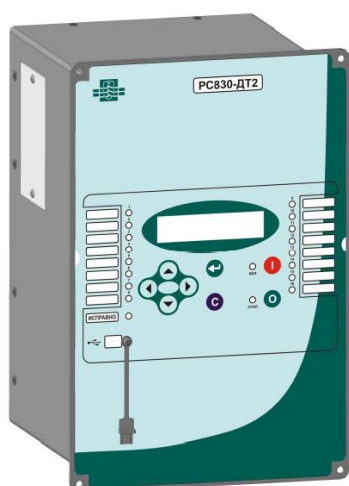


В. М. Ковальов

ОСНОВИ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ЗАХИСТУ І АВТОМАТИКИ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»

В. М. Ковальов

ОСНОВИ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ЗАХИСТУ
І АВТОМАТИКИ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2026

УДК 621.31
К 86

Рецензенти:

Д. А. Гапон, д-р техн. наук, завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут";

В. Є. Плюгін, д-р техн. наук, завідувач кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Ковальов В. М.

К 86 Основи мікропроцесорного захисту і автоматики електромереж [Електронний ресурс] : навч. посіб. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2026. – 156 с.

Викладено основи мікропроцесорного захисту і автоматики електромереж. У деталях розглянуто загальні принципи побудови захистів, вимоги до них, особливості первинних вимірювальних перетворювачів струму та напруги, а також побудову схем захистів ліній електропередач і трансформаторів. Наведено алгоритми розрахунку параметрів спрацювання мікропроцесорного захисту і автоматики електромереж. Розглянуто особливості виконання принципових електричних схем захисту з урахуванням особливостей мікроконтролерів. Подано запитання та завдання для самостійної роботи студентів.

Рекомендовано для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

УДК 621.31

Іл. 91. Табл. 55. Бібліогр.: 20 назв.

© Ковальов В. М. 2026

© Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», 2026

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Загальна характеристика електромереж	5
1.1. Аналіз типової схеми електромережі.....	5
1.2. Аналіз усталених електромагнітних процесів у трансформаторах.....	6
1.3. Аналіз перехідних електромагнітних процесів у трансформаторах.....	9
1.4. Методика розрахунку струмових режимів трансформаторів.....	10
1.5. Аналіз параметрів ліній електропередачі.....	14
1.6. Методика розрахунку струмових режимів ліній	16
2. Загальна характеристика пристроїв захисту та автоматики електричних мереж	20
3. Аналіз елементів мікропроцесорних пристроїв захисту та автоматики (МПЗА).....	26
3.1. Функціональна схема МПЗА.....	26
3.2. Аналогові та цифрові мікросхеми для пристроїв МПЗА.....	28
3.3. Перетворювачі аналогових і цифрових сигналів	33
3.4. Мікропроцесори і мікроконтролери	38
3.5. Периферійні пристрої мікроконтролерів.....	44
4. Основи програмування МПЗА	53
4.1. Аналіз мов програмування.....	53
4.2. Методика складання алгоритмів програм	57
5. Мікропроцесорний струмовий захист	67
5.1. Трансформатори струму.....	67
5.2. Завадозахищеність вхідних кіл МПЗА	73
5.3. Ступеневий принцип побудови струмових захистів	77
5.4. Мікропроцесорне струмове реле серії АЛ-5-Х	79
5.5. Програмування мікропроцесорного струмового реле	82
6. Мікропроцесорний захист і автоматика трансформаторів.....	99
6.1. Вибір типів захистів та автоматики для трансформаторів	99
6.2. Мікропроцесорний диференційний захист трансформаторів.....	102
6.3. Мікропроцесорний захист трансформаторів від зовнішніх коротких замикань	105
6.4. Мікропроцесорний газовий захист трансформаторів.....	109
6.5. Мікропроцесорний пристрій автоматичного вмикання резерву серії РС80-МАВ.....	118
7. Мікропроцесорний захист і автоматика ліній	122
7.1. Вибір типів захистів та автоматики для ліній	122
7.2. Мікропроцесорні пристрої захисту і автоматики ліній	126
7.3. Мікропроцесорний захист нульової послідовності	130
7.4. Мікропроцесорний захист паралельних ліній	134
7.5. Мікропроцесорний дистанційний захист ліній.....	140
7.6. Мікропроцесорний диференційно-фазний захист ліній.....	142
7.7. Мікропроцесорні пристрої автоматики ліній.....	145
Бібліографічний список	155

ВСТУП

Електрична мережа являє собою сукупність ліній і трансформаторів для розподілення та споживання електроенергії. Для забезпечення нормальної роботи та безперебійного надійного електропостачання споживачів необхідне використання пристроїв захисту і автоматики.

Нормативною базою для побудови захистів і автоматики електромереж є "Правила улаштування електроустановок (ПУЕ)". У ПУЕ в розділі 3 "Захист і автоматика" рекомендовано при капітальних ремонтах електроустановок і при побудові нових використовувати мікропроцесорні пристрої захисту і автоматики (МПЗА). Останні мають технічні переваги: в рази менша потужність споживання і похибка спрацювання; в рази менші маса та габарити пристроїв.

Функціональні переваги МПЗА: формування звітної документації; наявність цифрового осцилографа та реєстратора аварійних подій; можливість швидкої зміни параметрів захисту. *Експлуатаційні переваги МПЗА:* зниження трудомісткості експлуатації; висока міра заводської готовності; автоматичне тестування і самодіагностика. *Економічні переваги МПЗА:* менша вартість трансформаторів струму і напруги; зменшення витрат на кабельно-провідникову продукцію; мінімум робочої площі; скорочення номенклатури і кількості запасних частин; зменшення чисельності обслуговуючого персоналу. *Недоліки МПЗА:* чутливість до електромагнітних завад з боку живильної мережі.

В електромережах України широко використовують МПЗА від українських виробників, таких як "РЕЛСІС", «РЗА СИСТЕМЗ», "ХАРТРОН-ІНКОР", «Київприлад».

На сьогодні наявна література по МПЗА обмежується лише переліченням їх функціональних можливостей, технічних характеристик, функціональних схем і схем підключення. Зовсім не розглядаються принципи побудови алгоритмів їх роботи і принципи побудови програмного забезпечення. За такої ситуації МПЗА сприймається як "чорна скринька" зі входами і виходами, що обмежує технічну обізнаність спеціалістів.

Відмінною особливістю змісту цього посібника є розкриття питань внутрішнього функціонування МПЗА крізь призму практичних реалізацій алгоритмів роботи і складання програм.

Мета посібника – надати студентам загальні теоретичні знання і практичні навички для експлуатації і проектування систем МПЗА.

Посібник написано на основі досвіду підготовки студентів у Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» за спеціальністю 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ

1.1. Аналіз типової схеми електромережі

У загальному випадку електрична мережа (рис. 1.1) являє собою сукупність трансформаторних підстанцій та ліній електропередач.

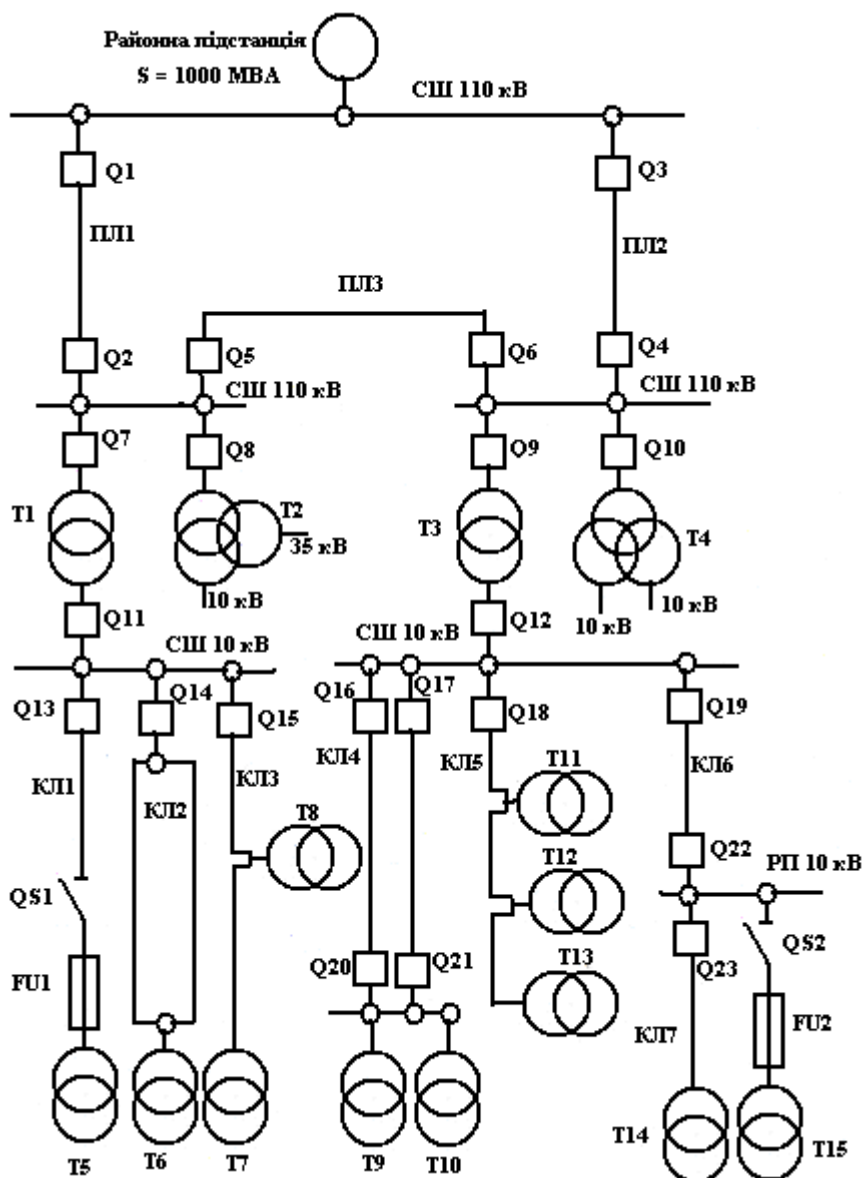


Рис. 1.1. Однолінійна електрична схема електричної мережі

Районна підстанція енергосистеми містить декілька автотрансформаторів сумарною потужністю 1000 МВт, живлення яких реалізується повітряними лініями напругою 330 кВ від групи електростанцій. Автотрансформатор містить трифазні котушки, з'єднані у схему "зірки", на

які подається лінійна напруга 330 кВ, і з частини котушок знімається лінійна напруга 110 кВ. Використання на районних підстанціях автотрансформаторів замість двообмоткових трансформаторів спричинене в рази меншою вартістю обмоток і вартістю ізоляції.

Від районної підстанції відходять дві повітряні лінії 110 кВ з високовольтними вимикачами до двох двотрансформаторних підстанцій, на яких встановлені двообмоткові трансформатори 110/10 кВ, триобмотковий трансформатор 110/35/10 кВ, трансформатор з розщепленими обмотками 110/10/10 кВ.

Від шин 10 кВ відходить радіальна кабельна лінія КЛ1 з вимикачем Q13 на вході і роз'єднувачем QS1 з запобіжником FU1 на виході. Паралельні кабельні лінії КЛ2, КЛ4 напругою 10 кВ використовують за відсутності кабелів необхідного перерізу жил. На паралельній лінії КЛ2 використано один спільний вимикач Q13. Для підвищення надійності паралельних ліній використовують окремі вимикачі Q16, Q17, Q20, Q21. Кабельні лінії КЛ3, КЛ5 називаються магістральними, оскільки живлять декілька підстанцій 10/0,4 кВ.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Сформулювати визначення поняття "електрична мережа".
2. Пояснити призначення ліній і трансформаторів в електричній мережі.
3. Пояснити призначення вимикачів в електричній мережі.
4. Дати характеристику типам ліній.
5. Дати характеристику типам трансформаторів.
6. Дати характеристику для районної підстанції енергосистеми.
7. Пояснити причини використання паралельних ліній.
8. Пояснити причини використання триобмоткових трансформаторів.
9. Пояснити причини використання трансформаторів із розщепленими обмотками.
10. Які величини напруг використовуються в електричних мережах?
11. Для захисту яких ліній використовуються високовольтні запобіжники?
12. Пояснити перевагу використання кабельних ліній над повітряними.

1.2. Аналіз усталених електромагнітних процесів у трансформаторах

У 1826 р. французький фізик Андре-Анрі Ампер відкрив закон перетворення електроенергії на енергію магнітного поля, який в Україні називають законом повного струму. Для цього він запропонував модель магнітного поля у вигляді сукупності магнітних ліній, які можна побачити в досліді з металевим пилом на скляній пластинці, під якою встановлений постійний магніт. Параметри магнітної лінії: довжина і напруженість лінії.

Напруженість магнітної лінії – це сила, з якою магнітна лінія діє на провідник зі струмом.

Конструкцію трансформатора показано на рис. 1.2.

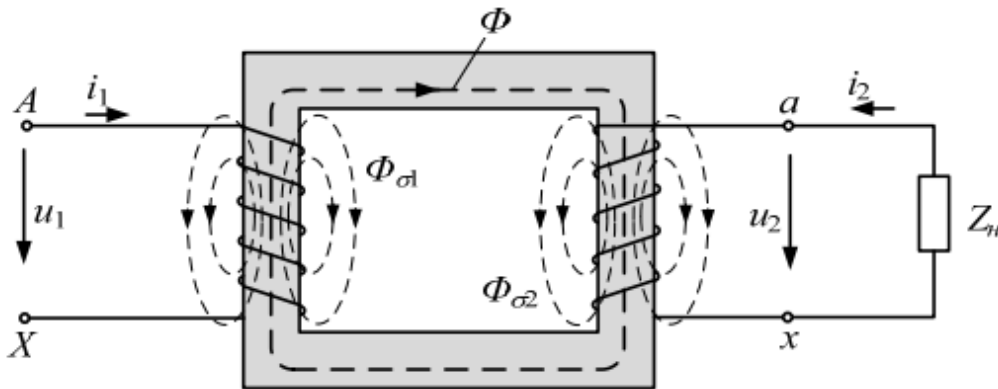


Рис. 1.2. Конструкція трансформатора

Трансформатор містить магнітне осердя, на якому намотані первинна і вторинна обмотки. Під час увімкнення первинної обмотки під напругу U_1 протікає струм I_1 , який згідно з законом повного струму Ампера створює магніторушійну силу (МРС). Вираз для визначення МРС в алгебраїчній формі (є інтегральна) має вигляд:

$$I_1 \cdot W_1 = \sum H_x \cdot l_x, \quad (1.1)$$

де I_1, W_1 – сила струму і кількість витків первинної обмотки;

H_x, l_x – напруженість і довжина магнітної лінії.

Через сукупність магнітних ліній розраховують параметри магнітного поля: магнітний потік і магнітну індукцію. Магнітний потік Φ – це кількість магнітних ліній через поверхню матеріалу обмеженою площею S . Магнітна індукція B – це кількість магнітних ліній на одиницю площі:

$$B = \Phi / S = \mu \cdot \mu_0 \cdot H, \quad (1.2)$$

де μ_0 – абсолютна магнітна проникність повітря, Гн/м;

μ – відносна магнітна проникність інших матеріалів відносно повітря;

H – сума напруженостей магнітних ліній поля, А/м.

З урахуванням виразів (1.1) і (1.2) магнітний потік дорівнює:

$$\Phi = \mu \cdot \mu_0 \cdot S \frac{I \cdot W}{\sum l} = \frac{I \cdot W}{R_m}, \quad (1.3)$$

де R_m – магнітний опір матеріалу для протікання магнітних ліній, який визначається за формулою:

$$R_m = \frac{\sum l}{\mu \cdot \mu_0 \cdot S},$$

Магнітний потік трансформатора має дві складові: основний, що змикається по осердю, і потік розсіювання, що змикається по повітря.

Змінний у часі основний магнітний потік в осерді, згідно з законом електромагнітної індукції Фарадея, створює у первинній котушці електрорушійну силу (ЕРС) самоіндукції, а у вторинній – ЕРС взаємоіндукції. Величини ЕРС самоіндукції і взаємоіндукції прямопропорційні швидкості зміни магнітного потоку і кількості витків котушок. Швидкість зміни магнітного потоку математично описує операція диференціювання, результат якої – похідна, тобто закон Фарадея математично має вигляд:

$$e_1 = W_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = W_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.4)$$

Закон Фарадея визначає величини ЕРС котушок, але не визначає їх напрямку відносно джерела живлення. Напрямок ЕРС самоіндукції визначив у 1834 році Емілій Ленц і назвав це правилом Ленца: ЕРС самоіндукції спрямована проти причини, що її викликала, тобто ЕРС самоіндукції спрямована зустрічно ЕРС джерела. ЕРС самоіндукції первинної обмотки і ЕРС взаємоіндукції вторинної обмотки створені основним потоком, тому мають однаковий напрямок від кінця котушки в її початок, як показано на рис. 1.3.

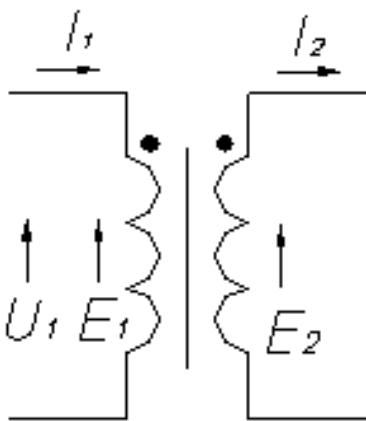


Рис. 1.3. Напрямки ЕРС самоіндукції у первинній котушці і ЕРС взаємоіндукції у вторинній котушці та напрямки струмів

При підключенні до вторинної обмотки трансформатора опору навантаження з'являється струм I_2 , який збігається за напрямком з ЕРС взаємоіндукції E_2 , тобто витікає з початку вторинної обмотки. При цьому первинний струм втікає в початок первинної котушки, тобто струми в обмотках знаходяться у протифазі. Вторинний струм навантаження створює дві складові магнітного потоку: потік $\Phi_{2\sigma}$ розсіювання, що протікає через повітря, і потік Φ_2 в осерді трансформатора, спрямований назустріч потоку Φ_1 первинної обмотки, тому що струм I_2 знаходиться у протифазі до I_1 .

При зменшенні опору навантаження і збільшенні вторинного струму магнітний потік в осерді трансформатора приблизно залишається постійним, тобто відбувається стабілізація основного магнітного потоку. Це пояснюється наявністю негативного зворотного зв'язку за потоком. При збільшенні струму вторинної обмотки основний потік Φ_0 в осерді, як різниця $\Phi_0 = \Phi_1 - \Phi_2$, зменшується, а отже, ЕРС самоіндукції E_1 зменшується. Струм у первинній котушці збільшується:

$$I_1 = \frac{U_1 - E_1 - E_{1\delta}}{R_1}. \quad (1.5)$$

Струм у первинній обмотці I_1 зростає, а отже, зростають Φ_0 і E_1 до початкових значень, за яких відновлюється рівняння електричної рівноваги первинної обмотки згідно з другим законом Кірхгофа:

$$U_1 - E_1 - E_{1\sigma} = I_1 R_1. \quad (1.6)$$

Таким чином, основний магнітний потік в осерді завдяки негативному зворотному зв'язку, реалізованому через E_1 , залишається стабільним.

1.3. Аналіз перехідних електромагнітних процесів у трансформаторах

Під час увімкнення трансформатора під напругу можливі кидки струму з ймовірністю 0,5 протягом 0,01 с, які можуть викликати помилкове спрацювання струмового захисту. Причина появи кидків струму під час увімкнення трансформатора пов'язана з явищем короточасного насичення магнітного осердя в момент увімкнення. Розглянемо явище більш детально.

Після відключення первинної обмотки трансформатора від напруги магнітне осердя залишається намагніченим з величиною залишкової магнітної індукції $+B_r$ або $-B_r$ згідно з кривою намагнічування (рис. 1.4).

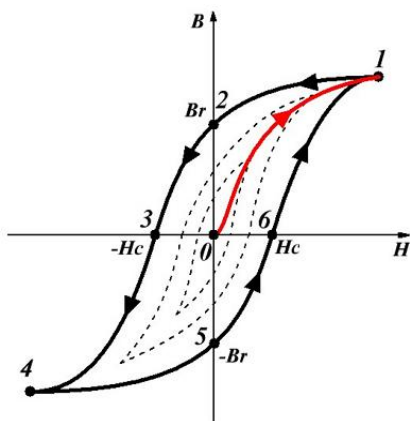


Рис. 1.4. Крива намагнічування магнітного осердя трансформатора

Під час вмикання первинної обмотки під напругу рівняння перехідного процесу первинної обмотки з урахуванням залишкового магнітного потоку і наступним насиченням магнітного осердя має вигляд:

$$U_m \sin(\omega t + \varphi) = i_1 R_1 + W_1 \frac{d\Phi_1}{dt}, \quad (1.7)$$

- де U_m – амплітуда напруги мережі, В;
- ω – кругова частота напруги мережі, рад/с;
- t – момент часу, с;
- φ – початкова фаза напруги мережі, рад;
- i_1 – миттєвий струм первинної обмотки, А;
- R_1 – активний опір первинної обмотки, Ом;

W_1 – кількість витків первинної обмотки;

Φ_1 – магнітний потік від первинної обмотки, Вб.

Величина ЕРС самоіндукції первинної обмотки, що з'являється при початковій фазі 90 електричних градусів увімкнення під напругу джерела, залежить від знака залишкового потоку $\Phi_{зал}$ в осерді. Якщо в момент увімкнення трансформатора знак напруги джерела і знак $\Phi_{зал}$ збігаються, то ЕРС самоіндукції дорівнює:

$$e_1 = W_1 \frac{d(\Phi_{зал} - \Phi_{нас})}{dt} = W_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = W_1 \operatorname{tg} \alpha_1, \quad (1.8)$$

де $\operatorname{tg} \alpha_1$ – тангенс кута дотичної до графіка намагнічування в точці 2 (див. рис. 1.4), величина якого є похідною від функції магнітного потоку.

Якщо в момент увімкнення трансформатора знак напруги і знак $\Phi_{зал}$ протилежні, то ЕРС самоіндукції дорівнює $e_2 = W_1 \operatorname{tg} \alpha_2$, де $\operatorname{tg} \alpha_2$ – тангенс кута дотичної до графіка намагнічування в точці 6 (див. рис. 1.4) є величина похідної функції магнітного потоку.

Величина кидка струму при увімкненні в першому випадку дорівнює $I_{к1} = (U - e_1) / R_1$ і в другому випадку дорівнює $I_{к2} = (U - e_2) / R_1$. Таким чином, кидки струму пропорційні ЕРС самоіндукції і похідній $\operatorname{tg} \alpha$. Тоді кидок струму при вмиканні ходу буде:

$$\frac{I_{к1}}{I_{к2}} = \frac{e_2}{e_1} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{\operatorname{tg} 75^\circ}{\operatorname{tg} 25^\circ} = 8,15. \quad (1.9)$$

Величину кидка струму можна також оцінити за заступною схемою трансформатора, якщо допустити насичення осердя. При цьому опір намагнічування $X_0 = 0$, оскільки осердя насичене. На величину струму впливають тільки опори розсіювання $X_{1\sigma} + X_{2\sigma}^l = 0,1X_0$, оскільки потоки розсіювання замикаються по повітрю і не насичуються. Тоді кидок струму дорівнює $I_k = 10I_{HX} = I_{ном}$ номінальному струму.

1.4. Методика розрахунку струмових режимів трансформаторів

Розрахунок струмових режимів трансформатора необхідний для визначення уставок спрацьовування захистів. Номінальні струми в обмотках трансформатора дорівнюють:

$$I_1 = \frac{S}{\sqrt{3}U_1}; \quad I_2 = K_T I_1; \quad (1.10)$$

де S, U_1 – номінальні потужність і напруга;

K_T – коефіцієнт трансформації.

Для розрахунку струмів в обмотках трансформатора при коротких замиканнях в обмотках складають заступну схему, тобто модель трансформатора як елемента електричного кола. Для побудови заступної схеми магнітні потоки від обмоток розкладають на складові: 1) магнітний потік намагнічування, що протікає по сталевому осердю і 2) потоки розсіювання від обмоток, що протікають по повітрю, як показано на рис. 1.2. Відповідні потоки створюють відповідні ЕРС: основну і розсіювання, які спрямовані згідно з законом Ленца зустрічно ЕРС джерела живлення.

Для зручності розрахунків струмів за законом Ома вплив цих ЕРС на величину струму в (1.5) заміняють індуктивними опорами. Для цього вводять коефіцієнт L індуктивності для переходу від операцій над магнітними потоками $W\Phi$ до операцій над струмами LI , тобто:

$$E = \omega W\Phi = \omega LI. \quad (1.11)$$

З (1.11) виражаємо струм через індуктивний опір:

$$I = \frac{E}{\omega L} = \frac{E}{X_L}. \quad (1.12)$$

Тоді рівняння електричної рівноваги первинного кола трансформатора перетвориться до виду:

$$U_1 = I_1 R_1 + I_1 (X_0 + X_{1\sigma}); \quad I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_0 + X_{1\sigma})^2}}, \quad (1.13)$$

де R_1 – активний опір первинної обмотки;

$X_0, X_{1\sigma}$ – індуктивні опори намагнічування та розсіювання.

Заступну схему трансформатора подано на рис. 1.5.

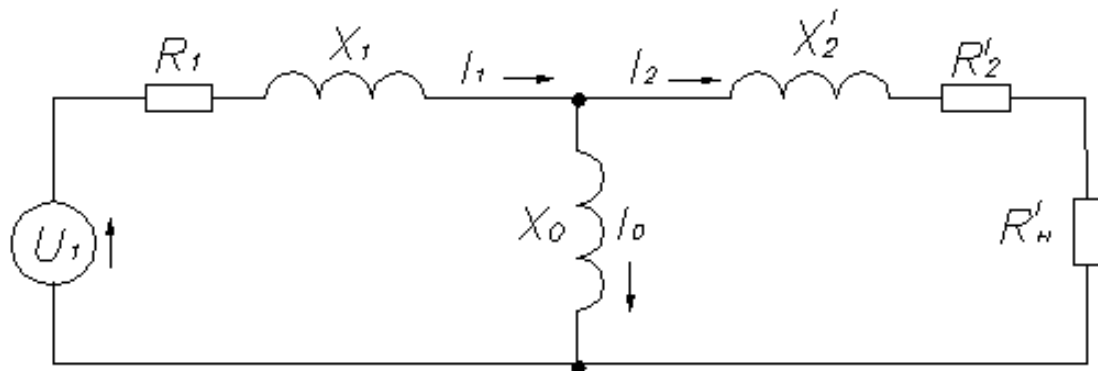


Рис. 1.5. Заступна схема двообмоткового трансформатора

Для електричного з'єднання кіл первинної і вторинної обмоток необхідно параметри вторинного кола привести до високої первинної напруги на основі збереження при цьому вторинної потужності. Приведення параметрів відбувається через коефіцієнт K_T трансформації трансформатора. Для приведення вторинних опорів необхідно помножити реальні

опори вторинного кола $R_2^l = R_2 \cdot K_T^2, X_{2\sigma}^l = X_{2\sigma} \cdot K_T^2$, а приведений струм при цьому зменшиться $I_2^l = I_2 / K_T$.

У режимі короткого замикання (КЗ) струм вітки намагнічування на порядок менше струму КЗ, тому нею нехтують, і заступна схема двообмоткового трансформатора має такий вигляд (на рис. 1.6).

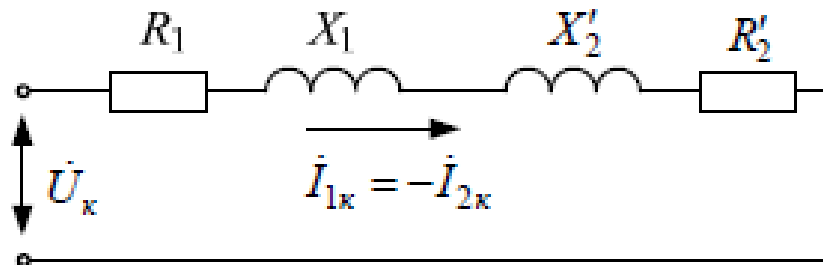


Рис. 1.6. Заступна схема двообмоткового трансформатора в режимі КЗ

Параметри заступної схеми трансформатора одержують з таких паспортних даних трансформатора: 1) потужність S ; 2) лінійні напруги обмоток високого $U_{ВН}$ і низького $U_{НН}$ напруг; 3) напруга $U_k\%$ короткого замикання у відсотках від $U_{ВН}$, тобто напруга підведена до обмотки ВН при короткозамкненій обмотці НН, за якого струми в обмотках дорівнюють номінальним значенням; 4) активна потужність P_k внутрішніх втрат у трансформаторі при трифазному КЗ обмотки НН.

Повний, активний і реактивний опори заступної схеми однієї фази трансформатора в режимі КЗ дорівнюють:

$$Z_T = \frac{u_k \% U_1^2 [кВ]}{100 S [МВА]}; R_T = R_1 + R_2^l = \frac{P_k}{3 I_1^2}; \quad (1.14)$$

$$X_T = X_1 + X_{2\sigma}^l = \sqrt{Z_T^2 - (R_1 + R_2^l)^2}.$$

Для трансформаторів потужністю $S \geq 6300$ кВА; сума активних опорів обмоток дорівнює $R_1 + R_2^l = 0,1 (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}^l)$, тому приймають, що в режимі КЗ повний опір дорівнює $Z_T = X_T$.

Для розрахунку струмів КЗ в обмотках трансформатора використовують заступну схему мережі з трансформатором (рис. 1.7).

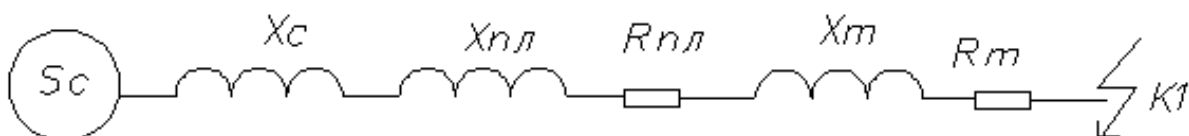


Рис. 1.7. Розрахункова та заступна схема електричної мережі з трансформатором для розрахунку струмів коротких замикань

Струми в обмотках ВН і НН при трифазному КЗ на виводах вторинної обмотки розраховують за заступною схемою (рис.1.7) і дорівнюють:

$$I_1^{(3K)} = \frac{U_1}{\sqrt{3} \sum Z}; \quad I_2^{(3K)} = I_1^{(3K)} \cdot K_T, \quad (1.15)$$

де $\sum Z = \sqrt{R_{\text{пл}}^2 + (X_C + X_{\text{пл}} + X_T)^2}$ – результуючий опір заступної схеми в режимі КЗ;

$R_{\text{пл}}, X_{\text{пл}}, X_T$ – активний і індуктивний опори повітряної лінії і трансформатора;

X_C – опір енергосистеми; $X_C = U_C^2 [кВ] / S_C [МВА]$, де $U_C = 110$ кВ;

S_C – напруга і потужність однієї або більше підстанцій енергосистеми напругою 330/110 кВ.

Струм в обмотках трансформатора при двофазному КЗ $I_1^{(2K)} = \sqrt{3} I_1^{(3K)} / 2$.

При однофазних КЗ струми в обмотках розраховують методом симетричних складових, котрі в колах пошкодженої фази і нейтралі рівні:

$$I_{1.n}^{1K} = 2 I_1^{3K} / 3. \quad (1.16)$$

Для неушкодженої фази $I_{1.m}^{1K} = 2 I_1^{3K} / 3$.

Термічна стійкість трансформатора – допустимий інтервал часу роботи трансформатора в режимі КЗ визначається за формулою $t = 500 / K_{кр}^2$ в с, де $K_{кр} = I_1^{3K} / I_1^{НОМ}$ – коефіцієнт кратності первинного струму КЗ. Час спрацьовування захисту має бути меншим часу термостійкості $t_{сп} < t_{ТС}$. Якщо розрахункова термічна стійкість перевищує 3 с, то приймається $t_{ТС} = 3$ с.

Запитання та завдання для самоперевірки

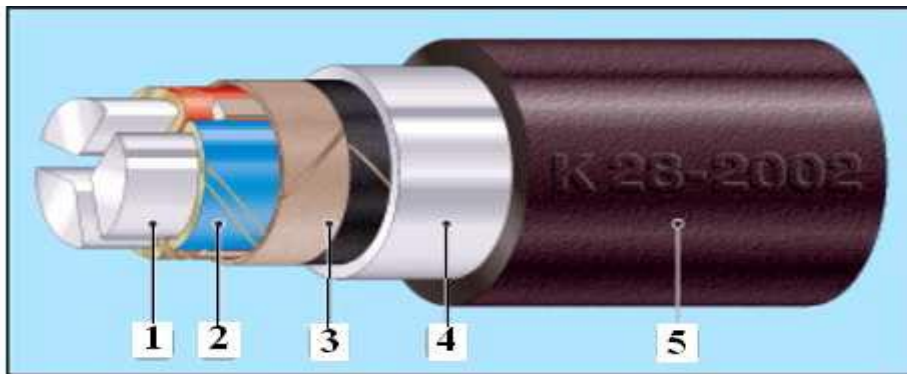
1. Пояснити принцип дії трансформатора.
2. Пояснити елементи заступної схеми трансформатора.
3. Пояснити причину нехтування індуктивним опором намагнічування в режимах коротких замикань.
4. Пояснити фізичний зміст напруги короткого замикання трансформатора.
5. Пояснити різницю між індуктивним опором намагнічування і індуктивним опором розсіювання.
6. Пояснити причини кидків струму в первинній обмотці трансформатора при його вмиканні під напругу.
7. Пояснити фазовий зсув вторинного струму відносно первинного.
8. Чому в заступній схемі трансформатора опори вторинної обмотки збільшують на коефіцієнт трансформації?

1.5. Аналіз параметрів ліній електропередачі

Лінії характеризуються величиною напруги та типом електричної схеми вмикання в електричну мережу. Лінії бувають повітряні і кабельні. Для повітряних ліній напругою 0,4–10 кВ використовують бетонні опори для проводів, для повітряних ліній з напругою 110 кВ і більше – зазвичай металеві.

Як проводи для повітряних ліній 10–330 кВ використовують сталевалюмінієві марки АС, які складаються з центрального сталюого осердя, яке забезпечує міцність проводів на розрив під власною вагою, вітром та ожеледдю. Струмopровідна фазна жила скручена з алюмінієвого дроту.

Кабельні лінії найчастіше виконуються кабелем марки ААШВ, тобто алюмінієві жили, алюмінієва оболонка для захисту жил від проникнення вологи, поверх оболонки шланг із вінілу від блукаючих струмів і електрокорозії. Будову кабельної лінії марки ААШВ показано на рис. 1.8.



1 – алюмінієва струмопровідна жила; 2 – ізоляція жили з просоченого паперу; 3 – поясна ізоляція (з напівпровідникового паперу); 4 – алюмінієва оболонка, 5 – захисний шланг

Рис. 1.8. Конструкція кабелю з паперовою ізоляцією в алюмінієвій оболонці із захисним шлангом з ПВХ-пластикату марки ААШВ

З точки зору теорії електричних кіл повітряна і кабельна лінія являють собою сукупність резистора, котушки і конденсатора (рис. 1.9). Активний опір ліній визначається за формулою $R = \rho \cdot l / S$, де l, S – довжина проводу в метрах і переріз в мм^2 , ρ – питомий опір алюмінію $\rho = 0,29 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$.

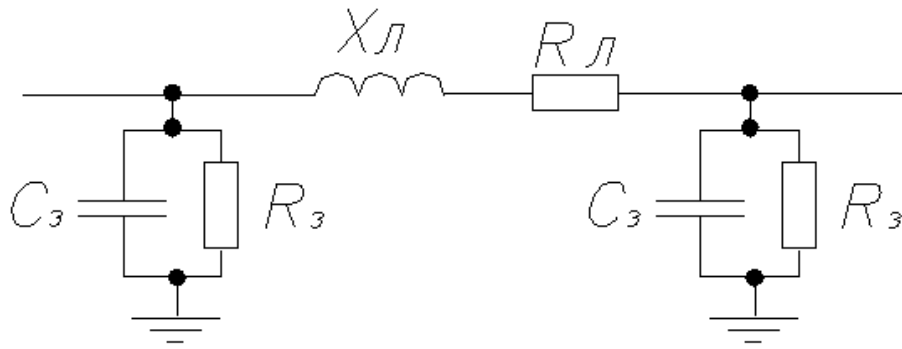


Рис. 1.9. Заступна схема лінії

Індуктивний опір лінії витікає з явища електромагнітної індукції. Лінія являє собою котушку з одним витком, у якій індукується ЕРС самоіндукції відповідно до закону Фарадея, тобто $e = Wd(\Phi_m \sin \omega t) / dt = \omega W\Phi_m \cos \omega t$, де $E_m = \omega W\Phi_m$ – амплітуда ЕРС самоіндукції, яку можна виразити через заміну $W\Phi_m = LI$, де L – індуктивність котушки (коефіцієнт перерахування). Тоді діюче значення ЕРС самоіндукції дорівнює $E = coLI$, звідки впливає поняття індуктивного опору виходячи з закону Ома, тобто $I = U / \omega L = U / X_L$.

У таблицях 1.1 і 1.2 наведено стандартні перерізи, питомі активні й індуктивні опори одного кілометра проводів марки АС і кабелів ААШВ.

Таблиця 1.1 – Питомі опори повітряних ліній марки АС

Поперечний переріз, мм ²	70	95	120	150	185	240
Питомий активний опір, Ом/км	0,428	0,306	0,249	0,198	0,162	0,12
Питомий індуктивний опір, Ом/км	0,444	0,434	0,427	0,42	0,413	0,405

Таблиця 1.2 – Питомі опори кабельних ліній марки ААШВ

Поперечний переріз, мм ²	16	25	35	50	70
Питомий активний опір, Ом/км	2	1,28	0,92	0,64	0,46
Питомий індуктивний опір, Ом/км	0,12	0,1	0,095	0,09	0,086
Поперечний переріз, мм ²	95	120	150	185	240
Питомий активний опір, Ом/км	0,34	0,27	0,21	0,17	0,132
Питомий індуктивний опір, Ом/км	0,075	0,081	0,079	0,083	0,077

Індуктивні опори повітряних ліній більше, ніж у кабельних, оскільки відстані між повітряними проводами в сотні разів більше, ніж між жилами кабелів.

Оскільки відстань між жилами кабельної лінії мала і мала між жилами і землею, то ємність кабельної лінії враховують, а ємністю повітряної лінії нехтують.

При підключенні кабельної лінії навіть без навантаження до джерела змінного струму з'являється струм у лінії ємнісного характеру:

$$i_{кл} = C_{кл} \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = \omega C_{кл} U_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + \pi/2). \quad (1.17)$$

Питоме діюче значення ємнісного струму на 1 км лінії залежить від перерізу і напруги лінії і дається в довідниках, наприклад, для кабельних ліній напругою 10 кВ і перерізом 16-240 мм² дорівнює $I_{кл}^n = 0,52 - 1,7 A / км$. До речі, з (1.17) випливає поняття ємнісного опору виходячи з закону Ома, тобто діюче значення ємнісного струму дорівнює $I = \omega C U$. Звідки випливає поняття ємнісного опору $X_c = U / I = 1 / \omega C$.

Повітряні і кабельні лінії напругою 6–35 кВ працюють у мережах з ізолюваною або компенсованою нейтраллю. Повітряні лінії напругою 110–330 кВ працюють у мережах з глухозаземленою нейтраллю.

Переваги ізолюваної нейтралі – підвищена надійність електропостачання, оскільки лінія не відключається при однофазних коротких замиканнях на землю. Недолік – необхідна ізоляція відносно землі на лінійну напругу.

Переваги глухозаземленої нейтралі – ізоляція відносно землі на фазну напругу. Недолік – лінія відключається при однофазних коротких замиканнях на землю.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Пояснити елементи заступної схеми лінії.
2. Пояснити причину нехтування ємнісним опором повітряної лінії.
3. Пояснити фізичний зміст індуктивного опору лінії.
4. Пояснити будову сталевалюмінієвих проводів.
5. Пояснити будову кабельної лінії.
6. Пояснити, чому індуктивний опір кабельної лінії менше від повітряної.
7. Пояснити, чому ємнісний опір кабельної лінії більший від повітряної.

1.6. Методика розрахунку струмових режимів ліній

Розрізняють такі режими роботи ліній: нормальний і післяаварійний, дво- і трифазне КЗ, однофазне КЗ на землю.

У нормальному режимі струм лінії визначається номінальною потужністю S_T підключених до неї трансформаторів. Тоді для радіальної лінії і для магістральної лінії номінальний струм дорівнює:

$$I_{пл}^n = \sum S_T / \sqrt{3} U, \quad (1.18)$$

де S_T, U – номінальна потужність трансформатора в кВА і лінійна напруга первинної обмотки в кВ.

За прийнятими значеннями поперечних перерізів кабельних ліній розраховуються активні та реактивні опори за формулами:

$$R_{KL} = r_{KL} l_{KL}; X_{KL} = x_{KL} \cdot l_{KL}, \quad (1.19)$$

де r_{KL}, x_{KL} – питомі активний і реактивний опори 1 км кабельної лінії;

l – довжина кабельних ліній, км.

Розрахунок струмових режимів ліній при коротких замиканнях виконують на основі заступної схеми, на якій реальні елементи мережі – лінії і трансформатори – представлені активними і реактивними опорами. Визначимо величини активних і реактивних опорів окремих елементів заступної схеми. Спочатку визначимо реактивний опір енергосистеми за формулою:

$$X_C = \frac{U_c^2}{S_C}, \quad (1.20)$$

де U_c – номінальна напруга енергосистеми, кВ;

S_C – потужність енергосистеми, МВА.

Опори ліній 10 кВ і трансформаторів 10/0,4 кВ приводяться до напруги 110 кВ множенням на коефіцієнт K_T^2 трансформації трансформатора 110/10 кВ, тобто $R_{KL}^n = R_{KL} K_T^2; X_{KL}^n = X_{KL} \cdot K_T^2; X_{T1}^n = X_{T1} K_T^2; R_{T1}^n = R_{T1} \cdot K_T^2$, де K_T – коефіцієнт трансформації.

Струм у лінії 10 кВ при трифазному КЗ у будь-якій точці лінії дорівнює:

$$I^{(3K)} = \frac{U = 110 \text{ кВ}}{\sqrt{3} \sqrt{\sum R^2 + \sum X^2}}, \quad (1.21)$$

де $\sum R^2, \sum X^2$ – сума опорів елементів мережі до точки КЗ

Струм у лінії при двофазному КЗ визначається не фазною, а лінійною напругою, тобто струм КЗ не фазний, а лінійний, і опір не однієї фази лінії, а двох фазних проводів. Тоді струм при двофазному КЗ дорівнює:

$$I^{(2\hat{E})} = \frac{\sqrt{3} I^{(3\hat{E})}}{2}. \quad (1.22)$$

Отримані значення струмів КЗ у лініях 10 кВ є приведеними до високої напруги 110 кВ, тобто вони менше реальних на величину коефіцієнта трансформації трансформатора 110/10 кВ. Тоді реальні струми:

$$I_p^{(3K)} = K_T \cdot I^{(3K)}; I_p^{(2K)} = K_T I^{(2K)}. \quad (1.23)$$

Струми при однофазних замиканнях на землю залежать від режиму нейтралі: глухозаземлена або ізольована. Для ліній з глухозаземленою нейтраллю струм однофазного замикання визначається опором кола

замикання. Для ліній з ізолюваною нейтраллю струм одофазного замикання визначається ємністю ліній.

На рис. 1.10 наведено розрахункову схему усталеного металічного однофазного замикання на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю.

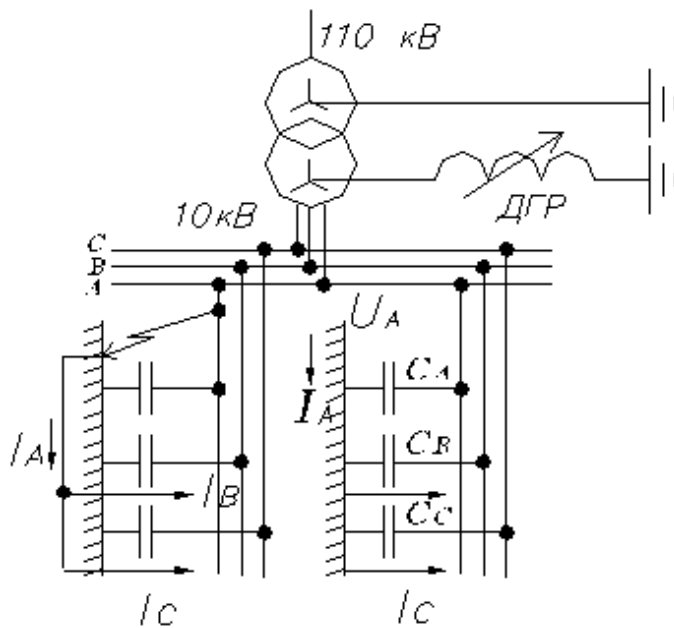


Рис. 1.10. Схема однофазного замикання на землю

При однофазному КЗ на землю ємності двох інших фаз, у тому числі і на неушкоджених лініях, виявляються не під фазною напругою, а під лінійною. Ємнісні струми неушкоджених фаз стають лінійними, а не фазними, як при нормальному режимі, тобто збільшуються в 1,73 рази

і протікають через ушкоджену фазу (рис. 1.10).

Кожна з ліній споживає власний ємнісний струм, який залежить від власної ємності лінії відносно землі. Величина ємнісного струму через ушкоджену фазу визначається з векторної діаграми (рис. 1.11), що будується в такий спосіб.

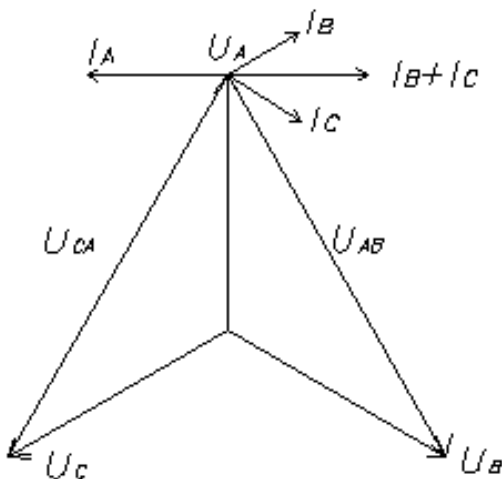


Рис. 1.11. Векторна діаграма напруг і струмів однофазного замикання на землю

Будуємо вектори лінійних напруг U_{CA} і U_{BA} під кутом 90° , до них будуємо вектори лінійних ємнісних струмів I_B і I_C . За першим законом Кірхгофа вектор струму в ушкодженій фазі буде рівним $I_A = I_B + I_C = 2I_B^{\perp} = 2\sqrt{3}I_B^{\phi}$. Модуль вектора струму фази А дорівнює

$$I_A = 2\sqrt{3}I_B^{\phi} \cdot \cos 30^\circ = 3I_B^{\phi}, \text{ де } I_B^{\phi} \text{ – власний ємнісний струм лінії.}$$

З урахуванням того, що мережа містить N ліній, то однофазний ємнісний струм при замиканні на землю фази будь-якої з ліній визначається сумою власних ємнісних струмів I_c усіх ліній, тобто:

$$I^{(1\dot{E})} = 3 \sum_1^N I_C . \quad (1.24)$$

Величини власних ємнісних струмів ліній залежно від перерізу наведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Питомі ємнісні струми кабельних ліній типу ААШВ залежно від перерізу

Назва параметрів	Стандартні значення поперечних перерізів, мм ²									
	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
Питомий ємнісний струм, А/кМ	0,55	0,65	0,72	0,8	0,92	1,04	1,16	1,3	1,47	1,7

Режим однофазного замикання на землю не є небезпечним для лінії з погляду її нагрівання до небезпечних температур понад 90 °С. Однак залишати лінію під напругою понад 2 годин не рекомендується, тому що однофазне КЗ може перейти у двофазне з наступним відключенням споживачів від електропостачання.

Якщо величина однофазного струму замикання перевищує значення 30А, 15А, 10А відповідно для мереж напругою 6 кВ, 10 кВ, 35 кВ, то для його обмеження на вказаних значеннях в ізолювану нейтраль встановлюють дугогасний реактор (ДГР) (рис. 1.12), і мережа стає з компенсованою нейтраллю.

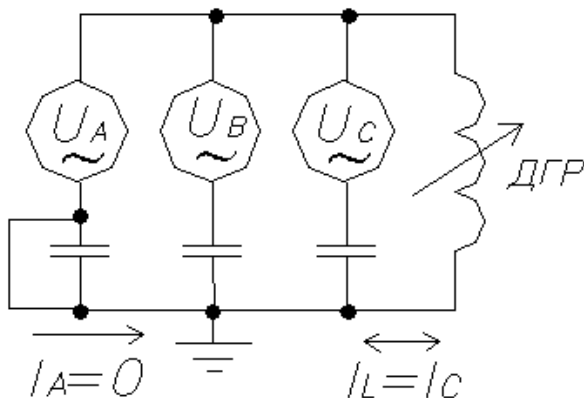


Рис. 1.12. Схема компенсації ємнісних струмів при однофазному замиканні на землю

Принцип зменшення струму через ушкоджену фазу пояснюється тим, що між ємностями неушкоджених фаз і ДГР виникає резонанс струмів. При цьому струм від фази А, що є джерелом для LC – контуру, в ідеальному випадку дорівнює нулю.

2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИСТРОЇВ ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

При експлуатації електричних мереж мають місце нормальні режими роботи й аварійні режими короткого замикання (КЗ), за яких захист формує сигнал на вимкнення вимикача. Для побудови захистів використовують характерні ознаки КЗ: зростання величини струму лінії і трансформатора; зменшення величини напруги на вході лінії і трансформатора; зменшення величини опору лінії; поява несиметричних струмів і спадів напруги; зміна фази струму КЗ на 180 електричних градусів.

Використовуючи вищевказані ознаки режиму КЗ, формуються принципи дії захистів. Класифікацію захистів за принципом дії наведено на рис. 2.1.

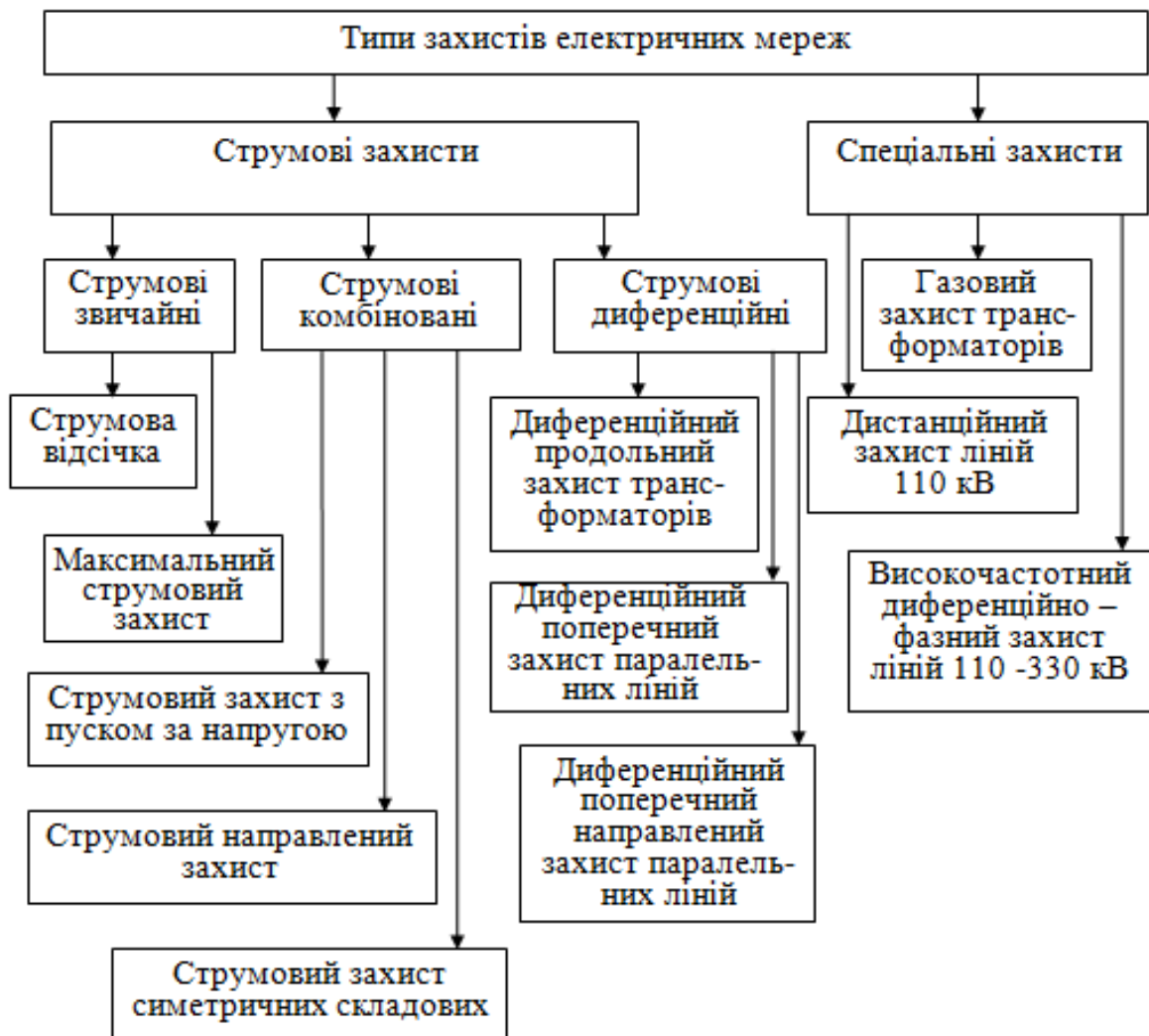


Рис. 2.1. Класифікація захистів за принципом дії

Звичайні струмові захисти, які працюють за принципом вимірювання тільки струму, встановлюються на кожному елементі електромережі. При цьому струмовий захист, який спрацьовує без витримки часу, отримав назву "струмова відсічка". Струмовий захист, який спрацьовує з витримкою часу, отримав назву "максимальний струмовий захист".

