

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до проведення практичних занять
з освітнього компонента**

***«ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ
СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ»***

**для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти
спеціальності G3 «Електрична інженерія» освітньої програми
«Електропостачання та ресурсозберігаючі технології»
всіх форм здобуття освіти**

Харків – 2026

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки 25 травня 2026 р., протокол № 15.

Методичні вказівки складаються з типових практичних робіт за основними розділами освітнього компонента «ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ». Призначені для проведення практичних занять в дистанційному форматі як під керівництвом викладача, так і в автономному режимі. Рекомендовано для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності G3 «Електрична інженерія» усіх форм навчання.

Укладачі:

доц. О. А. Плахтій,
проф. В. В. Панченко

Рецензент

проф. О. М. Ананьєва

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Теоретичні відомості.....	6
2 Приклади серійних приладів.....	17
3 Вихідні дані та припущення.....	22
4 Методика розрахунку.....	26
5 Алгоритм роботи та перевірка логіки	39
6 Приклад розрахунку.....	44
7 Завдання та вимоги до звіту	48
Список літератури	52

ВСТУП

Методичні вказівки призначені для розрахункової практичної роботи з дисципліни «Засоби автоматизації систем електропостачання» для магістрантів спеціальності G3 «Електрична інженерія» освітньої програми «Електропостачання та ресурсозберігаючі технології» всіх форм здобуття освіти.

Тема роботи — розрахунок параметрів і вибір засобів автоматичного вводу резерву (ABP) напругою 0,4 кВ. Об'єкт — розподільний щит із основним і резервним вводами та групами пріоритетних С і непріоритетних N електроприймачів. Обмежена потужність резерву потребує обґрунтування допустимого складу навантаження після перемикання.

Мета роботи — сформувати здатність обґрунтовувати структуру й параметри автоматики електропостачання за електричними та часовими характеристиками. Розглядаються комутаційні апарати, уставки контролю напруги, витримки часу, вимірювальні кола та резервне оперативне живлення. Результатом є специфікація вимог і алгоритм ABP із блокуванням паралельного з'єднання джерел.

Після виконання роботи здобувач має вміти розраховувати активну, реактивну та повну потужності; визначати струми вводів; перевіряти достатність резерву; задавати гістерезис і витримки часу; добирати трансформатори струму та переріз їх вторинних проводів; оцінювати потрібну ємність акумулятора оперативного живлення.

Робота виконується розрахунковим методом із використанням калькулятора або електронних таблиць. Обґрунтування каталожного добору спирається на документацію виробників. Логічну коректність перевіряють

аналітично за таблицею станів та послідовностями контрольних подій; розроблення програми й імітаційної моделі не передбачається.

Вихідні дані є навчальними й застосовуються в межах прийнятих припущень. Серійні прилади ілюструють засоби реалізації функцій; їх відповідність установлюють зіставленням паспортних і розрахункових характеристик.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Функції засобів автоматизації

Автоматизація систем електропостачання забезпечує одержання інформації про електричний режим, оцінювання стану обладнання та формування керувальних впливів. Релейний захист локалізує пошкодження, тоді як АВР відновлює живлення непошкодженої частини системи від іншого джерела. Узгодження цих функцій визначає допустимість і послідовність комутацій [1, 2]. На рисунку 1.1 наведено функціональний зв'язок вимірювання, логічного оброблення, виконавчих апаратів і зворотного зв'язку.



Рисунок 1.1 — Функціональна структура автоматики електропостачання

Вимірювальний орган перетворює електричні величини на інформаційні сигнали. Логічний орган зіставляє їх з уставками, враховує попередній стан та часові умови і формує команди виконавчим апаратам. Зворотний зв'язок за допоміжними контактами підтверджує фактичне виконання комутації. Отже, наявність команди є необхідною, але не достатньою ознакою зміни стану силового кола.

До засобів автоматизації належать реле контролю напруги та фаз, реле часу, проміжні реле, контролери АВР, програмовані логічні контролери,

вимірювачі, контактори, моторизовані перемикачі та джерела оперативного живлення. Канал зв'язку з диспетчерською системою доповнює місцеву автоматику, але в цій роботі її основна функція не залежить від зовнішньої мережі даних.

У структурі автоматики розрізняють вимірювані величини, логічні ознаки та керувальні команди. Значення напруги характеризує фізичний режим; ознака придатності вводу є результатом перевірки сукупності умов; команда контактору задає потрібну дію. Таке розмежування дає змогу однозначно визначити входи, стани та виходи алгоритму.

1.2 Принцип дії АВР двох вводів

На рисунку 1.2 наведено однолінійну схему двоввідного АВР із керованим відключенням неперіоритетної групи. Схема відображає розташування захисних і комутаційних апаратів та розподіл навантаження за пріоритетом електропостачання.

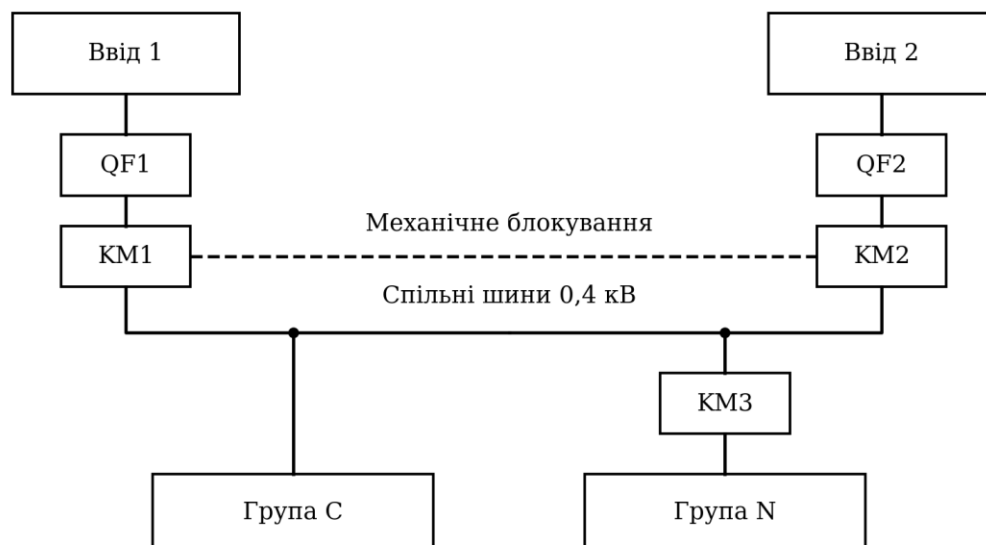


Рисунок 1.2 — Однолінійна схема АВР із відключенням неперіоритетної групи навантаження

Автоматичні вимикачі QF1 і QF2 захищають відповідні вводи, контактори КМ1 та КМ2 виконують перемикання джерел, контактор КМ3 відключає неперіоритетну групу N. Група С має зберігати живлення після введення резерву. На схемі показано трифазне трипровідне силове навантаження; лінія означає три фазні провідники. Захисний РЕ не комутують. Для реального об'єкта питання перемикання N вирішують окремо за схемою заземлення та складом навантаження.

Для заданої структури прийнято відкритий перехід: розмикання чинного вводу, підтвердження розімкненого стану, витримування безструмової паузи та подальше замикання іншого вводу. Перекриття замкнених станів КМ1 і КМ2 не допускається. Внаслідок такої послідовності виникає перерва електропостачання; її тривалість визначають сумою відповідних часових складових.

Якщо причина зникнення напруги — коротке замикання на спільних шинах, введення резерву забороняють до усунення пошкодження. Наявність справної напруги резервного вводу сама по собі не є достатньою умовою його ввімкнення.

1.3 Вимірювання напруги та визначення придатності вводу

Діюче значення напруги характеризує її теплову дію на активний опір. Для періодичного сигналу його визначають інтегруванням квадрата миттєвої напруги за період; для цифрових вимірювань застосовують дискретне наближення:

$$U_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}, \quad U_{\text{rms}} \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_k^2}. \quad (1.1)$$

де U_{rms} — діюче (середньоквадратичне) значення напруги, В; $u(t)$ — миттєва напруга в момент t , В; t — час, с; T — період напруги, с; u_k — k -й відлік миттєвої напруги, В; N — кількість рівномірних відліків за період; k — номер відліку.

У розрахунку контролюють діючі значення трьох лінійних напруг U_{AB} , U_{BC} і U_{CA} . Номінальна лінійна напруга U_n становить 400 В. Фазна напруга відносно нейтралі до цих уставок не підставляється. Найменшу та найбільшу контрольовані напруги визначають за виразами:

$$U_{\min} = \min(U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}), \quad U_{\max} = \max(U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}). \quad (1.2)$$

де $U_{\min}$ і $U_{\max}$ — найменше та найбільше діючі значення лінійної напруги, В; U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} — діючі значення напруг між відповідними фазами А, В, С, В; $\min$ і $\max$ — операції вибору найменшого та найбільшого аргументів.

Пуск за зниженою напругою формується, якщо хоча б одна лінійна напруга менша за U_- ; пуск за підвищеною — якщо хоча б одна перевищує U_+ . Додатковими умовами придатності є наявність і правильне чергування фаз. Відносний розкид модулів лінійних напруг оцінюють навчальним показником:

$$a_U = 100 \frac{U_{\max} - U_{\min}}{(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA})/3} \%. \quad (1.3)$$

де a_U — відносний розкид лінійних напруг, %; $U_{\max}$ і $U_{\min}$ — найбільша та найменша лінійні напруги, В; U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} — контрольовані лінійні напруги, В.

