

М. Й. Бурбело

РОЗРАХУНОК ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. Й. Бурбело

**РОЗРАХУНОК ВНУТРІШНЬОГО
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Вінниця
ВНТУ
2017

УДК 621.311(075)

Б91

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки (протокол № 15 від 25.05.2017 р.)

Рецензенти:

П. Д. Лежнюк, доктор технічних наук, професор

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

В. С. Костишин, доктор технічних наук, професор

Бурбело, М. Й.

Б91 Розрахунок внутрішнього електропостачання : навчальний посібник / Бурбело М. Й. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 123 с.

У навчальному посібнику висвітлені практичні аспекти побудови та функціонування систем електропостачання, що стосуються методів розрахунку електричних навантажень, розрахунку мереж внутрішнього електропостачання напругою до і вище 1000 В. Посібник розроблений відповідно до програми дисципліни «Системи електропостачання» для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» під час проведення лекційних і практичних занять, курсового і дипломного проектування.

УДК 621.311(075)

© ВНТУ, 2017

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	6
1.1 Розрахунок навантажень промислових підприємств	6
1.2 Розрахунок навантажень житлових будинків	17
2 РОЗРАХУНОК ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НАПРУГОЮ ДО 1000 В.....	23
2.1 Схеми і конструктивне виконання мереж напругою до 1000 В.....	23
2.2 Вибір провідників в мережах напругою до 1000 В	27
2.3 Розрахунок струмів КЗ в мережах напругою до 1000 В	31
2.4 Вибір комутаційно-захисної апаратури	41
2.5 Перевірка селективності захисту	60
3 РОЗРАХУНОК ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НАПРУГОЮ ВИЩЕ 1000 В	66
3.1 Схеми розподільних мереж напругою вище 1000 В.....	66
3.2 Вибір і розміщення підстанцій.....	69
3.3 Вибір кабелів напругою вище 1000 В	76
3.4 Розрахунок струмів КЗ в мережах напругою вище 1000 В.....	88
3.5 Вибір високовольтичних вимикачів	92
ЛІТЕРАТУРА.....	96
ДОДАТОК А Допустимий струм для проводів та кабелів з пластмасовою та паперовою ізоляцією	99
ДОДАТОК Б Допустимий струм для кабелів із зшитого ПЕ на напругу до 35 кВ.....	108
ДОДАТОК В Опори струмоведучих елементів і трансформаторів.....	113
ДОДАТОК Г Технічні дані автоматичних вимикачів.....	117

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

- АВР – автоматичне ввімкнення резерву
- АД – асинхронний двигун
- АПВ – автоматичне повторне ввімкнення
- ГПП – головна понижувальна підстанція
- ЕД – електричний двигун
- ЕН – електричні навантаження
- ЕП – електроприймач
- КЗ – коротке замикання (електроустановки, трансформатора, ...)
- КЛ – кабельна лінія електропередавання
- КРУ – комплектний розподільний пристрій (комірка)
- КСО – камера одностороннього обслуговування
- КТП – комплектна розподільна підстанція
- ОЗЗ – однофазне замикання на землю
- ПЛ – повітряна лінія електропередавання
- ПС – підстанція
- ПТЕ – правила технічної експлуатації
- ПУЕ – правила улаштування електроустановок
- РП – розподільний пункт (пристрій) 10 (6) кВ або 0,4 кВ
- СД – синхронний двигун
- СЕП – система електропостачання (електропостачальна система)
- ТП – трансформаторна підстанція
- УД – упорядкована діаграма
- ЦЕН – центр електричних навантажень
- ШМ – шинопровід магістральний
- ШР – шинопровід розподільний
- ЩВП – щит власних потреб
- ЩСУ – щит станцій управління

ВСТУП

Навчальний посібник призначений для використання під час проведення практичних занять з дисципліни «Системи електропостачання», виконання курсового проекту та бакалаврської роботи студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

У першому розділі навчального посібника розглянуто методи та наведено приклади розрахунку електричних навантажень (ЕН) силових та освітлювальних електроприймачів (ЕП) промислових підприємств, житлових будинків.

Розподілення електроенергії напругою до 1000 В – тема другого розділу. Тут розглянуто схеми цехових мереж, режими нейтралі. Виконуються розрахунки цехових мереж: вибір провідників, розрахунок втрат напруги, вибір комутаційно-захисної апаратури. Наведено приклади розрахунку струмів три- та однофазних коротких замикань (КЗ). Значну увагу приділено вибору автоматичних вимикачів провідних світових фірм. Сформульовано умови перевірки чутливості та селективності захисту.

У третьому розділі надано рекомендації стосовно вибору схем внутрішнього електропостачання напругою вище 1000 В. Розглянуто питання аналізу навантажувальної здатності трансформаторів, вибору цехових трансформаторних підстанцій (ТП) та місць для їх розміщення. Виконано розрахунки струмів коротких замикань (КЗ), вибору кабелів і вимикачів.

1 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1 Розрахунок навантажень промислових підприємств

Під час розрахунку ЕН в СЕП виділяють шість характерних рівнів (рис. 1.1), які відрізняються за характером електроспоживання і, відповідно, способом розрахунку [1].

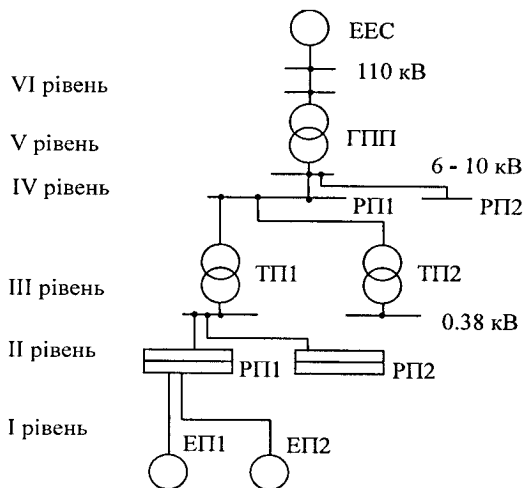


Рисунок 1.1 – Рівні електропостачання:

- I – окремі ЕП; II – розподільні щити, пункти, шинопроводи;
- III – шини 0,38 кВ цехових ТП та магістральні шинопроводи;
- IV – шини РП 10 (6) кВ; V – ГПП 110/10 (6) кВ;
- VI – лінії живлення потужних підприємств, міст напругою 110 кВ.

Розрахунок ЕН виконують знизу вгору в два етапи [1–3]: спочатку визначають навантаження цехів і підприємства в цілому, потім вибирають схеми електропостачання і визначають розрахункові навантаження для кожного конкретного рівня. Допускається спочатку скласти схему цехової мережі і на її основі виконати розрахунок ЕН цієї мережі.

Метод упорядкованих діаграм (метод коефіцієнта максимуму) був довгий час основним методом розрахунку ЕН силових ЕП [2]. Метод упорядкованих діаграм розроблено Г. М. Каяловим. В його основу покладено ймовірнісне моделювання.

Метод УД використовується для механічних, інструментальних, ремонтних, складальних цехів за незалежного ввімкнення ЕП.

Досвід застосування методу упорядкованих діаграм протягом тривалого часу показав, що він дає завищені значення розрахункових

активних та реактивних навантажень P_p, Q_p , які на практиці не досягаються. Тому в 1992 році був запропонований новий метод розрахунку навантажень [4], який одні автори називають модифікованим методом УД, а інші – методом розрахункових коефіцієнтів.

Згідно з цим методом знаходять розрахункові навантаження, які визначають за формулами:

$$P_p = K_p \cdot \sum_{i=1}^n k_{vi} \cdot P_{Hi}; Q_p = \begin{cases} 1,1 \cdot \sum_{i=1}^n k_{vi} \cdot P_{Hi} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ci}, & \text{якщо } n_e \leq 10; \\ \sum_{i=1}^n k_{vi} \cdot P_{Hi} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ci}, & \text{якщо } n_e > 10. \end{cases} \quad (1.1)$$

Груповий коефіцієнт використання та ефективну кількість ЕП знаходять за формулами:

$$K_B = \frac{\sum_{i=1}^n k_{vi} \cdot P_{Hi}}{P_H}; n_e = \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_{Hi} \right)^2}{\sum_{i=1}^n P_{Hi}^2}, \quad (1.2)$$

де використовують не середні, а найбільші значення коефіцієнта використання k_{vi} з діапазону можливих значень, наведених в довідниках [3]. Ефективну кількість ЕП можна визначити за наближеними формулами:

$$n_e \approx \begin{cases} n, & \text{якщо } m \leq 3 \text{ або якщо } n_e > n; \\ \frac{2P_H}{P_{H.\text{наиб}}}, & \text{якщо } m > 3 \text{ і } K_B \geq 0,2, \end{cases} \quad (1.3)$$

де P_H – номінальна потужність всіх ЕП; m – відношення номінальних потужностей найбільшого і найменшого за потужністю ЕП. Розраховане значення n_e округляється до найближчого меншого цілого числа.

Розрахунковий коефіцієнт активної потужності K_p знаходять за однією з довідкових таблиць $K_p = f(K_B, n_e, T_0)$ [4] (табл. 1.1 та 1.2), в яких наведено його значення відповідно для елементів мереж, що відповідають сталій часу нагрівання провідників $T_0 = 10$ хв (II рівень електропостачання), та для розподільних трансформаторів і магістральних шинопроводів, що відповідають сталій часу нагрівання провідників $T_0 = 2,5$ год (III рівень електропостачання).

Для кабельних ліній розподільних мереж напругою 10 (6) кВ, стала часу нагрівання T_0 яких приблизно дорівнює 30 хв, (IV рівень електропостачання) коефіцієнт K_p дорівнює одиниці.

Таблиця 1.1 – Значення розрахункового коефіцієнта K_p для мереж живлення напругою до 1000 В ($T_0 = 10$ хв)

n_e	Коефіцієнт використання								
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
1	8,00	5,33	4,00	2,67	2,00	1,60	1,33	1,14	1
2	6,22	4,33	3,39	2,45	1,98	1,60	1,33	1,14	1
3	4,06	2,89	2,31	1,74	1,45	1,34	1,22	1,14	1
4	3,24	2,35	1,91	1,47	1,25	1,21	1,12	1,06	1
5	2,84	2,09	1,72	1,35	1,16	1,16	1,08	1,03	1
6	2,64	1,96	1,62	1,28	1,14	1,13	1,06	1,01	1
7	2,49	1,86	1,54	1,23	1,12	1,10	1,04	1	
8	2,37	1,78	1,48	1,19	1,10	1,08	1,02	1	
9	2,27	1,71	1,43	1,16	1,09	1,07	1,01	1	
10	2,18	1,65	1,39	1,13	1,07	1,05	1		
12	2,04	1,56	1,32	1,08	1,05	1,03	1		
14	1,94	1,49	1,27	1,05	1,02	1			
16	1,85	1,43	1,23	1,02	1				
18	1,78	1,39	1,19	1					
20	1,72	1,35	1,16	1					
25	1,60	1,27	1,10	1					
30	1,51	1,21	1,05	1					
35	1,44	1,16	1						
40	1,40	1,13	1						
50	1,30	1,07	1						
60	1,25	1,03	1						
80	1,16	1							
100	1								

Таблиця 1.2 – Значення розрахункового коефіцієнта K_p на шинах низької напруги цехових трансформаторів і магістральних шинопроводів ($T_0 = 2,5$ год)

n_e	Коефіцієнт використання							
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	$\geq 0,7$
1	8,00	5,33	4,00	2,67	2,00	1,60	1,33	1,14
2	5,01	3,44	2,69	1,9	1,52	1,24	1,11	1,00
3	2,4	2,17	1,8	1,42	1,23	1,14	1,08	1,00
4	2,28	1,73	1,46	1,19	1,06	1,04	1,00	0,97
5	1,31	1,12	1,02	1,0	0,98	0,96	0,94	0,93
6-8	1,2	1,0	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91
9-10	1,1	0,97	0,91	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
10-25	0,8	0,8	0,8	0,85	0,85	0,85	0,9	0,9
25-50	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,8	0,85	0,85
>50	0,65	0,65	0,65	0,7	0,7	0,75	0,8	0,8

В табл. 1.3 наведено значення коефіцієнта одночасності електричних навантажень [4], який використовують для розрахунку на IV і V рівнях електропостачання.

Таблиця 1.3 – Значення коефіцієнта одночасності K_0 для визначення розрахункового навантаження на шинах 10 (6) кВ РП і ГПП

Середньозважений коефіцієнт використання	Кількість приєднань 6 (10) кВ на збірних шинах 6 (10) кВ РП і ГПП			
	2 – 4	5 – 8	9 – 25	> 25
$K_B < 0,3$	0,9	0,8	0,75	0,7
$0,3 \leq K_B < 0,5$	0,95	0,9	0,85	0,8
$0,5 \leq K_B \leq 0,8$	1,0	0,95	0,9	0,85
$K_B > 0,8$	1,0	1,0	0,95	0,9

Розрахунок цехових навантажень. Розрахункові навантаження окремих ЕП або ліній, від яких живляться два чи три ЕП (I рівень), беремо такими, що дорівнюють номінальним

$$P_p = \sum_{i=1}^3 P_{н.і}, \quad Q_p = \sum_{i=1}^3 P_{н.і} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{н.і},$$

де $P_{н.і}$ – номінальна активна потужність i -го ЕП; $\operatorname{tg} \varphi_{н.і}$ – номінальний коефіцієнт реактивної потужності i -го ЕП.

Номінальні величини визначають за паспортними даними ЕП. У разі відсутності паспортних даних беруть $\operatorname{tg} \varphi_{н.і} = 0,75$ – для ЕП тривалого і $\operatorname{tg} \varphi_{н.і} = 0,87$ – для ЕП повторно-короткочасного режиму роботи.

Розрахункові струми електроприводів тривалого режиму роботи, для яких номінальні потужності задаються як потужності на валу машини, визначають за формулою:

$$I_p = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,9 \cdot 0,92} = 36,7 \text{ А},$$

де η_n – номінальне значення коефіцієнта корисної дії ЕП.

Для ЕП повторно-короткочасного режиму роботи (із загальною тривалістю циклу менше 10 хв і тривалістю робочого періоду менше 4 хв) за розрахунковий струм для перевірки перерізу провідників за нагрівом беруть струм, приведений до тривалого режиму.

При цьому [5]:

1) для мідних провідників перерізом понад 6 мм² і алюмінієвих понад 10 мм² розрахунковий струм визначається за формулою

$$I_p = I_n \frac{\sqrt{T_{пв}}}{0,875},$$

де I_H – номінальне значення коефіцієнта струму; $T_{ПВ}$ – відносна тривалість повторного ввімкнення;

2) для мідних провідників перерізом до 6 мм^2 і алюмінієвих до 10 мм^2 з метою виключення ризику їх перегрівання розрахунковий струм береться як для ЕП з тривалим режимом роботи:

$$I_p = I_H.$$

Для ЕП короткочасного режиму роботи з тривалістю ввімкнення менше 4 хвилин перевірку перерізу провідників за нагрівом здійснюють як для ЕП повторно-короткочасного режиму роботи. Для ЕП короткочасного режиму роботи з тривалістю ввімкнення більше 4 хвилин перевірку здійснюють як для ЕП тривалого режиму роботи.

У разі увімкнення однофазного ЕП на фазну або лінійну напругу він враховується як еквівалентний трифазний ЕП номінальною потужністю відповідно: $p_H = 3p_{\text{но}}$, $p_H = \sqrt{3}p_{\text{но}}$, де $p_{\text{но}}$ – потужність однофазного ЕП. За наявності групи однофазних ЕП, які розподілені по фазах з нерівномірністю, що не перевищує 15% від загальної потужності трифазних і однофазних ЕП в групі, вони можуть бути подані як еквівалентна група трифазних ЕП з тією ж сумарною номінальною потужністю. У випадку перевищення вказаної нерівномірності номінальна потужність еквівалентної групи трифазних ЕП береться такою, що дорівнює потрійному значенню потужності найбільш завантаженої фази [4].

Піковий (пусковий) струм окремого ЕП визначають за паспортними даними. У разі відсутності заводських даних пусковий струм асинхронного електродвигуна (АД) з короткозамкнутим ротором або синхронного двигуна (СД) може дорівнювати п'ятикратному номінальному струму; пусковий струм двигуна постійного струму або АД з фазним ротором беруть не нижчим 2,5-кратного номінального струму; піковий струм пічних і електрозварювальних трансформаторів – не меншим 3-кратного номінального струму (без приведення до відносної тривалості повторного ввімкнення $T_{ПВ} = 100\%$).

Піковий (пусковий) струм групи ЕП

$$I_p = I_p - k_B I_{H, \text{наиб}} + I_{п, \text{наиб}},$$

де $I_{H, \text{наиб}}$, $I_{п, \text{наиб}}$ – номінальний і піковий струми ЕП з найбільшим піковим струмом.

На II і III рівнях електропостачання (цехові мережі) використовують метод упорядкованих діаграм (УД) або метод коефіцієнта попиту.

Приклад 1.1. Дані про споживачів слюсарно-складального цеху наведено в табл. 1.4. Для цього цеху було обрано радіальну схему мережі (рис. 1.2). Живлення обладнання залежно від його розташування здійснюється від розподільних пунктів РП-1 – РП-5. Одночасно РП-1

заживлено від РП-3, РП-2 – від РП-5, а РП-3, РП-4 та РП-5 живляться від трансформаторної підстанції, що розташована в суміжному цеху на відстані 35 м вправо від будівельної осі В10.

Таблиця 1.4 – Відомості про електричні навантаження слюсарно-складального цеху

№ на плані	Електричні навантаження	P_n , кВт
1, 12, 15	Заточний верстат	6
2, 13	Заточний верстат	5
3, 14	Вертикально-свердильний	4
4	Токарно-гвинторізний	22
5	Шліфувальний	18
6, 11	Круглошліфувальний	25
7, 9	Безцентровошліфувальний	11
8	Плоскошліфувальний	22
10	Різьбошліфувальний	25
16, 18-20, 22, 23	Токарно-гвинторізний	11
17	Токарно-гвинторізний	24
21	Токарно-гвинторізний	8
24-27	Токарно-гвинторізний з ЧПУ	24
28, 29	Координатно-розточний з ЧПУ	32
30	Вертикально-фрезерний	10
31	Універсально-фрезерний	10
32, 33	Горизонтально-фрезерний	10
34	Вертикально-фрезерний	11
35	Фрезерний з ЧПУ	8
36	Фрезерний	11
37, 39-43	Універсально-заточний	4,5
38	Верстат для заточування дисків	5

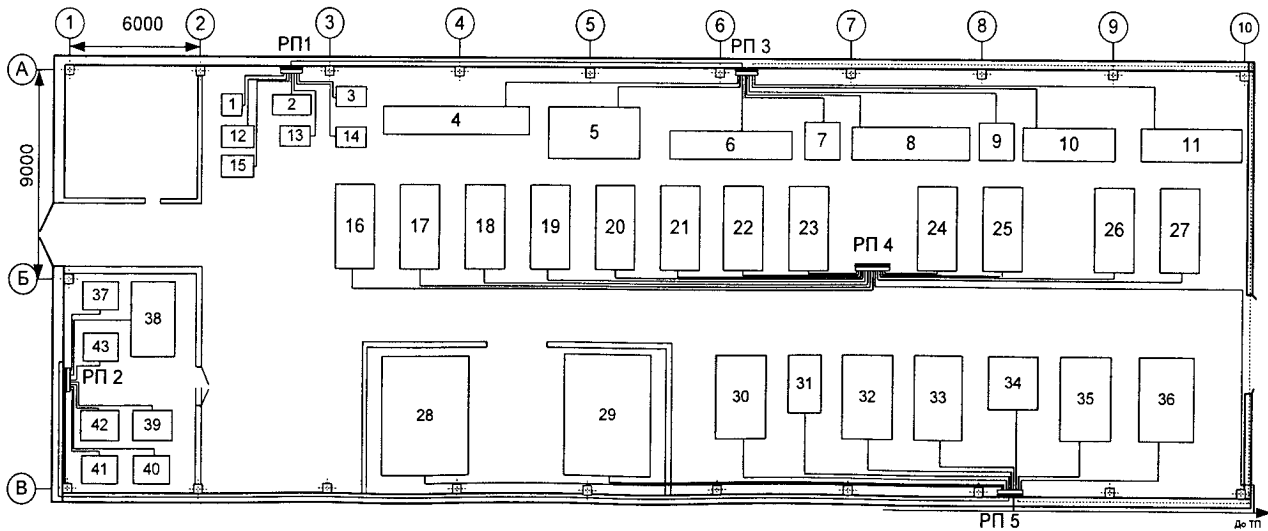


Рисунок 1.2 – План розміщення обладнання дільниць слюсарно-складального цеху

Розв'язування. Для визначення навантажень цехової мережі за методом упорядкованих діаграм заповнюється розрахункова таблиця (табл. 1.5) [4]. Розрахункові навантаження РП визначаються в такій послідовності: для ЕП, наприклад, РП1

$$K_B = \frac{\sum n P_H k_B}{\sum n P_H} = \frac{4,9}{36} = 0,14;$$

$$n_e = \frac{(\sum n P_H)^2}{\sum n P_H^2} = \frac{36^2}{190} = 6,8 \approx 6.$$

З табл. 1.1 знаходять $K_p = 2,01$ і обчислюють

$$P_p = K_p \sum n P_H k_B = 2,01 \cdot 4,9 = 9,8 \text{ кВт};$$

$$Q_p = K_p \sum n P_H k_B \operatorname{tg} \varphi = 1,1 \cdot 11,2 = 12,3 \text{ квар.}$$

Такої ж послідовності дотримуються і під час визначення розрахункових навантажень інших РП. Навантаження РП-3 і РП-5, крім навантаження ЕП, містить навантаження відповідно РП-1 і РП-2.