Комбіновані струмові захисти працюють за принципом виміру струму та іншого додаткового параметра, що характеризує аварійний режим, а саме: зменшення напруги, поява несиметричних струмів і несиметричних напруг.

Диференційні струмові захисти працюють за принципом вимірювання різниці вхідних і вихідних струмів лінії або трансформатора. При цьому розрізняють диференційний поздовжній захист трансформатора, диференційний поперечний захист паралельних ліній зі спільним вимикачем (див. рис. 1.1, лінія КЛ2 зі спільним вимикачем Q13) і диференційний поперечний направлений захист паралельних ліній з роздільними вимикачами (див. рис. 1.1, лінія КЛ4 з роздільними вимикачами Q16, Q17, Q20, Q21).

Спеціальні захисти працюють за принципом виміру параметрів, не пов'язаних зі струмом. Захист трансформатора від міжвиткових КЗ в обмотках реалізує газове реле, яке працює на принципі фіксації газів при розкладанні охолоджувального масла в корпусі трансформатора.

Дистанційний захист ліній 110 кВ працює на принципі вимірювання опору лінії в нормальному і в аварійному режимах. Високочастотний диференційно-фазний захист ліній 110–330 кВ працює на принципі вимірювання фази струму на початку і в кінці лінії в нормальному і в аварійному режимах.

У загальному випадку будь-який захист складається з датчика струму або напруги і виконавчого елемента, який формує команду на вимикання вимикача. Для контактного релейного захисту виконавчим елементом є електромеханічне реле. Для мікропроцесорного захисту виконавчим елементом є мікропроцесор з периферійними пристроями. Тобто принцип дії захистів зберігається, змінюється лише виконавчий елемент.

Нормативним документом при виборі та побудові захистів і автоматики електромереж є "Правила улаштування електроустановок" (ПУЕ). Відповідно до пункту 3.2.4 ПУЕ захисти мають забезпечувати найменший можливий час вимкнення електроустановки в режимі КЗ з метою збереження стійкої та безперебійної роботи непошкоджених елементів електромережі, а також обмеження обсягів і масштабів пошкодження. Швидкодіючим називається захист, час дії якого, як правило, не перевищує 0,2 с. Час вимкнення лінії (трансформатора) визначають часом спрацювання захисту та часом спрацювання вимикача $t_{\text{вим}}=t_{\text{зах}}+t_{\text{в}}$, де $t_{\text{зах}}$ – час спрацювання захисту; $t_{\text{в}}$ – час вимикання вимикача.

Основним називається захист, який формує сигнал на відключення електроустановки від усіх видів КЗ. Дублюючим називається захист, який має однаковий принцип дії з основним і, як правило, однакові технічні характеристики. Резервним називається захист, який виконує резервну дію у разі відмови основного захисту і спрацьовує, як правило, з витримкою часу. Резервний захист розділяють на ближній і дальній. Резервний ближній захист резервує основний захист конкретної електроустановки і працює на принципі роботи основного захисту або на іншому принципі роботи, як правило, з витримкою часу.

Резервний дальній захист, як правило, спрацьовує з витримкою часу та резервує неспрацювання ближнього захисту цієї електроустановки та неспрацювання вимикача, що її живить.

Резервний захист, який резервує неспрацювання вимикача електроустановки в режимі КЗ, називають пристроєм резервування відмови вимикача (ПРВВ). Причини відмови вимикача можуть бути спричинені поломкою механіки, приварюванням контактів, обривом кіл керування тощо. Принцип дії ПРВВ полягає у такому: одночасно з подачею команди від схеми основного або резервного захисту на вимикання вимикача електроустановки з режимом КЗ формується команда з витримкою часу на відключення вимикача, ближчого до джерела живлення, який живить несправний вимикач. Для перевірки несправності вимикача використовується критерій наявності струму або положення блок-контакту несправного вимикача.

Вищевикладене пояснимо на прикладі захисту кабельної лінії КЛ1 з вимикачем Q13 (див. рис. 1.1). Захист КЛ1 складається з основного, який спрацьовує миттєво і з ближнього резервного, який спрацьовує з витримкою часу. При спрацюванні основного або резервного захистів запускається схема ПРВВ. У разі неспрацювання вимикача Q13 схема ПРВВ формує команду на відключення вимикача Q11. Основним недоліком дальнього резервування є неселективне вимкнення від електропостачання непошкоджених елементів, які вимикаються одночасно з пошкодженням.

Сучасні мікропроцесорні захисти, як правило, містять у своєму складі функцію ПРВВ. Вводити його або не вводити – це проєктне рішення, яке приймається для конкретного випадку застосування.

Згідно з п. 3.2.5 ПУЕ захист має забезпечувати селективність (вибірковість) спрацювання, тобто здатність спрацьовувати при КЗ лише на пошкоджені елементі та не спрацьовувати при КЗ на інших елементах. Для забезпечення селективності необхідне створення умов неспрацювання захисту при КЗ на інших елементах. Розрізняють селективність абсолютну та відносну. Якщо захист реагує на пошкодження тільки того елемента, для захисту якого він призначений, то цей захист має абсолютну селективність. Захист із абсолютною селективністю

використовують при КЗ у трансформаторах і лініях з двостороннім живленням.

Якщо захист, крім пошкоджень на елементі, для захисту якого він призначений, реагує і на пошкодження в суміжному елементі, то цей захист має відносну селективність. Відносну селективність мають захисти, які виконують функції дальнього резервування.

Величина контрольованого параметра (струм, напруга, опір), за якого відбувається спрацювання захисту з формуванням сигналу на відключення вимикача називається уставкою спрацювання захисту.

Чутливістю захисту називається здатність захисту спрацювати при мінімальному значенні параметра, який характеризує аварійний режим. Кількісно чутливість визначають коефіцієнтом чутливості – відношення мінімального розрахункового значення параметра при аварійному режимі до уставки спрацювання захисту, який повинен бути не менше величини, зазначеної в ПУЕ.

Згідно з ПУЕ 3.2.21 коефіцієнт чутливості вказує на запас по параметру спрацювання в мінімальному аварійному режимі відносно уставки цього параметра. Якщо захист буде чутливим до пошкоджень у мінімальному режимі, то він тим більше буде чутливим до пошкоджень у всіх інших режимах КЗ.

Для струмових захистів чутливість захисту визначають як відношення мінімального струму КЗ $I_{к.мін}$ до уставки спрацювання захисту $I_{спр}$:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мін}}}{I_{\text{спр}}}. \quad (2.1)$$

Для дистанційних захистів ліній, що реагують на зменшення величини опору лінії при КЗ, коефіцієнт чутливості визначають як:

$$K_{\text{ч}} = \frac{Z_{\text{спр}}}{Z_{\text{л}}}, \quad (2.2)$$

де $Z_{\text{спр}}$ – уставка спрацювання вимірювального органа захисту;

$Z_{\text{л}}$ – опір лінії від місця встановлення захисту до кінця зони, охопленої цим захистом.

Згідно з п. 3.2.22 ПУЕ для основних захистів залежно від типу захисту коефіцієнт чутливості має бути $K_{\text{ч}} \geq 2$ або $K_{\text{ч}} \geq 1,5$. Для резервних захистів величина коефіцієнта чутливості має бути дещо меншою і становити $K_{\text{ч}} \geq 1,2$. Величина коефіцієнта чутливості є основою для розрахунку уставок спрацювання захистів.

Противарійна автоматика в електричних мережах призначена для забезпечення надійності електропостачання споживачів та для забезпечення стійкої роботи енергосистеми. З точки зору надійності електропостачання споживачів "Правила улаштування електроустановок (ПУЕ)" розділяють усіх споживачів на три категорії. До першої категорії відносяться споживачі, порушення електропостачання яких може

спричинити загибель людей і зупинку систем життєзабезпечення крупних територій. До другої категорії відносяться споживачі з великим скупченням людей.

Для споживачів другої категорії введення резерву може бути здійснене персоналом вручну впродовж однієї години.

До третьої категорії відносяться споживачі, які не ввійшли до перших двох категорій. За правилами, усунення наслідків зовнішньої аварії, яка впливає на можливість отримання електроживлення будь-яким з таких об'єктів, має тривати не більше за одну добу.

Для підвищення надійності електропостачання споживачів 1-ї і 2-ї категорій використовують автоматичне повторне ввімкнення (АПВ), автоматичне вмикання резерву (АВР) і автоматичне частотне розвантаження (АЧР). АПВ полягає у тому, що після вимикання захистом лінії або трансформатора від напруги через 0,5–1,5 секунди після вимикання (для закінчення горіння електричної дуги між контактами вимикача) відбувається одноразове або дворазове АПВ. Якщо лінія або трансформатор при цьому залишаються в роботі, то таке АПВ називають успішним.

Згідно з п. 3.3.2; 3.3.24-26 ПУЕ пристрої АПВ встановлюють:

1) на усіх повітряних лініях напруги вище 1 кВ. На кабельних лініях АПВ рекомендовано застосовувати для живлення споживачів 1-ї і 2-ї категорій надійності електропостачання;

2) на шинах електростанцій та підстанцій (ПС) з відкритими розподільчими пристроями;

Згідно з п. 3.3.3 ПУЕ пристрої АПВ треба виконувати таким чином, щоб вони не діяли в разі вимкнення вимикача персоналом дистанційно або за допомогою телемеханічного керування (ТК).

Згідно з п. 3.3.26 ПУЕ пристроями АПВ треба обладнувати всі одиничні знижувальні трансформатори потужністю понад 1 МВА на ПС енергосистем, які мають вимикач.

Згідно з п. 3.3.29 ПУЕ дію пристроїв АПВ треба фіксувати вказівними показниками спрацьовування та лічильниками числа спрацьовувань

Згідно з п. 3.3.30 ПУЕ пристрої автоматичного ввімкнення резерву (АВР) застосовують для відновлення живлення споживачів шляхом їх автоматичного приєднання до резервного джерела живлення при їх знеструмленні. Пристрої АВР треба передбачати для відновлення живлення споживачів першої категорії надійності електропостачання шляхом автоматичного ввімкнення резервного устаткування після вимкнення робочого устаткування для недопущення порушення технологічного процесу.

Згідно з п. 3.3.31 ПУЕ пристрій АВР, як правило, має діяти в разі зникнення напруги на шинах електроустаткування, яке резервується, з будь-якої причини, у тому числі в разі дії захисту шин.

Згідно з п. 3.3.78 ПУЕ для забезпечення стійкості роботи енергосистеми при дефіциті потужності застосовують автоматичне частотне розвантаження (АЧР) для відключення частини споживачів 3-ї категорії за надійністю електропостачання. Небезпечним значенням частоти напруги, за якого порушується паралельна робота генераторів електростанцій і відбувається значне зниження напруги, є величина 45,5 Гц.

При організації АЧР складається черга споживачів на відключення залежно від їх категорії за надійністю електропостачання. Перша черга споживачів відключається при частоті 48 Гц, друга черга споживачів відключається при частоті 47,5 Гц, третя черга споживачів відключається при частоті 47 Гц і так далі.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Пояснити сутність режимів коротких замикань і причини їх появи.
2. Перелічити характерні ознаки режимів коротких замикань.
3. Пояснити принципи роботи пристроїв захистів.
4. Обґрунтувати необхідність використання резервних захистів.
5. Пояснити алгоритм роботи пристрою резервування відмови вимикача.
6. Пояснити сутність терміна "селективність захисту".
7. Пояснити сутність терміна "чутливість захисту".
8. Пояснити сутність терміна "коефіцієнт чутливості".
9. Чому коефіцієнт чутливості захисту не може бути менше одиниці?
10. Перелічити переваги мікропроцесорних захистів над контактними.
11. Скласти характеристику для категорій споживачів по надійності електропостачання.
12. Обґрунтувати необхідність використання автоматичного повторного вмикання та скласти алгоритм його роботи.
13. Обґрунтувати необхідність використання автоматичного частотного розвантаження та скласти алгоритм його роботи.
14. Обґрунтувати необхідність використання автоматичного вмикання резерву та скласти алгоритм його роботи.

3. АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТІВ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИСТРОЇВ ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ (МПЗА)

3.1. Функціональна схема МПЗА

Функціональну схему МПЗА для захисту і автоматики трансформаторів і ліній показано на рис. 3.1.

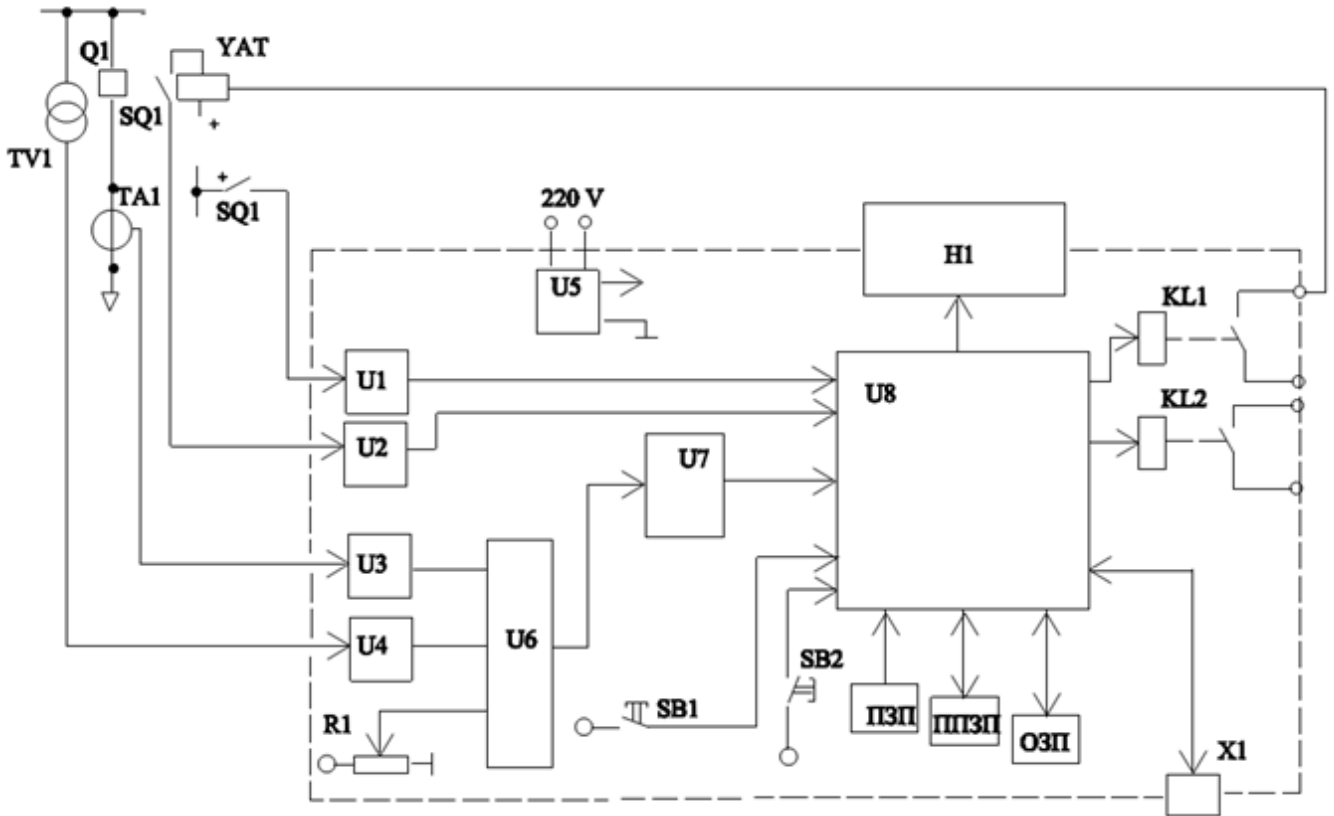


Рис. 3.1. Функціональна схема МПЗА

На схемі зліва направо показано: TV – вимірювальний трансформатор напруги; TA – вимірювальний трансформатор струму; Q – високовольний вимикач з електромагнітом вимикання YAT і блок-контактом SQ1. Вхідні блоки U1, U2 призначені для прийому логічних сигналів "нуль" або "одиниця" і являють собою малогабаритні герконові реле або оптрони для гальванічної розв'язки. Вхідні перетворювачі U3, U4 призначені для прийому аналогових сигналів від TV і TA і забезпечують гальванічну розв'язку від внутрішніх кіл МПЗА. При цьому вхідні перетворювачі U3-U4 здійснюють приведення сигналів до єдиного вигляду (як правило, до напруги) і нормованого рівня. Тут же здійснюється попередня частотна фільтрація вхідних сигналів перед їх аналого-цифровим перетворенням.

Одночасно вживаються заходи по захисту внутрішніх елементів пристрою від дії електромагнітних завад і перенапруг.

Центральним елементом МПЗА є U8 мікропроцесор (МП) або мікроконтролер (МК) – транзисторна схема, виготовлена на кристалі кремнію, призначена для програмної обробки вхідних сигналів і формування керуючих сигналів на виходах.

Мультиплексор U6 і аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) – U7 призначені для перетворення аналогових сигналів струму і напруги у цифровий код. Мультиплексор – це електронний комутатор, що по черзі подає контрольовані сигнали струму і напруги на вхід АЦП. Застосування мультиплексора дозволяє використовувати один АЦП (як правило, дорогий) для декількох каналів, В АЦП здійснюється перетворення миттєвого значення вхідного сигналу струму і напруги на пропорційне йому цифрове значення. Перетворення виконуються із заданою періодичністю. У подальшому в МПЗА по цих вибірках з вхідних сигналів розраховуються інтегральні параметри контрольованих сигналів – їх амплітудні або діючі значення.

Кнопки керування SB1, SB2 для введення інформації від оператора і виведення її на дисплей Н для відображення інформації Дисплеї і клавіатура є неодмінними атрибутами МПЗА, дозволяючи оператору отримати інформацію від пристрою, змінювати режим його роботи, вводити нову інформацію. Треба зазначити, що дисплей Н і клавіатура S81, S82 в МПЗА, як правило, реалізуються в максимально спрощеному вигляді: дисплей – цифробуквений, одно- (або декілька-) рядковий; клавіатура – декілька кнопок.

Вихідні реле KL1, KL2 забезпечують гальванічну розв'язку вихідних кіл МПЗА від зовнішніх високовольтних кіл. Вихідні реле повинні володіти відповідною комутаційною здатністю і загалом забезпечувати видимий розрив комутованого ланцюга.

Блок живлення (БП) – U5 – забезпечує стабілізованою напругою всі вузли цього пристрою, незалежно від можливих змін напруги в живлячій мережі.

МПЗА, як правило, оснащуються комунікаційним портом X1 для зв'язку з іншими зовнішніми цифровими пристроями: АСУ ТП, персональний комп'ютер тощо. Комунікаційний порт – необхідний елемент для дистанційної роботи з цим пристроєм.

ПЗП – постійний запам'ятовуючий пристрій; ОЗП – оперативний запам'ятовувальний пристрій; ППЗП – перепрограмований запам'ятовувальний пристрій.

3.2. Аналогові та цифрові мікросхеми для пристроїв МПЗА

У пристроях МПЗА використовують аналогові та цифрові сигнали струму і напруги. Аналоговим називають сигнал, величина якого змінюється в часі без розривів, наприклад, синусоїда напруги. Цифрові сигнали являють собою послідовність імпульсів напруги. Мікросхеми, призначені для роботи з аналоговими сигналами, називають аналоговими, а з дискретними сигналами – цифровими. Мікросхеми являють собою сукупність транзисторів на одному кристалі напівпровідника, з'єднаних в електричну схему.

Для роботи з аналоговими струмом і напругою використовують мікросхеми операційних підсилювачів (ОП), спрощену схему якого показано на рис. 3.2.

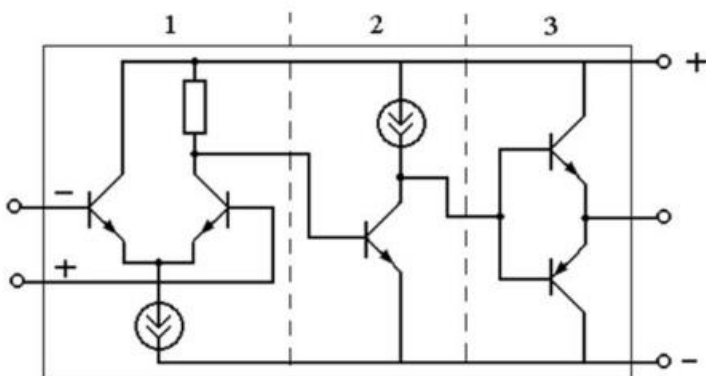


Рис. 3.2. Спрощена схема мікросхеми операційного підсилювача

Схема містить: 1 – диференційний вхідний каскад; 2 – каскад проміжного підсилювача; 3 – вихідний каскад. З рис. 3.2 видно, що живлення ОП двополярне відносно загальної точки від двох послідовно з'єднаних джерел для підсилення двополярних вхідних сигналів. Для підсилення однополярних вхідних сигналів використовують однополярне живлення.

У схемах МПЗА для підсилення аналогових сигналів струму і напруги використовують ОП, як показано на рис. 3.3.

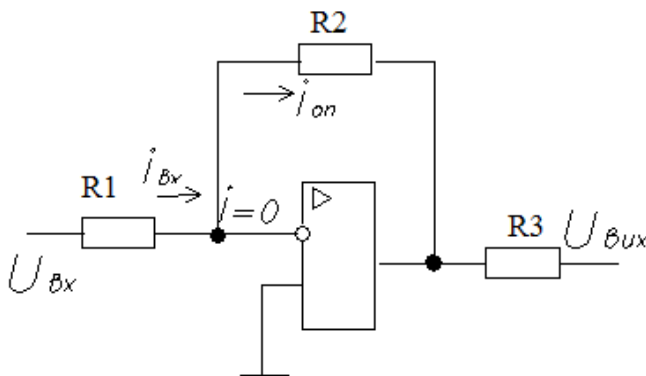


Рис. 3.3. Схема підсилювача напруги на ОП

Розглянемо методику розрахунку схеми підсилювача на заданий коефіцієнт підсилення. Оскільки власний коефіцієнт підсилення ОП більше 5000, то приймаємо, що

вхідний струм ОП дорівнює нулю. Тоді за першим законом Кірхгофа вхідні

струми від вхідних сигналів рівні, тобто $i_3=i_{оп}$. Виразимо вхідні струми через закон Ома $U_3/R_1=U_{вих}/R_{оп}$, звідки коефіцієнт підсилення дорівнює $K_{оп}=U_{вих}/U_3=R_{оп}/R_1$. Таким чином, для встановлення коефіцієнта підсилення задаються опором резистора в колі звання R_1 і далі розраховують опір зворотного зв'язку $R_{оп}$.

У схемах МПЗА часто виникає необхідність порівняння двох аналогових сигналів, наприклад, поточний струм порівнювати з допустимим. Для цього ОП використовують у режимі порівняння двох сигналів, і таку схему називають аналоговий компаратор. Компаратор походить від англійського слова "compare" – порівнювати. Входи компаратора називають сигнальний та опорний, на які надходять сигнали напруги одного знака (рис. 3.4).

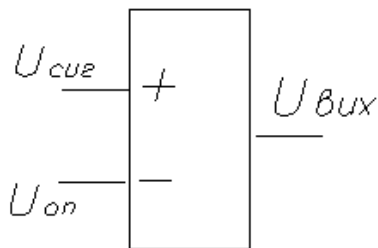


Рис. 3.4. Схема аналогового компаратора на операційному підсилювачі

На рис. 3.4 видно, що входи ОП позначені знаками "плюс" і "мінус". Знак "плюс" на вході означає, якщо напруга на опорному вході більша, ніж на сигнальному, то на виході компаратора логічна "1". Знак "мінус" означає, якщо напруга на сигнальному вході більша, ніж на опорному, то на виході логічний "0". Принцип роботи компаратора пояснюють діаграми вхідної і вихідної напруги, що показано на рис. 3.5.

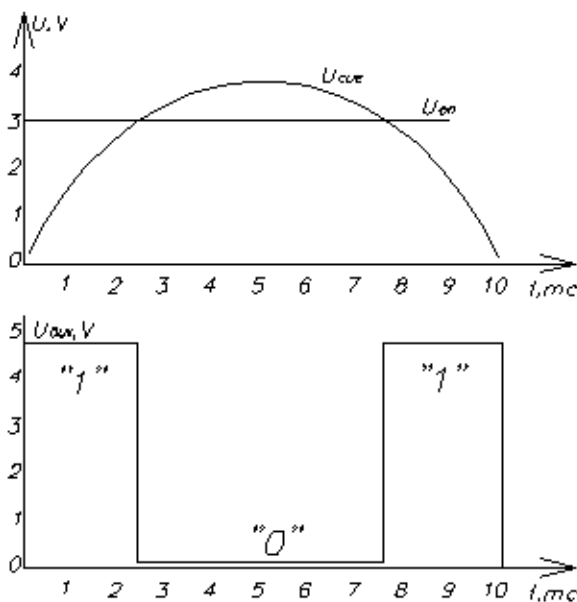


Рис. 3.5. Графіки вхідної і вихідної напруг компаратора

Якщо напруга на опорному вході більша, ніж на сигнальному, то на виході буде "плюс" напруги, або логічна "1". Якщо навпаки – то на виході буде логічний "0". Тобто алгоритм роботи компаратора:

$$U_{вих} = U^1, \text{ якщо } U_{сиг} < U_{оп},$$

$$U_{вих} = U^0, \text{ якщо } U_{сиг} > U_{оп}.$$

Усі цифрові мікросхеми будують на основі логічних елементів типу І, І-НІ, АБО, АБО-НІ, виключне АБО, схеми яких показані на рис. 3.6.

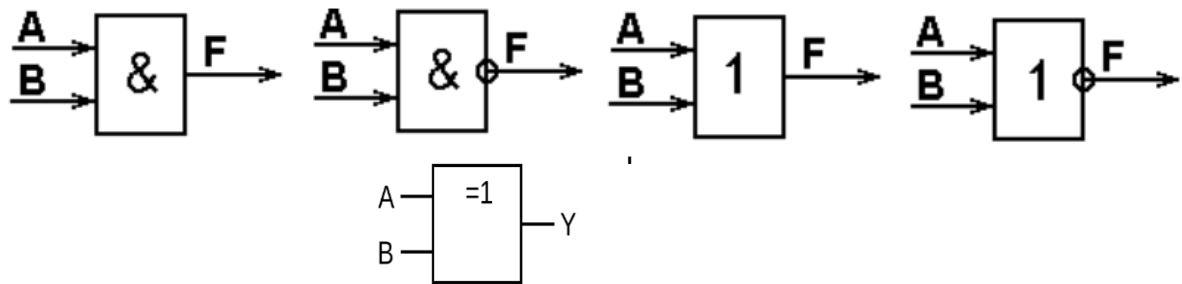


Рис. 3.6. Позначення на електричних схемах логічних елементів:
І; І-НІ; АБО; АБО-НІ; виключне АБО

Для логічного елемента "виключне АБО" сигнал "1" на виході буде тоді, коли сигнал "1" буде лише на одному із входів. Якщо ж на обох входах будуть сигнали "0" або "1", на виході буде сигнал "0".

На рис. 3.7 показано спрощену схему вихідного каскаду логічних елементів на польових транзисторах з ізолюваним затвором.

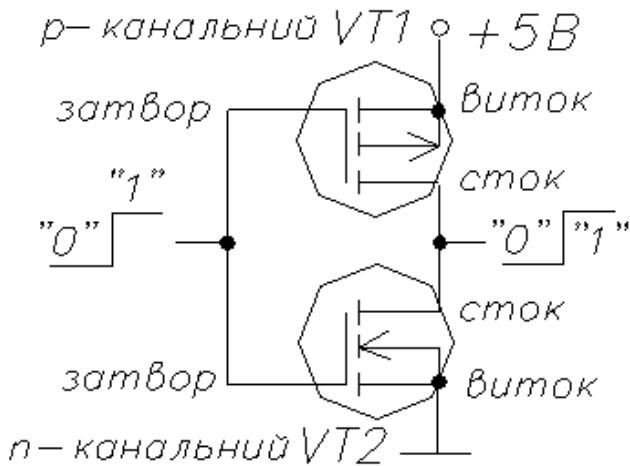


Рис. 3.7. Спрощена схема вихідного каскаду логічних елементів на польових транзисторах VT1 р-канального і VT2 n-канального

Затвори польових транзисторів VT1 і VT2 з'єднані між собою. Коли на вхід каскаду надходить логічна "1", то транзистор VT2 вмикається, а VT1 вимикається.

Коли на вхід надходить логічний "0", то навпаки. В результаті маємо два стани вихідного каскаду: 1) VT1 увімкнений, VT2 вимкнений, тоді на виході логічна "1", тобто напруга в межах (1,8-5)В; 2) VT2 увімкнений, VT1 вимкнений, тоді на виході логічний "0", тобто напруга в межах (0-1,3)В.

На логічних елементах будують схеми тригерів для запису, зберігання та зчитування одного біта інформації, тобто "1" або "0". У цифровій схемотехніці використовують декілька схем тригерів, зокрема схему D-тригера, показану на рис. 3.8.

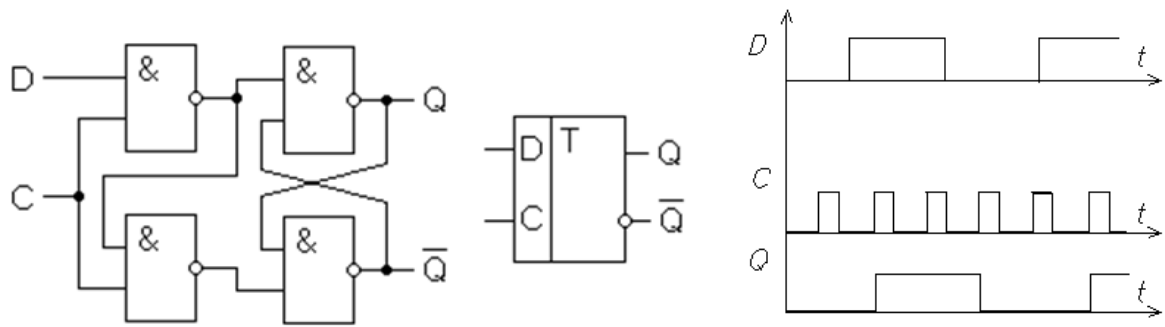


Рис. 3.8. Схема D-тригера на логічних елементах I-НІ, умовне графічне позначення на схемах та часові діаграми роботи

D-тригер має у своєму складі 4 логічних елементи I-НІ, два з яких на виході утворюють так званий RS-тригер. D-тригер має два входи: інформаційний D для прийому біта інформації "1" або "0" і синхронізуючий C для подачі синхроімпульсу. З часових діаграм видно, що вихід D-тригера повторює стан входу тільки при появі синхроімпульсу. Тобто запис біта інформації відбувається тільки за наявності синхроімпульсу.

Для зберігання 8 або 16 біт інформації тригери з'єднують у групи по 8 або 16 штук, які називаються регістрами 8- або 16-розрядними. Тобто кількість тригерів дорівнює кількості розрядів і кількості біт інформації. У Європі замість слова "розряд" використовують слово "біт" і говорять 8- або 16-бітний регістр. Схему 8-розрядного регістра на D-тригерах показано на рис. 3.9.

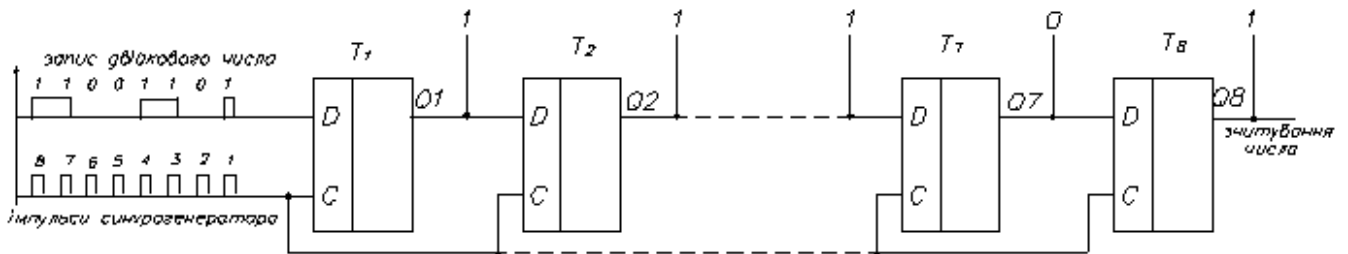


Рис. 3.9. Схема 8-розрядного регістра на D-тригерах

На рис. 3.9 видно, що виходи тригерів підключені до входів наступних. На інформаційний D-вхід 1-го тригера T1 надходять біти двійкового числа, а на об'єднані входи C надходять синхронізуючі імпульси. По кожному імпульсу відбувається зсув бітів, у якому кожен наступний тригер переходить у стан попереднього тригера. Після восьми імпульсів у регістр завантажується двійкове число. Для завантаження 8-розрядного числа потрібно 8 імпульсів. Зчитування завантаженого коду виконується з виходу 8-го тригера.

На регістрах будують лічильники вхідних імпульсів і таймери для створення витримок часу. На рис. 3.10 показано функціональну схему таймера.

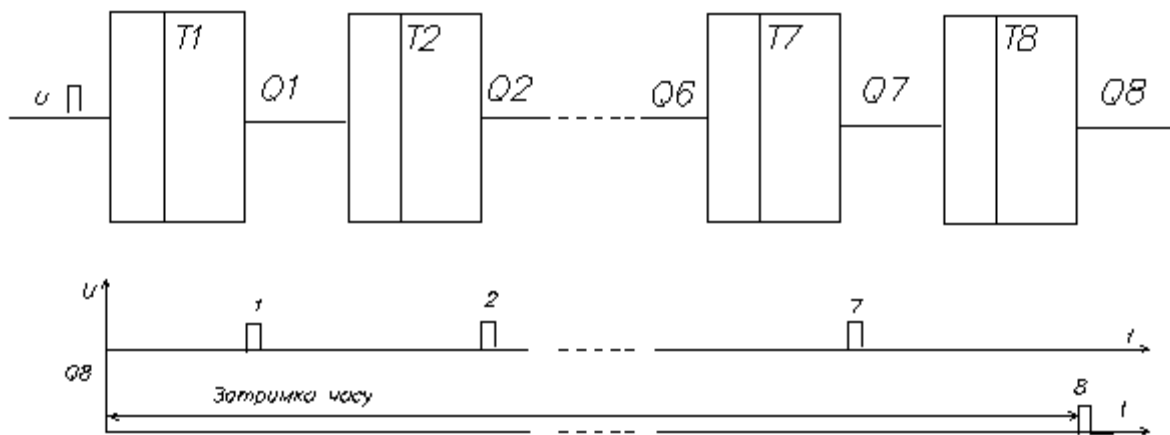


Рис. 3.10. Функціональна схема 8-розрядного таймера

На схемі 8-розрядний регістр складається з 8 тригерів. Спочатку на виходах усіх тригерів встановлені логічні "нулі". З діаграми напруг видно, що кожен вхідний імпульс змінює стан виходів тригерів. При цьому імпульс на виході старшого тригера з'являється із затримкою, яка дорівнює добутку кількості імпульсів на їхній період. У цьому полягає принцип роботи таймера. Кількість тригерів у регістрі називають розрядністю таймера, яка впливає на величину затримки. Розрядність таймера визначає максимальну кількість імпульсів для рахунку.

Дешифратором (декодером) називається логічна схема, призначена для перетворення комбінації вхідного двійкового коду в керуючий сигнал лише на одному із своїх виходів. Схему дешифратора на три входи показано на рис. 3.11.

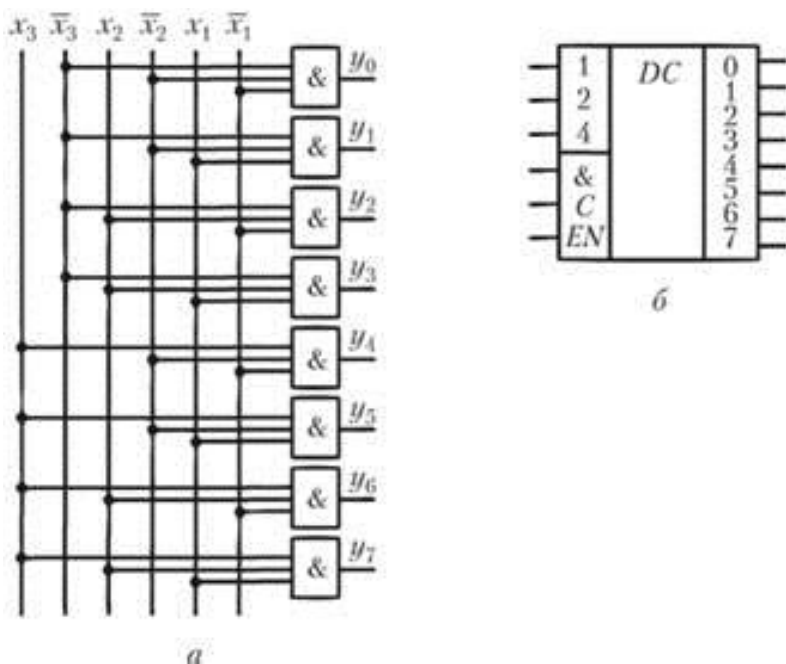


Рис. 3.11. Схема 8-розрядного дешифратора на три входи: а – логічна схема; б – умовне позначення дешифратора з входами синхронізації і дозволу

Дешифратори застосовуються в мікроконтролерах для визначення типу команд, для адресації комірки пам'яті тощо.

Мультиплéксори відносяться до пристроїв комутації цифрової інформації. Схему мультиплéксора на чотири входи показано на рис. 3.12.

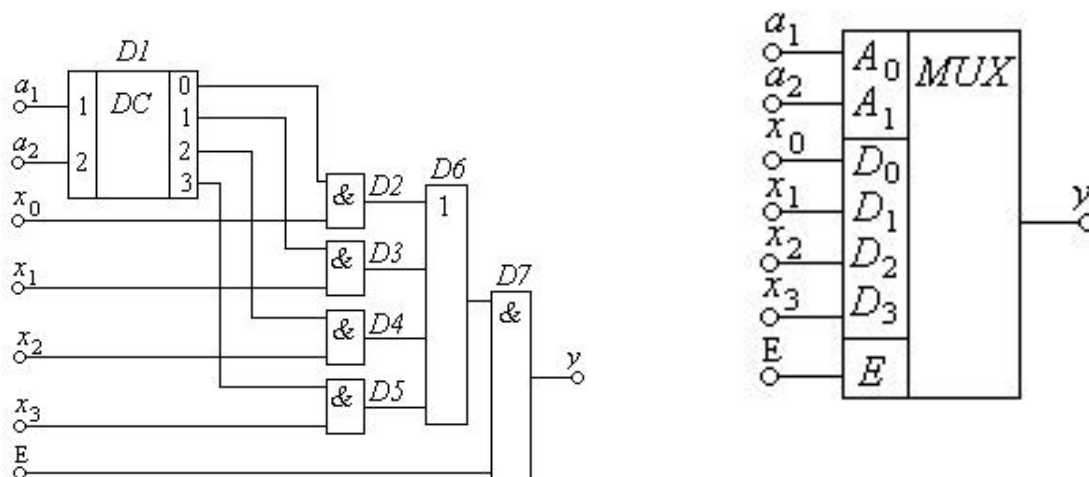


Рис. 3.12. Логічна схема і умовне позначення мультиплéксора на чотири входи

Мультиплéксор має чотири інформаційних входи, адресні входи, вхід дозволу мультиплéксування (стробуючий вхід) та один вихід. Мультиплéксор здійснює комутацію одного з чотирьох інформаційних входів до одного виходу. Адресний дешифратор D1 перетворює двійковий адресний код на десятковий для керування роботою мультиплéксора.

Залежно від комбінації стану адресних входів a_1 та a_2 на одному з чотирьох виходів дешифратора з'являється логічна "1", яка дає дозвіл на спрацьовування відповідної схеми типу "І" (D2...D5).

3.3. Перетворювачі аналогових і цифрових сигналів

У МПЗА для роботи з аналоговими сигналами напруги і струму використовують аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП), до складу яких входять цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП). Тому логічно розглянути роботу ЦАП, за якої використовуються дві шкали: цифрова шкала на вході і аналогова шкала на виході. Кожному двійковому числу на вхідній цифровій шкалі відповідає десяткове число на вихідній аналоговій шкалі. З цього випливає, що кількість поділок напруги на аналоговій шкалі ЦАП дорівнює кількості двійкових чисел цифрової шкали. Кількість двійкових чисел визначається кількістю розрядів двійкового числа.

Кількість поділок аналогової $N_{аш}$ та цифрової $N_{цш}$ шкали ЦАП визначається за формулою $N_{цш}=N_{аш}=2^p-1$, де p – кількість розрядів двійкового числа, тобто розрядність ЦАП. Межі вимірювання напруги для аналогової шкали складають "0–5V". Межі вимірювання двійкового числа для 8-розрядного ЦАП складають "00000000–11111111". Необхідно зазначити, що максимальна напруга для аналогової шкали не може

перевищувати напругу живлення ЦАП. Після визначення кількості поділок необхідно визначити ціну однієї поділки аналогової і цифрової шкал. Для цифрової шкали ціна поділки дорівнює одному молодшому розряду двійкового числа, тобто $C_{цш}=1$ біт. Ціна поділки аналогової шкали дорівнює $C_{аш} = U_{\max}/N_{аш}$ В, де U_{\max} – максимальна вихідна напруга ЦАП.

Розглянемо принцип перетворення трирозрядного двійкового числа на вході ЦАП в аналогову напругу. Кількість поділок аналогової та цифрової шкали для трирозрядного ЦАП дорівнює $N_{цш}=N_{аш}=2^3-1=7$ поділок. Приймаємо максимальне значення вихідної напруги ЦАП кратним кількості поділок 7, тобто $U_{\text{вих}} = 3,5$ В. Тоді ціна поділки аналогової шкали ЦАП дорівнює $C_{аш}=3,5/7=0,5$ В, як показано на рис. 3.13.

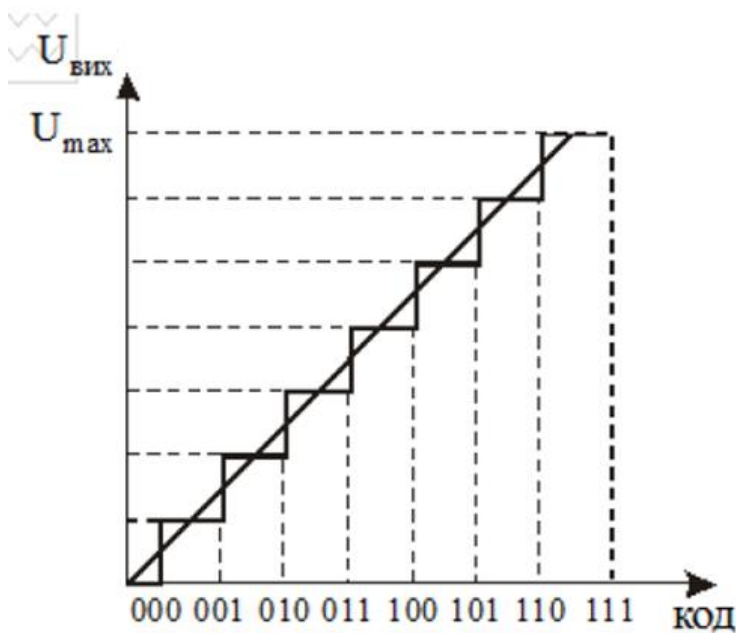


Рис. 3.13. Ціни поділок аналогової та цифрової шкал ЦАП

Максимальній вихідній напрузі ЦАП відповідає вхідне двійкове число з трьома "одиницями" в розрядах.

На рис. 3.14 показано схему трирозрядного ЦАП, яка містить на вході джерело опорної напруги $U_{оп}$, яке визначає максимальне значення вихідної напруги ЦАП. Вхідні резистори R_0, R_1, R_2 формують необхідні коефіцієнти підсилення ОП. Транзисторні ключі S_1, S_2, S_3 призначені для подачі двійкового числа на вхід ЦАП.

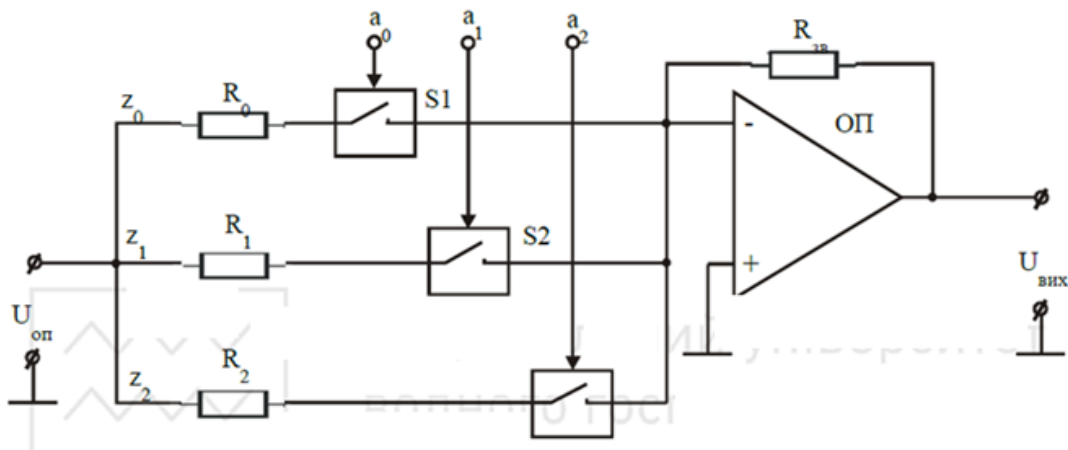


Рис. 3.14. Спрощена схема ЦАП на операційному підсилювачі і вагових резисторах

Розрахунок опорів резисторів проводиться таким чином. При вхідному двійковому числі 001 вихідна напруга ЦАП дорівнює ціні поділки аналогової шкали $U_{аш}=0,5$ В. Для розрахунку опорів резисторів R_0 , R_1 , R_2 задаємося опором резистора в колі зворотного зв'язку ОП $R_{оп}=10$ кОм.

Вихідна напруга ОП для нульового розряду повинна зменшитися до значення однієї поділки, тобто коефіцієнт підсилення ОП за нульовим розрядом $K_0=U_{вих}/U_{оп}=0,5/3,5=1/7$. Тоді вхідний опір нульового розряду дорівнює $R_0=R_{оп}/K_0=7 \cdot 10=70$ кОм. Опори старших розрядів зменшуються в два рази відносно попереднього розряду, тобто $R_1=35$ кОм, $R_2=17,5$ кОм. Коефіцієнти підсилення ОП, відповідно, в два рази збільшуються, тобто $K_1=2/7$, $K_2=4/7$. Покажемо принцип перетворення числа 5 у двійковому коді $5=1 \cdot 2^2+0 \cdot 2^1+1 \cdot 2^0$ на аналогову напругу. Напруга на виході ОП, яка відповідає двійковому коду виміряного числа, дорівнює $U_{вих}=3,5(1/7+4/7)=2,5$ В.

Перетворення аналогових сигналів на дискретні називають дискретизацією або квантуванням. Для цього використовують аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП). Перетворення аналогових сигналів до цифрових супроводжується певною втратою інформації. Це пояснюється тим, що перетворення вхідного аналогового сигналу в дискретний відбувається через деякі часові проміжки, а між ними значення вхідного сигналу не контролюється. Чим менший цей часовий проміжок, тим точніше відтворюється аналоговий сигнал у цифровій формі.

Основними характеристиками АЦП є його розрядність та інтервал дискретизації сигналу за часом. Дискретизацію сигналу за часом ще називають частотою вибірок, яка пов'язана з дискретизацією за часом ΔT t виразом $f_s=1/\Delta t$. Для періодичного сигналу з періодом T можна визначити за відомою частотою кількість вибірок за період $N=f_u \cdot T$.

АЦП відрізняється від ЦАП тим, що у нього аналогова шкала – на вході, а цифрова шкала – на виході. Кожному значенню напруги аналогової шкали відповідає двійкове число на цифровій шкалі. З цього випливає, що кількість поділок напруги на аналоговій шкалі дорівнює кількості двійкових чисел на цифровій шкалі. Ціна поділок на аналоговій та цифровій шкалі визначається аналогічно ЦАП. АЦП перетворює аналогове число у двійкове до цілої поділки, причому з округленням у меншу сторону. Звідси випливає, що максимальна похибка аналогової шкали дорівнює ціна однієї поділки.

В АЦП найчастіше використовується принцип послідовних наближень або порозрядного врівноваження, який можна пояснити на процесі зважування ваги на тарілчастих терезах за допомогою набору гирьок. Наприклад, є три гирі – 50, 100 та 200 грамів. Для визначення ваги на тарілці терезів на іншу тарілку відразу кидають найбільшу гирю вагою 200 грамів, і вона переважає, тобто вага менше 200 грамів. Тоді замість неї кидають на тарілку гирю 100 вагою грамів, вона не переважає вагу, тобто вага більше 100 грамів. Тоді додаємо на тарілку гирю вагою 50 грамів, тобто в сумі 150 грамів, і ця вага не переважає. Таким чином, 200 грамів – це багато, а 150 грамів – мало, але точніше зважити не можна, оскільки немає менших гирьок. Тому округляють вагу у менший бік і приймають, що вага важить 150 грамів. При такому зважуванні ціна поділки та максимальна похибка дорівнюють 50 грамів.

Такий принцип переноситься і на роботу АЦП, тільки замість кількості гирьок використовується кількість розрядів. Функціональну схему АЦП показано на рис. 3.15.

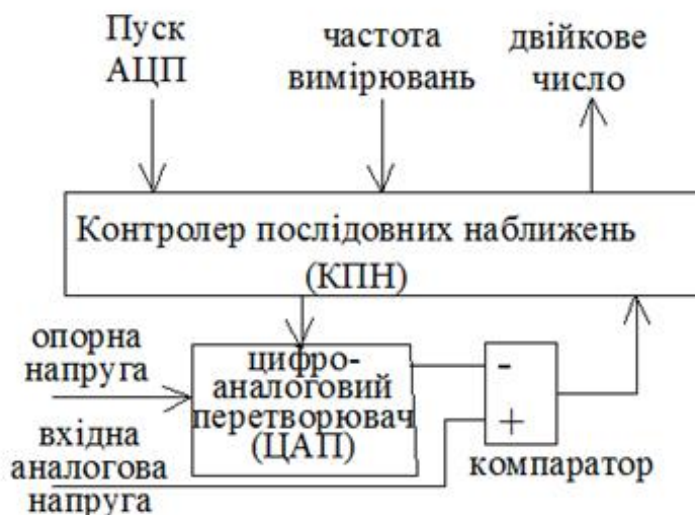


Рис. 3.15. Функціональна схема аналогово-цифрового перетворювача

Схема АЦП містить контролер послідовних наближень (КПН) – для формування ряду двійкових чисел, цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) – для перетворення двійкових чисел на аналогову напругу

і компаратор – для порівняння вихідної напруги ЦАП з вимірюваною напругою на вході АЦП.

Розглянемо принцип роботи трирозрядного АЦП. Кількість поділок аналогової та цифрової шкали для трирозрядного АЦП дорівнює $N_{\text{АЦП}} = N_{\text{АН}} = 2^3 - 1 = 7$ поділок. Приймаємо максимальне значення вхідної напруги АЦП кратним кількості поділок, тобто числу 7 рівне 3,5 В. Максимальній вхідній напрузі відповідає двійкове число з трьома "одиницями" в розрядах.

Максимальне значення вхідної напруги АЦП є опорною напругою для ЦАП. Якщо вхідна напруга дорівнює чи більше опорної, то у всіх розрядах двійкового числа будуть "одиниці". Для АЦП опорна напруга визначає максимальне значення вхідної напруги, що може бути виміряним. Як джерело опорної напруги можна використовувувати: напругу живлення АЦП або зовнішнє джерело напруги.

Для кількості поділок 7 приймаємо максимальну вхідну напругу 3,5 В. Тоді ціна поділки аналогової шкали АЦП дорівнює $U_{\text{аш}} = 3,5/7 = 0,5$ В, ціна поділки цифрової шкали АЦП дорівнює 1 біт.

Принцип аналого-цифрового перетворення аналогового сигналу на двійковий код пояснюється на рис. 3.16.

