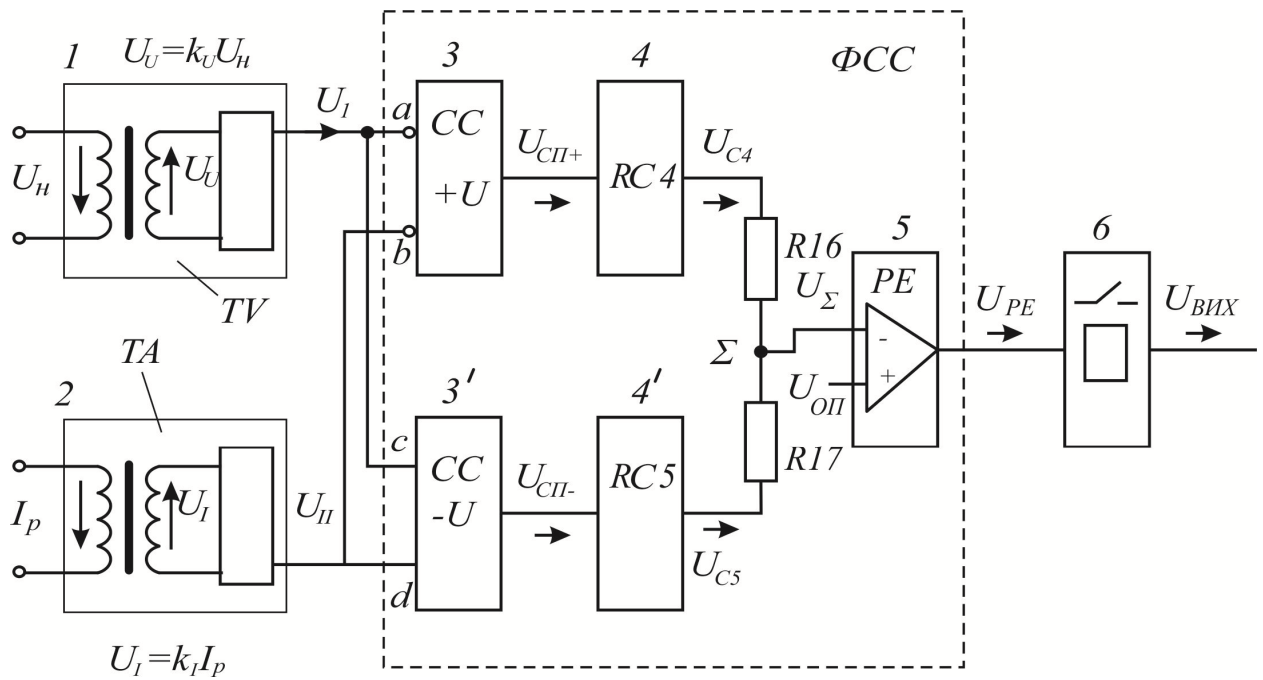


Рис. 1.15. Структурна схема напівпровідникового реле напругу потужності типа РМ-11

У цьому ж блоці за допомогою перемикачів SB1...SB4 може підключатися одна з двох фазообертальних схем для отримання (вибору кута максимальної чутливості мінус 30° або мінус 45° для РМ-11).

Зсув по фазі напруги \dot{U}_U відносно $\dot{U}_н$ забезпечує отримання необхідного кута максимальної чутливості $\varphi_{MЧ}$ і кутової характеристики спрацьовування реле.

У вузлі формування блоку 2 напруга \dot{U}_I проходить через фільтр, що знижує рівень вищих гармонік в ньому. В результаті вказаних перетворень на виході блоку 1 з'являється напруга \dot{U}_I , а на виході блоку 2 - напруга \dot{U}_{II} .

Вихідна напруга $\dot{U}_I = \dot{U}_U e^{j\alpha} = k_1 \dot{U}_н$ і $\dot{U}_{II} = k_2 \dot{I}_p$ блоків 1 і 2 поступають на блоки 3 і 3' схеми (ФСС), що порівнює фази і входить до складу вузла порівняння, схема якого залишається незмінною для усіх типовиконань реле. У ФСС виконується перетворення порівнюваної напруги в зручну для порівняння форму і утворюється сигнал, що управляє і відповідає умовам порівняння.

Сигнал, що управляє, на виході ФСС з'являється за умови, що напруга виявляється зрушеною на кут не більше ніж 90° . Великою цього кута визначається зона спрацьовування реле. Робота цього вузла ґрунтована на принципі зіставлення (фаз) часу збігу t_{cn} знаків однополярних миттєвих значень порівнюваної синусоїдальної напруги $u_{1t} = k_1 U_{pm} \sin(\omega t + \varphi)$ і $u_{1t} = k_1 U_{pm} \sin(\omega t + \varphi)$ з часом неспівпадіння t_n знаків цієї ж напруги. При цьому час неспівпадіння фаз t_n визначається зсувом фаз між порівнюваними величинами і визначається уставкою t_y , яка для цього реле складає чверть періоду промислової частоти. Якщо час збігу знаків перевищує чверть періоду промислової частоти, т. е. якщо $t_{cn} \geq t_y$, то реле спрацьовує. Якщо воно менше цього значення, то реле не спрацьовує.

Особливістю схеми, що порівнює фази (рис.1.15), є роздільне порівняння інтервалів збігу і неспівпадіння миттєвих значень позитивного і негативного знаків. Для цього вона розділена на дві паралельні частини - два канали проходження сигналів порівнюваної напруги. У одному каналі (верхньому) вимірюється час збігу позитивних значень \dot{U}_I і \dot{U}_{II} , а в іншому (нижньому) - негативних миттєвих значень цієї ж напруги. Таке розділення з подальшим підсумовуванням вихідних сигналів обох каналів усуває вплив аперіодичної складової.

Схема збігу (СС) 3 виявляє і фіксує збіг миттєвих значень \dot{U}_I і \dot{U}_{II} позитивного знаку, а схема збігу (СС) 3' - тієї ж напруги негативного знаку. У інтервалі часу збігу миттєвих значень \dot{U}_I і \dot{U}_{II} позитивної полярності на виході вузла 3 з'являється напруга $U_{СП+}$ прямокутної форми, а при збігу негативних значень таке ж за формою і амплітуді напруга $U_{СП-}$ з'являється на виході вузла 3 (рис. 1.16).

Кожен з сигналів ($U_{СП+}$ і $U_{СП-}$) поступає на інтегратори 4 і 4', що фіксують тривалість збігу знаків порівнюваних величин. Вони виконуються у вигляді ланцюгів RC4 і RC5 з однаковими значеннями R і C.

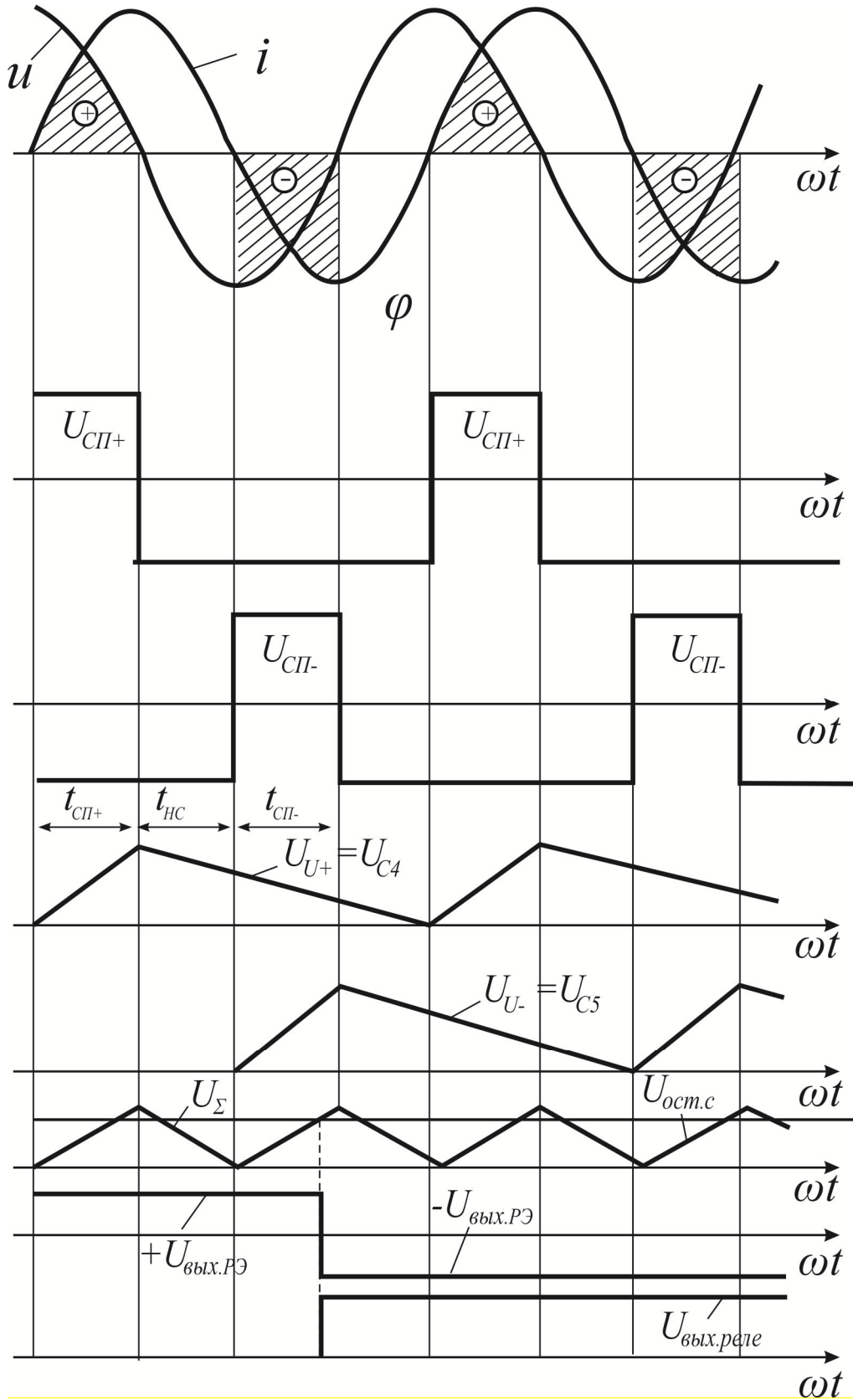


Рис. 1.16. Часова діаграма роботи ФСС реле типа РМ-11

По мірі заряду конденсаторів $C4$ і $C5$ на виході відповідного

інтегратора з'являється напруга U_{C4} і U_{C5} , значення яких пропорційні тривалості позитивних і негативних сигналів збігу. Кожна з цих напруг наростає на обкладинках конденсаторів інтеграторів 4 і 4' по експоненті, що має в початковій частині лінійний характер. Після зникнення співпадаючої по знаку напруги конденсатор інтегратора розряджається. З інтеграторів обидві напруги підводяться на вхід аналогового суматора (R16, R17), де відбувається їх складання.

Результуюча пилкоподібна напруга $U_{\Sigma} = 0,5(U_{C4} + U_{C5})$ з виходу суматора підводиться до реагуючого елементу (РЕ) 5, який виконаний у вигляді порогового компаратора релейної дії (тригера Шмитта) на базі операційного підсилювача. Сумарна (позитивна) напруга U_{Σ} підводиться на його інвертуючий вхід, а опорна (порогова) $U_{оп}$ - на неінвертуючий вхід. Тригер спрацьовує при появі на його вході напруги $U_{\Sigma} = U_{оп}$, значення якого відповідає тривалості часу збігу $t_{cn} > 0,005$ с (для випадку, коли зрушення фаз дорівнює 90°). Якщо сумарна напруга перевищить порогову напругу тригера, то він перемикається і на його виході з'являється сигнал негативного знаку. Під дією цієї напруги спрацьовує вузол виходу 6, в якості якого використовується транзисторний каскад і проміжне електромагнітне (РП- 13) або герконове (РПГ- 5) реле KL, яке спрацьовує і своїми контактами подає сигнал в ланцюг управління комутаційним апаратом.

Якщо час збігу (отже, і тривалість імпульсів) менше допустимого значення, то конденсатори C4 і C5 не устигають зарядитися до необхідних значень, а напруга U_{Σ} не досягає значення напруги спрацьовування U_{cp} . В цьому випадку реле також не спрацьовує.

Схема, що порівнює фази, і схема вихідного блоку живляться від стабілітронного дільника, включеного між плюсом і мінусом напруги постійного струму 220 або 110 В (на дільнику є відгалуження + 28, + 10, - 5 і 0 В). Передбачена можливість використання в якості джерела живлення випрямленої напруги, що отримується за допомогою комбінованого блоку

живлення, що включається на напругу і струм мережі.

Вузол живлення призначений для отримання від джерела оперативного струму об'єкту стабілізованої напруги постійного струму, необхідної для роботи інтегральних мікросхем і виконавчого вихідного реле, що захищає.

Загальні параметри реле РМ-11:

- час спрацьовування (при $\varphi = \varphi_{МЧ}$) - 30 мс;
- чутливість $U_{сп} = 0,25$ В;
- струм спрацьовування $I_{сп} = 0,25 \cdot I_{ном}$;
- споживання в ланцюзі змінного струму - 0,15 ВА, в ланцюзі змінної напруги - 0,1 ВА, в ланцюгах оперативного струму - 10 Вт.

1.5. Схеми включення реле напряму потужності

Реле напряму потужності включаються, як правило, на фазний струм і міжфазну напругу. Поєднання фаз струму і напруги реле, що називається його схемою включення, має бути таким, щоб реле правильно визначало знак потужності КЗ при усіх можливих випадках і видах ушкоджень. При цьому до нього повинна підводитися як можна більша потужність. Потужність, що підводиться до реле, в загальному випадку може мати недостатнє для дії РНП значення при КЗ, близьких до місця установки реле. Цей факт може бути обумовлений:

- зниженням напруги ;
- значенням кута φ_p при якому $\sin(\alpha - \varphi_p)$ рівний або близький до нуля.

Практично в схемах спрямованого струмового захисту застосовується включення РНМ за так званою 90-градусною схемою поєднання струмів і напруги. Назва схеми (90-градусна) носить умовний характер. У ній відбивається величина кута φ_p між напругою і струмом, підведеним до РНП в симетричному трифазному режимі за умови, що струми у фазах співпадають з однойменною фазною напругою. Діаграми роботи РНП типу

РБМ- 171 з кутом максимальної чутливості $\varphi_{MЧ} = -30^\circ$, включеного за 90° -градусною схемою, показані на рис. 1.17.