Розрахункові навантаження цеху визначаються в такій послідовності:

а) розраховують коефіцієнти використання та ефективну кількість ЕП цеху в цілому

$$K_n = \frac{\sum n P_n k_n}{\sum n P_n} = \frac{89,6}{555} = 0,16;$$

$$n_e = \frac{(\sum n P_n)^2}{\sum n P_n^2} = \frac{555^2}{10169,5} = 30,3 \approx 30;$$

б) з табл. 1.1 знаходять значення $K_p = 1,18$. Розрахункові навантаження на шинах 0,38 кВ ТП

$$P_p = K_p \sum n P_H k_B = 1,18 \cdot 89,6 = 105,7 \text{ кВт};$$

$$Q_p = K_p \sum n P_H k_B \operatorname{tg} \varphi = 1,0 \cdot 140,7 = 140,7 \text{ квар};$$

$$S_p = \sqrt{(P_p^2 + Q_p^2)} = \sqrt{105,7^2 + 140,7^2} = 175,9 \text{ кВ}\cdot\text{А.}$$

Розрахункові навантаження цеху, що відповідають сталій часу $T_0 = 2,5$ год і використовуються для вибору цехових трансформаторів та магістральних шинопроводів, визначаються в такій послідовності: з табл. 1.2 знаходять значення $K_p = 0,75$. Розрахункові навантаження для вибору трансформаторів ТП

$$P_p = K_p \sum n P_H k_B = 0,75 \cdot 89,6 = 67,2 \text{ кВт};$$

$$Q_p = K_p \sum n P_H k_B \operatorname{tg} \varphi = 0,75 \cdot 140,7 = 105,5 \text{ квар};$$

$$S_p = \sqrt{(P_p^2 + Q_p^2)} = \sqrt{67,2^2 + 105,5^2} = 125,1 \text{ кВ}\cdot\text{А.}$$

Таблиця 1.5 – Розрахунок силового навантаження цеху

Найменування ЕП	n , шт	$P_{н\prime}$ кВт	$n \cdot P_{н\prime}$ кВт	$K_{в}$	$\text{tg}\varphi$	$n \cdot P_{н} K_{в}$ кВт	$\frac{n \cdot P_{н}}{K_{в} \cdot \text{tg}\varphi}$ квар	$n \cdot P_{н}^2$	n_{ϵ}	$K_{р}$	$P_{р\prime}$ кВт	$Q_{р\prime}$ квар	$S_{р\prime}$ кВ·А
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
РП1													
Заточний (1,12,15)	3	6	18	0,14	2,29	2,5	5,8	108					
Заточний (2,13)	2	5	10	0,14	2,29	1,4	3,2	50					
Вертикально-свердильний (3,14)	2	4	8	0,12	2,29	1,0	2,2	32					
Всього РП-1	7		36	0,14		4,9	11,2	190	6	2,01	9,8	12,3	15,7
РП2													
Універсально-заточний (37, 39-43)	6	4,5	27	0,12	2,29	3,2	7,4	121,5					
Станок для заточування дисків (38)	1	5	5	0,12	2,29	0,6	1,4	25					
Всього РП-2	7		32	0,12		3,8	8,8	146,5	7	2,24	8,6	9,7	12,9
РП3													
Токарно-гвинторізний (4)	1	22	22	0,12	1,73	2,6	4,5672	484					
Шліфувальний (5)	1	18	18	0,25	1,17	4,5	5,3	324					
Круглошліфувальний(6,11)	2	25	50	0,25	1,17	12,5	14,6	1250					
Безцентровошліфувальний (7,9)	2	11	11	0,25	1,17	5,5	6,4	242					
Плоскошліфувальний (8)	1	22	22	0,25	1,17	5,5	6,4	484					
Різьбошліфувальний (10)	1	25	25	0,25	1,17	6,2	7,3	625					
Навантаження РП-1	7		36	0,14		4,9	9,0	190					
Всього РП-3	15		189	0,21		41,8	55,8	3599	10	1,34	56,0	61,4	83,1

Продовження таблиці 1.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
РП-4													
Токарно-гвинторізний (16, 18-20, 22, 23)	6	11	66	0,12	1,73	7,9	13,7	726					
Токарно-гвинторізний(17)	1	24	24	0,12	1,73	2,9	5,0	576					
Токарно-гвинторізний (21)	1	8	8	0,12	1,73	1,0	1,7	64					
Токарно-гвинторізний з ЧПУ (24 -27)	4	24	96	0,12	1,73	11,5	19,9	2304					
Всього РП-4	12		194	0,12		23,9	40,3	3670	10	2,07	48,2	44,3	65,5
РП5													
Координатно-розточний з ЧПУ (28,29)	2	32	64	0,17	1,73	10,9	18,8224	2048					
Вертикально-фрезерний (30)	1	10	10	0,14	1,73	1,4	2,4	100					
Універсально-фрезерний (31)	1	10	10	0,14	1,73	1,4	2,4	100					
Горизонтально-фрезерний (32,33)	2	10	20	0,14	1,73	2,8	4,8	200					
Вертикально-фрезерний (34)	1	11	11	0,14	1,73	1,5	2,7	121					
Фрезерний з ЧПУ (35)	1	8	8	0,14	1,73	1,1	1,9	64					
Фрезерний (36)	1	11	11	0,14	1,73	1,5	2,7	121					
Навантаження РП-2	7		32	0,12		3,8	8,8	146,5					
Всього РП-5	16		166	0,15		24,5	44,6	2900,5	9	1,78	43,7	49,0	65,6
Всього по цеху	43		555	0,16		89,6	140,7	10169,5	30	1,18	105,7	140,7	175,9

Емпіричні методи. Метод коефіцієнта попиту

$$P_p = K_{\Pi} \sum_{i=1}^n P_{\Pi, i} = \sum_{i=1}^n K_{\Pi, i} P_{\Pi, i},$$

де K_{Π} , $K_{\Pi, i}$ – коефіцієнти попиту груп ЕП та окремих ЕП, які отримані на основі статистичних даних ЕН аналогічних об'єктів.

Метод питомої енергоємності продукції

$$P_p = \frac{w_{\Pi} \cdot M}{T},$$

де w_{Π} – питома енергоємність одиниці продукції, яка отримана на основі статистичних даних електроспоживання аналогічних об'єктів; M – плановий випуск продукції за розрахунковий період T .

Наприклад, питома енергоємність електролізу алюмінію становить приблизно 40000 кВт·год/т, виплавлення сталі – 600–870 кВт·год/т, видобутку вугілля – 45 кВт·год/т.

Метод питомого навантаження на 1 м² площі приміщення

$$P_p = p_{\Pi} \cdot F,$$

де p_{Π} – питома навантаження; F – площа.

Приклад 1.2 Визначити навантаження механо-збирального цеху (табл. 1.6) за методом коефіцієнта попиту.

Таблиця 1.6 – Розрахунок навантажень механо-збирального цеху за методом коефіцієнта попиту

Назва груп ЕП	P_{Π} , кВт	K_{Π}	$\cos \varphi / \operatorname{tg} \varphi$	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВ·А
Металорізальні верстати	2540	0,2	0,5/1,73	508	880	
Верстати-автомати, штампувальні преси	2820	0,25	0,65/1,14	705	803	
Вентилятори сантехнічні	815	0,65	0,8/0,75	530	396	
Насоси, двигуни-генератори	645	0,75	0,85/0,62	483	300	
Крани, тельфери (приведені до $T_{\text{пв}}=100\%$)	315	0,2	0,5/1,73	63	109	
Електропечі опору	845	0,75	0,95/0,33	633	209	
Зварювальні машини	285	0,3	0,6/1,39	86	119	
Освітлення	320	0,9	0,9/0,48	288	138	
Всього по цеху	8585	0,385	0,76/0,86	3296	2954	4426

1.2 Розрахунок навантажень житлових будинків

Згідно з ДБН В.2.5-23:2010 [6] житлові будинки за їхнім електричним навантаженням підрозділяються на три види:

- житла (квартири) в будинках масового будівництва, споруджених та споруджуваних із загальною площею від 35 до 95 м² включно та заявленою (встановленою) потужністю до 30 кВт включно;
- житла (квартири) в багатоквартирних будинках, споруджених та споруджуваних із загальною площею від 50 до 300 м² включно та заявленим замовником високим рівнем комфортності, що відповідає встановленій потужності електроприймачів від 30 кВт до 60 кВт включно;
- житла (квартири) в котеджах, будинках, споруджених та споруджуваних із розрахунку, як правило, на одну родину із загальною площею від 150 до 600 м² включно та заявленим замовником високим рівнем комфортності, що відповідає встановленій потужності електроприймачів від 60 кВт до 140 кВт включно.

Для жител 1-го виду встановлюються п'ять рівнів електрифікації та відповідні їм нормативні розрахункові питомі навантаження:

- I – житла (квартири) з плитами на природному газі;
- II – житла (квартири) з плитами на скрапленому газі та на твердому паливі;
- III – житла (квартири) з електричними плитами потужністю до 8,5 кВт включно;
- IV – житла (квартири) з електричними плитами потужністю до 10,5 кВт включно;
- V – будиночки на ділянках садівничих товариств.

Для жител 2-го виду встановлюються два рівні електрифікації та відповідні їм нормативні розрахункові питомі навантаження:

- I – житла (квартири) з плитами на природному газі;
- II – житла (квартири) з електричними плитами потужністю до 10,5 кВт включно.

Питомі розрахункові електричні навантаження жител 1-го та 2-го видів наведено в табл. 1.7, у них враховано застосування в житловому приміщенні побутових кондиціонерів повітря та комфортного електричного доопалення у межах 7–15% від загальної потреби в теплі з розрахунку 60–120 Вт на 1 м² доопалюваної площі.

Орієнтовні питомі розрахункові електричні навантаження жител 3-го виду наведено в табл. 1.8.

Розрахункове навантаження групи жител 1-го та 2-го видів з однаковим питомим навантаженням на лінії живлення або шинах ТП

$$P_{p.ж.} = P_{ж.} \cdot N,$$

де $P_{ж.}$ – питоме навантаження на житло; N – кількість жител.

Таблиця 1.7 – Питомі розрахункові електричні навантаження жител 1-го та 2-го видів, кВт /житло

Кількість жител (квартир)	1	3	6	9	12	15	18	24	40	60	100	200	400	600	1000
Житла 1-го виду															
I рівня електрифікації – в будинках з плитами на природному газі	5,00	3,85	3,23	2,72	2,36	2,10	1,91	1,65	1,31	1,14	1,00	0,87	0,74	0,66	0,60
II рівня електрифікації – в будинках з плитами на скрапленому газі та на твердому паливі	6,50	5,01	4,20	3,53	3,07	2,73	2,48	2,15	1,70	1,48	1,30	1,12	0,96	0,86	0,78
III рівня електрифікації – в будинках з електричними плитами потужністю до 8,5 кВт включно	10,00	8,19	5,56	4,44	3,76	3,33	3,05	2,72	2,35	2,10	1,73	1,38	1,31	1,19	1,10
IV рівня електрифікації – в будинках з електричними плитами потужністю до 10,5 кВт включно	12,00	9,83	6,67	5,33	4,51	3,99	3,66	3,26	2,82	2,52	2,08	1,65	1,58	1,43	1,32
V рівня електрифікації – в будиночках на дільницях садівничих товариств	3,50	2,84	1,91	1,47	1,22	1,07	0,96	0,83	0,66	0,58	0,52	0,48	0,47	0,46	0,41
Житла 2-го виду															
I рівня електрифікації – в будинках з плитами на природному газі	9,00	6,33	5,29	4,36	3,72	3,26	2,94	2,51	2,00	1,78	1,62	1,47	1,24	1,08	0,99
II рівня електрифікації – в будинках з електричними плитами потужністю до 10,5 кВт включно	16,00	13,05	8,34	6,41	5,39	4,77	4,36	3,83	3,18	2,83	2,51	2,16	1,88	1,77	1,76

Таблиця 1.8 – Орієнтовні питомі розрахункові електричні навантаження жител 3-го виду, кВт /житло

Споживачі електроенергії/Кількість жител	1	3	6	9	12	15	18	24	40	60	100	200
1. Житла (котеджі) з газовими плитами без електричних саун (заявлена потужність 20 кВт), кВт	12,00	8,44	7,06	5,81	4,96	4,34	3,92	3,35	2,66	2,38	2,16	1,96
2. Житла (котеджі) з газовими плитами, з електричними саунами (заявлена потужність 32 кВт), кВт	18,00	13,59	9,78	7,80	6,63	5,86	5,33	4,64	3,79	3,39	3,06	2,74
3. Житла (котеджі) з електроплитами до 10,5 кВт без саун і проточних водопідігрівачів (заявлена потужність 32 кВт), кВт	20,00	16,13	9,96	7,65	6,48	5,78	5,31	4,78	3,99	3,58	3,20	2,83
4. Те саме з саунами потужністю до 12 кВт, без проточних водопідігрівачів (заявлена потужність 45 кВт), кВт	25,00	20,17	12,45	9,56	8,10	7,22	6,64	5,90	4,98	4,48	4,01	3,54
5. Те саме з саунами потужністю до 12 кВт, з проточними водопідігрівачами потужністю до 12 кВт (заявлена потужність 60 кВт), кВт	32,00	25,81	15,94	12,16	10,37	9,25	8,50	7,55	6,38	5,73	5,13	4,52
6. Те саме, що поз. 5, з повним електроопаленням, площею 150 м ² (заявлена потужність 73 кВт), кВт	45,50	39,59	29,58	25,48	23,66	22,76	22,30	21,39	20,02	19,11	18,66	18,20
7. Те саме, що поз. 5, з повним електроопаленням, площею 300 м ² (заявлена потужність 95 кВт), кВт	59,00	53,10	43,07	38,94	37,17	35,58	35,40	34,81	33,63	32,45	31,86	31,27

Розрахункове навантаження ліній живлення та на шинах ТП групи жител 3-го виду з однаковим питомим навантаженням

$$P_{p.ж.} = K_o \cdot P_{ж.} \cdot N,$$

де K_o – коефіцієнт одночасності (табл. 1.9).

Таблиця 1.9 – Значення коефіцієнта одночасності для однакових жител

Кількість жител (квартир)	1	3	6	9	12	15	18	24	40	60	100	200	400
3 плити на природному газі	1,00	0,65	0,38	0,32	0,28	0,26	0,22	0,23	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11
3 електроплити потужністю до 10,5 кВт включно	1,00	0,81	0,50	0,38	0,32	0,29	0,27	0,24	0,20	0,18	0,16	0,14	0,13
Житла з повним електроопаленням, площею 150 м ²	1,00	0,87	0,65	0,56	0,52	0,50	0,49	0,47	0,44	0,42	0,41	0,40	0,39
Житла з повним електроопаленням, площею 300 м ²	1,00	0,90	0,73	0,66	0,63	0,62	0,60	0,59	0,57	0,55	0,54	0,53	0,52

Розрахункове навантаження для групи жител з різними питомими навантаженнями, приведене до лінії живлення шин 0,4 кВ трансформатора 10(6)/0,4 кВ, за загальної кількості приєднаних жител 29 і менше, слід визначати за формулою:

$$P_{p.ж.} = (P_{ж.1} - P_{ж.m}) N_1 K_{o.1} + (P_{ж.2} - P_{ж.m}) N_2 K_{o.1+2} + \dots + (P_{ж.m-1} - P_{ж.m}) N_{m-1} K_{o.1+2+\dots+m-1} + P_{ж.m} (N_1 + N_2 + \dots + N_m) K_{o.1+2+\dots+m},$$

де найбільшому значенню присвоюється номер 1, найменшому – останній номер.

Розрахункове навантаження групи жител з різним питомим навантаженням на лінії живлення або шинах ТП за загальної кількості жител 30 і більше

$$P_{p.ж.} = K_{o.1+2+\dots+m} \sum_{i=1}^m P_{ж.i} N_i.$$

Значення коефіцієнтів одночасності для розрахунку навантажень жител з різним питомим навантаженням слід приймати за табл. 1.10.

Таблиця 1.10 – Значення коефіцієнта одночасності для жител з різним навантаженням

Кількість жител	1	3	6	9	12	15	18	24	40	60	100	200	400
Коефіцієнт одночасності	1,00	0,8	0,5	0,38	0,32	0,28	0,27	0,23	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12

Розрахункове активне навантаження силових ЕП, наприклад, ліфтових установок, визначається за формулою

$$P_{p.l.} = K_{п} P_{н.}$$

Значення коефіцієнта попиту ліфтових установок наведено в табл. 1.11.

Таблиця 1.11 – Значення коефіцієнта попиту ліфтових установок

Кількість ліфтових установок	2–3	4–5	6	10	20	25 і більше
для будинків заввишки до 12 поверхів	0,80	0,70	0,65	0,50	0,40	0,35
для будинків заввишки 12 і більше поверхів	0,90	0,80	0,75	0,60	0,50	0,40

Розрахункове навантаження житлового будинку в цілому, за умови, коли найбільшою складовою є навантаження від жителів, визначають за формулою

$$P_p = P_{p.ж.} + 0,9 P_{p.l.} + K_o P_{p.гр.}$$

де $P_{p.гр.}$ – розрахункове навантаження вбудованих чи прибудованих громадських приміщень, що живляться від електрощитової будинку.

Розрахункова реактивне навантаження визначається за формулою

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg}\varphi,$$

де $\operatorname{tg}\varphi$ – розрахунковий коефіцієнт реактивної потужності (табл. 1.12).

Таблиця 1.12 – Значення розрахункового коефіцієнта реактивної потужності

Споживачі електроенергії	$\operatorname{tg}\varphi$
Квартири з електричними плитами та без побутових кондиціонерів повітря	0,20
Квартири з електричними плитами і з побутовими кондиціонерами повітря	0,40
Квартири з плитами на природному або зрідженому газі чи на твердому паливі	0,29
Квартири з плитами на природному або зрідженому газі чи на твердому паливі та з побутовими кондиціонерами повітря	0,43
Господарські насоси, вентиляційні установки та інші санітарно-технічні пристрої	0,75
Ліфти	1,17

Приклад 1.3 Визначити розрахункове навантаження 9-поверхового 108-квартирного житлового будинку 1-го виду з плитами на природному газі (I рівня електрифікації), який має три секції по 36 квартир в кожній. Номінальна потужність однієї ліфтової установки 7 кВт.

Розв'язування. Питоме навантаження на одне житло 1-го виду I рівня електрифікації знаходимо з табл. 1.7 шляхом лінійної інтерполяції вхідних даних

$$P_{ж.} = 1,0 - \frac{1,0 - 0,87}{200 - 100} (108 - 100) = 0,99 \text{ кВт/житло.}$$

Розрахункове активне навантаження групи жител з однаковим питомим навантаженням на лінії живлення

$$P_{р.ж.} = P_{ж.} \cdot N = 0,99 \cdot 108 = 107 \text{ кВт.}$$

Розрахункова активна потужність ліфтів

$$P_{р.л.} = K_{п} P_{н} = 0,8 \cdot 3 \cdot 7 = 16,8 \text{ кВт.}$$

Розрахункове активне навантаження будинку

$$P_{р} = P_{р.ж.} + K_{о} P_{р.л} = 107 + 0,9 \cdot 16,8 = 122 \text{ кВт.}$$

Розрахункове реактивне навантаження будинку

$$Q_{р} = P_{р.ж.} \operatorname{tg} \phi_{ж.} + K_{о} P_{р.л} \operatorname{tg} \phi_{л.} = 107 \cdot 0,29 + 0,9 \cdot 16,8 \cdot 1,17 = 49 \text{ квар.}$$

Приклад 1.4 Визначити розрахункове навантаження жител (котеджі) двох видів: 1) з електроплитами до 10,5 кВт без саун і проточних водопідігрівачів (заявлена потужність 32 кВт); 2) з повним електроопаленням, площею 150 м² (заявлена потужність 73 кВт).

Кількість жител відповідно 9 і 6.

Розв'язування. Розрахункове навантаження для групи жител з різними питомими навантаженнями, приведене до лінії живлення, шин 0,4 кВ трансформатора 10(6)/0,4 кВ, визначається таким чином:

$$P_{р.ж.} = (73 - 32) \cdot 6 \cdot 0,5 + 32 \cdot 15 \cdot 0,28 = 257 \text{ кВт.}$$

2 РОЗРАХУНОК ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НАПРУГОЮ ДО 1000 В

2.1 Схеми і конструктивне виконання мереж напругою до 1000 В

Залежно від схеми цехові мережі поділяють на радіальні, магістральні та змішані. Радіальними називають мережі, в яких для передачі електричної енергії від ТП до розподільного пункту (РП) і до електроприймачів (ЕП) використовується окрема лінія. В радіальних цехових мережах лінії електропередавання виконують кабелями. Відгалуження до окремих ЕП можуть виконуватися кабелями або проводами. В радіальних мережах від розподільного щита ТП відходять лінії живлення первинних розподільних пунктів, а також ЕП великої потужності (більше 55 кВт). Також від первинних РП живляться вторинні РП і ЕП середньої потужності (10.....55 кВт). Від вторинних РП живляться ЕП малої потужності.

Радіальні схеми забезпечують високу надійність електропостачання. Однак вони потребують великих витрат на електрообладнання і монтаж.

Магістральними називають мережі, в яких передавання електроенергії виконують за допомогою магістральних і розподільних шинопроводів. Комплектні магістральні шинопроводи (ШМ) призначені для передавання електроенергії від ТП до розподільних шинопроводів (ШР). Комплектні ШР призначені для приєднання великої кількості ЕП. До комплекту ШР входять коробки з захисною і комутаційною апаратурою (рубильники із запобіжниками або автоматичні вимикачі). Застосування шинопроводів дозволяє відмовитися від великої кількості кабельних ліній.

Схеми цехових мереж зображають у вигляді плану (рис. 2.1) і розрахунково-монтажної таблиці (рис. 2.2).

Вирішальний вплив на вибір конструктивного виконання цехових мереж має стан навколишнього середовища. Рекомендований ступінь захисту електрообладнання у виробничих приміщеннях: нормальних – IP 20; запилених – IP 40; вологих – IP 44; особливо вологих і з хімічно активним середовищем – IP 54. В пожежезахищеному приміщенні має застосовуватись пожежезахищене обладнання. Найбільш складною є задача проектування цехових мереж у вибухонебезпечних приміщеннях, для яких використовується спеціальне вибухонебезпечне обладнання.

На сьогодні використовують кабеленесучі системи провідних світових виробників DKS, Flexel та інших з використанням металевих, гофрованих, двостінних труб, листових лотків. Максимальний ступінь захисту – IP 67. Використовують також магістральні, розподільні та освітлювальні шинопроводи. Причому виконання магістральних і розподільних шинопроводів фірми DKS типу Hercules – IP 55, IP 65.