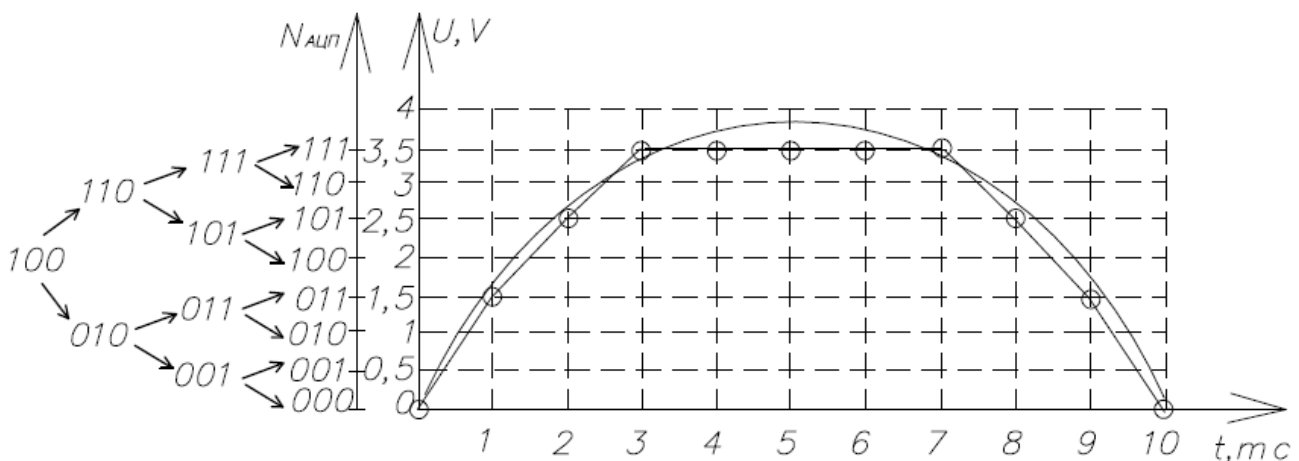


Рис. 3.16. Принцип АЦП перетворення аналогової синусоїди на трирозрядне двійкове число

Зліва дві осі ординат – цифрова шкала, аналогова шкала. Обидві поділені на 7 поділок. На цифровій шкалі показані поділки двійковими числами, на аналоговій поділки показані десятковими числами. Ціна поділки цифрової шкали – це один біт у молодшому розряді двійкового числа. Ціна поділки аналогової шкали дорівнює 0,5 В. На рис. 3.16 видно позитивну напівхвилю синусоїди з амплітудою більше 3,5 В. Зліва від графіка трирозрядні двійкові числа та стрілочки між ними пояснюють принцип послідовних наближень у процесі перетворення значень напруги синусоїди на двійкові числа.

Наприклад, покажемо алгоритм вимірювання вхідної напруги величиною 1,7 В: 1) КПН формує трирозрядне двійкове число з "одиницею"

в третьому старшому розряді, тобто 1-0-0 і подає його на вхід ЦАП; 2) ЦАП перетворює 1-0-0 на аналогову напругу і подає його на вхід компаратора, де воно порівнюється з вхідною напругою 1,7 В; 3) оскільки двійковому числу 1-0-0 відповідає напруга 2 В, яка більше 1,7 В, то КПН посилає на вихід АЦП "нуль"; 4) далі КПН формує двійкове число з "одиницею" у другому розряді, тобто 0-1-0; 5) оскільки двійковому числу 010 відповідає напруга 1 В, яка менше 1,7 В, то КПН посилає на вихід "одиницю"; 6) далі КПН формує число 0-1-1; 7) оскільки числу 0-1-1 відповідає 1,5, яке менше 1,7, то КПП посилає на вихід "одиницю". В результаті отримуємо двійкове число 0-1-1, яке відповідає аналоговому числу 1,5 В. Таким чином, похибка вимірювання складає -0,2 В.

Те, що записали, наочно показано стрілочками на рис. 3.17. Виходить, що двійкове число формується шляхом підбору, починаючи від старшого розряду. Якщо напруга на вході не 1,7, а 1,99 В, то АЦП все одно виміряє цю напругу як 1,5 В. Тобто максимальна похибка дорівнює ціні поділки 0,5 В. Якщо вхідна напруга буде більшою за 3,5 В, АЦП все одно виміряє її як 3,5 В.

Отримане від АЦП двійкове число перетворюється на десяткове двома діями: 1) двійкове число 011 перевести в кількість поділок аналогової шкали $0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 3$ поділки; 2) кількість поділок помножити на ціну поділки $3 \cdot 0,5 = 1,5$ В.

Десяткове число перетворюється на двійкове двома діями: 1) визначити кількість поділок, поділивши десяткове число на ціну поділки $1,7 / 0,5 = 3,4$ поділки; 2) округлити кількість поділок до цілого в меншу сторону $3,4 = 3$; 3) отримане число перетворити на двійкове, тобто 011.

Частоту АЦП-перетворень задає генератор частоти. Час одного вимірювання АЦП займає 13 періодів частоти. Для 1000 вимірів в секунду частота генератора має бути $13 \cdot 1000 = 13$ кГц.

3.4. Мікропроцесори і мікроконтролери

Залежно від призначення та фірми виробника в МПЗА використовують мікропроцесори (МП) і мікроконтролери (МК). МП через свої пристрої уведення-виведення обмінюється інформацією з периферійними вузлами. За допомогою цих додаткових вузлів здійснюється сполучення МП із зовнішнім середовищем: датчиками початкової інформації, об'єктом керування, оператором тощо.

Регістри являють основу для побудови МП, функціональну схему якого показано на рис. 3.17.

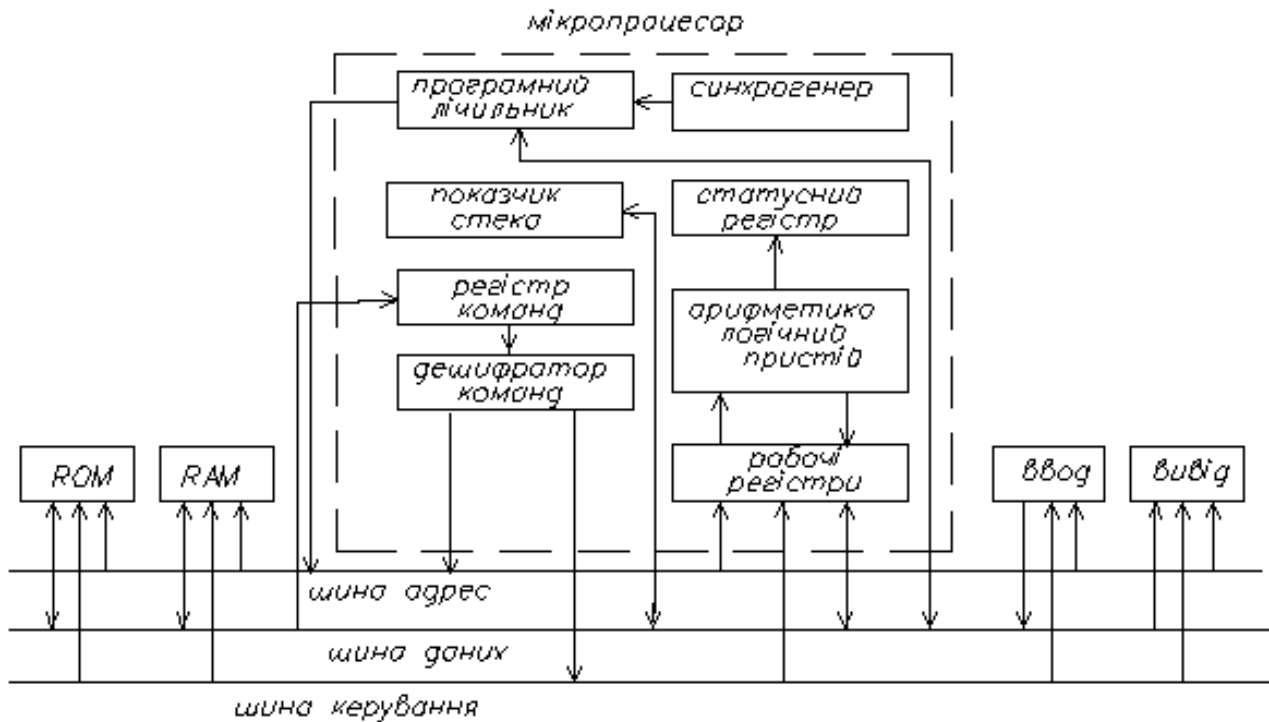


Рис. 3.17. Функціональна схема мікропроцесора

Функціональна схема МП містить синхрогенератор (тактовий генератор), програмний лічильник, регістр команд, дешифратор команд, показчик стека, робочі регістри, які в літературі називають "регістри загального призначення (РЗП)", арифметично-логічний пристрій, статусний регістр.

Синхрогенератор синхронізує роботу всіх регістрів МП, тобто всі регістри по кожному його синхроімпульсу змінюють біти у своїх розрядах. Частота синхрогенератора визначає швидкодію МП. Програмний лічильник МП – це 16-розрядний регістр для формування адрес комірок спеціальної мікросхеми ROM-пам'яті, в якій зберігаються команди завантажених програм. ROM – це початкові літери англійських слів "ready only memory", що перекладається як "пам'ять тільки для читання". В Україні ROM-пам'ять ще називають "постійний запам'ятовуючий пристрій" (ПЗП). Мікросхема ROM-пам'яті містить зазвичай двобайтові (16-розрядні) комірки, тобто 16-розрядні регістри, в які завантажуються і зберігаються двійкові коди команд, у тому числі при відключеному живленні.

З комірки ROM-пам'яті двійковий код команди пересилаються в регістр команд, в якому зберігаються до кінця виконання команди. З регістра команд двійковий код команди надходить на дешифратор команд, який визначає тип операції, адреси комірок, де зберігаються дані для виконання операції, пересилає дані в робочі регістри та арифметико-логічний пристрій (АЛП).

АЛП виконує операції над даними і результати операції пересилає до одного з робочих регістрів. Арифметико-логічний пристрій являє собою логічну схему суматора двійкових чисел, який виконує арифметичні або логічні операції над даними: 1) додавання (множення); 2) віднімання (ділення); 3) логічне "І"; 4) логічне "АБО"; 5) логічне "НІ"; 6) логічне "ВИКЛЮЧНЕ АБО"; 7) операція зсуву біт двійкового числа в регістрах; 8) порівняння двійкових чисел (більше, менше, дорівнює).

До АЛП безпосередньо підключені всі робочі регістри, та всі операції виконуються лише через них, у тому числі пересилання даних. Результати виконання операцій зберігаються в одному з робочих регістрів та у статусному регістрі.

Статусний 8-розрядний регістр у літературі ще називають регістром ознак або прапором регістром. Після виконання операції АЛП її ознаки (знак арифметичної операції, нульовий результат, перенесення біта в старший розряд тощо) завантажуються в розряди статусного регістра у вигляді біт "0" або "1" і використовуються при виконанні програми. Розряди статусного регістра називаються прапорами.

Мікросхема RAM-пам'яті призначена для тимчасового зберігання даних при виконанні програм, які зникають після вимкнення живлення. RAM – це початкові літери англійських слів "random access memory", що перекладається як "пам'ять вільного доступу". В Україні цю пам'ять ще називають оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП). RAM-пам'ять енергозалежна і містить зазвичай однобайтові (8-розрядні) комірки для запису, тимчасового зберігання та зчитування даних у процесі виконання програми.

Зазвичай останні комірки RAM-пам'яті використовують для формування так званої стекової пам'яті або стека. Стек – це група комірок у кінці RAM-пам'яті, призначених для збереження даних і адреси комірки з наступною командою основної програми на час виконання підпрограм. У перекладі з англійської "stack" – це стопка, наприклад, стопка аркушів паперу. Для стопки аркушів притаманно, що якщо їх складають одну на одну, то першим із цієї стопки беруть аркуш, який поклали останнім. Для МП стопка аркушів – це адреси комірок, розташованих у стеку. Особливості стекової пам'яті такі: 1) при завантаженні стека даними вказують адресу лише останньої комірки RAM-пам'яті і далі завантажують дані в комірки стека по черзі, не вказуючи адресу комірки; 2) при зчитуванні дані з комірок зчитуються по черзі у зворотному порядку. Виходячи з цього стек називають пам'яттю з послідовним доступом за принципом: "останній зайшов – першим вийшов". Адресу останньої комірки RAM-пам'яті називають дном стека. Комірку з молодшою адресою, у яку записані останні дані, називають вершиною стека. При завантаженні стека адреси комірок стека зменшуються. А при завантаженні оперативними даними комірок RAM-пам'яті адреси комірок

збільшуються. Якщо ці адреси "зустрінуться", то програма зупиниться, тому програміст повинен контролювати, щоби цього не трапилось.

Показчик стека – це двобайтовий регістр, у якому зберігається 16-бітна адреса останньої завантаженої комірки стека. У чому полягає сенс показчика стека? Коли з комірки ROM-пам'яті зчитується команда виклику підпрограми, то адреса наступної комірки ROM-пам'яті апаратно завантажується в комірку стекової пам'яті, а адреса комірки завантажується в показчик стека. Показчик стека зберігає адресу останньої завантаженої комірки стека. Після виконання підпрограми адреса комірки ROM-пам'яті з наступною командою головної програми зі стека завантажується до програмного лічильника. Використання показчика стека є обов'язковим за наявності підпрограм.

На сьогодні українські виробники (наприклад, фірма РЕЛСІС) виготовляють МПЗА на базі мікроконтролерів (МК), які у своєму складі містять мікропроцесори. У світі декілька компаній виготовляють МК: Atmel, Intel, Microchip, Motorola та інші. Архітектура у всіх МК практично однакова, тому доцільно їх вивчати на прикладі одного МК, наприклад, компанії "Atmel", яка випускає МК серії AVR, що поділяються на дві підсерії: ATiny – для побутових пристроїв (Tiny з англійської "дуже малий") та ATмега – для промислових пристроїв (мега з англійської "дуже великий").

Функціональну схему МК серії ATмега показано на рис. 3.18.

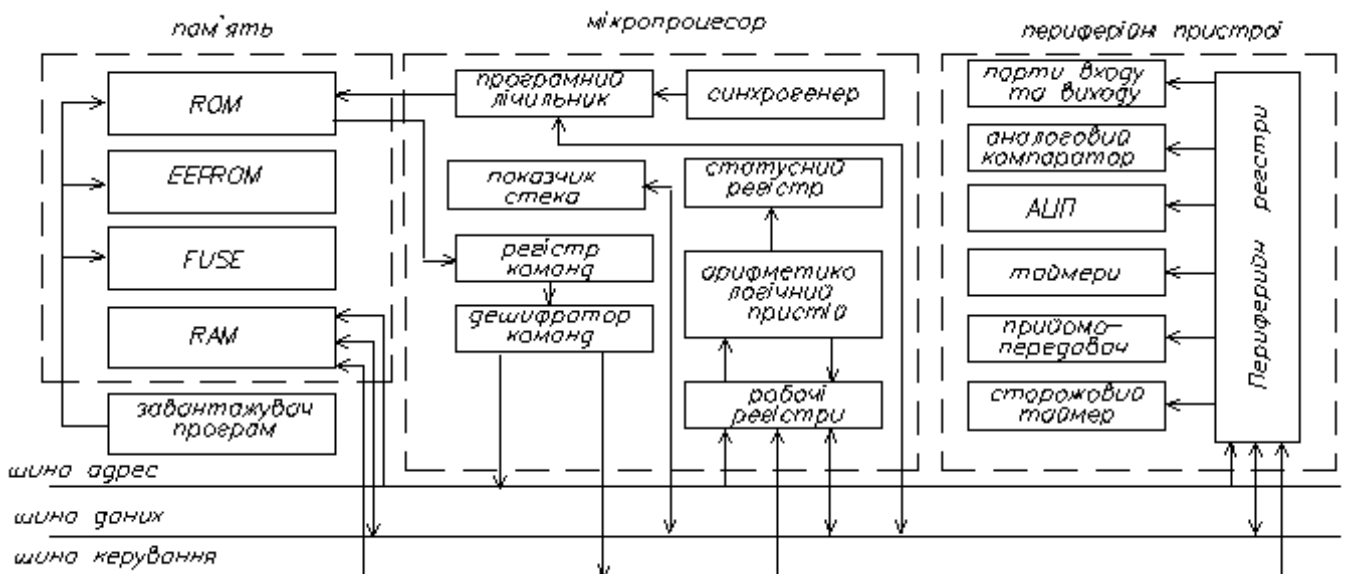


Рис. 3.18. Функціональна схема мікросхеми МК серії ATмега

Технічні характеристики мікроконтролера ATмега8 наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики мікроконтролера АТмега8

Найменування	Числове значення
Напруга живлення мікросхеми, В	4,5–5,5
Частота синхрогенератора, МГц	1–16
Струм споживання:	
– при частоті до 5 МГц, мА,	6
– при частоті 16 МГц, мА	10
Номінальний струм одного виводу порту, мА	20
Максимальний струм одного виводу порту, мА	40
Об'єм ROM-пам'яті, Кб	8
Об'єм RAM-пам'яті, Кб	1
Об'єм EEPROM-пам'яті, байт	512
Кількість робочих регістрів	32
Кількість периферійних регістрів	64

Напруга живлення 4,5–5,5 В означає що у цих межах МК виконує всі функції. Є спеціальні МК з напругою живлення 3,3 В. Частота синхрогенератора вибирається в діапазоні 1–16 МГц за допомогою кварцевого резонатора або за допомогою внутрішніх налаштувань МК при завантаженні програми. Слід зазначити, що при збільшенні частоти зростає струм споживання: при частоті до 5 МГц до 6 мА, при частоті 16 МГц до 10 мА.

Функціональна схема МК містить блок пам'яті, блок мікропроцесора та блок периферійних пристроїв, що пов'язані між собою шинами адреси, даних та керування. Блок пам'яті МК відповідає так званій Гарвардській обчислювальній архітектурі, згідно з якою ROM-пам'ять програм відокремлена від RAM-пам'яті даних. Це підвищує швидкодію МК, оскільки поки виконується одна команда з використанням RAM-пам'яті, відбувається вилучення з ROM-пам'яті наступної команди.

ROM-пам'ять (read only memory) призначена для зберігання завантажених програм, тобто при роботі МК з ROM-пам'яті тільки зчитуються команди. У технічних описах на МК ROM-пам'ять часто називають FLASH-пам'ять, тому що вона виготовлена за FLASH-технологією, звідки походить слово "флешка". ROM-пам'ять енергонезалежна та містить двобайтові комірки для зберігання та зчитування команд при виконанні програми. Кількість команд програми в ROM-пам'яті залежить від її об'єму. Для МК АТмега8 з об'ємом 8 кбайт кількість комірок дорівнює $8 \cdot 1024 / 16 = 512$ комірок. Виходить, що максимальна кількість двобайтових команд програми – 512, а трибайтових – менше, оскільки вони займають дві двобайтових комірки.

EEPROM-пам'ять призначена для зберігання поточних даних при виконанні програми і після вимкнення живлення МК. EEPROM – це початкові

літери англійських слів "Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory", що перекладається з англійської так: пам'ять, що електрично стирається. EEPROM-пам'ять енергонезалежна і містить одnobайтові комірки для запису, зберігання та зчитування даних у процесі виконання програми.

FUSE-пам'ять – це енергонезалежна пам'ять на 32 біти для внутрішнього налаштування МК при завантаженні програм у ROM-пам'ять.

Блок регістрової пам'яті (рис. 3.19) містить 32 комірки робочих регістрів (у літературі їх називають регістри загального призначення), 64 комірки периферійних регістрів і регістри RAM-пам'яті.

*Напрямки руху адрес
комірок RAM-пам'яті
та комірок стека*

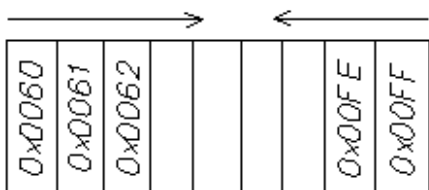


Рис. 3.19. Карта блоку регістрової пам'яті

Зазвичай у всіх МК в кінці RAM-пам'яті розміщуються комірки стека, як показано на рис. 3.19. Коли мікропроцесор (МП) зустрічає в програмі команду виклику підпрограми, то адреса наступної комірки з ROM-пам'яті апаратно завантажується в стек. Після виконання підпрограми адреса комірки з наступною командою основної програми зі стека повертається до програмного лічильника.

Блок периферійних пристроїв – це окремі транзисторні схеми, які виконують певні операції незалежно від МП і після їх виконання дають йому сигнал. Це спричинено тим, що деякі операції МП не може виконувати, деякі операції периферійні пристрої виконують швидше, ніж МП. До периферійних пристроїв відносяться порти для прийому вхідних сигналів і видачі вихідних сигналів; аналоговий компаратор, цифро-аналоговий перетворювач, таймери, прийомопередавач, сторожовий таймер.

Сторожовий таймер (WatchDog Timer) використовують при випадковій зупинці програми, тобто "зависання" МК. При виконанні головної програми одночасно працює сторожовий таймер і рахує певний проміжок часу, до закінчення якого в програмі передбачена команда скиду сторожового таймера і його наступного запуску. Якщо програма працює нормально, то команда скиду сторожового таймера має регулярно виконуватися, захищаючи процесор від скидання. Якщо ж МП перестав працювати або зациквився на якійсь ділянці програми, команда скиду сторожового таймера не буде виконана, і відбудеться перезавпуск МК з 1-ї комірки (вивід RESET). Якщо увімкнути сторожовий таймер за допомогою Fuse-бітів МК, то він буде

задіяний у роботі постійно, без можливості повторно відключити його програмним шляхом.

У нижній частині схеми показано шину адреси, шину даних та шину керування. Це дроти, укладені в одній площині один біля одного, виходить плоский джгут дротів, тому їх і назвали шинами.

До периферійних пристроїв мікроконтролерів відносяться порти, аналоговий компаратор, аналогово-цифровий перетворювач, таймери, сторожовий таймер. Порти є зовнішніми виводами мікросхеми МК, призначені для прийому вхідних сигналів і видачі вихідних сигналів.

До виводів портів підключають зовнішні елементи (світлодіоди, транзистори тощо), струм яких необхідно обмежувати на рівні номінального до 20 мА.

Важливим параметром МК є обсяг ROM-пам'яті, оскільки визначає кількість команд програми. Для ROM-пам'яті 8 кбайт кількість 2-байтових комірок для завантаження команд дорівнює $(8 \cdot 1024) / 2 = 4096$. Максимальна кількість команд програми визначається форматом команди: 2-байтові і 3-байтові, які займають три комірки.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Пояснити призначення синхрогенератора в схемі МП.
2. Пояснити призначення програмного лічильника в схемі МП.
3. Пояснити призначення регістра команд у схемі МП.
4. Пояснити призначення дешифратора команд у схемі МП.
5. Пояснити призначення покажчика стека в схемі МП.
6. Пояснити призначення робочих регістрів у схемі МП.
7. Пояснити призначення арифметично-логічного пристрою у схемі МП.
8. Пояснити призначення статусного регістра в схемі МП.

3.5. Периферійні пристрої мікроконтролерів

До периферійних пристроїв мікроконтролерів (МК) відносяться порти, аналоговий компаратор, аналогово-цифровий перетворювач, таймери, сторожовий таймер.

Порти є зовнішніми виводами мікросхеми МК, призначені для прийому вхідних сигналів і видачі вихідних сигналів. МК АТмега8 має два 8-розрядних порти з іменами В, D і 7-розрядний порт з іменем С. Виводи мікросхеми мають три типи маркування. Цифрами всередині корпусу позначені виводи мікросхеми для електричного монтажу друкованої плати. Поряд із лапками позначені літерами РВ, РD і РС назви розрядів портів В, D, С для їх програмування. Кожен порт або окремий його розряд можна програмувати на прийом вхідних сигналів або на видачу вихідних сигналів. Для програмування портів на вхід або на вихід кожен із портів має три

реєстри: 1) реєстр напрямку ddr програмує порт на вхід або на вихід; 2) керуючий реєстр port програмно формує на виході логічні сигнали "0" або "1"; 3) сигнальний реєстр pin призначений для зчитування даних з порту. Оскільки кожен порт має по три реєстри для програмування, то до їх назви в кінці приписується четверта літера відповідного порту, тобто b, c, d.

Розглянемо функціональну схему розряду PD0 порту D у режимі вхідного порту і розряду PD4 порту D у режимі вихідного порту (рис. 3.20).

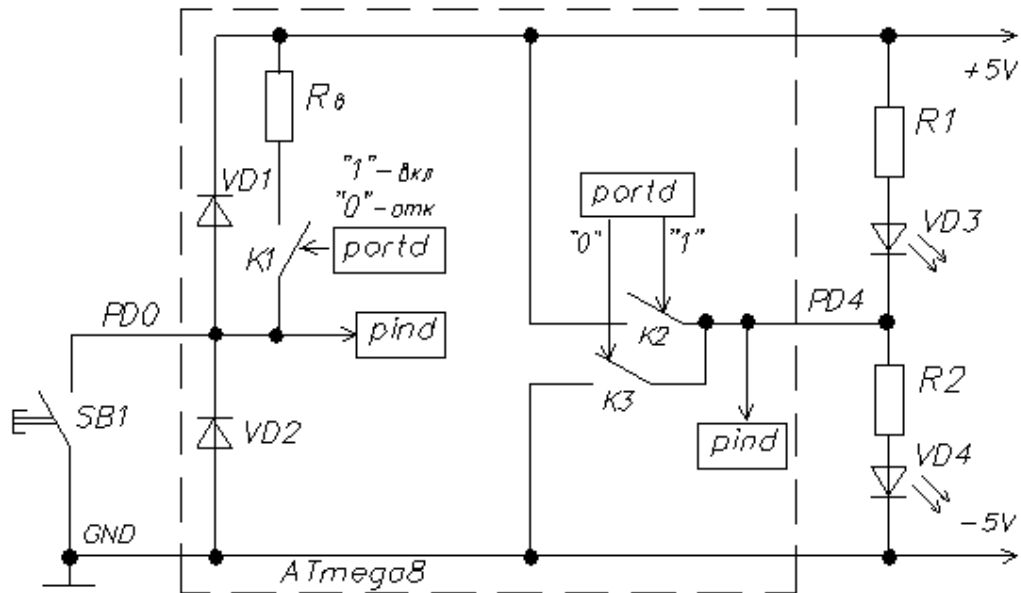


Рис. 3.20. Функціональна схема розряду PD0 у режимі вхідного порту та розряду PD4 у режимі вихідного порту

На схемі рис. 3.20 видно, що до розряду PD0 вхідного порту D підключений змикаючий контакт кнопки SB1, два діоди VD1, VD2 і резистор R_B вбудовані в корпус мікросхеми. Резистор R_B програмно реєстром керування портом portd підключається або відключається транзисторним ключем K1. При підключенні до вхідного порту контактних елементів обов'язково підключають внутрішній резистор R_B. На схемі рис. 3.20 видно, якщо кнопка SB1 не натиснута, то при підключеному R_B на вхід порту надходить +5В, тобто логічна "1". Якщо кнопка SB1 натиснута, то вхід порту надходить логічний "0". А якщо резистор не підключити, то при відпущеній кнопці SB1 на вході порту буде невизначеність, а МК потребує або "0", або "1", інакше він "зависне".

Якщо в реєстр portd програмно завантажити "1", то ключ K2 замкнутий і на виході порту сигнал логічної "1", якщо завантажити "0", то ключ K3 замкнутий і на виході порту сигнал логічного "0". З виводу сигнального реєстра pinD програмно можна зчитувати дані з виводів вхідного і вихідного порту. Реєстр напрямку порту ddrD, який програмує порт на вхід чи вихід на схемі, не показаний.

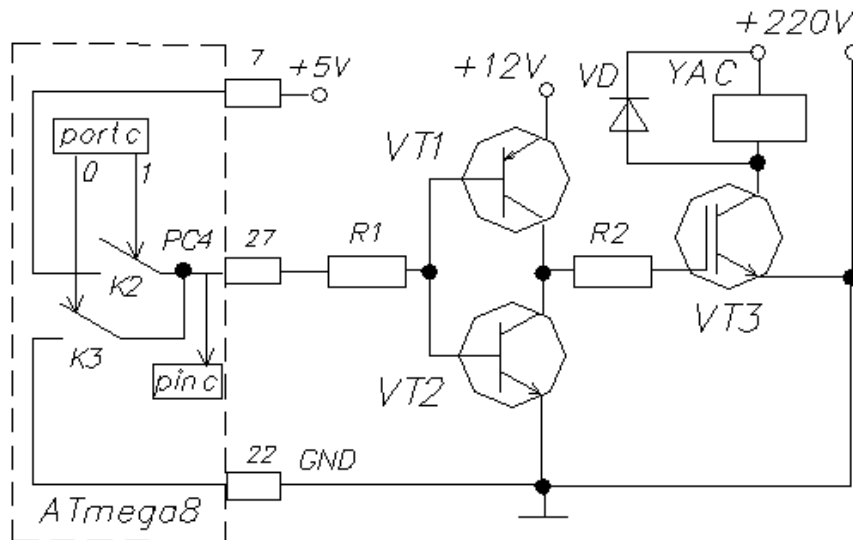


Рис. 3.22. Схема вихідного кола МК для керування котушкою постійного струму

Схема містить котушку постійного струму YAC для увімкнення вимикача (для вимкнення YAT), яка підключена до постійної напруги через IGBT-транзистор VT3. Паралельно котушці ввімкнений діод для запобігання перенапрузі від ЕРС самоіндукції при її відключенні.

Паралельно котушці ввімкнений діод для запобігання перенапрузі від ЕРС самоіндукції при її відключенні. В перехідних процесах при наростанні струму за законом Фарадея з'являється ЕРС самоіндукції, що спрямована зустрічному джерелу і гальмує наростання струму. При закриванні транзистора його опір зростає, струм зменшується і за законом Фарадея утворюється ЕРС самоіндукції, яка збігається з полярністю ЕРС джерела. Тобто до напруги джерела додається напруга від ЕРС самоіндукції, і до транзистора прикладається подвійна напруга, яка призводить до пробую. Тому увімкнюють зворотний діод, через який протікає струм від ЕРС самоіндукції. При цьому важливу роль відіграють динамічні параметри зворотного діода. Справа в тому, що діод змінює свій опір від малого до великого не миттєво, а протягом перехідного процесу.

Функціональну схему периферійного пристрою МК під назвою "аналоговий компаратор" показано на рис. 3.23.

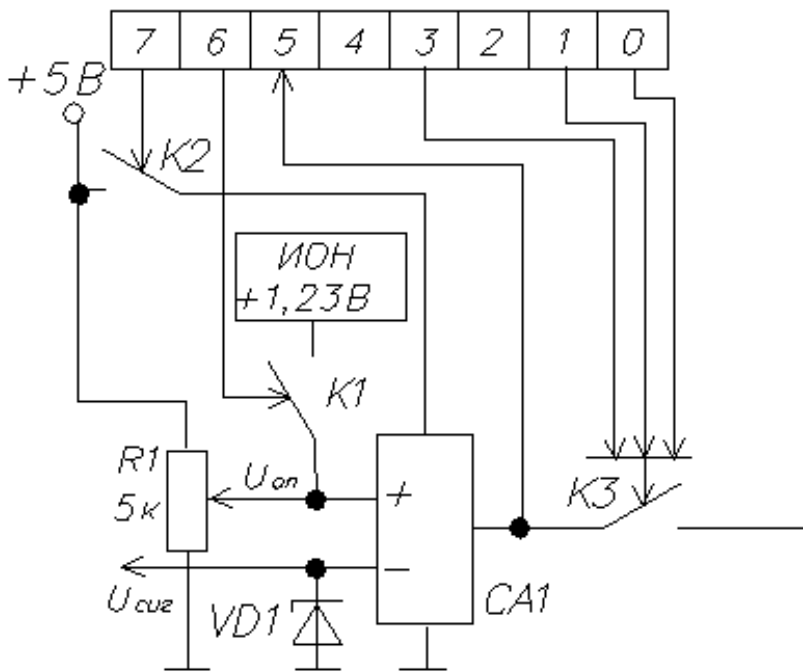


Рис. 3.23. Функціональна схема аналогового компаратора

У центрі схеми показано графічне зображення компаратора CA1 на основі операційного підсилювача, який містить два входи: сигнальний і опорний. Вхід опорного сигналу позначений знаком "плюс", а вхід сигнального – знаком "мінус". Опорний, що

призначений для завдання величини напруги порівняння, позначений літерами AIN0, сигнальний – для подачі контрольованого сигналу – літерами AIN1.

Внаслідок порівняння позитивної аналогової напруги сигнального входу з опорним на виході встановлюється стан з логічного "0" або "1". Можна подавати тільки позитивну напругу, і її амплітуда не повинна перевищувати напругу живлення 5В.

Знак "плюс" означає: якщо напруга на опорному більше, ніж на сигнальному, то на виході логічна "1". Знак "мінус" означає: якщо напруга на сигнальному більша, ніж на опорному, то на виході логічний "0".

До опорного входу підключено повзунок змінного резистора R1, який регулює опорну напругу, тобто задає напругу спрацьовування компаратора.

На сигнальний вхід подається позитивна вхідна напруга, наприклад від датчика струму, яка має бути меншою за напругу живлення. Для захисту входу від перенапруги встановлено стабілітрон VD1. На схемі показано три транзисторні ключі K1, K2, K3, які управляються розрядами регістра керування з літерним позначенням ACSR. Усі периферійні пристрої керуються своїми периферійними регістрами з літерними назвами, у яких закодовані адреси комірок оперативної пам'яті для їх зберігання. Це дає можливість у командах програми адресувати комірки регістрів не двійковим кодом, а їх ім'ям.

Програмування компаратора полягає у встановленні комбінації біт у розряди регістра ACSR для керування компаратором, призначення розрядів якого наводиться в технічному описі.

МК АТмега8 містить 10-розрядний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) з окремими виводами для подачі живлення, які зазвичай з'єднують з виводами живлення цифрової частини МК. На рис. 3.24 показано функціональну схему АЦП.

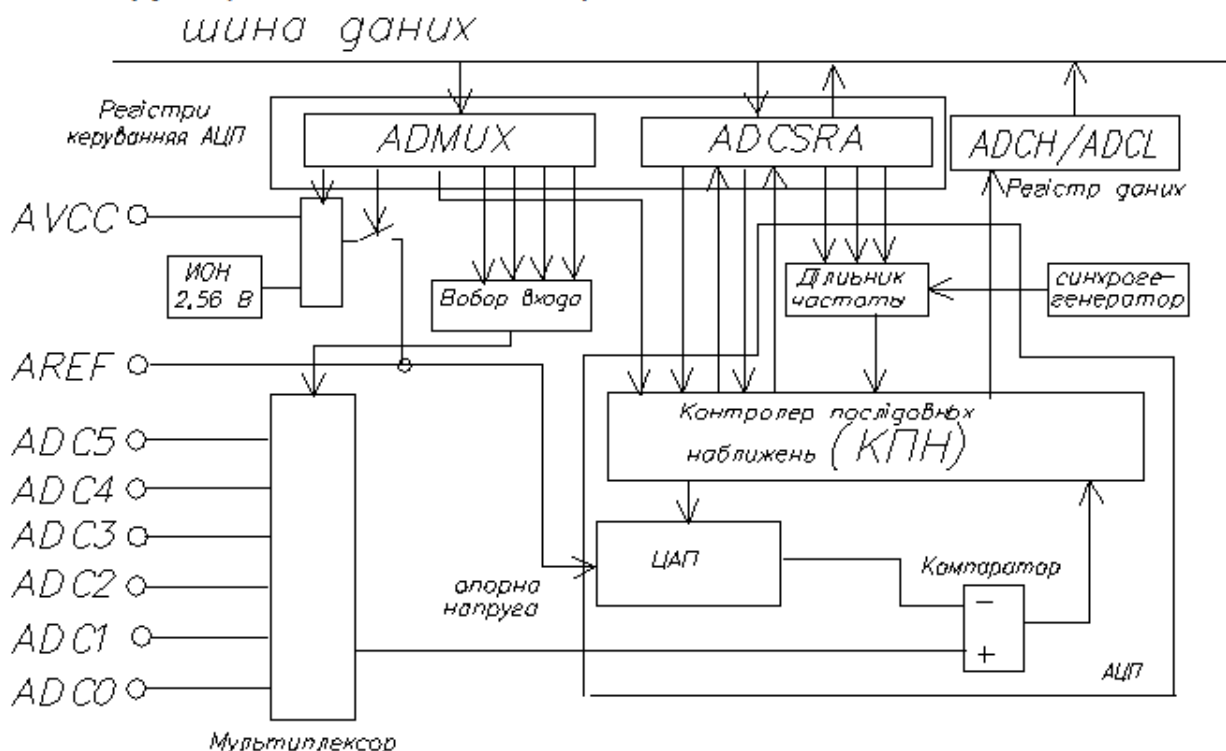


Рис. 3.24. Функціональна схема АЦП у складі МК АТмега8

У центрі схеми показаний пунктирною лінією 10-розрядний АЦП, праворуч від АЦП показаний дільник частоти та синхрогенератор МК. Дільник частоти задає частоту вимірювань вхідної напруги АЦП, тобто кількість вимірювань за 1 секунду. Час одного вимірювання АЦП займає 13 періодів частоти синхрогенератора. Для 1000 вимірювань вхідної напруги за секунду частота після дільника має бути $13 \cdot 1000 = 13$ кГц. Компанія Атмел рекомендує вибирати коефіцієнт дільника таким чином, щоб частота вимірювань АЦП була в діапазоні 50–200 кГц.

Зліва від АЦП видно, що МК АТмега8 має 6 входів для АЦ-перетворення, які переключаються мультиплексором. Мультиплексор – це транзисторний перемикач, який передає напругу від кількох входів на один вихід. Це означає, що МК може перетворити на двійковий код 6 каналів аналогової напруги. Оскільки АЦП в МК є лише один, то конструктори поставили на вході мультиплексор, який підключає АЦП до кожного з 6 виводів МК. Вище показаний блок опорної напруги, який задає максимальне значення аналогової напруги для перетворення на цифру. Зверху показані реєстри ADCSRA та ADMUX для керування АЦП та реєстри ADCH/ADCL для зчитування двійкового числа.

Програмування АЦП полягає у встановленні комбінації біт у розрядах регістрів керування. Програмування розрядів регістрів ADMUX і ADCSRA наводиться в технічному описі.

Мікроконтролери АТмега8 мають у своїй структурі три таймера / лічильника: два 8-бітних з іменами T0, T2 з максимальним рахунком $N_8=2^8-1=255$ імпульсів і один 16-бітний з іменем T1 з максимальним рахунком $N_{16}=2^{16}-1=65535$ імпульсів.

Таймери / лічильники можуть працювати в режимі підрахунку кількості зовнішніх імпульсів (лічильники) або кількості імпульсів від синхрогенератора (таймери) та в режимі широтно-імпульсного модулятора (ШИМ). Таймери працюють незалежно від процесора, а після закінчення переривають основну програму та викликають підпрограму, тобто процесору не треба опитувати стан таймерів. Кожен таймер використовує свої регістри для його керування, але керування перериваннями забезпечують загальні регістри.

Таймер / лічильник з іменем T0 рахує до максимального числа імпульсів – 255 (FF) і викликає переривання при переповненні або при досягненні завантаженого числа.

Для програмування таймера T0 використовується один керуючий регістр з іменем (адресою комірки за іменем) TCCR0, в якому задається коефіцієнт ділення частоти синхрогенератора.

Розглянемо роботу 16-розрядного таймера / лічильника з іменем T1, який використовується для формування часових затримок, підрахунку кількості зовнішніх імпульсів, Крім того, за зовнішнім сигналом на виводі захоплення ICP1 або сигналом від аналогового компаратора T1 завантажує пороховану кількість імпульсів у спеціальний 16-розрядний регістр захоплення ICR. Це дозволяє будувати схеми вимірювання періоду сигналів, а отже, їх частоту (бути вимірювачем частоти).

Для керування таймером T1 використовуються регістри:

- 1) TCCR1A, TCCR1B – два 8-бітні регістри керування таймером;
- 2) TCNT1H, TCNT1L – 16-бітний лічильний регістр, у який завантажується число порохованих імпульсів до 65535;
- 3) OCR1AH, OCR1AL, OCR1BH, OCR1BL – два 16-бітних регістри для завантаження числа імпульсів по каналу А і по каналу В при реалізації режимів ШИМ:
 - а) OCR1AH, OCR1AL – регістр уставки числа імпульсів по каналу А;
 - б) OCR1BH, OCR1BL – регістр уставки числа імпульсів по каналу В;
- 4) ICR1H, ICR1L – 16-розрядний регістр захоплення, в який завантажується число імпульсів з лічильного регістра TCNT1H для старших розрядів і TCNT1L для молодших розрядів при появі зовнішнього сигналу на лапці PB0/(ICP) або від компаратора за результатами порівняння двох аналогових сигналів.

Програмування регістрів керування таймером T1 наводиться в технічному описі.

До периферійних пристроїв МК відноситься сторожовий таймер (Watchdog Timer або WDT), який має такі основні особливості: 1) синхронізація від окремого внутрішнього генератора; 2) три режими роботи; а) генерація запиту на переривання; б) системне скидання; в) генерація переривання і скидання; 3) час спрацьовування від 16 мс до 8 с; 4) можливість апаратного увімкнення охоронного таймера (WDTON) для режиму підвищеної надійності.

Сторожовий таймер (WDT) виконаний у вигляді лічильника імпульсів, які надходять від спеціального внутрішнього генератора з частотою 128 кГц. Схема WDT формує запит на переривання або системне скидання в той момент, коли вміст лічильника досягає заданого значення.

Керування сторожовим таймером відбувається завантаженням двійкового числа в регістр керування WDTCSR, призначення розрядів якого показано в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Призначення розрядів регістра керування WDTCSR

№ розряду	Функція розряду
7, WDIF	Прапор переривання від сторожового таймера. Цей біт встановлюється в "1" при спрацьовуванні сторожового таймера, якщо вибраний режим переривань
6, WDIE	При завантаженні "1" дозволяє переривання від сторожового таймера
5, WDP3	Резерв
4, WDCE	Дозвіл зміни режимів сторожового таймера. Цей біт використовується при зміні стану бітів попереднього дільника і біта WDE. Перед тим, як скинути біт WDE і змінити стан бітів попереднього дільника, має бути встановлений розряд WDCE. Після запису в нього одиниці біт WDCE буде автоматично скинутий апаратним шляхом після закінчення чотирьох машинних циклів
3, WDE	Дозвіл режиму скидання. Прапор WDE дублює прапор WDRF у регістрі MCUSR. Це означає, що WDE завжди встановлений, якщо встановлений WDRF. Для того щоб очистити WDE, треба спочатку очистити WDRF
2, WDP2	Вибір режиму роботи попереднього дільника охоронного таймера. Вони визначають коефіцієнт ділення попереднього дільника сторожового таймера. Усі можливі коефіцієнти ділення і відповідні їм періоди часу наведені в табл. 3.3
1, WDP1	
0, WDP0	

Таблиця 3.3 – Вибір режимів дільника частоти сторожового таймера

WDP3	WDP2	WDP1	WDP0	Кількість циклів генератора до спрацювання	Приблизний час, мс
0	0	0	0	2048 циклів	16
0	0	0	1	4096	32
0	0	1	0	8192	64
0	0	1	1	16384	125
0	1	0	0	32768	250
0	1	0	1	65536	500
0	1	1	0	131072	1000
0	1	1	1	262144	2000
1	0	0	0	524288	4000
1	0	0	1	1048576	8000

Таблиця 3.4 – Вибір режиму роботи сторожового таймера

WDTON fuse	WDE	WDIE	Режим роботи сторожового таймера	Дія по завершенню контрольного часу
0	0	0	Таймер зупинений	
0	0	1	Режим переривання	Виклик переривання
0	1	0	Режим скидання	Системний скид
0	1	1	Режим переривання та скидання	Виклик переривання та перехід до режиму «системний скид»
1	x	x	Режим скидання	Системний скид

Програмування регістрів керування таймером T1 наводиться в технічному описі.

4. ОСНОВИ ПРОГРАМУВАННЯ МПЗА

4.1. Аналіз мов програмування

Термін "програма" означає перелік операцій, які буде виконувати МПЗА в нескінченному циклі опитування датчиків струму, апаратів керування вимикачами тощо. Вказівка на виконання операції називається командою, у Європі використовують термін "інструкція". МПЗА сприймає і виконує команди програми у двійкових кодах. Скласти програму у двійкових кодах дуже незручно і можна легко помилитися в "нулях" та "одиницях". Тому програмісти замість двійкових кодів використовують літерні коди, які краще запам'ятовуються і сприймаються наочніше. Літерні коди називають мнемонікою. Програма являє собою перелік мнемонік, які програма-транслятор перетворює на двійковий код. Транслятор походить від англійського слова "translate" – переклад. Звідси випливає, що мова програмування – це сукупність літерних кодів команд і програми-транслятора для їх перетворення на двійковий код.

Необхідно зазначити, що мови програмування різних фірм-виробників МК відрізняються, що обумовлено технологічними особливостями при виготовленні. Розрізняють мови програмування високого та низького рівнів. У мові низького рівня (Асемблер) кількість команд мнемоніки дорівнює кількості команд у двійковому коді. Програма на мові Асемблер вказує МК конкретні команди для виконання кожної операції та вказує адреси комірок і регістрів для завантаження результатів. У мові високого рівня (С+) кількість команд мнемоніки менше кількості команд у двійковому коді. Мова С+ вказує тільки на тип операції, яку треба виконати. Далі програма С+ сама вирішує, в які регістри записати числа та куди помістити результат. Якщо кількість команд мови програмування дорівнює кількості команд у двійковому коді, то це мова програмування низького рівня (Асемблер), якщо менше - то високого рівня (С). Для наочності це показано на простому прикладі у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняння команд для двох мов програмування

Операція додавання	Перелік команд у двійковому коді	Команди на Асемблері	Команди на С+
20+30	завантажити число 20 у регістр r16 завантажити число 30 у регістр r17 скласти вміст регістрів r16 і r17 результат зберігається в r16	1) ldi r16, 20 2) ldi r17, 30 3) add r16, r17	A=20+30

З табл. 4.1 видно, що програма мовою Асемблер вказує мікроконтролеру конкретні команди для виконання кожної операції, тобто завантажити число 20 в робочий регістр r16. Завантажити число 30

у робочий регістр r17. Потім вміст регістрів скласти. Програма мовою Сі тільки вказує на функцію, яку треба виконати. При цьому програма Сі сама вирішує, в які регістри записати числа та куди помістити результат.

Перевага мови С+: наочні та короткі програми. Недоліки: після трансляції займає пам'яті приблизно на 30 % більше, ніж Асемблер, і виконується повільніше. Тому для написання коротких програм і за обмежених розмірів пам'яті використовують Асемблер.

Для наочного уявлення про мови програмування як приклад розглянемо мову Асемблер для МК серії АТмега8 виробництва компанії "AVR", яка, до речі, дозволяє зрозуміти принцип роботи МК.

Всі програми всіх виробників починаються зі складання команд для керування програмою-транслятором, які називаються директивами для підкреслення їх належності програмі-транслятору. Звісно, що програма-транслятор не перетворює їх на двійковий код. Літерні коди директив для програми-транслятора визначають тип МК, підключають спеціальні файли з адресами комірок, визначають області пам'яті, адреси комірок пам'яті.

Синтаксис написання літерних кодів директив відрізняється від синтаксису написання літерних кодів команд, а саме перед літерним кодом директиви обов'язково ставиться крапка. Після директиви через пропуск ставиться крапка з комою і коментар з поясненням її призначення. Для МК серії АТмега8 використовується 15 директив, які наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Директиви для керування транслятором МК серії АТмега8

№	Директива	Короткий опис операції, яку виконує директива
1	.byte	Зарезервувати байт у RAM-пам'яті та EEPROM-пам'яті
2	.cseg	Записати команди в комірку FLASH-пам'яті
3	.db	Завантажити байти у FLASH-пам'ять
4	.def	Присвоїти ім'я робочому регістру
5	.device	Задати тип мікроконтролера
6	.dseg	Записати дані в комірку RAM
7	.dw	Задати постійне слово у FLASH
8	.equ	Присвоїти літерне ім'я числу
9	.eseg	Записати дані в комірку EEPROM
10	.exit	Вийти з файлу
11	.include	Підключає файл з адресами комірок з регістрами
12	.list	Створити файл листингу програми
13	.nolist	Вимкнути створення файлу листингу програми
14	.org	Адреса комірок пам'яті для завантаження команд
15	.set	Присвоїти літерне ім'я числу

Приклад програмування директив для транслятора МК серії АТмега показаний в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Програмування директив для транслятора МК серії АТмега

Директива	Коментар
.device АТмега8	;директива вказує транслятору, що програма транслюється для МК типу АТмега8. Транслятор видасть попередження, при некоректній команді і при перевищенні обсягу пам'яті
.include "m8def.inc"	;директива підключає до програми-транслятора файл з адресами всіх комірок регістрів АТмега8 для їх адресації ім'ям, а не двійковим кодом для зручності програмування
.cseg	;директива вказує транслятору завантажувати команди програми в комірки ROM-пам'яті
.org 0x0000	;директива вказує транслятору адресу 1-ї комірки ROM-пам'яті в шістнадцятковому коді для завантаження першої команди головної програми (x "екс" – літера англійська)
.eseg	;директива вказує транслятору завантажувати команди програми в комірки у EEPROM-пам'яті
.org 0x0009	;директива вказує транслятору адресу 9-ї комірки EEPROM-пам'яті
.dseg	;директива вказує транслятору завантажувати команди програми в комірки RAM-пам'яті
.org 0x0060	;директива вказує адресу 1-ї комірки у RAM-пам'яті
.def temp=R16	;директива присвоює регістру R16 ім'я "temp"

Після переліку директив ідуть перелік команд головної програми і блоки команд підпрограм для виконання окремих завдань головної програми. МК серії АТмега8 має 130 команд, кожна з яких містить три складових: 1) мнемоніка – літерний код операції; 2) операнди – дані для виконання операції; 3) коментарі програміста для пояснення сенсу команди. Мнемоніку можна писати великими або малими літерами, оскільки Асемблер не відрізняє регістри літер. Команди бувають арифметичні, логічні, передачі даних, переходу на мітку іншої команди тощо.

У всіх програмах обов'язково використовується команда завантаження даних в робочі регістри МК, приклад варіантів якої наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Команди завантаження робочих регістрів

Мнемоніка команди з операндами	Коментарі до команди
ldi r16, 0b11111111	;команда завантаження в регістр r16 числа 255 у двійковому кодi
ldi r16,0xff	;те саме у шістнадцятковому кодi
ldi r16,255	;те саме у десятковому кодi

Мнемоніка команди ldi походить від англійського слово "loading", що перекладається як "завантажити". Транслятор Асемблера перетворює цю мнемоніку на двійковий код, у якому закодовано операцію завантаження робочого регістра. Далі йдуть операнди: адреса комірки робочого регістра через його ім'я r16 та дані, які треба завантажити. Адресація комірки робочого регістра виконується ім'ям r16, а не двійковим кодом, оскільки директива .include "m8def.inc" перетворює ім'я регістра на адресу комірки у двійковому кодi, де він перебуває. Далі йдуть дані у двійковому кодi для завантаження: двійковий код числа позначається символами 0b, тобто англійська "бі". Шістнадцятковий код позначається 0x, тобто "нуль ікс", не українська літера "х", а саме англійська "екс". Числа можна писати в будь-якому кодi, Асемблер при трансляції перетворює їх на двійковий код. Далі йде крапка з комою і текст коментаря від програміста про сенс команди.

МК АТмега8 має 32 робочі регістри, але адресація починається з регістра r16, оскільки в МК АТмега8 робочі регістри з адресами r0 по r15 не можуть використовуватися в командах: завантаження ldi, віднімання sbci, subi, порівняння cpi та в логічних командах andi, ori. Це треба пам'ятати, інакше програма не буде працювати. Робочі регістри з r16 по r31 можуть використовуватися у всіх командах, тому щоб бути впевненим у всіх програмах, використовують робочі регістри, починаючи з r16.

Командою ldi можна завантажувати лише робочі регістри. Всі інші регістри завантажуються двома командами: перша завантажує дані у робочий регістр, друга пересилає дані з нього в інший регістр, як показано в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Команди завантаження неробочих регістрів

Команди	Коментар до команди
ldi r18, 255	;команда завантаження в регістр r18 числа 255
out ddrb, r18	;команда пересилання даних з r18 в периферійний регістр ddrb
in r18, pind	;пересилання даних з периферійного регістра pind в робочий регістр r18

З англійської слово out перекладається як "вийти", тобто дані з робочого регістра r18 виходять і завантажуються в регістр ddrb, отже, це не завантаження, а пересилання даних із робочого регістра до іншого. Зчитувати дані з неробочих регістрів безпосередньо не можна, лише через робочий регістр командою in пересиланням даних з периферійного регістра rind в робочий регістр r18 для подальшої обробки.

В Асемблері передбачені команди для завантаження окремих розрядів робочих та периферійних регістрів наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Команди завантаження окремих розрядів робочих і периферійних регістрів

Найменування	Коментар до команди
sbr r16,3	;команда завантаження "1" в 3-й розряд регістра r16
cbr r16,5	;команда завантаження "0" в 5-й розряд регістра r16
cbr portc,5	;завантаження "0" в 5-й розряд периферійного регістра portc
sbr ddrb, 2	;завантаження "1" у 2-й розряд периферійного регістра ddrb
ser r16	;команда завантаження "одиниць" у всі розряди r16
clr r16	;команда завантаження "нулів" у всі розряди r16

Тут наведені окремі директиви і команди, інші будуть розглянуті нижче у міру їх використання.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. У чому полягає призначення директив?
2. У чому полягає призначення директиви ".include "m8def.inc"?"
3. Пояснити зміст команди завантаження ldi r16, 0b11111111.

4.2. Методика складання алгоритмів програм

Написання програми починається зі складання алгоритму, тобто послідовності виконання операцій програми у вигляді тексту або блок-схеми, як показано на рис. 4.1.