Кут внутрішнього зсуву цього реле $\alpha = 90^\circ + \varphi_{MЧ} = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ$.

Потужність на затисках такого реле рівна $S_p = k_p U_n I_p \cos(\varphi_p + 30^\circ)$. РНП включене на струм $I_p = I_A$ і напругу $U_n = U_{BC}$. На рис. 1.17, б зображена векторна діаграма напруги і струму I_A при трифазному КЗ на ЛЕП. Струм I_A відстає від напруги U_A на кут φ_k . Вектор I_A має два граничні положення: I_A' - при КЗ за чисто реактивним опором X , коли $\varphi_k = 90^\circ$, I_A'' - при КЗ через дугу на початку ЛЕП, коли $\varphi_k \approx 0^\circ$.

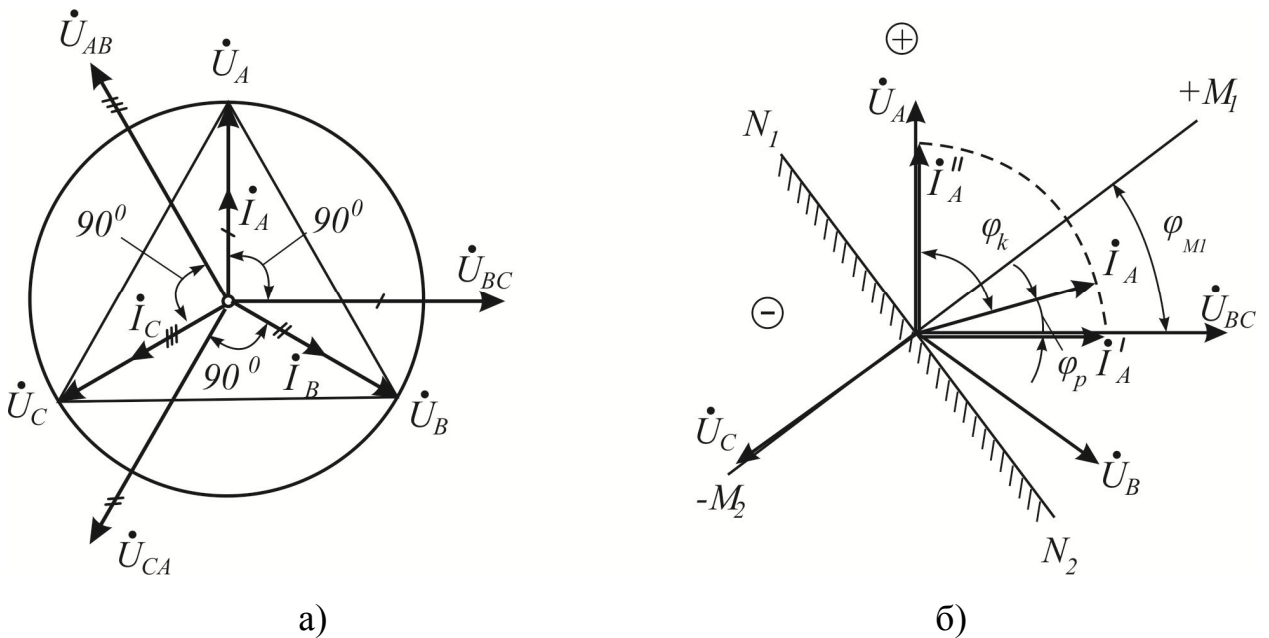


Рис. 1.17. Векторні діаграми напруги і струмів для реле напрямку потужності при 90° -ій схемі включення

По знайдених значеннях φ_p визначають знак і значення потужності на вході РНП. З цією метою будують діаграми струму і напруги на затисках РНП для даного випадку КЗ (рис.1.17, б). З цією метою на ній відносно U_n для цього типу РНП будують лінію N_1N_2 (зміни знаку потужності) і лінію M_1M_2 (максимальної потужності S_p). Проекція вектору I_A на лінію максимальної потужності, що рівна $I_A \sin(\alpha - \varphi_p)$, характеризує значення і

знак потужності.

При КЗ в зоні проекція вектору I_A має позитивний знак, а у разі КЗ поза зоною - негативний. Значення потужності на реле досягає максимуму $S_{p\max}$ при $\varphi_{\text{МЧ}} = -30^\circ$ (чому відповідає $\varphi_k = 60^\circ$). З діаграми і характеристики реле РНП виходить, що поведінка реле напряму потужності при трифазному короткому замиканні в зоні і поза зоною буде правильним і значення S_p достатнім для його дії.

Одним з основних недоліків індукційних реле напряму потужності є явище самохода. *Самоходом* називають спрацьовування реле при проходженні струму тільки в одній його обмотці - струмовій або напруги. Реле, що має самохід від струму, може неправильно спрацьовувати при зворотному напрямі потужності, коли ушкодження виникає у безпосередній близькості від реле в зоні його не дії, внаслідок чого напруга на його затисках дорівнюватиме нулю. Причиною самохода зазвичай є несиметрія магнітних систем реле відносно циліндричного ротора. Для усунення самохода на сталевому сердечнику 2 (рис. 1.8) передбачений зріз. Змінюючи положення сердечника, можна компенсувати нерівномірність потоків в повітряному проміжку.

1.6. Конструкції реле струму максимального струмового захисту.

Принцип дії максимального струмового захисту ґрунтований на фіксації збільшення струму при виникненні короткого замикання. Структурно схему максимального струмового захисту, що виконує функції захисту лінії, можна представити в наступному виді (рис. 1.18).

Струм об'єкту, що захищається, контролюється вимірювальним (пусковим) органом захисту ВО. Пусковий орган спрацьовує, якщо контрольована величина струму $I_{\text{контр}}$ стає більше за максимально можливе робоче значення $I_{\text{роб.мах}}$

$$I_{\text{контр}} > I_{\text{роб.мах}}$$

Хоча будь-яке коротке замикання супроводжується збільшенням струму, фіксація цієї ознаки не дозволяє зробити однозначного висновку про ушкодження об'єкту.

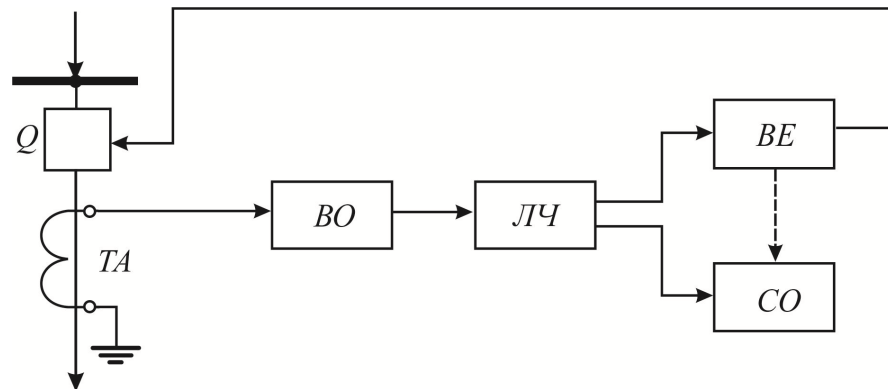


Рис. 1.18. Структурна схема максимального струмового захисту

Вимогу селективності забезпечує логічна частина ЛЧ шляхом створення затримки на спрацьовування, вибраної за наступним правилом. Захист, найбільш віддалений від джерела живлення, повинен мати мінімальний час спрацьовування. У міру наближення до джерела живлення витримки часу захисту збільшуються на величину Δt , що називається *ступенем селективності*. Ступінь селективності враховує час відключення вимикачів, погрішності елемента затримки на спрацьовування. Зазвичай Δt приймається рівним (0,4 - 0,6) сек.

Виконавчий елемент ВЕ сприймає сигнал логічної частини і формує команду на відключення вимикача. Сигнальний орган СО фіксує спрацьовування захисту.

Реле струму можуть виконуватися на електромагнітному і індукційному принципах, а також на мікроелектронній базі.

На рис. 1.19 наведена конструкція електромагнітного реле струму. Реле складається зі сталевго сердечника 1, з розміщеними на ній обмотками 2. У проміжку між полюсами електромагніту розміщений сталевий рухливий якір 3 із закріпленим на ній контактом 4. У початковому стані якір утримується за рахунок пружини 6 і упору 7. При протіканні струму по обмотці реле створюється електромагнітна сила

$$F_E = k \frac{I_P^2 W^2}{R_M^2},$$

де k - коефіцієнт пропорціональності, що враховує особливості конструктивного виконання реле струму; I_P - струм в реле; W - число витків обмоток; R_M - опір магнітного ланцюга.

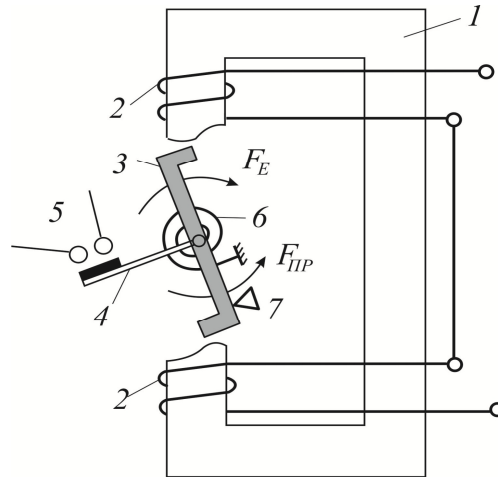


Рис.1.19. Схема електромагнітного реле струму

Реле спрацює, коли електромагнітна сила F_E здолає момент, що створюється протидіючою пружиною, і контакти 4, 5 замкнуться. Струм, при якому спрацьовує реле, називається струмом спрацьовування реле I_{CP} . У момент спрацьовування $F_E = F_{ПР}$ тоді

$$I_{CP}^2 = \frac{F_{ПР} R_M^2}{k W^2} \quad \text{звідки} \quad I_{CP} = \frac{R_M}{k_1 W} \sqrt{F_{ПР}}.$$

З останнього вираження виходить, що оперативно величину струму спрацьовування реле можна регулювати, міняючи опір протидіючої пружини і число витків обмоток реле. Якщо після спрацьовування реле зменшувати струм в обмотці, то при деякому значенні струму, що називається *струмом повернення реле*, якорь реле повернеться в початковий стан. Відношення струму повернення (відпускання) реле до струму спрацьовування є нормативним параметром і називається *коефіцієнтом повернення реле*:

$$k_B = \frac{I_{ВІДП}}{I_{CP}}.$$

Нині також випускається велика кількість напівпровідникових статичних реле струму різних модифікацій. Проте принцип їх дії практично однаковий і зводиться до порівняння вимірюваного сигналу, що підводиться, з опорним (рис.1. 20).

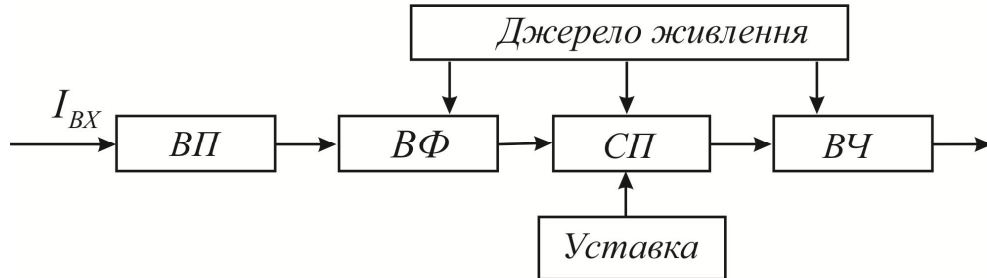


Рис. 1.20. Структурна схема статичного реле струму захисту.

Реле складається з наступних основних блоків:

1. Вхідний перетворювач ВП містить вимірювальний перетворювач, на вхід якого подається сигнал від трансформаторів струму об'єкту, що захищається. Вимірювальні перетворювачі є проміжними трансформаторами або трансреактори, які трансформують вхідний сигнал до величини, визначуваної умовами управління операційними підсилювачами. Одночасно перетворювачі відділяють напівпровідникову частину реле від вторинних ланцюгів об'єкту, що захищається. Разом з основними функціями вони вирішують задачу захисту реле від високочастотних наведень.

2. Для отримання потрібної характеристики реле вихідний сигнал, що подається з перетворювача, необхідно піддати спеціальній обробці у вузлі формування ВФ. Спосіб і об'єм такої обробки визначається конкретним типом реле.

3. У схемі порівняння СП сформовані сигнали вимірювального тракту порівнюються з опорною напругою, що називається уставкою реле. Для спрацьовування реле потрібно, щоб вхідний сигнал перевищив задане значення опорного сигналу. У релейному захисті в якості елементів схеми порівняння широко використовуються компаратори.

4. Вихідна частина ВЧ виконується за допомогою електромагнітного або герконового реле.

5. Для живлення операційних підсилювачів на схему реле має бути подана напруга ± 15 В. Якщо джерелом оперативного живлення є акумуляторна батарея на 220 В, то застосовуються спеціальні інтегральні мікросхеми, або живлення може бути організоване за допомогою стабілітронів.

Відмічаючи достоїнства електромеханічних реле, відмітимо і їх недоліки: мала швидкість роботи, обмежений (хоча і дуже великий) електричний і механічний ресурс, створення радіоперешкод при замиканні і розмиканні контактів і, нарешті, остання і найнеприємніша властивість - проблеми при комутації індуктивних навантажень і високовольтних навантажень на постійному струмі.

Сама наявність деталей, що рухаються, в цьому пристрої знижує його надійність. Контакти не лише підгорають і окислюються. З часом вони втрачають здатність притискатися один до одного з підпружинюванням, що призводить до появи перехідного опору або повного зникнення контакту.

Електромеханічні реле чутливі до пилу і вологи. Існують герметичні моделі, але у них немає можливості для ревізії контактів. Це означає, що при погіршенні роботи реле їх доведеться викинути.

2. АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ ТА РОЗРОБКА СТРУКТУРНИХ СХЕМ РЕЛЕ НАПРЯМУ ПОТУЖНОСТІ І РЕЛЕ МАКСИМАЛЬНОГО СТРУМУ

2.1. Основні задані характеристики реле напрямку потужності і реле максимального струму

Реле напрямку потужності

Основні технічні характеристики

1.	Кут максимальної чутливості, $\varphi_{мч}$ ел. град..	-30±5 -45±5
2.	Область спрацьовування реле по куту зсуву фаз при номінальному струмі і напрузі, ел. град.	165÷180
3.	Струм спрацьовування реле в діапазоні вхідної напруги від $3U_{CP}$ до $1,15U_H$	не більше $0,05I_H$
4.	Напруга спрацьовування реле, В, в діапазоні вхідного струму від $0,15I_H$ ÷ $30I_H$	не більше 0,25
5.	Споживана потужність по ланцюгу струму, ВА	не більше 0,5
6.	Споживана потужність по ланцюгу напруги, ВА	не більше 3
7.	Коефіцієнт повернення, не менше	0,6
8.	Контакти реле	1, що замикає
9.	Напруга живлення, 220 В	постійна
10.	Допустимий діапазон зміни напруги живлення	від 0,8 до $1,1U_H$
11.	Споживана потужність по ланцюгу живлення, Вт	10
12.	Габаритні розміри, мм, не більше	132×152×183
13.	Маса, кг, не більше	2,5

Реле максимального струму

Основні технічні характеристики

1.	Номінальна частота, Гц	50
2.	Клас точності	5

3.	Напруга живлення, 220 В	постійна
4.	Межі уставки на струм спрацьовування, А	0,15÷0,6
5.	Номінальний струм, А	6,3
6.	Потужність, споживана при струмі мінімальної уставки, ВА	0,1
7.	Час спрацьовування реле, с, не більше:	
	- при струмі, рівному $1,2I_{cp}$	0,06
	- при струмі, рівному $3I_{cp}$	0,035
8.	Коефіцієнт повернення реле, не менше	0,9
9.	Контакти реле	1, що замикає 1, що розмикає
10.	Споживана потужність по ланцюгу живлення, Вт, не більше - в нормальному режимі	7
	- в режимі спрацьовування	8,5
11.	Габаритні розміри, мм, не більше	66×152×181
12.	Маса реле, кг, не більше	1,0

2.2. Вибір принципу роботи реле напряму потужності

Поняття потенціалу або різниці потенціалів u дозволяє визначити роботу, що здійснюється електричним полем при переміщенні елементарного електричного заряду dq , як $dA = udq$. В той же час, електричний струм рівний $i = dq/dt$. Звідси $dA = ui dt$, отже, швидкість здійснення роботи, тобто потужність в даний момент часу або *миттєва потужність* рівна

$$p = \frac{dA}{dt} = ui,$$

де u і i – миттєві значення напруги і струму.

Величини струму і напруги, що входять в це вираження, є синусоїдальними функціями часу, тому і миттєва потужність є змінною величиною і для її оцінки використовується поняття середньої потужності за

період. Її можна отримати, інтегруючи за період T роботу, що здійснюється електричним полем, а потім співвідносивши її з величиною періоду, тобто

$$P = \frac{A}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt$$

Нехай при виникненні ушкодження на вхід обмотки напруги реле поступає сигнал, який, в загальному випадку, описується вираженням

$$u(t) = U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + U_{nm} \sin(n\omega t + \psi_n),$$

де U_0 - постійна складова;

U_{1m} - амплітуда основної гармоніки;

U_{2m}, \dots, U_{nm} - амплітуди вищих гармонік;

ψ_1, \dots, ψ_n - початкові фази відповідних гармонік.

Сигнал, що поступає на струмовий вхід, можна записати в наступному виді:

$$i(t) = I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1 - \varphi_1) + I_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2 - \varphi_2) + \dots + I_{nm} \sin(n\omega t + \psi_n - \varphi_n),$$

де $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ - кути зсуву між відповідними гармоніками струму і напруги.

Середня потужність в ланцюгу об'єкта, що захищається

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T U(t)I(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T [U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + U_{nm} \sin(n\omega t + \psi_n)] \times \\ \times [I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1 - \varphi_1) + I_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2 - \varphi_2) + \dots + I_{nm} \sin(n\omega t + \psi_n - \varphi_n)] dt$$

Після перемножування многочленів загальний інтеграл можна представити у вигляді суми інтегралів :

$$1. P = \frac{1}{T} \int_0^T U_0 I_0 dt = U_0 I_0;$$

2. Інтегралів, що містять добуток синусоїд однакової частоти

$$\frac{1}{T} \int_0^T U_{km} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_k) dt = U_{km} I_{km} \cos \varphi_k$$

3. Інтегралів, що містять добуток синусоїд різної частоти

$$\frac{1}{T} \int_0^T U_{km} I_{lm} \sin(k\omega t + \psi_k) \sin(l\omega t + \psi_l - \varphi_l) dt = 0$$

4. Інтегралів виду

$$\frac{1}{T} \int_0^T U_0 I_{lm} \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_k) dt = 0 \quad \text{і} \quad \frac{1}{T} \int_0^T I_0 U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) dt = 0$$

У результаті

$$P = U_0 I_0 + U_{1m} I_{1m} \cos \varphi_1 + U_{2m} I_{2m} \cos \varphi_2 + \dots + U_{nm} I_{nm} \cos \varphi_n$$

Отже, якщо перемножити миттєві значення напруги і струму і потім проінтегрувати за період, то вихідна напруга такого пристрою буде пропорційна активній потужності і залежно від напрямку струму матиме позитивний або негативний знак.

2.3. Розробка структурної схеми реле напрямку потужності

Відповідно до прийнятого принципу вимірювання потужності складемо структурну схему реле, яка дає уявлення про склад, структуру і виконувани функції окремих вузлів реле без деталізації їх схемної реалізації (рис. 2.1.)

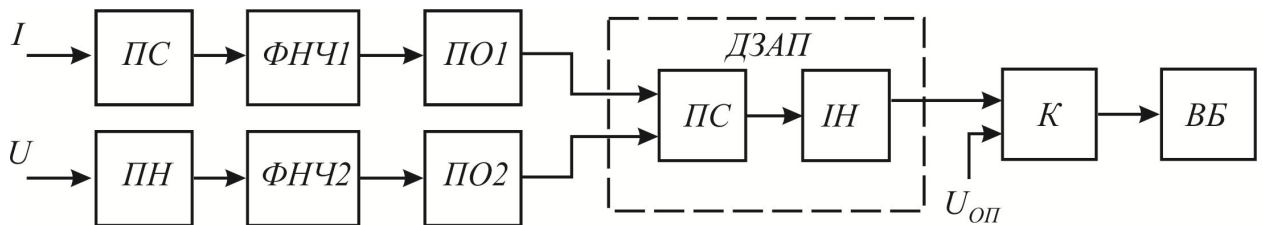


Рис. 2.1. Структурна схема реле напрямку потужності

Реле складається з вхідних перетворювачів струму ПС і напруги ПН; двох фільтрів низьких частот ФНЧ1 і ФНЧ2; підсилювачів-обмежувачів ПО1, ПО2; детектора знаку активної потужності ДЗАП, виконаного на основі інтегратора ІН і перемножувача аналогових сигналів ПС; порогового елементу К, виконаного на компараторі; виконавчого блоку ВБ.

Інформація про струм і напругу контрольованого об'єкту через вхідні перетворювачі подається на фільтри низьких частот. За допомогою фільтрів

низьких частот і підсилювачів-обмежувачів формуються необхідні амплітудно-частотні характеристики каналів струму і напруги. Сигнали, що поступають на входи детектора знаку активної потужності, перетворюються за допомогою перемножувача і інтегратора в сигнал, пропорційний активній потужності. Залежно від знаку активної потужності, який залежить від напрямку струму, виконавчий блок формує або не формує сигнал на відключення пошкодженої ділянки

2.4. Розробка структурної схеми реле максимального струму

Відповідно до завдання реле максимального струму призначені для використання як вимірювальних органів струмових захистів як миттєвої дії, так і працюючих з витримкою часу будь-яких приєднань електроустановок. Вони мають бути придатні для усіх випадків, коли не потрібні спеціальні заходи по відстроєнню захисту від аперіодичних складових і вищих гармонік, які можуть міститися в первинних струмах об'єкту, що захищається.

Схему реле виконаємо на часоімпульсному принципі, що гарантує хорошу завадостійкість реле. Прийняте виконання забезпечить також чітку роботу реле при великих кратностях струму ушкодження по відношенню до номінального струму трансформаторів струму, коли їх погрішність може досягати 80÷90%. Структурна схема реле струму приведена на мал. 2.2.

Вимірювальний вузол реле є проміжним трансформатором струму ТА, а вузлом формування служить випрямівний міст V1. Перетворюючою частиною вузла порівняння є однопороговий компаратор DA1, який використовується одночасно як перший ступінь порівняння, що визначає струм спрацьовування реле, - сигнал, що поступає, порівнюється із заданою опорною напругою. Для установки опорного сигналу, за допомогою якого задається уставка реле, передбачені перемикачі уставок SB1÷SB5. Ними шунтується частина резисторів, що утворюють дільник напруги, що живиться від джерела напруги ± 15 В. При розмиканні перемикачів змінюється доля напруги, що подається на вхід компаратора.

На неінвертуючий вхід компаратора подається опорний сигнал з блоку завдання уставок. Блок завдання уставок є дільником напруги з перемикачами, якими шунтуються резистори дільника. При зміні положення перемикачів змінюється доля напруги, що подається на вхід компаратора.

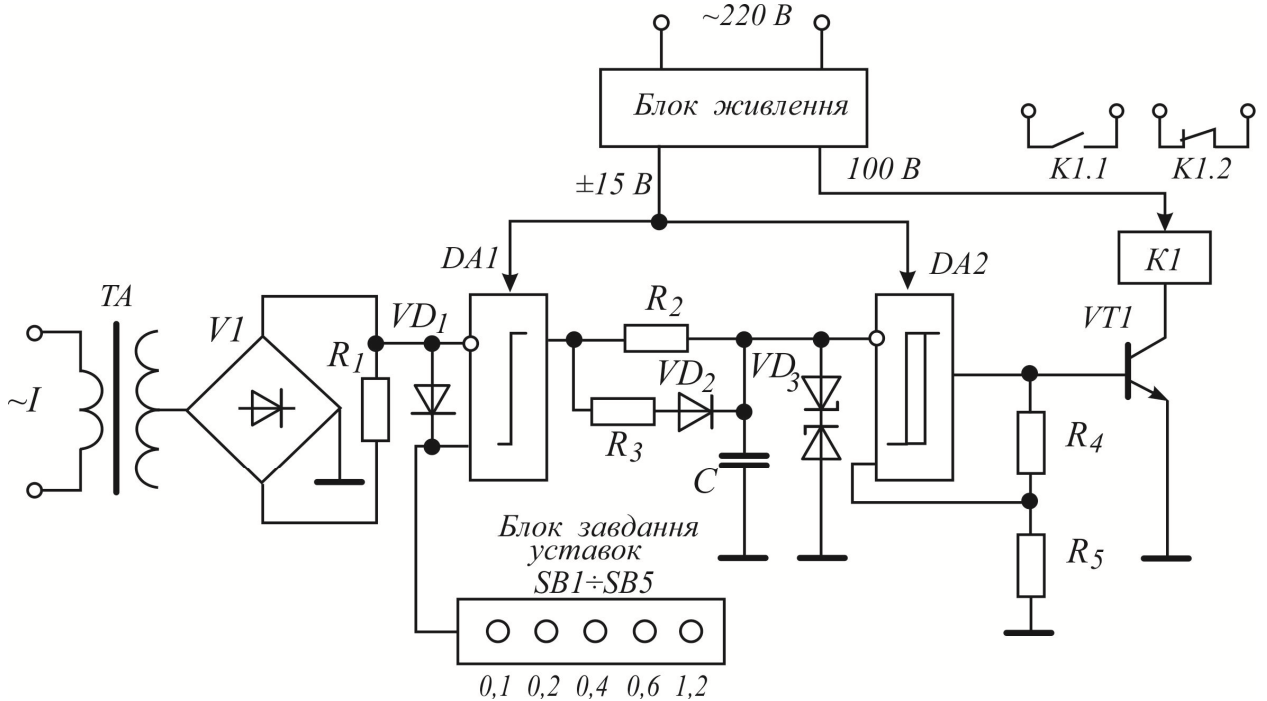


Рис. 2.2. Структурна схема мікроелектронного реле максимального струму

Вихідний сигнал однопорогового компаратора поступає на наступний ступінь порівняння - часопорівнюючий ланцюжок, що містить резистори R_2 , R_3 , діод VD_2 , конденсатор C і стабілітрон VD_3 , яка забезпечує відстроєння реле від перешкод, що призводять до короткочасного перекидання компаратора DA_1 . Пороговим елементом цього ланцюжка і одночасно виконавчою частиною вузла порівняння служить тригер Шмитта DA_2 . Позитивний зворотний зв'язок підсилювача DA_2 , виконаний на резисторах R_4 , R_5 , забезпечує гістерезис в перехідній характеристиці для виключення невизначеності моменту перемикачання, тобто для відвертання "брязкоту".

Вузол виходу реле складається з транзистора VT_1 і вихідного електромагнітного реле, наприклад типу РП13, на робочу напругу 100 В.

Якщо значення сигналу, що поступає, менше за опорне, то конденсатор C заряджений позитивною напругою насичення підсилювача DA_1 , приблизно на

1-2 В, що відрізняється від рівня напруги живлення, до напруги стабілізації стабілітрона VD3. На виході компаратора DA2 напруга негативна, і транзистор VT1 закритий.

При збільшенні вхідного сигналу до значення більше опорної напруги компаратор DA1 міняє свій стан, конденсатор перезаряджається через опір R2, на виході компаратора DA2 з'являється напруга позитивної полярності, транзистор VT1 відкривається, реле спрацьовує.

Блок живлення забезпечує живлення операційних підсилювачів напругою ± 15 В і електромагнітного реле напругою 100 В.

Струм уставки реле рівний $I_{уст} = I_{min} (1 + \Sigma N)$, А, де I_{min} - мінімальний струм уставки, рівний 1/4 значення струму, що відповідає другому числу в умовному позначенні реле; ΣN - сума чисел, нанесених під перемикачами, поставленими в положення, що виступає. При цьому риси на торцях голівок перемикачів будуть спрямовані у бік вибраних чисел.