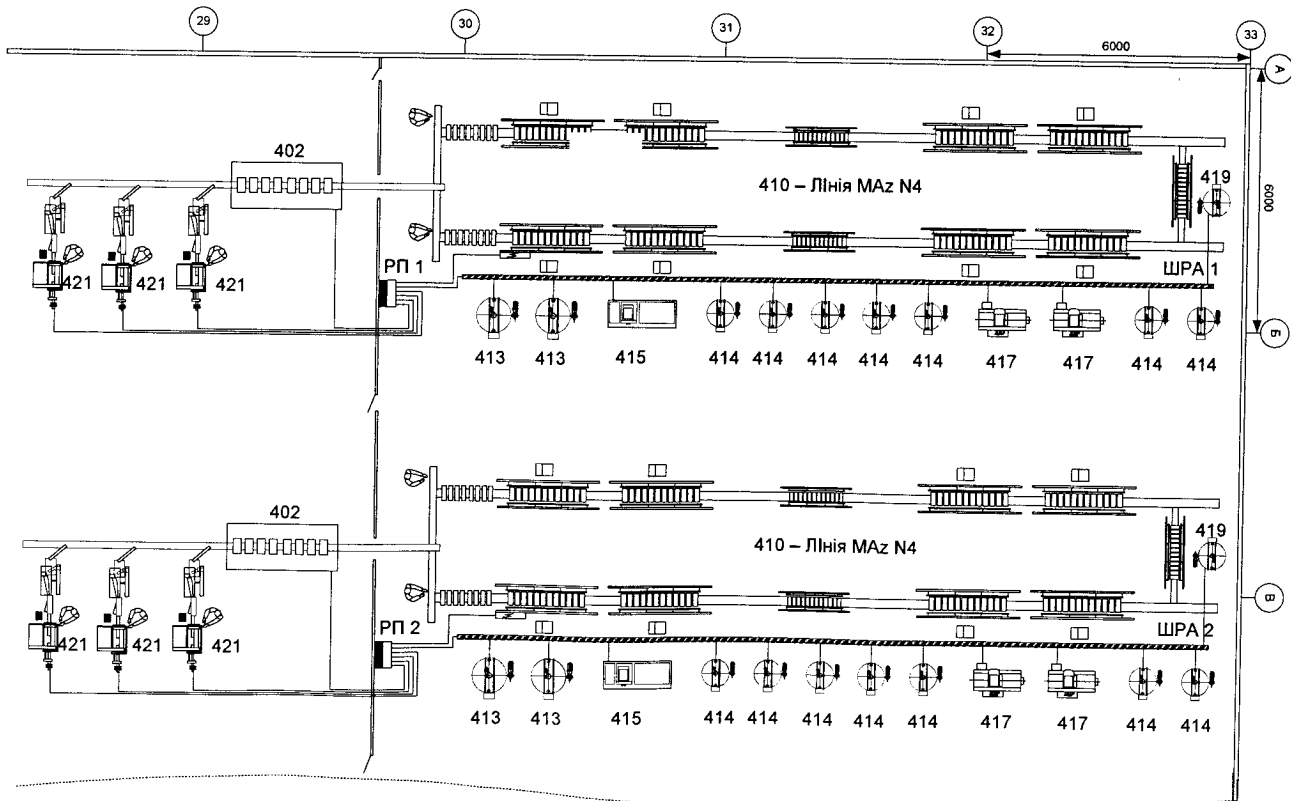


Рисунок 2.1 – План цехової мережі зі змішаною схемою

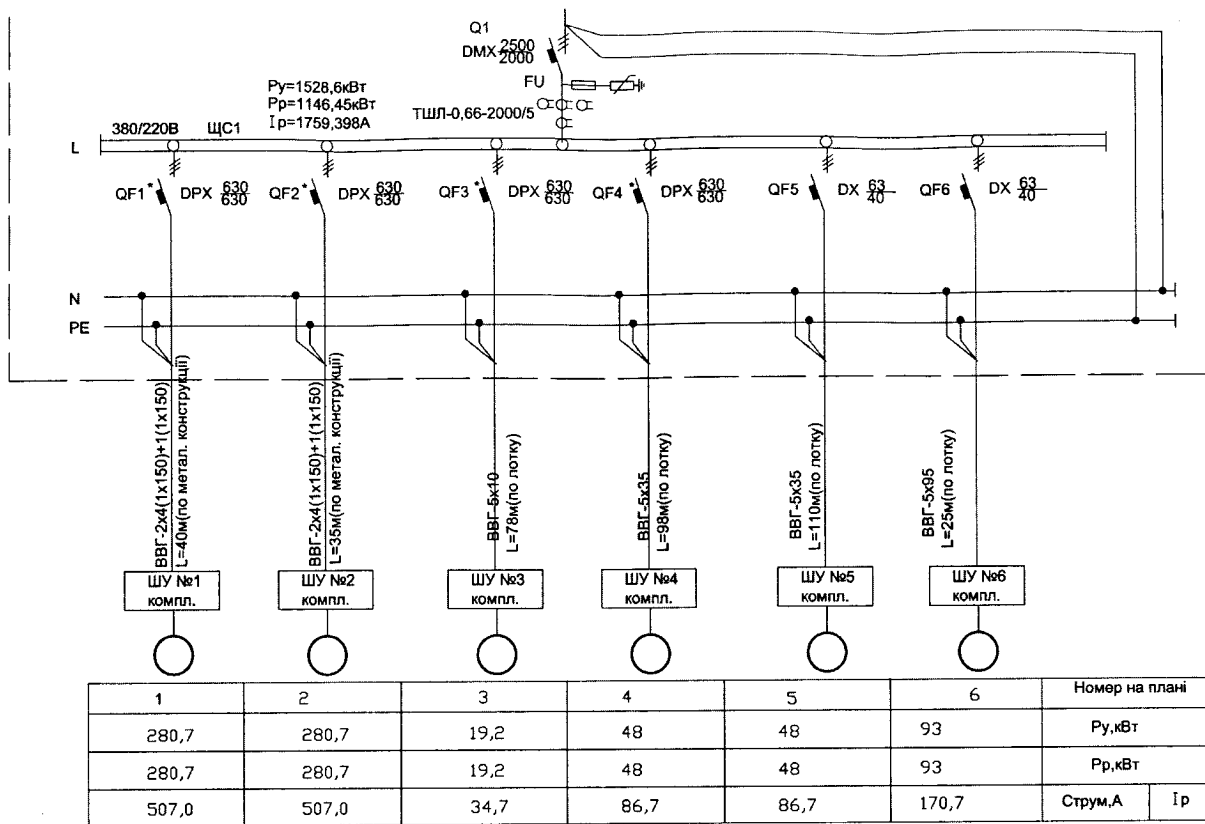


Рисунок 2.2 – Розрахунково-монтажна таблиця цехової мереж

ЩСУ слід передбачати лише за необхідності забезпечення зручного керування електроприводами або централізації місця встановлення апаратів блокування та диспетчерського управління або необхідності захисту апаратів від дії навколишнього середовища. У решті випадків рекомендується передбачати магнітні пускачі з установленням їх в безпосередній близькості до ЕП за відповідного виконання кожухів.

Розподільні пристрої ЩСУ можуть виконуватися з панелей ЩО-94. За ступенем захисту панелі виготовляють двох виконань (перша цифра в позначенні панелі): 1 – відкрите (ступінь захисту IP 00, з боку фасаду – IP 20); 2 – шафове (ступінь захисту IP 20, з боку дна – IP 00). За своїм призначенням панелі поділяють на (друга цифра в позначенні панелі): 1 – ввідні, 2 – секційні, 3 – розподільні і ввідно-розподільні, 4 – допоміжні, 5 – шинні мости. Панелі складають в щит завдовжки до 4 м.

За відсутності небезпеки механічних пошкоджень рекомендується відкрите прокладання ізольованих проводів і неброньованих кабелів. За наявності небезпеки механічних пошкоджень потрібно застосовувати броньовані кабелі або ж має передбачатися інший захист (наприклад, прокладання в трубах). У разі прокладання всередині приміщень броньовані кабелі не можуть мати поверх броні, а неброньовані – поверх металевих оболонок захисних покриттів з горючих матеріалів.

Вибір методу монтажу електропроводки і способу прокладання провідників виконується згідно з ПУЕ [5], а в країнах ЄС – згідно зі стандартом ІЕС 60364.5.52 [7]. Кабелі можуть монтуватися безпосередньо без фіксації або з кріпленням, в трубах, коробах, на лотках, кронштейнах, на ізоляторах, на тросі тощо, ізольовані проводи – на ізоляторах в трубах або в кабельних коробах (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Методи монтажу електропроводок

Тип провідника	Безпосередньо без фіксації	Безпосередньо з кріпленням	В трубах, в коробах	На лотках, кронштейнах	На ізоляторах	На тросі
Кабелі багатожильні	+	+	+	+	доп.	+
Кабелі одножильні	доп.	+	+	+	доп.	+
Ізольовані проводи	-	-	*	-	+	-

Примітка. – ізольовані проводи допускаються до застосування, якщо кабельні коробки мають ступінь захисту IP4X.

При цьому розрізняють такі способи прокладання:

А) в термоізолювальних стінах: ізольовані проводи або кабелі в пластмасових або металевих трубах, ізольовані проводи або одножильні кабелі в молдінгах, в балках, віконних рамах, кабелі безпосередньо;

В) по стінах або поверхнях: ізолювані проводи або кабелі в пластмасових або металевих трубах, кабельних коробах; в пустотах будівельних конструкцій: безпосередньо в трубах, кабельних коробах; кабелі в підвісних стелях, в підлозі, ізолювані проводи або кабелі в утеплених в підлозі, замонолічених, невентильованих, відкритих або вентильованих кабельних каналах, ізолювані проводи або кабелі в трубах в кладці (бетоні);

С) кабелі, закріплені по стіні, під стелею, за фіксованої установки підвісного обладнання, на неперфорованому лотку, кабелі, прокладені безпосередньо в кладці (бетоні);

Д) кабелі в пластмасових, керамічних, металевих трубах діаметром 100 мм і більше, в спеціальних кабельних каналах або безпосередньо в землі;

Е або F) кабелі, закріплені на відстані від стіни або стелі, на перфорованому лотку, на дротяному лотку або кронштейнах, кабель на тросі;

Г) ізолювані проводи або одножильні кабелі на ізоляторах.

Режими нейтралі. В мережах напругою 0,4 кВ використовується система заземлення *TN-C*, в якій нульовий (*PEN*) провідник виконує одночасно функції захисного і робочого провідників. Така мережа характеризується недостатньою безпекою. Мережа з системою заземлення *TN-S*, в якій використано два нульових провідники – робочий (*N*) та захисний (*PE*), є значно безпечнішою. Вона характеризується на порядок нижчими частотами відмов, що можуть призвести до враження людей струмом. Використовують мережі з системою заземлення *TN-C-S*, які отримують шляхом розділення *PEN*-провідника мереж *TN-C* на нульовий захисний (*PE*) і робочий (*N*) провідники на ввідному щиті окремих об'єктів.

Опір заземлювального пристрою, до якого приєднано нейтраль трансформатора, в будь-яку пору року має бути не більшим 4 Ом, якщо лінійна напруга 380 В. Цей опір потрібно забезпечувати з врахуванням використання природних заземлювачів, а також заземлювачів повторних заземлень *PEN*- або *PE*-провідника ПЛ напругою до 1 кВ за кількістю відхідних ліній не менше двох. Опір заземлювача, розташованого в безпосередній близькості від нейтралі трансформатора, має бути не більшим 30 Ом. Загальний опір розтіканню заземлювачів всіх повторних заземлень *PEN*-провідника кожної ПЛ в будь-яку пору року не має перевищувати 10 Ом. При цьому опір розтіканню заземлювача кожного з повторних заземлень має бути не більшим 30 Ом.

2.2 Вибір провідників в мережах напругою до 1000 В

Типи кабелів. В мережах напругою 0,4 кВ переважно використовують кабелі та ізолювані проводи з пластмасовою ізоляцією. Кабелі з

пластмасовою ізоляцією виготовляють для мереж 0,66; 1; 3; 6 кВ з ізоляцією з полівінілхлориду (ПВХ), поліетилену (ПЕ), із зшитого ПЕ, в алюмінієвій, ПВХ і ПЕ оболонках.

Кабелі з гумовою ізоляцією призначені для передачі електроенергії в стаціонарних установках з необмеженою різницею рівнів напругою 0,66; 3; 6 кВ. Кабелі виготовляють в оболонці з маслостійкої гуми і гуми, що не поширює горіння, ПВХ пластикату або свинцю. Тривало допустима температура жил не може перевищувати, залежно від матеріалу ізоляції, +65 °С (для звичної гуми) та 90 °С (для термостійкої гуми АВРтБ). Однократне максимально допустиме нагрівання кабелів АВРтБ для струмів КЗ тривалістю не більше 1 с не має перевищувати 250 °С. Допускається трикратне нагрівання жил струмами КЗ, за яких температура не перевищує 150 °С.

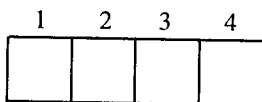
Допустимі температури нагрівання жил кабелів згідно з ІЕС 60502-1:2004 [8] та CENELEC (Європейський комітет з електротехнічної стандартизації) HD 603 S1/1994/A2:2003 наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Допустимі температури нагрівання жил кабелів

Матеріал ізоляції	Допустимі температури нагрівання жил кабелю, °С			
	Тривало допустима	В режимі перевантаження	Гранична під час короткого замикання	З умови незагоряння під час короткого замикання
ПВХ пластикат Полімерна композиція, що не містить галогенів	70	90	160/140*	350
Зшитий поліетилен	90	130	250	400
Гума	65	110	150	350
Етиленпропіленова гума	90	130	160	350

Примітка. * – для кабелів з струмопровідними жилами перерізом більше 300 мм².

Маркування кабелів з пластмасовою і гумовою ізоляцією містить чотири позиції.



Маркування кабелів з пластмасовою ізоляцією

1-е місце: матеріал жили (аналогічно кабелям з паперовою ізоляцією);

- 2-е місце: В – ізоляція жил з полівінілхлориду; П – з поліетилену;
 Пв – зшитого (вулканізованого) поліетилену;
 Пс – самозгасного поліетилену;
 Пвс – вулканізованого самозгасного поліетилену;
 3-е місце: В – полівінілхлоридна оболонка; А – алюмінієва;
 П – поліетиленова; Пс – з самозгасного поліетилену;
 4-е місце: Шв – захисне покриття – шланг вініловий.

Маркування кабелів з гумовою ізоляцією

- 1-е місце: матеріал жили (аналогічно кабелям з паперовою ізоляцією);
 2-е місце: Н – матеріал оболонки – гума, що не поширює вогонь;
 В – з полівінілхлориду; С – свинцева оболонка;
 3-е місце: Р – гумова ізоляція жил; Рт – гума підвищеної теплостійкості;
 4-е місце: захисне покриття.

Кабелі з паперовою ізоляцією використовують обмежено, наприклад, для живлення окремих цехів з їх прокладанням в траншеях. Для силових кабелів з паперовою ізоляцією до 1 кВ допустимою є температура нагрівання жил 80 °С.

Умови вибору низьковольтних кабелів та проводів:

- за нагрівом;
- за втратами напруги;
- за термічною стійкістю до дії струмів КЗ.

Переріз провідників в мережах напругою до 1 кВ вибирають за допустимим нагрівом

$$I_{\text{доп}} \geq \begin{cases} I_p & \text{– для нормальних приміщень;} \\ 1,25 \cdot I_p & \text{– для вибухонебезпечних приміщень.} \end{cases}$$

Тривало допустимий струм для даного типу провідника, перерізу і способу прокладання наведено в ПУЕ [5]. В додатку А наведено допустимі струми найбільш використовуваних провідників. Згідно з ПУЕ на період ліквідації післяаварійного режиму допускається перевантаження кабелів із поліетилену на 10%, а із полівінілхлоридного пластикату на 15% тривалістю не більше 6 год за добу протягом п'яти діб.

Комплектні шинопроводи вибирають з умови

$$I_{\text{ном.ш}} \geq I_p,$$

де $I_{\text{ном.ш}}$ – номінальний струм шинопроводу.

Вибрані провідники перевіряють на допустиму втрату напруги

$$\Delta U_{\text{доп}} \geq \Delta U_{\text{max}},$$

де $\Delta U_{\text{доп}}$ – рекомендована допустима втрата напруги ; ΔU_{max} – втрата напруги в лініях від ТП до електрично найвіддаленішого ЕП.

В нормальному режимі переріз і довжина провідників мають забезпечувати допустимі втрати напруги, що не перевищують 5% – для силових ЕП і 3% – для освітлення [7].

Розрахунок втрат напруги виконують за формулою

$$\Delta U = \sqrt{3} I_p (R_0 \cos \varphi + X_0 \sin \varphi) l = \frac{P_p R_0 + Q_p X_0}{U_{\text{НОМ}}} \cdot l,$$

де R_0, X_0 – питомі значення активного та реактивного опорів ліній; l – довжина лінії. Питомий опір провідника в ІЕС 60364-5-52:2009 рекомендовано брати на 25% більшим від питомого опору при 20 °С: для міді – 22,5 Ом·мм²/м, для алюмінію – 36,0 Ом·мм²/м.

Приклад 2.1. Вибрати провідники для живлення АД з короткозамкнутим ротором потужністю 15 кВт. Відстань 20 м.

Розв’язування. Розрахунковий струм АД:

$$I_p = \frac{P_H}{\sqrt{3} U_H \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{15}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 28,1 \text{ А.}$$

Вибираємо кабель АВВГ 4×6, прокладання відкрите, допустимий струм $I_{\text{доп}} = 0,92 \cdot 32 = 29,5 \text{ А}$ [5].

Втрати напруги становитимуть

$$\Delta U \approx \sqrt{3} I_p \cdot R_0 \cdot l \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 28,1 \cdot 6,41 \cdot 0,020 \cdot 0,9 = 5,9 \text{ В.}$$

Умову перевірки термічної стійкості провідників можна записати у вигляді

$$s \geq s_{\text{min}} = \frac{\sqrt{B_K}}{C_T} \cdot 1000 \approx \frac{I_{\text{к. max}}^{(3)} \sqrt{t_{\text{вим}}}}{C_T} \cdot 1000,$$

де $I_{\text{к. max}}^{(3)}$ – струм трифазного КЗ в кА; C_T – термічний коефіцієнт стійкості кабелів; $t_{\text{вим}}$ – час вимкнення КЗ ($t_{\text{вим}} = t_{\text{с.в}} + t_d + T_a$, тут $t_{\text{с.в}}$ – витримка часу спрацювання відсічки; t_d – час загасання дуги; T_a – стала часу загасання аперіодичної складової струму КЗ). Час гасіння дуги для автоматичних вимикачів ВА, АЗ700 становить $t_d = 0,01 \text{ с}$. Усереднене значення сталої часу $T_a = 0,03 \text{ с}$.

В табл. 2.3 наведено значення C_T згідно з даними компанії АВВ.

Таблиця 2.3 – Розрахункові значення C_T згідно з даними АВВ

Ізоляція	Початкова температура	Кінцева температура	Кабель з мідними жилами	Кабель з алюмінієвими жилами
ПВХ до 300 мм ²	70	160	115	76
ПВХ понад 300 мм ²	70	140	103	68
Зшитий ПЕ, етилен-пропіленова гума	90	250	143	94
Папір	80		140	90

Для кабелів із ПВХ пластикатів і композицій, що не містять галогенів, кабелів із зшитого поліетилену, а також вогнестійких кабелів в ІЕС 60502-1 наведено значення допустимого струму $I_{\text{доп.к}(1с)}$ тривалістю 1 с (табл. А.14), які визначені за нагріванням жили від температури 70 або 90 °С до гранично допустимої температури відповідно 160/140 та 250 °С.

Допустимі струми КЗ для кабелів за будь-якого часу вимкнення визначають, домноживши наведені значення на коефіцієнт $k = 1/\sqrt{t_{\text{вим}}}$:

$$I_{\text{доп.к}} = \frac{I_{\text{доп.к}(1с)}}{\sqrt{t_{\text{вим}}}}$$

2.3 Розрахунок струмів КЗ в мережах напругою до 1000 В

Розрахунок струмів трифазного КЗ від енергосистеми

Згідно з ДСТУ 60909-0-2007 [9] струм трифазного КЗ визначається як сума струмів КЗ від системи і струмів підживлення точки КЗ струмами двигунів, що гальмуються. Підживлення від двигунів потрібно враховувати тільки під час вибору апаратури на основному щиті ТП.

Початкове значення періодичної складової струму трифазного КЗ від енергосистеми розраховують за формулою

$$I''_{\text{кз}} = \frac{c \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}},$$

де c – коефіцієнт напруги мережі, який для визначення максимальних значень струму КЗ береться 1,1 (для мереж з допустимим відхиленням напруги $\pm 10\%$), 1,05 (для мереж з допустимим відхиленням напруги $\pm 5\%$), а для визначення мінімальних значень струму КЗ – 0,95; $R_{1\Sigma}$, $X_{1\Sigma}$ – сумарні активний та реактивний опори прямої послідовності до точки КЗ:

$$\begin{aligned} R_{1\Sigma} &= R_{1Т} + R_{1\text{кл}} + R_{1\text{ш}}; \\ X_{1\Sigma} &= X_c + X_{1Т} + X_{1\text{кл}} + X_{1\text{ш}}, \end{aligned}$$

тут $R_{1Т}$, $R_{1\text{кл}}$, $R_{1\text{ш}}$ – активні опори прямої послідовності відповідно трансформатора, кабельної лінії та шинопровода; X_c – реактивний опір системи, $X_{1Т}$, $X_{1\text{кл}}$, $X_{1\text{ш}}$ – реактивні опори прямої послідовності трансформатора, кабельної лінії та шинопровода.

Під час розрахунку струмів КЗ в мережах напругою до 1000 В можна дотримуватись рекомендацій ПУЕ (п. 1.4.12), що підведена до трансформатора напруга є незмінною і дорівнює його номінальній напрузі. У такому випадку опір системи береться таким, що дорівнює нулю.

В додатку В наведено значення активних та індуктивних опорів трансформаторів, кабельних ліній і шинопроводів. Під час визначення

струму КЗ рекомендується враховувати збільшення активного опору кабелю внаслідок його нагрівання

$$r_{\vartheta} = c_{\vartheta} r_{\vartheta_0},$$

де c_{ϑ} – коефіцієнт, що враховує збільшення активного опору кабелю;

r_{ϑ_0} – активний опір кабелю за температури ϑ_0 , що дорівнює плюс 20 °С.

Зростання опору під час нагрівання провідника визначається за виразом: $R=R_0(1+\alpha \vartheta)$, де R_0 – опір однієї жили проводу або кабелю за 20°С; $\alpha \approx 0,0039$ – температурний коефіцієнт опору.

Згідно з ДСТУ 60909-2007 температуру ϑ рекомендовано вибирати 80 °С. Отже, у разі наближених розрахунків значення коефіцієнта c_{ϑ} кабелів можна брати приблизно 1,234.

Приклад 2.2. Визначити значення максимального струму КЗ в розробці кабелів, приєднаних до шин ТП та РП. ТП живиться від системи потужністю $S_c=200$ МВ·А. На ТП встановлено трансформатор $S_{Т.НОМ}=1000$ кВ·А, $u_k = 5,5\%$, $\Delta P_k=11,2$ кВт. (рис. 2.3). Активний та індуктивний опори трансформатора: $R_{1Т}=1,79$ мОм та $X_{1Т}=8,62$ мОм. Кабельна лінія АБВГ 4×70: $r_{1кб}=0,549$ мОм/м; $x_{1кб}=0,065$ мОм/м; $l=50$ м.

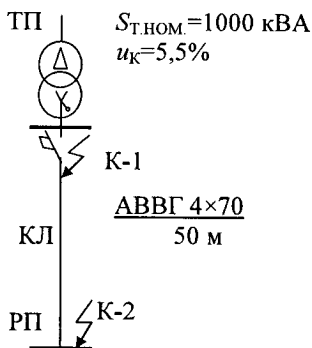


Рисунок 2.3 – Розрахункова схема

Розв’язування. Опір системи: $X_c = \frac{400^2}{200 \cdot 10^6} = 0,8 \cdot 10^{-3}$ Ом.

Опори трансформатора згідно з ДСТУ 60909-2007 [10] коректуються з використанням коефіцієнта

$$K_T = \frac{0,95 \cdot c}{1 + X_{1Т} \frac{S_{Т.НОМ}}{(U_{НОМ})^2}} = \frac{0,95 \cdot 1,05}{1 + 8,62 \frac{1000}{(400)^2}} = 0,9465.$$

Параметри заступної схеми прямої послідовності для точки К-1

$$R_{1\Sigma}=1,79 \cdot 0,9465=1,69 \text{ мОм}; \quad X_{1\Sigma}=0,8+8,62 \cdot 0,9465=8,96 \text{ мОм}.$$

Максимальний струм трифазного КЗ в точці К-1

$$I''_{\max} = \frac{1,05 \cdot U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{1,69^2 + 8,96^2}} = 25,3 \text{ кА}.$$

Активний та індуктивний опори кабельної лінії:

$$R_{1\text{кбл}} = 0,549 \cdot 1,234 \cdot 50 = 33,9 \text{ мОм}; \quad X_{1\text{кбл}} = 0,065 \cdot 50 = 3,3 \text{ мОм};$$

Параметри заступної схеми прямої послідовності для точки К-2

$$R_{1\Sigma}=1,69+33,9=35,6 \text{ мОм}; \quad X_{1\Sigma}=8,96+3,3=12,3 \text{ мОм};$$

Максимальний струм трифазного КЗ в точці К-2

$$I''_{\max} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{35,6^2 + 12,3^2}} = 6,1 \text{ кА}.$$

Розрахунок струмів КЗ від двигунів. Згідно з ДСТУ 60909-0–2007 надперехідне значення періодичної складової струму КЗ від синхронних двигунів (СД), що гальмуються:

$$I''_{\text{сд}} = \frac{c \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \sqrt{(R_{\text{сд}} + R_{1\text{кл}})^2 + (X''_{\text{д}} + X_{1\text{кл}})^2}},$$

де $R_{\text{сд}}$, $X''_{\text{д}}$ – опори СД: активний та надперехідний реактивний по поздовжній осі. У разі наближених розрахунків надперехідний опір СД $X''_{\text{д}} = 0,15$, активний опір $R_{\text{сд}} = 0,15 X''_{\text{д}}$.