Формула (1.3) є навчальним показником розкиду лінійних напруг. Вона не є коефіцієнтом несиметрії за напругою зворотної послідовності і не переноситься без перевірки до шкали реле. Для визначення зворотної послідовності потрібні комплексні фазори, а не лише три модулі.

Короткочасний провал не завжди потребує перемикання. Витримка пуску має відбудовуватися від допустимої короткої події, але сумарний час відновлення живлення повинен залишатися меншим за допустиму перерву для групи С. Ці дві вимоги перевіряють разом.

1.4 Гістерезис та часові характеристики

Гістерезис забезпечує різні пороги переходу в аварійний стан і повернення до нормального стану. Це зменшує ймовірність повторних перемикань за малих коливань поблизу уставки. Напруги повернення для нижнього та верхнього порогів обчислюють за формулами:

$$U_{-,ret} = U_- + hU_n, \quad U_{+,ret} = U_+ - hU_n. \quad (1.4)$$

де $U_{-,ret}$ і $U_{+,ret}$ — напруги повернення після зниження та підвищення напруги відповідно, В; U_- і U_+ — нижня та верхня уставки спрацювання, В; h — відносна ширина гістерезису, частка одиниці; U_n — номінальна лінійна напруга, В. У роботі $h = 0,03$, тому абсолютна ширина гістерезису становить 12 В.

На рисунку 1.3 показано взаємне розташування порогів спрацювання й повернення. Межі 352 і 440 В відповідають пуску, а 364 і 428 В — відновленню дозволу; відстані між ними характеризують гістерезис.

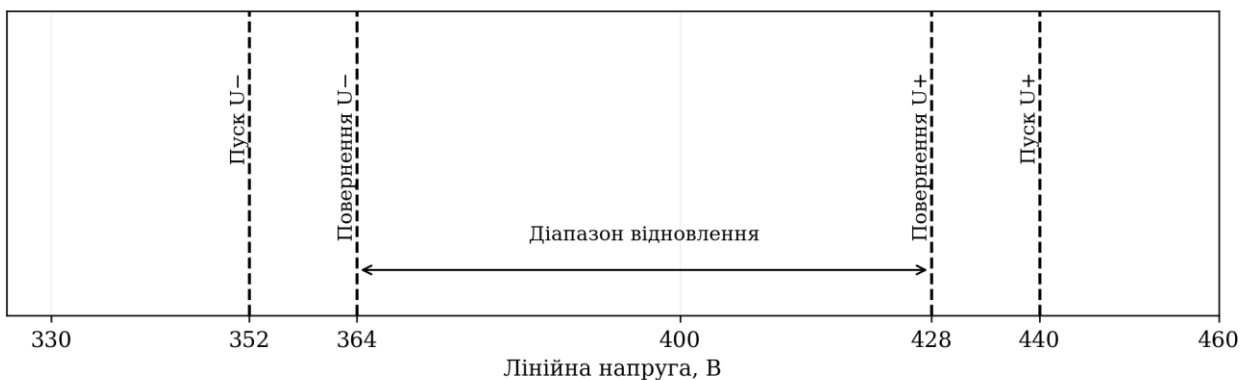


Рисунок 1.3 — Зони спрацювання та повернення за уставок 352 і 440 В

Ввід, попередньо визнаний непридатним, повертається до придатного стану після входження всіх контрольованих напруг у внутрішній діапазон, підтвердження правильного чергування фаз та завершення заданої витримки. У проміжних зонах рішення залежить від попереднього стану. Фізичний зміст гістерезису полягає у збереженні стану реле в межах цих зон.

Слід розрізняти час вимірювання, навмисну витримку пуску, затримку логіки, час відключення апарата, підтвердження положення, безструмову паузу та час увімкнення. Каталожний час руху контактора не дорівнює повному часу АВР.

Повернення на основний ввід виконують після його стійкого відновлення. Тривала витримка повернення не означає тривалу перерву живлення: до початку зворотної комутації навантаження залишається на резерві. Сумарний час очікування і фактичну перерву обліковують окремо.

1.5 Блокування та контроль виконання команд

Взаємне блокування поєднує алгоритмічну заборону суперечливих команд, електричне блокування кіл котушок і механічне блокування сумісних апаратів. Таке поєднання зменшує залежність функції від одного каналу

керування. Рисунок 1.4 пояснює електричне блокування: нормально замкнений допоміжний контакт протилежного контактора включено послідовно з котушкою керуваного апарата.

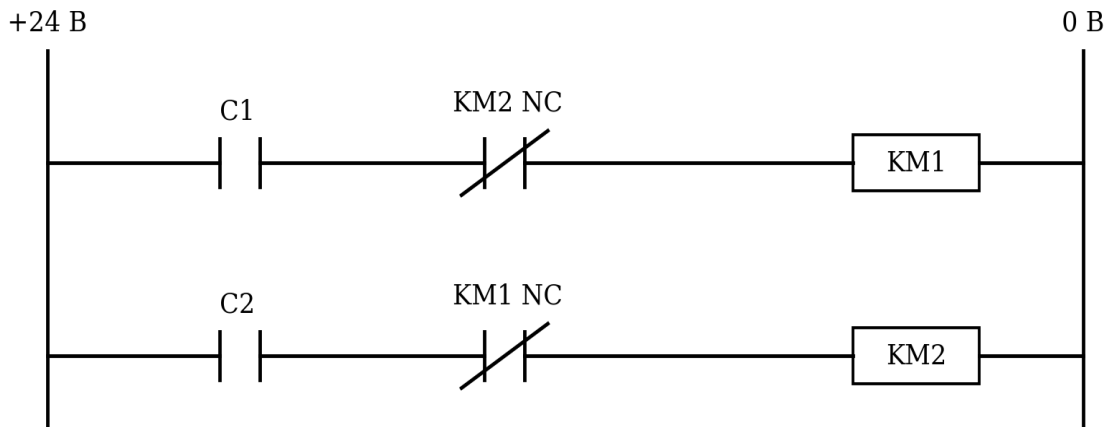


Рисунок 1.4 — Принцип електричного блокування котушок KM1 та KM2 у колі оперативного живлення 24 В DC

Заборону одночасного замикання двох вводів і видачі двох команд задають логічними інваріантами:

$$K_1 K_2 = 0, \quad C_1 C_2 = 0. \quad (1.5)$$

де K_1 і K_2 — двійкові ознаки підтвердженого замкненого стану відповідних ввідних контакторів; C_1 і C_2 — двійкові команди їх увімкнення. Значення 1 означає наявність ознаки або команди, 0 — її відсутність. Добуток двох двійкових змінних еквівалентний логічній операції «І».

Відсутність команди на увімкнення не підтверджує розмикання силових контактів. За їх зварювання або відмови приводу увімкнення протилежного

вводу має залишатися заблокованим. Сигнал несправності фіксують до встановлення причини й дозволеного скидання.

На рисунку подано принципове коло дозволу, без нумерації клем конкретного виробу. Котушки та вихідні контакти добирають за напругою і категорією навантаження. Паралельний котушці звичайний діод може збільшувати час відпускання; вплив захисного елемента враховують у прийнятому часі відключення.

1.6 Вимірювальна інформація та достовірність пуску

Діюче значення напруги характеризує енергетичну дію сигналу, але не описує окремо фазовий зсув, гармонічний склад або швидкість зміни напруги. Тому контроль лише діючого значення не є повною перевіркою якості електроенергії. Для АВР потрібний набір вимірювальних ознак визначають умовами допустимого живлення електроприймачів: рівнем напруги, наявністю фаз, їх чергуванням та, за потреби, частотою [1, 2].

У цифровому вимірювальному каналі тривалість вікна усереднення впливає на швидкодію. Після раптового провалу вікно ще містить відліки попереднього режиму, тому обчислене значення змінюється не миттєво. Додаткові затримки створюють фільтрація, цикл оброблення й опитування дискретних входів. У розрахунку їх представляють часовою складовою t_m , відокремленою від навмисної витримки t_D .

Гістерезис і витримка часу виконують різні функції. Гістерезис розділяє пороги за рівнем напруги, а витримка відокремлює події за тривалістю. Короткий вихід за уставку може бути відхилений часовим критерієм, проте тривалий недопустимий режим повинен викликати дію. Для прийнятого

алгоритму пусковий таймер відраховує час лише за неперервного існування пускової умови; її зникнення скидає незавершений відлік.

1.7 Узгодження резервування із захистом і навантаженням

Селективність захисту полягає у відключенні пошкодженої ділянки зі збереженням живлення непошкоджених споживачів. Зниження напруги на шинах може бути наслідком як зовнішньої втрати живлення, так і внутрішнього короткого замикання. Ці події не можна ототожнювати: у другому випадку повторне подавання напруги від резерву підтримувало б пошкодження. Тому алгоритм використовує окрему блокувальну ознаку В, що має пріоритет над командою резервування [1, 2].

Достатність резерву має енергетичний і комутаційний аспекти. Усталена повна потужність визначає тривале завантаження джерела, тоді як пуск двигунів може зумовити короточасний струм і провал напруги, істотно більші за розраховані усталені значення. Коефіцієнт k_s задає розрахунковий запас потужності, але не замінює перевірки самозапуску. Для неї необхідні склад двигунового навантаження, кратність пускового струму, інерційні характеристики та опір джерела.

Після відключення двигуни, що обертаються, можуть підтримувати залишкову напругу. Її фаза і частота з часом відхиляються від параметрів нового джерела. Отже, сама відсутність паралельного з'єднання вводів не гарантує малого перехідного струму при повторному підключенні двигунів. Для конкретного об'єкта вибір паузи обґрунтовують характером навантаження та прийнятим способом переходу.