3. ПРОЕКТНИЙ РОЗДІЛ

3.1. Розробка принципової електричної схеми реле напряду потужності

Принципова електрична схема реле напряду потужності розроблена відповідно до структурної схеми реле (рис. 2.1) і приведена на рис. 3.1. Реле складається з наступних частин: що сприймає (вхідні вимірювальні перетворювачі струму і напруги - проміжні трансформатори ТА1 і ТУ), що перетворює (два фільтри низьких частот на ОП DA1 і DA2 і підсилювачі - обмежувачі на ОП DA3 і DA4), що порівнює (детектор знаку активної потужності, виконаний на перемножувачі аналогових сигналів DA5, інтегратор на ОП DA6 і тригер Шмитта на ОП DA7) і виконавчої (проміжне реле К1, включене в ланцюг колектора транзистора VT1).

3.2. Розрахунок функціональних блоків принципової електричної схеми реле напряду потужності

3.2.1. Вимірювальний пристрій

В якості вимірювальних перетворювачів використовуються трансформатори струму і напруги, що називаються скорочено датчиками, які є основною частиною вузла вимірювання. Разом з основними функціями в них вирішується завдання - захистити напівпровідникову частину реле від високочастотних наведень, що можуть проникати в ланцюги вторинної комутації. Для захисту служить спеціальний екран, що поміщається між первинною і вторинною обмотками вхідного трансформатора датчика. Екран є одношаровою обмоткою, сполученою з нульовою шиною реле. Схема вимірювальних перетворювачів приведена на рис. 3.2.

Трансформатор струму ТА1. Число витків первинної обмотки $W_1=25$, виконаної дротом ПЕВ- 2-1,0; вторинної - $W_2=3000$ витків, дріт ПЕВ- 2-0,15. Сердечник ШЛ10×16.

Трансформатор напруги ТУ. Число витків обмоток $W_1 = W_2=3600$, виконані дротом ПЕВ-2-0,1 на сердечнику ШЛ10×16.

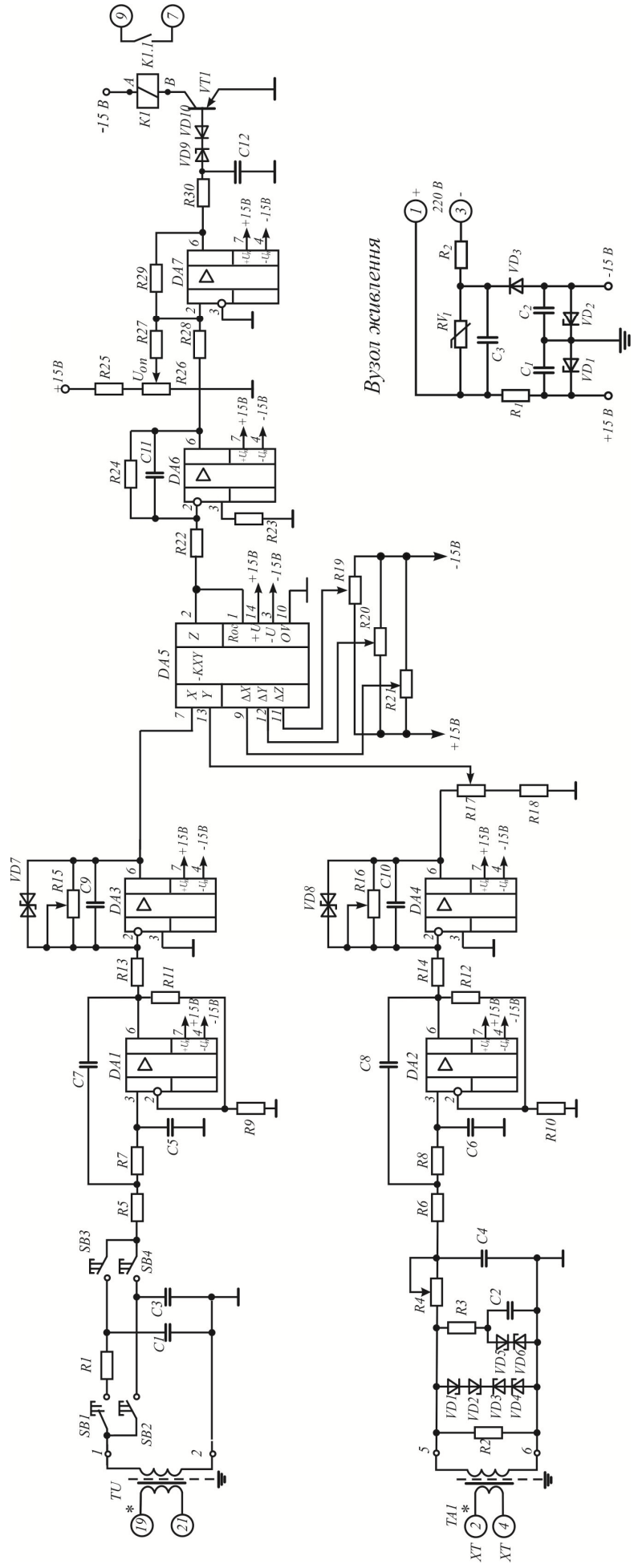


Рис. 3.1. Електрична принципова схема реле напрямку потужності

До датчика напруги ТУ реле з допомогою перемикачів SB1÷ SB4 може підключатися одна з двох фазоворотних схем для отримання вибраного кута (30^0 або 45^0). Основним навантаженням датчика струму ТА1 є резистор $R2=2$ кОм, інші приєднані до ТА1 елементи - стабілітрони VD1 ÷ VD4 (КС447А), фазовий коректор, що складається з R3, VD5, VD6 (КС433А) і C2, а також інтегруючий ланцюжок R4C4 служать для компенсації кутових погрешностей і спотворень форми кривої струму в усьому діапазоні значень струму КЗ.

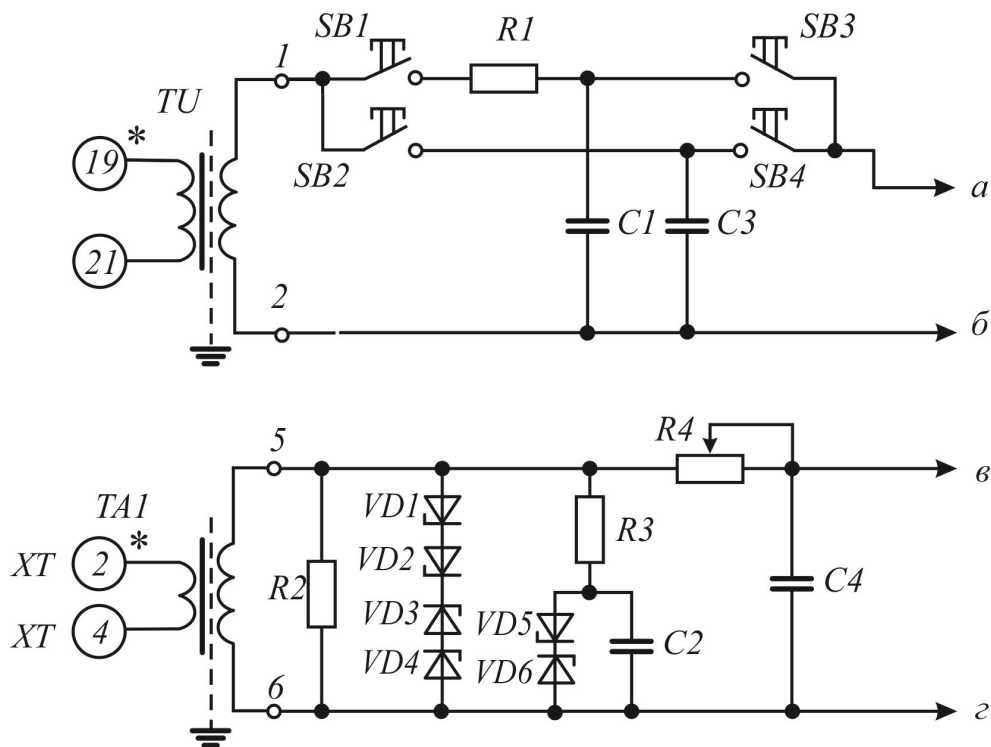


Рис. 3.2. Принципова схема вимірювальних пристроїв реле

Стабілітрон КС447А має наступні технічні характеристики:

Напруга стабілізації $U_{cm.min} = 4,23$ В, $U_{ст.ном} = 4,7$ В, $U_{cm.max} = 5,17$ В.

Струм стабілізації $I_{cm.min} = 3,0$ А, $I_{ст.ном} = 41$ А, $I_{cm.max} = 159$ А.

Постійна пряма напруга $U_{np} = 1,0$ В (при $I_{np} = 50$ мА)

Диференціальний опір $r_{cm} = 18$ Ом

Розсіювана потужність $P_{cm} = 1$ Вт.

Стабілітрон КС433А має наступні технічні характеристики:

Напряга стабілізації $U_{cm.min} = 4,23 \text{ В}$, $U_{ст.ном} = 4,7 \text{ В}$, $U_{cm.max} = 5,17 \text{ В}$.

Струм стабілізації $I_{cm.min} = 3,0 \text{ А}$, $I_{ст.ном} = 60 \text{ А}$, $I_{cm.max} = 191 \text{ А}$.

Постійна пряма напруга $U_{np} = 1,0 \text{ В}$ (при $I_{np} = 50 \text{ мА}$)

Диференціальний опір $r_{cm} = 25 \text{ Ом}$

Розсіювана потужність $P_{cm} = 1 \text{ Вт}$.

Параметри фазоповоротних ланцюгів можна, без урахування фазового зсуву, що вноситься трансформатором напруги, заздалегідь розрахувати відповідно до вираження:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_{C1}}{R_1} = \frac{1}{2\pi f R_1 C_1},$$

Звідки

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f R_1 \operatorname{tg} \varphi}.$$

Задаючись значенням резистора $R_1 = 560 \text{ Ом}$, отримаємо:

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 560 \cdot \operatorname{tg} 30} = 0,98 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Приймаємо значення $C_1 = 0,47 \text{ мкФ}$, $C_3 = 0,1 \text{ мкФ}$.

3.2.2. Фільтр низької частоти

Для якісного виділення вимірюваної напруги перш ніж подавати на пристрій подальшої обробки і захисту від високочастотних перешкод застосуємо активний фільтр низької частоти другого порядку типу Саллена-Кея (див. рис. 3.3.) Для якісної фільтрації приймаємо частоту зрізу фільтру

$$f_{CP} = 100 \text{ Гц}.$$

Вибираємо фільтр з частотною характеристикою Баттерворта, що має максимальну рівномірність характеристики в смузі пропускання.

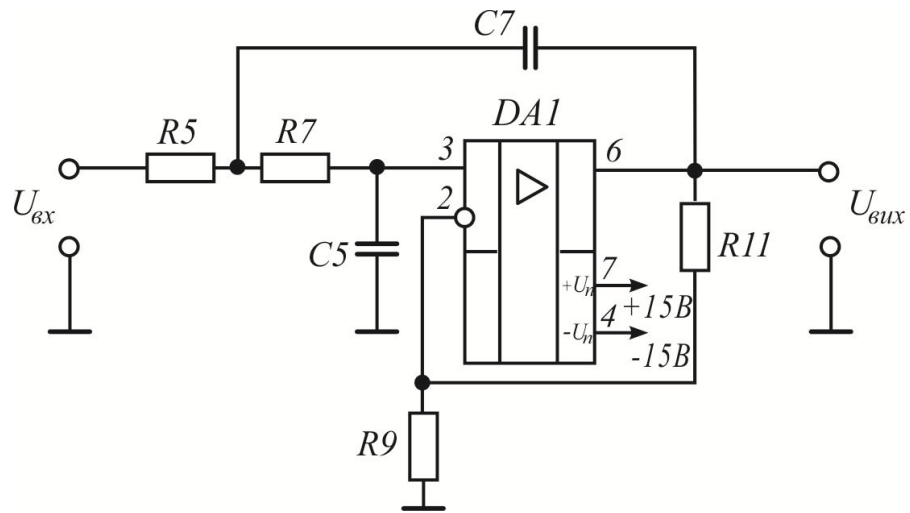


Рис. 3.3. Схема фільтра низької частоти.

Приймаємо $R_5 = R_7 = R$ і $C_5 = C_7 = C$.

Задаємося значенням ємності $C = 0,01$ мкФ і визначаємо величину опору R із співвідношення:

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{CP} \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 200 \cdot 10^{-8}} \approx 79,8 \text{ кОм.}$$

Вибираємо $R_9 = 82$ кОм, тоді

$$R_{11} = (2 - \alpha) R_9 = (2 - 1,414) 82 = 48,05 \text{ кОм}$$

де $\alpha = 1,414$ коефіцієнт, що визначає тип частотної характеристики фільтру.

Приймаємо $R_{11} = 48$ кОм.

Визначаємо коефіцієнт посилення в смузі пропускання:

$$K_{II} = \frac{R_{11}}{R_9} + 1 = \frac{48}{82} + 1 = 1,59.$$

3.2.3. Підсилювач-обмежувач

Під обмеженням розуміється обмеження напруги на виході ОП на деякому рівні, меншому, ніж максимально можлива вихідна напруга підсилювача. Схема обмеження:

- не робить ніякого впливу на вихідну напругу до тих пір, поки остання не досягне заданого рівня обмеження;

- після досягнення рівня обмеження вона зупиняє подальше підвищення напруги.