Надперехідне значення періодичної складової струму КЗ від асинхронних двигунів (АД), що гальмуються:

$$I''_{\text{ад}} = \frac{c \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \sqrt{(R_{\text{ад}} + R_{1\text{кл}})^2 + (X''_{\text{ад}} + X_{1\text{кл}})^2}},$$

де $R_{\text{ад}}$, $X''_{\text{ад}}$ – активний та надперехідний реактивний опори АД. У разі наближених розрахунків надперехідний опір АД $X''_{\text{ад}} = 0,922 \cdot Z_{\text{ад}}$, активний опір $R_{\text{ад}} = 0,42 X''_{\text{ад}}$. Надперехідний повний опір АД визначають за формулою

$$Z''_{\text{ад}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot k_n \cdot I_{\text{ном}}},$$

де k_n – кратність пускового струму.

Приклад 2.3. Для схеми (рис. 2.4) визначити максимальне значення струму трифазного КЗ від СД та двох АД на розподільному щиті ТП. Синхронний двигун СД: $P_n = 125$ кВт; $U_n = 380$ В. Асинхронні двигуни АД1 і АД2 А03-315М-6У3: $P_{ном} = 132$ кВт, $U_{ном} = 380$ В, $I_{ном} = 238,6$ А, $I_{пуск}/I_{ном} = 7,0$. Кабельні лінії КЛ: ААШВ $3 \times 185 + 1 \times 70$ ($l_1 = 15$ м; $l_2 = l_3 = 20$ м): $r_{1кб} = 0,208$ мОм/м; $x_{1кб} = 0,055$ мОм/м.

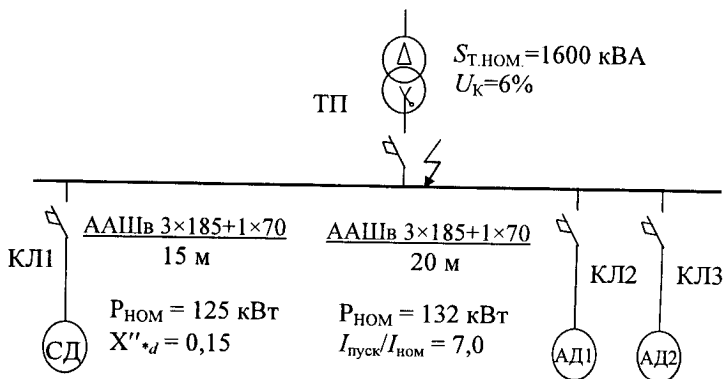


Рисунок 2.4 – Розрахункова схема

Розв'язування. Активний та індуктивний опори кабельної лінії КЛ-1:

$$R_{1кб1} = 0,208 \cdot 1,234 \cdot 15 = 3,85 \text{ мОм};$$

$$X_{1кб1} = 0,055 \cdot 15 = 0,83 \text{ мОм}.$$

Розрахунок струму КЗ від СД: $X''_{*d} = 0,15$, $R_{*сд} = 0,15 X''_{*d}$.

$$X''_{d} = 0,15 \frac{380^2}{\sqrt{3} \cdot 125} = 100 \text{ мОм}; \quad R_{сд} = 0,15 \cdot 100 = 15 \text{ мОм};$$

$$I''_{сд} = \frac{1,05 \cdot 380}{\sqrt{3} \sqrt{(15 + 3,85)^2 + (100 + 0,83)^2}} = 2,25 \text{ кА}.$$

Активний та індуктивний опори кабельних ліній КЛ2, КЛ3:

$$R_{2кб} = R_{3кб} = 0,208 \cdot 1,234 \cdot 20 = 5,1 \text{ мОм};$$

$$X_{2кб} = X_{3кб} = 0,055 \cdot 20 = 1,1 \text{ мОм}.$$

Розрахунок параметрів АД1 і АД2:

$$Z''_{ад} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot k_n \cdot I_{ном}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 7 \cdot 238,5} = 0,132 \text{ Ом};$$

$$X''_{ад} = 0,922 \cdot Z''_{ад} = 0,922 \cdot 132 = 122 \text{ мОм};$$

$$R''_{ад} = 0,42 \cdot X''_{ад} = 0,42 \cdot 122 = 51 \text{ мОм}.$$

Розрахунок складової струму КЗ від одного АД:

$$I''_{ад} \approx \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(51+5,1)^2 + (122+1,1)^2}} = 1,7 \text{ кА.}$$

Сумарний струму КЗ від двигунів:

$$I''_{д} = I''_{сд} + 2 \cdot I''_{ад} = 2,25 + 2 \cdot 1,7 = 5,7 \text{ кА.}$$

Розрахунок струмів однофазного КЗ

Для перевірки чутливості захисту необхідно розрахувати мінімальний струм однофазного КЗ. Надперехідне значення періодичної складової струму однофазного КЗ від системи:

$$I''_{с1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_{н}}{\sqrt{(2 \cdot R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2 \cdot X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}},$$

де $R_{0\Sigma}$, $X_{0\Sigma}$ – активний та реактивний опори нульової послідовності до точки КЗ:

$$R_{0\Sigma} = R_{0Т} + R_{0кл} + R_{0ш}; \quad X_{0\Sigma} = X_{0Т} + X_{0кл} + X_{0ш},$$

де $R_{0Т}$, $R_{0кл}$, $R_{0ш}$ – активні опори нульової послідовності трансформатора, кабельної лінії, шинопроводу ($R_{0ш} = R_{1ш} + 3R_{нп}$); $X_{0Т}$, $X_{0кл}$, $X_{0ш}$ – реактивні опори нульової послідовності трансформатора, кабельної лінії, шинопроводу ($X_{0ш} = (7,5 \div 9,4) X_{1ш}$).

Розрахунок струмів однофазного КЗ можна виконати за спрощеною формулою

$$I_K^{(1)} = \frac{U_{ф.ном}}{\frac{Z_T^{(1)}}{3} + Z_{ф-н} \cdot l},$$

де $U_{ф.ном}$ – номінальна фазна напруга;

$Z_T^{(1)} = \sqrt{(2R_T + R_{0Т})^2 + (2X_T + X_{0Т})^2}$ – повний опір силового трансформатора струмам однофазного КЗ; $R_{0Т}$, $X_{0Т}$ – активний і реактивний опори нульової послідовності трансформатора (додаток В);

$Z_{ф-н}$ – питоме значення повного опору петлі «фаза–нуль»;

l – відстань до місця КЗ.

Приклад 2.4. ТП живиться від системи (рис. 2.5) потужністю КЗ: $S_K = 200 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_{ВН} = 10,0 \text{ кВ}$. Трансформатор Т: ТСЗ 1000/10, $S_{Т.ном} = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; $U_{ВН} = 10,5 \text{ кВ}$; $U_{НН} = 0,4 \text{ кВ}$; $P_{к\text{ ном}} = 14 \text{ кВт}$; $u_k = 6\%$. Активний та індуктивний опори прямої послідовності трансформатора відповідно 2,24 та 9,64 мОм. Активний та індуктивний опори нульової послідовності трансформатора відповідно 19,1 та 60,6 мОм. Шинопровід ШМА-4-1600: $R_{ш} = 0,030 \text{ мОм/м}$; $X_{ш} = 0,014 \text{ мОм/м}$; $R_{нп} = 0,037 \text{ мОм/м}$; $X_{нп} = 0,042 \text{ мОм/м}$; $l_{ш} = 10 \text{ м}$. Розрахувати струм однофазного КЗ в кінці шинопроводу.

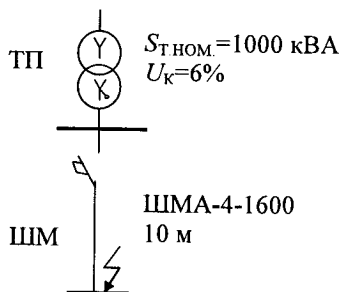


Рисунок 2.5 – Розрахункова схема

Розв'язування. Параметри заступної схеми нульової послідовності

$$R_{от} = 19,1 \text{ мОм}; X_{от} = 60,6 \text{ мОм};$$

$$R_{ош} = (0,03 + 3 \cdot 0,037) \cdot 10 = 1,41 \text{ мОм}; X_{ош} = (0,014 + 3 \cdot 0,042) \cdot 10 = 1,4 \text{ мОм}.$$

Струм однофазного КЗ

$$I''_{к1} \approx \frac{\sqrt{3} \cdot 0,95 \cdot 380}{\sqrt{(2 \cdot 2,24 + (19,1 + 1,41))^2 + (2 \cdot 9,64 + (60,6 + 1,4))^2}} = 7,3 \text{ кА}.$$

Приклад 2.5. Розрахувати максимальні струми трифазного КЗ на шинах ТП і щита власних потреб ЩВП (рис. 2.6) когенераційної установки. Перевірити кабелі на термічну стійкість до дії струмів КЗ. Розрахувати мінімальні струми двофазного та однофазного КЗ на затискачах електроприймачів.

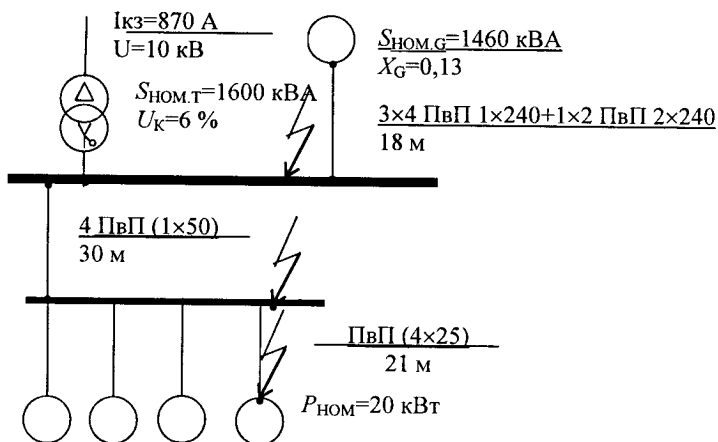


Рисунок 2.6 – Розрахункова схема мережі

Розв'язування. Опір системи: $X_c = \frac{400^2}{\sqrt{3} \cdot 870 \cdot 10,0 \cdot 10^3} = 10,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$

Силовий трансформатор ТМГ-1600/10/0,4 кВ: $u_k = 6\%$, $\Delta P_{кз} = 16,5 \text{ кВт.}$
Активна та реактивна складові напруги короткого замикання трансформатора

$$u_{ка} = \frac{\Delta P_{кз}}{S_{НОМ.Т}} \cdot 100 = \frac{16,5}{1600} \cdot 100 = 1,03\% ;$$

$$u_{кр} = \sqrt{u_k^2 - u_{ка}^2} = \sqrt{6^2 - 1,03^2} = 5,91\%.$$

Активний та індуктивний опори трансформатора:

$$R_{1Т} = \frac{u_{ка}}{100} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ.Т}} = \frac{1,03}{100} \cdot \frac{400^2}{1600 \cdot 10^3} = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ Ом;}$$

$$X_{1Т} = \frac{u_{кр}}{100} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ.Т}} = \frac{5,91}{100} \cdot \frac{400^2}{1600 \cdot 10^3} = 5,91 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Опори трансформатора згідно з ДСТУ 60909-2007 коректуються з використанням коефіцієнта

$$K_T = \frac{0,95 \cdot c}{1 + X_{1Т} \frac{S_{Т.НОМ}}{(U_{НОМ})^2}} = \frac{0,95 \cdot 1,05}{1 + 5,91 \frac{1600}{(400)^2}} = 0,963.$$

Параметри заступної схеми прямої послідовності від системи

$$R_{1\Sigma} = 1,03 \cdot 0,963 = 0,99 \text{ мОм; } X_{1\Sigma} = 10,6 + 5,91 \cdot 0,963 = 16,3 \text{ мОм.}$$

Максимальний струм трифазного КЗ на шинах ТП від системи

$$I''_{\max} = \frac{1,05 \cdot U_H}{\sqrt{3} \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{0,99^2 + 16,3^2}} = 14,2 \text{ кА.}$$

Опори генератора:

$$X_{1Г} = \frac{x_G}{100} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ.Г}} = \frac{13}{100} \cdot \frac{400^2}{960 \cdot 10^3} = 21,7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом;}$$

$$X''_{1Г} = 0,15 \cdot X_{1Г} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Опори генератора відповідно до ДСТУ 60909-2007 коректуються з використанням коефіцієнта

$$K_G = \frac{U_{НОМ}}{U_{НОМ.Г}} \cdot \frac{c}{1 + \sin \varphi \cdot X_{1Г} \frac{S_{Г.НОМ}}{(U_{НОМ})^2}} = \frac{0,95 \cdot 1,05}{1 + 0,45 \cdot 21,7 \frac{960}{(400)^2}} = 0,942.$$

Опори лінії, що з'єднує генератор з шинами 0,4 кВ трансформатора:

$$R_{Л2} = \frac{l}{s \cdot \gamma} = \frac{18}{4 \cdot 240 \cdot 54} = 0,43 \cdot 10^{-3} \text{ Ом;}$$

$$X_{Л2} = \frac{x_{\text{ПІТ}} \cdot l}{1000} = \frac{0,078 \cdot 18}{4 \cdot 1000} = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Параметри заступної схеми прямої послідовності від генератора

$$R_{1\Sigma} = 3,3 \cdot 0,942 + 0,43 = 3,5 \text{ мОм}; \quad X_{1\Sigma} = 21,7 \cdot 0,942 + 0,35 = 20,8 \text{ мОм.}$$

Максимальний струм трифазного КЗ на шинях ТП від генератора

$$I''_{\text{max}} = \frac{1,05 \cdot U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{3,5^2 + 20,8^2}} = 10,9 \text{ кА.}$$

Струм трифазного КЗ на шинях ЩВП 0,4 кВ буде додатково обмежуватись опорами лінії ЛЗ:

$$R_{Л3} = \frac{l}{s \cdot \gamma} = \frac{30}{50 \cdot 54} = 13,9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

$$X_{Л3} = \frac{x_{\text{ПІТ}} \cdot l}{1000} = \frac{0,078 \cdot 30}{1000} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Максимальний струм трифазного КЗ на ЩВП

$$I''_{\text{max.c}} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(0,99 + 13,9)^2 + (16,3 + 2,3)^2}} = 9,7 \text{ кА};$$

$$I''_{\text{max.г}} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(3,5 + 13,9)^2 + (20,8 + 2,3)^2}} = 8,0 \text{ кА.}$$

З умови термічної стійкості переріз жил кабелів, що відходять від ТП і ЩВП, відповідно будуть:

$$s \geq s_{\text{min}} = \frac{I_{\text{к.мак}}^{(3)} \sqrt{t_{\text{вим}}}}{C_{\text{T}}} \cdot 1000 = \frac{(14,2 + 10,9) \sqrt{0,13}}{143} \cdot 1000 = 63 \text{ мм}^2;$$

$$s \geq s_{\text{min}} = \frac{I_{\text{к.мак}}^{(3)} \sqrt{t_{\text{вим}}}}{C_{\text{T}}} \cdot 1000 = \frac{(9,7 + 8,0) \sqrt{0,13}}{143} \cdot 1000 = 21 \text{ мм}^2.$$

Для перевірки чутливості автоматичних вимикачів ЩВП розрахуємо мінімальні струми двофазного та однофазного КЗ в кінці кожної лінії (чутливість визначають за меншим з цих значень).

Мінімальний струм двофазного КЗ від системи в кінці лінії Л4, що виконана кабелями 4 ПвП 1×25, довжиною 21м:

$$I''_{\text{min 2.c}} = \frac{360}{2 \sqrt{(0,99 + 13,9 + 19,4)^2 + (16,3 + 2,3 + 1,8)^2}} = 4,5 \text{ кА.}$$

Струм однофазного КЗ з урахуванням опорів нульової послідовності ліній ЛЗ та Л4 ($R_{Л0} = 55,5 + 51,4 = 106,9 \text{ мОм}$, $X_{Л0} = 9,6 + 19,9 = 29,5 \text{ мОм}$):

$$I''_{\text{min 1.c}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 360}{\sqrt{(3 \cdot 0,99 + 2 \cdot 33,3 + 106,9)^2 + (3 \cdot 16,3 + 2 \cdot 4,1 + 29,5)^2}} = 3,2 \text{ кА.}$$

Урахування перехідного опору. Під час розрахунку мінімального струму КЗ в заступну схему вводять перехідний активний опір [11]

$$I_{\text{кР}}^{(3)} = \frac{0,95 \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \sqrt{(R_{\Sigma} + R_{\text{пер}})^2 + X_{\Sigma}^2}}$$

Розрахунок струму однофазного КЗ може бути виконаний за спрощеною формулою

$$I_{\text{кР}}^{(1)} = \frac{0,95 \cdot U_{\text{ф.ном}}}{\frac{Z_{\Sigma}^{(1)}}{3} + Z_{\text{ф-н}} \cdot l}$$

де $Z_{\Sigma}^{(1)} = \sqrt{(2R_{\text{T}} + R_{0\text{T}} + 3R_{\text{пер}})^2 + (2X_{\text{T}} + X_{0\text{T}})^2}$ – повний опір струмам однофазного КЗ з урахуванням перехідного опору в точці КЗ.

Перехідний опір містить опори контактів, котушок і струмообмежувальної дії дуги в місці пошкодження. Найскладнішою задачею є визначення опору дуги. Наближено опір дуги можна визначити за формулою

$$R_{\text{д}} \approx E_{\text{д}} l_{\text{д}} / I_{\text{п0}},$$

де $E_{\text{д}} \approx 1,5$ В/мм – напруженість електричного поля в дузі; $l_{\text{д}}$ – довжина дуги, яка приблизно дорівнює подвоєній відстані a між фазами в місці КЗ. Однак така формула недостатньо точна $l_{\text{д}} \approx a \dots 4a$.

Згідно з ГОСТ 28249–93 [12] опір дуги рекомендовано визначати ітераційним методом за формулою

$$R_{\text{д}} \approx \frac{16 \sqrt{l_{\text{д}}}}{I_{\text{п0д}}^{0,85}} \text{ МОм,}$$

де $I_{\text{п0д}}$ – початкове діюче значення періодичної складової струму в місці КЗ, кА, яке визначають з урахуванням опору дуги; $l_{\text{д}}$ – довжина дуги в см, яку визначають залежно від відстані a :

$$l_{\text{д}} = \begin{cases} a, & \text{якщо } a \geq 50 \text{ мм;} \\ 20,4 \ln \frac{a}{2} e^{-0,15 R_{1\Sigma} / X_{1\Sigma}}, & \text{якщо } a = 5 \dots 50 \text{ мм;} \\ 4a, & \text{якщо } a \leq 5 \text{ мм.} \end{cases}$$

Розрахунок опору дуги виконується ітераційно з одночасним визначенням надперехідного значення струму КЗ.

В табл. 2.4 наведено рекомендовані ГОСТ 28249–93 [12] значення відстаней між фазами залежно від місця виникнення КЗ.

Наближені значення опору дуги в характерних точках наведено в табл. 2.5 [12].

Таблиця 2.4 – Відстань між фазами в місці виникнення КЗ [12]

Місце виникнення КЗ		а, мм
Трансформатор потужністю 1600 кВ·А		120
1000 кВ·А		70
630 кВ·А		60
400 кВ·А		60
Кабелі з перерізом жил	240 мм ²	4,8
	120...150 мм ²	4,0
	50...95 мм ²	2,8
	16...35 мм ²	2,4
	2,5...10 мм ²	1,6

Таблиця 2.5 – Наближені значення опору дуги

Розрахункові умови КЗ	Активний опір дуги (R_d), мОм, під час КЗ за трансформаторами потужністю, кВ·А					
	250	400	630	1000	1600	2500
КЗ поблизу виводів низької напруги трансформатора:						
- в розробці кабелів 0,4 кВ	15	10	7	5	4	3
- в шинопроводі типу ШМА	-	-	-	6	4	3
КЗ в кінці шинопроводу типу ШМА довжиною 100...150 м	-	-	-	6-8	5-7	4-6

Приклад 2.6. Для схеми (рис. 2.3) визначити мінімальне значення струму двофазного та однофазного КЗ з урахуванням опору дуги в кінці кабельної лінії (точка К-2). Трансформатор Т: $S_{T,ном} = 1000$ кВ·А. Кабельна лінія АВВГ 4×70, $l = 50$ м.

Розв'язування. Під час визначення мінімального значення струму слід урахувати вплив електричної дуги:

$$R_{1\Sigma} + R_d = 35,6 + 9 = 44,6 \text{ мОм,}$$

де $R_d = 9$ мОм – опір дуги, визначений ітераційним методом за формулами:

$$R_d \approx \frac{16 \sqrt{I_d}}{I_{KR}^{(3)0,85}}; \quad I_{KR}^{(3)} = \frac{0,95 \cdot U_{ном}}{\sqrt{3} \sqrt{(R_{1\Sigma} + R_d)^2 + X_{1\Sigma}^2}}$$

Струм двофазного дугового КЗ в кінці кабельної лінії

$$I_{KR}^{(2)} = \frac{0,95 \cdot 400}{2 \sqrt{44,6^2 + 11,5^2}} = 4,1 \text{ кА.}$$

Струм однофазного дугового КЗ в кінці кабельної лінії

$$I_{кR}^{(1)} = \frac{0,95 \cdot U_{ф.ном}}{\frac{Z_{\Sigma}^{(1)}}{3} + Z_{ф-н} \cdot l} = \frac{0,95 \cdot 220}{\frac{26,4 + 3 \cdot 9}{3} + 1,06 \cdot 50} = 2,95 \text{ кА.}$$

де $Z_T^{(1)} = 26,4 \text{ МОм}$ – для трансформатора 1000 кВ·А (див. табл. В.1),
 $Z_{ф-н} = 1,06 \text{ МОм/м}$ – для кабельної лінії АВВГ 4×70 (див. табл. В.3).

2.4 Вибір комутаційно-захисної апаратури

Умови вибору захисних апаратів. Найпростішими захисними апаратами є запобіжники. Вибір вставок запобіжників здійснюють за умовами:

$$I_{н.вст} \geq k_{відс} I_p, \quad I_{н.вст} \geq \frac{I_n}{k_{пер}},$$

де $I_{н.вст}$ – номінальний струм вставки запобіжника; $k_{відс}$ – коефіцієнт відстроювання ($k_{відс} = 1,1 \dots 1,25$); $k_{пер}$ – коефіцієнт перевантаження ($k_{пер}$ беруть: 2,5 – для ЕД з легкими пусками; 1,6...2,0 – для ЕД з важкими і частими пусками; 1,6 – для відповідальних механізмів; 0,8...1,0 – для ЕД з фазним ротором [13]).

Більш досконалими комутаційно-захисними апаратами є автоматичні вимикачі. Вибір автоматичних вимикачів здійснюють за умовами

$$I_{н.в} > I_p; \quad I_{н.р} \geq I_p,$$

де $I_{н.в}$, $I_{н.р}$ – номінальний струм вимикача і розчіплювача.

Обов'язковою є перевірка вибраних захисних апаратів за умовою комутаційної здатності

$$I_{н.вимк.} \geq I_{к.мах}^{(3)},$$

де $I_{н.вимк.}$ – номінальний струм вимкнення КЗ;

$I_{к.мах}^{(3)}$ – найбільший струм трифазного КЗ.