1.8 Автомат станів і контроль виконання комутацій

Алгоритм АВР доцільно розглядати як скінченний автомат: кожному стану відповідають допустимі команди, а перехід визначається вимірювальними ознаками, підтвердженнями положення та таймерами. Такий опис унеможливорює трактування окремої логічної формули як повного алгоритму. Однакова комбінація напруг може вимагати різних дій залежно від того, чи система працює на основному вводі, очікує розмикання або вже перебуває на резерві.

Час очікування підтвердження має бути обмеженим. Якщо апарат не досяг потрібного положення в установленому інтервалі, автоматика фіксує відмову, забороняє наступну небезпечну комутацію та формує сигналізацію. Одночасні підтвердження замкненого і розімкненого положень одного апарата є суперечливими. Відсутність обох сигналів може відповідати руху механізму лише протягом допустимого часу переходу.

Безпечне відновлення після втрати оперативного живлення потребує повторного зчитування положень апаратів і придатності джерел. Збережена в пам'яті команда не є підтвердженням поточного стану. Початковий стан алгоритму визначають за достовірними вхідними сигналами; за їх суперечності автоматичне замикання забороняють до усунення невизначеності.

1.9 Вимірювальні кола та енергетичне забезпечення автоматики

Трансформатор струму передає інформацію про первинний струм у вторинне коло зі стандартизованим номіналом. Струм намагнічування та опори обмоток спричиняють похибку, яка залежить від первинного струму й навантаження вторинного кола. Збільшення опору проводів підвищує потрібну

вторинну напругу і впливає на точність. Тому переріз визначають не лише за нагріванням проводу, а й за допустимим навантаженням ТС.

Вимірювальні та захисні ТС мають різні завдання. Для вимірювання важлива точність у робочому діапазоні, для захисту — достовірність передавання аварійних струмів у заданих межах. Вибір вимірювального ТС за номінальним струмом і потужністю не доводить його придатності для релейного захисту. Прийняті в роботі $5 \text{ В} \cdot \text{А}$ характеризують номінальне вторинне навантаження одного ТС, а не потужність, споживану силовим навантаженням.

Резервне живлення автоматики забезпечує незалежність керування від стану силових вводів. Ємність батареї визначає запас енергії, тоді як допустимий струм джерела й батареї — здатність одночасно жити контролер і приводити в дію котушки. Енергетична достатність не гарантує відсутності короткочасного провалу напруги під час спрацювання апарата. Тому розрахунок автономності доповнюють перевіркою пускових струмів, допустимого діапазону напруги та зарядного алгоритму.

2 ПРИКЛАДИ СЕРІЙНИХ ПРИЛАДІВ

2.1 Контролер АВР LOVATO ATL610

Контролер ATL610 призначений для автоматичного вводу резервної лінії живлення до навантаження, тобто керування перемиканням між двома джерелами живлення. Він має входи контролю трифазної напруги, дисплей, дискретні входи й релейні виходи. Вимірювання та логіка інтегровані в контролер; силові контакти розміщені в зовнішніх комутаційних апаратах [4].

На рисунку 2.1 наведено зовнішній вигляд контролера LOVATO ATL610. Органи індикації та налаштування забезпечують місцевий контроль, тоді як комутацію силового кола виконують зовнішні апарати [4].



Рисунок 2.1 — Контролер LOVATO ATL610

Технічні характеристики контролера LOVATO ATL610 подано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Приклад характеристик контролера [4]

Характеристика	Значення за каталогом
Джерела, що контролюються	2
Живлення	110–240 В АС та 12–24 В DC
Номінальна вимірювана напруга	100–480 В АС, між фазами
Дискретні входи / релейні виходи	6 / 7
Розширення	2 слоти EXP
Споживання від 24 В DC	До 120 мА

Для розрахункового алгоритму нижче визначають потрібний склад входів і виходів, а не припускають, що будь-яка програма АВР автоматично виконує всі додаткові функції. Реалізацію відключення КМЗ та блокування за несправності підтверджують за функціями і призначенням I/O вибраного контролера. За потреби застосовують розширення або окрему логіку.

2.2 Реле контролю напруги LOVATO PMV70A575

На рисунку 2.2 показано реле серії PMV70 зі шкалою 208–240 В. Подальший розрахунок стосується виконання PMV70A575 із діапазоном номінальної контрольованої напруги 380–575 В; зовнішня подібність виробів не означає тотожності їх параметрів.

Реле PMV70A575 призначене для контролю трифазної мережі без нейтралі. Воно формує вихідний сигнал за недопустимої напруги, втрати або неправильного чергування фаз. Функцію контролю асиметрії серії PMV70 описано в інструкції [7]; спосіб її обчислення відрізняють від навчального показника (1.3). Силове коло навантаження комутує зовнішній контактор [5, 7].



Рисунок 2.2 — Реле серії LOVATO PMV70

Характеристики вимірювального реле LOVATO PMV70 подано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 — Характеристики вимірювального реле LOVATO PMV70

Параметр	Значення
Контрольований номінал напруги U_e	380–575 В АС
Нижня / верхня уставки	80–95 % / 105–115 % U_e
Витримка спрацювання	0,1–20 с
Гістерезис повернення	3 %
Вихід	Один перемикальний контакт
Стан реле за норми	Увімкнене; за спрацювання відпадає

Для двох введів у релейній реалізації потрібні два незалежні канали контролю. У контролерній реалізації ці функції можуть бути вбудовані. Навчальний розрахунок часу є консервативною оцінкою із заданими

затримками; реальні спеціальні затримки за обриву фази та глибокого провалу звіряють з інструкцією.

2.3 Силовий контактор LOVATO BF4000A230

На рисунку 2.3 наведено триполюсний контактор LOVATO BF4000A230. Для цього виконання допустимий робочий струм становить 40 А в категорії АС-3 за напруги 400 В і 70 А в категорії АС-1 за температури не вище 40 °С. Котушка А230 розрахована на 230 В змінного струму [6].



Рисунок 2.3 — Контактор LOVATO BF4000A230

Фото з офіційного каталогу виробника [6]

На рисунку 1.4 використано інший принцип живлення котушок — 24 В DC. Тому показане виконання А230 не підключають до цього кола. Для основного розрахункового рішення вибирають виконання з котушкою 24 В DC або окремо переробляють оперативне живлення. Фото наведено для вивчення будови і правил читання каталогу.

Контактор не замінює автоматичного вимикача від короткого замикання. Перевіряють комутаційну категорію, допустимий робочий струм, ресурс, кількість полюсів, сумісне механічне блокування, допоміжні контакти й узгодження із захисним апаратом. Для готового перемикача АВР застосовують його власні характеристики і категорії, а не лише дані контактора.

У навчальному процесі далі визначають мінімальні потрібні номінали. Завершений каталожний добір для реального щита потребує перевірки струму короткого замикання, умов установлення, пускових процесів та таблиць координації виробника. Фотографії не є монтажною інструкцією.

3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТА ПРИПУЩЕННЯ

Кожен варіант розрахунку містить дві групи симетричного трифазного навантаження. P_C і P_N — активні електричні потужності на вході груп С і N; додатково ділити їх на ККД не потрібно. Обидві групи мають індуктивний характер реактивної потужності. Коефіцієнти попиту вже враховано. S_R — доступна повна потужність резервного вводу після врахування його інших споживачів. Ввід 1 здатний жити все задане навантаження. Усі величини відповідають усталеному режиму. Розрахунок пуску двигунів, провалу напруги під час пуску та струмів КЗ не входить до числової частини; перелік потрібних для цього даних здобувач включає до висновку.

Спільні розрахункові параметри для всіх варіантів розрахунку подано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 — Спільні розрахункові параметри

Параметр	Значення
Лінійна напруга / частота	400 В / 50 Гц
Запас за робочим струмом k_I	1,20
Запас потужності резерву k_S	1,15
Нижній / верхній пороги	$0,88U_n$ / $1,10U_n$
Відносний гістерезис h	0,03 (3 %)
Оперативне живлення	24 В DC
Вторинний струм ТС / потужність	5 А / 5 В·А
Навантаження приладу / контактів ТС	1,0 В·А / 0,5 В·А
Питомий опір міді для розрахунку	0,0225 Ом·мм ² /м
Акумулятор: η / D / k_T	0,85 / 0,70 / 0,80
Коефіцієнт запасу ємності k_B	1,25

В таблиці 3.1 подано такі позначення: η – ККД передачі енергії від акумулятора до навантаження ланки постійного струму; D — допустима частка використаної ємності; k_T — прийняте зниження доступної ємності за температури.

3.1 Вихідні дані для розрахунку – дані навантаження та резерву

Індивідуальні вихідні дані навантаження та параметрів резервного джерела для виконання розрахунку подано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Вихідні дані навантаження та резервного джерела

Вар.	P_C , кВт	P_N , кВт	$\cos\varphi_C$	$\cos\varphi_N$	S_R , кВт·А
1	2	3	4	5	6
1	20	10	0,84	0,92	31
2	22	10	0,86	0,92	36
3	24	10	0,88	0,92	43
4	26	10	0,90	0,92	50
5	28	10	0,92	0,92	62
6	30	13	0,84	0,93	46
7	32	13	0,86	0,93	52
8	34	13	0,88	0,93	60
9	36	13	0,90	0,93	70
10	38	13	0,92	0,93	84
11	40	16	0,84	0,94	61
12	42	16	0,86	0,94	68
13	44	16	0,88	0,94	78
14	46	16	0,90	0,94	89
15	48	16	0,92	0,94	105
16	50	19	0,84	0,95	76
17	52	19	0,86	0,95	84
18	54	19	0,88	0,95	96

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6
19	56	19	0,90	0,95	108
20	58	19	0,92	0,95	127
21	60	22	0,84	0,92	91
22	62	22	0,86	0,92	100
23	64	22	0,88	0,92	113
24	66	22	0,90	0,92	127
25	68	22	0,92	0,92	149
26	70	25	0,84	0,93	106
27	72	25	0,86	0,93	116
28	74	25	0,88	0,93	131
29	76	25	0,90	0,93	146
30	78	25	0,92	0,93	171

Групу N дозволено відключати лише повністю. У варіанті потрібно самостійно визначити, чи необхідне таке відключення. Групу С в межах задачі не розвантажують. Якщо резерв достатній для обох груп із запасом, КМЗ можна залишати ввімкненим після переходу.