Схему обмеження використовуємо для запобігання насиченню ОП, тобто стану при якому вихідна напруга ОП рівна максимальній вихідній напрузі $U_{вих.мах.ОП}$. Цей стан небажаний, оскільки підсилювач з цього стану повертається значно повільніше в початковий стан, чим з лінійної області роботи. Схема обмеження (рис. 3.4) містить два зустрічно включених стабілітрона (симетричний стабілітрон КС191Ц) паралельно ланцюгу зворотного зв'язку ОП (КР140УД708). В цьому випадку вихідна напруга схеми буде обмежена величиною

$$U_{ВИХ.МАХ} \approx U_{СТАБ.} + 0,7 = U_{ОБМ} = 9,1 + 0,7 = 9,8 \text{ В.}$$

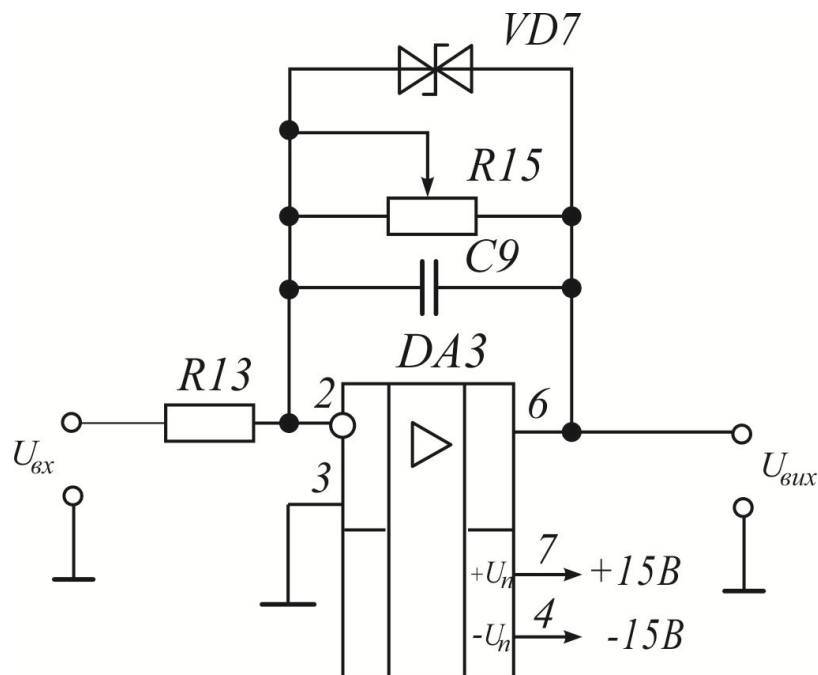


Рис. 3.4. Принципова схема підсилювача-обмежувача

Коефіцієнт посилення визначається вираженням:

$$K = -\frac{R_{15}}{R_{13}}$$

Знак "мінус" свідчить про те, що підсилювач інвертує, тобто фаза вихідного сигналу зрушена відносно вхідного на 180^0 . При максимальному коефіцієнті посилення $K = 10$, задаючись значенням резистора $R_{13} = 10 \text{ кОм}$, визначимо необхідний опір резистора R_{15}

$$R_{15} = K \cdot R_{13} = 10 \cdot 10 = 100 \text{ кОм}$$

Вибираємо багатооборотний підстроювальний резистор типу СП5-2ВА. Ємність $C_9 = 0,1 \text{ нФ}$, що включена в ланцюг зворотного зв'язку звужує смугу шумів, а також зменшує час встановлення $U_{\text{вих}}$ і компенсує вплив вхідної ємності і ємності навантаження.

3.2.4. Аналоговий перемножувач сигналів

Схему множення вихідних сигналів підсилювачів-обмежувачів будемо на основі інтегрального аналогового перемножувача сигналів К525ПС2, який є функціонально закінченим пристроєм. Він має три входи X, Y, Z і три входи регулювання зсуву вхідного рівня $X_{\text{см}}$, $Y_{\text{см}}$, $Z_{\text{см}}$ відповідно. Вихідний сигнал знімається зі вбудованого операційного підсилювача (див. рис. 3.5).

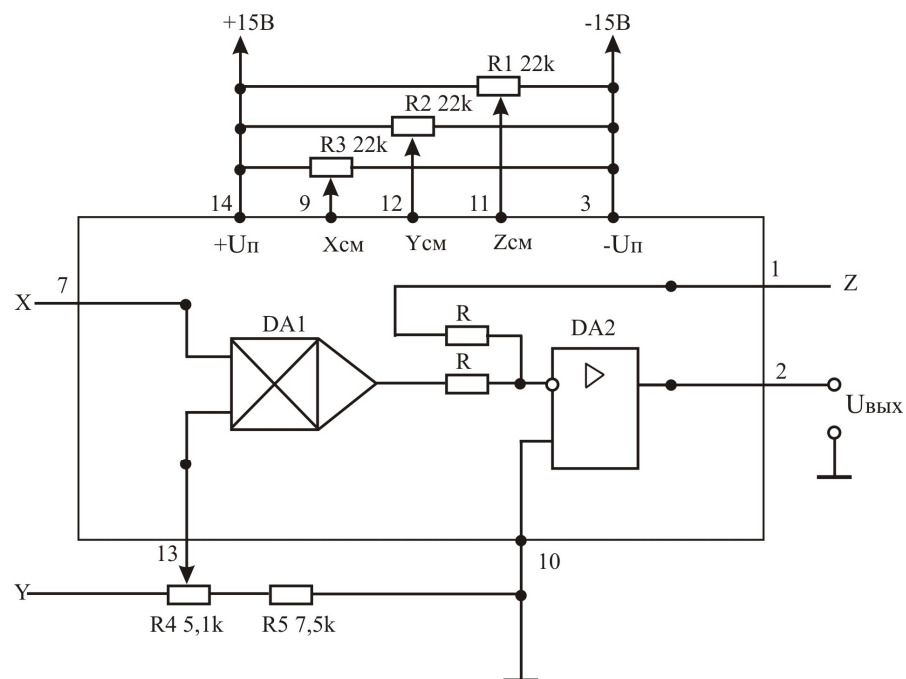


Рис. 3.5. Схема інтегрального аналогового перемножувача К525ПС2.

Сполучаючи по-різному входи і вихід цього перемножувача можна також здійснювати операції зведення в квадрат і витягання квадратного кореня.

При відповідному налаштуванні ця схема забезпечує чотирьохквadrантне перемножування аналогових сигналів. Схема включення в режимі множення двох сигналів приведена на рис. 3.6. Регулювання масштабу перетворення можна робити за допомогою дільника, встановленого, наприклад, на вході Y як показано на рис. 3.6. Вхідні сигнали перемножувача К525ПС2 можуть змінюватися в межах $\pm 10,5$ В. Завод-виробник гарантує погрішність перемножування у відсотках до повної шкали (± 10 В) не більше $\pm 1\%$.

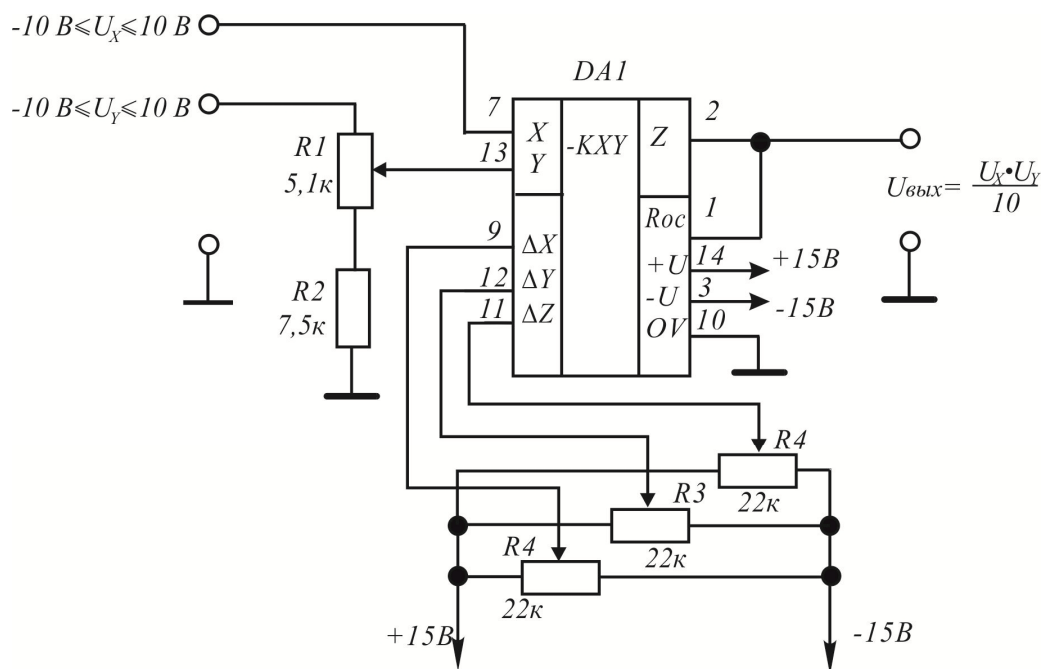


Рис. 3.6. Схема включення ІМС К525ПС2 в режимі множення

3.2.5. Інтегратор

Інтегратор будується на основі інвертуючого підсилювача на ОП, у якого резистор зворотного зв'язку замінений конденсатором (рис. 3.7).

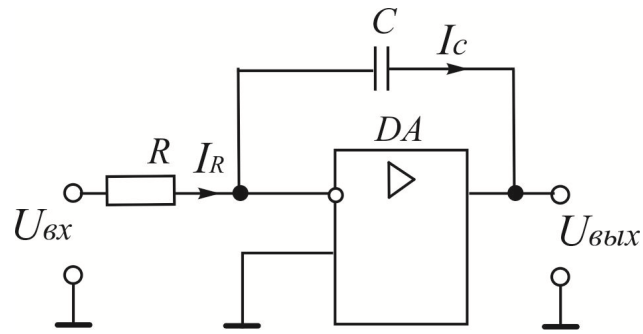


Рис. 3.7. Інтегратор на ОП

Вихідна напруга інтегратора визначається наступним вираженням:

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{вх}}(t) dt + U_{\text{вых}}(0)$$

Постійний член $U_{\text{вых}}(0)$ визначає початкові умови інтегрування:

$$U_{\text{вых}}(0) = U_{\text{вых}}(t=0)$$

Якщо вхідна напруга змінюється по синусоїдальному закону, тобто якщо $U_{\text{вх}} = U_m \sin \omega t$, тоді

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_m \sin \omega t + U_{\text{вых}}(0) = \frac{U_m}{\omega RC} \cos \omega t + U_{\text{вых}}(0)$$

З цього виразу видно, що амплітуда вихідної напруги обернено пропорційна до кругової частоти.

У схемі інтегратора негативний зворотний зв'язок викликає фазовий зсув, тобто коефіцієнт передачі ланцюга ЗЗ є комплексним.

$$\beta = \frac{U_{oc}}{U_{\text{вых}}} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

Для високих частот $\beta \rightarrow 1$ і його фазовий зсув буде нульовим, тобто з'являються умови самозбудження. Тому потрібна корекція частотної характеристики. Тому для схеми інтегратора використовують ОП з внутрішньою корекцією.

Для реального інтегратора на ОП необхідно враховувати вхідний струм $I_{ex.oy}$ і напругу зміщення ΔU_{cm} . При $\Delta U_{ex} = 0$ через ємність C тектиме струм, обумовлений наявністю вказаних погрешностей:

$$I_c = \frac{\Delta U_{cm}}{R} + I_{ex.oy}.$$

Внаслідок цього зменшуватиметься вихідна напруга

$$\frac{dU_{вых}}{dt} = \frac{I_c}{C} = \frac{1}{C} \left(\frac{\Delta U_{cm}}{R} + I_{ex} \right).$$

При заданій постійній часу τ вклад I_{ex} буде тим менше, чим більше ємність C . Рекомендується вибирати:

$$I_{ex} < \frac{\Delta U_{cm}}{R} = \frac{\Delta U_{cm} \cdot C}{\tau}.$$

Тому вибираємо ОП типу К544УД1В з повною внутрішньою частотною корекцією, що має дуже малий вхідний струм $I_{ex.oy} = 0,05 \text{ нА}$ і порівняно низьку напругу зміщення $\Delta U_{cm} \leq 5 \text{ мВ}$. Принципова схема інтегратора приведена на рис. 3.8.

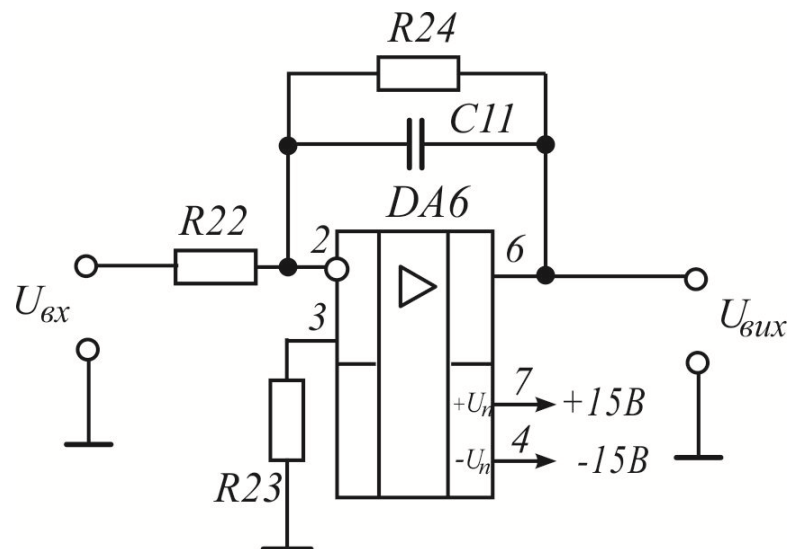


Рис. 3.8. Принципова схема інтегратора

Шунтування резистором R24 конденсатора C11 на низьких частотах, де конденсатор діє як розімкнений ланцюг, дозволяє зменшити вихідну напругу величиною $\Delta U_{вих} = \frac{R_{24}}{R_{22}} \Delta U_{см}$ замість $\Delta U_{вих} = K_{ов} \Delta U_{см}$.

Проте це шунтування обмежує знизу область частот, в якій виконується інтегрування. Ця область частот визначається частотою зрізу

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi R_{24} C_{11}}.$$

Для того, щоб погрішність інтегрування $\delta_u = 1\%$ мінімальна вхідна частота має бути $f_{вх.min} = 5f_{cp}$. Приймаючи $f_{cp} = 10$ Гц і ємність C11=0,68 мкФ, визначаємо значення резистора R24

$$R_{24} = \frac{1}{2\pi f_{cp} C_{11}} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 0,68} = 23417 \text{ Ом} = 23,4 \text{ кОм}$$

Приймаємо стандартне значення $R_{24} = 24 \text{ кОм}$.

При постійній часу інтегрування $\tau = R_{22} C_{11} = 1,6$ мс визначаємо величину резистора R22

$$R_{22} = \frac{\tau}{C_{11}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{0,68 \cdot 10^{-6}} = 2,35 \text{ кОм}$$

Приймаємо стандартне значення $R_{22} = 2,4 \text{ кОм}$.