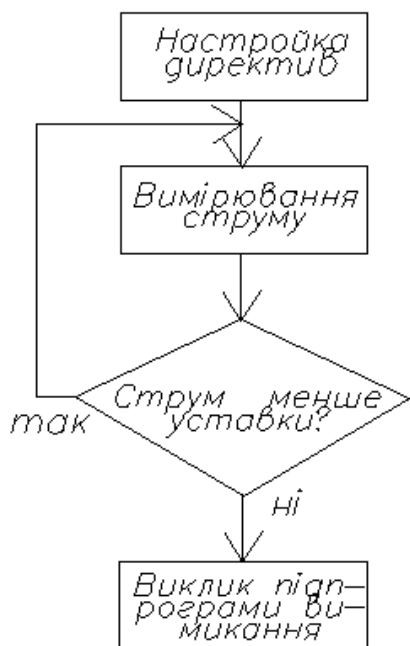


Рис. 4.1. Приклад алгоритму програми струмового захисту

Перший блок алгоритму – складання директив для керування програмою-транслятором. Далі ідуть блок команд основної програми і блоки підпрограм для виконання окремих завдань основної програми.

Після директив пишуть команди головної програми для виконання основного завдання. Головна програма закінчується командою повернення в початок або командою зупинки.

Після команд головної програми складають команди підпрограм для виконання окремих завдань. Кожна підпрограма має мітку, після якої пишуться команди. Останньою командою

підпрограми є команда виходу в головну програму, після виконання якої в програмний лічильник завантажується із стека адреса комірки з наступною командою головної програми.

Підпрограми викликаються двома способами: 1) командою виклику в головній програмі; 2) командою при спрацюванні зовнішніх пристроїв або периферійних пристроїв МК. Такий спосіб виклику називається перериванням головної програми. Розглянемо перший спосіб виклику підпрограм.

Всі операції в МК проходять через робочі регістри, які використовуються як в головній програмі, так і в підпрограмах. Під час виконання підпрограми робочі регістри завантажуються новими даними, які після виходу з підпрограми перейдуть в головну програму або в інші підпрограми і виникне збій головної програми. Щоб такого не сталося, треба обов'язково завантажувати поточні дані робочих регістрів з головної програми у стекову пам'ять і далі використовувати їх у підпрограмі.

Правила складання підпрограм: 1) переслати з головної програми у стекову пам'ять дані робочих та інших регістрів; 2) записати команди підпрограми; 3) після виконання команд підпрограми переслати зі стека дані робочих та інших регістрів до головної програми; 4) вийти з підпрограми командою повернення у головну програму.

Для виклику підпрограм в головній програмі МК використовується команда виклику, як показано в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Команда виклику підпрограми

Команда	Коментарі команд
rcall start	У головній програмі викликається підпрограма з міткою "start"

Мнемоніка rcall – це літерний код операції виклику підпрограми, що походить від англійського слова call і перекладається як "викликати", start – це мітка як адреса комірки в ROM-пам'яті МК.

При виконанні команди виклику підпрограми МК виконує такі операції: 1) завантажує адресу наступної команди головної програми з лічильника команд в комірку стека на адресу з покажчика стека; 2) завантажує до програмного лічильника адреси команд підпрограми; 3) після виконання підпрограми пересилає зі стека адресу наступної команди головної програми до програмного лічильника.

У його комірки, розташованій у кінці RAM-пам'яті, на час виконання підпрограми зберігається наступна команда з головної програми та адреса комірки в постійному запам'ятовуючому пристрої. Основна перевага стека полягає в тому, що під час завантаження даних немає потреби адресувати його комірки. Дані в стек завантажуються подібно до складання аркушів паперу в стопку, з якої першим беруть аркуш, покладений останнім. Такий прийом пришвидшує виконання програми.

Переваги стекової пам'яті такі: 1) простота при завантаженні, оскільки не треба вказувати адреси комірки, а просто вказати адресу останньої комірки RAM-пам'яті і далі завантажувати їх по черзі; 2) простота при зчитуванні, тобто дані з комірок зчитуються по черзі у зворотному порядку. Виходячи з цього стек називають пам'яттю з послідовним доступом.

Комірки стека розташовані в кінці комірок RAM-пам'яті. Адреса останньої комірки 0x00FF записана в шістнадцятиковому кодї, який у десятковому кодї означає число 128, а адреса 1-ї комірки RAM-пам'яті починається не з "нуля", а з номера 0060. Молодші адреси регістрової пам'яті використовуються для адресації робочих і периферійних регістрів МК. У таких випадках кажуть, що комірки знаходяться у спільному адресному просторі. Це як три будинки на вулиці, в яких нумерація квартир починається з першого будинку та продовжується у двох інших будинках.

Адресу останньої комірки регістрової пам'яті називають дном стека. Комірку з молодшою адресою, в яку записані останні дані з головної програми, називають вершиною стека. При завантаженні даних у стек адреси комірок стека зменшуються. А при завантаженні даних в комірки RAM-пам'яті їх адреси комірок збільшуються. Якщо ці адреси "зустрінуться", то головна програма зупиниться, тому програміст повинен контролювати, щоб цього не трапилось.

Програмування стека означає завантаження в регістр "Показчик стека" в схемі мікропроцесора адреси останньої комірки RAM-пам'яті. Адреси комірок у програмному лічильнику 16-розрядні, а комірки стек-пам'яті – 8-розрядні, тому для завантаження 16-розрядної адреси з програмного лічильника в стек треба використовувати дві його комірки, в одну завантажити старший байт адреси наступної команди головної програми, а в іншу – молодший.

Написання головної програми, що містить підпрограму, обов'язково починається з завантаження в показчик стека адреси останньої комірки стек-пам'яті, тому у першу комірку ROM-пам'яті з нульовою адресою завантажуються команда переходу на мітку програмування стека, як показано в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Початкові команди головної програми з викликом підпрограм командою

Код команди	Коментар до команди
.device ATmega8	;директива вказує програмі-транслятору, що програма транслюється для МК серії ATmega8
.include "m8def.inc"	;директива підключає до транслятора файл з адресами всіх регістрів ATmega8 для їх адресації ім'ям
.cseg	;директива на завантаження програми у ROM-пам'ять
.org 0x0000	;директива вказує адресу 1-ї комірки ROM-пам'яті
rjmp start	;у 1-шу комірку ROM-пам'яті з адресою 0x0000 завантажена команда переходу на мітку start
start:	;мітка команди для програмування стека
ldi r16, high (RAMEND)	;завантаження в робочий регістр r16 адреси останньої комірки стекової пам'яті
out SPH,r16	;пересилання адреси останньої комірки стекової пам'яті в старший регістр показчика стека
ldi r16, low(RAMEND)	;завантаження в регістр r16 адреси передостанньої комірки стекової пам'яті
out SPL, r16	;пересилання адреси передостанньої комірки стекової пам'яті в молодший регістр показчика стека

Мнемоніка команди rjmp від англійського слова "jump", що перекладається як "стрибок" на мітку головної програми. Тобто в програмний лічильник завантажуються адреса першої комірки в ROM-пам'яті з міткою start. Мітки використовуються як наказ для безумовного переходу або переходу за умовою.

Далі за програмою ідуть команди пересилання адреси останніх двох комірок стека в 16-бітну комірку покажчика стека. Адреса останніх двох комірок RAM-пам'яті вказана не 16-бітним кодом, а завдяки директиві `.include "m8def.inc"` мнемонікою "RAMEND", яка складається з двох слів END і RAM, тобто END – це кінець, а RAM – це пам'ять вільного доступу. Виходить, що "RAMEND" означає кінець пам'яті RAM. Це зроблено для зручності програмістів. Фірма Атмел для всіх своїх МК використовує цю мнемоніку, а підключення до програми файлу "m8def.inc" перетворює цю мнемоніку на адреси останніх двох комірок RAM-пам'яті. Далі при завантаженні в комірки стека даних їх адреси завантажуються в покажчик стека.

Необхідно бути уважним при використанні стека. Якщо підпрограм багато, то адреси комірок вершини стека зменшуватимуться, а адреси комірок із проміжними даними в RAM-пам'яті зростатимуть. Може статися так, що дані для комірок стека накладуться на дані комірок RAM-пам'яті або навпаки. Це називається "зрив стека": головна програма зупиниться і знайти причину зупинки буде важко. Тому при написанні програм необхідно стежити, щоб адреси комірок стека не досягли адреси комірок RAM-пам'яті з проміжними даними.

Необхідно зауважити, що всі операції у МК проходять через робочі регістри. Одні й ті ж самі робочі регістри можуть використовуватися і в головній програмі, і у підпрограмах. Під час виконання підпрограми робочі регістри завантажуються новими даними. І ці дані після виходу з підпрограми перейдуть в головну програму, і програма зупиниться. Щоб цього не сталося, треба зберегти дані робочих регістрів з головної програми в комірках стека і тільки потім використовувати їх у підпрограмі. Для цього на початку підпрограми пишуть команду завантаження даних із робочих регістрів головної програми у комірки стека. Також має бути збережено у стеку дані статусного регістра SREG, у якому зберігаються результати логічних операцій.

Тому складання команд підпрограми починається із команди завантаження даних з робочих регістрів головної програми в стек, які після виконання підпрограми необхідно переслати в головну програму. Приклад складання підпрограми `delay` наведено в табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Приклад складання команд підпрограми

Код команди з операндами	Коментар до команди
delay:	;мітка підпрограми для посилання
push r16	;пересилання даних r16 з головної програми у комірку стека
in r17, SREG	;пересилання даних статусного регістра SREG в регістр R17
далі йдуть команди підпрограми, після виконання яких дані робочих регістрів пересилаються в головну програму у зворотному порядку "останній зайшов – перший вийшов"	
pop r17	;перша команда вивантажує зі стеку дані регістра r17
out SREG, r17	;друга команда пересилає ці дані в регістр SREG
pop r16	;третя команда завантажує дані з регістра r16 в основну програму
ret	;вихід з підпрограми означає пересилання зі стека адреси наступної команди головної програми до програмного лічильника

При роботі зі стеком виконується принцип: першим зайшов у стек – останнім вийшов зі стека. Перша команда завантажила у стек дані регістра r16 з головної програми, друга команда завантажила у стек дані регістра r17 із даними статусного регістра. Потім виконуються команди підпрограми. Після виконання підпрограми першими зі стека вивантажуються дані регістра r17 і дані статусного регістра, другим зі стека витягується регістр r16 і третім за командою ret зі стека витягується адреса наступної команди головної програми, що завантажується в програмний лічильник. Мнемоніка команди ret походить від англійського слова return, що перекладається як «повертати».

Виклик підпрограм командами переривання відбувається при зовнішніх подіях, наприклад, натискання кнопки увімкнення і при спрацюванні периферійних пристроїв МК. Такий спосіб виклику підпрограм називається перериванням. Периферійні пристрої працюють незалежно від мікропроцесора, але при їх спрацюванні хід виконання головної програми або підпрограми переривається та виконується підпрограма, що відповідає цьому перериванню від периферійного пристрою.

В МК АТмега8 передбачено 19 переривань, перелічених у табл. 4.10, під які у ROM-пам'яті зарезервовано перші 19 комірок. У ці комірки завантажують команди на перехід на мітку підпрограми. Якщо комірка не використовується, то в неї завантажують команду виходу з переривання.

Таблиця 4.10 – Таблиця переривань для МК АТмега8

№ події	Адреса комірки	Коментарі
1	0x0000	Перехід на цю адресу при скиданні або при подачі живлення
2	0x0001	Перехід на цю адресу при зміні логічного рівня на 4-му виводі мікросхеми (зовнішнє переривання 1)
3	0x0002	На 5-му виводі аналогічно зовнішнє переривання 2
4	0x0003	Перехід на цю адресу при спрацюванні таймера T2 при рівності числа імпульсів регістрів TCNT2 і OCR2
5	0x0004	Перехід на цю адресу при спрацюванні таймера T2 при перевищенні заданого числа імпульсів регістра TCNT2
6	0x0005	Перехід на цю адресу при появі на 11-му виводі мікросхеми "1", і дані з регістра TCNT1 завантажуються в регістр ICP1
7	0x0006	Спрацював таймер T1 за рівності числа імпульсів по каналу "А" збігу даних регістрів TCNT1 і OCR1A
8	0x0007	Спрацював таймер T1 за рівності числа імпульсів по каналу "В" збігу даних регістрів TCNT1 і OCR1B
9	0x0008	Спрацював таймер T1 при перевищенні числа імпульсів заданому числу. Переповнення регістра TCNT1
10	0x0009	Спрацював таймер T0 при перевищенні числа імпульсів заданому числу. Переповнення регістра TCNT0
11	0x000A	Завершення завантаження FLASH-пам'яті каналом SPI. Переривання від модуля SPI
12	0x000B	Завершення прийому даних від комп'ютера. Отримання байта по каналу USART
13	0x000C	Регістр даних UDR для передачі або прийому вільний. Вивантаження даних регістра UDR в канал USART
14	0x000D	Завершення передачі на комп'ютер. Передача байта по USART
15	0x000E	Завершення аналого-цифрового перетворення. Переривання від АЦП
16	0x000F	Відбувається запис даних у EEPROM. Завершення запису в EEPROM
17	0x0010	Спрацював аналоговий компаратор. Переривання від компаратора
18	0x0011	Спрацював двопровідний приймач-передавач TWI. Переривання від модуля TWI
19	0x0012	Завершилося завантаження. Завершення виконання <code>spt</code>

Якщо в головній програмі використовується переривання, то в закріплені за ними комірки завантажують команду виходу з переривання "reti". Мнемоніка команди reti походить від двох англійських слів "return interrupt", які перекладаються, як "повернення" та "переривання".

Таким чином, при появі команди переривання мікропроцесор: 1) закінчує виконання поточної команди; 2) завантажує в стек адресу наступної команди підпрограми або головної програми, 3) завантажує в програмний лічильник адресу комірки з ROM-пам'яті, закріпленої за даним перериванням, в яку попередньо завантажена команда "rjmp metka" для переходу на мітку підпрограми від переривання.

За кожним перериванням у ROM-пам'яті закріплена комірка, в яку треба завантажити команду "rjmp" для переходу на мітку підпрограми переривання. Мнемоніка команди "rjmp" походить від англійського слова "jump", що перекладається як "стрибок". Тобто при спрацьовуванні переривання програма або підпрограма переривається, і в програмний лічильник завантажується адреса комірки з ROM-пам'яті, в якій повинна бути завантажена команда переходу на мітку підпрограми, яка відповідає цьому перериванню.

Після спрацювання переривань програмний лічильник відкриває комірку з таблиці переривань, де повинна бути команда переходу на мітку підпрограми. Тому команди головної програми починають з комірки № 20. А в попередніх комірках завантажують команду виходу з переривання "reti".

Список переривань називають таблицею переривань, що складається з 19 рядків. У кожному рядку вказаний номер переривання, адреса комірки FLASH-пам'яті від 1-ї до 19-ї для завантаження команди "rjmp" та опис переривання. Якщо переривання у програмі не використовується, то в закріплену за ним комірку завантажують команду виходу з переривання "reti".

При використанні в програмі переривань в 1-шу комірку з нульовою адресою завжди завантажують команду переходу на мітку головної програми, як показано в табл. 4.11. Після таблиці переривань ідуть команди головної програми. У цьому випадку це команди для програмування стека. Після програмування стека повинна йти команда на дозвіл всіх переривань, 7-й розряд статусного регістра SREG дозволяє або забороняє переривання.

Якщо під час роботи МК виникає одночасно два і більше переривань, то черговість виклику підпрограм визначається адресою комірки. Чим менша адреса у таблиці переривань, тим вищий пріоритет. Тобто першою викликається підпрограма, переривання якої має меншу адресу комірки в таблиці переривань. Після виходу з першої підпрограми відбувається виклик іншої підпрограми від іншого переривання згідно з пріоритетом. Під час виконання підпрограми від будь-якого переривання в 7-й розряд статусного регістра SREG апаратно завантажується "нуль", тобто всі інші переривання в цей час заборонені. При виході з підпрограми переривання

7-й розряд апаратно завантажується "1", тобто, всі переривання знову дозволяються.

Таблиця 4.11 – Початкові команди головної програми з викликом підпрограм перериваннями

Код команди	Коментар до команди
.device ATmega8	;директива вказує програмі-транслятору, що програма транслюється для МК серії ATmega8
.include "m8def.inc"	;директива підключає до транслятора файл з адресами всіх регістрів ATmega8 для їх адресації регістрів ім'ям
.cseg	;директива на завантаження у FLASH-пам'ять
.org 0x0000	;директива вказує адресу 1-ї комірки FLASH
rjmp start	У 1-шу комірку ROM-пам'яті завантажена команда переходу на мітку start
.org 0x0001;	;директива вказує адресу 2-ї комірки FLASH
rjmp alfa	У 2-гу комірку ROM-пам'яті завантажена команда переходу на підпрограму з міткою alfa зовнішнього переривання
.org 0x0002	;адреса 3-ї комірки, закріпленої за перериванням по таймеру
rjmp 1234	;у комірку 0x0002 завантажена команда переходу на підпрограму з міткою 1234 при спрацюванні переривання
reti	;у 4-ту комірку і до 19 завантажується команда виходу з переривання, оскільки вони не використовуються
.org 0x0013	;адреса 20-ї комірки, куди завантажена мітка команди
start:	;для програмування стека
ldi r16, high (RAMEND)	;завантаження в r16 адреси останньої комірки RAM
out SPH,r16	;пересилання адреси в старший регістр покажчика стека
ldi r16, low(RAMEND)	;завантаження адреси передостанньої комірки RAM
out SPL, r16	;пересилання адреси в молодший регістр покажчика стека
sei	;команда означає дозвіл переривань (завантаження "1" у 7-й розряд регістра SREG); команда cлі означає заборону переривань (завантаження "0" у 7-й розряд)

Якщо виконується підпрограма від першого переривання, а в цей час відбулося друге переривання, а перша підпрограма може чекати, то в першій підпрограмі треба вставити команду дозволу переривань sei. Тоді перша підпрограма переривається, адреса повернення зберігається в стеку, і викликається підпрограма другого переривання.

Призначення розрядів статусного регістра наведено в табл. 4.12.

Таблиця 4.12 – Призначення розрядів статусного регістра

№ розряду	Літерне позначення	Призначення
0	C	Прапор перенесення: встановлюється в "1", якщо в результаті операції стався вихід за межі байта, тобто результат став більшим за 255
1	Z	Прапор нуля: встановлюється в "1", якщо при відніманні вийшов нуль
2	N	Прапор негативного значення: встановлюється в "1", якщо при відніманні вийшло негативне число
3	V	Прапор переповнення: встановлюється в "1" при переповненні додаткового коду
4	S	Прапор знака: встановлюється в "1", якщо під час підсумовування чисел зі знаком виник негативний результат
5	H	Прапор напівперенесення: встановлюється в "1", якщо відбулася позика біта зі старшої половини байта до молодшої
6	T	Прапор пересилання: використовується командами BLD і BST
7	I	Прапор дозволу / заборони загального переривання

5. МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ СТРУМОВИЙ ЗАХИСТ

5.1. Трансформатори струму

Конструкція електромагнітного ТС (рис. 5.1) містить первинну обмотку 1 з малою кількістю витків W_1 з проводу великого перерізу, магнітне осердя 2 з електротехнічної сталі та вторинну обмотку 3 з великою кількістю витків W_2 з проводу малого перерізу.

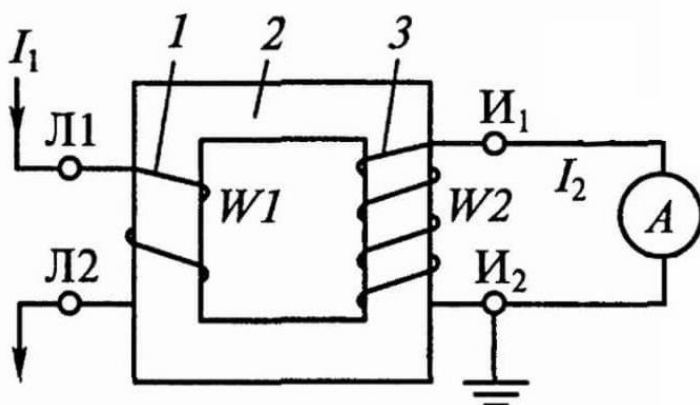


Рис. 5.1. Будова трансформатора струму

Через первинну обмотку ТС протікає струм навантаження, який створює в осерді магнітне поле, яке моделюється сукупністю магнітних ліній.

Залежність параметрів магнітних ліній від сили струму і кількості витків котушки визначив французький фізик Андре-Анрі Ампер у 1826 році. В українській літературі цю залежність називають законом повного струму, який математично описує явище перетворення електричного струму в магнітне поле і записується алгебраїчно формулою (є інтегральна):

$$\sum H \cdot l = I \cdot W, \quad (5.1)$$

де I, W – сила струму і кількість витків котушки (ампер-витки);

H, l – напруженість і довжина магнітних ліній.

Через сукупність магнітних ліній розраховують параметри магнітного поля: магнітний потік і магнітну індукцію. Магнітний потік Φ – це кількість магнітних ліній через поверхню матеріалу обмеженою площею S . Магнітна індукція B – це кількість магнітних ліній на одиницю площі:

$$B = \Phi / S = \mu \cdot \mu_0 \cdot H, \quad (5.2)$$

де μ_0 – абсолютна магнітна проникність повітря, Гн/м;

μ – відносна магнітна проникність інших матеріалів відносно повітря;

H – напруженість середньої магнітної лінії поля, А/м.

Величина магнітного потоку, створеного діючим значенням змінного струму в первинній котушці ТС, на основі виразів (5.1) і (5.2) дорівнює:

$$\Phi = \mu \cdot \mu_0 \cdot S \frac{I \cdot W}{\sum l} = \frac{I \cdot W}{R_m}, \quad (5.3)$$

де IW – магніторушійна сила (ампер-витки);

R_m – магнітний опір матеріалу проникненню магнітних ліній, величина, обернена магнітній провідності матеріалу.

Енергія магнітного поля, створена діючим значенням змінного струму в первинній котушці ТС, дорівнює:

$$W = \int \frac{B \cdot H \cdot V \cdot dV}{2} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot H^2 \cdot S_k \cdot h_k}{2} = \mu \cdot \mu_0 \frac{W^2 \cdot S_k}{h_k} \cdot \frac{I^2}{2} = \frac{L \cdot I^2}{2}, \quad (5.4)$$

де V – об'єм сталі осердя ТС, $V = S_k h_k$;

S_k, h_k – переріз і висота первинної котушки;

L – індуктивність котушки – коефіцієнт пропорційності між струмом котушки і створюваним магнітним потоком, яка визначається за формулою, Гн:

$$L = \mu \mu_0 \frac{W^2 S_k}{h_k}. \quad (5.5)$$

Синусоїдний струм через первинну обмотку трансформатора струму створює синусоїдний магнітний потік, діюче значення якого, згідно з законом повного струму, прямопропорційне добутку кількості витків на діюче значення струму. Синусоїдний магнітний потік протікає через поперечний переріз магнітного осердя, яке складається з окремих пластин із електротехнічної сталі. Силкові лінії синусоїдного магнітного потоку перетинають витки первинної і вторинної обмоток та індукують в них електрорушійні сили, миттєві значення яких прямопропорційні їх індуктивностям за виразом (5.5) і дорівнюють:

$$e_1 = W_1 \frac{d\Phi}{dt} = L_1 \frac{di}{dt}; \quad e_2 = W_2 \frac{d\Phi}{dt} = L_2 \frac{di}{dt}. \quad (5.6)$$

Оскільки електрорушійні сили створюються спільним магнітним потоком, то їх напрямки визначаються за правилом Ленца, тобто напрямки електрорушійних сил, індукованих змінним у часі магнітним потоком завжди спрямовані проти причини, що їх викликала. Отже, у первинній обмотці електрорушійна сила спрямована зустрічно електрорушійній силі джерела електроенергії і струму, що протікає через неї.

При синусоїдному струмі первинна котушка створює синусоїдний магнітний потік Φ і синусоїдну ЕРС самоіндукції:

$$e = W \frac{d\Phi}{dt} = W \frac{d(\Phi_M \sin \omega t)}{dt} = W \Phi_M \omega \cos \omega t = E_M \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}). \quad (5.7)$$

При цьому приймається, що синусоїди магнітного потоку і струму збігаються за фазою, хоча насправді є фазове відставання. З формули (5.7) видно, що синусоїда ЕРС самоіндукції котушки відстає по фазі від магнітного потоку, а отже, від струму на електричний кут 90° .

Діюче значення ЕРС самоіндукції у первинній обмотці ТС згідно з (5.7) дорівнює $E_1 = E_M / 1,41 = 4,44 f \Phi_1 W_1$, де $f = 50$ Гц – частота напруги електромережі. Діюче значення ЕРС взаємоіндукції у вторинній обмотці ТС дорівнює $E_2 = 4,44 f \Phi_1 W_2$. ЕРС взаємоіндукції вторинної обмотки створює

струм I_2 і магнітний потік Φ_2 , який відповідно до закону Ленца спрямований зустрічно Φ_1 , тобто віднімається від нього. Їхня різниця називається потоком Φ_0 намагнічування. Рівнянню магнітних потоків відповідає рівняння магніторушійних сил (МРС) обмоток ТС:

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_0, \quad I_1 W_1 - I_2 W_2 = I_0 W_1, \quad (5.8)$$

де Φ_0, I_0 – магнітний потік намагнічування і струм намагнічування ТС як складова первинного струму.

З рівняння (5.8) отримуємо величину вторинного струму ТС:

$$I_2 = \frac{(I_1 - I_0) W_1}{W_2} = \frac{I_1 - I_0}{K_{mc}}, \quad (5.9)$$

де $K_{mc} = W_2 / W_1$ – коефіцієнт трансформації ТС по виткам, який повинен бути більше одиниці, оскільки $W_2 > W_1$.

З виразу (5.9) випливає, при збільшенні вторинного опору (а отже, зменшенні вторинного струму) збільшується магнітний потік намагнічування, який може досягати величини насиченості (рис. 4.1).

Важливо зазначити, що струм у первинній обмотці ТС визначається лише струмом навантаження лінії і не залежить від струму й опору навантаження вторинної обмотки. При цьому вторинний струм не може перевищити величину $I_2 = I_1 / K_{TC}$. При вимірюванні струму ТС повинна виконуватися рівність $I_2 = I_1 / K_{TC}$, проте з (5.9) випливає, що вторинний струм менше на величину I_0 / K_{TC} , тобто з'являється похибка вимірювання струму $I_2 < I_1 / K_{TC}$. Тоді коефіцієнт трансформації за витками не дорівнює коефіцієнту трансформації за струмом:

$$K_{mcw} = \frac{W_2}{W_1} \neq K_{mci} = \frac{I_1}{I_2}. \quad (5.10)$$

Для зменшення похибки згідно з (5.9) треба зменшити струм намагнічування за рахунок максимально можливого вторинного струму I_2 , тобто мінімально можливого опору навантаження. Оскільки підключені до вторинної обмотки прилади мають опір, то для компенсації його впливу на точність вимірювання при виготовленні ТС збільшують кількість витків вторинної обмотки. При цьому збільшується ЕРС взаємоіндукції і вторинний струм.

Робота ТС у режимі неробочого ходу з розімкненою вторинною обмоткою не допускається, оскільки ТС становиться підвищувальним за напругою, яка зростає до величин, небезпечних для ізоляції вторинної обмотки і небезпечною для обслуговуючого персоналу.

Для уніфікації ТС використовується стандартна шкала вторинних номінальних струмів: 5 А і 1 А, тобто, ТС мають різний первинний номінальний струм 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 750, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 3000 А, – але всі мають однаковий номінальний вторинний струм. Звідси їхній коефіцієнт трансформації дорівнює $K_{ma} = I_{1ном} / I_{2ном} = I_{1ном} / 5 \text{ А}$.

В енергосистемах України в електроустановках напругою 330 кВ та вище зазвичай використовують ТС з номінальним вторинним струмом 1 А, що дозволяє використовувати провідники меншого перерізу.

При коротких замиканнях струм первинної обмотки ТС зростає у рази, і магнітний потік намагнічування може досягти величини насичення і збільшити похибку вимірювання. Тому необхідно перевіряти похибку вимірювання струму в режимах КЗ, яка не повинна перевищувати 10 %. Для цього заводи-виробники в технічних паспортах на ТС наводять так звані графіки граничної кратності (ГГК), які являють собою залежність допустимого опору навантаження вторинної обмотки від кратності первинного струму, як показано на рис. 5.2.

За ГГК визначають максимальний допустимий опір навантаження вторинної обмотки ТС при розрахунковій кратності струму КЗ відносно номінального струму первинної обмотки. Якщо отримане розрахункове значення опору навантаження менше від реального, то похибка ТС струму не перевищує 10 %.

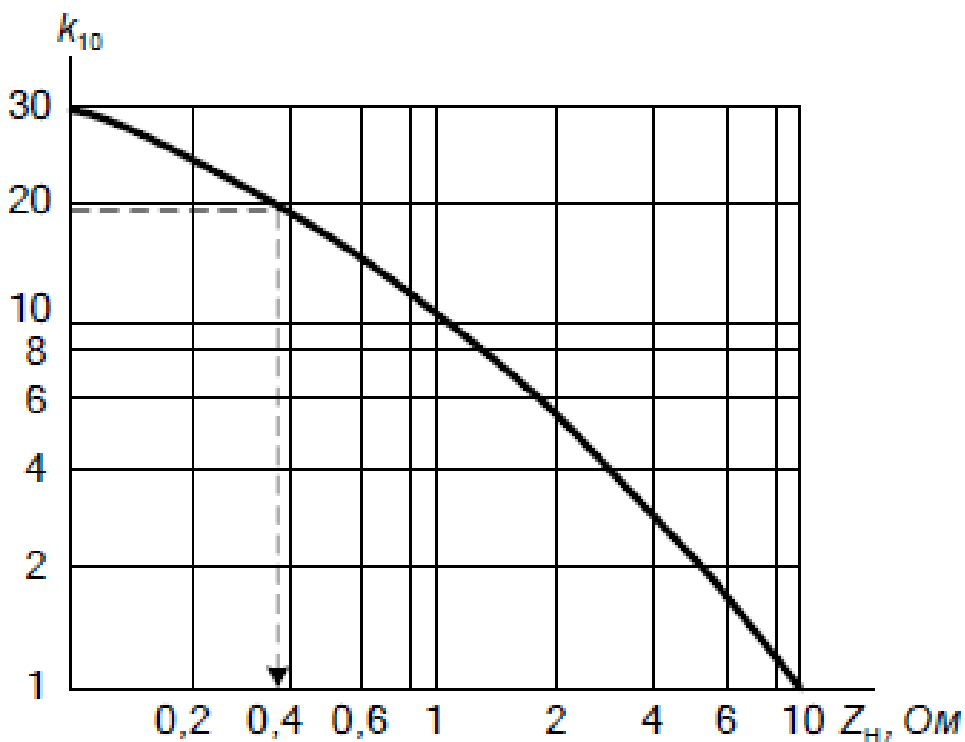


Рис. 5.2. Графік граничної кратності трансформатора струму серії ТПЛ-10 залежно від опору навантаження вторинної обмотки

Складемо схему датчика струму для мікропроцесорного захисту кабельної лінії напругою 10 кВ (рис. 5.3).

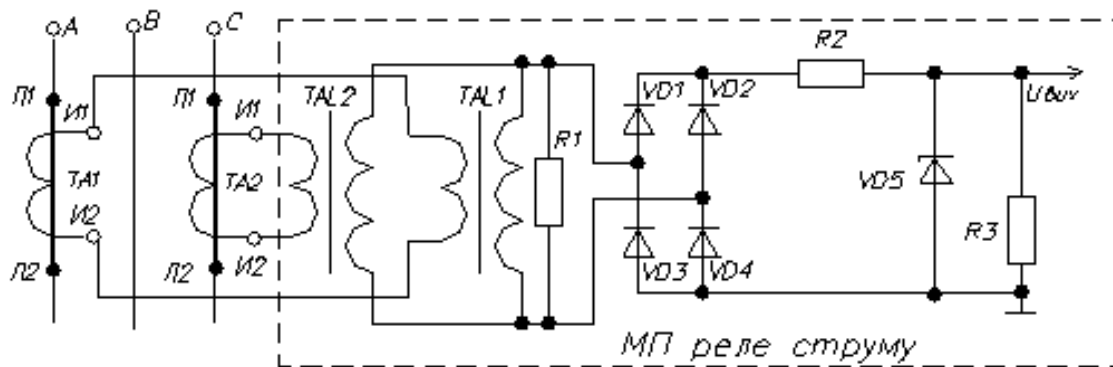


Рис. 5.3. Схема датчика струму

Схема містить трансформатори ТА1, ТА2 струму, які вимірюють струм лінії, проміжні трансформатори ТАЛ1, ТАЛ2 струму, які встановлені в корпусі мікропроцесорного захисту і мають коефіцієнт трансформації 100. Вторинні обмотки ТАЛ1, ТАЛ2 з'єднані паралельно, до яких підключений резистор R1 з опором 50 Ом для забезпечення точності вимірювання струму. На схемі видно, що у вузол надходять два струми від вторинних обмоток трансформаторів струму ТАЛ1, ТАЛ2 і два струми відходять: один в резистор R1 і другий на вхід випрямляча. Для визначення струму через резистор R1 підсумуємо струми від вторинних обмоток ТАЛ1, ТАЛ2 з урахуванням їх фазового зсуву на 120 електричних градусів. З векторної діаграми вторинних струмів видно, що векторна сума двох фазних струмів вторинних обмоток трансформаторів струму дорівнює фазному струму, тобто струм через резистор R1 дорівнює фазному струму лінії, поділеному на коефіцієнт трансформації.

При режимах КЗ можливі кидки струму, і вихідна напруга датчика струму може перевищувати 5В, що недопустимо для МПЗА. Тому на схемі датчика струму увімкнений стабілітрон, який виконує функцію обмеження сигналу напруги.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. У якому режимі роботи повинен працювати трансформатор струму?
А) у режимі неробочого ходу; Б) у режимі повного навантаження; В) у режимі неповного навантаження; Г) у режимі короткого замикання.
2. Які чисельні значення струму вторинних обмоток трансформаторів струму прийнято за номінальне стандартизоване?
А) 1 А; Б) 3 А; В) 5 А; Г) 7 А.
3. Як зміниться напруга вторинної обмотки працюючого трансформатора струму при її розмиканні?
А) зменшиться; Б) зменшиться у 2 рази; В) збільшиться; Г) збільшиться у 2 рази.

4. Як зміниться похибка вимірювання трансформатора струму зі збільшенням опору навантаження вторинної обмотки?
 А) не зміниться; Б) зменшиться; В) збільшиться; Г) зросте.
5. Яке значення відносної похибки трансформатора струму допустиме для надійної роботи релейного захисту?
 А) 1 %; Б) 5 %; В) 7 %; Г) 10 %.
6. Яка з обмоток трансформатора струму має більшу кількість витків?
 А) первинна; Б) перша; В) вторинна; Г) друга.
7. Яка з обмоток трансформатора струму має меншу кількість витків?
 А) первинна; Б) перша; В) вторинна; Г) друга.
8. Яка з обмоток трансформатора струму має більший переріз дроту?
 А) первинна; Б) перша; В) вторинна; Г) друга.
9. Яка з обмоток трансформатора струму має менший переріз дроту?
 А) первинна; Б) перша; В) вторинна; Г) друга.
10. Якими символами позначаються виводи первинної обмотки трансформатора струму?
 А) А1-А2; Б) І1-І2; В) Х1-У1; Г) Л1-Л2.
11. Якими символами позначаються виводи вторинної обмотки трансформатора струму?
 А) А1-А2; Б) І1-І2; В) Х1-У1; Г) Л1-Л2.
12. За якою формулою розраховують коефіцієнт трансформації трансформатора струму під час його перевірки?
 А) $K=I_1/I_2$; Б) $K=I_2/I_1$; В) $K=U_2/U_1$; Г) $K=U_1/U_2$.
13. У яку сторону змінюється величина магнітного потоку в магнітному осерді працюючого трансформатора струму при розмиканні кола його вторинної обмотки?
 А) у більшу; Б) у меншу; В) до середньої; Г) до крайньої.
14. З якою метою трансформатор струму має працювати у режимі короткого замикання?
 А) для надійності; Б) задля забезпечення похибки трохи більше 10 %; В) підвищення точності менше 10 %; Г) зменшення похибки менше 10 %.
15. У яку сторону зміниться напруга вторинної обмотки працюючого трансформатора струму при її розмиканні?
 А) у більшу; Б) у середню; В) у меншу; Г) не зміниться.
16. Як змінюється похибка вимірювання струму трансформатора струму зі збільшенням опору навантаження вторинної обмотки?
 А) не зміниться; Б) зменшиться; В) збільшиться; Г) збільшиться незначно.
17. Який параметр трансформатора струму впливає на величину магнітного потоку в його осерді?
 А) опір навантаження; Б) магнітний опір; В) опір обмотки; Г) струм навантаження.

18. Яким чином увімкнюється первинна обмотка трансформатора струму щодо фазної обмотки силового трансформатора підстанції?

А) паралельно; Б) послідовно; В) змішано; Г) у розрив.

19. Який із законів фізики не належить до принципу роботи трансформатора струму?

А) Ампера; Б) Фарадея; В) Ленца; Г) Повного струму.

5.2. Завадозахищеність вхідних кіл МПЗА

До вхідних кіл МПЗА відносяться проводи від трансформаторів струму і трансформаторів напруги, довжина яких може бути від 5 м до 40 м. Ці проводи знаходяться у просторі змінних електромагнітних полів різної частоти і потужності. Змінні електромагнітні поля за законом Фарадея індують електрорушійні сили (ЕРС) на всіх дротах, які вони перетинають. Таку ЕРС називають електромагнітною завадою. Величина ЕРС залежить від частоти і потужності поля. Електромагнітні поля від станцій стільникового зв'язку, передавальних радіоцентрів, телецентрів тощо не можуть вплинути на роботу МПЗА, оскільки мають малу потужність і не можуть індукувати на їхніх виводах небезпечні величини ЕРС.

МПЗА встановлені на підстанціях поряд з шинами, по яких протікають великі струми і створюється змінне магнітне поле. Це поле низькочастотне і при синусоїдальному струмі не може індукувати величини ЕРС, небезпечні для МПЗА.

Але при короткому замиканні виникає кидок струму з великою похідною наростання. При цьому в навколишньому просторі з'являється хвиля, яка індукує імпульси напруги на проводах і на контактних мідних доріжках електронних плат керування, що може викликати відмову мікросхем.

Завади бувають періодичні й імпульсні. Перші впливають на аналогові системи промислової електроніки, другі – на МПЗА. Але якщо в аналогових системах завада спричинює спотворення корисного сигналу різного ступеня, то в дискретних системах напруга завади проявляється лише у випадках її перевищення гранично допустимого рівня або гранично допустимого часового інтервалу.

Індуктивні завади виникають за рахунок трансформаторного зв'язку при змінах величини струму в одному контурі, як показано на рис. 5.4.

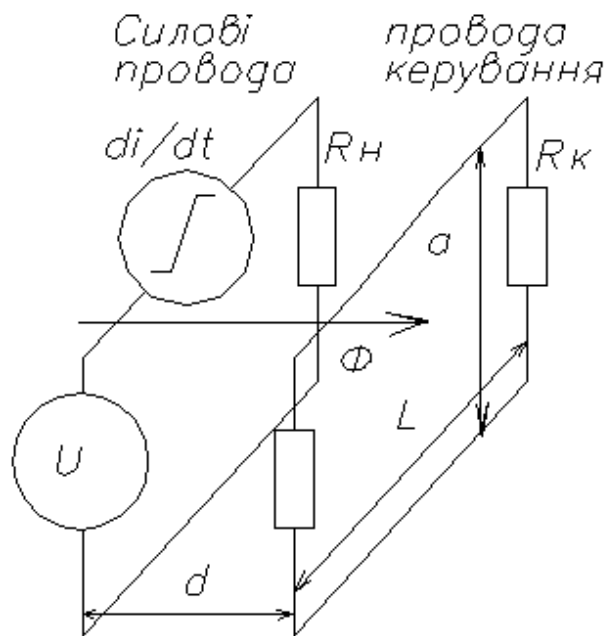


Рис. 5.4. Принцип утворення індуктивної завади

Як видно з рис. 5.4, можна говорити про існування повітряного трансформатора, первинна обмотка якого утворена силовими проводами, а вторинна обмотка – це контур на платі керування. При кидках струму в одному контурі в другому контурі індукується електро-рушійна сила взаємоіндукції, яка створює індуктивну заваду.

Індуктивні завади можна пригнічувати таким чином: зменшити взаємну індуктивність електричних контурів за рахунок збільшення відстані між силовими лініями та зменшення площі контурів; виконати звивання дротів керування з кількістю 30 витків на метр, що забезпечує взаємне знищення складових завад індуктованих окремими магнітними потоками, як показано на рис. 5.5.

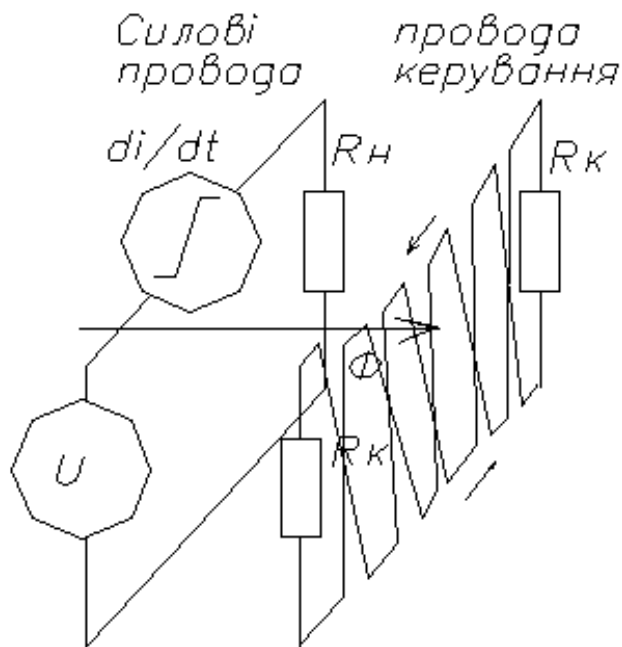


Рис. 5.5. Компенсація індуктивної завади за рахунок звивання проводів на вході схеми керування

Виконують екранування проводів, блоків, пристроїв феромагнітними екранами зі сталі для низькочастотних полів та латунними екранами для високочастотних полів товщиною 1–2 мм. В екранах індукуються вихрові струми, магнітне поле яких напрямлене зустрічно зовнішньому полю. Металевий екран зменшує енергію електромаг-

нітних хвиль за допомогою або поглинання цієї енергії провідним середовищем або за допомогою відбивання енергії на межі двох середовищ. Матеріал екрану повинен забезпечувати максимальний захист та ослаблення електромагнітного поля завад, тип матеріалу вибирається

залежно від того, чи є поле завад магнітним чи електричним. Існують два типи екранування кабелів: обплетення та покриття з фольги. Використовують екрановані контрольні кабелі між силовим електрообладнанням та пристроями керування із заземленням екрану з обох боків, а також екрановані або броньовані силові кабелі.

Вплив електромагнітних завад зменшується у разі рознесення у просторі силових і сигнальних кабелів (у крайньому випадку – їх перетинання під прямим кутом), а також рознесення в просторі (не менше 20 см) силових дротів з високим рівнем випромінюваних перешкод і сигнальних дротів, з прокладанням їх у роздільних кабельних каналах. Вплив електромагнітних завад також зменшується у разі застосування спеціальних фільтрів від електромагнітних завад на вході (іноді й на виході) силового електрообладнання.

Найбільш ефективний спосіб передбачає розміщення блоків та пристроїв керування в металевих корпусах. Внаслідок цього зовнішні поля екрануються цими металевими корпусами. Але якщо в аналогових системах завада спричинює спотворення корисного сигналу різного ступеня, то у цифрових системах керування напруга завади проявляється лише у випадках її перевищення гранично допустимого рівня або гранично допустимого часового інтервалу.

Розглянемо причину появи ємнісних завад. Два проводи, що належать до різних електричних кіл, мають різні електричні потенціали та діелектрик між ними, тому вони утворюють конденсатор, як показано на рис. 5.6.

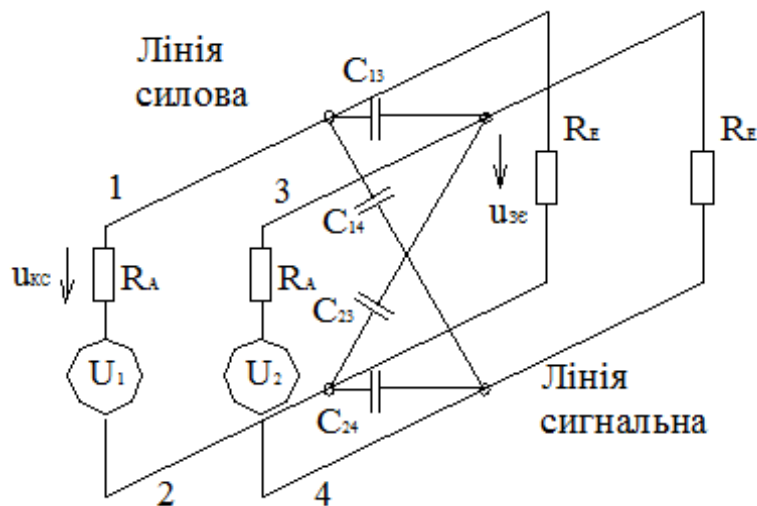


Рис. 5.6. Ємнісні зв'язки між проводами різних кіл і принцип формування ємнісних завад

Практичне значення ємності електричної лінії складає 20–100 пФ/м. При зміні потенціалу на одному з проводів відбувається розряд або дозаряд ємності між проводами, тобто протікає струм і виникає ємнісна завада у формі імпульсу. Величина напруги ємнісної завади дорівнює $u_3 = u \cdot K(C_{13} \cdot C_{24} - C_{14} \cdot C_{23})$, де u – миттєве значення напруги силового проводу;

K – коефіцієнт, який дорівнює нулю при виконанні умови симетрії ємностей, тобто $C_{13}/C_{23} = C_{14}/C_{24}$; де $C_{13}; C_{14}; C_{23}; C_{24}$ – ємності між відповідними проводами згідно з рис. 5.8. Виконання умови симетрії ємностей можна забезпечити шляхом використання попарно скручених провідників 1 і 2 та 3 і 4, або підключенням симетруючих конденсаторів.

Для зменшення величини ємнісних завад необхідно збільшувати відстані між силовими проводами та сигнальними, зменшувати їх довжину, екранувати сигнальні лінії і електронні пристрої металевими трубками та кожухами, які повинні заземлюватись в одній точці електричного кола. При ємнісних завадах в екрані виникає ємнісний струм, який відводиться в одну точку спільного проводу схеми. Для забезпечення однієї точки заземлення екрануючий провід повинен бути в ізоляції.

За наявності кількох шаф керування здійснюється вирівнювання потенціалів їх корпусів за рахунок з'єднання в схему "зірки", загальна точка якої з'єднується з контуром заземлення та струмопровідними конструкціями будівель. Для усунення завад від гальванічного зв'язку необхідно спільний провід від окремих пристроїв з'єднувати в одній точці джерела живлення, розділяти кола живлення силових кіл і кіл керування, встановлювати силові фільтри на вході силового обладнання.

Питанням захисту пристроїв МПЗА від електромагнітних завад присвячені спеціальні пункти "Правил улаштування електроустановок (ПУЕ)". Згідно з п. 3.4.50 ПУЕ розподільні та групові лінії, що використовуються для живлення мікропроцесорних пристроїв захисту, установлених у розподільних пристроях, треба виконувати екранованими кабелями. Застосування неекранованих кабелів має бути обґрунтовано розрахунками.

Згідно з п. 3.4.53 ПУЕ, у разі прокладання сигнальних кабелів кіл з метою зниження рівня електромагнітних, радіочастотних, магнітних завад необхідно виконувати такі вимоги:

1) силові кабелі та сигнальні кабелі слід, за можливості, прокладати по різних трасах;

2) у разі прокладання їх по одній трасі відстань між ними має бути не менше ніж:

- 0,45 м – для кабелів з колами напругою до 220 В;

- 0,6 м – для кабелів з колами напругою до 380 В;

- 1,2 м – для кабелів напругою до 6–10 кВ.

Застосовувати люмінесцентні лампи (незалежно від типу пускорегулювальної апаратури) для внутрішнього освітлення панелей (шаф), які містять пристрої МПЗА, заборонено. Необхідно використовувати тільки лампи розжарювання або світлодіодні лампи.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Назвати вимоги до монтажу сигнальних ліній від датчиків інформації до МПЗА.
2. Пояснити процес формування електромагнітної завади при появі коротких замикань.
3. Що відбувається у навколишньому просторі при кидках струму в лініях і трансформаторах?
4. Обґрунтувати появу електромагнітної завади за законом електромагнітної індукції Фарадея.
5. Яку графічну форму мають електромагнітні завади?
6. Які лампи згідно з вимогами ПУЕ слід застосовувати для внутрішнього освітлення панелей (шаф), які містять пристрої МПЗА, і чому?
7. Пояснити принцип трансформаторного зв'язку, що спричиняє виникнення індуктивних завад.
8. За рахунок яких заходів можна зменшити взаємну індуктивність електричних контурів?
9. З якою метою звивають сигнальні дроти до МПЗА?
10. У чому полягає принцип дії магнітних екранів для сигнальних проводів?
11. У чому полягає принцип дії спеціальних вхідних фільтрів від електромагнітних завад?
12. Пояснити причину появи ємнісних завад.

5.3. Ступеневий принцип побудови струмових захистів

Ступеневий принцип побудови струмових захистів призначений для ближнього і дальнього резервування відмов спрацьовування захистів або відповідних вимикачів. Сутність ступеневого принципу розглянемо на прикладі, наданому на рис. 5.7.

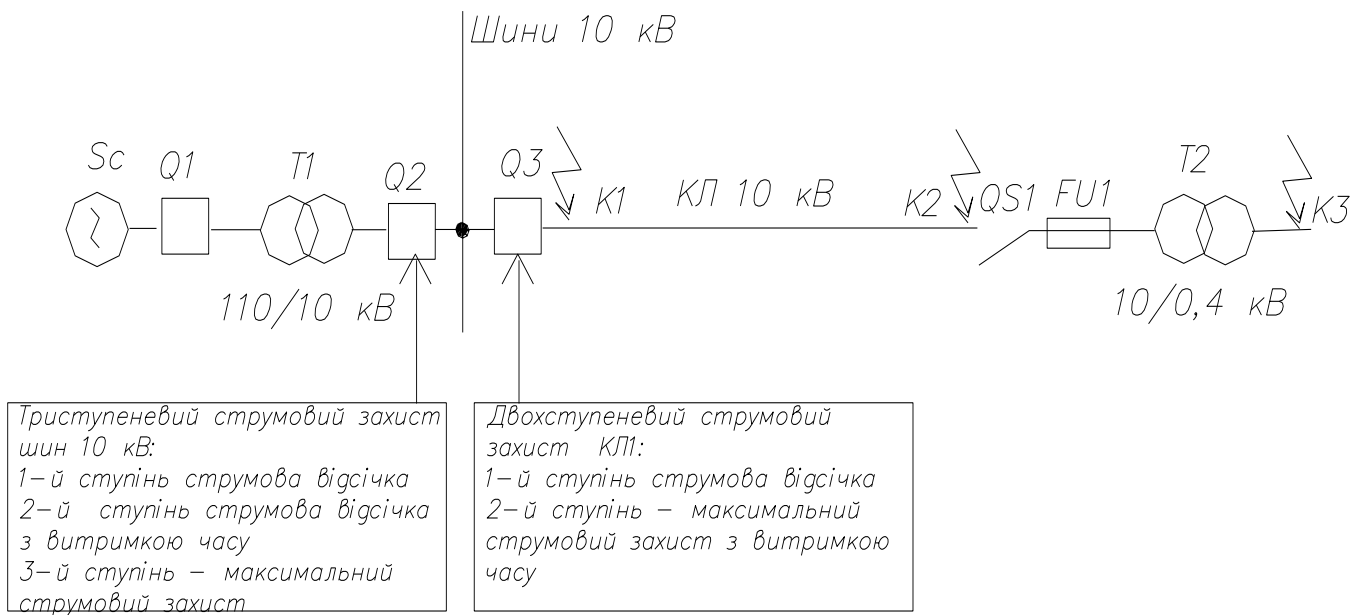


Рис. 5.7. Ступеневий принцип побудови струмових захистів

На рис. 5.7 показано розрахункову схему електропостачання кабельної лінії 10 кВ з позначенням точок короткого замикання: точка К1 – на початку кабельної лінії; точка К2 – в кінці лінії; точка К3 – на стороні напруги 0,4 кВ. Згідно з вимогами ПУЕ для захисту кабельних ліній необхідний двоступеневий струмовий захист. Перший ступінь захисту називається струмовою відсічкою без витримки часу для захисту ліній від струмів двофазних коротких замикань. Другий ступінь захисту називається максимальним струмовим захистом із витримкою часу для резервування неспрацювання запобіжника при К3 на стороні 0,4 кВ.