3.2 Часові та допоміжні параметри варіантів

Вихідні дані витримок часу та параметри вторинних кіл для розрахунку подано в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 — Дані для витримок часу та вторинних кіл

Вар.	$t_{\text{пров}}, \text{с}$	$t_{\text{доп}}, \text{с}$	$t_{\text{пов}}, \text{с}$	$l, \text{м}$	$P_{\text{DC}}, \text{Вт}$	$t_{\text{авт}}, \text{хв}$
1	2	3	4	5	6	7
1	0,15	1,5	20	5	12	15
2	0,15	1,7	20	5	14	15
3	0,15	1,9	20	5	16	15

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5	6	7
4	0,15	2,1	20	5	18	15
5	0,15	2,3	20	5	20	15
6	0,20	1,5	25	7	12	25
7	0,20	1,7	25	7	14	25
8	0,20	1,9	25	7	16	25
9	0,20	2,1	25	7	18	25
10	0,20	2,3	25	7	20	25
11	0,25	1,5	30	9	12	35
12	0,25	1,7	30	9	14	35
13	0,25	1,9	30	9	16	35
14	0,25	2,1	30	9	18	35
15	0,25	2,3	30	9	20	35
16	0,30	1,5	35	11	12	45
17	0,30	1,7	35	11	14	45
18	0,30	1,9	35	11	16	45
19	0,30	2,1	35	11	18	45
20	0,30	2,3	35	11	20	45
21	0,35	1,5	40	13	12	55
22	0,35	1,7	40	13	14	55
23	0,35	1,9	40	13	16	55
24	0,35	2,1	40	13	18	55
25	0,35	2,3	40	13	20	55
26	0,40	1,5	45	15	12	65
27	0,40	1,7	45	15	14	65
28	0,40	1,9	45	15	16	65
29	0,40	2,1	45	15	18	65
30	0,40	2,3	45	15	20	65

У таблиці 3.3 подано такі позначення: $t_{\text{пров}}$ – найбільша тривалість допустимого короткого провалу; $t_{\text{доп}}$ – дозволена перерва живлення С; $t_{\text{пов}}$ – підтвердження стійкого відновлення вводу 1; l – довжина траси від ТС до приладу в один бік; $P_{\text{ДС}}$ – сумарне тривале споживання всього кола 24 В, включно з утримуваними котушками; $t_{\text{авт}}$ – потрібна автономність автоматики.

4 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

4.1 Потужності та струми навантаження

Для симетричного синусоїдного режиму потужності груп підсумовують за активною та реактивною складовими. За різних коефіцієнтів потужності арифметична сума модулів повних потужностей не дорівнює повній потужності сукупного навантаження. Реактивні потужності груп визначають за формулами:

$$Q_C = P_C \tan(\arccos c_C), \quad Q_N = P_N \tan(\arccos c_N). \quad (4.1)$$

де Q_C і Q_N — реактивні потужності пріоритетної та непріоритетної груп, квар; P_C і P_N — їх активні потужності, кВт; $c_C = \cos \varphi_C$ і $c_N = \cos \varphi_N$ — коефіцієнти потужності груп; φ_C і φ_N — кути зсуву фаз між напругою та струмом. Для індуктивного навантаження реактивні потужності приймають додатними.

Сумарні активну, реактивну та повну потужності навантаження визначають за формулами:

$$P_\Sigma = P_C + P_N, \quad Q_\Sigma = Q_C + Q_N, \quad S_\Sigma = \sqrt{P_\Sigma^2 + Q_\Sigma^2}. \quad (4.2)$$

де P_Σ — сумарна активна потужність, кВт; Q_Σ — сумарна реактивна потужність, квар; S_Σ — сумарна повна потужність, кВ·А; P_C і P_N — активні потужності груп, кВт; Q_C і Q_N — їх реактивні потужності, квар. Індекс Σ позначає сукупне навантаження.

Повні потужності окремих груп і коефіцієнт потужності сукупного навантаження обчислюють за співвідношеннями:

$$S_C = \frac{P_C}{c_C}, \quad S_N = \frac{P_N}{c_N}, \quad c_\Sigma = \frac{P_\Sigma}{S_\Sigma}. \quad (4.3)$$

де S_C і S_N — повні потужності груп C і N, кВ·А; P_C і P_N — їх активні потужності, кВт; c_C і c_N — коефіцієнти потужності груп; c_Σ — сумарний коефіцієнт потужності; P_Σ і S_Σ — сумарні активна потужність, кВт, та повна потужність, кВ·А. Усі коефіцієнти потужності безрозмірні.

Розрахунок струмів ґрунтується на симетрії трифазного навантаження та синусоїдності напруги і струму. За повної потужності в кВ·А та лінійної напруги у вольтах діючі значення лінійних струмів обчислюють за формулами:

$$I_\Sigma = \frac{1000S_\Sigma}{\sqrt{3}U_n}, \quad I_C = \frac{1000S_C}{\sqrt{3}U_n}, \quad I_N = \frac{1000S_N}{\sqrt{3}U_n}. \quad (4.4)$$

де I_Σ , I_C , I_N — діючі значення лінійних струмів сукупного навантаження та груп C і N відповідно, А; S_Σ , S_C , S_N — відповідні повні потужності, кВ·А; U_n — номінальна лінійна напруга, В.

4.2 Достатність резерву та рішення про розвантаження

Можливість живлення пріоритетної групи та необхідність відключення непріоритетної групи встановлюють за умовами:

$$k_S S_C \leq S_R, \quad L = \begin{cases} 0, & k_S S_\Sigma \leq S_R, \\ 1, & k_S S_\Sigma > S_R. \end{cases} \quad (4.5)$$

де k_S — коефіцієнт запасу потужності резерву, у роботі 1,15; S_C — повна потужність пріоритетної групи, $\text{кВ} \cdot \text{А}$; S_Σ — повна потужність обох груп, $\text{кВ} \cdot \text{А}$; S_R — доступна повна потужність резервного джерела, $\text{кВ} \cdot \text{А}$; L — двійкова логічна ознака розвантаження: 0 — обидві групи залишаються, 1 — групу N відключають.

Перша нерівність обов'язкова: резерв має забезпечити С із запасом. $L = 1$ означає необхідність відключити N перед замиканням КМ2. За $L = 0$ відключення не потрібне. Усі 30 варіантів підібрано так, що живлення С можливе; потреба розвантаження не однакова для всіх варіантів.

Повну потужність, що залишається на резерві, та його коефіцієнт завантаження визначають за формулами:

$$S_{\text{res,load}} = \begin{cases} S_\Sigma, & L = 0, \\ S_C, & L = 1, \end{cases} \quad \beta_R = \frac{S_{\text{res,load}}}{S_R}. \quad (4.6)$$

де $S_{\text{res,load}}$ — повна потужність навантаження після переходу на резерв, $\text{кВ} \cdot \text{А}$; S_Σ — потужність обох груп, $\text{кВ} \cdot \text{А}$; S_C — потужність пріоритетної групи, $\text{кВ} \cdot \text{А}$; L — ознака розвантаження; β_R — коефіцієнт завантаження резерву, частка одиниці; S_R — доступна потужність резервного джерела, $\text{кВ} \cdot \text{А}$.

4.3 Вибір комутаційних апаратів та захисту

КМ1 і КМ2 приймають однаковими за номіналом, розрахованим для всього навантаження. Це уніфікує вузол і не дозволяє помилково вибрати ввідний апарат лише за меншим струмом групи С. КМ3 добирають за струмом N:

$$I_{e,1}, I_{e,2} \geq k_I I_{\Sigma}, \quad I_{e,3} \geq k_I I_N. \quad (4.7)$$

де $I_{e,1}$, $I_{e,2}$ та $I_{e,3}$ — допустимі робочі струми контакторів КМ1, КМ2 та КМ3 у потрібній категорії застосування, А; k_I — коефіцієнт запасу за струмом, у роботі 1,20; I_{Σ} — сумарний струм навантаження, А; I_N — струм неперіоритетної групи, А.

Ряд номіналів значення струмів складає 40А; 50А; 63А; 80А; 100А; 125А; 160А; 200А; 250А; 315А; 400А. Приймають найменше значення, що задовольняє умову (4.7). Цей ряд задає умовний вибір; за реальним каталогом застосовують найближчий більший доступний номінал у потрібній категорії.

Результат за струмом є необхідною, але не достатньою умовою. Для контактора перевіряють АС-1, АС-3 або іншу категорію відповідно до навантаження. Для готового апарата перемикач застосовують його категорію використання за документацією. Додавання коефіцієнта 1,20 не замінює цієї перевірки.