Резистор R23 служить для зменшення погрішності інтеграції викликаній вхідним струмом ОП. Його величина визначається таким чином:

$$R_{23} = \frac{R_{22} \cdot R_{24}}{R_{22} + R_{24}} = \frac{2,4 \cdot 24}{2,4 + 24} = 2,18 \text{ кОм}$$

Приймаємо стандартне значення $R_{23} = 2,2 \text{ кОм}$.

3.2.6. Тригер Шмитта

Тригер Шмитта є компаратором, рівні включення і виключення якого не співпадають. Для цього в схемі простого компаратора вводиться

позитивний зворотний зв'язок. Схема неінвертуючого тригера Шмитта приведена на рис. 3.9. Резистор позитивного зворотного зв'язку (ПЗЗ) створює в схемі два пороги спрацьовування залежно від стану виходу, тобто вводить гістерезис в роботу компаратора.

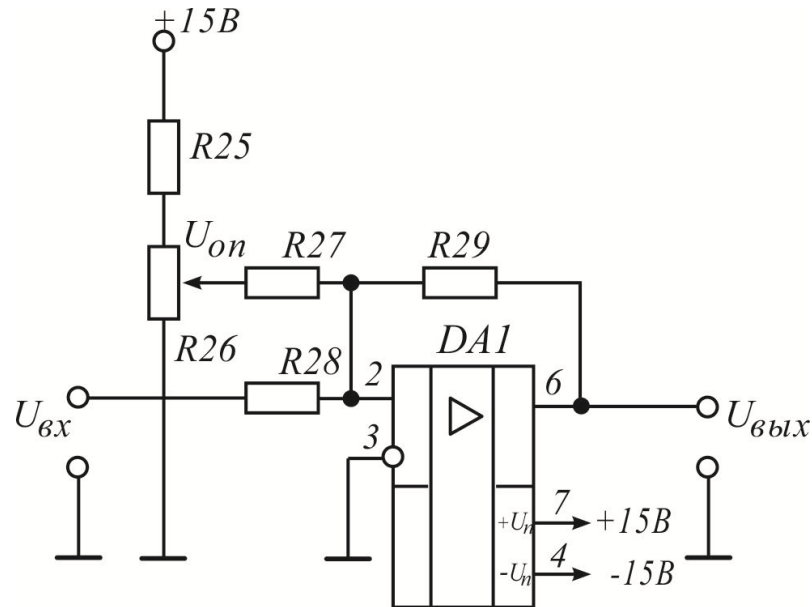


Рис. 3.9. Принципова схема тригера Шмитта

При $U_{оп} = 0$ пороги включення і виключення тригера Шмитта визначаються вираженням:

$$U_{вкл} = -\frac{R_{28}}{R_{29}}(-U_{вих\max\text{оп}});$$

$$U_{викп} = -\frac{R_{28}}{R_{29}}(+U_{вих\max\text{оп}}).$$

При $R_{28} = 20 \text{ кОм}$, $R_{29} = 100 \text{ кОм}$ и $U_{вих\max\text{оп}} = \pm 12 \text{ В}$, отримаємо два симетричні пороги перемикання відносно нульового дроту :

$$U_{вкл} = 2,4 \text{ В} \text{ и } U_{викп} = -2,4 \text{ В}.$$

Напряга гістерезису

$$U_{гист} = U_{вкл} - U_{викп} = 4,8 \text{ В}$$

При $U_{оп} \neq 0$ пороги включення і виключення тригера Шмитта визначатимуться таким чином:

$$U_{вкл} = -\frac{R_{28}}{R_{29}}(-U_{вих\max\text{ ОП}}) - U_{оп} \frac{R_{28}}{R_{27}},$$

$$U_{вкл} = -\frac{R_{28}}{R_{29}}(+U_{вих\max\text{ ОП}}) - U_{оп} \frac{R_{28}}{R_{27}}.$$

Опорна напруга, що знімається з дільника R25, R26 дозволяє регулювати в певних межах пороги включення і виключення компаратора.

Для того, щоб вхідний струм ОП не впливав на струм дільника напруги вибираємо $I_{дел} = 1 \text{ мА} \gg I_{R27}$. Тоді сумарний опір дільника

$$R_{дел} = R_{25} + R_{26} = \frac{+U_{п}}{I_{дел}} = \frac{15}{10^{-3}} = 15 \text{ кОм}.$$

При $R_{27} = 100 \text{ кОм}$, $R_{26} = 10 \text{ кОм}$ и $R_{25} = 5,1 \text{ кОм}$ опорну напругу $U_{оп}$ можна змінювати від 0 до 10 вольт, пороги перемикавання відповідно будуть змінюватися $U_{вкл}$ з 2,4 до 0,4 В і $U_{викл}$ з -2,4 В до -4,4 В. Напруга гістерезису не зміниться.

Пороги переключення встановлюються при налаштуванні реле.

3.2.7. Виконавчий пристрій

Принципова схема виконавчого пристрою приведена на рис. 3.10.

Реле К1 - проміжне герконове реле типу РПГ- 5 2110 15В, яке призначене для роботи в схемах автоматики і управління, виконаних на друкованих платах, і розраховано на номінальну напругу 15 В постійного струму випрямленого трифазного струму з частотою пульсації не менше 300 Гц без фільтру, а також з фільтром, що забезпечує пульсацію не більше 6%.

Основні технічні характеристики реле РПГ-5 2110 15В:

- Номінальна напруга живлення котушки, В 15;
- Відхилення напруги живлення котушки, $U_{ном}$ 0,8-1,1;

- Номінальний струм контактів, А 2;
- Номінальні робочі струми контактів, А $1 \cdot 10^{-6} \div 2$;
- Номінальна напруга контактів, В 300;
- Номінальні робочі напруги контактів, В 0,05-300;
- Час замикання контактів при спрацьовуванні, мс, не більше 2;
- Час розмикання контактів при повертанні, мс, не більше 1;
- Кількість груп контактів.....1, що замикає;
- Споживана потужність, Вт.....0,24;

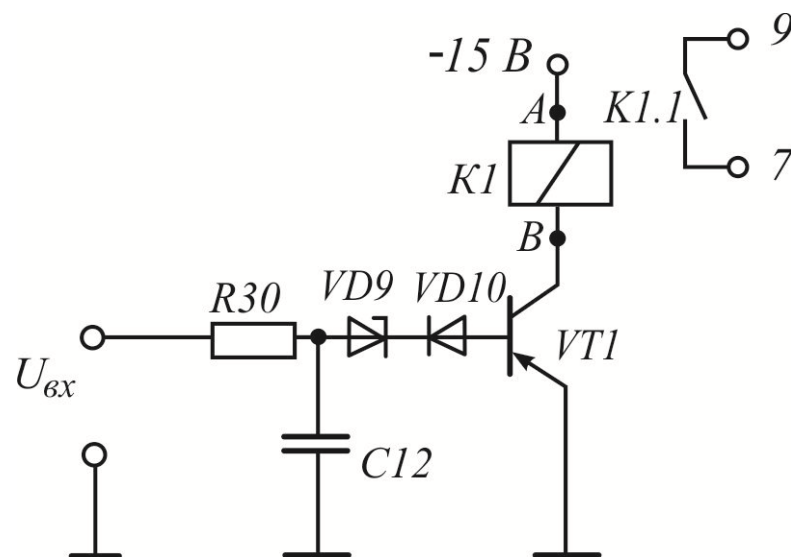


Рис. 3.10. Принципова схема виконавчого пристрою

Резистор R30 обмежує струм бази транзистора і захищає операційний підсилювач від перевантаження на виході. VD9, VD10 застосовується у зв'язку з тим, що у більшості операційних підсилювачів навіть в умовах насичення напруга на виході відрізняється від напруги на шинах живлення. Так що вихідний транзистор може відкриватися цією різницею напруги, яка виявляється прикладена між базою і емітером. Застосування стабілітрона VD9 (КС133) на 3,3 вольти гарантує надійне замикання будь-якого транзистора в схемі з будь-яким операційним підсилювачем. Конденсатор С12 запобігає відмиканню транзистора імпульсними перешкодами.

Визначаємо номінальний струм котушки реле

$$I_p = \frac{P_{сн}}{U_{ном}} = \frac{0,24}{15} = 0,016 \text{ А} = 16 \text{ мА}$$

Транзистор VT1, що управляє, повинен мати максимальний струм колектора $I_{к макс} > I_p$.

Вибираємо р-п-р транзистор КТ3107А, що має наступні характеристики: $I_{к макс} = 100 \text{ мА}$; $h_{21емин} = 70$; $U_{ке.нас} = 0,5 \text{ В}$..

Тоді необхідний струм бази транзистора VT1

$$I_{б} = \frac{I_p}{h_{21емин}} = \frac{16}{70} = 0,228 \approx 230 \text{ мкА}$$

величина опору резистора R30

$$R_{30} = \frac{U_{вих.мах.ОП} - U_{VD7} - U_{VD8} - U_{бе.нас}}{I_{б}} = \frac{12,5 - 3,3 - 0,7 - 0,7}{230 \cdot 10^{-6}} = \frac{7,8}{230 \cdot 10^{-6}} = 33913 \text{ Ом}$$

Тут $U_{бе.нас} = 0,7 \text{ В}$ - напруга насичення база-емітер.

$U_{VD7} = 0,7 \text{ В}$ - пряме падіння напруги на діоді VD8.

Вибираємо з запасом $R_{30} = 30 \text{ кОм}$.

3.2.8. Вузол живлення

Відповідно до завдання джерелом оперативного струму є акумуляторна батарея або випрямний агрегат на 220 В. Яких-небудь спеціальних блоків живлення оперативних ланцюгів в реле захисту, як правило, не використовують. Для отримання напруги $\pm 15 \text{ В}$ для живлення ОУ застосовуємо дільників напруги на резисторах (рис. 3.11). Необхідні рівні напруги $+15 \text{ В}$ і -15 В при допустимих відхиленнях напруги 220 В підтримуються за допомогою стабілітронів типу КС515А. Паралельно стабілітронам підключені конденсатори, що служать для захисту операційних підсилювачів від впливу перешкод, що поступають з мережі оперативного струму.

Для захисту від перенапружень з боку живлення в реле встановлюється варистор RV_1 типу СН1 з паралельно підключеним заводозахисним конденсатором C_3 .

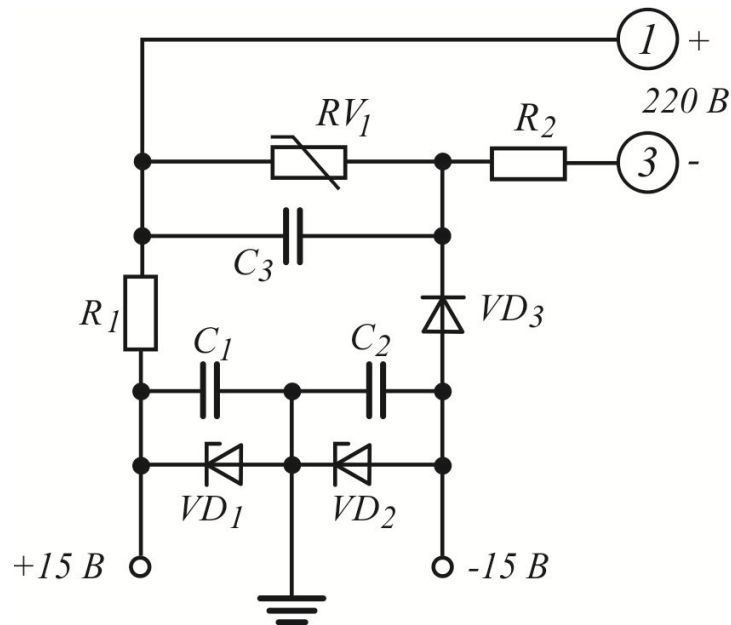


Рис. 3.11. Вузол живлення реле напруги потужності

Визначимо величину та потужність розсіювання баластних резисторів R_1 та R_2 . Струм споживання від вузла живлення розрахуємо у відповідності до виразу:

$$I_{cn} = \frac{P_{cn}}{U_{дож}} = \frac{10}{220} = 0,045 \text{ A} = 45 \text{ mA},$$

де $P_{cn} = 10 \text{ Вт}$ - споживана потужність від джерела оперативного струму;

$U_{дож} = 220 \text{ В}$ - напруга джерела оперативного струму.

Значення опору резисторів R_1 та R_2 без урахування падіння напруги на VD_3

$$R_1 + R_2 = \frac{U_{дож} - U_{VD1} - U_{VD2}}{I_{cn}} = \frac{220 - 15 - 15}{0,045} = 4180 \text{ Ом} = 4,18 \text{ кОм}.$$

Приймаємо стандартні значення $R_1 = R_2 = 2,1 \text{ кОм}$.

Визначимо необхідну потужність розсіювання резисторів R_1 та R_2

$$P_{R_1} = P_{R_2} = I_{cn}^2 R_1 = 0,045^2 \cdot 2,1 \cdot 10^3 = 4,25 \text{ Вт.}$$

Вибираємо резистори типу ПЕВ 7,5, номінальною потужністю 7,5 Вт.

Місце підключення шин ± 15 В до дільника вибрано так, щоб воно знаходилося під напругою, складовим приблизно половину напруги оперативного струму 220 В. При такому виконанні ці шини у нормальному стані ізоляції мережі оперативного струму опиняються під потенціалом, близьким до нуля по відношенню до землі. Діод VD3 встановлений для того, щоб не пошкодити мікросхеми, якщо на вхід реле буде подано напругу, що не відповідає полярності, позначеній на затисках.

3.3. Принципова схема реле максимального струму

Принципова схема реле максимального струму приведена на рис. 3.12. Реле складається з наступних частин: що сприймає (проміжний трансформатор ТА1), що перетворює (випрямівний міст VI, вихід якого підключений до резистора R1), що порівнює (пороговий елемент на операційному підсилювачі DA1, інтегруючий RC- ланцюг і тригер Шмитта на ОП DA2) і виконавчою (проміжне реле K1, включене в ланцюг колектора транзистора VT1).

Положення перемикачів уставок SB1 - SB5 на схемах відповідає мінімальній уставці по струму спрацьовування реле. Числа, над перемикачами, відповідають числам на шкалі уставок реле. Пороговий елемент реле виконаний на компараторі DA1. Поріг компаратора визначається напругою на ланцюзі резисторів R6, R9 - R13, яка практично пропорційна опорі цього ланцюга, оскільки струм в ньому задається резисторами R3 - R5, що мають великий опір. Змінний резистор R3 служить для точного підстроювання уставки. Діод VD1 призначений для захисту компаратора DA1 при великих струмах на вході реле.