Уставка спрацювання захисту від перевантаження теплового та напівпровідникового розчіплювачів

$$I_{с.п} \geq I_p.$$

Струмова відсічка автоматичного вимикача повинна бути відстроєна від пікового (пускового) струму:

$$I_{с.в} \geq k_n I_p,$$

де k_n – коефіцієнт надійності відстроювання струмової відсічки (береться 2,1 – для електромагнітного розчіплювача, 1,5 – для напівпровідникового розчіплювача).

Перевірка захищеності ліній від перевантажень здійснюється згідно з вимогами ПУЕ. Захисту від перевантажень потребують [5]:

а) мережі всередині приміщень, що виконані прокладеними відкрито провідниками з горючою зовнішньою оболонкою або ізоляцією;

б) освітлювальні мережі в житлових і громадських будівлях, у торговельних приміщеннях, а також службово-побутових приміщеннях промислових підприємств, включно з мережами для побутових і переносних електроприймачів, а також мережами в пожежонебезпечних зонах;

в) силові мережі на промислових підприємствах, у житлових і громадських будівлях, торговельних приміщеннях – тільки в разі, якщо за умовами технологічного процесу або за режимом роботи мережі може виникати тривале перевантаження провідників;

4) мережі всіх видів у вибухонебезпечних зонах (крім В-1, б; В-1, г).

У решті випадків мережі захищають тільки від КЗ.

Під час вибору провідників мереж, які потребують захисту від перевантажень, мають виконуватися умови забезпечення захищеності ліній (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Умови забезпечення захищеності провідників від перевантажень

Захисний апарат	Мережі, що потребують захисту від перевантажень		Мережі, що не потребують захисту від перевантажень (з умови чутливості захисту від КЗ)
	з горючою ізоляцією (полі-вінілхлоридна, ПЕ, гумова)	з негорючою ізоляцією (паперова, зшитий ПЕ)	
Запобіжник	$I_{доп} \geq 1,25 I_{н.вст}$	$I_{доп} \geq I_{н.вст}$	$I_{доп} \geq I_{н.вст}/3$
Вимикачі з комбінованим розчіплювачем	$I_{доп} \geq I_{н.р}$	$I_{доп} \geq I_{н.р}$	$I_{доп} \geq I_{н.р}$
Вимикачі з напівпровідниковим розчіплювачем	$I_{доп} \geq I_{с.п}$	$I_{доп} \geq 0,8 I_{с.п}$	$I_{доп} \geq 0,8 I_{с.п}$
Вимикачі лише з електромагнітним розчіплювачем	$I_{доп} \geq 1,25 I_{с.ем}$	$I_{доп} \geq I_{с.ем}$	$I_{доп} \geq I_{с.ем}/4,5$

Стандарт ІЕС 60364-4-43 регламентує координацію між провідниками та пристроями захисту від перевантаження, яка полягає в забезпеченні умов:

$$I_p \leq I_{с.п} \leq I_{доп}; I_{сп} \leq 1,45 \cdot I_{доп},$$

де $I_{\text{спр}}$ – струм спрацювання, що забезпечує ефективну роботу захисного пристрою за певний час.

Перевірка другої умови не є необхідною у випадку застосування автоматичних вимикачів, оскільки розчіплювач захисту спрацьовує автоматично, адже:

- $I_{\text{спр}} = 1,3 \cdot I_{\text{с.п}}$ для автоматичних вимикачів, що відповідають стандарту ІЕС 60947-2 (автоматичні вимикачі промислового призначення);

- $I_{\text{спр}} = 1,45 \cdot I_{\text{с.п}}$ для автоматичних вимикачів, що відповідають стандарту ІЕС 60898 (модульні автоматичні вимикачі для установок побутового та аналогічного призначення).

Таким чином, для автоматичних вимикачів, якщо $I_{\text{с.п}} \leq I_{\text{доп}}$, формула $I_{\text{спр}} \leq 1,45 \cdot I_{\text{доп}}$ буде теж справедливою.

Перевірка чутливості захисту. В табл. 2.7 наведено умови перевірки чутливості запобіжників і автоматичних вимикачів згідно з ПУЕ-86. Для мереж, які повинні бути захищеними тільки від КЗ, допускається спрощення умов перевірки чутливості (див. табл. 2.6).

Таблиця 2.7 – Умови перевірки чутливості захисних апаратів до дії струмів КЗ згідно з ПУЕ-86

Захисний апарат	Нормальні приміщення	Вибухонебезпечні приміщення
Запобіжник	$I_{\text{н.вст}} \leq \frac{I_{\text{к.мін}}}{3}$	$I_{\text{н.вст}} \leq \frac{I_{\text{к.мін}}}{4}$
Автоматичні вимикачі з тепловим або напівпровідниковим розчіплювачами	$I_{\text{н.р}} \leq \frac{I_{\text{к.мін}}}{3}$	$I_{\text{н.р}} \leq \frac{I_{\text{к.мін}}}{6}$

Оскільки в [5] перевірка чутливості захисту не нормується, то її доцільно здійснювати як для резервного захисту за умовою

$$k_{\text{ч}} = I_{\text{к.мін}} / I_{\text{с.в}} > 1,25 \dots 1,4,$$

де $k_{\text{ч}}$ – коефіцієнт чутливості; $I_{\text{к.мін}}$ – мінімальний струм одно- або двофазного КЗ в кінці захищеної лінії.

Типи автоматичних вимикачів. Автоматичні вимикачі серії А3700 виробництва «Контактор» випускались чотирьох величин на струми: 160 А (А3710), 250 А (А3720), 400 А (А3730), 630 А (А3740), з електромагнітним, комбінованим та напівпровідниковим розчіплювачами (остання цифра маркування відповідно 2, 6 та 4). Вимикачі випускались неселективними без струмообмеження (А3700Ф), струмообмежувальними (А3700Б) та

селективними (А3734С, А3744С). Випускаються вимикачі А3793Б, А3794Б, а також А3793С, А3794С на струм 250 і 400 та 630 А.

Більш сучасна серія ВА50 складається з ВА51, ВА52 (з комбінованим розчіплювачем), ВА53, ВА54 (з напівпровідниковим розчіплювачем неселективні), ВА55, ВА56 (селективні). Їх недоліком є недостатня диференціація за номінальними струмами та функціями захисту.

Нині широко застосовують автоматичні вимикачі провідних європейських виробників. Наприклад, розподільні шафи низької напруги виробництва Укрелектроапарат можуть комплектуватися автоматичними вимикачами: АBB SACE, Schneider Electric, Siemens та іншими.

Автоматичні вимикачі Tmax XT компанії АBB SACE (Італія) випускаються таких типів [14]: вимикачі XT1 ($I_{н.в.}=160$ А) та XT3 ($I_{н.в.}=250$ А) з термомагнітним розчіплювачем; багатофункціональні вимикачі XT2 ($I_{н.в.}=160$ А) та XT4 ($I_{н.в.}=250$ А) з термомагнітним або електронним розчіплювачем. Номінальна вимикальна здатність вимикачів наведена в табл. Г.1.

В вимикачах Tmax XT використано (табл. 2.8):

- термомагнітні розчіплювачі TMD або TMA з регульованим тепловим і відповідно з фіксованим або регульованим електромагнітним порогами спрацювання;

- термомагнітний розчіплювач для захисту генераторів TMG з регульованим тепловим і фіксованим низьким магнітним порогом захисту;

- електромагнітний розчіплювач для захисту двигунів з фіксованою MF або регульованою MA уставкою;

- електронний розчіплювач Ekip LS/I (LSI) із захистом від перевантаження «L» та від КЗ з витримкою спрацювання «S» або (та) з миттєвим спрацюванням «I».

- електронний розчіплювач захисту електродвигунів Ekip M-LRIU;

- електронний розчіплювач захисту нейтралі Ekip N-LS/I.

Таблиця 2.8 – Розчіплювачі автоматичних вимикачів Tmax XT

Розчіплювачі	XT1 160	XT2 160	XT3 250	XT4 250
TMD	16...160		63...250	
TMD/TMA		1.6...160		16...250
TMG		16...160	63...250	
MF/MA		1...100 ⁽¹⁾	10...200 ⁽¹⁾	10...200 ⁽¹⁾
Ekip (I, LS/I, LSI, LSIG)		10...160		40...250
Ekip G-LSI		12...160		40...250
Ekip M-LIU і M-LRIU		15...100 ⁽¹⁾		40...160 ⁽¹⁾
Ekip N-LS/I		10...100 ⁽²⁾		40...160 ⁽²⁾

Примітка. ⁽¹⁾ – лише триполюсне виконання; ⁽²⁾ – лише чотириполюсне виконання.

Термомагнітні розчіплювачі TMD, TMA забезпечують:

- захист від перевантаження (L): поріг захисту від $I_{c.n}=0,7...1 \times I_{н.р}$;
- захист від КЗ з миттєвим спрацюванням (I) $I_{c.ем}=10 \times I_{н.р}$ (для TMD), $I_{c.ем}=10 \times I_{н.р}$ для $I_{н.р} < 32$ А, $I_{c.ем}=8...10 \times I_{н.р}$ для 40, 50 А, $I_{c.ем}=5...10 \times I_{н.р}$ для $I_{н.р} \geq 63$ А (для TMA);
- захист від замикання на землю (G) в чотириполюсних автоматичних вимикачах 100% від уставки захисту фаз; 50% – для $I_{н.р} \geq 125$ А.

Термомагнітні розчіплювачі для захисту генераторів TMG з регульованим тепловим ($I_{c.n}=0,7...1 \times I_{н.р}$) і фіксованим електромагнітним ($I_{c.ем}=3 \times I_{н.р}$) порогами спрацювання використовують в автоматах ТЗ.

Електромагнітні розчіплювачі MF та MA використовуються для захисту електродвигунів в поєднанні з тепловим реле контактора. Вони забезпечують захист від КЗ з миттєвим спрацюванням (I):

- в ХТ2: поріг захисту фіксований $I_{c.ем}=14 I_{н.р}$ для $I_{н.р} \leq 12,5$ А, поріг захисту регулюється в діапазоні $I_{c.ем}=6...14 I_{н.р}$ для $I_{н.р} > 12,5$ А;
- в ХТ3: поріг захисту регулюється в діапазоні $I_{c.ем}=6...12 I_{н.р}$;
- в ХТ4: поріг захисту регулюється в діапазоні $I_{c.ем}=5...10 I_{н.р}$.

Електронний розчіплювач Екір І для вимикачів ХТ2 і ХТ4 в три- і чотириполюсному виконанні забезпечує захист від КЗ з миттєвим спрацюванням (I): регульований поріг захисту $I_{c.в}=1...10 \times I_{н.р}$.

Розчіплювачі Екір LS/I (табл. Г.3) забезпечують захист:

- від перевантаження (L) $I_{c.n}=0,4...1 \times I_{н.р}$ з регулюванням часу спрацювання (крок 0,04);
- від КЗ з регульованим порогом $I_{c.в}=1...10 \times I_{н.р}$, (всього 15 значень) з селективною витримкою часу спрацювання (S): або з миттєвим спрацюванням (I).

Розчіплювачі Екір LSI і Екір LSIГ (табл. Г.4) забезпечують ті ж захисти з можливістю ручного та електронного налаштування, а також

- захист від замикання на землю (G): регульований поріг захисту від $0,2...1 \times I_{н.р}$, крива спрацювання з нерегульованим часом спрацювання.

Розчіплювачі Екір забезпечують захист нейтралі в чотириполюсних автоматичних вимикачах: для $I_{н.р} < 100$ А – 100% від уставки захисту фаз, а для $I_{н.р} \geq 100$ А можливий вибір 50 або 100% від уставки захисту фаз.

Розчіплювачі Екір M-LIU (доступні для ХТ2 і ХТ4 в триполюсному виконанні) призначені для захисту електродвигунів (табл. Г.5):

- від перевантаження (L): регульований поріг $I_{c.n}=0,4...1 \times I_{н.р}$; час спрацювання устанавлюється шляхом вибору класу спрацювання, визначеного в стандарті IEC 60947-4-1: клас 3E, 5E, 10E, 20E, що

відповідає часу розмикання в діапазоні відповідно 2...3, 3...5, 5...10, 10...20 с залежно від тривалості пуску двигунів;

– від КЗ (I): регульований поріг $I_{c.v}=6...13 \times I_{н.р}$;

– від перекосу фаз (U): 50% або 100% від $I_{c.п}$.

Розчіплювачі Екір М-LRIU, крім того, призначені для захисту електродвигунів від заклинювання ротора (R): уставка спрацювання вибирається $3...9 \times I_{c.п}$.

Автоматичні вимикачі Tmax. Серія автоматичних вимикачів Tmax (компанії ABB SACE) має сім основних типорозмірів: T1, T2, T3 (аналоги Tmax XT), T4, T5, T6 і T7 на струми, відповідно, 320, 630, 1000 і 1600 А [15]. Номінальна вимикальна здатність вимикачів наведена в табл. Г.6.

Автоматичні вимикачі Tmax оснащені (табл. 2.9):

– термомагнітними розчіплювачами TMD або TMA;

– термомагнітними розчіплювачами для захисту генераторів TMG;

– електронними розчіплювачами PR221DS (T2), PR222DS/P та /PD, PR223DS (T4, T5, T6); PR231/P, PR232/P, PR331/P і PR332/P (T7).

Таблиця 2.9 – Комплектування автоматичних вимикачів Tmax розчіплювачами

Розчіплювачі автоматичних вимикачів	T4	T5	T6	T7
TMD	20...320	320...630	630...1000	200...1600
TMA	20...50			
TMG	+	+	+	
PR221DS		+		
PR222DS, PR223DS	+	+	+	
PR231/P, PR232/P, PR331/P, PR332/P				+

Термомагнітні розчіплювачі TMD або TMA оснащені регульованим тепловим ($I_{c.п}=0,7...1 \times I_{н.р}$) і відповідно з фіксованим ($I_{c.ем}=10 \times I_{н.р}$) або регульованим ($I_{c.ем}=5...10 \times I_{н.р}$) електромагнітними порогами спрацювання;

Термомагнітні розчіплювачі для захисту генераторів TMG оснащені регульованим тепловим ($I_{c.п}=0,7...1 \times I_{н.р}$) і фіксованим ($I_{c.ем}=3 \times I_{н.р}$) в автоматах T3 та регульованим електромагнітним ($I_{c.ем}=2,5...5 \times I_{н.р}$) порогом спрацювання – в автоматах T5.

Чотириполюсні автоматичні вимикачі, які застосовують для захисту напівпровідникових пристроїв, завжди постачаються з розчіплювачем, в якому уставка захисту нейтралі дорівнює 100% від уставки захисту фаз за струмів до 100 А. Для більших струмів існують виконання з уставкою захисту нейтралі, що дорівнює 50% від уставки захисту фаз.

Електронний розчіплювач PR221DS (табл. Г.7) забезпечує ті ж функції захисту, що і розчіплювач Ekip LS/I: від перевантаження (L): $I_{c.n}=0,4...1 \times I_{н.р}$ (крок 0,04) і КЗ (S/I або лише I): $I_{c.в}=1...10 \times I_{н.р}$.

Електронний розчіплювач PR222DS/P (табл. Г.8) має функції захисту L, який може виставлятися в діапазоні $I_{c.n}=0,4...1 \times I_{н.р}$. Існує можливість вибору чотирьох різних кривих спрацювання (для $6 \times I_{c.n}$): $t=3$ с, $t=6$ с, $t=9$ с, $t=12$ с або $t=18$ с. Час спрацювання можна установити за допомогою електронного блока SACE PR010T в діапазоні 3...18 с (з кроком 0,5 с).

Функція селективного захисту від КЗ (S) $I_{c.в}=0,6...10 I_{н.р}$ (всього 15 уставок) з обернено залежною ($I^2 t = \text{const}$) або з незалежною ($t = \text{const}$) характеристиками може виставлятися вручну з вибором однієї з чотирьох кривих спрацювання: $t=0,05$ с, $t=0,1$ с, $t=0,25$ с і $t=0,5$ с (для $8 \times I_{н.р}$), а також за допомогою електронного блока у тому ж діапазоні (з кроком 0,1) з вибором часу спрацювання 0,05...0,5 с (з кроком 0,01 с).

Функція миттєвого захисту від КЗ (I) $I_{c.в}=1,5...12 \times I_{н.р}$ може виставлятися вручну (всього 15 уставок), а також за допомогою електронного блока у тому ж діапазоні з кроком $0,1 \times I_{н.р}$.

Функція захисту від замикання на землю G $I_{c.з}=0,2...1 \times I_{н.р}$ може виставлятися вручну (7 уставок) або електронним способом з кроком $0,01 \times I_{н.р}$. Також існує можливість вибирати одну з чотирьох кривих або установити час спрацювання електронним способом в діапазоні 0,1...0,8 с.

На передній панелі розчіплювачів передбачено передаварійну та аварійну сигналізацію для захисту L. Значення передаварійної уставки (яке не може бути вимкнено або змінено користувачем) дорівнює $0,9 I_{c.n}$. Також можливо передавати аварійний сигнал захисту L дистанційно.

Електронний розчіплювач PR222DS/PD для T4 і T5 також має улаштований діалоговий блок для підключення до мережі за протоколом Modbus® RTU.

Розчіплювач PR331/P для автоматичного вимикача Tmax T7 у виконанні PR331/P-LSIG має повний діапазон функцій захисту і широкий вибір порогів і витримок часу спрацювання. Крім того, PR331/P можна приєднати до зовнішніх пристроїв.

Розчіплювач PR332/P для Tmax T7 (постачається в чотирьох виконаннях: PR332/P-LI, PR332/PLSI, PR332/P-LSIG і PR332/P-LSIRc) виконаний на базі сучасного мікропроцесора з технологією цифрової обробки сигналів DSP.

У разі оснащення внутрішнім діалоговим блоком PR330/D-M, розчіплювач PR332/P стає інтелектуальним пристроєм захисту на основі протоколу Modbus® RTU. За допомогою блока PR330/D-M розчіплювач PR332/P може приєднуватися до адаптера EP010 Fieldbus, що дозволяє використовувати мережі Profibus і DeviceNet.

Автоматичні вимикачі Emax (E1...E6) компанії ABB SACE випускаються на номінальні струми $I_{н.р}=400, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3200, 4000, 5000, 6300$ А.

Розчіплювачі PR121, PR122, PR123 виконують такі функції [16]: захист від перевантаження (L); селективний захист від КЗ (S); миттєвий захист від КЗ (I); захист від замикання на землю (G). Захист від перевантаження L з регулюванням порогового значення в діапазоні: $I_{с.п}=0,4...1,0 \times I_{н.р}$ з обернено залежною витримкою часу спрацювання $I^2 t = k$; існує 25 порогових значень за струмом і 8 кривих для вибору часу спрацювання $t_{с.п}=3-12-24-36-48-72-108-144$ с (для $3 \times I_{с.п}$).

Селективний захист від КЗ (S) з регулюванням в діапазоні: $I_{с.в}=1...10 \times I_{н.р}$ і $t_{с.в}=0,1...0,8$ с. Функція селективного захисту від КЗ (S) може бути визначена двома різними типами кривих: з незалежним від струму часом спрацювання ($t=k$) або з постійною питомою енергією ($t=k/I^2$). Існує 15 порогових значень за струмом і 8 кривих для вибору часу спрацювання.

Регульований миттєвий захист від КЗ (I) в діапазоні: $I_{с.в}=1,5...15 \times I_{н.р}$ (15 порогових значень спрацювання).

Захист від замикання на землю (G) з регулюванням порогового значення в діапазоні: $I_{с.з}=0,2...1,0 \times I_{н.р}$ (7 порогових значень) з $t_{с.з}=0,2-0,4-0,6-0,8$ с (4 кривих для вибору часу спрацювання). Час спрацювання можна вибирати незалежно від струму ($t=k$) або з постійним значенням питомої енергії ($t=k/I^2$).

Уставки функції захисту нейтралі можна задати 50%, 100% або 200% від уставки захисту фаз.

Автоматичні вимикачі Compact NS торгової марки Merlin Gerin компанії «Schneider Electric» охоплюють діапазон струмів до 80 А, від 100 до 630 А, від 630 до 1600 А [17].

Триполюсні автоматичні вимикачі Compact NS 80H-MA з улаштованим електромагнітним розчіплювачем MA зі струмами 1,5/2,5/6,3/25/50/80 А застосовують для захисту електродвигунів потужністю до 37 кВт від КЗ. Номінальна робоча напруга до 690 В. Гранична вимикальна здатність 70 кА (380/415 В). Диференційний захист реалізовано за допомогою реле Vigirex.

Автоматичні вимикачі Compact NS100 – NS250 модифікацій N, H та L можуть бути оснащені термомагнітним розчіплювачем TM або електронним розчіплювачем STR22. Номінальний струм розчіплювачів TM16D – TM250D $I_{н.р}$ становить: 16, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250 А. Уставка теплового розчіплювача $I_{с.п}$ регулюється в межах $0,8 \div 1 I_{н.р}$. Уставки електромагнітного розчіплювача $I_{с.ем}$ наведені в табли-

ці Г.9. В чотириполюсних вимикачах уставки захисту нейтралі можна задати рівними 0 (незахищена нейтраль), 50% та 100% від уставки захисту фаз.

Номінальний струм розчіплювачів STR22SE: $I_{н.р}=40, 80, 100, 160, 250$ А. Захист від перевантаження: уставка $I_{с.п}=0,4...1 I_{н.р}$ регульована (48 поз.). Регулюється грубо $I_0 = 0,5...1 I_{н.р}$ з кроком 0,1 і точно $I_r = 0,8; 0,85; 0,88; 0,9; 0,93; 0,95; 0,98; 1 I_{н.р}$. Приклад налаштування уставки захисту від перевантаження вимикача Compact NS250 з розчіплювачем STR22SE 160 А для $I_0 = 0,5$ і $I_r = 0,8$: Уставка $I_{с.п}= 160 \times 0,5 \times 0,8 = 64$ А.

Захист від КЗ. Селективна струмова відсічка: $I_{с.в}=2...10 I_{н.р}$ (8 поз), уставка часу постійна. Миттєва струмова відсічка: $I_{с.в} \geq 11 I_{н.р}$.

Захист 4-го полюса: без захисту; $I_{с.п}/2$; $I_{с.п}$. Спеціальний захист OSN для чотириполюсних вимикачів призначений для мереж з високим вмістом третьої гармоніки.

Автоматичні вимикачі Compact NS400 – NS630 модифікацій N, H, L в три- або чотириполюсному виконанні оснащені електронними розчіплювачами STR23SE, STR23SV, STR53UE і STR53SV. Номінальний струм розчіплювачів $I_{н.р} = 150 250 400 630$ (А). Характеристики розчіплювачів STR23SE, STR23SV (табл. Г. 10) аналогічні розчіплювачам STR22SE.

Розчіплювачі STR53UE і STR53SV (табл. Г.11) забезпечують захист від перевантажень: $I_{с.п}= 0,4...1 I_{н.р}$ рег. (48 поз.), час спрацювання залежить від $I_{н.р}$; захист від КЗ (селективна струмова відсічка): $I_{с.в}=1,5...10 I_{с.п}$ (8 поз.), уставка часу постійна регульована (4 поз.: 0; 0,1; 0,2; 0,3 с) і додаткова функція « $I^2 t = \text{const}$ »; захист від КЗ (миттєва струмова відсічка), уставка за струмом $I_{с.в}= 1,5...11 I_{н.р}$ постійна регульована (8 поз.), захист 4-го полюса: 4P 3d – без захисту; 4P 3d + N/2 - $I_{с.п}/2$; 4P 4d - $I_{с.п}$.