На панелі захисту шин 10 кВ необхідний треступеневий струмовий захист. Перший ступінь захисту називається струмовою відсічкою без витримки часу для захисту шин від струмів двофазних коротких замикань. Другий ступінь захисту називається струмовою відсічкою з витримкою часу. Вона резервує відмову спрацьовування першого ступеня захисту лінії і відмову вимикача Q2. Третій ступінь захисту називається максимальним струмовим захистом із витримкою часу для резервування неспрацювання вимикача Q2.

Таким чином, сутність ступеневого принципу побудови захистів полягає в тому, що уставки спрацьовування за струмом ступенів захистів у міру наближення до джерела живлення зростають, а витримки часу при їхньому спрацьовуванні зменшуються.

5.4. Мікропроцесорне струмове реле серії АЛ-5-Х

Мікропроцесорне струмове реле (МП-реле) серії АЛ-5-Х виготовляє науково-виробниче підприємство "РЕЛСІС" (Україна, м. Київ, вул. Сім'ї Сосніних, 9). МП-реле серії АЛ-5-Х призначене для двоступеневого струмового захисту при коротких замиканнях і перевантаженнях ліній, трансформаторів при напругах (0,4...35) кВ. Схему зовнішніх підключень реле показано на рис. 5.8.

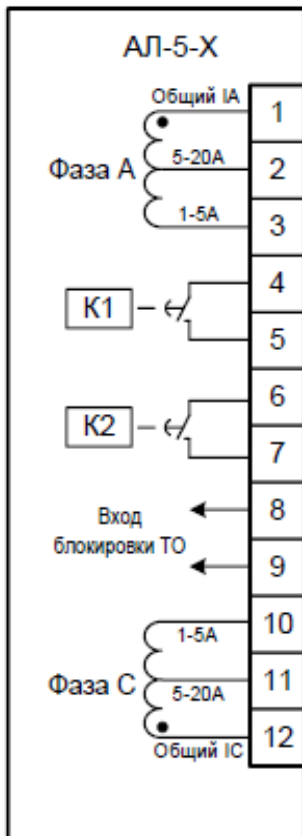


Рис. 5.8. Зовнішній вигляд і схема зовнішніх підключень мікропроцесорного реле серії АЛ-5-Х

Призначення виводів: 1–3 – входи фази А відповідно до діапазону вхідних струмів; 4, 5 – нормально розімкнені контакти виконавчого реле К1; 6, 7 – нормально розімкнені контакти виконавчого реле К2; 7, 8 – вхід зовнішнього блокування СВ; 10–12 – входи фази С відповідно до діапазону вхідних струмів.

МП-реле не потребує зовнішнього джерела напруги, оскільки живиться від трансформаторів струму, струм яких і контролює. Живлення елементів схеми реле здійснюється від вхідного струму по одній або двох фазах.

МП-реле забезпечує двоступеневий струмовий захист: струмова відсічка (СВ) з витримкою часу або без та максимальний струмовий захист (МСЗ) з витримкою часу або без. МП-реле АЛ-5-Х мають два замикаючих контакти: один для вмикання вимикача, другий – для вимикання.

Споживана потужність вхідних ланцюгів фазних струмів при струмі, що дорівнює мінімальній уставці струму МСЗ, у всьому діапазоні не повинна перевищувати 1,5 ВА.

Алгоритм роботи реле. При подачі струму на первинні обмотки проміжного трансформатора живлення і вимірювальних трансформаторів струму сигнали, що пропорційні прохідним струмам, подаються на відповідні входи вбудованого в корпус мікроконтролера. Після перетворення та вибірки проводиться їх контроль двома пороговими елементами, що відповідають ступеням СВ та чутливому ступеню МСЗ.

Світіння світлодіодного індикатора «МТЗ» зеленим кольором на лицьовій панелі сигналізує про протікання струму нормальної величини (нижче за поріг встановлених уставок). Рівень вхідного струму, достатній до роботи реле, становить не менше 0,7 від струму мінімальної уставки відповідного піддіапазону. При неправильному виборі уставок за струмом та часом світлодіодний індикатор «МСЗ» починає по черзі блимати зеленим та червоним кольором.

Вхідні кола для мікропроцесорного реле показані рис. 5.9.

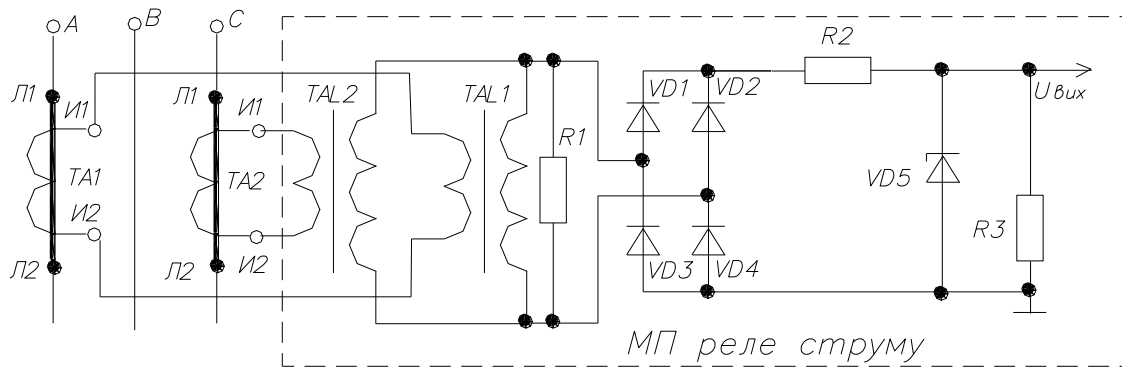


Рис. 5.9. Схема вхідних кіл мікропроцесорного реле

Схема містить трансформатори ТА1, ТА2 струму, які вимірюють струм лінії, проміжні трансформатори ТАЛ1, ТАЛ2 струму, які встановлені в корпусі мікропроцесорного захисту і мають коефіцієнт трансформації 100. Вторинні обмотки ТАЛ1, ТАЛ2 з'єднані паралельно, до яких підключений резистор R1 з опором 50 Ом для забезпечення точності вимірювання струму. На схемі видно, що у вузол надходять два струми від вторинних обмоток трансформаторів струму ТАЛ1, ТАЛ2 і два струми відходять: один – у резистор R1, другий – на вхід випрямляча. Оскільки струм навантаження випрямляча в 100 разів менше за струм резистора R1, то струм випрямляча не враховуємо і вважаємо, що з вузла відходить лише струм резистора R1.

На рис. 5.10 зображено спрощену принципову електричну схему захисту на мікропроцесорному реле.

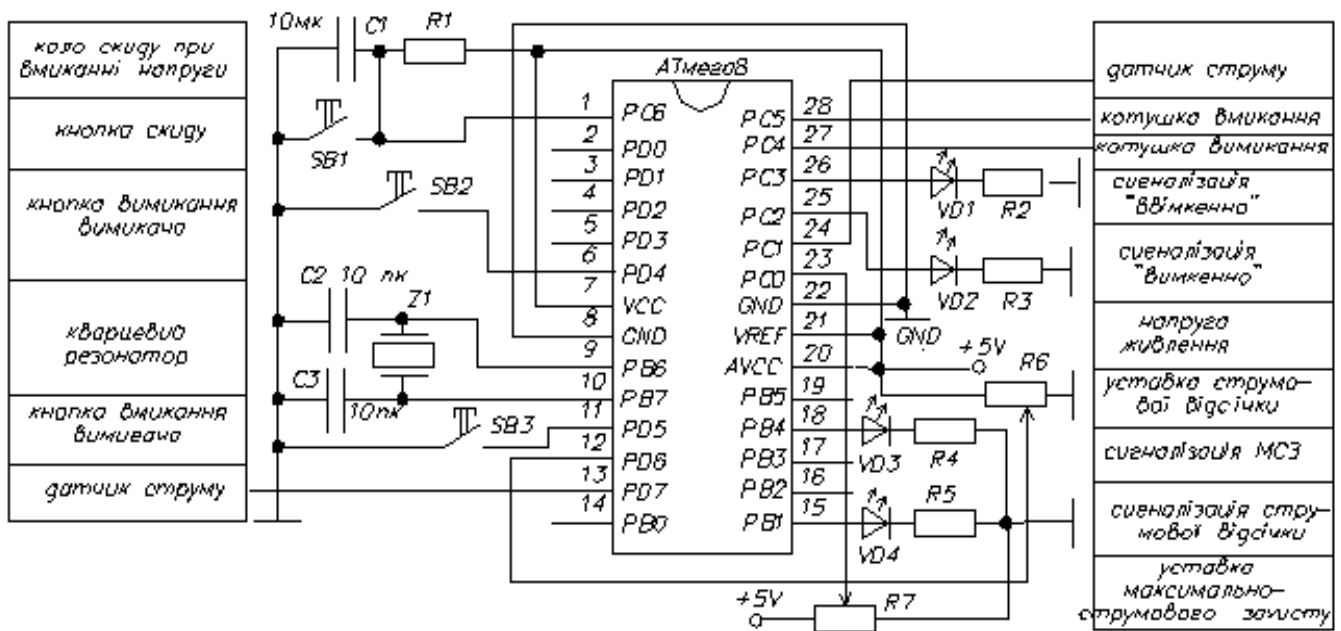


Рис. 5.10. Спрощена електрична схема захисту на мікропроцесорному струмовому реле

Розподіл виводів мікросхеми мікроконтролера АТмега8 показаний в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Розподіл виводів мікросхеми мікроконтролера АТмега8

Номер виводу	Номер розрядів	Назва виводів	Призначення виводів
1	PC6		RESET – кнопка скиду при «зависанні» МК
6	PD4	порт D	4-й розряд – кнопка для відключення вимикача
7		VCC	напруга +5 В – живлення цифрової частини МК
8		GND	напруга -5 В – джерела живлення
9	PB6	XTAL1	підключення кварцового резонатора
10	PB7	XTAL2	підключення кварцового резонатора
11	PD5	порт D	5-й розряд – кнопка для увімкнення вимикача
12	PD6	AIN0	6-й розряд порту D – опорний вхід компаратора для завдання уставки спрацювання струмової відсічки. Компаратор спрацьовує, якщо напруга на сигнальному вході більша, ніж на опорному
13	PD7	AIN1	7-й розряд порту D – сигнальний вхід компаратора для підключення датчика струму
15	PB1	порту B	6-й розряд порту B – сигналізація спрацювання струмової відсічки і команда на вимикання
18	PB4	порту B	4-й розряд – сигналізація спрацювання максимального струмового захисту і команда на вимикання вимикача

Кінець таблиці 5.1

20		AVCC	+5 В – живлення аналогової частини МК для живлення аналогового компаратора і АЦП
21		VREF	вхід опорної напруги для роботи аналого-цифрового перетворювача (АЦП)
22		GND	–5 В для живлення аналогового компаратора і АЦП. Виводи живлення для аналогової і цифрової частини необхідно запаралелювати для підвищення завадозахищеності
24	PC1	ADC1	1-й розряд порту С та вхід АЦП, який перетворює аналогову напругу на двійкове число
25	PC2	ADC2	2-й розряд порту С – сигналізація про стан вимикача «відключено»
26	PC3	ADC3	3-й розряд порту С – сигналізація про стан вимикача «увімкнено»
27	PC4	ADC4	4-й розряд порту С – увімкнення котушки відключення
28	PC5	ADC5	5-й розряд порту С – увімкнення котушки увімкнення

5.5. Програмування мікропроцесорного струмового реле

Програмування мікропроцесорного струмового реле проводиться в чотири етапи: 1) складання алгоритму програми; 2) вибір лапок мікросхеми; 3) складання електричної схеми; 4) складання програми у вигляді команд.

У загальному випадку будь-яка програма складається з головної програми і підпрограм. Головна програма повинна виконуватися в нескінченному циклі опитування вхідних кіл МК. Підпрограми можуть викликатися командами з головної програми або командами переривання від периферійних пристроїв.

Для прикладу програмування як головну програму приймемо програму нескінченного циклу опитування кнопок керування вимикачем, а підпрограми викликатимемо командами переривання від периферійних пристроїв. Алгоритм головної програми приведений на рис. 5.11.

При кожному спрацюванні АЦП переривається основна програма, і викликається підпрограма МСЗ. Для виклику підпрограми МСЗ необхідно в 15-ту комірку таблиці переривань з адресою 0x00E, що закріплена за АЦП, завантажити команду переходу «rjmp MTZ» на підпрограму МСЗ.

Для побудови захисту від коротких замикань, який називають струмовою відсічкою, доцільно використати периферійний пристрій – компаратор. При спрацюванні компаратора переривається основна програма, і викликається підпрограма струмової відсічки. Для виклику підпрограми струмової відсічки необхідно в 17-ту комірку таблиці переривань з адресою 0x0010, що закріплена за компаратором, завантажити команду переходу «rjmp otsechka» на підпрограму струмової відсічки. В інші комірки таблиці переривань необхідно завантажувати команду «reti» – вихід з переривання. Програмування таблиці переривань зводимо в таблицю 5.3.

Таблиця 5.3 – Програмування таблиці переривань

Директиви та команди	Коментарі
.org 0x0000 rjmp stek	Директива вказує адресу 1-ї комірки в ROM-пам'яті Команда переходу в 1-й комірці ROM-пам'яті на мітку stek
.org 0x00E rjmp MTZ	Директива вказує адресу 15-ї комірки, закріпленої за АЦП Команда переходу в 15-ту комірку ROM-пам'яті на мітку MTZ
.org 0x0010 rjmp otsechka	Вказує адресу 17-ї комірки, закріпленої за компаратором Команда в 17-ту комірку для переходу на мітку otsechka

Далі за алгоритмом необхідно запрограмувати блок «налаштування стека». Програмування стека є обов'язковим, оскільки в програмі використовуються підпрограми. При виклику підпрограм у стек автоматично завантажуються адреса наступної команди з ROM-пам'яті, а в програмний лічильник по чергово завантажуються адреса комірок з командами підпрограми. Для налаштування стека в регістр SP (вказівник стека) завантажують адресу двох останніх 8-розрядних комірок RAM-пам'яті, в які при виклику підпрограм завантажуються старший і молодший байти 16-розрядної адреси комірки ROM-пам'яті з наступною командою.

Далі за алгоритмом необхідно програмування блоку «дозвіл переривань», який дозволяє виклик підпрограм після спрацювання периферійних пристроїв. Програмування дозволу переривань полягає у завантаженні в 7-й розряд статусного регістра SREG процесора логічної «1» за допомогою спеціальної команди «sei». Результати програмування зводимо в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Програмування стека і дозволу переривань

Команди	Коментарі
stek:	Мітка основної програми
ldi r16, high(RAMEND)	Завантаження в r16 адреси останньої комірки RAM
out SPH, r16	Пересилка адреси в старший регістр покажчика стека
ldi r16, low(RAMEND)	Завантаження адреси передостанньої комірки RAM
out SPL, r16	Пересилка адреси в молодший регістр покажчика стека
sei	Команда дозволу переривань

Слід звернути увагу, що адреси останніх двох комірок RAM-пам'яті вказані не 16-бітним кодом, а мнемонікою «RAMEND». Використання цієї мнемоніки створює зручності при програмуванні і прискорює сам процес складання програми за рахунок того, що не треба звертатися до довідника за адресами відповідних комірок RAM-пам'яті.

Зі схеми зовнішніх підключень мікроконтролера видно, що до порту D підключені кнопки керування вимикачем, отже, порт потрібно налаштувати на вхід. До порту C підключені котушки керування вимикачем і сигнальні світлодіоди про стан вимикача, отже, порт потрібно налаштувати на вихід. Кожний порт або окремий розряд порту можна налаштувати на вхід або на вихід, запрограмувавши регістр напрямку порту під назвою ddr.

Необхідно зазначити, що при подачі живлення на мікроконтролер у всіх регістрах завантажені логічні «нулі», тому при увімкненні живлення всі порти налаштовані на вхід. Але до розрядів порту D з кнопками керування rd4 і rd5 потрібно підключити внутрішні резистори.

Далі зі схеми керування вимикачем видно, що розряди 2, 3, 4, 5 порту C потрібно налаштувати на вихід, тобто в регістр напрямку порту ddrc завантажити логічні «одиниці». Аналогічно програмуються на вихід 1-й і 4-й розряди порту B, тобто в регістр напрямку ddrb завантажити логічні «одиниці». Результати програмування портів на вхід і вихід зведені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Програмування портів на вхід і вихід

Перелік команд	Коментарі
ldi r16, 0b00011000	Завантаження «1» в 4-й і 5-й розряди регістра r16
out portd, r16	Підключення резисторів в 4-й і 5-й розряди порту D
ldi r16, 0b00111100	Завантаження робочого регістра r16 двійковим кодом
out ddrc, r16	Налаштування розрядів 2, 3, 4, 5 порту C на вихід
ldi r16, 0b00010010	Завантаження робочого регістра r16 двійковим кодом
out ddrb, r16	Налаштування розрядів 1, 4 порту B на вихід

Далі за алгоритмом необхідно програмувати блок «Регістр керування компаратором». Аналоговий компаратор в блоці керування використаний для побудови захисту від коротких замикань, який називається струмовою відсічкою. Аналоговий компаратор має два входи: сигнальний та опорний. На сигнальний вхід підключається вихід датчика струму. На опорний вхід підключений середній вивід змінного резистора R6 для завдання уставки спрацювання. При перевищенні напруги сигнального входу над опорним на виході компаратора з'являється логічний «нуль». При цьому переривається головна програма, і викликається підпрограма струмової відсічки. У програмний лічильник автоматично завантажується адреса 17-ї комірки ROM-пам'яті, в якій записана команда «`jmp otsechka`» переходу на мітку підпрограми струмової відсічки. Програмування аналогового компаратора полягає у встановленні біт в розряди периферійного регістра ACSR, який керує роботою компаратора. Призначення розрядів регістра ACSR наведено в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Призначення розрядів регістра ACSR компаратора

Номер розряду	Призначення розрядів
0	Комбінація біт визначає варіанти виклику підпрограми переривання при спрацюванні компаратора
1	
2	При завантаженні «1» вихід компаратора підключається до входу вбудованого таймера T1, якщо «0», то відключається
3	Завантаження «1» дозволяє переривання, а «0» забороняє
4	В розряді встановлюється «1» при спрацюванні компаратора
5	Вихід компаратора для зчитування даних при спрацюванні: «0», «1»
6	Завантаження «1» вмикає, а «0» вимикає внутрішнє джерело напруги +1,23 В для опорного входу
7	Завантаження «0» вмикає, а «1» вимикає живлення компаратора

У табл. 5.7 наведені варіанти виклику переривань при спрацюванні компаратора.

Таблиця 5.7 – Варіанти виклику переривань при спрацюванні
Компаратора

В 1-му розряді	В 0-му розряді	Варіанти виклику переривань при спрацюванні компаратора
0	0	За будь-якої зміни виходу компаратора
0	1	Комбінація не використовується
1	0	При зміні виходу з логічної «1» на «0»
1	1	При зміні виходу з логічного «0» на «1»

На основі аналізу таблиць 5.6 та 5.7, з урахуванням принципу дії струмової відсічки, розряди периферійного регістра ACSR для керування компаратором завантажені бітами згідно з табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – Завантаження розрядів регістра ACSR керування
Компаратором

Номер розряду	7	6	5	4	3	2	1	0
Тип бітів	0	0	1	0	1	0	1	0

Завантаження комбінації біт у регістр ACSR реалізується командами згідно з табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – Програмування компаратора

Перелік команд	Коментарі
ldi r16, 0b00101010	Завантаження комбінації біт для регістра ACSR
out ACSR, r16	Налаштування регістра ACSR для керування компаратором

Далі за алгоритмом необхідно програмувати блок «регістр керування АЦП». Програмування АЦП полягає у встановленні комбінації біт у розряди периферійних регістрів керування ADMUX і ADCSRA, які керують роботою АЦП. Призначення розрядів регістрів ADMUX і ADCSRA наведені в таблицях 5.10 і 5.11.

Таблиця 5.10 – Призначення розрядів регістра ADMUX

Номер розряду	Призначення
0	Комбінація біт визначає вибір номера входу АЦП для підключення аналогового сигналу. Завантаження розрядів 0-1-2-3 відповідно бітами: 1) 0-0-0-0 – аналоговий сигнал підключається до порту PC0; 2) 1-0-0-0 – аналоговий сигнал підключається до порту PC1; 0-1-0-0 – аналоговий сигнал підключається до порту PC2 тощо
1	
2	
3	
4	Завантажується логічний «0»
5	При завантаженні «1» зчитувати 8 старших розрядів числа з регістра ADCH і два молодших з регістра ADCL
6	При завантаженні в 7-й розряд «0» і в 6-й «1» – опорна напруга АЦП від джерела живлення, з'єднати виводи AVCC, AREF, VCC та виводи GND, AGND, підключити паралельно конденсатор 100 пФ
7	

Таблиця 5.11 – Призначення розрядів регістра ADCSRA

Номер розряду	Призначення розрядів
0	Комбінація біт у розрядах визначає коефіцієнт K_d ділення частоти синхрогенератора $f_{сг}$. При завантаженні розрядів 0-1-2 бітами 0-0-1 $K_d = 16$, частота вимірювань АЦП $f_{ацп} = f_{сг} / K_d = 1000 / 16 = 62,5$ кГц
1	
2	
3	Завантаження «1» дозволяє переривання, «0» – забороняє
4	Змінюється на «1» при спрацюванні АЦП
5	Завантаження «1» – безперервне перетворення, «0» – однократне
6	Завантаження «1» програмно запускає АЦП. Після закінчення в розряд апаратно завантажується «0»
7	Завантаження «1» увімкнює, а «0» вимикає живлення АЦП

На основі аналізу табл. 5.10 та 5.11, з урахуванням вимог до роботи АЦП, розряди регістрів керування завантажені згідно з табл. 5.12 і 5.13.

Таблиця 5.12 – Завантаження бітами розрядів регістра ADMUX

Номер розряду	7	6	5	4	3	2	1	0
Біти	0	1	1	0	0	0	0	1

Таблиця 5.13 – Завантаження бітами розрядів регістра ADCSRA

Номер розряду	7	6	5	4	3	2	1	0
Біти	1	1	1	0	1	1	0	0

Завантаження комбінації біт у регістри керування АЦП реалізується командами згідно з табл. 5.14.

Таблиця 5.14 – Програмування регістрів керування АЦП

Команди	Коментарі
ldi r16, 0b01100001 out ADMUX, r16	;команда завантаження коду для керування АЦП ;налаштування регістра ADMUX
ldi r16, 0b11101100 out ADCSRA, r16	;команда завантаження коду для керування АЦП ;налаштування регістра ADCSRA

Далі за алгоритмом йде блок опитування стану кнопок, до розрядів яких програмно підключені внутрішні резистори. Якщо кнопки не натиснуті, то на вході портів логічна «1». При натисканні кнопки на вході портів виникає логічний «0», і необхідно викликати підпрограми увімкнення або відключення вимикача. Перевірка стану кнопок і залежно від результату перевірки зміна ходу виконання програми реалізується спеціальною командою умовного переходу «sbis». Команди опитування стану кнопок зведені в табл. 5.15.

Таблиця 5.15 – Команди основної програми опитування стану кнопок керування вимикачем

Команди	Коментарі
кнопкі:	Мітка основної програми опитування кнопок
sbis pind, 4	;мітка основної програми опитування стану кнопок
rcall otkl	;якщо кнопка «вимк» не натиснута, то пропуск наступної команди
sbis pind, 5	;виклик підпрограми вимикання при натиснутій кнопки «вимк»
rcall vkl	;якщо кнопка «увімк» не натиснута, то пропустити наступну команду
gjmp кнопкі	;виклик підпрограми вмикання при натиснутій кнопки «увімк»

Алгоритм підпрограми відключення вимикача в текстовій формі: 1) увімкнути живлення котушки відключення; 2) створити витримку часу на час відключення вимикача на 0,1 с та на час зростання струму в котушці до 0,3 с; 3) відключити живлення котушки відключення; 4) сигналізувати про відключений стан вимикача; 5) вихід з підпрограми. Цей алгоритм представлений командами в табл. 5.16.

Таблиця 5.16– Команди підпрограми відключення вимикача

Команди	Коментарі
otkl:	;мітка підпрограми вимикання вимикача
push r16	;завантаження в стек даних r16 з основної програми
ldi r16,0b00010100	;завантаження двійкового коду
out portc,r16	;увімкнути котушку вимикання і діод VD2, вимкнути VD1
rcall delay	;виклик підпрограми витримки часу на 0,5 с
cbi portc,4	;завантажити «0» в 4-й розряд порту для вимикання
pop r16	;пересилання даних регістра r16 зі стека в основну програму
ret	;вихід з підпрограми вимикання вимикача

У підпрограмі відключення потрібна часова витримка на пів секунди для надійного увімкнення і відключення вимикача. Таку витримку також необхідно оформити як підпрограму, оскільки вона буде використовуватися і в підпрограмі увімкнення вимикача. Складемо алгоритм підпрограми часової витримки, що наведений на рис. 5.12.

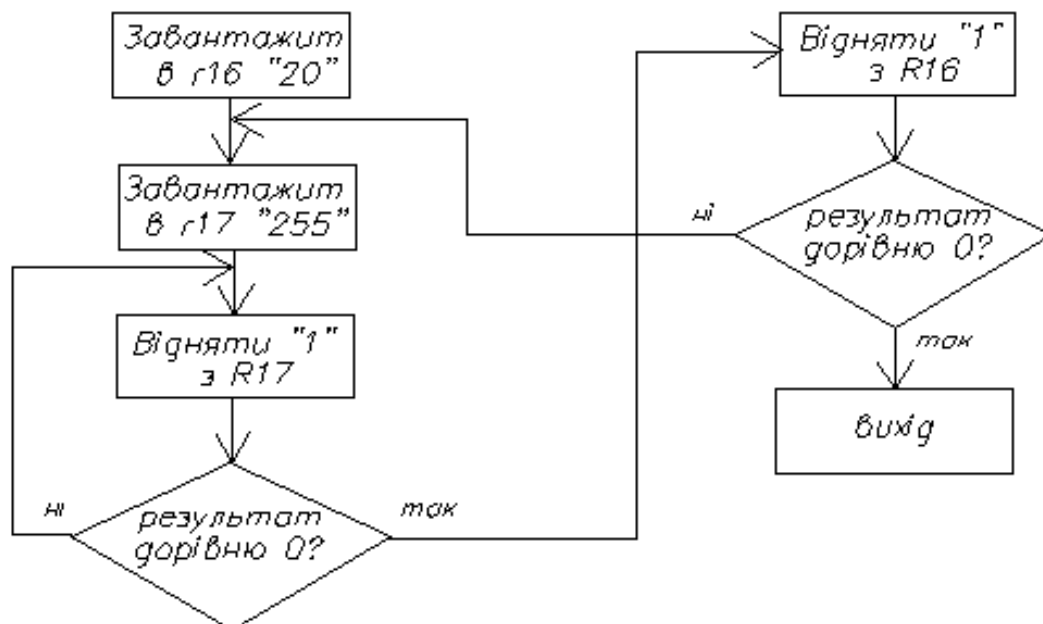


Рис. 5.12. Алгоритм підпрограми часової витримки

Витримка часу створюється за рахунок того, що виконання команд потребує часу $255 \cdot 3 = 765$ мкс. Віднімання 255 разів по одиниці з числа 255 потребує часу $765 \cdot 765 = 0,58$ с. Запишемо підпрограму витримки відповідно до алгоритму у вигляді команд у табл. 5.17.

Таблиця 5.17 – Команди підпрограми затримки часу

Команди	Коментарі
delay:	:мітка підпрограми витримки часу
ldi r16,255	;команда завантаження регістру r16 числом 255
delay2:	;мітка для команди умовного переходу
ldi r17,255	;команда завантаження регістру r17 числом 255
delay1:	;мітка для команди умовного переходу
dec r17	;команда віднімання «одиниці» з числа 255
brne delay1	;команда переходу на delay1, якщо число в r17 не дорівнює нулю
dec r16	;команда віднімання «одиниці» з числа 255
brne delay2	;команда переходу на delay2, якщо число в r16 не дорівнює нулю
ret	;вихід з підпрограми витримки часу

Команда «dec» при кожному імпульсі синхрогенератора віднімає з числа в регістрі «одиницю». Мнемоніка команди «dec» походить від англійського слова «decrement» – зменшення. Команда умовного переходу «brne» реалізує перехід програми на мітку, якщо число в регістрі не дорівнює нулю.

Процес вмикання високовольтного вимикача відбувається подачею напруги живлення на котушку електромагніту вмикання. Після спрацювання електромагніту та змикання головних і допоміжних контактів вимикача котушку електромагніту вмикання вимикають від напруги. При цьому контакти вимикача утримуються в замкненому стані спеціальною «магнітною засувкою». Це зроблено для того, щоби на весь час увімкненого стану вимикача не тримати котушку під напругою, створюючи втрати електроенергії.

Алгоритм підпрограми для вмикання вимикача аналогічний алгоритму підпрограми для його вимикання. Але в алгоритмі вмикання необхідно врахувати один важливий момент. Існує ймовірність ситуації, коли оперативний черговий на підстанції натискає кнопку вмикання вимикача кабельної лінії, на якій до вмикання створився режим двофазного короткого замикання. Спрацьовує миттєвий струмовий захист, який вимикає вимикач. Але при цьому черговий на підстанції не встигає відпустити кнопку вмикання і продовжує тримати її натиснутою. Знову відбувається вмикання вимикача, і знову захист його вимикає. Тобто відбувається багаторазове вмикання і вимикання вимикача.

За умовами заводів-виробників вакуумних вимикачів інтервал між відключенням вимикача і наступним увімкненням повинен бути не менше 3 секунд. Недотримання паузи може призвести до приварювання контактів і поломки механізму увімкнення вимикача. Тому в алгоритмі необхідно передбачити блокування від багаторазових увімкнень вимикача при його увімкненні на коротке замикання.

Пропонується принцип блокування від багаторазових увімкнень вимикача, який полягає в тому, що не можна вийти з підпрограми, утримуючи кнопку увімкнення. Тоді повторного увімкнення вимикача не буде. Для цього використовується команда перевірки стану кнопки «Увімкнути». Якщо кнопка натиснута, то знову перевіряється стан кнопки в нескінченному циклі. Якщо кнопку відпущено, то відбувається вихід з підпрограми увімкнення, і далі черговий на підстанції не стане натискати вдруге на кнопку «Увімкнути», не з'ясувавши причини, чому вимикач відключився одразу після увімкнення. За таким принципом складений алгоритм підпрограми увімкнення вимикача, що показаний на рис. 5.13.

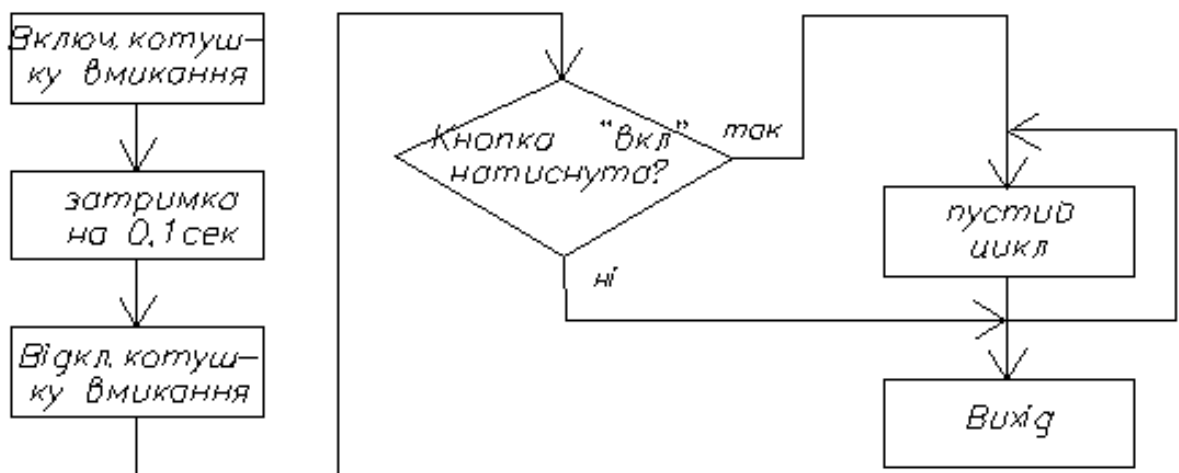


Рис. 5.13. Алгоритм підпрограми увімкнення вимикача

У цьому алгоритмі для блокування багаторазових увімкнень вимикача передбачена команда перевірки стану кнопки: якщо кнопка залишається натиснутою, то команда в безкінечному циклі перевіряє стан кнопки і не виходить з підпрограми увімкнення. Тобто повторне увімкнення при натиснутій кнопці після захисного відключення вимикача не відбувається. Якщо кнопку відпущено, то відбувається вихід з підпрограми увімкнення. Перелік команд підпрограми увімкнення зведений у табл. 5.18.

Таблиця 5.18 – Команди підпрограми увімкнення

Команди	Коментарі до команд
vkl:	Мітка підпрограми увімкнення вимикача
push r16	Завантаження в стек дані регістра r16 з основної програми
ldi r16,0b00101000	Завантаження двійкового коду
out portc,r16	Увімкнути котушку увімкнення і VD1, відключити VD2
rcall delay	Виклик підпрограми витримки часу
cbi portc,5	Відключення живлення котушки увімкнення
кнопка:	Мітка для перевірки стану кнопки увімкнення
in r16, pind	Зчитування стану розрядів порту D
sbrs r16, 5	Пропуск наступної команди, якщо кнопка відпущена
rjmp кнопка	Перевірка стану кнопки увімкнення
pop r16	Повернення зі стека даних регістра r16 в основну програму
ret	Кінець підпрограми і вихід в основну програму

Роз'яснення команди «sbrs»: ця команда при виконанні певної умови змінює хід виконання програми. Тобто якщо кнопка відпущена і на вході порту логічна «1», то наступна команда «rjmp кнопка» виклику підпрограми пропускається. Команди, які мають дві адреси для переходу, при виконанні певних умов називаються командами умовного переходу. Мікроконтролер АТмега8 має 20 таких команд.

Для побудови струмової відсічки використаємо периферійний пристрій "аналоговий компаратор", який має два входи: сигнальний та опорний. На сигнальний вхід компаратора (вивід № 13 на схемі) підключається вихід датчика струму. На опорний вхід компаратора (вивід № 12) підключається середній вивід змінного резистора R6 для завдання уставки спрацювання. Складемо алгоритм підпрограми струмової відсічки, що показаний на рис. 5.14.

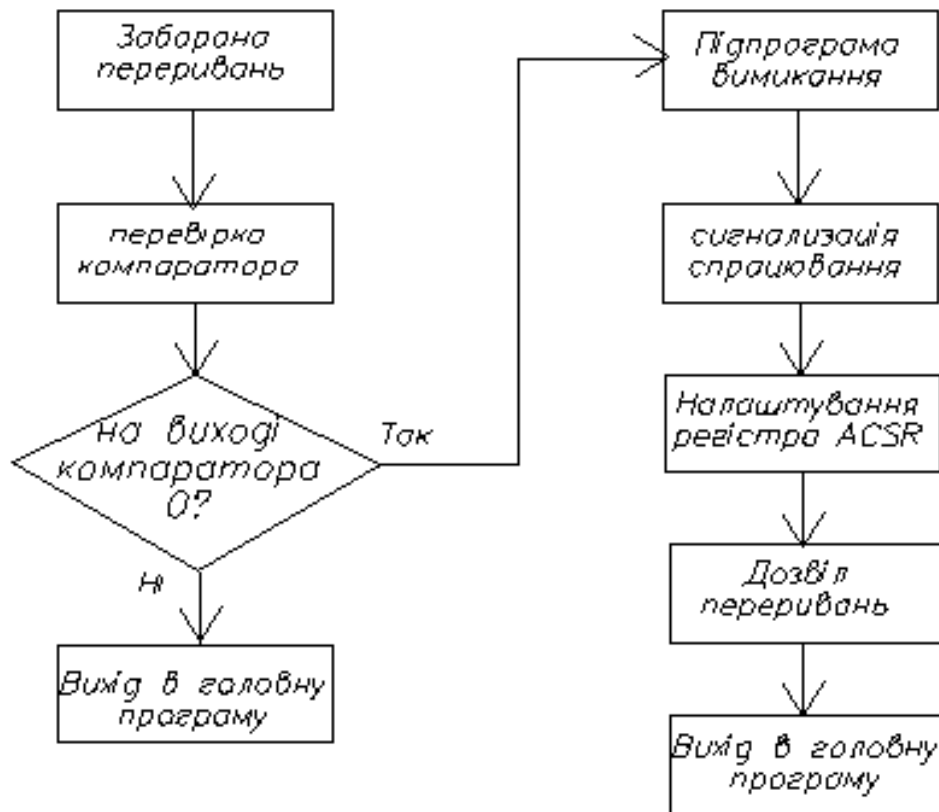


Рис. 5.14. Алгоритм підпрограми струмової відсічки

В алгоритмі передбачений блок «заборона переривань», щоб підпрограма струмової відсічки не була перервана іншими перериваннями при спрацюванні інших периферійних пристроїв. Блок «перевірка виходу компаратора» потрібен для підтвердження режиму коротких замикань. Якщо коротке замикання самоліквідувалося, то відбувається вихід з підпрограми, якщо коротке замикання підтверджується, то викликається підпрограма «otkl» для відключення вимикача. Після відключення вимикача вмикається сигналізація про спрацювання струмової відсічки. Це потрібно для того, щоб оперативний персонал підстанції мав інформацію про спрацювання струмової відсічки для аналізу заходів по усуненню наслідків аварії.

В наступних блоках відновлюється стан реєстра керування компаратором, оскільки стан розрядів змінився після спрацювання компаратора і далі за алгоритмом дозволяються переривання. Для цього алгоритму складемо перелік команд згідно з табл. 5.19.

Таблиця 5.19 – Команди підпрограми струмової відсічки

Команди	Коментарі до команд
otsechka:	Мітка підпрограми струмової відсічки
push r16	Завантаження в стек даних регістра r16
cli	Команда заборони всіх переривань
sbic acsr, 5	Пропуск наступної команди, якщо в 5-му розряді «0»
reti	Вихід з підпрограми переривань від компаратора
rcall otkl	Виклик підпрограми відключення вимикача
sbi portb, 1	Завантаження «1» в 1-й розряд порту В, увімкнення VD4
ldi r16, 0b00101010	Завантаження двійкового коду в регістр r16
out acsr, r16	Відновлення даних регістра керування компаратором
sei	Дозвіл всіх переривань
pop r16	Пересилка зі стека даних r16 в основну програму
reti	Вихід з підпрограми струмової відсічки

Для побудови МСЗ аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) перетворює напругу з датчика струму на двійкове число і порівнює з двійковим числом уставки спрацювання. У підрозділі 2.2 за величиною уставки спрацювання МСЗ розраховані параметри датчика струму, за яких його вихідна напруга дорівнює 4 В. Перетворимо уставку спрацювання МСЗ, що дорівнює 4 В, на 10-розрядне двійкове число. Для цього спочатку визначимо кількість поділок аналогової $N_{АН}$ і цифрової $N_{АЦП}$ шкали: $N_{АЦП}=N_{АН}=2^p-1=2^{10}-1=1023$ поділки. Ціна поділки аналогової шкали $Ц_{АН}=U_{макс}/N_{АН}=5/1023=0,0049$ В. Величина напруги 5 В – це опорна напруга АЦП. Тоді уставка спрацювання МСЗ для її завантаження в АЦП дорівнює: $N_{МСЗ}=U_{МСЗ}/Ц_{под}=4/0,0049=816,3$ поділки. Отримане число округляємо до цілого в меншу сторону і перетворюємо на двійкове число згідно з табл. 5.20.

Таблиця 5.20 – Перетворення уставки спрацювання 816 на двійкове число

Число	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1
Номер розрядів	2^9	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
Двійк. код	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0

Код 1100110000 уставки спрацювання МСЗ завантажується в МК з використанням комп'ютера та вбудованого в мікроконтролер

периферійного пристрою прийомопередавача UART. Алгоритм підпрограми МСЗ наведений на рис. 5.15.

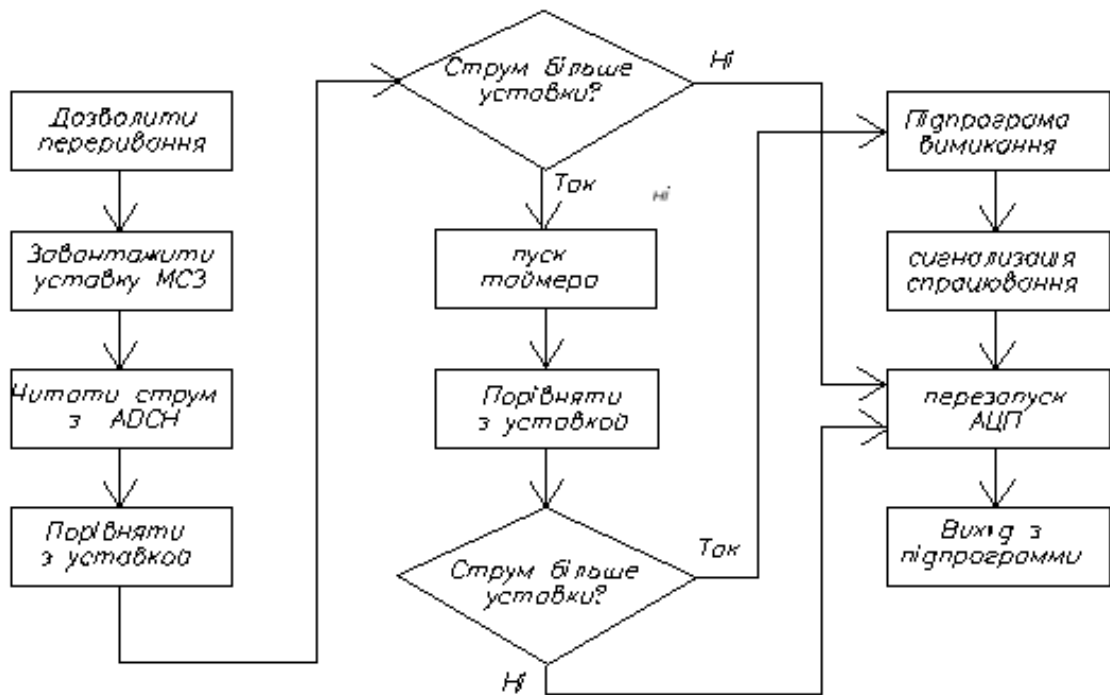


Рис. 5.15. Алгоритм підпрограми МСЗ

Команди для цього алгоритму зведені в табл. 5.21.

Таблиця 5.21 – Команди підпрограми МСЗ

Команди	Коментарі до команд
MTZ:	Мітка підпрограми МСЗ
push r16	Завантаження в стек даних регістра r16 з основної програми
ldi r16, 0b11001100	Завантаження коду уставки спрацювання МСЗ
in r17, ADCH	Зчитування даних зі старшого регістра даних АЦП
cp r17, r16	Порівняння поточного струму з уставкою спрацювання
rcall timer	Якщо r17-r16 > 0, то виклик підпрограми витримки часу
cp r17,r16	Порівняння поточного струму з уставкою
brlo Perezapusk	Якщо r17-r16 < 0, то перезапуск АЦП
rcall otkl	Якщо r17-r16 > 0, то виклик підпрограми відключення
sbi portb,4	Увімкнення світлодіода для сигналізації спрацювання МСЗ
Perezapusk:	Мітка для перезапуску АЦП
ldi r16, 0b11001100	Завантаження двійкового коду
out ADCSRA, r16	Налаштування регістра ADCSRA для перезапуску АЦП
pop r16	Пересилка зі стека даних r16 в основну програму
reti	Вихід з підпрограми переривань

Відповідно до алгоритму спочатку завантажується уставка спрацювання МСЗ. Далі зчитується двійковий код поточного струму з регістра ADCH і порівнюється з уставкою МСЗ. Якщо струм більше уставки, то вмикається таймер для часової затримки. Після часової затримки знову перевіряється величина поточного струму: якщо струм зменшився, то АЦП перезапускається, а потім – вихід із підпрограми. Такий випадок може бути при пуску високовольтного двигуна, коли під час пуску струм виростає в 5 і більше разів номінального, а після закінчення пуску струм зменшується. Якщо після часової затримки двійковий код з датчика струму залишається більшим за код уставки, то викликається підпрограма відключення вимикача. Далі програмно відбувається перезапуск АЦП і вихід з підпрограми.

Якщо не зчитувати два молодших розряди числа з молодшого регістра ADCL, то абсолютна похибка вимірювання напруги дорівнює: ціна поділки помножена на кількість поділок $\Delta = N_{\text{МСЗ}} \cdot \text{Цпод} = 3 \cdot 0,0049 = 0,0147$ В. Відносна похибка дорівнює $\Delta\% = (0,0147/4) \cdot 100 = 0,36$ %. Для захисту похибка допускається до 10 %, тому можна не враховувати два молодших розряди, яким відповідають три молодші поділки аналогової шкали.

Зміст команди «sr r17, r16» полягає у порівнянні шляхом віднімання з числа в регістрі r17 числа в регістрі r16. Якщо різниця менше «нуля», то число в регістрі r17 менше числа в регістрі r16, тобто поточний струм менше струму уставки і відключати вимикач не потрібно. Тоді згідно з алгоритмом потрібно перезапустити АЦП та вийти із підпрограми. Для цього використовується команда умовного переходу за умовою «менше» «brlo regezarusk», тобто якщо різниця $r17 - r16 < 0$, то необхідно перейти на перезапуск АЦП. Якщо поточний струм більше уставки, наступна команда «rcall timer» повинна викликати підпрограму витримку часу.

Після витримки часу необхідно ще раз порівняти поточний струм з уставкою МСЗ, оскільки за час витримки часу АЦП продовжує вимірювати струм, який може стати менше уставки спрацювання. Якщо струм після витримки часу залишився більше струму уставки, то необхідно викликати підпрограму відключення вимикача командою «rcall otkl». Після спрацювання МСЗ перезапускається АЦП і відбувається вихід з підпрограми МСЗ.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Пояснити, чому необхідно блокувати повторне вмикання вимикача після його аварійного відімкнення при натиснутій кнопці «Увімкнути».
2. В яких границях допускається напруга живлення мікроконтролера?
3. Які способи виклику підпрограм використані в алгоритмі керування вимикачем?

4. Пояснити призначення директив Асемблера.
5. Пояснити призначення таблиці переривань.
6. Пояснити роль стека в роботі мікроконтролера.
7. Яким чином реалізована програма вимикання вимикача при коротких замиканнях?
8. Яким чином реалізована програма вимикання вимикача при струмових перевантаженнях?
9. У чому полягає суть програмування компаратора?
10. У чому полягає суть програмування аналогово-цифрового перетворювача?
11. У чому полягає суть програмування портів на вхід і на вихід?
12. Пояснити, чому при виконанні підпрограми струмової відсічки забороняються інші переривання.
13. Пояснити, чому при виконанні підпрограми максимального струмового захисту дозволяються інші переривання.

6. МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ЗАХИСТ І АВТОМАТИКА ТРАНСФОРМАТОРІВ

6.1. Вибір типів захистів та автоматики для трансформаторів

Під час проектування нових підстанцій і реконструкції діючих згідно з п. 3.2.4 “Правил улаштування електроустановок (ПУЕ)” потрібно застосовувати МПЗА, які мають кращу здатність до налаштування, більші можливості компенсації впливу перехідних процесів та більшу гнучкість в реалізації уставок спрацювання та схемних рішень.

Для трансформаторів згідно з п. 3.2.54 ПУЕ мають бути передбачені захисти від таких видів пошкоджень і ненормальних режимів роботи:

- міжфазних коротких замикань в обмотках високої напруги (ВН) і низької напруги (НН) та на їх виводах;
- однофазних коротких замикань на металеві частини трансформатора, з'єднані із землею;
- міжвиткових коротких замикань в обмотках ВН і НН;
- від струмів в обмотках ВН і НН, спричинених перевантаженням трансформатора більше 140%;
- від струмів в обмотках ВН і НН, спричинених зовнішніми короткими замиканнями, тобто короткими замиканнями на лініях, що відходять;
- від зниження рівня масла в корпусі трансформатора.

Для захисту трансформатора від вищеназваних пошкоджень застосовують такі захисти:

- диференційний захист, як основний захист від міжфазних коротких замикань обмоток ВН і НН та їх виводів;
- максимальний струмовий захист, підключений до нейтралі обмотки ВН, з'єднаної у “зірку” від однофазних коротких замикань на землю;
- максимальний струмовий захист від симетричних перевантажень трансформатора з дією на сигнал черговому персоналу;
- максимальний струмовий захист оберненої послідовності від зовнішніх коротких замикань;
- газовий захист від міжвиткових коротких замикань в обмотках ВН і НН та від зниження рівня охолоджувального масла в розширювальному баку трансформатора;
- захист від однофазних замикань на землю обмотки НН з ізольованою нейтраллю, з'єднаною у “трикутник” з дією на сигнал – так званий захист нульової послідовності.

Струм спрацювання диференційного захисту трансформаторів без урахування гальмування рекомендовано приймати не більшим за 1,5 номінального струму трансформатора.

Згідно п. 3.2.72 ПУЕ на трансформаторах потужністю (0,4-5,6) МВ·А необхідно передбачати струмову відсічку без витримки часу. Від можливого

перевантаження необхідно передбачати максимальний струмовий захист від струмів, зумовлених перевантаженням обмоток, з дією на сигнал.

Максимальний струмовий захист є резервним і повинен бути налаштований від максимального навантаження струму. Його встановлюють з боку вищої напруги трансформатора, який захищається та на стороні нижчої напруги в лінії всіх напрямків до вимикача нижчої напруги трансформатора. Він захищає виводи трансформатора на стороні низької напруги та частини обмотки трансформатора від міжфазних коротких замикань.

Згідно з п. 3.2.57 ПУЕ для захисту від пошкоджень на виводах, а також від внутрішніх пошкоджень треба передбачати поздовжній диференційний струмовий захист без витримки часу на трансформаторах потужністю 6,3 МВА і більше, а також на трансформаторах потужністю 4 МВА і вище при їх паралельній роботі з метою селективного вимкнення пошкодженого трансформатора. Поздовжній диференційний захист може бути передбачено на трансформаторах меншої потужності, але не меншої за 1 МВА, якщо струмова відсічка не задовольняє вимоги чутливості, а максимальний струмовий захист має витримку часу, більшу за 0,5 с.

Згідно з п. 3.2.58 ПУЕ для МПЗА поздовжній диференційний струмовий захист потрібно виконувати відлаштованим від стрибків струму намагнічування, перехідних і усталених струмів небалансу із застосуванням спеціальних алгоритмів.

Згідно з п. 3.2.22 ПУЕ при оцінювання чутливості основних захистів необхідно забезпечувати такі найменші коефіцієнти чутливості:

1) максимальні струмові захисти з пуском і без пуску за напругою, за складовими зворотної або нульової послідовностей:

- для органів струму і напруги – приблизно 1,5;

- для органу струму і напруги зворотної та нульової послідовності – приблизно 1,5;

- для органу напрямку потужності, увімкненого на повний струм і напругу не нормується за потужністю і приблизно 1,5 за струмом;

- для максимальних струмових захистів трансформаторів з нижчою напругою 0,23–0,4 кВ найменший коефіцієнт чутливості приблизно 1,5;

2) поздовжні диференційні захисти трансформаторів, а також повний диференційний захист шин – приблизно 2,0.

Пристрій резервування відмови вимикачів (ПРВВ) потрібен для відключення трансформатора іншими вимикачами будь-якого суміжного елемента, якщо була відмова спрацьовування вимикача.

Згідно з п. 3.2.56 ПУЕ необхідно передбачити газовий захист від пошкоджень усередині бака, які супроводжуються виділенням газу, і від зниження рівня масла треба передбачити для:

- трансформаторів потужністю 6,3 МВ А і більше;

- внутрішньоцехових знижувальних трансформаторів потужністю 630 кВ А і більше.

Газовий захист можна встановлювати також на трансформаторах потужністю 1–4 МВА. Газовий захист має діяти на сигнал у разі слабкого газоутворення і зниження рівня масла та на вимкнення за інтенсивного газоутворення і подальшого зниження рівня масла.

Згідно з п. 3.3.1 ПУЕ для забезпечення надійності електропостачання і стійкості енергосистеми для трансформаторів необхідно передбачити:

1) автоматичне повторне ввімкнення (АПВ) трансформаторів під напругу після їх захисного автоматичного вимкнення;

2) автоматичне ввімкнення резерву (АВР) живлення секцій шин після відключення одного трансформатора двотрансформаторної підстанції.

Згідно з п. 3.3.2 ПУЕ пристрої АПВ треба передбачати для швидкого відновлення живлення споживачів шляхом автоматичного ввімкнення вимикачів, вимкнених пристроями захисту. Досвід експлуатації показує, що частина КЗ викликаних перекриттям ізоляції, перекручуванням проводів та іншими причинами при досить швидкому вимкненні пошкоджень самоусувається.

Пристроями АПВ мають бути оснащені всі поодинокі працюючі трансформатори потужністю 1000 кВА та більше і трансформатори меншою потужністю, що живлять споживачів першої категорії.

Згідно з п. 3.3.25 ПУЕ на двотрансформаторних знижувальних підстанціях за роздільної роботи трансформаторів, як правило, треба передбачати пристрої АПВ шин середньої та нижчої напруги в поєднанні з пристроями АВР.

Для двотрансформаторної підстанції, у нормальному режимі якої передбачають паралельну роботу трансформаторів на шини цієї напруги, допускається додатково до пристрою АПВ встановлювати пристрій АВР, призначений для режиму, коли один із трансформаторів виведено в резерв.