Початкове узгодження автоматичного вимикача з навантаженням, кабелем і очікуваним коротким замиканням перевіряють за нерівностями:

$$I_B \leq I_{n,QF} \leq I_Z, \quad I_{cu,QF} \geq I_{k,max}. \quad (4.8)$$

де I_B — розрахунковий струм кола, А; $I_{n,QF}$ — номінальний струм або узгоджена довготривала уставка автоматичного вимикача, А; I_Z — допустимий тривалий струм кабелю за фактичних умов, А; $I_{cu,QF}$ — гранична вимикальна здатність вимикача, А; $I_{k,max}$ — найбільший очікуваний струм короткого замикання, А.

Умови (4.8) є початковими умовами вибору захисного апарата. Додатково перевіряють час відключення, захист кабелю від перевантаження, робочу вимикальну здатність I_{cs} і координацію з контактором. Оскільки струми короткого замикання та характеристики кабелів не задано, числовий добір автоматичного вимикача в цій роботі не виконується.

У специфікації наводять потрібний струм, робочу напругу, кількість полюсів, напругу котушки 24 В DC, вимоги до механічного блокування та допоміжних контактів. Для двигунового навантаження додатково зазначають необхідність перевірки пускових струмів і залишкової напруги перед повторним увімкненням.

4.4 Розрахунок уставок контролю напруги

Нижню й верхню уставки спрацювання обчислюють як задані частки номінальної лінійної напруги:

$$U_- = 0.88U_n = 352 \text{ В}, \quad U_+ = 1.10U_n = 440 \text{ В}. \quad (4.9)$$

де U_- — нижня уставка спрацювання, В; U_+ — верхня уставка спрацювання, В; U_n — номінальна лінійна напруга, 400 В; 0,88 і 1,10 — прийняті відносні пороги.

Напруги повернення за гістерезису 3 % визначають підстановкою у (1.4):

$$U_{-,ret} = 364 \text{ В}, \quad U_{+,ret} = 428 \text{ В}. \quad (4.10)$$

де $U_{-,ret}$ — нижній поріг повернення, В; $U_{+,ret}$ — верхній поріг повернення, В. Значення 364 і 428 В отримано відповідно додаванням та відніманням 12 В від уставок спрацювання.

Ці уставки є спільними умовами навчальної роботи. Вони задають межі перемикавання, а не нормативні показники якості електроенергії. Їх придатність для конкретного обладнання визначають за допустимими режимами споживачів і потрібною координацією з іншими захистами.

Для прийнятого гістерезису 3 % ширина зони становить 12 В. Якщо сумарна оцінена амплітуда шуму та похибки поблизу порогу дорівнює ε_U , практичну відбудову від коливань оцінюють умовою:

$$hU_n > 2\varepsilon_U. \quad (4.11)$$

де h — відносна ширина гістерезису; U_n — номінальна лінійна напруга, В; ε_U — оцінена максимальна амплітуда відхилення вимірюваної напруги через шум і похибку, В. Добуток $h \cdot U_n$ є абсолютною шириною гістерезису, а $2\varepsilon_U$ — повним розмахом можливого відхилення.

За навчальної оцінки $\varepsilon_U = 4$ В маємо $12 > 8$ В. Це перевірка запасу гістерезису, а не повний розрахунок метрологічної невизначеності. Для реального реле враховують похибку вимірювання, шкали встановлення, температурний вплив і спосіб визначення відсоткового порогу.

Для наборів лінійних напруг (400; 398; 402) В, (346; 395; 398) В і (366; 367; 369) В необхідно визначити $U_{\min}$, $U_{\max}$ та a_U . На основі результатів установлюють наявність пускової умови або можливість повернення після попередньої відмови. У третьому випадку виконання нижньої умови повернення ще не замінює перевірку решти ознак та витримки часу.

Для реле РМВ70А575 номінал контролю встановлюють на 400 В, нижню шкалу — на 88 %, верхню — на 110 %. Якщо точність шкали не дозволяє встановити розраховане значення точно, у звіті вказують прийняте доступне значення й повторюють перевірку порогів.

4.5 Узгодження витримок часу

Пускову витримку визначають із часовим запасом 0,10 с щодо допустимого короткого провалу. Для узгодження з навчальним кроком налаштування 0,05 с застосовують округлення в бік збільшення:

$$t_D = 0.05 \left\lceil \frac{t_{\text{sag}} + 0.10}{0.05} \right\rceil. \quad (4.12)$$

де t_D — прийнята витримка пуску АВР, с; t_{sag} — найбільша тривалість допустимого короткого провалу, с, яка в таблиці 3.3 позначена $t_{\text{пров}}$; 0,10 с — часовий запас; 0,05 с — крок налаштування; $\lceil x \rceil$ — округлення числа x до найближчого більшого або рівного цілого.

Значення граничних часових складових подано в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 — Граничні часові складові

Складова часу	Позначення	Значення, с
Виявлення зміни напруги	t_m	0,10
Обробка рішення	t_l	0,02
Відключення КМ1 або КМ3	t_{off}	0,08
Підтвердження положення	t_{fb}	0,05
Пауза після підтвердженого розриву	t_0	0,15
Увімкнення нового вводу	t_{on}	0,10

За $L = 1$ команди відключення КМ1 і КМ3 видають одночасно. Тому час двох паралельних операцій беруть за максимумом, а не додають. Резерв у базовому випадку вже перевірений і придатний до моменту аварії:

$$\tau_{\text{off}} = \max(t_{\text{off1}} + t_{\text{fb}}, L(t_{\text{off3}} + t_{\text{fb}})). \quad (4.13)$$

де τ_{off} — час завершення паралельних операцій відключення з підтвердженням, с; t_{off1} і t_{off3} — час відключення КМ1 та КМ3, с; t_{fb} — затримка підтвердження положення, с; L — ознака необхідності відключення групи N; $\max$ — вибір більшої тривалості. За $L = 0$ друга гілка не визначає результат.

Повний час АВР охоплює вимірювання, пускову витримку, логічне оброблення, відключення й підтвердження, паузу, увімкнення та кінцеве підтвердження. За параметрами таблиці 4.1 сума всіх складових, крім пускової витримки, дорівнює 0,55 с. Розрахунковий час і умову допустимості визначають виразом:

$$t_{\text{AVR}} = t_{\text{D}} + 0.55 \text{ с} \leq t_{\text{allow}}. \quad (4.14)$$

де t_{AVR} — розрахунковий час переходу на резерв із кінцевим підтвердженням, с; t_{D} — витримка пуску, с; t_{allow} — допустима перерва живлення пріоритетної групи, с, позначена в таблиці 3.3 як $t_{\text{доп}}$; 0,55 с — сума інших прийнятих затримок.

Оцінка включає фінальне підтвердження замикання і тому консервативна щодо моменту появи напруги. Якщо резерв став придатним пізніше, його час очікування враховують додатково за фактичною послідовністю. Задані часи не є паспортними характеристиками приладів на фотографіях.

За невиконання (4.14) зменшувати витримку нижче умови відбудови від провалу не можна без зміни вимог. Потрібні швидші апарати, інша логіка або окремий UPS для навантаження С. Зворотну комутацію починають після $t_{\text{пов}}$ із таблиці 3.3; власна перерва зворотного переходу за цими даними становить 0,45 с.

4.6 Трансформатори струму та вторинні проводи

Вимірювальні трансформатори струму (ТС) встановлюють на спільних шинах для контролю навантаження. У прийнятому алгоритмі вони не формують основний пуск АВР. Первинний номінал добирають із ряду 50; 75; 100; 150; 200; 250; 300; 400 А, вторинний — 5 А. Умову вибору, коефіцієнт трансформації та робочий вторинний струм визначають за співвідношеннями:

$$I_{1n} \geq 1.20 I_{\Sigma}, \quad k_{\text{СТ}} = \frac{I_{1n}}{I_{2n}}, \quad I_2 = \frac{I_1}{k_{\text{СТ}}}. \quad (4.15)$$

де I_{1n} і I_{2n} — номінальні первинний та вторинний струми ТС, А; I_{Σ} — сумарний робочий струм навантаження, А; $k_{\text{СТ}}$ — коефіцієнт трансформації струму, безрозмірний; I_1 і I_2 — робочі первинний та вторинний струми, А; 1,20 — прийнятий коефіцієнт запасу. Співвідношення робочих струмів записано без урахування похибки ТС.

Завищення первинного номіналу зменшує робочий вторинний струм і може погіршувати використання вимірювального діапазону. Клас точності та допустиме навантаження перевіряють за паспортами ТС і приладу. Розрахунок нижче виконано для переважно активного вторинного навантаження; за істотної реактивної складової потрібне комплексне підсумовування опорів.

Опір пари вторинних проводів і повне розрахункове навантаження одного ТС визначають за формулами:

$$R_{\text{wire}} = \frac{2\rho l}{A}, \quad S_{2\Sigma} = S_{\text{meter}} + S_{\text{term}} + I_{2n}^2 R_{\text{wire}} \leq S_{2n}. \quad (4.16)$$

де R_{wire} — опір прямого та зворотного проводів, Ом; ρ — розрахунковий питомий опір міді, 0,0225 Ом·мм²/м; l — довжина траси в один бік, м; A — площа поперечного перерізу однієї жили, мм²; $S_{2\Sigma}$ — сумарне навантаження вторинного кола, В·А; S_{meter} і S_{term} — навантаження вимірювального приладу та клемних контактів, В·А; I_{2n} — номінальний вторинний струм, А; S_{2n} — номінальна потужність ТС, В·А.