Додаткові функції електронного розчіплювача STR53UE: захист від замикань на землю, уставка за струмом $I_{с.з} = 0,2...1 I_{н.р}$ (8 поз.), уставка за часом функції « $I^2 t = \text{const}$ » (4 поз.), максимальна витримка 60, 140, 230, 350 мс, повний час вимкнення не більше 140, 230, 350, 500 мс.

Вимірювання, що здійснюються функцією «Амперметр». Цифровий індикатор постійно видає інформацію про найбільш завантажену фазу і дозволяє вивести на екран значення струмів в інших фазах, а також значення струму в нейтралі (I1, I2, I3, IN). Індикація амперметра забезпечується за мінімального струму, більшого $0,2 I_{н.р}$ (за менших струмів індикація відсутня), та максимального струму, меншого за $10 I_{н.р}$.

Передбачена можливість забезпечення зонної селективності послідовно розташованих апаратів шляхом їх з'єднання контрольним проводом.

Автоматичні вимикачі Compact NS630b–1600 (табл. 2.10) оснащені блоками захисту, контролю та керування Micrologic.

Таблиця 2.10 – Номінальні струми автоматичних вимикачів Compact NS630b – 1600 та їх розчіплювачів

$I_{н.в}$ (А)	630	800	1000	1250	1600
$I_{н.р}$ (А)	250-630	320-800	400-1000	500-1250	630-1600

Автоматичні вимикачі Masterpact NT і NW на струми від 630 до 6300 А випускаються під торговою маркою Merlin Gerin компанії «Schneider Electric» [18, 19].

Вимикачі Masterpact є двох типів: Masterpact NT та Masterpact NW: (табл. 2.11). Вони оснащені блоками захисту, контролю та керування Micrologic.

Таблиця 2.11 – Номінальні струми автоматичних вимикачів Masterpact NT і NW та їх розчіплювачів

$I_{н.в}$ (А)	250	400	630	800	1000	1250	1600
$I_{н.р}$ (А) Masterpact NT та Masterpact NW	100-250	160-400	250-630	320-800	400-1000	500-1250	630-1600
$I_{н.в}$ (А)	2000	2500	3200	4000	5000	6300	
$I_{н.р}$ (А) Masterpact NW	800-2000	1000-2500	1250-3200	1600-4000	2000-5000	2500-6300	

Вимикачі випускають таких модифікацій:

N1: автоматичний вимикач для стандартного застосування в мережах з невисоким рівнем розрахункових струмів короткого замикання;

N1: автоматичний вимикач для промислових об'єктів з підвищеним рівнем струмів;

N2: автоматичний вимикач с високою вимикальною здатністю;

N3: автоматичний вимикач для експлуатації в екстремальних умовах, де високий рівень вимикальної здатності повинен поєднуватися з високим порогом забезпечення селективності;

L1: струмообмежувальний автоматичний вимикач, який поєднує високу струмообмежувальну здатність з найвищим порогом селективності (до 37 кА) для апаратів цього типу.

На основі автоматичних вимикачів розроблені вимикачі навантаження декількох моделей: НА, NA і HF. Виконання HF має швидкодійний струмовий захист, що спрацьовує у разі увімкнення на КЗ. В увімкненому стані апарат не захищений і діє як класичний вимикач навантаження. Він часто використовується як секційний вимикач збірних шин.

Розчіплювачі Micrologic A. Захист від перевантаження спрацюває за ефективним значенням струму (стандартне виконання: $I_{c.p.}=0,4\dots 1\cdot I_{н.р.}$). Точність завдання уставок може бути підвищена у разі використання калібратора захисту від перевантаження з більш вузькою зоною регулювання: додаткове виконання: $I_{c.p.}=0,4\dots 0,8\cdot I_{н.р.}$ або $I_{c.p.}=0,8\dots 1\cdot I_{н.р.}$. Теплова пам'ять: до і після вимкнення (стала часу нагріву дорівнює сталій часу охолодження). Захист від перевантаження можна вивести з дії за допомогою спеціального калібратора «Off» («вимкнено»).

Захист від КЗ: селективна і миттєва струмова відсічки. Вибір характеристики I^2t (On – увімкнено або Off – вимкнено) в зоні селективної струмової відсічки.

Захист від замикань на землю поділяється на два типи: «Небаланс» або «Повернення струму через заземлювач». В останньому слід брати до уваги тип заземлювача нейтралі мережі. Вибір стану функції I^2t (увімкнено або вимкнено) в уставці часу (обернено залежної або незалежної витримки часу у разі досягнення уставки захисту за струмом).

Диференційний захист за струмом нульової послідовності (Vigi) характеризується струмом витоку на землю IDn (в амперах – до 30 А).

Захист нейтралі в триполюсних автоматичних вимикачах неможливий. В чотириполюсних вимикачах уставки захисту нейтралі можна задати такими, що дорівнюють 0 (незахищена нейтраль), 50%, 100% від уставки захисту фаз.

Вимірювання, що здійснюються завдяки функції «Амперметр», забезпечують постійне відображення діючих значень струмів відносно $I_{н.р.}$ від 0,2 до 2,0. На цифровому дисплеї відображається інформація про найбільш завантажену фазу (Imax) і можна вивести значення $I_{c.п.}$, $I_{c.в.}$ (S), $I_{c.в.}$ (I), (а також IN (струм в нейтралі), IG (небаланс струму замикання на землю), IDn (струм витоку на землю) та максимальні діючі значення цих струмів. За значень нижчих $0,05I_{н.р.}$ вимірювання не здійснюються.

Розчіплювач Micrologic 2.0 A. Захист від перевантаження $I_{c.p.}= 0,4;$ 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,95; 0,98; 1 $I_{н.р.}$. Вимкнення між 1,05 та 1,20 $I_{c.p.}$. Уставка часу спрацювання $t_{c.p.}=0,5, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24$ с. Період дії теплової пам'яті 20 хв до і після вимкнення.

Миттєва струмова відсічка $I_{c.в.}= 1,5, 2, 2,5, 3, 4, 5, 6, 8, 10 I_{c.p.}$. Час затримки: 20 мс. Максимальний час вимкнення: 80 мс.

Амперметр Micrologic 2.0 A забезпечує постійне вимірювання струмів I1 I2 I3 IN: 20 – 200 % $I_{н.р.}$. Точність: 1,5%. Живлення від силових кіл (для I > 20 % $I_{н.р.}$). Передбачено фіксування максимальних значень I1 I2 I3 IN.

Розчіплювачі Micrologic 5.0/6.0/7.0 А. Захист від перевантаження виконано як для захистів Micrologic 2.0 А.

Уставка струму миттєвої струмової відсічки (А): $I_{c.v} = 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 15, \text{Off}$ $I_{н.р.}$. Час затримки: 20 мс. Максимальний час вимкнення: 50 мс.

Уставка струму селективної струмової відсічки (А): $I_{c.v} = 1,5, 2, 2,5, 3, 4, 5, 6, 8, 10$ $I_{c.п.}$. Регульовані уставки часу $t_{c.v}$ (с): Off 0 0,1 0,2 0,3 0,4.

Захист від замикання на землю в Micrologic 6.0 А. Уставка струму (А) $I_{c.з} = I_{н.р} \times A B C D E F G H J$. Для $I_{н.р} = 400$ А: 0,3 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1; для $400 \text{ А} < I_{н.р} < 1250$ А: 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1; для $I_{н.р} > 1250$ А: 500 640 720 800 880 960 1040 1120 1200 А. Регулювання уставки часу $t_{c.з}$: Off 0 0,1 0,2 0,3 0,4 с.

Диференційний захист (Vigi) в Micrologic 7.0 А: чутливість (ампер первинних): $ID_n = 0,5 1 2 3 5 7 10 20 30$; уставка часу Δt : ступені регулювання 60, 140, 230, 350, 800 мс.

Налаштування захисту нейтралі в триполюсних автоматичних вимикачах можна задати нульовими (незахищена нейтраль), 50%, 100% або 160% від уставки захисту фаз. Захист нейтралі з завищеною уставкою застосовують, якщо переріз нейтралі в два рази більший від перерізу фаз (значна несиметрія навантаження, високий коефіцієнт третьої гармоніки).

В чотириполюсних вимикачах уставки захисту нейтралі можна задати нульовими (незахищена нейтраль), 50%, 100% від уставки захисту фаз.

Розчіплювачі Micrologic 5.0/6.0/7.0 Р. Захист від перевантаження, селективна та миттєва струмові відсічки виконані як для захистів Micrologic 5.0/6.0/7.0 А, захист від замикання на землю Micrologic 6.0 Р – як для Micrologic 6.0 А, диференційний захист (Vigi) Micrologic 7.0 Р – як для Micrologic 7.0 А.

Аварійно-попереджувальна сигналізація та інші додаткові захисти Micrologic 5.0/6.0/7.0 Р: нерівномірність навантаження по фазах; небаланс напруги; зворотний перетік потужності; зниження та збільшення частоти; зворотне чергування фаз.

Крім функцій, що реалізовані в Micrologic Р, блок Micrologic Н забезпечує аналіз якості електроенергії з обчисленням гармонік та основних складників; з записом параметрів струму та напруги; програмування персоналізованих аварійних сигналів для відслідкування та аналізу аварійних режимів в мережі.

Автоматичні вимикачі Legrand. Автоматичні вимикачі серії DPX з номінальним струмом 160, 250, 630, 1250, 1600 А з термомагнітним або електронним розчіплювачем з вимикальною здатністю від 16 до 100 кА (табл. 2.12) [20].

Електронні розчіплювачі вимикача DPX мають такі функції [20]:

- функція захисту L $I_{c.п}=0,4...1 \times I_{н.р}$, $t_{c.п}=3...16$ с ;
- функція захисту від КЗ $I_{c.в}=1,5...10 I_{c.п}$, $t_{c.в}=0...0,5$ с ;
- функція захисту від замикання на землю G $I_{c.з}=0,2...1 \times I_{н.р}$, $t_{c.з}=0,1...1$ с ;
- установлення рівня захисту за струмом в нейтральному проводі: Off, 50, 100 % від струму в фазному проводі.

Залежно від моделі електронні розчіплювачі забезпечують виконання таких додаткових функцій як теплова пам'ять та зонна селективність.

Таблиця 2.12 – **Номинальні струми автоматичних вимикачів DPX**

Вимикач з розчіплювачем	Номинальний струм вимкнення, кА	Номинальний струм розчіплювача, А
DPX 160 ¹ термамагнітний	16 25 36 50	16 25 40 63 80 100 125 160
DPX 250 ¹ термамагнітний	25 36 50 70	100 160 200 250
DPX 250 ¹ електронний	25 36 50 70	40 100 160 250
DPX 250 ² термамагнітний	36 70 100	40 63 100 160 250
DPX 250 ² електронний	36 70 100	40 100 160 250
DPX 630 ² термамагнітний	36 70 100	250 320 400 500 630
DPX 630 ² електронний	36 70 100	250 400 630
DPX 1250 ² термамагнітний	50 70 100	630 800 1000 1250
DPX 1600 ² електронний	50 70	630 800 1250 1600

Примітки. ¹ – з монтажем на рейці або на платі; ² – з монтажем на платі.

Автоматичні вимикачі серії DMX випускаються на струми 1600, 2500, 4000, 6300 А з найбільшою вимикальною здатністю до 100 кА. Електронні розчіплювачі МР4, МР6 мають такі функції [20]:

- функція захисту L $I_{c.п}=0,4...1 \times I_{н.р}$ (з кроком 0,02), $t_{c.п}=5$ 10 20 30 с ;
- функція селективного захисту від КЗ (S) $I_{c.в}=1,5...10 I_{c.п}$ (з кроком 0,5) $t_{c.в}=0-0,1-0,2-0,3$ с ;
- функція миттєвого захисту від КЗ (I) $I_{c.в}=2...15 \times I_{н.р}$;
- функція захисту від замикання на землю G $I_{c.з}=0,2...1 \times I_{н.р}$ з $t_{c.з}=0,1-0,2-0,5-1$ с .
- установлення рівня захисту за струмом в нейтральному проводі: Off, 50, 100, 200% від струму в фазному проводі ;
- налаштування диференційного струму $I_{c.д}$ в межах від 1 до 30 А та часу $t_{c.д}$ в межах 0,1–3,0 с .

Аварійно-попереджувальна сигналізація та додаткові захисти МР6: нерівномірність навантаження по фазах; небаланс напруги; коливання потужності; зниження та збільшення частоти; зворотне чергування фаз.

Автоматичні вимикачі SIEMENS. Вимикачі 3VA є п'яти типорозмірів 100, 160, 250, 400 та 630 А. Номінальна гранична вимикальна здатність КЗ $I_{cu} \leq 150$ кА. Вони оснащені термомагнітним ТМ або електронним розчіплювачем ETU.

Вимикачі 3VT мають п'ять типорозмірів 160, 250, 630, 1000 та 1600 А [21]. Номінальна гранична вимикальна здатність КЗ $I_{cu} \leq 65$ кА. Вони оснащені електронним розчіплювачем максимального струму ETU.

Вимикачі Sentron 3VL випускають семи типорозмірів від 160 до 1600 А. Номінальна гранична вимикальна здатність КЗ $I_{cu} \leq 200$ кА. Вони оснащені термомагнітним ТМ (до 240 А), електромагнітним М або електронним ETU розчіплювачем максимального струму.

Вимикачі 3VF мають десять типорозмірів від 40, 160 ... до 2500 А. Номінальна гранична вимикальна здатність КЗ $I_{cu} \leq 200$ кА. Вони оснащені термомагнітним ТМ (до 400 А) або електронним ETU (від 400 А) розчіплювачем максимального струму.

Автоматичні вимикачі Moeller Group компанії Eaton. Вимикачі серій BZM, LZM, NZM, NRX випускає фірма Moeller Group компанії Eaton. Структура позначення вимикачів BZM: BZM – Building (автоматичні вимикачі для будівництва) Circuit Breaker; вимикальна здатність: D – 15 кА; E – 18 кА; B – 25 кА; C – 36 кА; N – 50 кА; габарит 1 (160 А), 2 (250 А), 3 (400 А); кількість полюсів – 1, 2, 3, 4; 16, ..., 400 – номінальний струм від 16 до 400 А; приєднання ВТ – хомутові затискачі.

Серія NRX представлена вимикачами IZMX та вимикачами-роз'єднувачами INX з номінальним робочим струмом від 630 до 4000 А, з вимикальною здатністю на напрузі 440 В від 42 до 105 кА, три- або чотириполюсними, стаціонарного або викатного виконання, з електронними розчіплювачами Digitrip™, які забезпечують захист з додатковими функціями параметризації, вимірювань, аналізу, діагностики та реєстрації. На випадок виникнення електричної дуги запатентована система гасіння дуги під час обслуговування ARMSTM, яка нейтралізує її швидше, ніж струмова відсічка [22].

Вимикачі IZMX випускають із максимальним робочим струмом 1600 А ($I_{н.р} = 630, 800, 1000, 1250, 1600$ А) і 4000 А ($I_{н.р} = 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3200, 4000$ А) забезпечують можливість регулювання захисту від перевантаження в діапазоні $I_{с.п} = 0,5 \dots 1 I_{н.р}$ і захисту від КЗ в діапазоні $I_{с.в} = 2 \dots 10 I_{н.р}$ – з витримкою часу та $I_{с.в} = 2 \dots 12 I_{н.р}$ – без витримки часу.

Автоматичні вимикачі серії Ні компанії Hyundai. Вимикачі загального призначення серії Ні з номінальним струмом від 30 до 800 А з термомагнітними розчіплювачами та регульованого типу з номінальним струмом від 50 до 225 А з термомагнітними розчіплювачами, а також з номінальним струмом від 400 до 1200 А з електронними розчіплювачами ($I_{c.p}=0,5...1 I_{н.p}$) [23].

Вимикачі серії U [24] компанії Hyundai, UAB від 30 до 100 А, UCSB від 50 до 1600 А з термомагнітними розчіплювачами є більш компактними.

Автоматичні вимикачі UPB мають можливість заміни термомагнітних розчіплювачів з номінальним струмом від 125 до 630 А на електронні з номінальним струмом від 400 до 630 А ($I_{c.p}=0,5...1 I_{н.p}$). (табл. Г.16) та миттєві розчіплювачі з номінальним струмом від 125 до 250 А для захисту двигунів.

Промислові автоматичні вимикачі ETIBREAK 2 [25] виробництва Словенії з номінальними струмами від 100 А (EB100) до 2500 А (EB2500) є відносно дешевими. Вони випускаються три- або чотириполюсними з термомагнітними та електронними розчіплювачами. Тепловий розчіплювач регулюється в межах (0,63; 0,8; 1) $I_{н.p}$, електромагнітний – (6...10 або 12) $I_{н.p}$, електронний розчіплювач з уставками спрацювання від перевантаження $I_{c.p}=0,4, 0,5, 0,63, 0,8, 0,9, 0,95, 1 I_{н.p}$ та струмовою відсічкою $I_{c.в}=2,5, 5, 10 I_{c.p}$. з витримкою часу $t_{c.в}=0,1$ с та (0,2 с), а також 14 $I_{c.p}$. з миттєвим спрацюванням.

Автоматичні вимикачі ETIPOWER [26] з номінальними струмами від 800 А (EP 208) до 6300 А (EP 663) серій стандартної (S) і підвищеної вимикальної здатності (H), викатного типу з приводом, які призначені для застосування на ТП. Перша цифра характеризує вимикальну здатність.

Приклад 2.7. Вибрати провідники та комутаційно-захисну апаратуру для цехової мережі, план якої зображено на рис. 1.2. На ТП встановлено трансформатор потужністю 630 кВ·А.

Розв'язування. В табл. 2.13 наведено результати вибору провідників та автоматичних вимикачів ETIBREAK 2 та Tmax XT2.

Згідно з ІЕС 60364-5-52-2009 в збалансованій трифазній системі допустиме навантаження чотирижильних кабелів береться як для трижильних. Вибір збільшеного перерізу кабелів зумовлений необхідністю забезпечення їх термічної стійкості до дії струмів КЗ.

Таблиця 2.13 – Вибір провідників та автоматичних вимикачів цехової мережі

Лінія	I_p , А	I_n , А	Тип захисного апарата	I_n , А	$I_{c.п.}$, А	$I_{c.в.}$, А	Тип провід- ника	s , мм ²	Спосіб прокла- дання	$I_{доп.}$, А	l , м,	U , %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
РП-1	ЕП (1,12,15)	11,4	57,0	ЕВ 100/3Л 16А 3р	16	12,8	128	АПВ	4(1×2,5)	в трубі	19	8	0,52
	ЕП(2,13)	9,5	47,5	ЕВ 100/3Л 16А 3р	16	10	112	АПВ	4(1×2,5)	в трубі	19	5	0,27
	ЕП (3,14)	7,6	38,0	ЕВ 100/3Л 16А 3р	16	10	96	АПВ	4(1×2,5)	в трубі	19	7	0,30
РП-2	ЕП (37, 39-43)	8,5	42,7	ЕВ 100/3Л 16А 3р	16	10	96	АПВ	4(1×2,5)	в трубі	19	7	0,34
	ЕП (38)	9,5	47,5	ЕВ 100/3Л 16А 3р	16	10	112	АПВ	4(1×2,5)	в трубі	19	5	0,27
РП-3	ЕП (4)	41,8	208,9	ЕВ 100/3Л 50А 3р	50	50	450	АПВ	4(1×16)	в трубі	60	5	0,20
	ЕП (5)	34,2	170,9	ЕВ 100/3Л 40А 3р	40	40	360	АПВ	4(1×10)	в трубі	47	5	0,25
	ЕП (6,11)	47,5	237,4	ЕВ 100/3Л 50А 3р	50	50	500	АПВ	4(1×16)	в трубі	60	20	0,87
	ЕП(7)	20,9	104,5	ЕВ 100/3Л 25А 3р	25	25	225	АПВ	4(1×4)	в трубі	28	6	0,45
	ЕП (8)	41,8	208,9	ЕВ 100/3Л 50А 3р	50	50	450	АПВ	4(1×16)	в трубі	60	4	0,15
	ЕП(9)	20,9	104,5	ЕВ 100/3Л 25А 3р	25	25	225	АПВ	4(1×4)	в трубі	28	12	0,90
	ЕП (10)	47,5	237,4	ЕВ 100/3Л 50А 3р	50	50	500	АПВ	4(1×16)	в трубі	60	16	0,68
	ЕП(16,18- 20,22,23)	20,9	104,5	ЕВ 100/3Л 25А 3р	25	25	225	АПВ	4(1×4)	в трубі	28	7	0,52
РП-4	ЕП (17)	45,6	227,9	ЕВ 100/3Л 50А 3р	50	50	500	АПВ	4(1×16)	в трубі	60	6	0,26
	ЕП (21)	15,2	76,0	ЕВ 100/3Л 16А 3р	16	16	160	АПВ	4(1×2,5)	в трубі	19	7	0,61
	ЕП (24 -27)	45,6	227,9	ЕВ 100/3Л 50А 3р	50	50	500	АПВ	4(1×16)	в трубі	60	9	0,39

Продовження таблиці 2.13

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
РП-5	ЕП (28,29)	60,8	303,9	ЕВ 100/3L 63А 3р	63	63	630	АПВ	4(1×25)	в трубі	80	25	0,90
	Е (30)	19,0	95,0	ЕВ 100/3L 20А 3р	20	20	200	АПВ	4(1×4)	в трубі	28	13	0,88
	ЕП (31)	19,0	95,0	ЕВ 100/3L 20А 3р	20	20	200	АПВ	4(1×4)	в трубі	28	12	0,81
	ЕП (32,33)	19,0	95,0	ЕВ 100/3L 20А 3р	20	20	200	АПВ	4(1×4)	в трубі	28	7	0,47
	ЕП (34)	20,9	105	ЕВ 100/3L 25А 3р	25	25	225	АПВ	4(1×4)	в трубі	28	7	0,52
	ЕП (35)	15,2	76,0	ЕВ 100/3L 16А 3р	16	16	160	АПВ	4(1×2,5)	в трубі	19	7	0,60
	ЕП (36)	20,9	105	ЕВ 100/3L 25А 3р	25	25	225	АПВ	4(1×4)	в трубі	28	9	0,67
РПЗ	РП1	22,7	83	ЕВ 100/3L 25А 3р	25	25	200	АПВІПу	4×16	відкрито	78	19	0,45
РП5	РП2	18,7	69	ЕВ 100/3L 20А 3р	20	20	200	АПВІПу	4×16	відкрито	78	46	0,9
ТП	РПЗ	120	369	Tmax XT2 Ekip LSI	160	128	640	АПВІПу	4×70	відкрито	203	77	2,2
ТП	РП4	94,5	325	Tmax XT2 Ekip LSI	160	96	640	АПВІПу	4×70	відкрито	203	62	1,4
ТП	РП5	94,7	416	Tmax XT2 Ekip LSI	160	96	640	АПВІПу	4×70	відкрито	203	48	1,1

Приклад 2.8. Вибрати автоматичні вимикачі та уставки їх розчіплювачів для ФЕС. На ФЕС для видачі електроенергії в електричну мережу напругою 35 кВ будуть встановлені трансформатори типу ТМГ-2000 35/0,4 ($u_{кз}=7,2\%$, $P_{кз}=18$ кВт, $P_{нх}=2,5$ кВт, схема з'єднання Д/Ун-11). До кожного ТП приєднано 20 РП, від кожного з яких живиться по два інвертори. Номінальний струм інвертора становить 77 А.