Згідно з п. 3.3.26 ПУЕ пристроями АПВ треба обладнувати всі одиничні знижувальні трансформатори потужністю понад 1 МВА, які мають вимикач і максимальний струмовий захист з живильного боку, якщо вимкнення трансформатора призводить до знеструмлення електроустановок споживачів. АПВ повинно спрацьовувати при аварійному вимкненні і не повинно спрацьовувати при оперативному вимкненні.

Згідно з п. 3.3.30 ПУЕ пристрої АВР застосовують для відновлення живлення споживачів шляхом їх автоматичного приєднання до резервного джерела живлення за вимкнення робочого джерела живлення та знеструмлення електроустановок споживача. Пристрої АВР треба передбачати для відновлення живлення споживачів першої категорії надійності електропостачання шляхом автоматичного ввімкнення резервного устаткування після вимкнення робочого устаткування для недопущення порушення технологічного процесу. Перерви живлення

споживачів здебільшого визначаються лише часом увімкнення вимикача резервного джерела і становлять 0,3-0,8 с.

Дія АВР має бути одноразовою для того, щоб не допустити увімкнення кількох разів на КЗ. Для того щоб схема АВР діяла при зникненні напруги на шинах, що живлять робоче джерело, коли його вимикач залишається ввімкненим, схема АВР повинна доповнюватися пусковим пристроєм мінімальної напруги.

6.2. Мікропроцесорний диференційний захист трансформаторів

Мікропроцесорний диференційний захист трансформаторів призначений для захисту від внутрішніх коротких замикань (КЗ). Внутрішніми КЗ трансформаторів є КЗ фазних обмоток на корпус, КЗ між фазними первинними і вторинними обмотками, міжфазні КЗ на виводах. Принцип дії диференційного захисту пояснюється схемою, що надана на рис. 6.1.

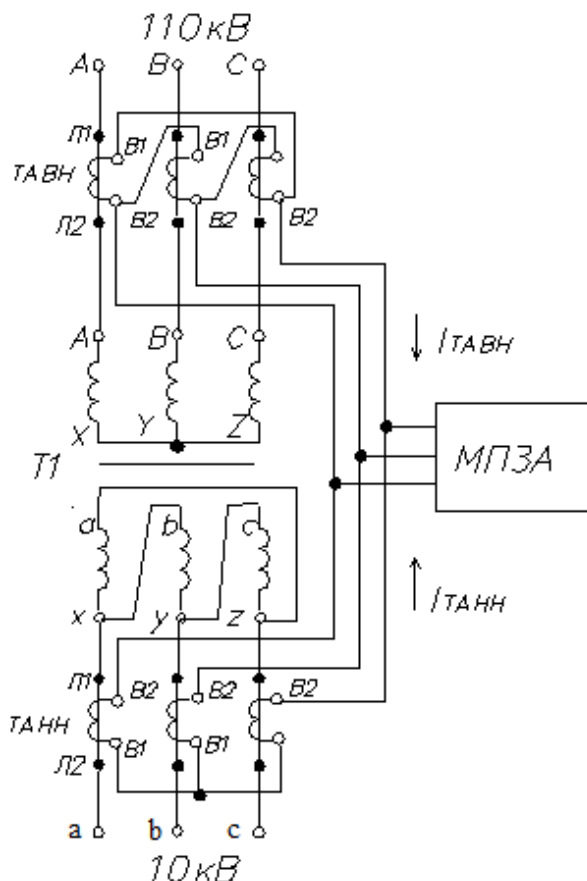


Рис. 6.1. Пояснююча схема принципу дії диференційного захисту

Схема містить трансформатори струму ТАВН і ТАНН на сторонах обмоток ВН і НН, вторинні обмотки яких з'єднані між собою зустрічно. Струми через входні кола МПЗА протікають зустрічно, тобто віднімаються, і через входні кола МПЗА протікає різниця вторинних струмів. Трансформатори струму ТАВН і ТАНН повинні мати такі коефіцієнти трансформації, щоб їхні вторинні струми в нормальному режимі роботи трансформатора і при зовнішніх КЗ за трансформатором були рівні. Тоді різниця струмів на входних колах МПЗА дорівнює нулю і МПЗА не спрацьовує. На практиці це неможливо реалізувати, тому

у нормальному режимі й у режимі зовнішнього КЗ різниця вторинних струмів не дорівнює нулю, тобто має місце так званий струм небалансу:

$$I_{НБ} = I_{2ТАВН} - I_{2ТАНН} > 0, \quad (6.1)$$

де $I_{2ТАВН}, I_{2ТАНН}$ – вторинні струми трансформаторів струму при зовнішньому короткому замиканні.

Для того щоб не було помилкового спрацьовування захисту, уставка спрацьовування диференційного захисту визначається за формулою:

$$I_{сп} = 1,2I_{НБ}. \quad (6.2)$$

При внутрішньому КЗ у зоні між ТАВН і ТАНН вторинний струм від ТАНН дорівнює нулю при односторонньому живленні або змінює напрямок, тобто складається з вторинним струмом від ТАВН при паралельній роботі трансформаторів. У обох випадках через вхідні кола МПЗА протікає струм, і воно спрацьовує.

Усе вищевикладене справедливо для трифазних трансформаторів із групою з'єднання обмоток «зірка-зірка-нуль», первинні і вторинні струми яких збігаються за фазою. Однак трансформатори з напругою 110/10 кВ найчастіше мають групу з'єднання обмоток «зірка-трикутник-11», первинні і вторинні струми яких мають фазовий зсув тридцять електричних градусів. Це приводить до подальшого збільшення струму небалансу за рахунок фазового зсуву і до завищення уставки спрацьовування МПЗА, і до відключення трансформатора при великих струмах КЗ.

Для компенсації впливу фазового зсуву на струм небалансу вторинні обмотки ТАВН і ТАНН з'єднують у схему протилежну схемі з'єднання обмоток ВН і НН трансформатора. Схему мікропроцесорного диференційного захисту трансформатора показано на рис. 6.2.

При цьому вторинні струми ТАВН і ТАНН мають фазовий зсув 180 електричних градусів (у протифазі), а отже, у вхідних колах МПЗА віднімаються. У мікропроцесорних диференційних захистів такий фазовий зсув усувають алгоритмічно і застосовують схему з'єднання вторинних обмоток ТС у "зірку".

З метою резервування неспрацьовування диференційного захисту відповідно до вимог ПУЕ встановлюється обов'язково на всіх трансформаторах потужністю більше 400 кВА максимальний струмовий захист (МСЗ) з витримкою часу.

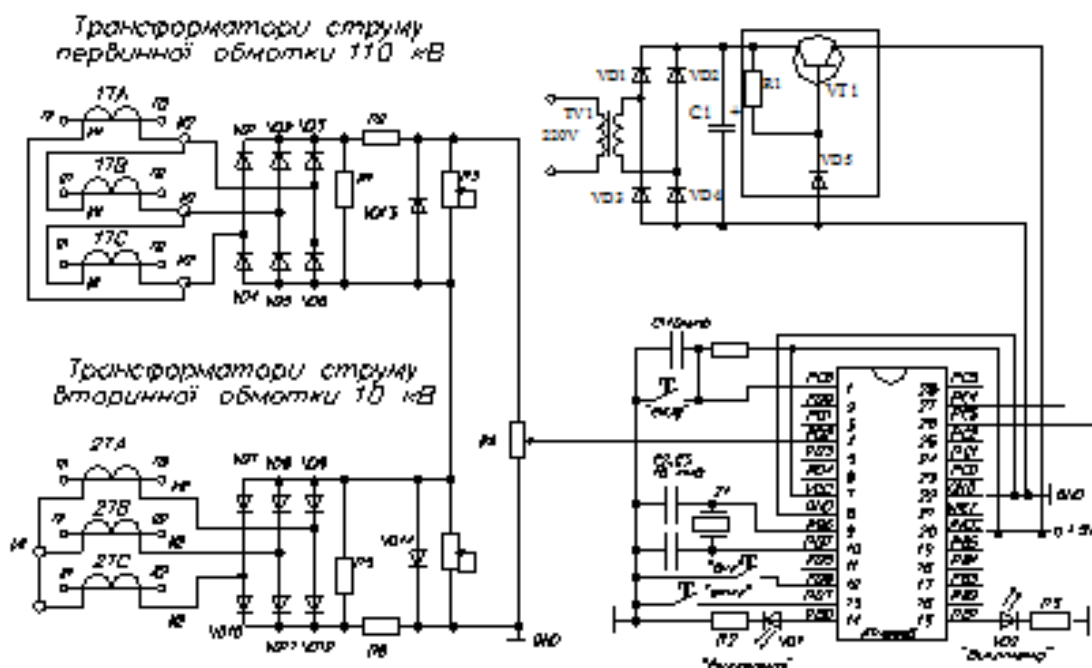


Рис. 6.2. Схема мікропроцесорного диференційного захисту трансформатора

Уставка спрацьовування МСЗ визначається за формулою:

$$I_{\text{МЗЗ}} = \frac{K_{\text{зап}} \cdot K_{\text{сзп}}}{K_{\text{п}}} I_{\text{ВН}}^{\text{м}} \quad (6.3)$$

де $K_{\text{зап}} = 1,2$ - коефіцієнт запасу;

$K_{\text{сзп}}$ – коефіцієнт самозапуску високовольтних електродвигунів;

$K_{\text{п}} = 0,8$ – коефіцієнт повернення струмового реле;

$I_{\text{ВН}}^{\text{м}}$ – максимальний робочий струм обмотки ВН, А.

Витримка часу спрацьовування МСЗ трансформатора повинна бути більше на ступінь селективності $\Delta t = 0,4 \text{ сек}$ відповідно до ступеневого принципу побудови захистів від витримки часу МСЗ ліній, що відходять, але менш часу термостійкості ізоляції трансформатора (не більше 3 с).

На двообмоткових трансформаторах МСЗ влаштовують на стороні ВН, але при спрацьовуванні з витримкою часу МСЗ діє на вимикання вимикачів з обох сторін ВН і НН трансформатора.

Перевірка чутливості МСЗ полягає у розрахунку коефіцієнта чутливості і його відповідності вимогам ПУЕ, тобто:

$$K_{\text{МСЗ}} = \frac{0,5 \cdot I_{\text{ВН}}^{(1\text{К})}}{I_{\text{МСЗ}}} > 1,5. \quad (6.4)$$

На двообмоткових трансформаторах МСЗ установлюють на стороні обмотки ВН, при цьому вона діє на відключення вимикачів на обмотках ВН і НН. На триобмоткових трансформаторах і з розщепленими вторинними обмотками МСЗ встановлюють на сторонах обмоток НН і СН.

6.3. Мікропроцесорний захист трансформаторів від зовнішніх коротких замикань

Зовнішніми короткими замиканнями (КЗ) трансформаторів називають одно-, двох- і трифазних КЗ за межами диференційного захисту. При цьому виникають несиметричні режими за напругою і струмом. Принцип дії захистів від зовнішніх КЗ заснований на вимірюванні ступеня їх несиметрії, величина якої визначається методом симетричних складових. Суть методу полягає в тому, що вихідна несиметрична трифазна система струмів або напруг математично представляється у вигляді трьох симетричних систем, векторне додавання яких дає вихідну несиметричну (рис. 6.3).

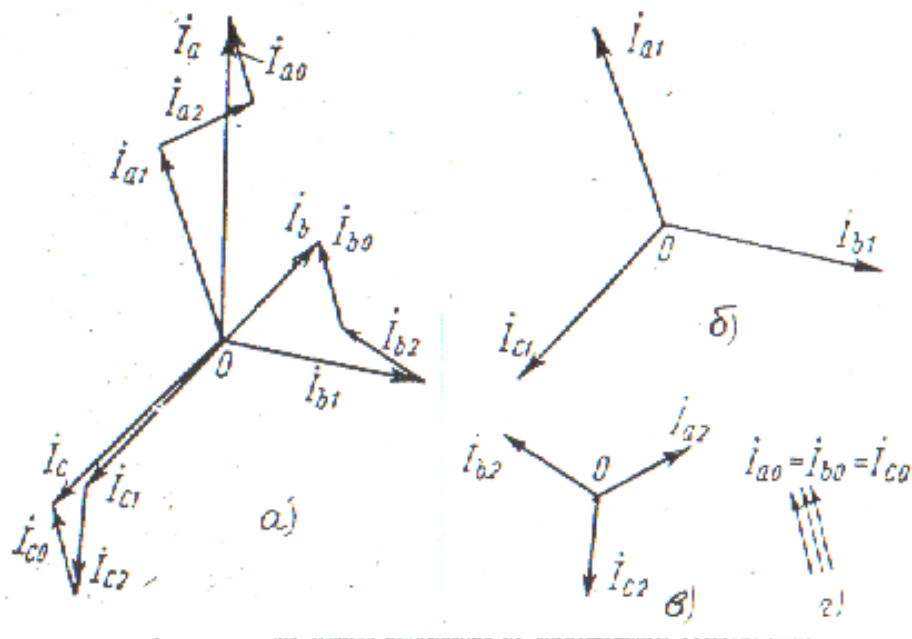


Рис. 6.3. Метод симетричних складових: а) несиметрична система, б) складові прямої послідовності, в) складові зворотної послідовності, г) складові нульової послідовності

Симетричні складові одержали назву: складові прямої послідовності (рис. 6.3б), складові зворотної послідовності (рис. 6.3в), складові нульової послідовності (рис. 6.3г). Їхня відмінність між собою полягає у такому. У складових прямої послідовності вектор струму I_{a1} фази А випереджає за часом, тобто, за фазою, вектори I_{b1} й I_{c1} на 120° і 240° , тобто має місце пряме чергування фаз $A_1B_1C_1$. У складових зворотної послідовності вектор струму I_{a2} фази А випереджає вектори I_{b2} й I_{c2} на 240° і 120° , тобто має місце зворотне чергування фаз $B_2A_2C_2$. У складових нульової послідовності вектори струмів $I_{a0}=I_{b0}=I_{c0}$ не мають фазового зсуву за часом, тобто збігаються за фазою, а отже, струми не можуть протікати по фазних проводах, а тільки через нульовий провід.

Для виявлення однофазного короткого замикання треба знати величину напруг або струмів нульової послідовності, а для двофазного КЗ теж, але зворотної послідовності. Такі захисти називають струмові захисти симетричних складових.

Методика розрахунку складових нульової і зворотної послідовності заснована на тому, що підсумовування векторів симетричних складових має дати вихідну несиметричну систему, тобто:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\ I_b &= I_{b0} + I_{b1} + I_{b2} \\ I_c &= I_{c0} + I_{c1} + I_{c2} \end{aligned} \quad (6.5)$$

З системи (6.5) невідомі вектори симетричних складових не можуть бути визначені, тому що векторів сім (вектори нульової послідовності рівні), а рівнянь три. Для зменшення кількості невідомих векторів треба складові векторів фаз В і С виразити через вектори фази А. Для цього використовують так званий оператор повороту $a = e^{j120^\circ}$, множення якого на кожній з векторів повертає останній на 120° проти годинникової стрілки без зміни модуля. Множення вектора на квадрат оператора $a^2 = e^{j240^\circ}$ повертає його проти годинникової стрілки на 240° . Множення на куб оператора $a^3 = e^{j360^\circ}$ дорівнює самому вектору, тобто $a^3 I = I$. Тоді система (6.5) може бути записана через складові одного вектора, наприклад, вектора I_a , з урахуванням що $I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$. Тоді система рівнянь має вигляд

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}, \\ I_b &= I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2}, \\ I_c &= I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Для визначення вектора симетричних складових нульової послідовності I_{a0} складемо почленно рівняння системи (6.6) і одержимо $I_a + I_b + I_c = 3I_{a0}$, оскільки $I_{a1} + a^2 I_{a1} + a I_{a1} = 0$; $I_{a2} + a I_{a2} + a^2 I_{a2} = 0$, тобто сума трьох векторів симетричної системи дорівнює нулю. Тоді модуль і фаза вектора нульової послідовності I_{a0} дорівнює

$$I_{a0} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}. \quad (6.7)$$

Для визначення модуля й фази вектора складових прямої послідовності I_{a1} помножимо друге рівняння системи (6.6) на a , а третє на a^2 і, з урахуванням того, що $a^3 I_{a1} = I_{a1}$, а $a^4 I_{a1} = a I_{a1}$, і одержимо:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}, \\ a I_b &= a I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}, \\ a^2 I_c &= a^2 I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2}. \end{aligned} \quad (6.8)$$

Після додавання рівнянь одержимо: $I_a + a I_b + a^2 I_c = 3 I_{a1}$.

Звідки модуль і фаза вектора прямої послідовності I_{a1} дорівнюють:

$$I_{a1} = \frac{I_a + aI_b + a^2I_c}{3}. \quad (6.9)$$

Для визначення вектора складових зворотної послідовності I_{a2} помножимо друге рівняння в (6.6) на a^2 , а третє на a і аналогічно одержимо модуль і фазу складовій вектора зворотної послідовності:

$$I_{a2} = \frac{I_a + a^2I_b + a I_c}{3}. \quad (6.10)$$

Складові векторів фаз В і С визначаються аналогічним способом.

Таким чином, для побудови МП-захистів зі спрацюванням по симетричних складових складають спеціальні алгоритми для розрахунку симетричних складових зворотної і нульової послідовності. Такі захисти називають максимальним струмовим захистом (МСЗ) симетричних складових.

МСЗ зворотної послідовності застосовується на трансформаторах від зовнішніх двофазних коротких замикань, коли у фазних струмах й у напругах з'являються складові зворотної послідовності. Для їхнього виявлення використовують алгоритми розрахунку складових зворотної послідовності, в результаті отримують сигнал пропорційний ступеню несиметрії вхідного трифазного струму або напруги.

МСЗ нульової послідовності (МСЗНП) застосовується для захисту трансформаторів від однофазних замикань на корпус. У мережах із глухозаземленою нейтраллю захист діє на відключення, а в мережах з ізольованою нейтраллю – на сигналізацію для оперативного персоналу.

Захист трансформатора від однофазних коротких замикань обмотки ВН 110 кВ з глухозаземленою нейтраллю може бути реалізованим на принципі вимірюванні струму в нейтралі обмотки ВН трансформатора, який з'являється лише у випадках однофазних коротких замикань на землю. Уставка спрацювання МСЗНП розраховується за емпіричною формулою

$$I_{МСЗН} = 0,5I_{ВН}^H, \quad (6.11)$$

де $I_{ВН}^H$ – номінальний струм первинної обмотки.

Перевірка МСЗНП на чутливість виконується згідно з ПУЕ за величиною коефіцієнта чутливості $K_{МСЗН}$, тобто,

$$K_{МСЗН} = \frac{I_{ВН}^{(1K)}}{I_{МСЗН}} > 1,5, \quad (6.12)$$

де $I_{ВН}^{(1K)}$ – струм у фазі обмотки ВН, замкненій на землю.

Захист трансформатора від однофазних коротких замикань обмотки ВН 110 кВ з глухозаземленою нейтраллю може бути реалізованим на принципі складання струмів (рис. 6.4).

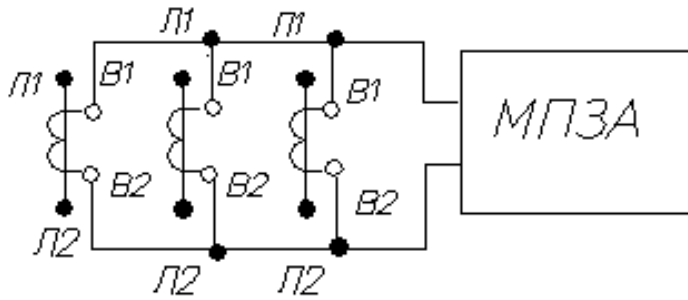


Рис. 6.4. Схема струмового захисту нульової послідовності

Принцип дії захисту заснований на геометричному підсумовуванні фазних струмів або напруг. При симетричних режимах і при двофазних КЗ їхня сума $3I_0=0$; $3U_0=0$ дорівнює нулю, а при однофазних КЗ їхня сума більше нуля, і захист спрацьовує. У мережах напруги 10 кВ з ізолюваною нейтраллю при однофазному замиканні на землю первинні обмотки трансформатора напруги неушкоджених фаз виявляються під лінійною напругою (рис. 6.5).

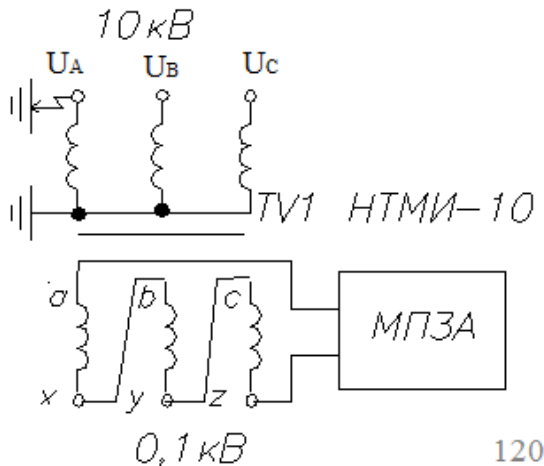


Рис. 6.5. Схема захисту напруги нульової послідовності при однофазному КЗ

Максимальний струмовий захист трансформаторів з напругами 10/0,4 кВ здійснюється на вході живильної лінії 10 кВ і буде розглянутий нижче. Підключення самого трансформатора до живильної лінії згідно з нормами проектування підстанцій 10/0,4 кВ виконується через роз'єднувач і запобіжник.

Розрахунковий струм плавкої вставки запобіжника визначається за формулою $I_{ПВ}^P = 2I_{ВН}^H$. По розрахунковому струмі приймають плавку вставку зі стандартним номінальним струмом $I_{ПВ}^H$ у більшу або меншу сторону за законами округлення.

Відповідно до вимог ПУЕ запобіжник на стороні ВН перевіряється на чутливість і селективність. Чутливість перевіряється за коефіцієнтом чутливості за формулою $K_{чг} = I_{ВН}^{(1К)} / I_{ПВ}^H > 3$, де $I_{ВН}^{(1К)}$, $I_{ПВ}^H$ – струм в обмотці ВН при однофазному КЗ на стороні НН і номінальний струм плавкої вставки.

Селективність запобіжника на стороні ВН перевіряється за допомогою порівняння ампер-секундних (захисних) характеристик запобіжників на сторонах ВН і НН шляхом порівняння часу їхнього спрацьовування. Запобіжник на стороні ВН вважається селективним, якщо час його спрацьовування в три рази більше часу спрацьовування запобіжника на стороні 0,4 кВ, тобто $t_{\text{НВ}}^{\text{НН}} > 3t_{\text{НВ}}^{\text{НН}}$. Час спрацьовування запобіжника визначається за так званими захисними характеристиками (рис. 6.6).



Рис. 6.6. Захисні характеристики запобіжника серії ПКТ-10

6.4. Мікропроцесорний газовий захист трансформаторів

Струми коротких замикань в обмотках трансформаторів створюють значні електродинамічні сили, які викликають деформацію обмоток, взаємну вібрацію витків із взаємним тертям між ними. Внаслідок цих явищ відбувається руйнування міжвиткової ізоляції й утворення короткозамкнених витків (кз-витків), як показано на рис. 6.7. При змінному струмі в короткозамкнених витках обмотки індукується ЕРС взаємоіндукції. Напрямок ЕРС взаємоіндукції короткозамкнутих витків збігається з напрямком ЕРС самоіндукції котушки, оскільки створюються одним магнітним потоком.

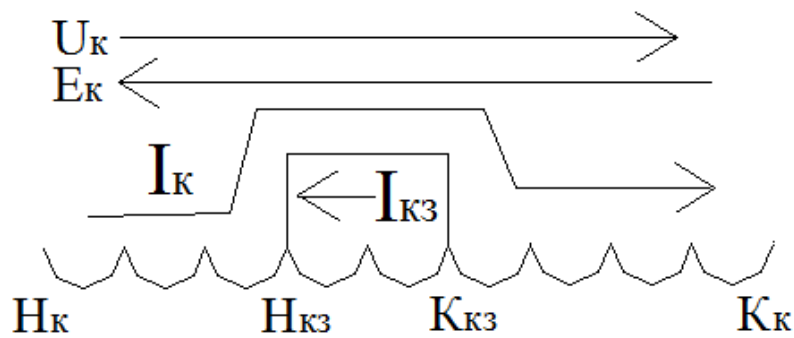


Рис. 6.7. Принцип утворення короткозамкнених витків в обмотках трансформаторів

Якщо ЕРС самоіндукції спрямована від кінця котушки до її початку, то ЕРС взаємоіндукції короткозамкнених витків теж спрямована від кінця короткозамкнених витків до початку. Таким чином, ЕРС взаємоіндукції короткозамкнених витків створює струм у протифазі струму обмотки, і магнітний потік від них знаходиться в протифазі основному потоку. Результуючий магнітний потік зменшується, ЕРС самоіндукції зменшується, споживання струму збільшується.

При появі кз-витків струм в обмотках зростає несуттєво, і струмовий захист обмоток не реагує на їх появу. Але в короткозамкнених витках унаслідок їхнього низького опору протікає значний струм, який перегріває ізоляцію, відбувається її руйнування, і обмотка виходить з ладу.

Принцип дії захисту від кз-витків побудований на тому, що в місці утворення кз-витків відбувається місцеве нагрівання охолоджувального масла до температури його розкладання на летючі гази. Таким чином, утворення кз-витків можна визначити за утворенням летючих газів при місцевому нагріванні масла і його розкладанні при цьому за допомогою спеціального газового реле. Тому захист від кз-витків одержав назву газового захисту, який, окрім цього, забезпечує захист від неприпустимого зниження рівня охолоджувального масла.

При утворенні малої кількості кз-витків трансформатор може залишатися якийсь час у роботі до виводу в ремонт. При значній кількості кз-витків трансформатор повинний миттєво відключатися від мережі.

Таким чином, захист від кз-витків повинен мати два ступені спрацьовування: 1-й ступінь при малій кількості кз-витків діє на сигналізацію персоналу; 2-й ступінь – на відключення за великої кількості кз-витків.

Газовий захист згідно з вимогами ПУЕ встановлюється обов'язково на трансформаторах потужністю 6,3 МВА і більше, хоча ПУЕ допускає його установку і на трансформаторах меншої потужності за наявності чергового персоналу.

Для газового захисту трансформаторів застосовують газове реле серії РГЧЗ-66 чашкового типу (рис. 6.8) виробництва Запорізького трансформаторного заводу.

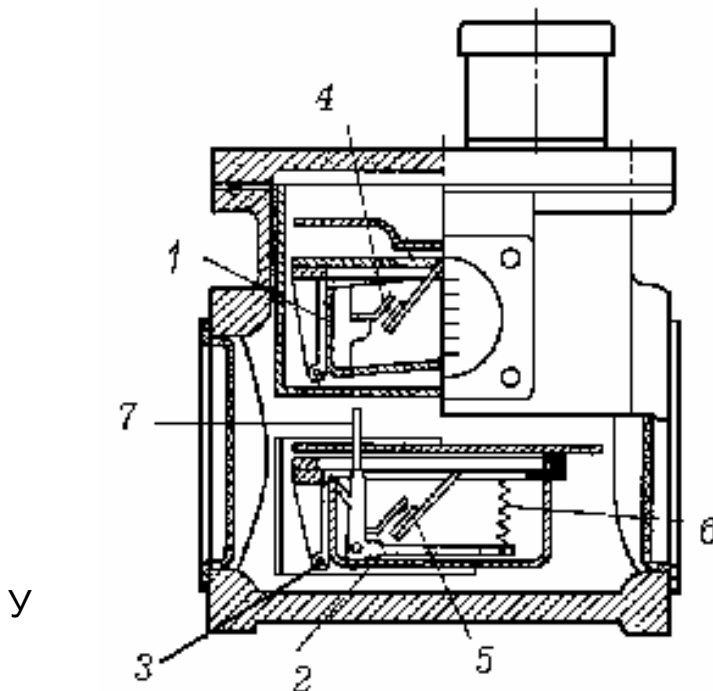


Рис. 6.8. Конструкція газового реле чашкового типу

Реле містить рухомі плоскодонні чашки 1, 2, які виконані з анодованого алюмінію і можуть повертатись відносно нерухомої осі 3. До кожної чашки жорстко закріплено контакт 4, який рухається разом із чашкою. Другий контакт 5 нерухомо закріплений до корпусу реле. верхньому положенні чашки утримують пружини 6. За

пониження рівня оливи в баку трансформатора верхня чашка опиняється в повітрі, але вона заповнена оливою, що в ній залишилася. Пружина відрегульована так, що вона не може утримати у верхньому положенні чашку, наповнену оливою. Тому чашка опускається, і контакти (рухомий 4 та нерухомий 5) верхньої чашки змикаються. Ці контакти діють у колах сигналізації.

Нижня чашка, на відміну від верхньої, має ще пластину 7, жорстко закріплену до чашки перпендикулярно до напрямку руху оливи в патрубку. Пластина призначена для підсилення дії струменя оливи, який, за значних пошкоджень у баку трансформатора, буде переміщатись у патрубок, де встановлене газове реле.

За значних пошкоджень усередині бака трансформатора виникає потік оливи, що разом з продуктами розкладу тисне на пластину. Пластина разом з нижньою чашкою повертається відносно осі 3. Від цього замикаються контакти 4, 5 нижньої чашки, що діють на вимикання трансформатора від мережі. У комплект реле РГЧЗ-66 входять три пластини 7 різної площі, які кріплять до нижньої чашки. Кожна з цих пластин розрахована на певну швидкість руху оливи, тобто визначає уставку газового реле. Ці пластини відповідають таким швидкостям: 0,6; 0,9; 1,2 м/с. Уставку 0,6 м/с застосовують для трансформаторів потужністю до 40 МВА з природною циркуляцією оливи, а також для трансформаторів з дуттям і природною циркуляцією (охолодження типу М та Д). При незначному виділенні газу

витісняється масло з верхньої частини корпусу. Верхня чашка опускається, замикаючи контакт на сигналізацію черговому персоналові. Така ж дія газового реле відбувається при зниженні рівня масла в розширювальному баці.

Газове реле встановлюють у патрубку, що з'єднує бак трансформатора з розширювальним бачком (рис. 6.9).

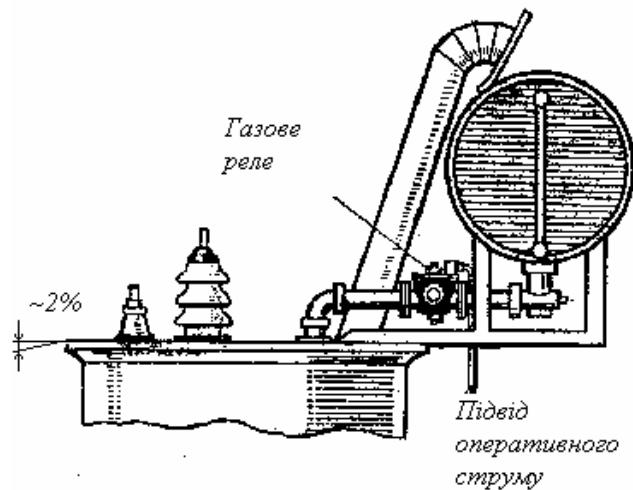


Рис. 6.9. Розміщення газового реле на трансформаторі

Для забезпечення руху газів до газового реле патрубків та верхню кришку бака трансформатора потрібно монтувати з нахилом $\sim 2\%$. При установці нахил труби з газовим реле щодо верхньої кришки трансформатора $1,5\text{...}2\%$ для запобігання скупчення пухирців газу під кришкою. Під час доливання масла в трансформатор і на час виділення повітря після цього газовий захист відключається.

Газовий захист має два органи – сигнальний та вимикаючий: сигнальний діє на сигнал у разі пониження рівня оливи в баку трансформатора та слабкому газоутворенні; вимикаючий діє на вимкнення трансформатора від напруги у разі подальшого пониження рівня оливи, а також за інтенсивного газовиділення. Як було зазначено, за незначних пошкоджень у баку трансформатора у верхній частині корпусу газового реле збираються гази. Зразки цього газу через кран, який розташований в кришці газового реле, відбирають для аналізу в хімічній лабораторії. За хімічним складом газу можна зробити висновок про вид пошкодження трансформатора. Попередній висновок можна зробити за кольором газу, запахом, його горючістю, як показано в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Характерні пошкодження трансформатора

Властивості газу	Можливі пошкодження
Газ без кольору, без запаху	У баку трансформатора є повітря
Газ білого кольору, з різким запахом, не горить	Пошкодження ізоляційних матеріалів обмотки трансформатора, зазвичай, паперу
Газ жовтого кольору, горить	Пошкодження дерев'яних конструкцій трансформатора
Газ темно-сірого (чорного) кольору, легко запалюється	Виткове замикання або пошкодження ізоляції між пластинами магнітопроводу

Пальний газ свідчить про те, що виділяється не повітря, а газ, що виникає при розкладанні масла.

Схему мікропроцесорного газового захисту показано на рис. 6.10.

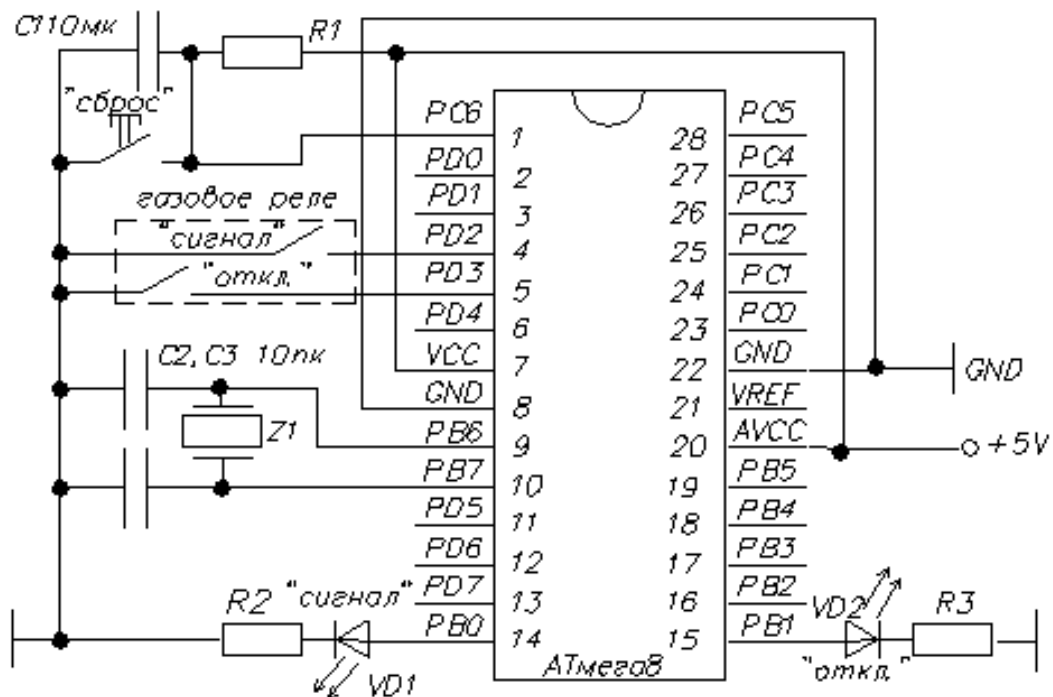


Рис. 6.10. Схема мікропроцесорного газового захисту

Зліва на схемі показано кнопку "скидання", яка підключена до 1-го виводу мікросхеми МК. Скидання МК означає зовнішнє переривання основної програми, тобто виконання основної програми переривається, і в програмний лічильник завантажуються "нулі". "Нулі" є адресою першої комірки FLASH-пам'яті, в якій завантажено 1-шу команду основної програми.

Нижче на схемі показані контакти газового реле "сигнал" та "вимкнути". При зниженні рівня оливи та невеликої кількості короткозамкнених витків в обмотках спрацьовує 1-й ступінь газового захисту та замикає контакт

"сигнал" газового реле. Основна програма переривається та викликається підпрограма увімкнення сигналізації за допомогою світлодіода VD1. Після увімкнення VD1 продовжується виконання основної програми. При подальшому зниженні рівня масла та збільшення кількості короткозамкнених витків в обмотках спрацьовує 2-й ступінь газового захисту, замикається контакт "відключити". Головна програма переривається та виконується підпрограма відключення трансформатора від мережі.

Газовий захист може спрацьовувати один раз на декілька років, тому немає сенсу вводити газовий захист в головну програму для опитування стану його контактів. Тут раціонально використовувати режим зовнішніх переривань під час спрацьовування газового реле. Тобто контакти газового реле підключаються на вхід МК і при їх замиканні переривається головна програма і викликається підпрограма сигналізації або відключення. Початок головної програми починається складанням директив в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Перелік директив Асемблера

Директиви	Коментарі до директив
.device Tmega8	Директива вказує, що програма складена для АТмега8
.include "m8def.inc"	Директива підключає файл з бібліотеки "AVR studio"
.cseg	Директива вказує про запис команд в ROM-пам'ять

Оскільки в головній програмі використовуються зовнішні переривання при спрацьовуванні газового реле, то потрібно писати таблицю переривань в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Програмування таблиці переривань

Команди	Коментарі
.org 0x0000	;адреса 1-ї комірки FLASH
rjmp main	;команда в 1-шу комірки безумовного переходу на головну програму
.org 0x0001	;адреса комірки, для завантаження команди переходу на підпрограму сигналізації при замиканні контакту "сигнал"
rjmp signal	;команда переходу на підпрограму "сигналізація"
.org 0x0002	;адреса комірки для завантаження команди переходу на підпрограму відключення при замиканні контакту "відключення"
rjmp otkl	;команда переходу на підпрограму відключення

При першому зовнішньому перериванні при натисканні кнопки скидання у програмний лічильник завантажується адреса 1-ї комірки, де записано команду безумовного переходу на мітку main, тобто на 1-шу команду основної програми. Далі йдуть два зовнішні переривання від спрацьовування двох контактів газового реле. При спрацьовуванні одного з контактів газового реле відбувається режим зовнішнього переривання. У програмний лічильник завантажуються адреси комірки з таблиці переривань, що відповідають певній зовнішній події. У комірки завантажено команди безумовного переходу на підпрограми "сигналізація" та "відключення". Якщо переривання використовується, то в комірку, що відповідає цьому перериванню з таблиці переривань, пишуть команду переходу "rjmp" на підпрограму; якщо переривання не використовується, то в комірку пишуть команду виходу з переривання "reti".

При використанні переривань початкові комірки FLASH-пам'яті не повинні завантажуватись командами основної програми, інакше при настанні події процесор зчитує дані з цих комірки, а там завантажена незрозуміла команда, отже, МК "зависне". При вмиканні живлення МК у програмний лічильник завантажується адреса першої комірки, у якій знаходиться команда переходу на команду з міткою основної програми. Тобто процесор не читає таблицю переривань, а відразу переходить на основну програму, яка починається з налаштування стека та команди загального дозволу переривань. Команди головної програми зведені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Команди головної програми

Команди	Коментарі
main:	;мітка основної програми
ldi r16, high (RAMEND)	;програмування стека
out SPH,r16	;завантаження адреси стека в покажчик стека
ldi r16, low(RAMEND)	
out SPL, r16	;завантаження адреси стека в покажчик стека
sei	;команда загального дозволу переривань

Команда sei завантажує "одиницю" до 7-го розряду статусного регістра SREG. Далі налаштовуються порти PD2 та PD3 на вхід і підключають внутрішні резистори згідно з табл. 6.5.

Таблиця 6.5 – Команди налаштування порту на вхід

Команди	Коментарі
ldi r16, clr	;налаштування порту на вхід завантаження r16 "0"
out ddrd, r16	;налаштування порту d на вхід
ldi r16, 0b00001100	
out portd , r16	;підключення внутрішніх резисторів до 2-го та 3-го розряду порту D

При розімкнених контактах газового реле на входах PD2 та PD3 сигнал буде "1", тому що до цих виводів підключені внутрішні резистори, які іншим виводом підключені до напруги живлення +5 В. А якщо контакти замикаються, на входах буде логічний "нуль".

Налаштування зовнішніх переривань полягає у завантаженні комбінацій біт у розряди двох 8-розрядних регістрів: GICR, MCUCR. Призначення розрядів регістра GICR для вибору номера входу для зовнішніх переривань: Розряди 6-7 – комбінація біт визначає вибір входу, тобто: "0-1" – вибрано вхід PD3; "1-0" - вибрано вхід PD2; "1-1" – вибрано обидва входи. В решту розрядів завантажуються "нулі". Оскільки вибираємо для зовнішніх переривань обидва входи, то у розряди 6 і 7 завантажуюмо дві "одиниці", як показано в табл. 6.6.

Таблиця 6.6 – Команди налаштування регістра зовнішніх переривань

Команди	Коментарі
ldi R16, 0b11000000	;вибрано входи PD2 та PD3 для зовнішніх переривань
out GICR, R16	;завантаження в периферійний регістр GICR

Переходимо до програмування наступного регістра для зовнішніх переривань під назвою MCUCR, який задає форму сигналу на входах портів, за якого відбувається зовнішнє переривання. Зовнішні переривання можуть викликатися складовими форми імпульсу: зростаючий або спадаючий фронти, високий або низький рівень напруги. Зустрічаються також слова "передній фронт" замість "зростаючий фронт" і "задній фронт" замість "спадаючий фронт". А який варіант краще вибрати? Який зрозуміліший і легше запам'ятати.

Для цього в розряди 0-1-2-3 регістра MCUCR завантажують комбінацію біт, що визначають форму імпульсу на вході для виклику зовнішніх переривань: 1-ша комбінація "0-0-0-0" – спрацювання з появою низького рівня; 2-га комбінація "0-1-0-1" – спрацювання за будь-якої зміни рівня; 3-тя комбінація "1-0-1-0" – спрацювання при спадаючому фронті

імпульсу; 4-та комбінація "1-1-1-1" – спрацьовування при зростаючому фронті імпульсу.

Поки газове реле не спрацювало, контакти розімкнено і на входах логічна "одиниця" від внутрішніх резисторів, які підключені до входів. При спрацьовуванні газового реле контакти замикаються та подають на вхід логічний "нуль". Можна прийняти 1-шу комбінацію "0-0-0-0", тобто спрацьовування з появою низького рівня на входах. Але не можна прийняти цей варіант, тому що контакти будуть постійно замкнуті і постійно викликатимуть переривання. Програма "зависне". Тому ми приймаємо спрацювання переривання по спадаючому фронту імпульсу, тобто 3-ю комбінацію, як показано в табл. 6.7.

Таблиця 6.7 – Команди налаштування регістра зовнішніх переривань

Команди	Коментарі
ldi R16,0b00001010	;вибір форми сигналу для виклику зовнішнього переривання завантажуюмо число в R16
out MCUCR, R16	;спрацьовування переривання по спадаючому фронту імпульсу

У старші розряди цього регістра завантажили "нулі", оскільки ці розряди не працюють.

Команди головної програми не приведені, а приведені команди підпрограми, які будуть викликатися при спрацьовуванні газового реле з таблиці переривань, як показано в табл. 6.8.

Таблиця 6.8 – Команди підпрограми для сигналізації

Команди	Коментарі
signal:	мітка підпрограми для сигналізації
push R16	;дані регістра R16 з основної програми зберегли у стеку
in R17, SREG	;дані регістра SREG переслали в R17 і зберегли в стеку
push R17	
sbi portd, 4	;завантаження "1" у 4-й розряд регістра, увімкнути світлодіод
pop R17	;дістаємо зі стека дані R17
out SREG, R17	;пересилання даних з R17 у SREG
pop R16	;витягаємо зі стека дані R16
reti	;команда виходу з підпрограми переривання

Коли замкнеться контакт «сигнал» газового реле, тобто настане зовнішнє переривання і в програмний лічильник буде завантажено адресу комірки таблиці переривань. У цю комірку завантажено команду безумовного переходу на мітку підпрограми "signal". Перед виконанням підпрограми в стек завантажують дані регістрів з основної програми, тому що ці регістри можуть використовуватись у підпрограмі та змінять свої дані.

У головній програмі цих регістрів немає, їх написали для нагадування про правила написання підпрограм. Підпрограма увімкнює світлодіод "signal". Далі пересилає дані регістрів в основну програму. Причому дані зі стека пересилаються у зворотному порядку за принципом "останній зайшов, перший вийшов". Команда виходу з підпрограми пересилає адресу наступної команди головної програми в програмний лічильник.

При спрацьовуванні 2-го ступеня газового реле все відбувається аналогічно, тільки на виході буде команда відключення вимикача. При одночасному замиканні контактів першою буде виконуватися підпрограма "signal", адреса комірки якої менша в таблиці переривань, а потім виконуватиметься підпрограма на відключення.

6.5. Мікропроцесорний пристрій автоматичного вмикання резерву серії PC80-MABP

Мікропроцесорний пристрій автоматичного увімкнення резерву серії PC80-MABP призначений для виконання функцій автоматичного увімкнення резерву (ABP) на підстанціях 6 кВ – 35 кВ. Загальний вигляд пристрою PC80-MABP показаний на рис. 6.11.

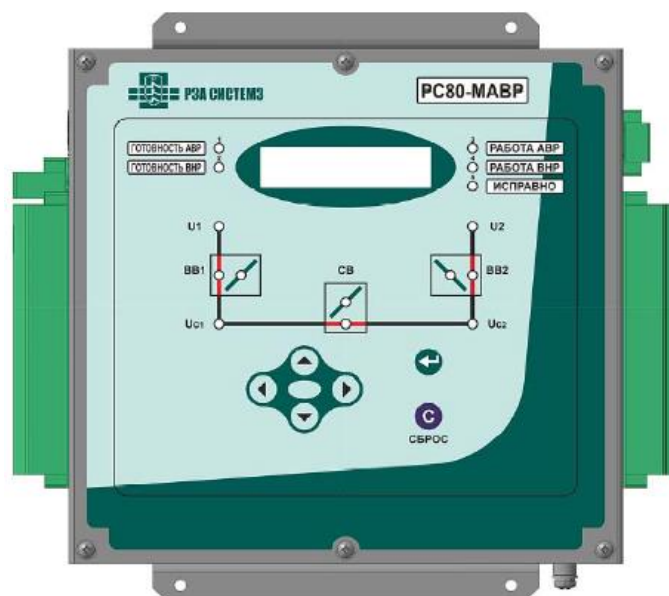


Рис. 6.11. Загальний вигляд пристрою АВР серії PC80-MABP

Пристрій виконує функцію автоматичного увімкнення секційного вимикача при втраті живлення однієї з секцій та функцію автоматичного відновлення нормального режиму (ВНР) після успішного спрацювання АВР.

На передній панелі пристрою зображено мнемосхему підстанції з двома ввідними вимикачами і секційним вимикачем (СВ) і розташовані світлодіодні індикатори положення вимикачів "Увімкнено" і "Вимкнено". Світлодіоди U1 та U2 відображають наявність напруги на вводи 1 та на вводи 2 відповідно. Світлодіоди Uс1 та Uс2 відображають наявність напруги на секції 1 та секції 2 відповідно. Світлодіод «Готовність АВР» увімкнений, за наявності готовності пристрою до спрацювання. У пристрої реалізовано журнал подій.

Інтерфейс USB доступний через роз'єм miniUSB на бічній панелі пристрою. Інтерфейс USB призначений для проведення пусконаладжувальних робіт через стандартний кабель, що входить до комплекту постачання пристрою. На рис. 6.12 показано спрощену схему АВР для керування секційним вимикачем.

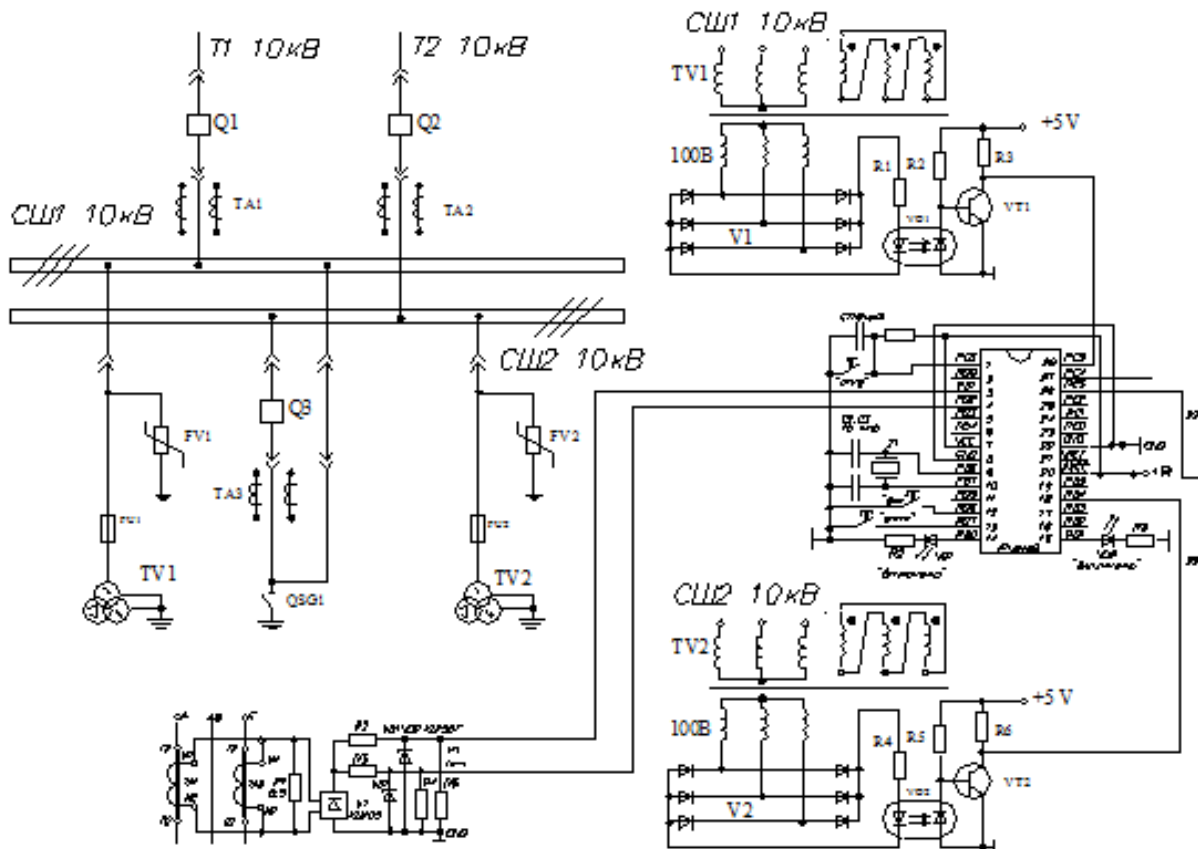


Рис. 6.12. Спрощена схема АВР керування секційним вимикачем

Виходячи зі схеми алгоритм головної програми має вигляд, поданий на рис. 6.13. Програма складається з головної програми та підпрограм.

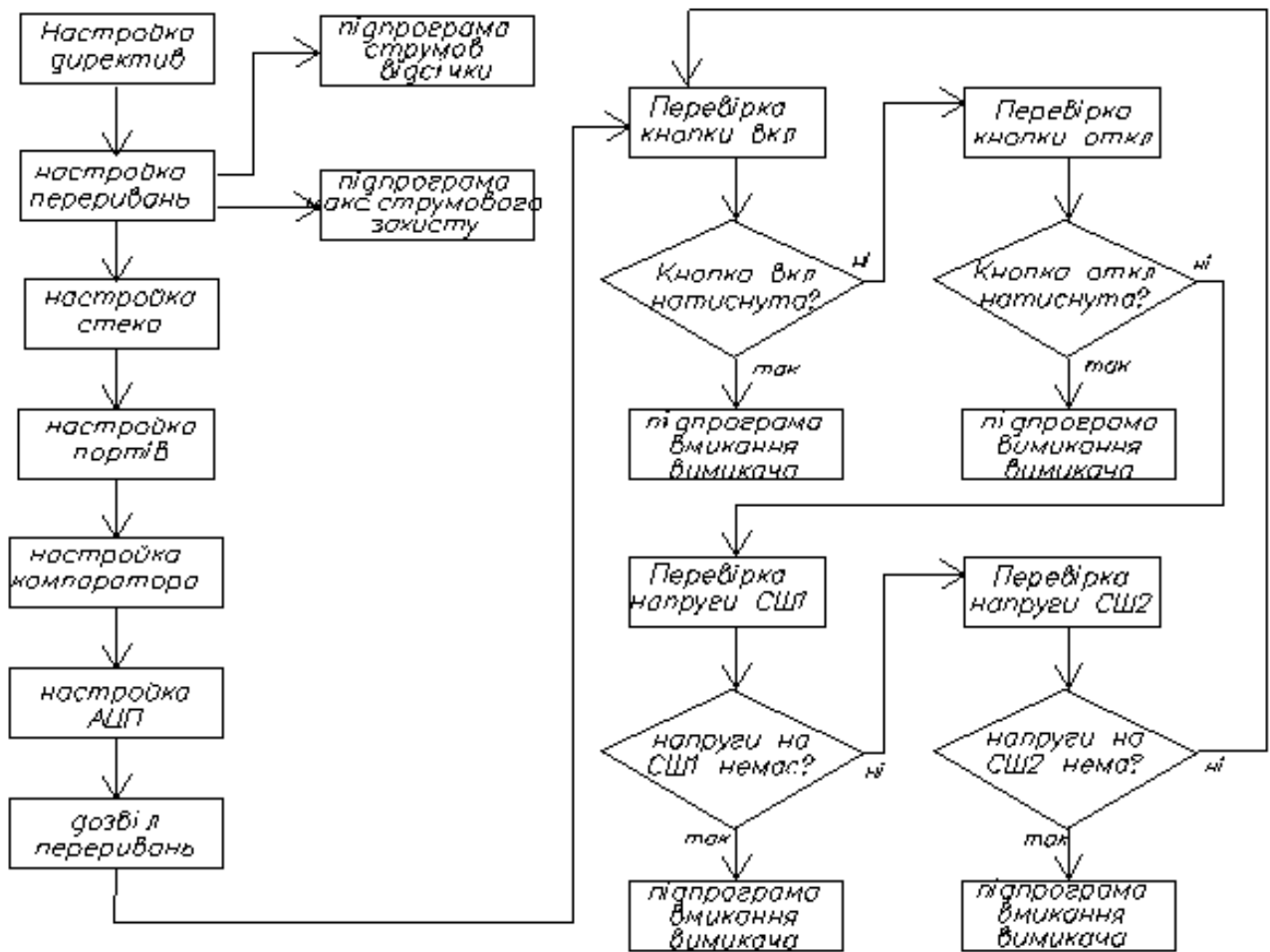


Рис. 6.13. Алгоритм головної програми для роботи схеми АВР

До головної програми відносимо команди, які виконуються в нескінченному циклі, тобто команди опитування стану кнопок (натиснута чи ні) та команди опитування наявності напруги на секціях шин. До підпрограми відносимо команди, яка виконуються викликом з таблиці переривань. Для кожного блоку алгоритму складаються відповідні команди. Для всіх блоків алгоритму у попередніх розділах були складені команди. Розглянемо алгоритм роботи сегмента головної програми автоматичного вмикання секційного вимикача при втраті напруги на одній секції 10 кВ. Програма по чергово опитує наявність напруги на шинах секції. Якщо на одній з секцій зникає напруга, то викликається підпрограма вмикання секційного вимикача.