Мінімальний переріз вторинного проводу одержують із граничної умови допустимого навантаження ТС:

$$A_{\text{min}} = \frac{2\rho l I_{2n}^2}{S_{2n} - S_{\text{meter}} - S_{\text{term}}}. \quad (4.17)$$

де A_{min} — мінімальна площа поперечного перерізу жили, мм²; ρ — питомий опір провідника, Ом·мм²/м; l — довжина траси в один бік, м; I_{2n} — номінальний вторинний струм, А; S_{2n} — допустима потужність вторинного навантаження, В·А; S_{meter} і S_{term} — навантаження приладу та контактів, В·А.

Навантаження ТС перевіряють за номінальним вторинним струмом, що забезпечує зіставлення з паспортною потужністю.

Переріз провідників добирають із ряду 1,5; 2,5; 4; 6; 10 мм² у бік збільшення та перевіряють підстановкою у (4.16). Для порівняння з ТС на 1 А враховують, що за однакових проводів їх навантаження пропорційне квадрату вторинного струму.

Вторинне коло ТС під струмом не розмикають: перед від'єднанням приладу використовують призначені для цього закорочувальні клєми. У

специфікації передбачають клемний блок, маркування полярності та засіб безпечного обслуговування вимірювального кола.

4.7 Резервне живлення автоматики 24 В DC

Резервне оперативне живлення забезпечує працездатність контролера, вимірювальних і сигнальних кіл за втрати напруги обох вводів. Задана потужність P_{DC} уже враховує всіх тривалих споживачів, у тому числі утримувані котушки. Струм навантаження та потрібну тривалість автономної роботи в годинах визначають за формулами:

$$I_{DC} = \frac{P_{DC}}{U_{DC}}, \quad t_h = \frac{t_{aut,min}}{60}. \quad (4.18)$$

де I_{DC} — тривалий струм оперативного навантаження, А; P_{DC} — його сумарна активна потужність, Вт; U_{DC} — номінальна напруга оперативної шини, 24 В; t_h — потрібна автономність у годинах; $t_{aut,min}$ — автономність у хвилинах, позначена в таблиці 3.3 як $t_{авт}$. Множник 60 є кількістю хвилин в одній годині.

Мінімальну номінальну ємність акумуляторної батареї оцінюють за балансом потрібної та доступної енергії:

$$C_{min} = \frac{k_B P_{DC} t_h}{U_{DC} \eta D k_T}. \quad (4.19)$$

де C_{min} — мінімальна номінальна ємність батареї, А·год; k_B — коефіцієнт запасу ємності, 1,25; P_{DC} — потужність оперативного навантаження, Вт; t_h — потрібна автономність, год; U_{DC} — номінальна напруга батареї, В; η — ККД

передавання енергії від батареї до навантаження; D — допустима частка використаної ємності; k_T — температурний коефіцієнт доступної ємності.

Розраховану мінімальну ємність округлюють угору до значення з навчального ряду 1,2; 2,3; 4,5; 7; 9; 12 А·год. У послідовному з'єднанні двох однакових акумуляторів 12 В напруги додаються, а ємність в А·год зберігається на рівні одного акумулятора.

Оціночну автономність для обраної стандартної ємності та її достатність із прийнятим запасом перевіряють за виразом:

$$t_{\text{calc}} = \frac{U_{\text{DC}} C_{\text{sel}} \eta D k_T}{P_{\text{DC}}} \geq k_B t_h. \quad (4.20)$$

де t_{calc} — розрахункова автономність, год; U_{DC} — номінальна напруга батареї, В; C_{sel} — обрана номінальна ємність, А·год; η — ККД шляху живлення; D — допустима частка використання ємності; k_T — температурний коефіцієнт; P_{DC} — потужність навантаження, Вт; k_B — коефіцієнт запасу; t_h — потрібна тривалість автономної роботи, год.

Попередня оцінка струму джерела враховує одночасне живлення автоматики із запасом і заряд батареї. Для навчального розрахунку прийнято зарядний коефіцієнт $0,1 \text{ год}^{-1}$; його добуток на ємність в А·год дає струм в амперах. Мінімальний струм джерела визначають за формулою:

$$I_{\text{PS,min}} = 1.25 \frac{P_{\text{DC}}}{24} + 0.1 C_{\text{sel}}. \quad (4.21)$$

де $I_{\text{PS,min}}$ — мінімальний тривалий вихідний струм джерела живлення й заряду, А; P_{DC} — потужність оперативного навантаження, Вт; 24 В — прийнята

напруга шини U_{DC} ; C_{sel} — номінальна ємність обраної батареї, А·год; 1,25 — коефіцієнт запасу струму навантаження; $0,1 \text{ год}^{-1}$ — прийнятий зарядний коефіцієнт.

Струм джерела добирають із ряду 1; 2; 3; 5; 10 А у бік збільшення. Джерело має бути сумісним із DC-UPS або зарядним модулем і забезпечувати потрібний діапазон оперативної напруги. Окремо перевіряють пусковий струм котушок і допустиме короткочасне перевантаження.

Результат (4.19) є енергетичною оцінкою. Для завершеного добору батареї використовують паспортні розрядні таблиці на потрібний час, граничну напругу, старіння і температурні умови. Напруги всіх навантажень мають бути сумісними з повним діапазоном оперативної шини.

5 АЛГОРИТМ РОБОТИ ТА ПЕРЕВІРКА ЛОГІКИ

5.1 Сигнали та умови дозволу

Логічні булеві сигнали G_1 і G_2 — ознаки придатності вводів за напругою та фазами; K_1, K_2, K_3 — підтверджені замкнені положення контакторів; O_1, O_2, O_3 — підтверджені розімкнені положення; B — блокування за пошкодженням спільних шин або іншою несправністю; A — режим «Автоматично». Успішна команда змінює стан лише після отримання очікуваного зворотного зв'язку.

Сукупність логічних дозволів на замикання резервного вводу на відповідному етапі алгоритму задають виразом:

$$C_2 = A \wedge G_2 \wedge O_1 \wedge (\neg L \vee O_3) \wedge \neg B \wedge T_0. \quad (5.1)$$

де C_2 — дозвіл на команду ввімкнення резервного контактора; A — ознака автоматичного режиму; G_2 — придатність резервного вводу; O_1 — підтвердження розімкненого стану КМ1; L — ознака розвантаження; O_3 — підтвердження розімкненого стану КМ3; B — загальне блокування; T_0 — ознака завершення паузи.

В формулі (5.1) усі змінні булеві (двійкові), логічні функції; $\wedge$ означає «І», $\vee$ — «АБО», $\neg$ — заперечення.

Ознака T_0 формується після завершення безструмової паузи. Дозвіл на команду додатково залежить від поточного стану автомата: логічна умова (5.1) застосовується лише на етапі ввімкнення резерву. Команду C_1 формують після підтвердження O_2 , завершення паузи та виконання умов повернення на основний ввід.

Перелік сигналів керування системи автоматики подано в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 —Склад сигналів системи автоматики

Сигнали	Мінімальна потреба в реалізації
G_1, G_2	Два канали напруги або два дискретні дозволи реле
$K_1/O_1, K_2/O_2, K_3/O_3$	Шість дискретних входів для двох положень трьох апаратів
B, A	Два дискретні входи або еквівалентні внутрішні сигнали
C_1, C_2, C_3	Три виходи керування через сумісні інтерфейси
Аварійна сигналізація	Один окремий дискретний вихід

Якщо обидва положення кожного апарата заведено окремо, потрібно щонайменше вісім зовнішніх дискретних входів без урахування G_1/G_2 . Базових шести входів ATL610 для такої буквальної схеми недостатньо: потрібні відповідне розширення, зовнішні реле контролю або інший контролер. Скорочення входів допускають лише за обґрунтованого контролю стану й збереження всіх блокувань.

Контакт «розімкнено» має бути конструктивно придатним для контролю положення силових контактів. Звичайне інвертування K_1 у програмі не замінює незалежного підтвердження O_1 . За суперечності положень або перевищення часу очікування система фіксує несправність і не вмикає протилежний ввід.

5.2 Послідовність станів автоматики

Перелік основних станів АВР подано в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 — Основні стани АВР

Стан	Апарати	Умова переходу
Основний ввід	КМ1 увімкнений; КМ2 вимкнений; КМ3 увімкнений	Відмова G_1 триває довше t_D
Відключення	Зняти команду КМ1; за $L = 1$ також КМ3	Підтвердження O_1 і, за потреби, O_3
Пауза	КМ1 і КМ2 вимкнені	$G_2 = 1$, $B = 0$ та завершено t_0
Резерв	КМ2 увімкнений; КМ3 за рішенням L	G_1 стійкий протягом $t_{пов}$
Зворотний перехід	Відключити КМ2; підтвердити O_2 ; витримати t_0	Дозвіл замикання КМ1
Відновлення групи N	КМ1 підтверджено ввімкнений	Після 2 с стабільного живлення ввімкнути КМ3
Блокування	Команди небезпечного замикання заборонені	Усунення причини та усвідомлене скидання

Якщо ввід 2 непридатний, навантаження не підключають до нього. За втрати обох джерел команди обох ввідних контакторів знімають, контролер живиться від DC-UPS і чекає придатного джерела. За одночасного відновлення обох ввідів пріоритет має ввід 1.

Якщо основний ввід відновився під час початого перемикання, автоматика завершує безпечну послідовність без зустрічних команд. Перепланування дозволене тільки в підтвердженому розімкненому стані. Повторні автоматичні спроби після невиконаної команди не виконують до скидання несправності.

Повернення N через 2 с є спільною навчальною умовою, яка розділяє комутації в часі. Вона не доводить допустимості одночасного самозапуску всіх двигунів: для цього потрібні дані про їхні пускові режими та допустимі провали напруги.