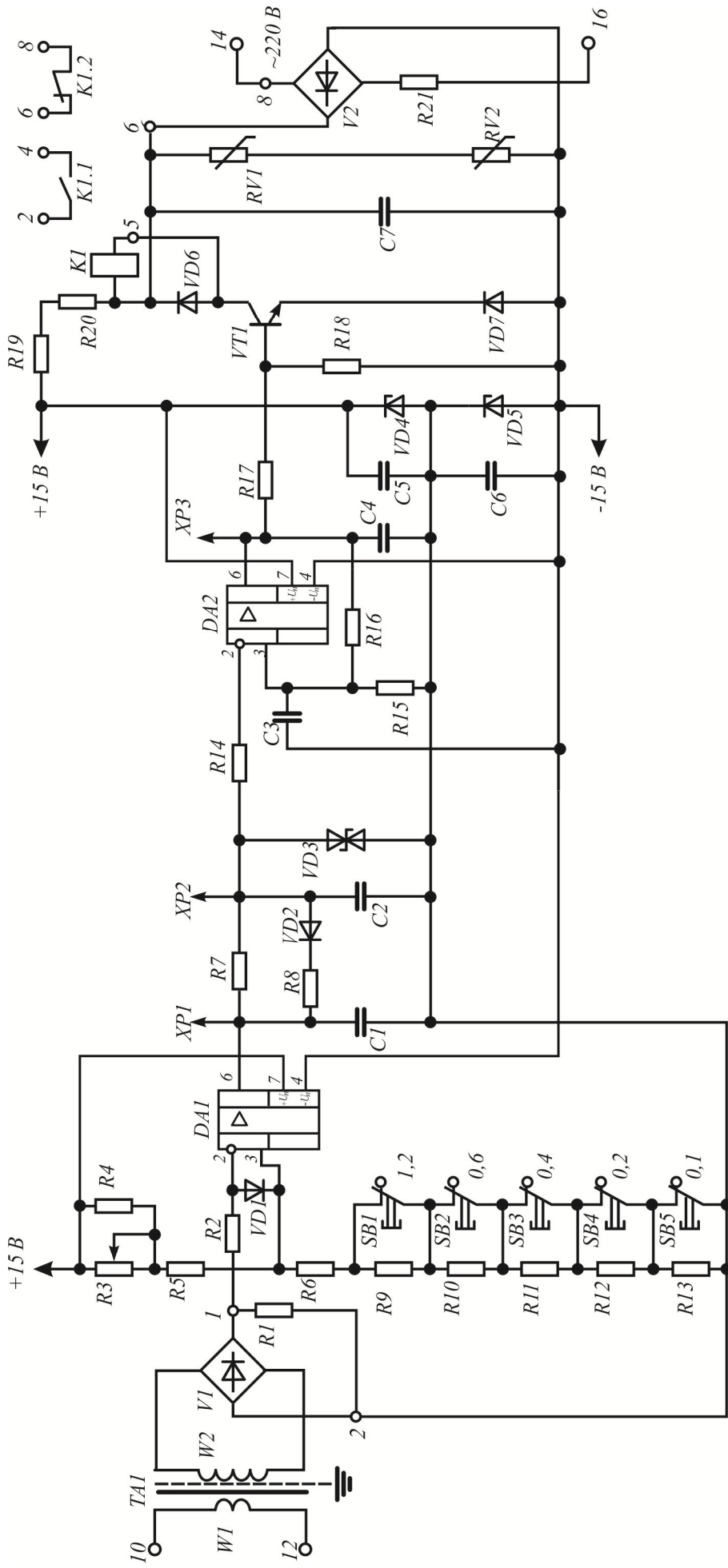


Рис. 3.12. Принципова електрична схема реле максимального струму

Вузол порівняння, використовуваний в цьому реле струму максимального захисту, реагує на повне значення вимірюваного струму. Цей вузол працює на часоімпульсному принципі. Для спрацьовування такого реле вимагається, щоб, по-перше, вхідний сигнал перевищив деяке задане значення, і, по-друге, забезпечувалося б певне співвідношення між часом перевищення заданого рівня і часом, коли вхідний сигнал нижчий рівня спрацьовування. Ці умови забезпечують хороше налаштування реле від перешкод, що виникають в мережі живлення реле оперативним струмом, а також із-за наведеної напруги від суміжних ланцюгів.

Відповідно до принципу роботи в схемі рис. 3.12 міститься два індикатори рівня. Один з них входить до складу перетворюючої частини вузла і є компаратором, зібраним на операційному підсилювачі DA1. На неінвертуючий вхід DA1 через дільника на резисторах R2 і R3 - R13 подається від джерела оперативного струму позитивна опорна напруга U_{on1} , значення якої визначається заданою уставкою реле. На інвертуючий вхід DA1 подається випрямлена напруга, пропорційна струму, що поступає від відповідного датчика через діодний міст.

Якщо значення випрямленої напруги, що поступає, менше опорної напруги, на виході DA1 буде напруга позитивного знаку максимального значення, рівна приблизно 13 В. На часовій діаграмі (рис. 3.13), що характеризує роботу вузла при різних значеннях вхідного сигналу, це відповідає першому напівперіоду зміни вхідного сигналу. Наявна на виході DA1 позитивна напруга заряджає конденсатор C1 через резистор R3, оскільки діод VD2 закритий. Максимум напруги на конденсаторі обмежується напругою стабілізації VD3, яка дорівнює приблизно 9 В. Отримана напруга подається на інший індикатор рівня, зібраний на операційному підсилювачі DA2. Він є інвертуючим тригером Шмитта.

Позитивна напруга, що поступає з конденсатора C1 на інвертуючий вхід DA2, створює на виході ОП напругу негативного знаку, що досягає мінус 13 В. Через ланцюг позитивного зворотного зв'язку на неінвертуючий

вхід DA2 приходить частина цієї напруги, залежна від співвідношення між опорами резисторів R6 і R7.

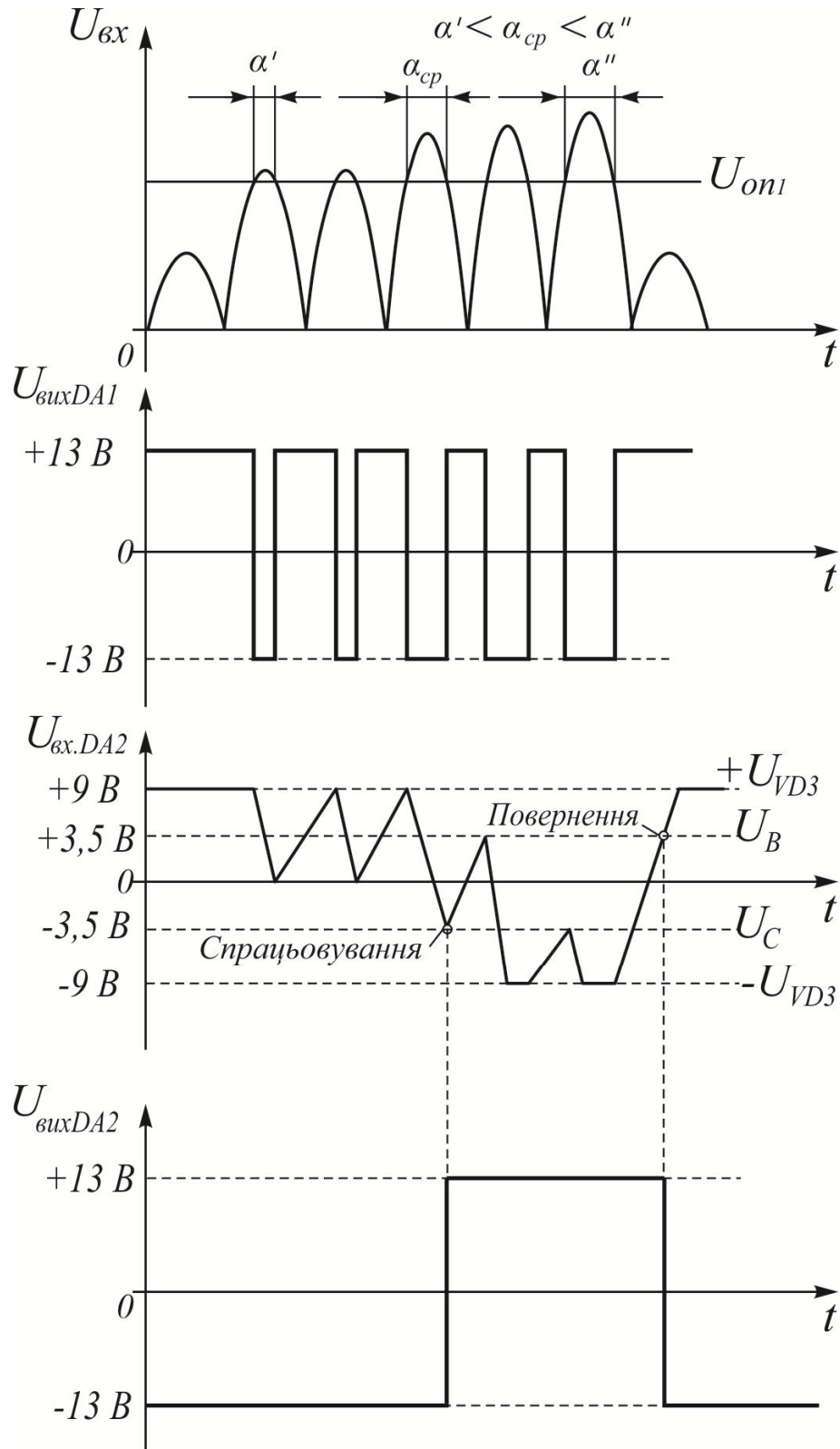


Рис. 3.13. Часова діаграма вузла порівняння

Вона служить опорною напругою спрацьовування

$U_{on2,C} = U_{вихDA2} \frac{R6}{R6 + R7}$, що визначає другу умову спрацьовування. При

зростанні вхідної напруги до значення, що перевищує опорну, відбувається зміна режиму компаратора, і знак вихідної напруги DA1 стає негативним, залишаючись рівним максимуму, тобто мінус 13 В.

Зміна знаку напруги на виході DA1 викликає перезаряд конденсатора C1, якщо рівень U_{ex} стає вище U_{on1} на невеликий проміжок часу, як виходить в другому і третьому напівперіодах зміни U_{ex} на рис. 3.13, то ємність C1 не устигає повністю перезарядитися. Відбувається лише зниження напруги на ємності C1 до значення, близького до нуля, а потім після спаду U_{ex} нижче U_{on1} - повторний заряд ємності до максимального позитивного рівня.

Виконавча частина вузла порівняння подіє тільки тоді, коли за рахунок збільшення вхідного сигналу час перевищення U_{ex} над U_{on1} рівний проміжку α_{cp} на рис. 3.13, стане достатнім, щоб ємність C1 перезарядилася настільки, що негативна напруга на конденсаторі C1 стала нижче $U_{on2,C}$.

Потенціал інвертуючого входу DA2 досягне в цьому випадку такого значення, що станеться негайна зміна знаку вихідної напруги триггеру на позитивний. Це є ознакою спрацьовування вузла. Процес спрацьовування видно на рис. 3.13 на четвертому напівперіоді, що відповідає початку спрацьовування, і двох наступних напівперіодах зміни U_{ex} .

Після зміни знаку напруги на виході DA2 напруга на його неінвертуючому вході DA2 стає теж позитивною. Її називають опорною напругою повернення $U_{on2,B}$, оскільки нею визначається значення вхідного сигналу, яке потрібно для повернення триггера Шмитта. Після закінчення проміжку часу, відповідного α_{cp} , ємність C1 знову почне заряджатися. Постійні часу заряду і розряду ємності C1 завдяки наявності діода VD2 виходять неоднаковими, оскільки опір ланцюга заряду приблизно в 3 рази більше опору ланцюга розряду. Тому, коли ємність C1 знову почне

заряджатися, вона не встигне досягти рівня $U_{on2,B}$ знову настане розряд. Цим досягається релейна дія реагуючого органу.

Для повернення треба, щоб U_{ex} знизилася до такого значення, коли напруга на конденсаторі С1 стане вища $U_{on2,B}$. Останній напівперіод зміни U_{ex} на рис. 3.13, відповідає цьому моменту. Як показує аналіз, α_{cp} повинна складати приблизно 1,6 мс. За цей час вхідна напруга змінюється практично не більше ніж на 3%. Зате завдяки такій властивості робота реле мало залежить від форми кривої вхідного сигналу, що поступає. Тому струмові реле такого виконання надійно працюють при значних погрішностях трансформаторів струму, які можуть досягати 50 % і більше.

Для забезпечення високого коефіцієнта повернення реле, а також для зменшення часу його спрацьовування і повернення, паралельно інвертуючому входу тригера включений стабілітрон VD3, рівень стабілізації якого дещо перевищує поріг тригера. Цей рівень вибраний так, щоб перезаряд конденсатора С2 інтегруючого RC- ланцюга за часом відбувався на відносному зламі, практично лінійній ділянці експоненти, що стабілізує часові характеристики реле.

Резистор R17 обмежує струм, а резистор R18 - напругу ланцюга база-емітер транзистора VT1. Діод VD6 захищає цей транзистор від перенапружень в ланцюзі емітер-колектор при комутації електромагнітного реле К1, а діод VD7 служить для забезпечення режиму відсічення транзистора VT1 в режимі до спрацьовування реле. Конденсатори С1 і С4 призначені для захисту реле від імпульсних перешкод, а конденсатор С3 для відвертання короткочасного спрацьовування вихідного реле при включенні оперативної напруги.

Оперативна напруга змінного струму подається на схему реле через випрямівний міст V2 і баластний резистор R21. Конденсатор С8 призначений для згладжування випрямленої напруги. Напруга ± 15 В для живлення компараторів DA1 і DA2 знімається із стабілітронів VD4 і VD5 і додатково згладжується конденсаторами С5, С6, які одночасно служать для захисту

схеми реле від імпульсних перешкод. Резистори R19, R20 є баластними при стабілізації і згладжуванні напруги. Діод VD8 в схемі призначений для захисту реле від помилкового включення напруги зворотної полярності.