Команди опитування стану вимикачів зведені в табл. 6.9.

Таблиця 6.9 – Команди головної програми опитування датчиків напруги

Команди	Коментарі
avr:	Мітка основної програми опитування кнопок
sbic pind,4	Пропуск наступної команди при натиснутій кнопці "Вимк."
rjmp PC+3	Пропуск двох наступних команд
sbic pind,5	Пропуск наступної команди при натиснутій кнопки "Увімк."
rjmp PC+3	Пропуск двох наступних команд
sbi portc,5	Увімкнути вимикач
sbic pins,5	Пропуск наступної команди, якщо напруга є на СШ1
sbi portc,4	Увімкнути секційний вимикач
sbic pinb,4	Пропуск наступної команди, якщо напруга є на СШ2
sbi portc,4	Увімкнути секційний вимикач
rjmp avr	Команда переходу на початок програми – безкінечний цикл

7. МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ЗАХИСТ І АВТОМАТИКА ЛІНІЙ

7.1. Вибір типів захистів та автоматики для ліній

Згідно з п. 3.2.108 ПУЕ на одиночних лініях з одностороннім живленням від багатофазних замикань потрібно встановлювати, як правило, двоступеневий струмовий захист, перший ступінь якого виконано у вигляді струмової відсічки, а другий – у вигляді максимального струмового захисту з незалежною або залежною характеристикою витримки часу.

Захист від міжфазних КЗ для ліній 6-35 кВ має бути у двофазному виконанні у фазах А і С по всій мережі. Захист від однофазних замикань на землю діє, як правило, на сигнал для персоналу. Допускається використовувати пристрій контролю ізоляції.

У випадку невиконання вимог ПУЕ за коефіцієнтом чутливості струмового захисту застосовують комбіновані струмові захисти з пуском за мінімальною напругою, з пуском за зворотними складовими струму або напруги.

Коли в повітряну лінію потрапляє блискавка й виникає велика перенапруга, то струмова відсічка не повинна спрацьовувати, для цього роблять затримку часу 0,06-0,1 с, щоб узгодити дію розрядників, що роблять під час атмосферних розрядів з роботою захисту. Спрацювання струмової відсічки визначається таким параметром, як струм спрацювання. Зона дії цієї струмової відсічки розраховується графічно або аналітично. Зоною дії та коефіцієнтом чутливості характеризуватиметься чутливість самої струмової відсічки.

Згідно з п. 3.2.109 ПУЕ на одиночних лініях з двостороннім живленням, а також на лініях, які входять до кільцевої мережі з однією точкою живлення, рекомендовано застосовувати такі самі захисти, що й на одиночних лініях з одностороннім живленням, виконуючи їх за необхідності направленими.

Згідно з п. 3.2.112 ПУЕ захист від однофазних замикань на землю має бути виконаним, як правило, з використанням трансформаторів струму нульової послідовності. Захист насамперед має реагувати на усталені замикання на землю; допускається також застосовувати пристрої, які реєструють короточасні замикання без забезпечення повторності дії.

На одиноких послідовних лініях, тобто лініях, які складаються з декількох послідовних ділянок з однобічним живленням, застосовують три- або чотириступеневий струмовий захист на головній ділянці лінії, або комбіновані струмові захисти з пуском за мінімальною напругою, з пуском за зворотними складовими струму або напруги.

На одиноких лініях із двостороннім живленням, а також на лініях, що входять у кільцеву мережу з одною точкою живлення, застосовують захисти аналогічні лініям з однобічним живленням, виконуючи їх за необхідності

з реле напрямку потужності. Радіальні лінії з трансформатором на кінці допускається захищати запобіжником.

Згідно з п. 3.2.122 ПУЕ для ліній у мережах 110-750 кВ з ефективно заземленою нейтраллю треба передбачати захисти від багатофазних замикань, від замикань на землю, від неповнофазного режиму та від перевантажень. Під час проектування нових ліній та реконструкції діючих потрібно застосовувати МПЗА, які є більш швидкодійними, мають кращу здатність до налаштування, більші можливості компенсації впливу перехідних процесів і більшу гнучкість у реалізації уставок і схемних рішень.

На лініях рекомендовано встановлювати захист від перевантаження, виконаний як максимальний струмовий, що діє з незалежною витримкою часу на сигнал черговому персоналу зі струмом спрацьовування, максимально допустимим з точки зору навантаження лінії.

Для повітряних ліній напругою 110–220 кВ виконувати основний захист рекомендовано із застосуванням високочастотного блокування дистанційного та струмового направленої нульової послідовності захистів або диференційно-фазний захист, якщо це доцільно за умови чутливості та швидкодії.

Згідно з п. 3.2.11 ПУЕ захисти в електричних мережах напругою 110 кВ та вище повинні мати пристрої, як і блокують їхню дію під час коливань напруги або асинхронного ходу генераторів на електростанціях.

Захист ліній будується за ступеневим принципом від міжфазних КЗ і однофазних КЗ на землю, оскільки мережі 110 кВ виконані з глухозаземленою нейтраллю. Для одиноких радіальних ліній з одностороннім живленням від однофазних і міжфазних КЗ застосовують ступеневі струмові захисти. При цьому трансформатори струму і струмові реле увімкнюються за схемою повної зірки. Якщо коефіцієнт чутливості струмових захистів менше 1,5, то застосовують струмові захисти з пуском за мінімальною напругою, з пуском за складовими струмів або напруги зворотної і нульової послідовності.

Для захисту магістральних ліній і ліній з відгалуженням від міжфазних КЗ застосовують ступеневі дистанційні захисти, а від однофазних КЗ на землю – захисти нульової послідовності. При цьому обов'язковою є наявність резервного захисту у вигляді струмової відсічки з витримкою часу.

Для захисту кільцевих ліній і ліній із двостороннім живленням застосовують захисти, аналогічні магістральним лініям. Якщо коефіцієнт чутливості захистів менше 1,5, застосовують для захисту від міжфазних КЗ диференційно-фазний високочастотний захист. Для захисту від однофазних КЗ застосовують ступеневий спрямований захист нульової послідовності. Для захисту паралельних ліній застосовують поперечні диференційні спрямовані захисти.

Спрацьовування захистів має бути заблоковане при коливаннях амплітуди і фази напруги на лінії, так звані «хитання», для збереження

стійкості енергосистеми. «Хитання» виникають при увімкненні електростанцій на паралельну роботу, увімкненні та відключенні навантажень на працюючі синхронні генератори електростанцій, у тому числі і при КЗ. Стійкість енергосистеми порушується при зниженні напруги в системі до 0,6 номінального значення, при цьому захист відключає лінії споживачів 2-ї і 3-ї категорій. Згідно з п. 3.2.22 ПУЕ для оцінювання чутливості основних захистів необхідно забезпечувати такі найменші коефіцієнти їх чутливості.

Для максимальних струмових захистів з пуском і без пуску за напругою (направлені і ненаправлені), а також струмові одноступеневі (направлені і ненаправлені) захисти, увімкнені на складові зворотної або нульової послідовностей:

- для органів струму і напруги коефіцієнти чутливості – 1,5;
- для органу напрямку потужності зворотної та нульової послідовності коефіцієнти чутливості – 2,0 за потужністю і 1,5 за струмом і напругою.

Для ступеневих захистів струму або струму і напруги (направлені і ненаправлені), увімкнуті на повні струми і напругу або на складові нульової послідовності: для органів струму і напруги ступеня захисту коефіцієнт чутливості – 1,5, для органів напрямку потужності нульової та зворотної послідовності коефіцієнт чутливості – 2,0 за потужністю і 1,5 за струмом і напругою.

Для поперечних диференційних направлених захистів паралельних ліній:

- для реле струму і реле напруги пускового органу комплектів захисту від міжфазних КЗ і замикань на землю коефіцієнт чутливості – 2,0;
- для органу напрямку потужності нульової послідовності коефіцієнт чутливості – 4,0 за потужністю і 2,0 за струмом і напругою;
- для органу напрямку потужності, увімкненого на повний струм і напругу коефіцієнт чутливості не нормується, а за струмом – 2,0.

Для направлених захистів з високочастотним блокуванням:

- для органу напрямку потужності зворотної або нульової послідовності коефіцієнт чутливості – 3,0 за потужністю і 2,0 за струмом і напругою;
- для пускових органів, які контролюють коло вимикання коефіцієнт чутливості – 2,0 за струмом і напругою і 1,5 за опором.

Згідно з п. 3.2.22 ПУЕ для оцінювання чутливості основних захистів необхідно забезпечувати такі найменші коефіцієнти їх чутливості:

1) дистанційні захисти від багатofазних та однофазних КЗ:

- для пускового органу будь-якого типу і дистанційного органу третього ступеня коефіцієнт чутливості – 1,5;
- для дистанційного органу другого ступеня, призначеного для дії в разі КЗ у кінці захищеної ділянки без урахування резервної дії коефіцієнт чутливості – 1,5;

2) диференційно-фазні високочастотні захисти:

- для пускових органів, які контролюють коло вимикання, коефіцієнт чутливості – 2,0 за струмом і напругою і 1,5 за опором;

3) захисти від замикань на землю на кабельних лініях у мережах з ізольованою нейтраллю (які діють на сигнал або на вимикання):

- для захистів, які реагують на струми основної частоти, коефіцієнт чутливості – 1,25;

- для захистів, які реагують на струми підвищених частот, коефіцієнт чутливості – 1,5;

4) захисти від замикань на землю на повітряних лініях у мережах з ізольованою нейтраллю, які діють на сигнал або на вимикання, коефіцієнт чутливості – 1,5.

Згідно з ПУЕ на повітряних лініях обов'язково застосовують автоматичне повторне вмикання (АПВ). Після захисного вимикання лінії відбувається одноразове АПВ лінії. Якщо лінія при цьому залишається в роботі, таке АПВ називають успішним. Використання АПВ значно підвищує надійність електропостачання і тому необхідне при живленні споживачів 1-ї категорії і рекомендоване при живленні споживачів 2-ї категорії. Спрацьовування АПВ відбувається через 1–1,5 секунди після вимикання лінії, що зумовлено підготовкою приводу вимикачів для їх увімкнення. Як показує досвід експлуатації, у 60–80 % випадків аварійних відключень АПВ забезпечує безперебійність електропостачання. Пристроями АПВ оснащуються також усі поодинокі працюючі трансформатори потужністю понад 1000 кВА. АПВ буває одне-, двох- і багаторазової дії.

При збільшенні навантаження на синхронний генератор знижується його швидкість і частота напруги. При дефіциті активної потужності знижується значення частоти струму. Небезпечним значенням частоти струму, за якого порушується паралельна робота генераторів електростанцій і відбувається значне зниження напруги, є величина 47 Гц. Це може призвести до його захисного вимикання і втрати стійкості енергосистеми. Тому необхідно автоматично вимикати частину споживачів пристроями автоматичного частотного розвантаження (АЧР).

Згідно з п. 3.3.78 ПУЕ для забезпечення стійкості роботи енергосистеми при дефіциті потужності застосовують АЧР для відключення частини споживачів 3-ї категорії за надійністю електропостачання. При організації АЧР складається черга споживачів на відключення залежно від їхньої категорії за надійністю електропостачання. Перша черга споживачів відключається при частоті 48 Гц, друга черга споживачів відключається при частоті 47,5 Гц, третя черга споживачів відключається при частоті 47 Гц, четверта – 46,5 Гц.

Для підвищення надійності електропостачання споживачів 3-ї категорії застосовують частотне автоматичне повторне вмикання (ЧАПВ) після

спрацьовування АЧР, яке спрацьовує після відновлення нормального рівня частоти і дає команду на підключення електропостачання споживачів через 10–20 секунд. Під час налаштування пристроїв ЧАПВ необхідно враховувати, що:

- у першу чергу пристрої ЧАПВ необхідно встановлювати у споживачів, які живляться від підстанцій без постійного обслуговуючого персоналу;
- черговість увімкнення споживачів від ЧАПВ має бути, як правило, зворотною до черговості вимкнення їх пристроями АЧР.

7.2. Мікропроцесорні пристрої захисту і автоматики ліній

Для струмових захистів ліній напругою 6–35 кВ в енергосистемі України широко використовують МПЗА від українських виробників: науково-промислове підприємство "РЕЛСІС" (м. Київ, www.relsis.ua), компанія «РЗА СИСТЕМЗ» (м. Київ, www.rzasystems.com), науково-промислове підприємство "ХАРТРОН-ІНКОР" (м. Харків, www.hartron-inkor.com), ВАТ «Київприлад» (м. Київ, www.kievpribor.com).

На лініях бувають міжфазні короткі замикання і однофазні короткі замикання в мережах з ізольованою нейтраллю напругою 6–35 кВ і в мережах з глухозаземленою нейтраллю напругою 110–330 кВ. У лініях напругою 6–35 кВ струмові захисти є основними, а в лініях напругою 6–35 кВ є резервними. До струмових захистів відносяться струмова відсічка (СВ) і максимальний струмовий захист (МСЗ).

МПЗА мають вбудований блок живлення, який забезпечує роботу схем від струмових кіл у режимі КЗ (мінімальний вхідний струм однієї з фаз – 4 А), або від джерела змінного (50 Гц), постійного або випрямленого струму напругою від 90 В до 250 В. Потужність, що споживається пристроями від джерела оперативного струму в черговому режимі, не перевищує 5 ВА, а в режимі спрацювання захисту – 7 ВА.

Пристрій періодично вимірює миттєві значення струмів за допомогою АЦП, підключаючи його вхід до відповідного струмового каналу через вбудований аналоговий мультиплексор. Значення, отримані з АЦП, обробляються програмою цифрової фільтрації, у результаті чого визначаються діючі значення першої гармоніки вхідних струмів. Фільтрація відсікає постійну складову сигналів, вищі гармоніки, а також послаблює експоненційну складову під час перехідних процесів.

Для порівняння із уставками обчислюється діюче значення кожного струму і знаходиться максимальне діюче значення кожного з фазних струмів. Значення модуля максимального значення струму обчислюються кожні 20 мс і порівнюються з уставками, введеними в пристрій, під час його налаштування для конкретного застосування.

Функції захисту: максимальний струмовий захист (МСЗ): 4 ступеня, незалежна та залежна витримка часу; мінімальний і максимальний захист

по напрузі: двоступеневий із контролем струму; захист зворотної послідовності (ЗЗП): контроль обриву фаз.

Функції автоматики: чотириразове автоматичне повторне ввімкнення (АПВ); керування вимикачем: локальне або дистанційне; USB-порт для налаштування уставок спрацювання.

Для роботи всіх МПЗА в локальній мережі передбачений інтерфейс RS-485. Робота з зовнішнім комп'ютером здійснюється через порт USB. Багатомовне меню підтримує 3 мови.

Для завантаження уставок спрацювання необхідний їх попередній розрахунок. Уставка спрацювання струмової відсічки (СВ) має розраховуватися виходячи з таких умов: 1) СВ захищає тільки лінію по всій її довжині і частково трансформатор, підключений до неї; 2) СВ не повинна спрацювати при трифазному КЗ на виводах обмотки низької напруги (НН) підключеного до лінії трансформатора, а також від кидків струмів при його увімкненні. Уставка спрацювання СВ визначається за формулою:

$$I_{CB} = 1,2I_{HH}^{(3K)}, \quad (7.1)$$

де $I_{HH}^{(3K)}$ – струм у лінії при трифазному КЗ на виводах обмотки НН трансформатора напругою 10/0,4 кВ.

Уставка спрацювання СВ має бути більше від кидків струму при вмиканні трансформаторів під напругу, тобто:

$$I_{CB} > 4 \cdot \sum I_m^{НОМ}, \quad (7.2)$$

де $\sum I_m^{НОМ}$ – сумарний номінальний струм трансформаторів, підключених до лінії.

$$K_{CB} = \frac{I_{кін}^{2K}}{I_{CB}} > 1,5, \quad (7.3)$$

де $I_{кін}^{2K}$ – струм в лініях при двофазних коротких замиканнях в кінці ліній.

Уставка спрацювання максимального струмового захисту (МСЗ) ліній розраховується за формулою:

$$I_{МСЗ} = \frac{K_3 K_{CЗП} I_{МАКС}}{K_{II}}, \quad (7.4)$$

де $K_{II} = 0,85$ – коефіцієнт повернення струмового реле;

$I_{МАКС}$ – максимальний робочий струм лінії.

Умови перевірки МСЗ на правильність функціонування полягає у відповідності коефіцієнта чутливості МСЗ нормам ПУЕ за формулою:

$$K_{МСЗ} = \frac{I^{1K}}{I_{МСЗ}} > 1,5, \quad (7.5)$$

де I^{1K} – струм в лінії при однофазному КЗ на виводах обмотки НН визначається за формулою:

$$I^{1K} = \frac{2 \cdot I^{3K}}{3}, \quad (7.6)$$

де I^{3K} – струм у лінії при трифазному КЗ на виводах обмотки НН.

Уставка витримки часу МСЗ визначається за умовами:

1) повинна бути менше часу термостійкості t_t ізоляції кабелю, тобто інтервалу часу дії струмів КЗ, при якому температура жил кабелю не перевищує припустимої температури 90° і визначається за формулою

$$t_t = \left(\frac{2F}{\alpha \cdot I_{\text{МАКС}}^{(3К)}} \right)^2 [\text{сек}], \quad (7.7)$$

де F – прийнятий переріз кабелю, мм^2 ;

$F_{\text{МАКС}}^{(3К)}$ – струм у лінії при КЗ на початку лінії, А;

$\alpha = 0.01$ – розрахунковий коефіцієнт для кабелів з алюмінієвими жилами.

2) повинна в три рази перевищувати час спрацьовування запобіжника на стороні ВН трансформатора, підключеного до лінії, що визначається за його захисною характеристикою.

Для перевірки селективності струмових захистів будується карта селективності, за якою визначається зона дії СВ і МСЗ, як показано на рис. 7.1.

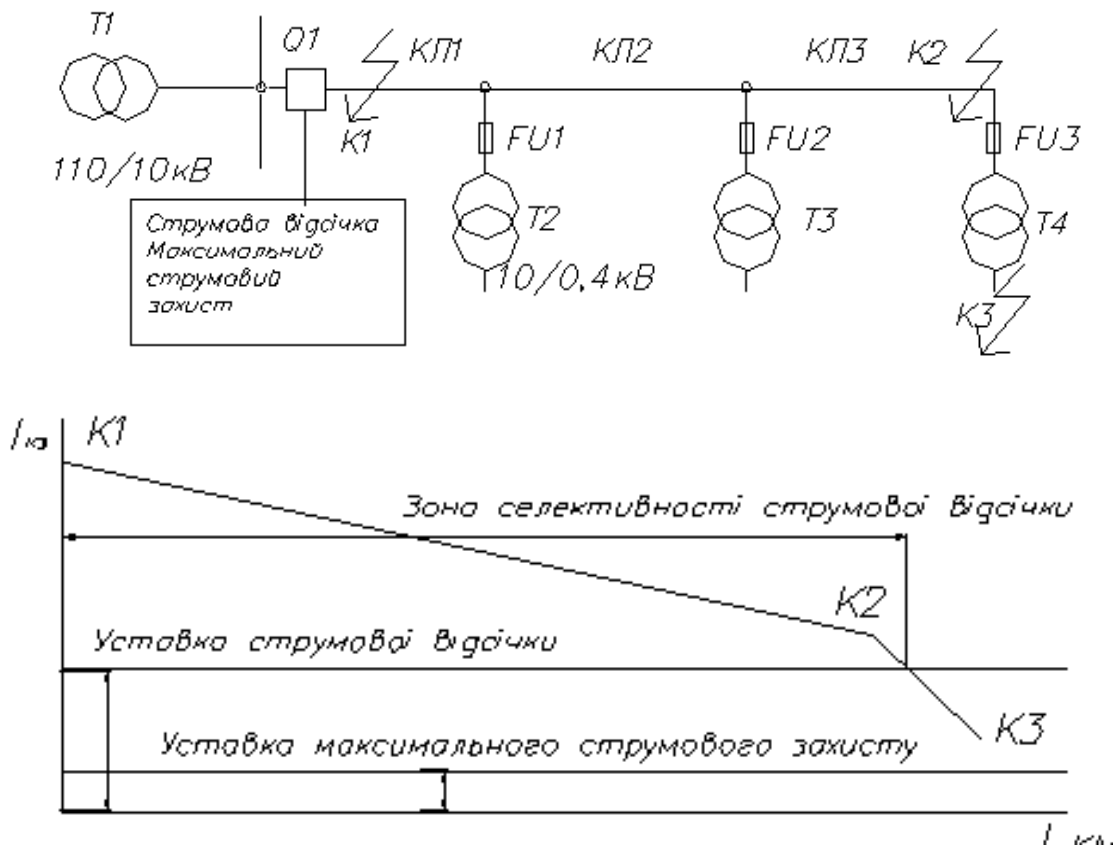


Рис. 7.1. Визначення зони селективності струмової відсічки

На рис. 7.2 показано лінію, яка живить розподільний пункт, від якого відходить лінії, що живлять підстанції 10/0,4 кВ.

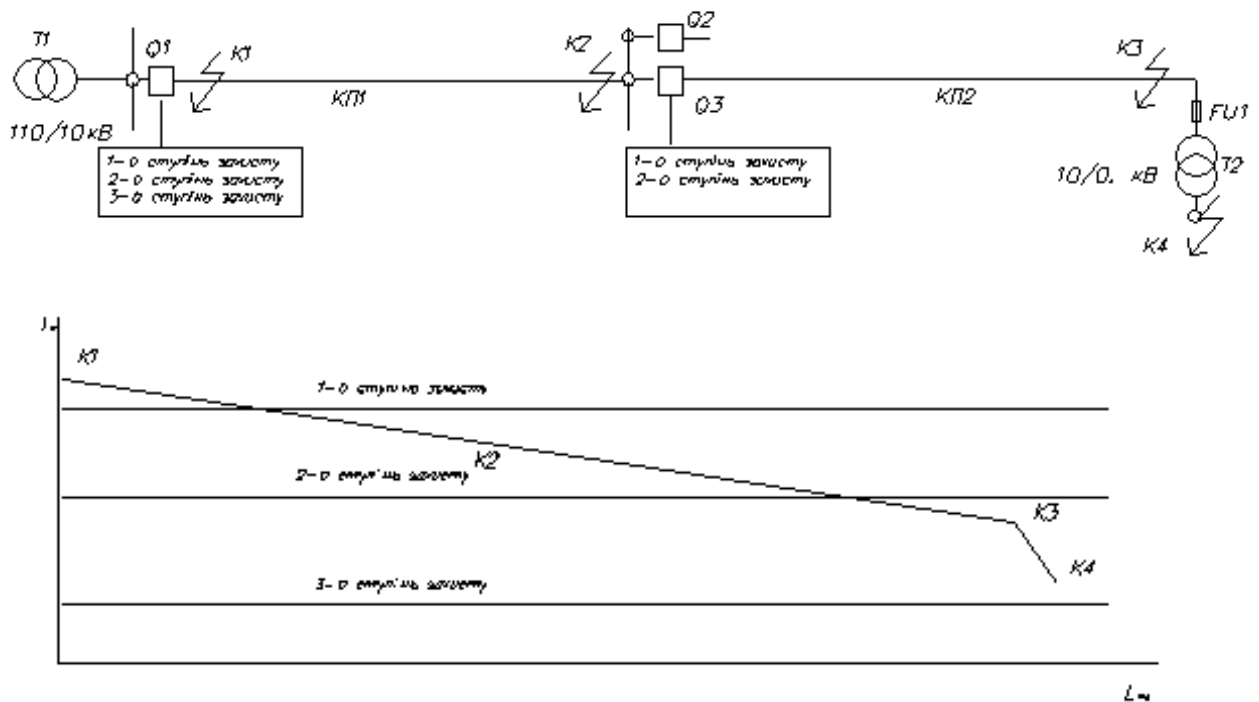


Рис. 7.2. Схема захисту лінії з розподільним пунктом

Захист головної ділянки лінії будується триступенево: 1-й ступінь – струмова відсічка без витримки часу, 2-й ступінь – струмова відсічка з витримкою часу, 3-й ступінь – максимальний струмовий захист із витримкою часу.

Уставка спрацьовування 1-го ступеня $I_{\text{нд}}^I = 1,2I_{K2}^{(3K)}$, де $I_{K2}^{(3K)}$ – струм у лінії КЛ1 при трифазному КЗ у точці К2. Коефіцієнт чутливості 1-го ступеня $K_{\text{чут}} = (I_{K2}^{(2K)} / I_{\text{сп}}^I) > 1,5$, де $I_{K2}^{(2K)}$ – струм на ділянці КЛ1 при двофазному КЗ у точці К2.

Уставка спрацьовування 2-го ступеня $I_{\text{нд}}^{II} = 1,2I_{K3}^{(3K)}$, де $I_{K3}^{(3K)}$ – струм на ділянці КЛ1 при трифазному КЗ у точці К3. Витримка часу спрацьовування 2-го ступеня $t^{II} = t^I + t_{\text{наб}}^I$, де $t^I = 0,3$ с – власний час спрацьовування 1-го ступеня; $t_{\text{сел}} = 0,4 \text{ сек}$ – ступінь селективності. Коефіцієнт чутливості 2-го ступеня $K_{\text{сб}}^{II} = (I_{K3}^{(2K)} / I_{\text{сп}}^{II}) > 1,2$, де $I_{K3}^{(2K)}$ – струм на ділянці КЛ1 при двофазному КЗ у точці К3.

Уставка спрацьовування 3-го ступеня $I_{\text{сп}}^{III} = 1,4I_{\text{РАБ}}^{\text{МАКС}}$, де $I_{\text{РАБ}}^{\text{МАКС}}$ – максимальний робочий струм на ділянці КЛ1. Витримка часу при спрацьовуванні 3-го ступеня $t^{III} = t^{II} + t_{\text{сел}} = 0,5 + 0,4 = 0,9 \text{ сек}$. Коефіцієнт

чутливості $K_{чув.3} = (I_{K4}^{(2R)} / I_{cp}^{III}) > 1,2$ де $I_{K4}^{(2K)}$ – струм на ділянці КЛ1 при двофазному к. з у точці К4.

Якщо простий струмовий захист не забезпечує необхідного коефіцієнта чутливості, то застосовується захист за мінімальною напругою. Принцип дії захисту заснований на тому, що контролюють не тільки величину аварійного струму, але і величину залишкової напруги $U_{зал}$ на шинах підстанції.

У міру наближення точки КЗ до шин підстанції величина $U_{зал}$ зменшується, як показано на рис. 7.3.

При короткому замиканні в т. К1 поблизу шин підстанції $U_{КЛ}^{зал} = 0$, а в міру переміщення т. К2 і К3 $U^{зал}$ зростає. При КЗ у т. К2 і К3 $U_{К2}^{зал} = \sqrt{3} I_{K2}^{(3K)} \sqrt{R_{л1}^2 + X_{л1}^2}$; $U_{К3}^{зал} = \sqrt{3} I_{K3}^{(3K)} \sqrt{(R_{л1} + R_{Т1})^2 + (x_{л1} + x_{Т1})^2}$, де $I^{(3K)}$ – струм на початку лінії при трифазному КЗ у відповідній точці КЗ: $R_{л1}$, $R_{Т1}$, $X_{л1}$, $X_{Т1}$ – активні і реактивні опори лінії і трансформатора.

Уставка спрацьовування за напругою розраховується $U_{cp} = U^{зал} / (K_{TV} \cdot 1,5)$, де K_{TV} – коефіцієнт трансформації TV.

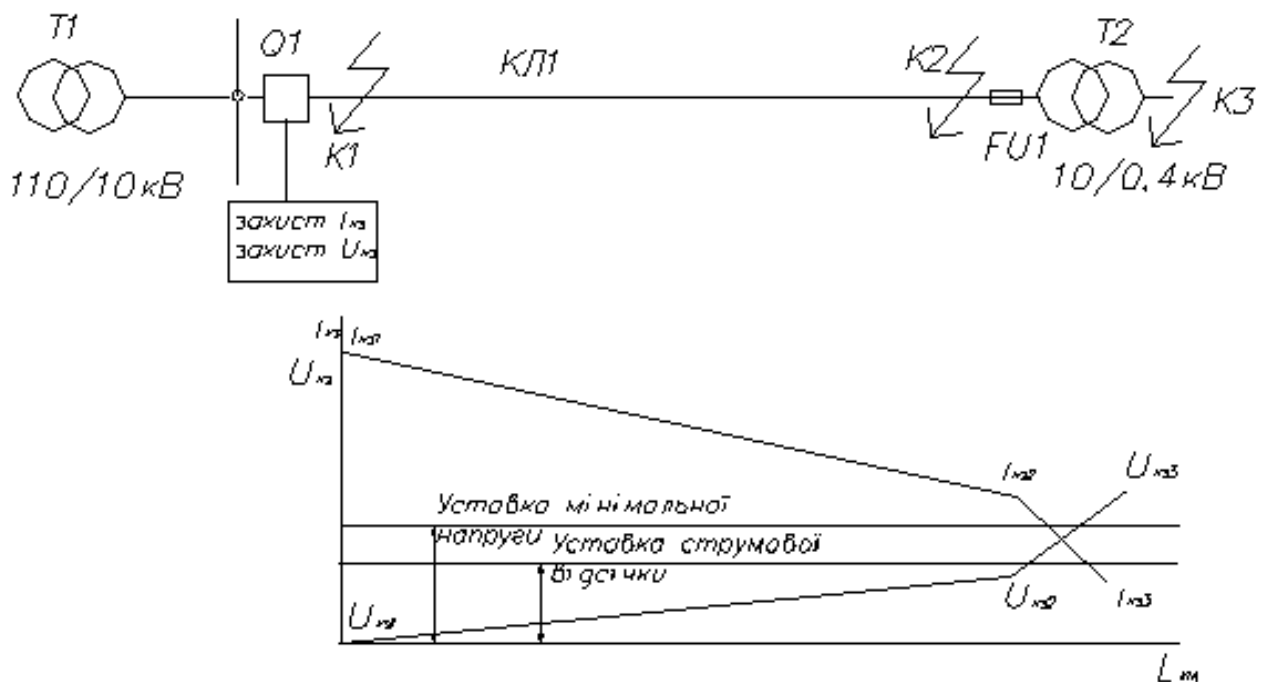


Рис. 7.3. Розрахункова схема захисту за мінімальною напругою

7.3. Мікропроцесорний захист нульової послідовності

При однофазних замиканнях на землю виникають складові нульової послідовності струму і напруги. За виникнення однофазного замикання на землю в мережах з глухозаземленою нейтраллю необхідно лінію вимикати

від живлення. За виникнення однофазного замикання на землю в мережах з ізолюваними або компенсованими нейтраліми струм замикання не перевищує кількох або кількох десятків ампер, і лінію можна залишати в роботі протягом 2 годин.

Схему захисту ліній нульової послідовності від однофазних КЗ на землю в мережах з глухозаземленою нейтраллю показано на рис. 7.4.

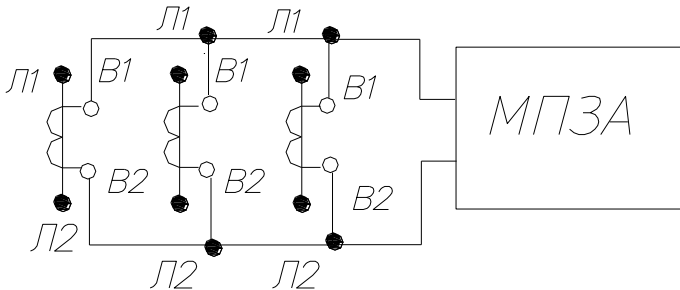


Рис. 7.4. Схема захисту лінії за струмом нульової послідовності

Схема містить фільтр струмів нульової послідовності на трансформаторах струму ТА1-ТА3. Принцип дії схеми полягає в тому, що при дво- і трифазних КЗ сума фазних струмів $3I_0 = I_A + I_B + I_C = 0$ дорівнює нулю і МПЗА не спрацює. При однофазному КЗ на землю з'являється струм нульової послідовності $3I > 0$, і МПЗА спрацює.

Для захисту ліній 6–35 кВ від однофазних замикань на землю ПУЕ допускає застосування пристроїв контролю ізоляції фаз відносно землі. Пристрій являє собою три фазних вольтметра, нейтраль «зірки» яких заземлена. При аварії напруга на ушкодженій фазі зменшується, а на нормальних підвищується. Для повітряних ліній застосовують неселективний захист напруги нульової послідовності. При цьому ушкоджена лінія визначається шляхом почергового відключення ліній від живлення, тобто методом виключення, коли захист не спрацює при відключенні ушкодженої лінії.

Схеми захисту нульової послідовності будуються на основі спеціального трансформатора нульової послідовності (ТНП). Останній являє собою тороподібне осердя з намотаною на ньому вторинною обмоткою, роль первинної обмотки виконує безпосередньо кабель, пропущений через вікно осердя ТНП.

Металева захисна оболонка кабелю з'єднується з заземлювальною шиною на підстанції гнучким провідником, пропущеним через вікно осердя ТНП, як показано на рис 7.5.

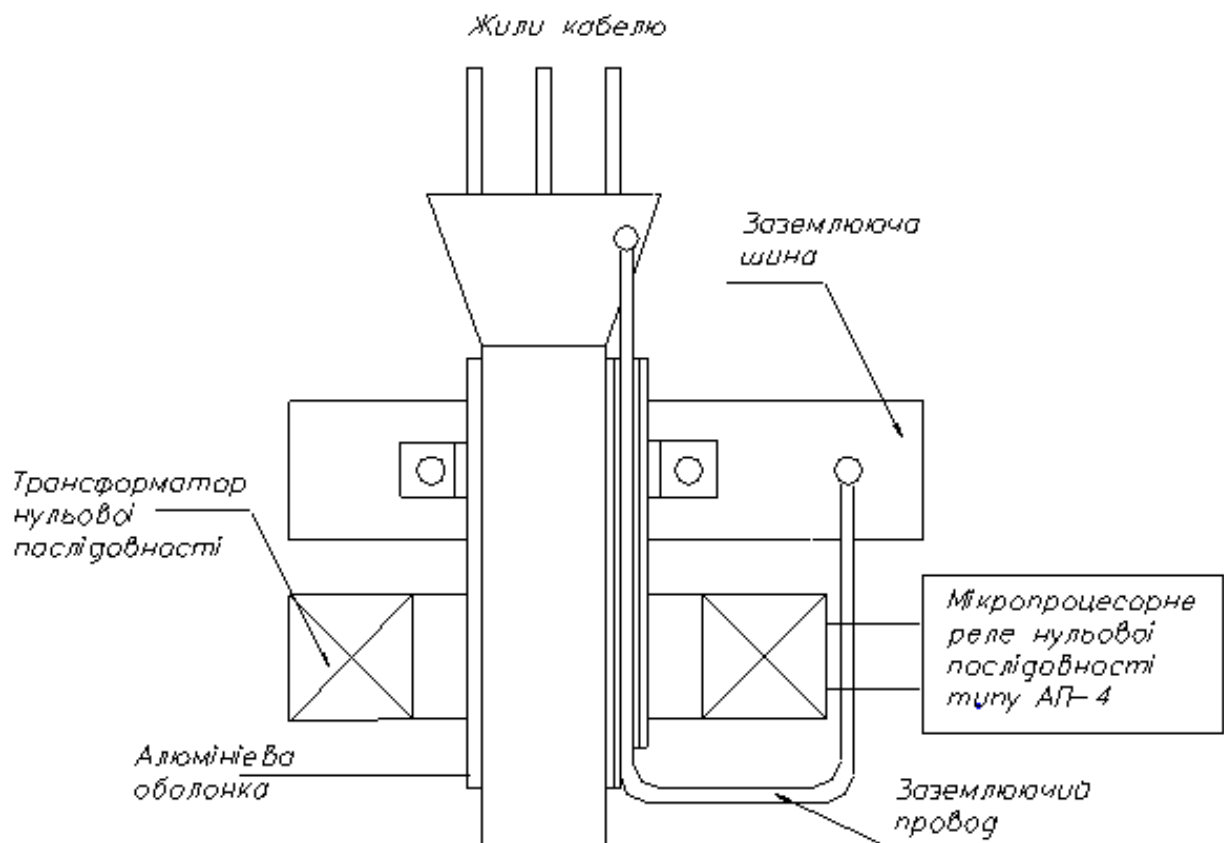


Рис. 7.5. Схема захисту кабельної лінії від однофазних замикань на землю

Захист містить трансформатор струму нульової послідовності (ТНП), до вторинної обмотки якого підключене мікропроцесорне струмове реле.

У нормальному режимі, а також у режимах дво- і трифазних КЗ векторна сума миттєвих значень фазних струмів і створених ними магнітних потоків дорівнює нулю, тобто навколо кабелю змінне магнітне поле відсутнє, і у вторинній котушці ТНП не індукується ЕРС, тобто дорівнює нулю, і мікропроцесорне струмове реле не працює.

При однофазному замиканні жили кабелю на його металеву оболонку з'являється струм ємнісного характеру, що протікає по колу: ушкоджена жила через ізоляцію – оболонка кабелю – провідник, що заземлює – заземлювальна шина – земля. Ємнісні струми кожного з провідників створюють магнітні потоки, рівні за величиною і протилежні за напрямком, векторна сума яких $\Phi_{\text{жил}} - \Phi_{\text{об}} + \Phi_{\text{з.з.п.р.}}$ більше нуля. При цьому в кабельному просторі з'являється змінний магнітний потік, що індукує у вторинній обмотці ТНП ЕРС, і реле АП-2 спрацює.

Вторинний струм ТНП залежить від величини ємнісного струму однофазного замикання на землю пропорційно коефіцієнту трансформації ТНП, тобто:

$$K_{ТНП} = I^{(1K)} / I_2 = 100.$$

Розрахунок схеми захисту нульової послідовності полягає у визначенні вторинного струму трансформатора ТЗЛ за допомогою графіка його залежності від первинного струму, яким є струм нульової послідовності $3I_0$, на числовій осі якого і знаходиться уставка спрацьовування $I_{зНП}$. За величиною вторинного струму ТЗЛ вибирається струм спрацьовування реле, який має бути меншим за цей струм.

Уставка спрацьовування захисту нульової послідовності розраховується за умовою відбудови захисту від власного ємнісного струму I_{BC} за формулою:

$$I_{зНП} = 1,2 \cdot I_E \cdot \ell_{кл}, \quad (7.8)$$

де I_E – власний питомий ємнісний струм лінії, що залежить від перерізу, напруги та визначається за довідниками, А/км;

$\ell_{кл}$ – довжина кабельної лінії, км.

Перевірка захисту нульової послідовності виконується за коефіцієнтом чутливості $K_{зНП}$ за формулою:

$$K_{зНП}^{чут} = \frac{I^{(1K)} - I_E \cdot \ell_{кл}}{I_{зНП}} \geq 1,5 \quad K_{зНП} = \frac{I_C^{1K} - I_{BC}}{I_{зНП}} > 1,5, \quad (7.9)$$

де $I^{(1R)}$ – струм однофазного замикання на землю, що залежить від повної ємності мережі щодо землі.

Електричну схему мікропроцесорного реле струму нульової послідовності захисту показано на рис. 7.6.

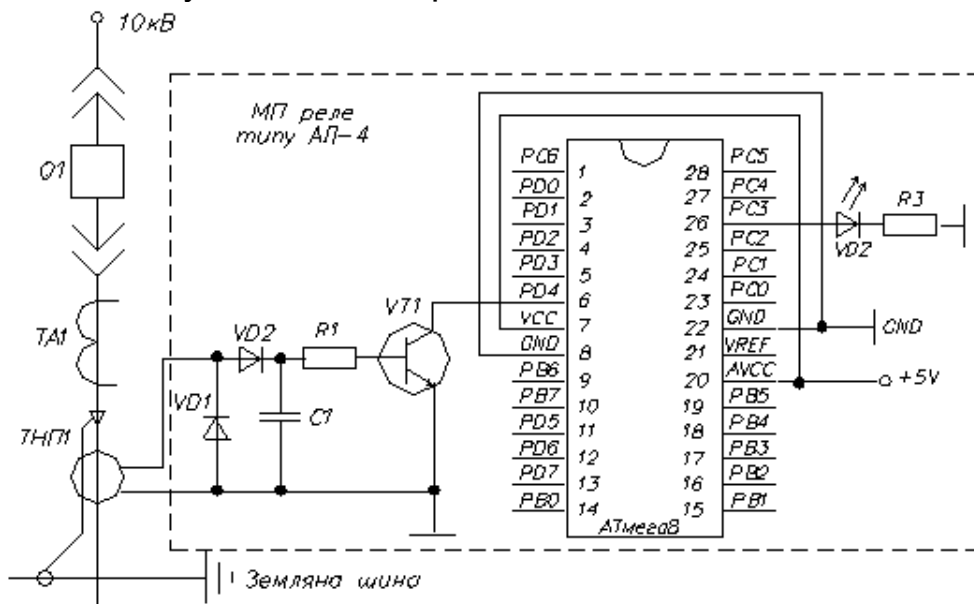


Рис. 7.6. Схема захисту за струмом нульової послідовності

Для захисту від однофазних замикань на землю можна використовувати трансформатор напруги типу НТМИ-10 із трьома трифазними обмотками: первинна увімкнена в «зірку»; перша вторинна з'єднана в «зірку», до якої підключають вольтметри і лічильники електроенергії; друга вторинна увімкнена за схемою розімкнутого «трикутника», у розрив якого увімкнено реле МПЗА (рис. 7.7).

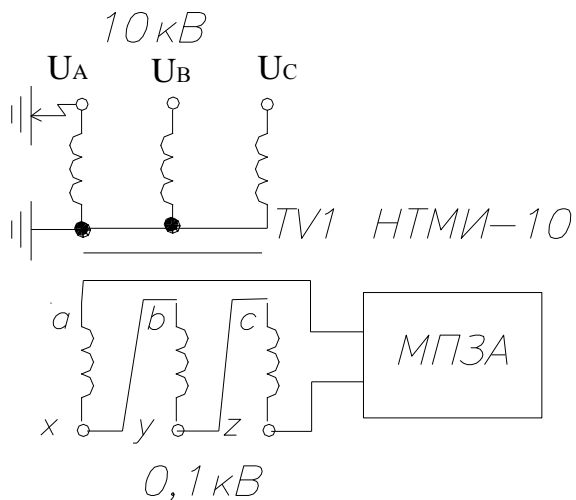


Рис. 7.7. Схема захисту за напругою нульової послідовності

У нормальному режимі векторна сума ЕРС обмоток розімкнутого трикутника дорівнює нулю, тобто $U_{a\bar{o}} + U_{\bar{a}o} + U_{c\bar{z}} = 0$ і реле не спрацьовує.

При замиканні, наприклад, фази А на землю первинна обмотка АХ трансформатора напруги виявляється зашунтованою, та її струм дорівнює нулю. При цьому ЕРС вторинної обмотки ах дорівнює нулю, і сума двох ЕРС дорівнює $U_{by} + U_{cz} = 100B$, реле спрацьовує і діє на сигнал.

7.4. Мікропроцесорний захист паралельних ліній

Паралельне увімкнення двох ліній застосовують для підвищення передавальної потужності. Паралельні лінії бувають двох типів: зі спільним вимикачем (див. рис. 1.1, лінія КЛ2) і з роздільними вимикачами (див. рис. 1.1, лінії КЛ4).

На паралельних лініях з однобічним живленням, підключених до спільного вимикача, встановлюють захисти, аналогічні одиночним лініям, тобто СВ і МСЗ, також поздовжні й поперечні диференційні струмові захисти з абсолютною селективністю. Згідно з п. 3.2.119 ПУЕ на коротких одиночних лініях з двостороннім живленням допускається застосовувати поздовжній диференційний захист як основний для захисту ліній невеликої довжини. При цьому довжина кабелю, який прокладають спеціально для цього захисту, не має перевищувати 4 км. Схема поперечного диференційного захисту (ПДЗ) (рис. 7.8) містить два однакових трансформатори струму ТА1, ТА2, до вторинних обмоток яких, з'єднаних за схемою «вісімки» на різницю струмів підключене реле МПЗА

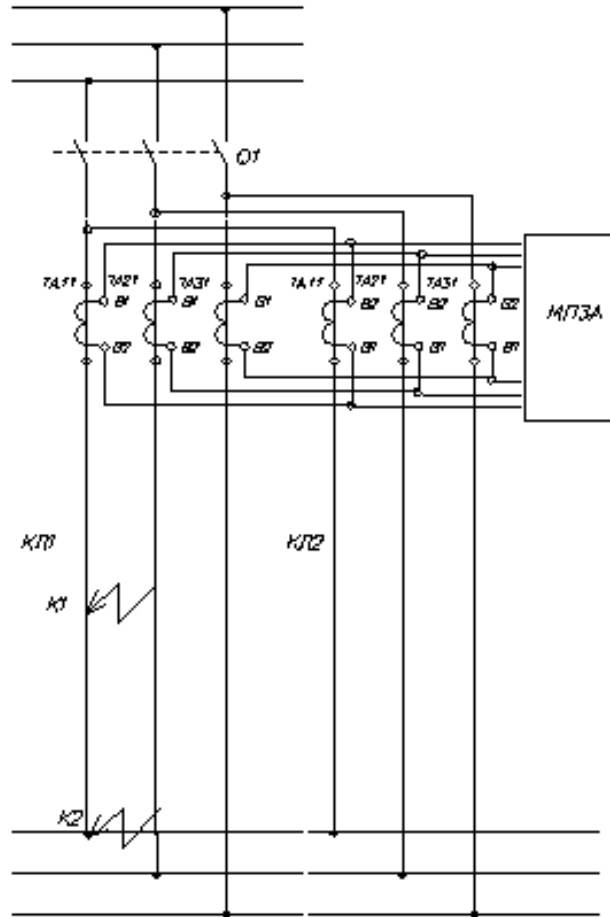


Рис. 7.8. Схема поперечного диференційного захисту паралельної лінії

У нормальному режимі і при зовнішньому КЗ (точка К2) через реле МПЗА протікає струм небалансу $I_{НБ} = I_2^{TA1} - I_2^{TA2} > 0$. Він викликаний похибками самих трансформаторів, величина якого визначається за формулою:

$$I_{НБ} = \frac{(\gamma_{TA1} + \gamma_{TA2})}{100 \cdot 2K_{TA}} I^{3K}, \quad (7.10)$$

де $\gamma_{TA1} = \gamma_{TA2} = 10\%$ – припустима похибка ТА1, ТА2;

$I^{(3K)}$ – величина струму при трифазному КЗ на початку паралельної лінії, тому поділяється на 2;

K_{TA} – коефіцієнт трансформації ТА1, ТА2.

При міжфазному КЗ у точці К1 (рис. 7.9) струм у лінії КЛ1 росте, а в лінії КЛ2 падає до нуля. Різниця вторинних струмів ТА1, ТА2 перевищує струм небалансу, і реле МПЗА спрацьовує. Уставка спрацьовування визначається за формулою $I_{сп}^{K43} = 1,2I_{НБ}$.

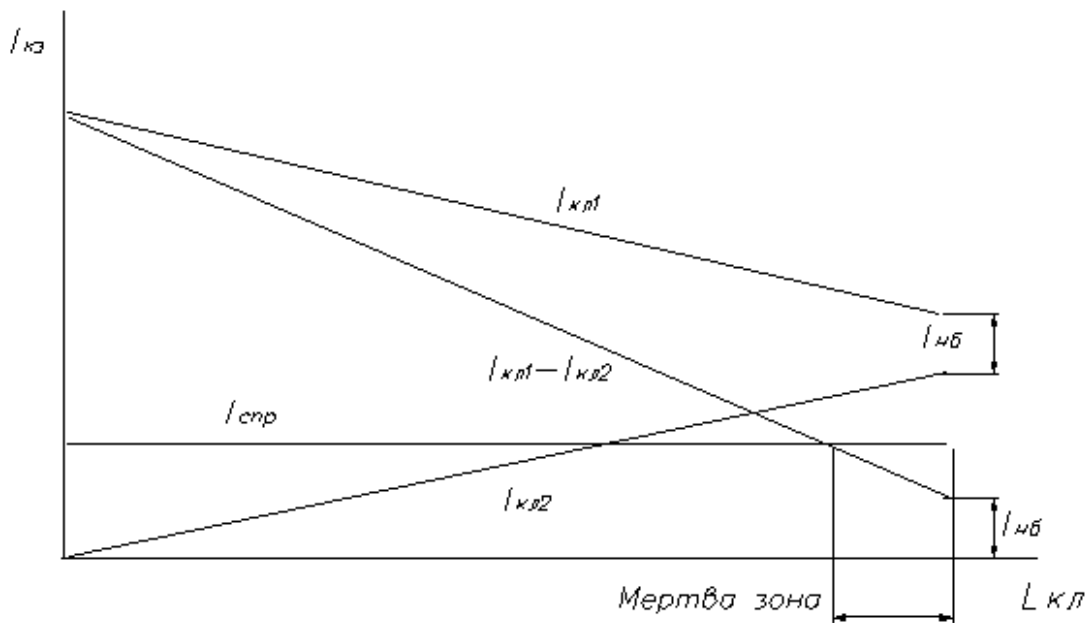


Рис. 7.9. Зони селективності поперечного диференційного захисту ліній

При переміщенні точки КЗ від міста установки захисту струм в ушкодженій лінії КЛ1 зменшується, а в нормальній лінії КЛ2 зростає. При цьому при міжфазному КЗ у точці КЗ наприкінці лінії струми в лініях мало відрізняються один від одного за величиною, а їхня різниця $I_2^{TA1} - I_2^{TA2} < I_{cp}^{KA3}$ і КА3 не працює. У такий спосіб схема ПДЗ не захищає зону наприкінці лінії, яка називається «мертвою» зоною. Довжина «мертвої» зони визначається графічно (рис. 7.15) або за формулою:

$$l_{m3} = \frac{2l_l \cdot K_{TA} I_{cp}^{KA3}}{I^{(3K)}}, \quad (7.11)$$

де l_l – довжина паралельної лінії.

Недоліки ПДЗ: 1) не захищає лінію по всій довжині; 2) при виводі однієї з ліній у ремонт захист треба відключати; 3) захист не визначає ушкоджену лінію, тобто відключає обидві лінії.

Для паралельної лінії з роздільними вимикачами згідно з вимогами ПУЕ на прийомному кінці двох паралельних ліній, як правило, має бути використаний поперечний диференційний спрямований захист (ПДСЗ). Принцип дії схеми ПДСЗ на живильному початку лінії показано на рис. 7.10.

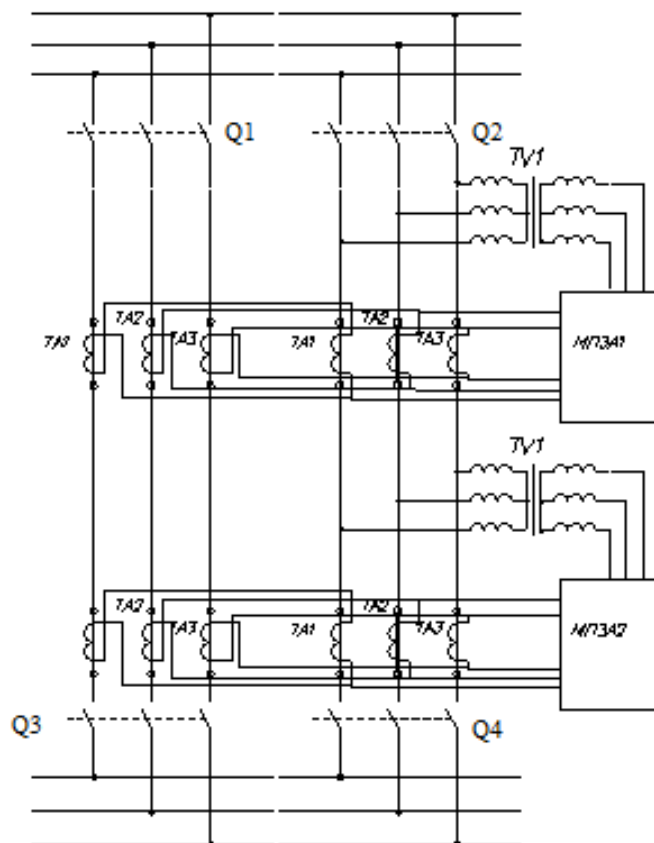


Рис. 7.10. Схема поперечного диференційного напрямленого захисту

На живильному початку лінії встановлюються захисти, аналогічні одиночним лініям. У випадку, якщо коефіцієнт чутливості струмової відсічки менше двох, то ПУЕ рекомендує використовувати як основний або додатковий захист на живильному початку лінії ПДСЗ. Перевага ПДСЗ – визначає ушкоджену лінію з двох паралельних і відключає саме її. ПДСЗ будують на основі мікропроцесорного пристрою реле напрямку потужності РНМ-01.