Розв'язування. Відповідно до вимог глави 1.3 ПУЕ 2014 р. переріз алюмінієвих жил чотирижильних кабелів від ТП до РП, довжина яких становить від 50 до 300...500 м, і від РП до інверторів, довжина яких не перевищує 10 м, вибирають за умов забезпечення допустимого нагріву (за тривало допустимим струмом) та втрат напруги (табл. 2.14). Перевірка термічної стійкості до дії струмів КЗ кабелів здійснюється за умовами:

$$s \geq s_{\min} = \frac{I_{к.маx}^{(3)} \sqrt{t_{вим}}}{C_T} \cdot 1000 = \frac{38,6 \sqrt{0,14}}{76} \cdot 1000 = 190 \text{ мм}^2;$$

$$s \geq s_{\min} = \frac{I_{к.маx}^{(3)} \sqrt{t_{вим}}}{C_T} \cdot 1000 = \frac{20,0 \sqrt{0,04}}{76} \cdot 1000 = 52,4 \text{ мм}^2.$$

Таблиця 2.14 – Вибір кабелів

Приєднання	I_p , А	Кабель	$I_{доп}$, А	Довжина, м	ΔU , В
ТП-РП	154	АВВГ 4(1×240)	465	300...500	12,5...20,8
РП-Інвертор	77	АВВГ 4×70	128,8	10	0,7

Вибрано ввідні автомати ТП – Е4.2N, розчіплювач Екір Дір з $I_{н.р}=4000$ А, $I_{сн}=66$ кА; відхідні лінії від ТП – Тmax ХТ4S 250, розчіплювач Екір LSI $I_{н.р}=250$ А, $I_{сн}=50$ кА; лінії живлення інверторів – Тmax ХТ2 з термомагнітним розчіплювачем ТМА $I_{н.р}=100$ А, $I_{сн}=36$ кА. Дані про паспортні дані вимикачів та максимальні струми КЗ, що можуть протікати через них, наведемо у табл. 2.15.

Таблиця 2.15 – Вибір автоматичних вимикачів

Приєднання	I_p , А	Вимикач	Розчіплювач	$I_{н.р}$, А	$I_{с.п}$, А	$I_{сн}$, кА	$I_{кз.маx}$, кА
Ввідний	3080	Е4.2N	Екір Дір	4000	3600	66	38,6
ТП-РП	154	Тmax ХТ4	Екір LSI	250	160	50	38,6
РП-Інв	77	Тmax ХТ2	ТМА	100	80	36	20,0

Уставки захисту від перевантажень становлять:

- для ввідного автоматичного вимикача трансформатора 2000 кВ·А – $I_{н.р}=4000$ А, $I_{с.п}=0,9$; $I_{н.р}=3600$ А, $t_{с.п}=3$ с;

- для автоматичного вимикача від ТП до РП – 160 А;
- для автоматичного вимикача від РП до інвертора – 80 А.

Швидкодійний захист від КЗ. Уставки струму спрацювання вибирають за двома умовами:

1. Забезпечення коефіцієнта чутливості близько 1,5 за мінімального усталеного струму одно- чи двофазного дугового КЗ в кінці захищеної зони;

2. Забезпечення селективної роботи з автоматами нижчого рівня.

Уставки захисту від КЗ становлять (табл. 2.16):

- для ввідного автоматичного вимикача – $I_{c.в2} = 1,5 \cdot I_{н.р} = 6000 \text{ А}$,
 $t_{c.в2} = 0,2 \text{ с}$, $I_{c.в3} = 4 \cdot I_{н.р} = 16000 \text{ А}$, $t_{c.в3} = 0 \text{ с}$;
- для автоматичного вимикача від ТП до РП – $I_{c.в2} = 2 \cdot I_{н.р} = 500 \text{ А}$,
 $t_{c.в2} = 0,1 \text{ с}$, $I_{c.в3} = 10 \cdot I_{н.р} = 2500 \text{ А}$, $t_{c.в3} = 0 \text{ с}$;
- для автоматичного вимикача від РП до інвертора – $I_{c.в3} = 10 \cdot I_{н.р} = 1000 \text{ А}$, $t_{c.в3} = 0 \text{ с}$.

Таблиця 2.16 – Вибір уставок захисту від КЗ автоматичних вимикачів

Приєднання	$I_p, \text{ А}$	Вимикач	Розчіплювач	$I_{н.р}, \text{ А}$	$I_{c.в2}, \text{ А}$	$I_{c.в3}, \text{ А}$
Ввідний	3080	E4.2N	Ekip Dip	4000	6000	16000
ТП-РП	154	Tmax XT4	Ekip LSI	250	500	2500
РП-Інв	77	Tmax XT2	TMA	100	-	1000

Для перевірки чутливості захистів використовують менший із струмів одно- та двофазного КЗ в мінімальному режимі. Розрахункові величини коефіцієнтів чутливості для усіх приєднань наведено в табл 2.17.

Таблиця 2.17 – Перевірка чутливості автоматичних вимикачів

Приєднання	$I_p, \text{ А}$	$I_{c.п}, \text{ А}$	$k_{ч}$	$I_{c.в}, \text{ А}$	$k_{ч}$
Ввідний	3080	$0,9 \cdot I_{н.р} = 3600$	8,1	$4 \cdot I_{н.р} = 16000$	1,8
ТП-РП	154	$0,8 \cdot I_{н.р} = 200$	24,4	$10 \cdot I_{н.р} = 2500$	1,6
РП-Інвертор	77	$1 \cdot I_{н.р} = 100$	40,7	$10 \cdot I_{н.р} = 1000$	4,0

2.5 Перевірка селективності захисту

Забезпечення селективності дії захисту автоматичних вимикачів суміжних ступенів досягається правильним вибором уставок захисту від перевантаження, захисту від КЗ з витримкою та без витримки часу, з урахуванням енергетичної селективності та вимикальної здатності вимикачів.

У зоні **перевантаження** реалізується часово-струмова селективність, яка забезпечується шляхом регулювання пристроїв захисту таким чином, що захист з боку навантаження за всіх можливих значень струму перевантаження спрацює швидше, ніж автоматичний вимикач з боку живлення. Умови вибору захисту від перевантаження мають такий вигляд:

$$I_{c.пА} > I_{c.пВ}, \quad t_{c.пА} > t_{c.пВ},$$

де $I_{c.пА}$, $I_{c.пВ}$ – значення струмів спрацювання захисту від перевантаження відповідно вищого і нижчого ступенів; $t_{c.пА}$, $t_{c.пВ}$ – час спрацювання захисту від перевантаження вищого і нижчого ступенів.

У зоні **КЗ** із застосуванням пристроїв захисту можуть використовуватися різні методи забезпечення селективності: струмової; часової; енергетичної; зонної [27].

Струмова селективність основана на положенні про те, що чим далі точка замикання від джерела живлення, тим менший струм КЗ (рис. 2.7).

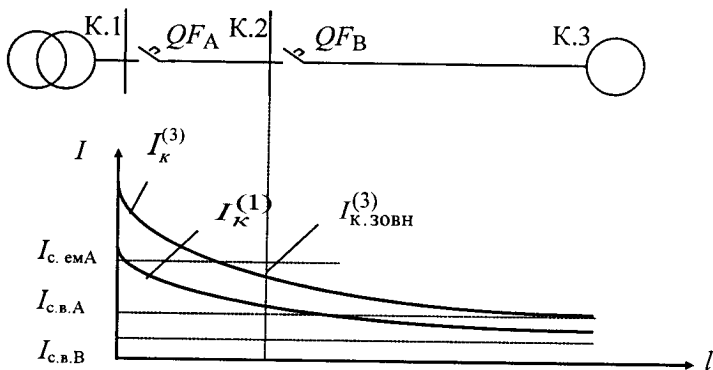


Рисунок 2.7 – Вибір струму спрацювання відсічки з умови селективності

Цей тип селективності може бути реалізований між автоматичними вимикачами з миттєвими розчіплювачами. Він, за своєю суттю, є швидкодійним (миттєвим), простим в реалізації й економічним. Однак, струмова селективність є лише частковою, а резервування захисту, якщо один з пристроїв захисту несправний, є неможливим.

Часова селективність. За цього типу селективності стратегія вибору уставок полягає в поступовому підвищенні порогів струму і витримок часу спрацювання з наближенням до джерел живлення (рівень уставки безпосередньо співвідноситься з ієрархічним рівнем).

Умови вибору захисту від КЗ з витримкою часу мають такий вигляд:

$$I_{c.вA} > (1,3 \dots 1,5)I_{c.вB}, \quad t_{c.вA} = t_{c.вB} + \Delta t_{c.в},$$

де $I_{c.вA}$, $I_{c.вB}$ – значення струмів спрацювання відсічки відповідно вищого і нижчого ступенів; $t_{c.вA}$, $t_{c.вB}$ – час спрацювання відсічки вищого і нижчого ступенів; $\Delta t_{c.в}$ – ступінь селективності ($\Delta t_{c.в} = 0,1$ с).

Якщо автоматичний вимикач вищого ступеня оснащений також миттєвим (електромагнітним) розчіплювачем, то

$$I_{c.емA} > I_{к.зовн.мах}^{(3)} = I_{к.2}^{(3)},$$

де $I_{c.емA}$ – струм спрацювання електромагнітного розчіплювача вищого ступеня; $I_{к.зовн.мах}^{(3)}$ – максимальний струм трифазного КЗ, який виникає в зоні дії вимикача нижчого ступеня.

Під час аналізу селективності двох автоматичних вимикачів необхідно враховувати: допуски порогів уставок і часу спрацювання, а також дійсні значення струмів, що протікають в автоматичних вимикачах [27]. Допуски спрацювання розчіплювача показано двома кривими, одна з яких вказує найбільший час спрацювання (верхня крива), а інша – найменший час спрацювання (нижня крива). Для коректного аналізу селективності необхідно розглянути найгірші умови, коли автоматичний вимикач з боку живлення спрацьовує відповідно до своєї нижньої кривої, а автоматичний вимикач з боку навантаження спрацьовує відповідно до своєї верхньої кривої. Криві допусків спрацювання розчіплювачів виробників подано в технічних каталогах і програмному забезпеченні.

Для більш детального аналізу селективності дії захисту в мережах напругою до 1000 В застосовується карта селективності захисту. На рис. 2.8 наведено карту селективності, побудовану програмою «SIMARIS curves» <http://www.siemens.com/simaris>.

Карту селективності побудовано для трьох автоматичних вимикачів компанії SIEMENS:

3WT81005AA000AA2: $I_{н.р} = 1000$ А, $I_{c.п} = 1000$ А, $t_{c.п} = 10$ с, $I_{c.в2} = 4000$ А
 $t_{c.в2} = 0,2$ с, $I_{c.в3} = 20000$ А;

3VT37633AA360AA0 + 3VT93406AS00: $I_{н.р} = 400$ А, $I_{c.п} = 200$ А, $t_{c.п} = 3$ с
 $I_{c.в2} = 1400$ А, $t_{c.в2} = 0,1$ с, $I_{c.в3} = 6500$ А;

5SL43637: $I_{н.р} = 63$ А, $I_{c.п} = 63$ А, $I_{c.ем} = 315$ А.

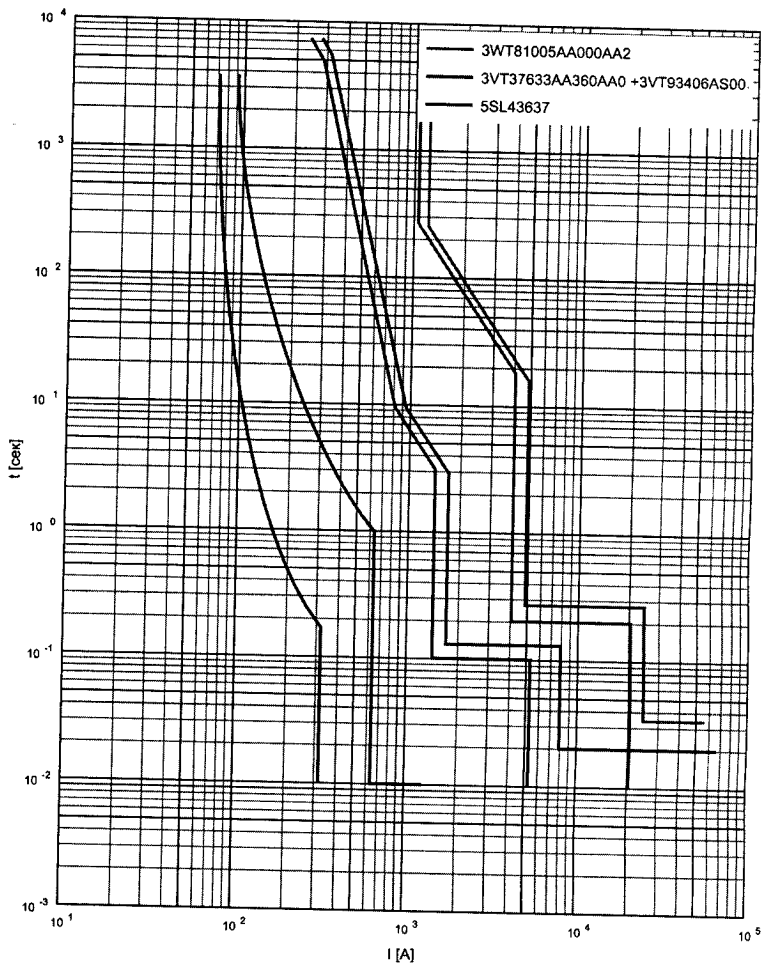


Рисунок 2.8 – Карта селективності вимикачів SIEMENS

Параметри функцій захисту від КЗ у двох автоматичних вимикачів з порогами спрацювання $I_{c,B}$ і часом спрацювання $t_{c,B}$ функцій захисту від КЗ з витримкою мають бути відрегульовані таким чином, щоб не створювати перекриття зон спрацювання з урахуванням допусків і розкидів дійсних струмів, що протікають в автоматичних вимикачах, з тим, щоб автоматичний вимикач В з боку навантаження відключав струм КЗ, тоді як автоматичний вимикач А з боку живлення, який перебуває в очікуванні, був здатний розпізнати вимкнення струму і, отже, залишитися в увімкненому стані [27].

Витримка часу спрацювання $t_{c,в}$ функції S вибирається таким чином [27]. Якщо поріг спрацювання $I_{c,BA}$ автоматичного вимикача з боку живлення вищий від миттєвого захисту автоматичного вимикача з боку навантаження $I_{c,EM}$, то:

$$t_{c,BA} \geq 150 \text{ мс, якщо } I^2 t = \text{const};$$

$$t_{c,BA} \geq 100 \text{ мс, якщо } t = \text{const}.$$

Якщо поріг спрацювання $I_{c,BA}$ автоматичного вимикача з боку живлення вищий від порогу $I_{c,VB}$ автоматичного вимикача з боку навантаження, то, у разі кривих з тими ж характеристиками:

$$t_{c,BA} - \text{допуск} \geq t_{c,VB} + \text{допуск} + 50 \text{ мс}.$$

Цей тип узгодження дозволяє отримати високі значення межі селективності (якщо значення I_{cW} високе) та дозволяє забезпечити резервування пристроїв захисту. Цей тип селективності може бути реалізований між автоматичними вимикачами однакової величини, оснащеними електронними розчіплювачами із захистом від КЗ, що спрацювають із витримкою часу.

Енергетична селективність. Узгодження енергетичного типу є специфічним типом селективності, який оснований на струмообмежувальних характеристиках автоматичних вимикачів. Струмообмежувальним автоматичним вимикачем є автоматичний вимикач з надзвичайно малим часом вимкнення, протягом якого струм КЗ не встигає досягти свого максимального значення [27].

В умовах КЗ струмообмежувальні автоматичні вимикачі мають надзвичайно високу швидкість (час спрацювання близько декількох мілісекунд) і розмикаються за наявності значної аперіодичної складової.

Ці явища, в основному, динамічні (через пропорційність квадрату значення миттєвого струму) і значно залежать від взаємодії між двома послідовними пристроями. Тому значення енергетичної селективності не можуть бути визначені кінцевим користувачем. Виробники надають таблиці, рахункові лінійки і програми розрахунку, в яких вказані значення граничного струму селективності I_s для КЗ між різними комбінаціями автоматичних вимикачів. Ці значення визначаються шляхом теоретичного узагальнення результатів випробувань.

Для перевірки енергетичної селективності роботи автоматичних вимикачів скористаємось онлайн сервісом SOC – Selected Optimized Coordination від фірми АВВ, який знаходиться за адресою <https://applications.it.abb.com/SOC/Selectivity>. Задавши значення номінальних струмів та струму КЗ, отримують таблиці для вибору вимикачів, які забезпечують вимоги енергетичної селективності (рис. 2.9).

Technology		Technology										ACB		
		PR										E _{max}		
MCCB		Series										E2		
		Version										B	N	S
		Relay										EL		
T _{max} XT		Relay										EL		
		lu										1600..2000	1000..2000	800..2000
		Icu												
		low												
		160										42	55	65
		TM												
		EL												
		TM										T	T	T
		EL										T	T	T
		TM										T	T	T
EL										T	T	T		
TM										T	55	65		
EL										T	55	65		
TM										T	55	65		
EL										T	55	65		
TM										T	55	65		
EL										T	55	65		

Рисунок 2.9 – Таблиця перевірки енергетичної селективності захисту

Зонна селективність. Принцип дії зонної селективності між автоматичними вимикачами такий: за значень струму, вищих від своїх уставок, кожен захисний пристрій направляє сигнал блокування на ієрархічно вищий рівень захисту і, до спрацювання, перевіряє, що аналогічний сигнал блокування не надійшов від захисту з боку навантаження. Таким чином, спрацьовує тільки захист, розташований безпосередньо з боку живлення від місця замикання [27].

Цей тип селективності може бути реалізований між вимикачами в литому корпусі T_{max} і повітряними автоматичними вимикачами E_{max}, оснащеними розчіплювачами PR122 і PR123. За допомогою додаткового модуля IM210 можна створити коло зонної селективності.

За допомогою нового електронного розчіплювача PR223EF можливо реалізувати зонну селективність між автоматичними вимикачами в литому корпусі серій T_{max} T4L, T5L і T6L. Розчіплювач PR223EF реалізує нову функцію захисту EF, здатну виявити КЗ на самому початку його виникнення. Це відбувається завдяки «прогнозуванню» замикання, на основі аналізу тенденції похідної струму за часом, $di(t)/dt$ порівняно зі струмом $i(t)$ [27].

Зонна селективність реалізується одночасно з виконанням функцій S, G. Вона виконується за допомогою протоколу взаємоблокування (IL), що гарантується двома екранованими кабелями типу «скручена пара» для шини modbus RS485, які з'єднують автоматичні вимикачі, оснащені розчіплювачами PR223EF.

Цілісність системи перевіряється функцією контролю: в разі КЗ, якщо в системі взаємоблокування виявлена несправність, спрацьовує функція захисту EF (з часом спрацювання близько десятка мілісекунд), але зонна селективність при цьому не забезпечується.

Крім того, якщо автоматичний вимикач з боку навантаження не спрацьовує, він запитує підтримку автоматичного вимикача з боку живлення, який розмикається навіть у тому випадку, коли не виявляє несправності (функція SOS).

Зонна селективність забезпечує: зменшення часу спрацювання (він може бути менший 0,1 с); зниження теплових і динамічних навантажень на частини установки; отримання дуже великої кількості рівнів селективності. Однак вона більш обтяжлива як з боку вартості, так і складності установки; потребує наявності додаткового джерела живлення. Тому це рішення, в основному, використовується в системах з великим номінальним струмом і високим значеннями струму КЗ, з обов'язковими вимогами безпеки і безперервності експлуатації.

Одна з основних переваг використання зонної селективності між вимикачами полягає в тому, що вона дає можливість зменшити розмір автоматичних вимикачів. Дійсно, при забезпеченні селективності між автоматичними вимикачами в литому корпусі із застосуванням класичних методів часто необхідно збільшити розмір автоматичних вимикачів з боку живлення для отримання порогів селективності, відповідних струму КЗ.

3 РОЗРАХУНОК ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НАПРУГОЮ ВИЩЕ 1000 В

3.1 Схеми розподільних мереж напругою вище 1000 В

Заводські розподільні мережі невеликих підприємств виконуються радіальними одноступеневими (рис. 3.1, а). На потужних підприємствах використовуються двоступеневі мережі (рис. 3.1, б), в яких передбачаються проміжні розподільні підстанції РП – 10 (6) кВ. Від РП – живляться ТП і високовольтні електродвигуни [28, 29].

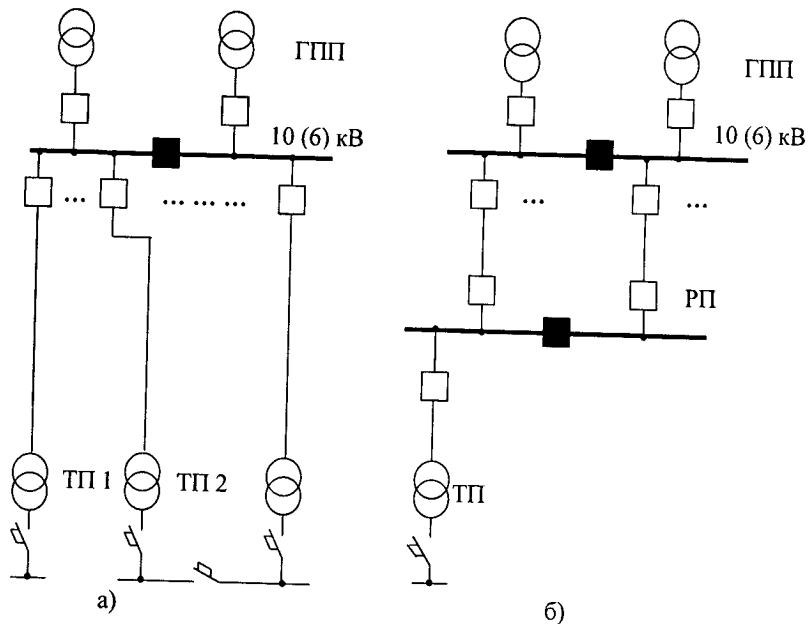


Рисунок 3.1 – Схеми радіальних заводських мереж:
а – одноступенева; б – двоступенева

Для підвищення надійності однотрансформаторних ТП для споживачів II категорії надійності використовують резервування на низькій стороні. Резервування виконують за допомогою резервних кабельних або шинних перемичок. Кабельні перемички слід виконувати, виходячи з резервування 15 – 30 відсотків потужності трансформаторів, шинні – до 40 відсотків.

Конструктивно заводські мережі середніх за потужністю підприємств виконують кабелями, прокладеними в траншеях, в трубах або кабельних каналах. За невеликої кількості кабелів (до шести) в одному напрямку їх

прокладають в траншеях або в асбоцементних трубах. Кабельні канали дозволяють прокласти в них 15...20 кабелів. Перспективним є виконання кабельних каналів напівзаглибленими, коли канал накривається плитами і землею не засипається. У випадках ущільненості траси, а також в місцях переходу під дорогами, кабелі прокладають в блоках. Для живлення потужних РП 10 (6) кВ можливим є застосування одножильних кабелів із зшитого поліетилену або струмопроводів з номінальним струмом до 2000...3000 А.

Під час вибору напруги розподільних мереж промислових підприємств перевагу віддають напрузі 10 кВ. Допускається застосування напруги 6 кВ, яке може бути доцільним у двох випадках: а) за наявності ТЕЦ з генераторною напругою 6 кВ; б) за значної кількості електродвигунів 6 кВ в загальному навантаженні підприємства.