5.3 Часова діаграма та контрольні події

На рисунку 5.1 наведено часову діаграму переходу на резерв для варіанта 1. Вона відображає послідовність вимірювання, витримки, розмикання контактів, паузи та замикання резервного вводу; довжина кожного інтервалу визначає його внесок у повний час АВР.

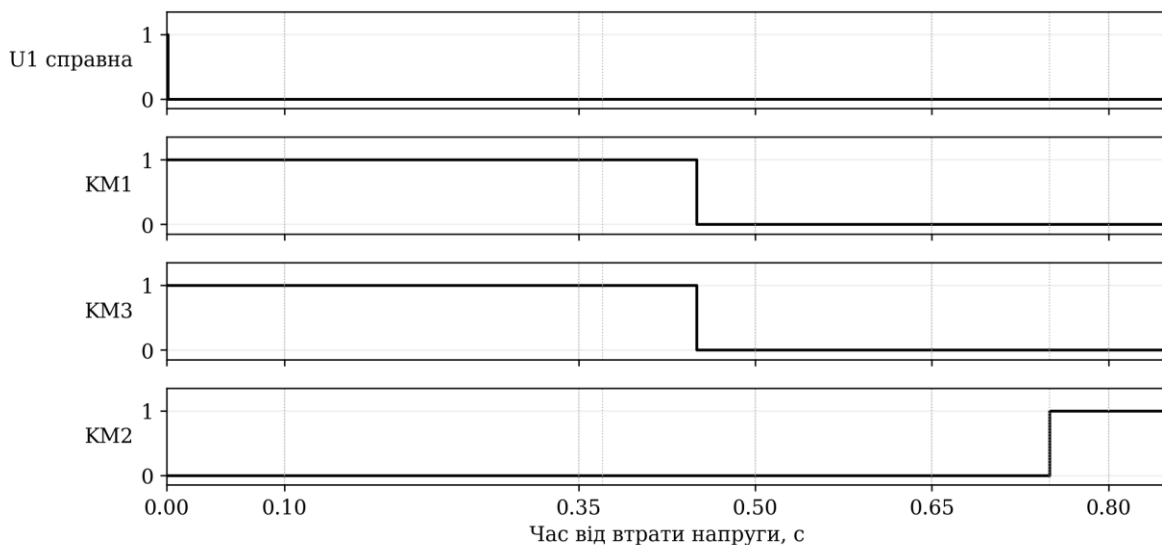


Рисунок 5.1 — Розрахункова послідовність переходу на резерв для варіанта 1 за $L = 1$

Відлік починається з втрати напруги вводу 1. До 0,10 с завершується вимірювальна затримка; до 0,35 с — пускова витримка; у 0,37 с видаються команди відключення KM1 і KM3. До 0,50 с підтверджуються обидва розриви,

до 0,65 с витримується пауза; КМ2 замикається до 0,75 с, а підтвердження отримують до 0,80 с.

Діаграма відображає граничні розрахункові моменти, а не експериментальну осцилограму. За незалежного живлення котушки від DC-UPS контактор КМ1 може залишатися замкненим після втрати напруги силового вводу. Тому алгоритм передбачає явну команду відключення та контроль її виконання.

Аналітична перевірка охоплює такі події: короткий провал тривалістю $t_{\text{пров}}$; тривалу втрату основного вводу за придатного резерву; відсутність резерву; невідключення КМ1; невідключення КМ3 за $L = 1$; відновлення основного вводу; пошкодження спільних шин; втрату живлення контролера. Для кожної події визначають допустимі команди, потрібні підтвердження і наступний стан.

Критерій коректності — відсутність будь-якого шляху до одночасного замикання КМ1 і КМ2, збереження заборони резервування пошкоджених шин, дотримання потужності резерву та виконання часової умови для базового випадку. Відмовні випадки можуть завершуватися відсутністю живлення, якщо це необхідно для недопущення небезпечного замикання.

6 ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

6.1 Варіант 1 Потужності та апарати

Для варіанта 1 задано $P_C = 20$ кВт, $P_N = 10$ кВт, $\cos\varphi_C = 0,84$, $\cos\varphi_N = 0,92$ та $S_R = 31$ кВА. Номінальна лінійна напруга становить 400 В. Реактивні потужності груп і їх суму обчислюють за (4.1) та (4.2):

$$Q_C = 12.919 \text{ квар}, \quad Q_N = 4.260 \text{ квар}, \quad Q_\Sigma = 17.179 \text{ квар}. \quad (6.1)$$

де Q_C і Q_N — реактивні потужності груп C і N, квар; Q_Σ — їх сумарна реактивна потужність, квар.

Сумарну повну потужність і повну потужність пріоритетної групи для варіанта 1 визначають за (4.2) та (4.3):

$$S_\Sigma = \sqrt{30^2 + 17.179^2} = 34.570 \text{ кВА}, \quad S_C = 23.810 \text{ кВА}. \quad (6.2)$$

де S_Σ — сумарна повна потужність, кВА; S_C — повна потужність групи C, кВ·А; 30 кВт — сума P_C та P_N ; 17,179 квар — сумарна реактивна потужність Q_Σ .

Діючі значення лінійних струмів для номінальної напруги 400 В становлять:

$$I_\Sigma = 49.898 \text{ А}, \quad I_C = 34.366 \text{ А}, \quad I_N = 15.689 \text{ А}. \quad (6.3)$$

де I_{Σ} — струм сукупного навантаження, А; I_C і I_N — струми пріоритетної та непраіоритетної груп, А. Значення отримано за (4.4), без арифметичного додавання модулів струмів груп.

Для всієї групи $k_S \cdot S_{\Sigma} = 39,756 \text{ кВ} \cdot \text{А} > 31 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. Для пріоритетної групи $k_S \cdot S_C = 27,381 \text{ кВ} \cdot \text{А} < 31 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. Отже, $L = 1$: перед замиканням резервного вводу необхідно відключити N і підтвердити O_3 . Після розвантаження резерв працюватиме з коефіцієнтом завантаження $\beta_R = 0,768$.

Мінімально потрібні допустимі робочі струми контакторів визначають за коефіцієнта запасу 1,20:

$$I_{e,1/2} \geq 1.2 \cdot 49.898 = 59.878 \text{ А}, \quad I_{e,3} \geq 1.2 \cdot 15.689 = 18.827 \text{ А}. \quad (6.4)$$

де $I_{e,1/2}$ — потрібний робочий струм кожного з контакторів КМ1 і КМ2, А; $I_{e,3}$ — потрібний робочий струм КМ3, А; 1,2 — коефіцієнт k_1 ; 49,898 А — струм I_{Σ} ; 15,689 А — струм I_N . Розраховані значення округлюють угору до допустимого каталожного номіналу.

За навчальним рядом приймаємо 63 А для КМ1 і КМ2 та 40 А для КМ3. Це мінімальні номінали умовного ряду. За реальним каталогом допустимий інший найближчий більший номінал, якщо він відповідає потрібній категорії та умовам роботи.

Показаний BF4000A230 має 40 А в АС-3 і тому не задовольняє вимогу 59,878 А до ввідної пари в цій категорії, хоча його АС-1 становить 70 А. Крім того, його котушка 230 В АС не відповідає прийнятому живленню 24 В DC. Приклад демонструє необхідність перевіряти повне виконання апарата, а не лише одну цифру в назві.

6.2 Варіант 1. Уставки та вторинні кола

Для всіх трьох лінійних напруг приймаємо $U_- = 352$ В, $U_+ = 440$ В, повернення 364 і 428 В. Короткий провал $t_{\text{пров}} = 0,15$ с, дозволена перерва — 1,50 с. Розрахунок витримки дає:

$$t_D = 0.25 \text{ с}, \quad t_{\text{AVR}} = 0.25 + 0.55 = 0.80 \text{ с} < 1.50 \text{ с}. \quad (6.5)$$

де t_D — прийнята витримка пуску, с; t_{AVR} — час переходу з підтвердженням, с; 0,55 с — сума інших часових складових; 1,50 с — допустима перерва $t_{\text{доп}}$. Різниця між допустимим і розрахунковим часом становить 0,70 с.

Часовий запас становить 0,70 с. Стійкість відновлення вводу 1 підтверджують протягом 20 с, а перерва зворотної комутації становить 0,45 с. Затримка повернення групи N після підтвердження КМ1 — 2 с.

Первинний номінал ТС має бути не меншим за 59,878 А. Прийнято 75/5 А, що відповідає $k_{\text{СТ}} = 15$; робочий вторинний струм за сумарного навантаження становить 3,327 А. Мінімальний переріз жили за довжини траси $l = 5$ м визначають підстановкою у (4.17):

$$A_{\min} = \frac{2 \cdot 0.0225 \cdot 5 \cdot 5^2}{5 - 1 - 0.5} = 1.607 \text{ мм}^2. \quad (6.6)$$

де $A_{\min}$ — мінімальний переріз однієї жили, мм^2 ; 0,0225 $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ — питомий опір ρ ; 5 м — довжина l ; 5 А у чисельнику — струм I_{2n} ; 5 В·А у знаменнику — потужність S_{2n} ; 1 В·А і 0,5 В·А — навантаження S_{meter} та S_{term} .