Мікропроцесорний пристрій напрямку потужності серії РНМ-01 призначений для використання у складі схем захисту як чутливого органу, що визначає напрямки потужності та реалізує функцію напрямленого максимального струмового захисту трифазної мережі.

Пристрій забезпечує такі експлуатаційні можливості:

- напрямлений максимальний струмовий захист; введення та зберігання уставок захистів та автоматики; сигналізація спрацьовування за допомогою реле та світлодіодів, а також по каналу АСУ;
- вимірювання та індикація фазних струмів і напруг, лінійних напруг;
- вимірювання та індикація вторинної активної та реактивної потужностей;
- реєстрація подій та аварійних параметрів, запис осцилограм аварійних подій з прив'язкою до дати та часу;

- інформативний морозостійкий OLED-дисплей та світлодіодна сигналізація поточного стану пристрою, спрацьовування захистів та автоматики;

- отримання дискретних сигналів керування та блокувань, видача аварійної та попереджувальної сигналізації;

- виконання функцій телесигналізації, телевимірювання та телекерування, передача параметрів аварії, введення та зміна уставок по лінії зв'язку;

- постійний автоконтроль справності (самодіагностика) з використанням сторожового таймера;

- блокування всіх виходів при несправності пристрою для усунення хибних спрацьовувань;

- гальванічна розв'язка всіх входів і виходів, включно з живленням, підвищена потужність імпульсу при спрацьовуванні дискретних входів для забезпечення високої завадозахищеності.

Діапазон напруги оперативного живлення 90–254 В. Пристрій має три входи вимірювання струму фаз I_A , I_B , I_C і три входи для вимірювання фазних напруг U_A , U_B , U_C .

Пристрій перебуває в режимі контролю: одночасно вимірює миттєві значення струмів і напруг за допомогою багатоканального АЦП. Зняті значення АЦП обробляються по програмі цифрової фільтрації відносно першої гармоніки промислової частоти. Для порівняння з уставками захистів використовуються лише діючі значення першої гармоніки вхідних сигналів, приведені до вторинних величин. Ці ж значення використовуються для індикації кожного струму та напруги на вбудованому міні-дисплеї пристрою. Значення модулів векторів обчислюються кожні 5 мс і порівнюються з уставками, введеними у пристрій під час налаштування його на конкретне застосування.

Визначення напрямку потужності здійснюється за величиною фазового кута між струмом і напругою окремо для кожної пари сигналів. Напрямок потужності визначається за величиною фазового кута між першою гармонічною складовою сигналів струму та напруги окремо для кожної пари сигналів.

Для визначення кута фазового зсуву між струмом і напругою використовується принцип фазового детектора (ФД), який порівнює фази двох вхідних сигналів рівних або близьких частот. На вхід ФД подаються два сигнали: струму і напруги, фази яких потрібно порівняти. На виході ФД формується сигнал напруги, пропорційний різниці фаз вхідних сигналів.

Найпростіший ФД може бути побудований на логічному елементі "виключне АБО" (рис. 7.11).

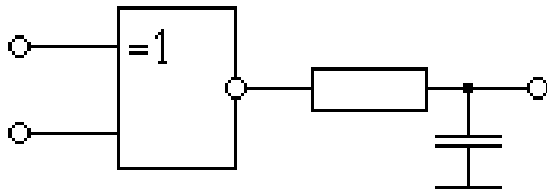


Рис. 7.11. Схема фазового детектора на логічному елементі "виключне АБО"

При подачі на вхід цього елемента двох прямокутних сигналів рівних частот з нульовим фазовим зрушенням його вихідна напруга дорівнює нулю (на виході логічний 0). При ненульовому зсуві фаз на виході елемента формуються імпульси, середнє значення яких прямопропорційне фазовому зсуву і досягає максимуму (на виході логічна 1) при зсуві на 180° . Для отримання сигналу, пропорційного зсуву фаз напруги імпульси з виходу елемента подають на інтегрувальну ланку (фільтр низьких частот – ФНЧ).

Уставки спрацьовування реле потужності не розраховуються. Мінімальні параметри спрацьовування реле потужності за струмом 1 А і за напругою 50 В.

При КЗ поблизу шин підстанції відбувається зниження рівня напруги, тому необхідно перевірку рівня напруги за формулою:

$$U_{\min}^{(3K)} = I^{(3K)} \cdot Z_{\bar{e}} = \frac{UZ_{\bar{e}}}{\sqrt{3}(Z_n + Z_c + Z_T) \cdot K_{\Delta I}}, \quad (7.12)$$

де U – лінійна напруга на шинах підстанції, кВ;

$Z_{\bar{e}}, Z_c, Z_T$ – повні опори лінії, енергосистеми і трансформатора, Ом;

K_{TH} – коефіцієнт трансформації трансформатора напруги.

Поперечний диференційний струмовий направлений захист, як і будь-який диференційний захист, є швидкодіючим.

Реле напрямку потужності, як і в схемі струмового направленного захисту, має мертву зону $l_{м.з}$ по напрузі, тобто відмовляє в дії внаслідок недостатньої напруги, яка підводить до нього при металевих трифазних коротких замиканнях у місця установки захисту. Як зазначалося, мертва зона не повинна перевищувати $l_{м.з} \leq 0,1l$ довжини лінії. У дійсності для наявних реле напрямку потужності вона значно менше. Наявність мертвої зони зумовлює можливість відмови поперечного диференційного спрямованого захисту з обох боків захищуваної лінії у разі трифазного короткого замикання в цій зоні. Це пояснюється тим, що мертва зона даного комплексу захисту розташована в області каскадної дії захисту протилежного кінця лінії.

7.5. Мікропроцесорний дистанційний захист ліній

Мікропроцесорний дистанційний захист ліній (МДЗ) ліній призначений для захисту ліній 110 кВ і більше від міжфазних КЗ. Зовнішній вигляд мікропроцесорного дистанційного захисту серії РС830-ДЗ показаний на рис. 7.12.



Рис. 7.12. Зовнішній вигляд мікропроцесорного дистанційного захисту серії РС830-ДЗ

Пристрій РС830-ДЗ – багатофункціональний, об'єднує функції захисту, контролю, керування і сигналізації. У пристрої реалізовано такі функції: вісім ступенів дистанційного захисту; вісім ступенів захисту від замикань на землю; два ступеня захисту за струмами зворотної послідовності; два ступеня захисту по напрузі; два ступеня двократного АПВ; два ступеня ЧАПВ; два ступеня АЧР; два ступеня ПРВВ; блокування при хитаннях.

Принцип дії МДЗ заснований на вимірі опору ділянки, тобто дистанції лінії від джерела живлення до точки КЗ

Розрахункову схему мережі показано на рис. 7.13.

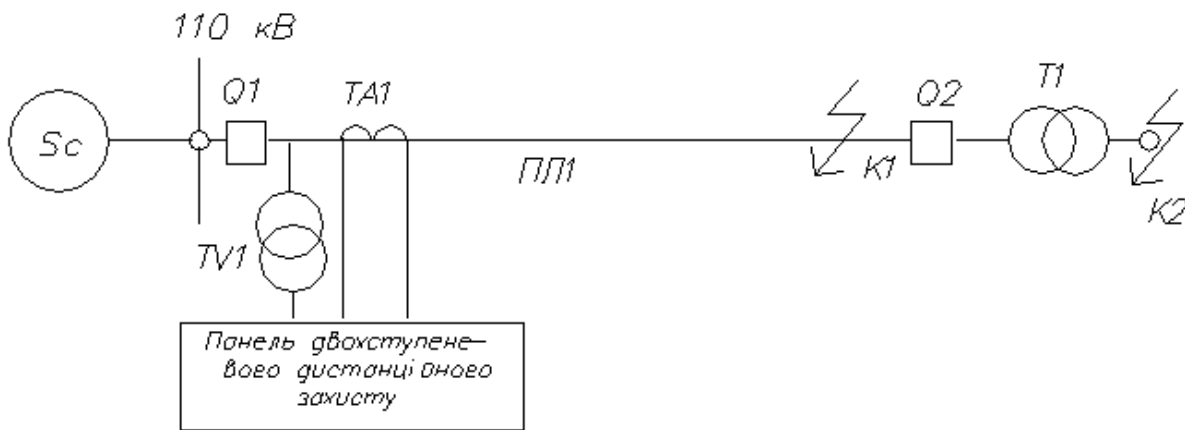


Рис. 7.13. Розрахункова схема електромережі 110 кВ

Розрахунок струмових режимів лінії при коротких замиканнях виконується на основі заступної схеми, яку показано на рис. 7.14.

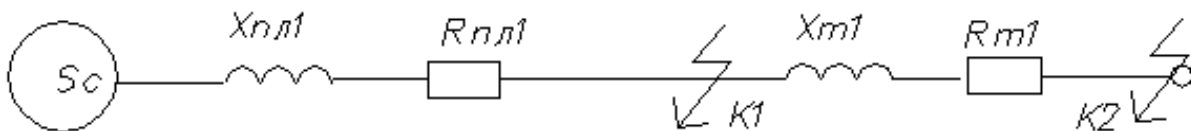


Рис. 7.14. Заступна схема електромережі

Дистанційний захист (ДЗ) призначений для захисту ліній від міжфазних КЗ. Принцип дії ДЗ заснований на вимірі опору ділянки, тобто дистанції лінії від джерела живлення до точки КЗ. У нормальному режимі опір лінії дорівнює

$$Z_{\text{ВЛ}}^H = U_H / I_H = \sqrt{(R_{\text{ПЛ}} + R_T)^2 + (X_{\text{ПЛ}} + X_T)^2} \quad (7.13)$$

і визначається переважно опорами трансформатора, підключеного до лінії. При КЗ на лінії опір навантаження дорівнює нулю, струм у лінії зростає до струму КЗ, а напруга на шинах живильної підстанції падає. Тоді опір лінії при КЗ

$$Z_{\text{ПЛ}}^K = U_K / I_K = \sqrt{R_{\text{ПЛ}}^2 + X_{\text{ПЛ}}^2} \quad (7.14)$$

падає. Таким чином, уставка спрацьовування дистанційного захисту знаходиться в діапазоні опорів лінії, тобто:

$$\frac{U_K}{I_K} = Z_{\text{ВЛ}}^K < Z_C < Z_{\text{ВЛ}}^H = \frac{U_H}{I_H}. \quad (7.15)$$

Перший ступінь захисту, який діє без витримки часу, повинен захищати лінію ПЛ1 від міжфазних КЗ уздовж лінії до її кінця, тобто до точки К1. Другий ступінь захисту діє з витримкою часу при відмовленні захисту

трансформатора або вимикача Q6 при коротких замиканнях у точці K2. Уставка спрацьовування за опором має бути більше уставки 1-го ступеня, оскільки до опору ПЛ1 додається опір лінії ПЛ2. Третій ступінь захисту діє з витримкою часу при відмовленні захистів трансформатора Т1 або його вимикача при коротких замиканнях в точці K3. Уставка його спрацьовування більше уставки 2-го ступеня, оскільки опір трансформатора Т1 більше опору лінії ПЛ1.

Перший ступінь захисту, який діє без витримки часу, повинен захищати лінію ПЛ №1 від міжфазних КЗ уздовж лінії до її кінця, тобто до точки K1. Уставки спрацьовування 1-го, 2-го та 3-го ступенів дистанційного захисту визначаються відповідно за формулами:

$$Z_{д}^I = 0,85 \cdot Z_{ПЛ1}; \quad Z_{д}^{III} = 0,85(Z_{ПЛ1} + Z_{Т1}) \quad (7.16)$$

Приймаємо витримки часу при спрацьовуванні ступенів захистів $t^I = 0; t^{II} = 0,4 \text{сек}; t^{III} = 0,8 \text{сек}$.

На рис. 7.15 показано карту селективності дистанційних захистів, яка визначає зону дії дистанційних захистів.

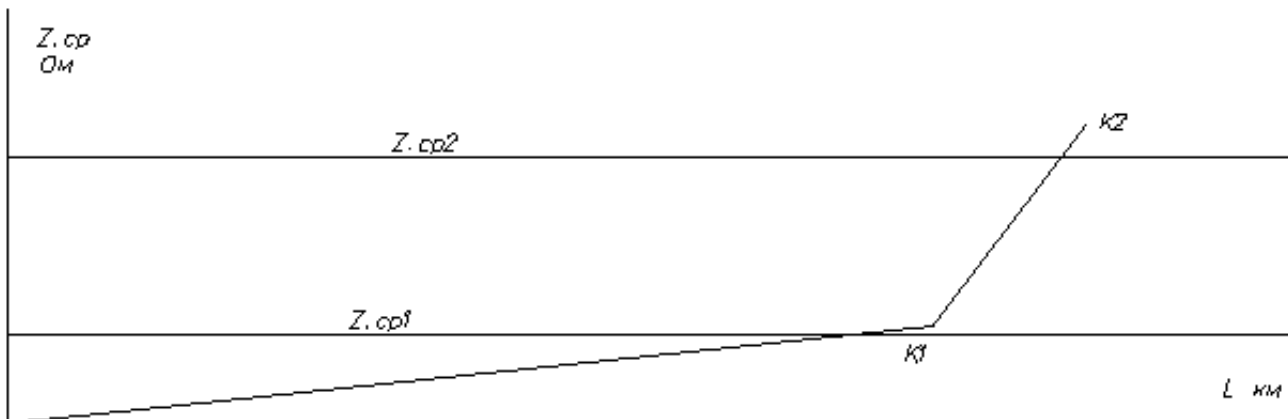


Рис. 7.15. Карта селективності дистанційних захистів

7.6. Мікропроцесорний диференційно-фазний захист ліній

Мікропроцесорний диференційно-фазний захист (ДФЗ) серії ПМ РЗА «ДІАМАНТ» застосовується в мережах складної конфігурації, у тому числі при двосторонньому живленні ліній. ДФЗ спрацьовує при усіх видах КЗ тільки на лінії, що захищається, і не спрацьовує при КЗ на суміжних лініях, тобто має абсолютну селективність захисту.

Пристрої ПМ РЗА «ДІАМАНТ» забезпечують такі функціональні можливості захисту: п'ятиступеневого направленої струмового захисту нульової послідовності; п'ятиступеневого дистанційного захисту (ДЗ) від усіх видів КЗ; триступеневого максимального струмового захисту; міжфазної струмової відсічки; від неповнофазного режиму.

ПМ РЗА «ДІАМАНТ» контролює електричні параметри вхідних аналогових сигналів, обчислює струми нульової і зворотної послідовності, лінійні напруги, напруги нульової і зворотної послідовності, частоту, а також активну та реактивну потужності та енергії.

У ПМ РЗА «ДІАМАНТ» реалізовані п'ятиступеневий дистанційний захист від багатофазних коротких замикань і п'ятиступеневий дистанційний захист від однофазних коротких замикань.

Диференційно-фазний захист високочастотний (ДФЗ ВЧ) типу L041 є основним захистом від усіх видів пошкоджень ліній. Принцип дії захисту заснований на порівнянні струмів фаз у кінцях лінії, що отримуються від комбінованого фільтра струмів прямої і зворотної послідовностей. Інформація про фазний кут струму передається з одного кінця лінії, що захищається, на інший за високочастотним каналом типовими високочастотними приймачами-передавачами. Схему високочастотного каналу диференційно-фазного захисту ліній показано на рис. 7.16.

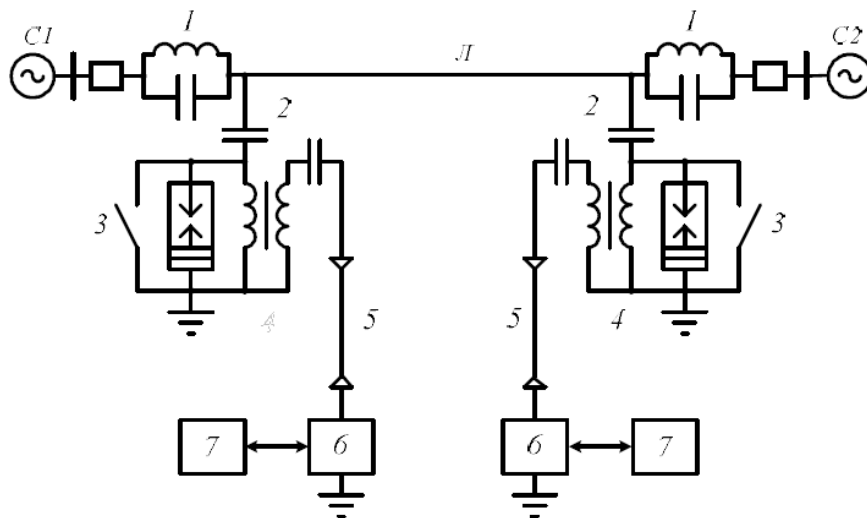


Рис. 7.16. Схема високочастотного каналу диференційно-фазного захисту ліній

Конденсатор зв'язку 2 та фільтр приєднань 4 утворюють смуговий фільтр, що пропускає ВЧ-сигнал і не пропускає струми промислової частоти. Крім того, він забезпечує узгодження вхідних хвильових опорів лінії та ВЧ-кабелю 5 для приєднання фільтра до блока приймача-передавача 6. Приймач-передавач 6 призначений для приймання та генерування ВЧ-сигналів. Керування процесом генерування ВЧ-сигналів здійснює релейна частина 7 для оброблення ВЧ-сигналів від приймача, керує передавачем та, у разі виконання певних умов, формує сигнал вимкнення вимикача лінії. Захисні пристрої 3 призначені для захисту низьковольтного обладнання від дії високої напруги.

Важливою перевагою ДФЗ є неспрацьовування захисту при хитаннях напруги, що виключає застосування блокування від хитань. Це забезпечується за рахунок того, що контролюють не величини струмів, а їхні фази.

7.7. Мікропроцесорні пристрої автоматики для ліній електропередач

Мікропроцесорні пристрої автоматики для ліній електропередач забезпечують надійність електропостачання і стійкість енергосистеми.

Мікропроцесорний пристрій автоматичного повторного вмикання серії АПВ2 призначений для одного або дворазового повторного вмикання високовольтного вимикача в схемах протиаварійної автоматики. Зовнішній вигляд лицьової панелі показаний на рис. 7.18.

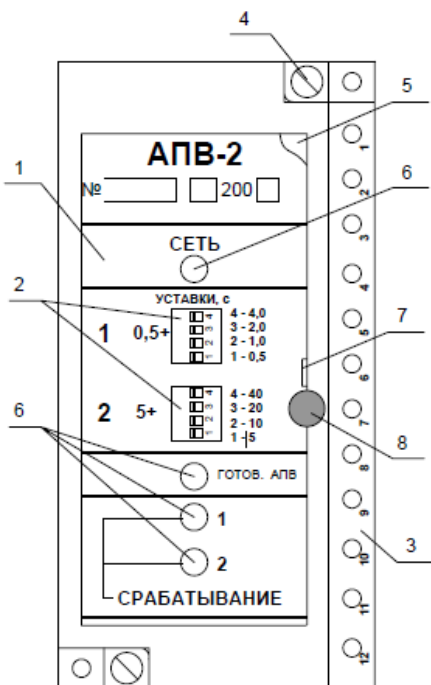


Рис. 7.18. Зовнішній вигляд лицьової панелі мікропроцесорного пристрою автоматичного повторного вмикання серії АПВ-2

1 – панель із маркуванням; 2 – перемикачі завдання уставок; 3 – захисна кришка; 4 – гвинт для кріплення кришки на корпусі та пломбування мастикою; 5 – прозора панель, 6 – світлодіоди; 7 – паз для зняття прозорої панелі; 8 – місце пломбування прозорої панелі.

Діапазон зміни уставок часу: 0,5–8 с – для першого увімкнення; -5-80 с – для другого увімкнення. Дискретність зміни уставок витримки часу: 0,5 с – для першого увімкнення; 5 с – для другого увімкнення. Напруга живлення постійна або змінна (187–242 В). Потужність споживання – не більше 2,5 ВА.

Пристрої мають один вихідний контакт, що замикається при струмі до 3А та напрузі від 24 до 250 В, із допустимою потужністю: до 60 Вт для кіл постійного струму з постійною часу не більше 0,005 с та до 700 ВА для кіл змінного струму з коефіцієнтом потужності не менше 0,5.

Пристрій керується трьома вхідними сигналами: 1) блок-контакт вимикача – замиканням клем 6 і 7 пристрою; 2) скидання сигналу ГОТОВИЙ.

АПВ» – замиканням клем 6 і 8 пристрою; 3) ПУСК АПВ – замиканням клем 6 і 11 пристрою.

Вхідні сигнали є потенційними, тобто діють на пристрій протягом усього часу з моменту подачі до моменту зняття. Вхідний сигнал ПУСК АПВ має імпульсну дію на пристрій. Він діє протягом перших 100 мс після подачі (за наявності сигналу «ГОТОВИЙ. АПВ»).

Спрощену внутрішню схему пристрою показано на рис. 7.19.

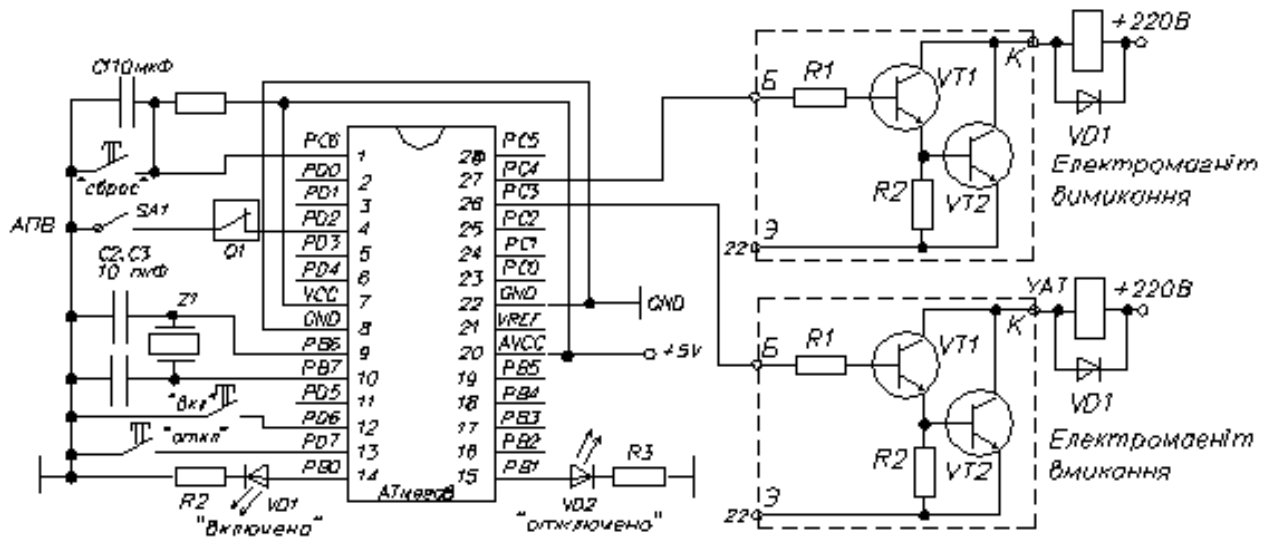


Рис. 7.19. Спрощена внутрішня схема реле АПВ

Зліва на схемі показано кнопку "скидання", яка підключена до 1-го виводу мікросхеми МК. Скидання МК означає зовнішнє переривання основної програми, тобто виконання основної програми переривається і в програмний лічильник завантажуються "нулі". "Нулі" є адресою першої комірки FLASH-пам'яті, в якій завантажено 1-шу команду основної програми.

У процесі виконання програми МК на 1-му виводі мікросхеми МК має бути "1". При натисканні на кнопку "скидання", яка подає нульовий рівень на 1-й вивід мікросхеми, у всі регістри МК завантажуються "нулі". Конденсатор С1 резистор R1 призначений для скидання при подачі живлення. Слід зазначити, що при подачі живлення відбувається автоматичне скидання за допомогою внутрішньої схеми МК. Але зовнішнє автоматичне скидання при подачі живлення за допомогою резистора R1 і конденсатора С1 необхідне при налаштуванні та діагностиці МК. Напруга на конденсаторі в момент подачі живлення на МК дорівнює нулю, а після подачі живлення зростає від нуля до 5В.

Нижче на схемі показані контакт SA1 для вимкання АПВ і розмикаючий контакт Q1 вимикача. Після захисного відключення вимикача змикається контакт Q1, переривається основна програма і викликається

підпрограма АПВ. Алгоритм програми керування вимикачем з АПВ показаний на рис. 7.20.

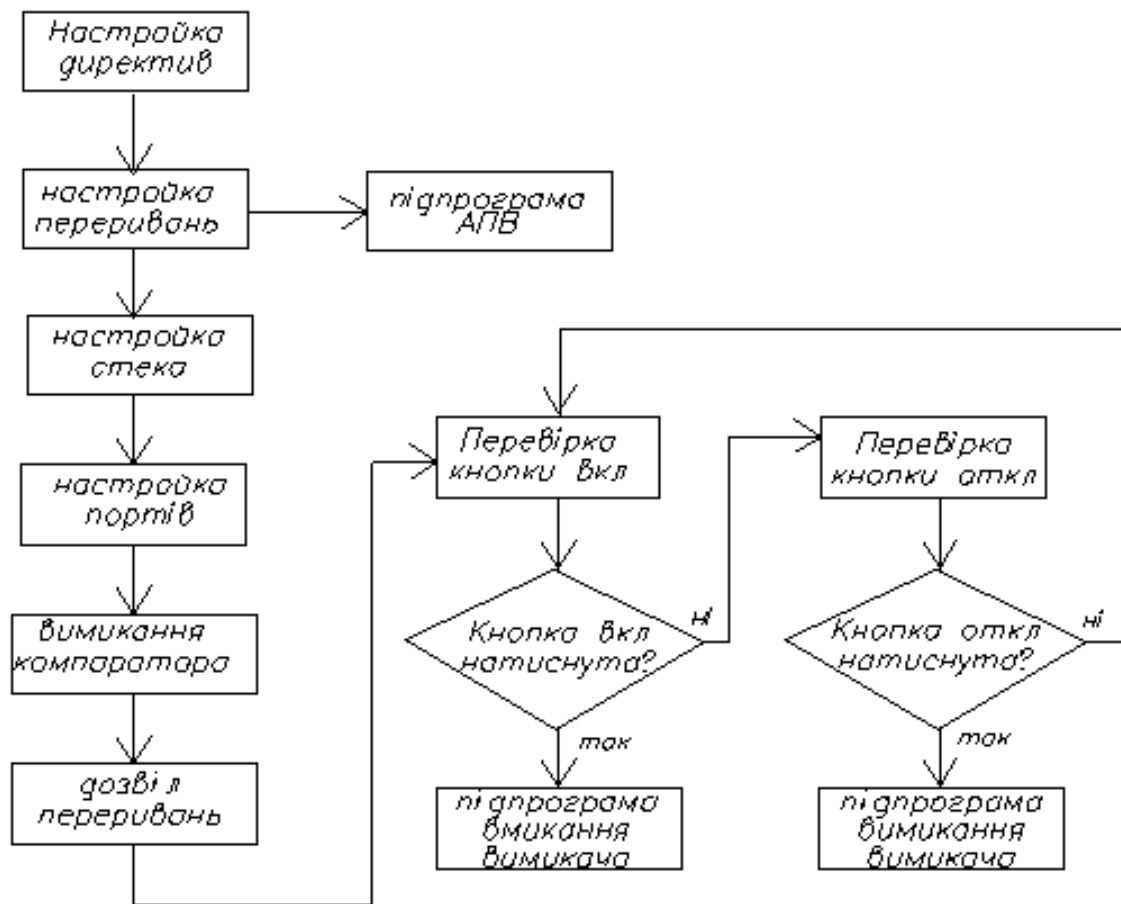


Рис. 7.20. Алгоритм програми керування вимикачем з АПВ

На основі алгоритму складений перелік директив і команд програми.

Таблиця 7.1 – Перелік директив і команд програми Асемблера

Директиви	Коментарі до директив
.device ATmega8	;директива вказує, що програма складена для ATmega8
.include "m8def.inc"	;директива підключає файл з бібліотеки "AVR studio"
.cseg	;директива вказує про запис команд в ROM-пам'ять
.org 0x0000	;адреса 1-ї комірки ROM-пам'ять
rjmp main	;команда безумовного переходу на основну програму
.org 0x0001	;адреса 2-ї комірки ROM-пам'ять
rjmp arv	;команда переходу на підпрограму "АПВ"
reti3- reti19	;команди-заглушки в комірки 3-19 таблиці переривань
main:	;мітка основної програми
ldi r16, high(RAMEND)	;завантаження в r16 адреси останньої комірки RAM
out SPH, r16	;пересилка адреси в старший регістр покажчика стека

ldi r16, low(RAMEND)	;завантаження адреси передостанньої комірки RAM
out SPL, r16	;пересилка адреси в молодший регістр покажчика стека
ldi r16,0b00001100	;підключимо внутрішні резистори
out portd , r16	;підключення внутрішніх резистора до 2-го та 3-го розряду порту D
ldi r16, 0b00011000	;завантаження "1" в 4-й і 5-й розряди регістра r16
out portd, r16	;підключення внутрішніх резисторів в розряди порту D
ldi r16, 0b00110000	;завантаження робочого регістра r16 двійковим кодом
out ddrc, r16	;програмування розрядів 4,5 порту C на вихід
ldi r16,0b00000010	;завантаження робочого регістра r16 двійковим кодом
out ddrb, r16	;програмування розряду 1 порту B на вихід, інші на вхід
ldi r16,0x80	;вимикання компаратора для зменшення
out acsr, r16	;енергоспоживання
ldi R16, 0b11000000	;налаштування регістра GICR переривань
out GICR, R16	;вибрано входи PD2 та PD3 для зовнішніх переривань
ldi R16,0b00001010	;налаштування регістра MCUCR переривань
out MCUCR, R16	
sei	;завантаження "1" у 7-й розряд статусного регістра – команда загального дозволу переривань

Налаштування зовнішніх переривань після вимикання вимикача полягає у завантаженні комбінацій біт у розряди двох 8-розрядних регістрів керування зовнішніми перериваннями: GICR, MCUCR. Регістр GICR вибирає для зовнішніх переривань обидва входи МК. Регістр MCUCR задає форму сигналу на входах портів для зовнішнє переривання. Для цього в розряди 0-1-2-3 завантажують комбінацію біт, що визначають форму імпульсу на вході для виклику зовнішніх переривань: 1-ша комбінація "0-0-0-0" – спрацювання з появою низького рівня. 2-га комбінація "0-1-0-1" – спрацювання за будь-якої зміни рівня. 3-тя комбінація "1-0-1-0" – спрацювання при спадаючому фронті імпульсу. 4-та комбінація "1-1-1-1" – спрацювання при зростаючому фронті імпульсу.

Поки контакт вимикача розімкнуто на входах МК логічна "одиниця" від внутрішніх резисторів, які підключені до входів. При спрацюванні вимикача контакти замикаються та подають на вхід логічний "нуль". Можна прийняти 1-шу комбінацію "0-0-0-0", тобто спрацювання з появою низького рівня на вході. Але цей варіант прийняти не можна, оскільки контакт буде постійно замкнений і безперервно викликати переривання. Програма «зависне». Тому приймаємо спрацювання переривання по спадаючому фронту імпульсу, тобто третю комбінацію.

Команди головної програми, яка полягає в опитуванні стану кнопок керування, наведені в табл. 7.2.

Таблиця 7.2 – Команди основної програми опитування стану кнопок

Команди	Коментарі
кнопкі:	Мітка основної програми опитування кнопок
sbic pind,4	Пропуск наступної команди при натиснутій кнопки "откл"
rjmp PC+3	Пропуск двох наступних команд
sbi portc,4	Вимкнути вимикач
sbic pind,5	Пропуск наступної команди при натиснутій кнопки "вкл"
rjmp PC+3	Пропуск двох наступних команд
sbi portc,5	Увімкнути вимикач
rjmp кнопкі	Команда переходу на початок програми – безкінечний цикл

Алгоритм підпрограми АПВ показаний на рис. 7.21, за яким складені команди підпрограми в табл. 7.3.

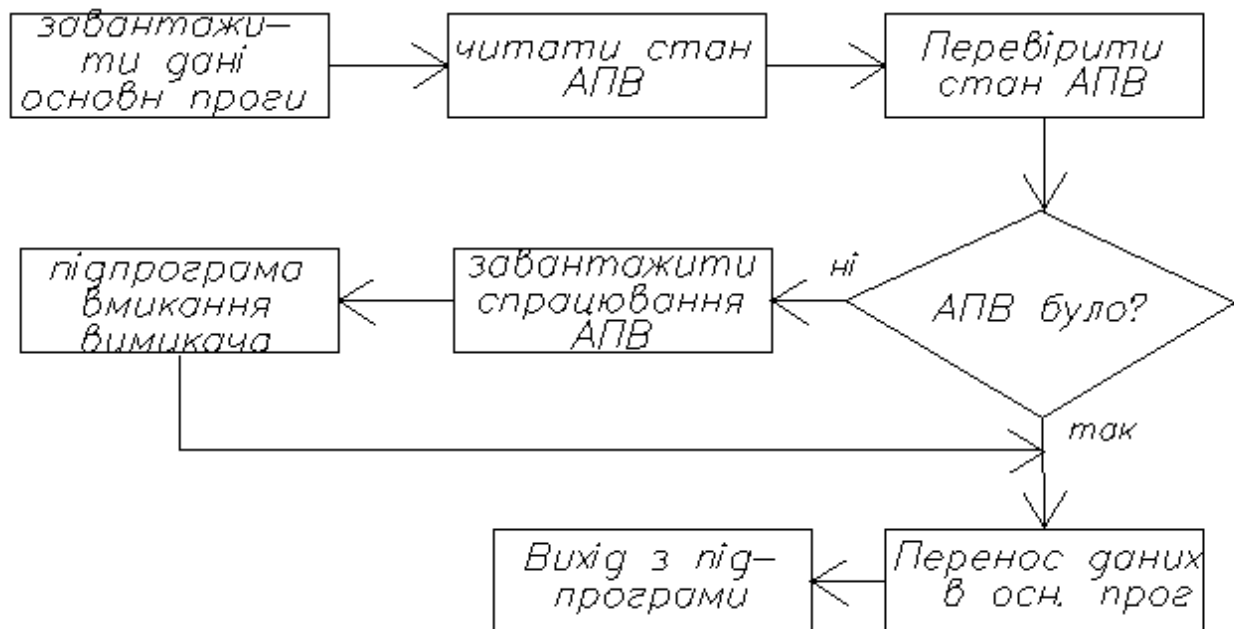


Рис. 7.21. Алгоритм підпрограми АПВ

Таблиця 7.3 – Підпрограма АПВ

	Команди	Коментарі до команд
1	push r16	;завантаження даних з основної програми
2	lds r16, arv	;зчитування даних спрацювання АПВ з RAM-пам'яті
3	cp r16,0	;перевірка спрацювання АПВ через порівняння цифр
4	brne vihid	;якщо цифри не рівні, то вихід із підпрограми
5	ldi r17,1	;спрацювання АПВ через завантаження
6	sts arv, r17	;одиниці в комірку RAM-пам'яті
7	rcall vkl	;виклик підпрограми вмикання вимикача
8	Vihid:	;мітка команди виходу підпрограми вмикання
9	reti	;команди виходу з підпрограми АПВ

Як пристрій автоматики використовують мікропроцесорне реле автоматичного частотного розвантаження серії РЧ-3М-С, яке реалізує автоматичне частотне розвантаження (АЧР) і частотне автоматичне повторне вмикання (ЧАПВ).

Реле має три незалежні канали контролю зниження та підвищення частоти з уставками частоти, часу спрацювання та повернення для кожного каналу. Спрощену схему пристрою наведено на рис. 7.22.

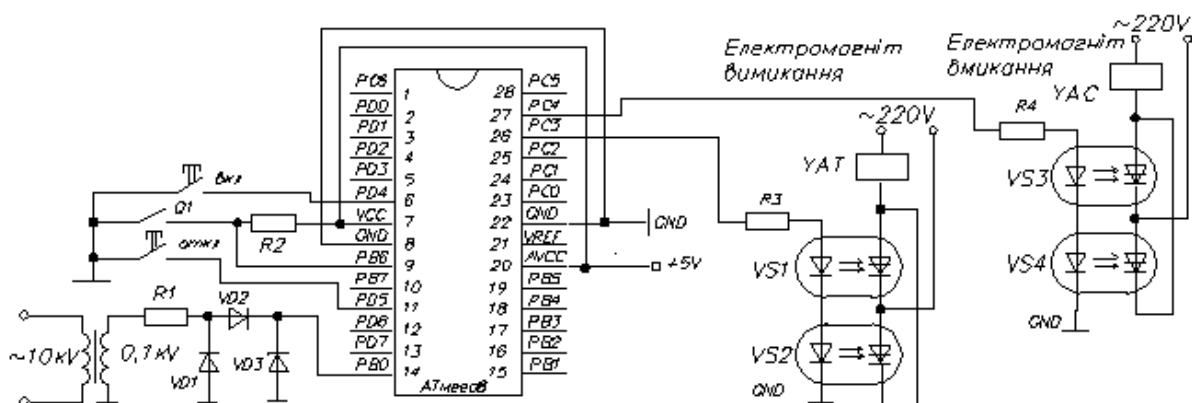


Рис. 7.22. Спрощена схема реле автоматичного частотного розвантаження

Зліва показаний трансформатор напруги, з вторинної обмотки якого на вивід №14 МК АТмега8 надходять імпульси напруги з частотою мережі, подані на рис. 7.23.

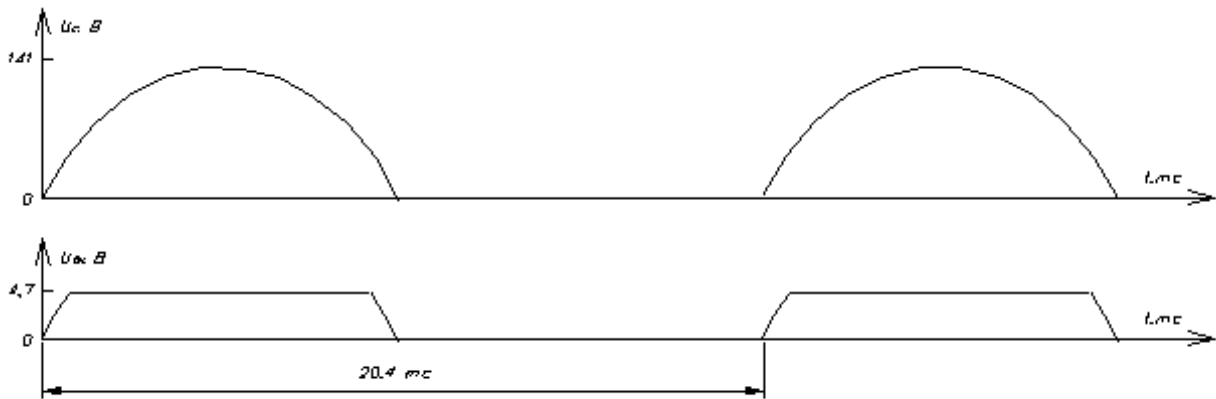


Рис. 7.23. Діаграми напруг на вході мікроконтролера

АТмега8 містить спеціальний 16-розрядний реєстр захоплення ICR1, в який апаратно завантажуються дані з рахункового реєстра TCNT1 таймера T1. Завантаження числа імпульсів в реєстр ICR1 зупиняється по фронту імпульсу напруги, що наростає на вході реєстра ICR1. Для програмування таймера T1 використовують 8-розрядний реєстр керування TCCR1B, 16-розрядний лічильний реєстр TCNT1 і реєстр ICR1.

Таким чином, напівперіод синусоїди 10 мс заповнюється кількістю імпульсів відповідно до частоти мережі. Чим більше імпульсів заповнить синусоїду, тим точніше таймер визначатиме період синусоїди.

Визначимо уставку спрацювання АЧР, тобто порахуємо кількість імпульсів таймера за період 20,4 мс, що відповідає частоті мережі 49 Гц.

Приймаємо, що частота синхрогенератора дорівнює 1 МГц. Тоді кількість імпульсів визначається як $N_i = T_c / T_i = 20400 / 1 = 20400$ імпульсів, тобто менше за максимальне числа 65535. Алгоритм підпрограми АЧР наведено на рис. 7.24.

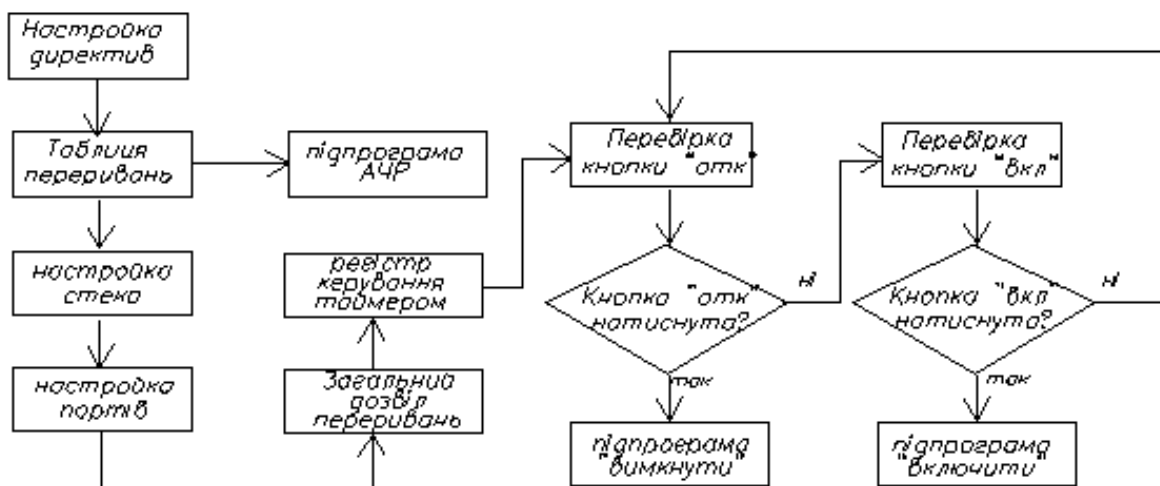


Рис. 7.24. Алгоритм підпрограми АЧР

АЧР представляється у вигляді підпрограми, що викликається з таблиці переривань після зупинки завантаження регістра ICR1 при наростаючому фронті вхідного імпульсу напруги мережі. Таблиця переривань містить перші 19 комірок ROM-пам'яті, які закріплені за периферійними пристроями. У ці комірки можуть бути завантажені команди переходу на відповідні підпрограми при спрацьовуванні периферійних пристроїв.

Спрацьовує переривання, і в програмний лічильник автоматично завантажується адреса комірки, у якій завантажено команду переходу на підпрограму АЧР.

Таблиця 7.4 – Програмування регістра керування перериваннями

Команда	Коментар
.org 0x005	;адреса комірки, закріплена за регістром ICR1 при спрацьовуванні
rjmp ACHR	;команда переходу на підпрограму АЧР

Програмування переривань під час роботи таймера полягає у встановленні відповідних біт у регістрі керування перериваннями TIMSK і регістрі керування TCCR1B таймером T1 в табл. 7.5.

Таблиця 7.5 – Програмування регістра керування перериваннями

Команда	Коментар
ldi r19,0b00100000	;дозвіл переривань при завантаженні регістра ICR1
out TIMSK,r19	та завантаження в регістр керування TIMSK
ldi r16, 0b00100001	;завантаження коду в робочий регістр
out TCCR1B, r16	;пуск таймера з частотою 1МГц та перериванням по передньому фронту

У регістрі TCCR1B керування таймером встановлюємо частоту на вході таймера, рівну частоті синхрогенератора 1 МГц, і вмикаємо запис у регістр ICR1 по передньому фронту імпульсу напруги. 6-й розряд регістра TCCR1B програмує переривання по фронту імпульсу: при завантаженні «1» переривання запускаються на зростаючому фронті зовнішнього імпульсу, при завантаженні «0» — на спадному фронті.

В момент наростання імпульсу напруги зупиняється завантаження регістра ICR1, тобто фіксується поточне значення періоду синусоїди напруги. Алгоритм підпрограми АЧР показаний на рис. 7.25.

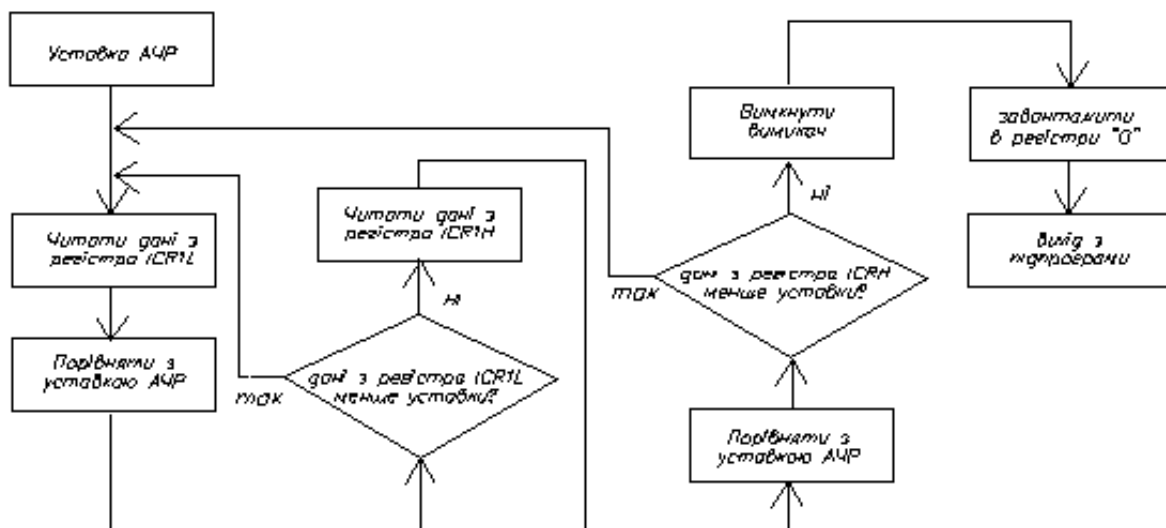


Рис. 7.25. Алгоритм підпрограми АЧР на основі таймера

За алгоритмом підпрограми АЧР складаємо команди для його реалізації в табл. 7.6.

Таблиця 7.6 – Програмування реєстра керування перериваннями

Команда	Коментар
ACHR:	;мітка підпрограми АЧР
.equ freq = 20400	;директива надала ім'я для уставки АЧР
wate:	мітка для команди умовного переходу
in r16, ICR1L	;читати число імпульсів з молодшого байта реєстра ICR1
cpi r16, low(freq)	;порівняти з молодшим байтом уставки АЧР
brlo wate	;якщо число менше уставки, йти на мітку wate
in r16, ICR1H	;читати дані зі старшого реєстра ICR1
cpi r16, high(freq)	;порівняти число імпульсів зі старшим байтом уставки
brlo wate	;якщо менше, йти на мітку wate
rcall otkl	;виклик підпрограми вимкнення вимикача, якщо кількість імпульсів дорівнює або більше уставки
crl r16	;команда скидання реєстра r16 в "нуль"
out TCNT1H, r16	;команда обнуління реєстра
out TCNT1L, r16	;команда обнуління реєстра
out ICR1H, r16	;команда обнуління реєстра
out ICR1L, r16	;команда обнуління реєстра
reti	;команда виходу з підпрограми АЧР

У 1-му блоці алгоритму – це уставка спрацювання АЧР, тобто число імпульсів треба завантажити у програму. В Асемблері є директива, яка надає імена числам, це зручно при зміні числа, тобто в одному місці число змінили, і воно змінилося у всіх командах.

Далі за алгоритмом зчитуються дані з молодшого байта регістра ICR1 та порівнюються з молодшим байтом уставки частоти. 16-розрядний регістр ICR1 складається з двох 8-розрядних. При читанні першим читають молодший, а другим – старший. За порушення цього правила програма працювати не буде. Уставка АЧР 20400 імпульсів – число двобайтове, а всі операції проходять через однобайтові робочі регістри. Отже, з числа уставки АЧР треба виділити молодший і старший байт. Для цього в Асемблері використовуються спеціальні функції для виокремлення молодшого і старшого байтів з двобайтового числа, тобто `low(req)` і `high(req)`.

Сенс команди порівняння `srli` полягає у відніманні з числа імпульсів у робочому регістрі `r16` молодшого байта уставки АЧР. Далі за алгоритмом йде блок умовного переходу, у якому за результатом порівняння вибирається подальший шлях виконання програми. Ось для чого було введено мітку `wate`. Якщо число в молодшому лічильному регістрі менше молодшого байта уставки, то команда умовного переходу `brlo` виконує перехід на команду з міткою `wate`. А якщо дорівнює або більше, то виконується наступна команда, тобто читання даних зі старшого рахункового регістра. Аналогічно робимо для старшого байта уставки часу. Після відключення вимикача треба скинути всі регістри в нуль і вийти з підпрограми.

Бібліографічний список

1. Правила улаштування електроустановок : затв. М-вом енергетики та вуг. промисловості України : чинний з 21.07.2017. 5-те вид., перероб. і доп. Харків : Форт, 2017. 792 с.
2. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів : затв. М-вом палива та енергетики України : чинний з 25.07.2006. Харків : Основа, 2022. 328 с.
3. Сокол Є. І., Сендерович Г. А., Гриб О. Г. та ін. Релейний захист електроенергетичних систем : підруч. для студентів зі спец. електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Харків : ФОП Бровін О. В., 2020. 306 с.
4. Говоров П. П., Сендерович Г. А., Соколов В. Ф. та ін. Релейний захист і автоматика в системах електропостачання : навч. посіб. Київ : ІЗМН, 1996. 288 с.
5. Кідиба В. П. Релейний захист електроенергетичних систем : навч. посіб. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2015. 504 с.
6. Яндульський О. С., Дмитренко О. О. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 102 с.
7. Кідиба В. П., Шелепетень Т. М. Захист трансформаторів та автотрансформаторів. Львів : В-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2004, 180 с.
8. Кідиба В. П., Шелепетень Т. М. Захист ліній електропересилання. Львів : В-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2004 185 с.
9. Голота А. Д. Автоматика в електроенергетичних системах : навч. посіб. Київ : Вища шк., 2006. 367 с.
10. Шелепетень Т. М. Захисна автоматика електричних мереж : навч. посіб. для студентів спец. 7.090602 та 8.090602 "Електричні системи та мережі" всіх форм навчання. Львів, 2002. 157 с.
11. Ковальова Ю. В. Методичні рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи з навчальної дисципліни «Мікроконтролери в електроенергетиці» для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 58 с.
12. Пристрій мікропроцесорний захисту, автоматики, контролю і управління приєднань МРЗС-05Л : настанова з експлуатації АИАР.466452.001РЭ. Електрон. текст. дані. Київ, 2019. URL: https://www.kievpribor.com.ua/download/mrzs-05l_
13. ПМ РЗА «Діамант» Релейний захист та протиаварійна автоматика. URL: <http://hartron-inkor.com>

14. ДСТУ ІЕС 60050-604:2004 Словник електротехнічних термінів. Вироблення, передавання та розподіляння електричної енергії. Експлуатація електроустановок (ІЕС 60050-604:1987, IDT).
15. Фурман І. О., Малиновський М. Л., Джулгаков В. Г. Мікроелектронні засоби керування : підручник для студентів ВНЗ. Харків : Факт, 2007. 486 с.
16. Халіков В. А., Липківський К. О. Процеси та організація комутації трансформаторів. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 5. С. 22–30.
17. Подальцев А. Д., Конторович Л. Н. Чисельний розрахунок електричних струмів в силовому трансформаторі в аварійних режимах. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 6. С. 3–9.
18. Зірка С. Є., Мороз Ю. І. Моделювання перехідних процесів в трансформаторі з урахуванням гістерезисних властивостей магнітопровода. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 2. С. 11–19.
19. Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. та ін. Основи схемотехніки електронних систем : підручник. Київ : Вища шк., 2004. 527с.
20. Мікропроцесорна техніка : навч. посіб. для студентів усіх форм навчання та студентів-іноземців напряму підготовки 6.050701 “Електротехніка та електротехнології” / НТУУ «КПІ» ; уклад. В. В. Кирик. Київ : Політехніка, 2014. 184 с.

Навчальне видання

Ковальов Віктор Миколайович

**ОСНОВИ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ЗАХИСТУ
І АВТОМАТИКИ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ**

Редактор Костіна І.В.

Зв. план, 2026

Підписано до видання 25.02.2026

Ум. друк. арк. 9,8. Обл.-вид. арк. 10,6. Електронний ресурс

Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Вадима Манька, 17
<http://www.khai.edu> izdat@khai.edu

Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Вадима Манька, 17

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001