Регулювання уставок реле робиться дискретно сходами по 0,1 мінімальної уставки діапазону. Значення струму спрацьовування на відповідній уставці визначається по формулі

$$I = I_{\min}(1 + \Sigma N),$$

де I_{\min} – мінімальна уставка по струму діапазону уставок;

ΣN - сума чисел на шкалі уставок (0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,6), біля яких шліци перемикачів уставок SB1 - SB5 встановлені горизонтально. При цьому контакти відповідних перемикачів розімкнені, а резистори R9 - R13 введені в роботу, що призводить до підвищення порогу спрацьовування компаратора DA1. При необхідності струм спрацьовування реле може бути відкоригований за допомогою змінного резистора R3, розташованого на лицьовій стороні плати реле.

Усі елементи схеми реле, окрім баластних резисторів, змонтовані в загальному корпусі, що складається з основи і знімного прозорого корпусу. Баластні резистори встановлені на підставі реле із зовнішнього боку. Перемикачі уставок, що виходять регульованою частиною на зовнішню сторону лицьової таблички, встановлені на платі з друкарським монтажем.

4. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

4.1. Порядок установки і роботи реле на пряму потужності

Реле виконано в уніфікованій конструкції "СУРА". Реле змонтоване на механічно міцному пластмасовому цоколі. Усі вузли і деталі захищені прозорим полістироловим кожухом.

Резистори великої потужності (типу ПЕВ-7,5) винесені під цоколь з метою зменшення, нагрівання елементів, розташованих усередині кожуха. Більшість радіоелементів схеми встановлена на друкованих платах, які закріплені на основній скобі, що несе. На бічній стінці скоби встановлений вхідний трансформатор ланцюгів напруги, а трансформатор струму встановлений на цоколі. На друкованій платі реле зліва від лицьової плати є 4 перемикачі для виставляння характеристичного кута. Конструкція реле (рис. 4.1) допускає застосування переднього або заднього (гвинтом) приєднання зовнішніх провідників.

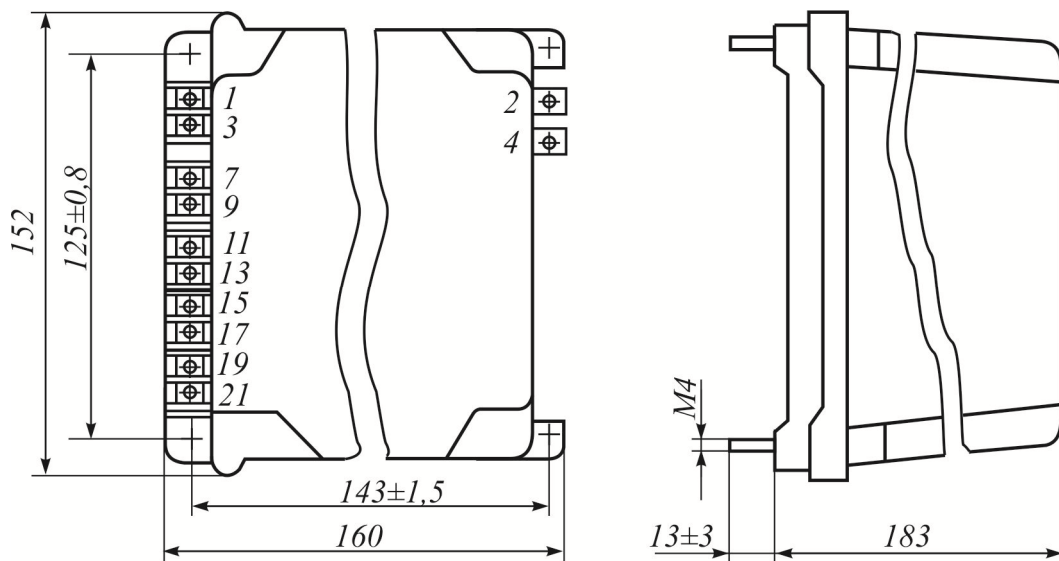


Рис.4.1. Конструкція корпусу реле з переднім приєднанням провідників

Реле призначені для установки на вертикальну площину рейкової заземленої металоконструкції (товщина косинця не більше 5 мм). Робоче положення реле в просторі вертикальне з відхиленням не більше 10° у будь-яку сторону.

При установці реле на площину під реле має бути передбачений прямокутний отвір розміром (110×70) мм для поліпшення умов охолодження винесених резисторів. Чотири гвинти для кріплення реле з транспортного положення необхідно переставити в робоче.

4.1.1. Реле пристосоване для переднього або заднього (гвинтом) приєднання зовнішніх провідників. Реле поставляється зі встановленими деталями приєднання зовнішніх провідників. Електрична схема підключень приведена на мал. 4.2.

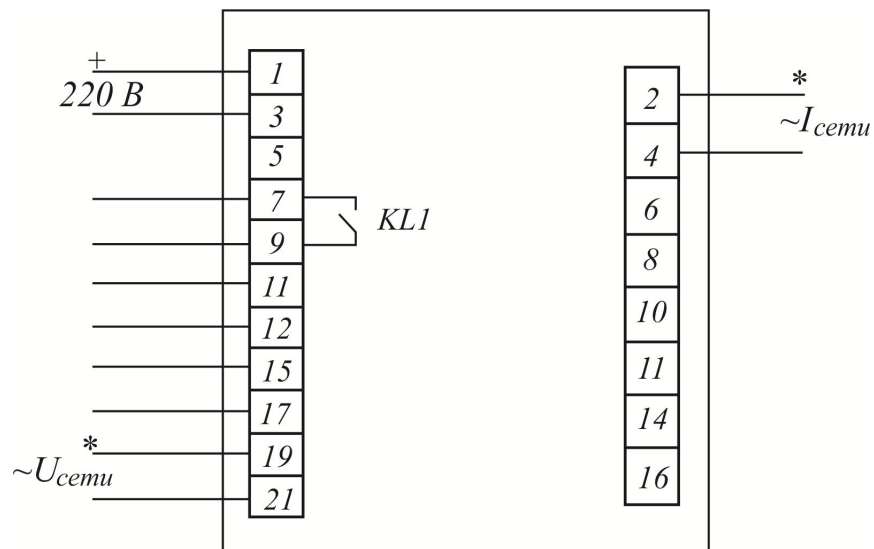


Рис. 4.2. Схема електрична підключень реле

4.1.2. Контактні затиски виведень реле допускають приєднання до них одного або двох провідників номінальним перерізом $1,5 \text{ мм}^2$ і відповідають 2 класу по ГОСТ 10434-76.

4.1.3. Перед включенням в роботу треба переконатися у відсутності в реле дефектів, які могли з'явитися при порушенні правил транспортування і зберігання.

Потім на лицьовій платі реле виставити необхідний характеристичний кут (мал. 4.3);

Перемикання уставок робиться таким чином.

Викрутку вставити в шліц голівки відповідного перемикача, легко натиснути на неї до упору, повернути так, щоб шліц показував на відповідну

цифру уставки на лицьовій платі і відпустити голівку перемикача, яка повинна залишитися втиснутою в корпус перемикача.

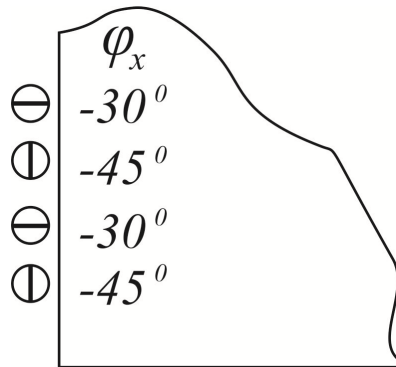


Рис.4.3. Приклад виставлення характеристичного кута (-30°)

4.1.4. Реле випускається із заводу повністю відрегульованим і додаткового регулювання не потребує, але у разі потреби підрегулювання виконується відповідно до розділу 4.2.

4.2. Налаштування реле напряму потужності

Налаштування реле полягає у встановленні необхідної ширини робочої зони по спрацьовуванню і поверненню, а також в підстроюванні верхнього обмежувача і робиться в наступному порядку:

а) встановити осі резисторів :

- R26 проти годинникової стрілки до упору;
- R4 приблизно в середині.

б) змінюючи кут між струмом і напругою добитися спрацьовування вихідного реле, відійти від краю робочої зони на $(3-4)^\circ$ і резистором R26 добитися повернення реле;

в) заміряти граничні кути φ_1 , φ_2 і визначити дійсний кут $\varphi_{x.дійсн.}$, по формулі:

$$\varphi_{x.дійсн.} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \text{ при відліку кутів від } 0 \text{ до } \pm 180^\circ;$$

г) визначити різницю $\varphi_x - \varphi_{x.дійсн.}$, де φ_x рівний -30° , -45° ;

д) визначити будь-який з граничних кутів, що відповідає φ_x , як

$$\varphi_1' = \varphi_1 + (\varphi_x - \varphi_{x.\text{дієсн.}})$$

або

$$\varphi_2' = \varphi_2 + (\varphi_x - \varphi_{x.\text{дієсн.}})$$

е) виставити отримане значення φ_1' або φ_2' за допомогою фазорегулятора;

ж) обертаючи вісь резистора R26 добитися спрацювання вихідного реле. При вихідному реле, що спрацювало, спочатку обертанням осі R26 добитися повернення реле, а потім зворотним обертанням - спрацювання;

з) заміряти знову граничні кути і визначити характеристичний кут

$$\varphi_x' = \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2}$$

и) визначити граничні кути при необхідній ширині зони ($A=170^\circ$)

$$\varphi_1'' = \varphi_x' - \frac{A}{2}; \quad \varphi_2'' = \varphi_x' + \frac{A}{2}.$$

к) виставити отримані значення φ_1'' або φ_2'' за допомогою фазорегулятора;

л) обертанням осі резистора R4 добитися спрацювання реле;

м) відійти від краю робочої зони на $(3-4)^\circ$ і обертанням резистора R26 добитися чіткого повернення реле;

н) за допомогою фазорегулятора виставити φ_1'' або φ_2'' - реле повинно спрацювати, обертанням осі резистора R4 добитися повернення реле і зворотним обертанням знайти грань спрацювання - реле повинно спрацювати;

о) перевірити ширину робочої зони, яка має бути $(165+180)^\circ$, повернення $(3-4)^\circ$ і характеристичний кут.

Характеристичний кут визначається як середина робочої зони реле.

ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі магістра спроектовані напівпровідникові реле струму і напряду потужності для систем максимального спрямованого струмового захисту. На відміну від струмового захисту струмовий спрямований завдяки реле напряду потужності реагує не лише на абсолютне значення струму в елементі, що захищається, але і на його фазу відносно напруги на шинах біля місця установки захисту, тобто діє залежно від напряду потужності при коротких замиканнях. Селективна дія захисту забезпечується відповідним включенням органу напряду потужності і вибором витримки часу.

На відміну від найбільш поширених індукційних реле напівпровідникові мають меншу споживану потужність, більш чутливі і точніші, вимагають менших експлуатаційних витрат. Крім того, усунений головний недолік індукційного реле напряду потужності - явище самохода, тобто неправильне спрацьовування реле при зворотному напрямі потужності, коли ушкодження виникає у безпосередній близькості від реле в зоні його недії.

Відмінністю розробленого напівпровідникового реле напряду потужності від тих, що випускаються серійно, являється інший принцип визначення знаку активної потужності, ґрунтований на використанні аналогового перемножувача сигналів, що дозволило спростити схему реле і підвищити надійність роботи.

Подальша перспектива в розробці реле цього типу полягає в застосуванні твердотілих і мікропроцесорних реле, які мають більш високу швидкість перемикання, повну гальванічну розв'язку і меншу чутливість до зовнішніх умов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ДЖЕРЕЛ

1. Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учеб. для вузов.- М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособ. для техн.- М.: Энергоатомиздат, 1998.
3. Линт Г.Э. Серийные реле защиты, выполненные на интегральных микросхемах.- М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Темкина Р. В. Измерительные органы релейной защиты на интегральных микросхемах.- М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Реле направления мощности типов РМ 11 и РМ 12. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ИАЕЖ 648.243.001 ТО ОБК.469.584 Издание 01.
6. Казанский В.Е. Измерительные преобразователи тока в релейной защите. – М.: Высшая школа, 1988. – 240 с.
7. Копьев В.Н. Релейная защита. Принципы выполнения и применения: Учебное пособие. 3-е изд., испр. и доп.-Томск: Изд. ЭЛТИ ТПУ, 2006.- 143 с.
8. Мельников М.А. Релейная защита и автоматика элементов систем электроснабжения промышленных предприятий: учебное пособие / М.А. Мельников – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 218 с.
9. Фабрикант В.Л. и др. Элементы устройств релейной защиты и автоматики энергосистем и их проектирование. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 472 с.
10. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей - Санкт-Петербург: Изд-во ПЭИ повышения квалификации, 2003. – 350 с.
11. Гуревич Ю. Е., Либова Л. Е., Окан А. А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. - М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.

12. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. - М.: Энергоатомиздат, 1990.-576 с.
13. Электротехнический справочник: В 3-х т. Т.3. Кн.1. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. Ред. В.Г. Герасимова и др.-6-е изд. испр. и доп.- М.: Энергоиздат, 1982.-656 с.
14. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных приборах. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1988. – 304с.
15. Зельдин Е.А. Цифровые интегральные микросхемы в информационно-измерительной аппаратуре. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1986. – 280с.
16. Аналоговые и цифровые интегральные микросхемы: Справочное пособие /под ред. С.В. Якубовского/ - 2-е изд., М.: Радио и связь., 1984. – 560с.
17. Александров К.К., Кузьмина Е.Г. Электротехнические чертежи и схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288с.
18. Кар. Дж. Проектирование и изготовление электронной аппаратуры: Пер с англ. – 2-е изд. стереотип., - М.: Мир., 1986. – 387с. ил.
19. Изъюрова Т.И., Королев Г.В., Терехов В.А. и др. Расчет электронных схем. – М.: Высшая школа, 1987. – 335с.
20. Алексеенко А.Г. и др. Применение прецизионных аналоговых микросхем. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1985. –256с.
21. Справочная книга радиолюбителя-конструктора /под ред. Н.И. Чистякова. – М.: Радио и связь, 1990. – 624с.
22. Щербаков В.И., Грездов Г.И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. – К.: Техника, 1983. – 213с.
23. Материалы в приборостроении и автоматике: Справочник /под ред. Ю.М.Аятина/ - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 528с.