Для стандартного перерізу $A = 2,5 \text{ мм}^2$ опір пари проводів R_{wire} дорівнює 0,09 Ом. Навантаження вторинного кола перевіряють підстановкою у (4.16):

$$S_{2\Sigma} = 1 + 0.5 + 25 \cdot 0.09 = 3.75 \text{ В}\cdot\text{А}. \quad (6.7)$$

де $S_{2\Sigma}$ — сумарне вторинне навантаження ТС, В·А; 1 В·А — навантаження приладу S_{meter} ; 0,5 В·А — навантаження контактів S_{term} ; 25 А^2 — квадрат номінального вторинного струму I_{2n} ; 0,09 Ом — опір проводів R_{wire} .

Отримано $3,75 \leq 5 \text{ В}\cdot\text{А}$; за максимальним навантаженням ТС умова виконується. Далі перевіряють, чи лежить це навантаження в діапазоні, для якого виробник гарантує потрібний клас точності.

Для оперативного кола задано $P_{\text{DC}} = 12 \text{ Вт}$ і $t_{\text{авт}} = 15 \text{ хв}$, тобто $t_h = 0,25 \text{ год}$. Струм навантаження I_{DC} становить 0,50 А. Мінімальну ємність батареї визначають підстановкою у (4.19):

$$C_{\min} = \frac{1.25 \cdot 12 \cdot 0.25}{24 \cdot 0.85 \cdot 0.70 \cdot 0.80} = 0.3283 \text{ А} \cdot \text{год}. \quad (6.8)$$

де $C_{\min}$ — мінімальна ємність батареї, А·год; 1,25 — коефіцієнт k_B ; 12 Вт — потужність P_{DC} ; 0,25 год — автономність t_h ; 24 В — напруга U_{DC} ; 0,85 — ККД η ; 0,70 — допустима частка використання ємності D ; 0,80 — температурний коефіцієнт k_T .

Приймаємо два послідовні акумулятори 12 В, 1,2 А·год: батарея 24 В, 1,2 А·год. Оціночна автономність — 1,1424 год. Джерело має забезпечити не менше $1,25 \cdot 0,50 + 0,1 \cdot 1,2 = 0,745 \text{ А}$; за рядом приймаємо 1 А. Перевірка пускового струму котушок залишається окремою умовою каталожного добору.

7 ЗАВДАННЯ ТА ВИМОГИ ДО ЗВІТУ

7.1 Послідовність виконання

1 Виписати дані свого варіанта й спільні параметри. Намалювати однолінійну схему, позначити джерела, контактори, захист, дві групи навантаження та канали зворотного зв'язку.

2 Розрахувати Q і S кожної групи, сумарні P , Q , S та струми. Перевірити достатність резерву з коефіцієнтом k_S і обґрунтувати рішення L . Визначити завантаження резерву після переходу.

3 Визначити мінімальні номінали $KM1$, $KM2$, $KM3$. Скласти специфікацію вимог до напруги, категорії, котушок, блокувань і контактів положення. Навести одну каталожну позицію та перевірити її відповідність; невідповідність пояснити конкретним параметром.

4 Обчислити пороги спрацювання й повернення, перевірити навчальні набори напруг із пункту 4.4. Вибрати витримку t_D , оцінити t_{AVR} і запас щодо $t_{доп}$. Побудувати власну часову діаграму за зразком рисунка 5.1.

5 Вибрати ТС, коефіцієнт трансформації та переріз вторинних проводів. Перевірити навантаження $5 \text{ В} \cdot \text{А}$ підстановкою обраного перерізу. Пояснити відмінність вимірювального ТС від захисного.

6 Обчислити струм оперативного живлення, ємність батареї та струм зарядного джерела. Перевірити автономність за обраною ємністю. Вказати дані, потрібні для уточнення за паспортом батареї та котушок.

7 Скласти таблицю станів, перелік I/O і відповіді на контрольні події пункту 5.3. Увести заборону перемикання за пошкодженням шин і невідповідністю положень. Розрахунки виконувати з одиницями, округлення номіналів — угору.

7.2 Зміст звіту

Звіт має містити тему, мету, номер варіанта, вихідні таблиці, припущення, схеми, послідовні розрахунки, посилання на каталоги, часову діаграму, специфікацію вимог, таблицю перевірки логіки та висновки. У висновках окремо вказують, що перевірено чисельно і які дані залишилися потрібними для реального проєкту.

7.3 Форма підсумкових результатів

У таблицю 7.1 вносять результати свого варіанта з одиницями вимірювання. Для каталожного добору зазначають виробника, повний код виконання, визначальні параметри та джерело даних. Придатність обладнання обґрунтовують порівнянням розрахункових вимог із характеристиками конкретного виконання.

Перевірку логіки оформлюють таблицею з графами «подія», «початковий стан», «команди», «очікуване підтвердження», «наступний стан», «дія за невиконання». Розглядають усі вісім подій підрозділу 5.3. Така перевірка є аналітичним обґрунтуванням алгоритму в межах прийнятої моделі станів.

Перелік підсумкових результатів розрахунків заносять до таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 — Підсумкові результати свого варіанта

Показник	Одиниця	Результат
$P_C + P_N$	кВт	—
$Q_C + Q_N$	квар	—
S_Σ / S_C	кВ·А	—
$I_\Sigma / I_C / I_N$	А	—
Необхідність розвантаження L	0 або 1	—
Завантаження резерву β_R	—	—
Номінали КМ1 / КМ2 / КМ3	А	—
Пороги спрацювання / повернення	В	—
t_D / t_{AVR} / запас часу	с	—
ТС та коефіцієнт трансформації	А/А; —	—
Переріз / навантаження ТС	мм ² ; В·А	—
Ємність батареї / джерело DC	А·год; А	—
Розрахункова автономність	хв	—
Потрібні DI / DO	шт.	—

7.4 Контрольні питання

- 1 Чим відрізняються функції релейного захисту та АВР?
- 2 Чому наявність напруги на резерві недостатня для його ввімкнення?
- 3 Чим відрізняються команда апарату та підтвердження його положення?
4. Навіщо потрібні електричне й механічне блокування одночасно?
- 5 Чому АВР відкритого переходу не є безшовним джерелом живлення?

- 6 Як визначають сумарну повну потужність за різних $\cos\varphi$ груп?
- 7 Чому струми двох груп не завжди можна арифметично додати як модулі?
- 8 Що означають коефіцієнти запасу k_I та k_S ?
- 9 За якої умови потрібно відключити групу N?
- 10 Чому номінал АС-1 не можна автоматично застосувати для АС-3?
- 11 Які дані потрібні для перевірки QF за струмом короткого замикання?
- 12 Чим відрізняються пороги спрацювання і повернення?
- 13 Як відрізнити навчальний показник a_U від напруги зворотної послідовності?
- 14 Які складові входять до повного часу АВР?
- 15 Коли тривалості операцій додають, а коли беруть їх максимум?
- 16 Чому витримка повернення не дорівнює тривалості перерви живлення?
- 17 Для чого у формулі опору вторинних проводів ТС є множник 2?
- 18 Чому навантаження вторинного кола перевіряють за номінальним струмом?
- 19 Чим небезпечне розмикання вторинного кола ТС?
- 20 Як зміняться напруга та $A_{\text{год}}$ за послідовного з'єднання двох батарей?
- 21 Чому оцінки в $A_{\text{год}}$ недостатньо для остаточного добору DC-UPS?
- 22 Що робить автоматика за невідключення КМ1 або КМ3?
- 23 Чи достатньо шести входів контролера для повного складу сигналів таблиці 5.1?
- 24 Які перевірки потрібні перед повторним живленням групи двигунів?

Список літератури

1 Сокол Є. І., Сендерович Г. А., Гриб О. Г. та ін. Релейний захист електроенергетичних систем : підручник. Харків: ФОП Бровін О. В., 2020. 306 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/entities/publication/540f2c15-baef-4c80-b7d8-de5a456ee6af> (дата звернення: 14.09.2026).

2 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. URL: <https://ela.kpi.ua/items/b50bc13f-61f5-4d2c-bad9-35648d0c6f98> (дата звернення: 14.09.2026).

3 Бурбело М. Й., Бірюков О. О., Мельничук Л. М. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2011. 204 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/LANZ/Burbelo_2011_204.pdf (дата звернення: 14.09.2026).

4 LOVATO Electric. ATL610. Automatic transfer switch controller : technical data and product photograph. URL: https://catalogue.lovatoelectric.com/gl_en/ATL610/snp (дата звернення: 23.09.2026).

5 LOVATO Electric. PMV70A575. Voltage monitoring relay : technical data and product photograph. URL: https://catalogue.lovatoelectric.com/gl_en/PMV70A575/snp (дата звернення: 23.09.2026).

6 LOVATO Electric. BF4000A230. Three-pole contactor : technical data and product photograph. URL: https://catalogue.lovatoelectric.com/gl_en/BF4000A230/snp (дата звернення: 23.09.2026).

7 LOVATO Electric. PMV30–PMV70. True RMS three-phase multifunction protection relay: instructions manual. I161IGBDFE10_12. 2012. 6 p. URL: https://catalogue.lovatoelectric.com/gl_en/Product/GetDocument?doc=Technical%5CTechInstructions%5C22.+RELE+DI+MISURA+E+CONTROLLO%5CI161IGBDFE10_12.pdf (дата звернення: 23.09.2026).

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до проведення практичних занять

з освітнього компонента

«ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ»

для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти
спеціальності G3 «Електрична інженерія» освітньої програми
«Електропостачання та ресурсозберігаючі технології»
всіх форм здобуття освіти

Відповідальний за випуск Плахтій О. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

Підписано до друку 18.08.2026 р.

Умовн. друк. арк. 3,0. Тираж . Замовлення № .

Видавець та виготовлювач Український державний університет
залізничного транспорту,

61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.