Міські мережі виконують одно- та двоколовими магістральними (рис. 3.2, а) і петльовими (рис. 3.2, б).

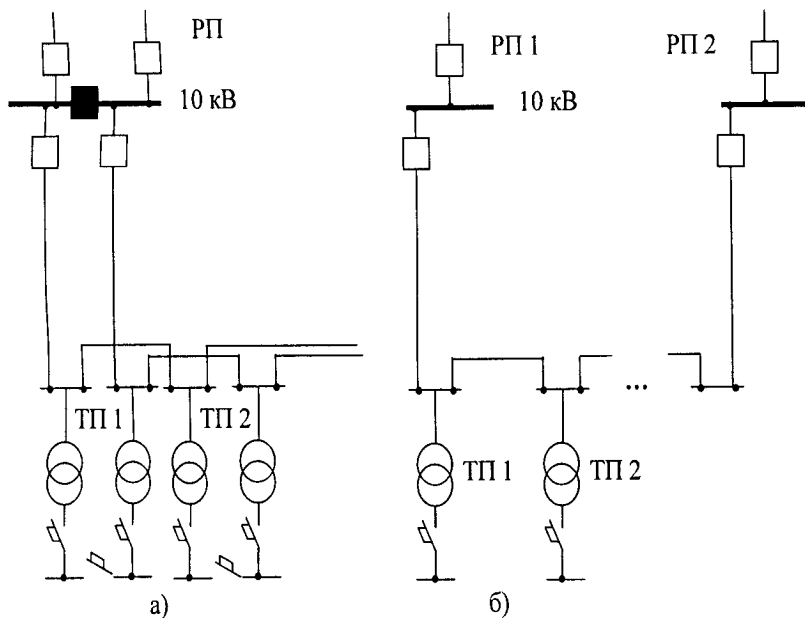


Рисунок 3.2 – Схеми міських мереж:
 а – двоколова магістральна; б – петльова

Сільські розподільні мережі виконують розгалуженими петльовими (рис. 3.3).

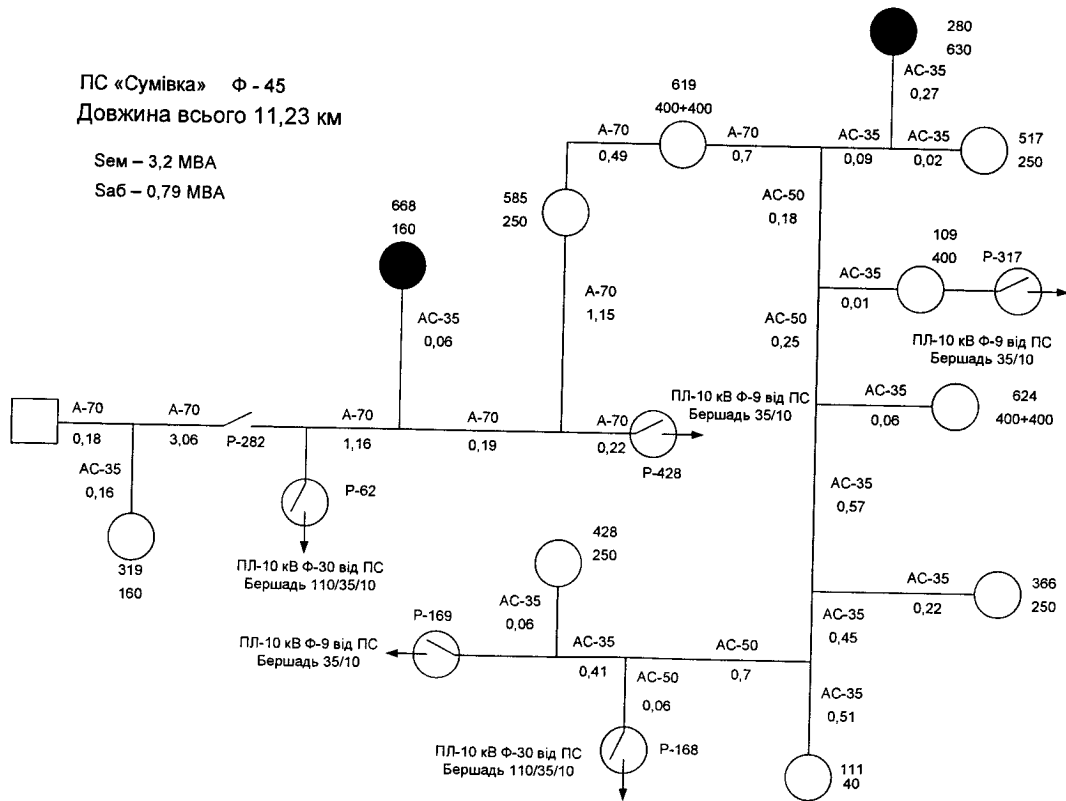


Рисунок 3.3 – Схема фідера 45 мережі 10 кВ Бершадських ЕМ

Режими нейтралі. Мережі напругою 10 кВ виконують з ізольованою нейтраллю, перевагами яких є:

- можливість роботи мережі протягом деякого часу за наявності в ній однофазного замикання на землю (ОЗЗ);
- велика ймовірність самозагасання дуги, яка дуже часто виникає під час ОЗЗ, тобто можливість самоліквідації пошкодження;
- більше значення допустимого опору заземлення корпусів обладнання з умови напруги «дотику» порівняно з мережами із заземленими нейтраллями.

Але такі мережі мають недоліки. Основними з них є:

- виникнення істотних перенапруг під час ОЗЗ, особливо коли ОЗЗ супроводжуються горінням дуги;
- велика ймовірність виникнення ферорезонансних процесів, які супроводжуються перенапругами на вищих гармоніках і на субгармоніках;
- погіршення умов електробезпеки через можливе існування недопустимо великих напруг дотику під час ОЗЗ, а також небезпечних крокових напруг в результаті обривів проводів ліній електропередавання.

3.2 Вибір та розміщення підстанцій

На ТП промислових підприємств переважно встановлюють трансформатори типу ТМ, ТМЗ, ТМГ з системою охолодження ONAN, номінальною потужністю 630, 1000, 1600, 2500 кВ·А, номінальними напругами первинної обмотки (високої напруги) 10 (6) кВ і вторинної обмотки (низької напруги) – 0,4 кВ.

Для масляних РТ допускаються [30]:

- такі тривалі аварійні перевантаження, за яких струмові навантаження не перевищують 1,8, температура масла не перевищує 115 °С, а температура найбільш нагрітої точки обмотки не перевищує 150 °С;
- такі систематичні навантаження (як для трансформаторів середньої потужності), за яких значення струму не перевищує в 1,5 раза номінальне значення струму трансформатора, температура масла не перевищує 105 °С, а температура найбільш нагрітої точки обмотки не перевищує 140 °С;
- такі короткочасні аварійні перевантаження, за яких струмові навантаження не перевищують 2,0.

Допустимі аварійні та систематичні перевантаження трансформаторів з системою охолодження: ONAN для коефіцієнта попереднього навантаження $K_1=0,8$ наведено відповідно в табл. 3.1 та 3.2.

РТ, які призначені для встановлення в приміщенні, піддаються додатковому перегріву, значення якого становить приблизно половину значення перевищення температури (табл. 3.3).

Таблиця 3.1 – Допустимі аварійні перевантаження трансформаторів з системами охолодження ONAN для $K_1=0,8$

h, год.	Температура навколишнього середовища, °C						
	-20	-10	0	10	20	30	40
0,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,8
1,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,8	1,8	1,7
2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5
4,0	1,8	1,7	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
8,0	1,7	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2
24,0	1,7	1,5	1,5	1,5	1,4	1,2	1,2

Таблиця 3.2 – Допустимі систематичні навантаження трансформаторів з системами охолодження ONAN та ON для $K_1=0,8$

h, год.	Трансформатори типу ONAN, °C				Трансформатори типу ON, °C			
	0	10	20	30	0	10	20	30
0,5	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
1,0	1,50	1,50	1,50	1,45	1,50	1,50	1,50	1,42
2,0	1,50	1,50	1,43	1,26	1,50	1,50	1,40	1,25
4,0	1,47	1,37	1,25	1,10	1,42	1,34	1,23	1,11
8,0	1,32	1,23	1,13	1,01	1,29	1,21	1,12	1,02
24,0	1,17	1,09	1,00	0,91	1,16	1,08	1,00	0,92

Таблиця 3.3 – Поправки на температуру навколишнього середовища для трансформаторів внутрішнього встановлення

Вид приміщення	Кількість встановлених трансформаторів	Поправка (дається до еквівалентної температури навколишнього середовища), °C			
		номінальна потужність трансформатора, кВ А			
		250	500	750	1000
Підземні камери з природною вентиляцією	1	11	12	13	14
	2	12	13	14	16
	3	14	17	19	22
Підвальні поверхи і споруди з незначною природною вентиляцією	1	7	8	9	10
	2	8	9	10	12
	3	10	13	15	17
Споруди з доброю природною вентиляцією і підземні камери та підвальні поверхи з примусовою вентиляцією	1	3	4	5	6
	2	4	5	6	7
	3	6	9	10	13
Трансформаторні кіоски	1	10	15	20	-

Сухі трансформатори з ізоляцією «Nomex» типу ТС, ТСЗ та литою ізоляцією «Geafol» (для ізоляції обмоток використаний епоксидний компаунд з кварцевим наповнювачем) типу ТСГЛ, ТСЗГЛ, ТСЗГЛФ призначені для промислових приміщень і громадських будівель з підвищеними вимогами пожежобезпеки та екологічної чистоти.

Сухі трансформатори мають значно меншу перевантажувальну здатність. В табл. 3.4 наведено максимально допустимі тривалості систематичного перевантаження сухих трансформаторів з ізоляцією типу «Geafol» для температури повітря плюс 10 °С за даними заводу-виробника.

Таблиця 3.4 – Максимально допустимі тривалості систематичного перевантаження сухих трансформаторів з ізоляцією типу «Geafol» для температури повітря плюс 10 °С, хв

K ₁	K ₂											
	1,15	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
0	240	160	80	56	44	35	25	18	10	7	3,9	2,7
0,4	230	150	74	53	40	33	23	17	9,5	6,2	3,6	2,4
0,5	220	125	68	50	37	30	21	16	9	5,6	3,2	2,2
0,6	210	120	62	46	34	28	19	15	8	5,1	2,9	2
0,7	200	100	59	43	31	26	18	14	7	4,8	2,6	1,9
0,8	190	95	54	37	28	23	15	12	6	4,2	2,3	1,6
0,9	185	85	45	31	24	18	13	9	5	3,3	1,8	1,3
1,0	180	65	32	22	15	12	8	5,5	3	2	1,1	0,5

Під час визначення числа і потужності трансформаторів цехових ТП враховують:

- а) надійність електропостачання, зокрема для споживачів I категорії повинні використовуватися двотрансформаторні ТП;
- б) навантажувальну здатність трансформаторів;
- в) економічність цехових і заводської мереж;
- г) доцільність уніфікації підстанцій (однотипність підстанцій забезпечує можливість використання меншого числа резервних трансформаторів).

Потужність трансформаторів двотрансформаторних ТП вибирають з умов допустимості післяаварійних перевантажень

$$S_{\text{ном.т}} \geq \frac{S_p}{N \cdot 2 \cdot k_3}$$

Коефіцієнт завантаження трансформаторів k_3 беруть 0,65 ÷ 0,7, якщо переважають споживачі I категорії і 0,75 ÷ 0,8, якщо переважають споживачі II та III категорій.

На основі техніко-економічних розрахунків обґрунтовано, що з економічної точки зору номінальну потужність трансформаторів цехових

ТП доцільно вибирати за питомою густиною навантаження на 1 м^2 площі цеху ($S_{\text{ПІТ}}$). Згідно з СН 357-77 використання однострансформаторних ТП є більш раціональним для $S_{\text{ПІТ}} < 0,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}/\text{м}^2$, а інтервали економічних потужностей однострансформаторних ТП такі:

$$S_{\text{НОМ.Т}} = \begin{cases} 400, 630 \text{ або } 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А,} & \text{якщо } S_{\text{ПІТ}} < 0,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}/\text{м}^2; \\ 1600 \text{ кВ} \cdot \text{А,} & \text{якщо } S_{\text{ПІТ}} = 0,2 \div 0,3 \text{ кВ} \cdot \text{А}/\text{м}^2; \\ 1600 \text{ або } 2500 \text{ кВ} \cdot \text{А,} & \text{якщо } S_{\text{ПІТ}} > 0,3 \text{ кВ} \cdot \text{А}/\text{м}^2. \end{cases}$$

Якщо $S_{\text{ПІТ}} > 0,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}/\text{м}^2$, то доцільно застосовувати двотрансформаторні ТП незалежно від категорії надійності споживачів.

Виходячи з цього, рекомендується така послідовність знаходження кількості та потужності ТП:

а) визначають економічний ступінь потужності трансформаторів $S_{\text{НОМ.Т}}$ залежно від густини навантаження ($S_{\text{ПІТ}} = S_{\Sigma}/F_{\Sigma}$, де S_{Σ} – сумарне навантаження цехів на напрузі $0,38 \text{ кВ}$ ($S_{\Sigma} = \sum S_{p,k}$); F_{Σ} – сумарна площа цехів);

б) визначають економічну кількість одно- або двотрансформаторних підстанцій за формулами

$$N_{\text{ЕК}} \geq \frac{S_{\Sigma}}{S_{\text{НОМ.Т}} \cdot k_3} \text{ або } N_{\text{ЕК}} \geq \frac{S_{\Sigma}}{2 \cdot S_{\text{НОМ.Т}} \cdot k_3};$$

в) розподіляють ТП між цехами і визначають фактичні коефіцієнти завантаження трансформаторів.

Побудова картограми навантажень. Для вибору місць розташування підстанцій будується картограма ЕН і визначається ЦЕН або центр мережі підприємства. Картограму навантажень будують на кресленні генерального плану підприємства. Навантаження кожного з цехів зображається кругом, площа якого пропорційна розрахунковій активності потужності згідно з виразом

$$\pi r_k^2 = m_p P_{pk},$$

де r_k – радіус кола; m_p – масштаб побудови.

Під час графічної побудови центр кола суміщують з геометричним центром зображеного на генплані контуру цеху. Масштаб вибирають таким, щоб побудована картограма ЕН наочно відображала співвідношення потужностей цехів. Круг навантаження кожного цеху ділять на сектори, які характеризують співвідношення силового та освітлювального навантажень.

Для вибору місця розміщення понижувальних підстанцій (наприклад, ГПП) традиційно знаходять центр електричних навантажень (ЦЕН). Координати ЦЕН розраховують за формулами

$$x_0 = \frac{\sum_{k=1}^N P_{p.k} x_k}{\sum_{k=1}^N P_{m.k}}, \quad y_0 = \frac{\sum_{k=1}^N P_{p.k} y_k}{\sum_{k=1}^N P_{m.k}},$$

де $P_{p.k}$ – максимальна активна потужність навантаження k -го об'єкта (цеху); x_k, y_k – координати геометричних центрів об'єктів на генплані підприємства; N – кількість об'єктів (цехів).

Центр електричної мережі. Для зменшення витрат понижувальні підстанції потрібно розміщувати в центрі мережі. Для визначення центра електричної мережі сформулюємо цільові функції у вигляді мінімуму провідникового матеріалу і мінімуму втрат потужності

$$V = \sum V_k = \sum 3s_k l_k = \sum \frac{3I_k}{j_k} l_k = 3 \sum \frac{M_k}{j_k} \rightarrow \min;$$

$$\Delta P = 3 \sum I_k^2 R_k = 3\rho \sum I_k^2 \frac{l_k}{s_k} = 3\rho \sum I_k^2 \frac{l_k}{I_k l j_k} = 3\rho \sum I_k l_k j_k = 3\rho \sum j_k M_k \rightarrow \min.$$

Оскільки обидві функції пропорційні моменту навантаження, то центр електричної мережі знаходять з умови

$$M = \sum I_k l_k = \sum I_k (|x_k - x_e| + |y_k - y_e|) \rightarrow \min,$$

де x_e, y_e – координати центра електричної мережі.

Розкриємо знак абсолютної величини

$$M = \sum_m I_m (x_m - x_e) + \sum_n I_n (x_e - x_n) + \sum_p I_p (y_p - y_e) + \sum_r I_r (y_e - y_r),$$

де x_m, y_p – координати центрів об'єктів, що більші від x_e, y_e ; x_n, y_r – координати центрів об'єктів, що менші від x_e, y_e .

Знаходять частинні похідні та прирівнюють їх до нуля

$$\frac{\partial M}{\partial x_e} = -\sum_m I_m + \sum_n I_n = 0; \quad \frac{\partial M}{\partial y_e} = -\sum_p I_p + \sum_r I_r = 0.$$

Звідси випливає, що центр мережі визначають як медіану розподілення струмів або повних потужностей. Центр мережі можна інтерпретувати як точку, відносно якої зліва і справа, зверху і знизу повні потужності навантажень однакові.

Приклад 3.1 Побудувати картограму ЕН друкарської фабрики. Визначити потужність цехових ТП. Вибрати місця для розміщення підстанцій. На підприємстві передбачається спорудження ГПП. Генеральний план підприємства зображено на рис. 3.4 (масштаб 1:1000). Вихідні дані наведено в табл. 3.5.

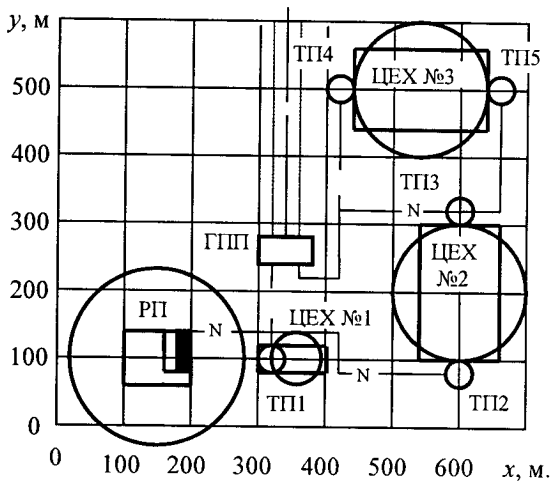


Рисунок 3.4 – Генеральний план підприємства

Таблиця 3.5 – Розрахунок картограми навантажень

Цех	Координати цехів		$P_{p,k}$ кВт	$P_{p.o,k}$ кВт	r_k м
	x_k , м	y_k , м			
Цех № 1	350	100	453	45	54
Цех № 2	600	200	1156	180	86
Цех № 3	550	500	1452	180	96
Компресорна станція (№ 4)	150	100	2960	-	137
Всього			6021		

Розв'язування. Вибираємо масштаб побудови картограми навантажень. Візьмемо радіус круга навантажень цеху № 2 $r_2 = 100$ м. Тоді

$$m_p = \frac{P_{p2}}{\pi r_2^2} = \frac{1156}{3,14 \cdot 100^2} = 0,037 \text{ кВт/м}^2.$$

Вибираємо $m_p = 0,05$ кВт/м² (m_p звичайно вибирають кратним 1, 2, 5). Розраховуємо радіуси кіл за даного масштабу

$$r_1 = \sqrt{\frac{P_{p1}}{\pi m_p}} = \sqrt{\frac{453}{3,14 \cdot 0,05}} = 54 \text{ м.}$$

Аналогічно розраховані радіуси кіл для інших об'єктів.

Будуємо картограму навантажень.

Координати центра електричних навантажень

$$x_0 = \frac{\sum_{k=1}^N P_{pk} x_k}{\sum_{k=1}^N P_{pk}} = \frac{453 \cdot 350 + 1156 \cdot 600 + 1452 \cdot 550 + 2960 \cdot 150}{453 + 1156 + 1452 + 2960} = 348 \text{ м,}$$

$$y_0 = \frac{\sum_{k=1}^N P_{pk} y_k}{\sum_{k=1}^N P_{pk}} = \frac{453 \cdot 100 + 1156 \cdot 200 + 1452 \cdot 500 + 2960 \cdot 100}{453 + 1156 + 1452 + 2960} = 216 \text{ м.}$$

Розрахунок кількості ТП наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Вибір цехових ТП

Цех	Категорія надійності	S_p , кВ·А	F , м ²	$S_{\text{ном.т}} =$ =630 кВ·А		$S_{\text{ном.т}} =$ =1000 кВ·А	
				N , шт	k_3	N , шт	k_3
Цех № 1	II	557	3780	1	0,88	1	0,56
Цех № 2	II	1708	15120	3	0,90	2	0,85
Цех № 3	II	1745	15120	3	0,92	2	0,87
Всього		4010	34020	7		5	

Розв'язування. Визначимо загальне значення розрахункових потужностей цехів і їхню загальну площу

$$S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^3 S_{pi} = 557 + 1708 + 1745 = 4010 \text{ кВ·А;}$$

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^3 F_i = 3780 + 15120 + 15120 = 34020 \text{ м}^2.$$

Середнє питоме навантаження на 1 м² площі

$$S_{\text{пит}} = \frac{S_{\Sigma}}{F_{\Sigma}} = \frac{4010}{34020} \approx 0,12 \text{ кВ·А/м}^2.$$

Розглянемо два варіанти спорудження однострансформаторних підстанцій з $S_{\text{ном.т}} = 630 \text{ кВ·А}$ та $S_{\text{ном.т}} = 1000 \text{ кВ·А}$.

1. Якщо $S_{\text{ек}} = S_{\text{ном.т}} = 630 \text{ кВ·А}$, економічна кількість ТП

$$N_{\text{ек}} = \frac{S_{\Sigma}}{S_{\text{ек}} k_3} = \frac{4010}{630 \cdot (0,9 \dots 0,95)} = 6,7 \div 7,1 \text{ шт.}$$

Отже, необхідно встановити сім ТП-630 кВ·А.

2. Якщо $S_{\text{ек}} = S_{\text{ном.т}} = 1000 \text{ кВ·А}$, $N_{\text{ек}}$ буде дорівнювати

$$N_{\text{ек}} = \frac{S_{\Sigma}}{S_{\text{ек}} k_3} = \frac{4010}{1000 \cdot (0,9 \dots 0,95)} = 4,2 \div 4,5 \text{ шт.}$$

У цьому випадку треба встановити п'ять ТП. Коефіцієнти завантаження трансформаторів наведено в табл. 3.6.

Для остаточного вибору потрібно провести техніко-економічні розрахунки як цехових мереж, так і заводської.

Цехові ТП виконуємо прибудованими, оскільки приміщення технологічних цехів друкарських фабрик відносять до пожежонебезпечних зон класу П-Па, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали за пожежною безпекою. Місця для розміщення ТП вибираємо таким чином, щоб вони з корпусами цехів утворювали єдиний архітектурний ансамбль.

3.3 Вибір кабелів напругою вище 1000 В

Типи кабелів. В мережах напругою 10 кВ переважно використовують кабелі з паперовою ізоляцією та з ізоляцією із зшитого поліетилену.

Для силових кабелів з паперовою ізоляцією в свинцевій або алюмінієвій оболонці напругою 10 кВ допустимою є температура нагрівання жил 60 °С. У разі перевищення цієї температури можливе утворення пустот всередині кабелю. Нагрівання кабелю пов'язано з розширенням кабельної протягнутої маси, яка має більший коефіцієнт температурного розширення, ніж папір. У разі недопустимого нагрівання кабелю розвивається тиск, який викликає залишкову деформацію герметичної оболонки кабелю. Під час охолодження кабелю всередині оболонки утворюються вакуумні і заповнені газом пустоти. Електрична міцність ізоляції на границях таких утворених газових пустот знижується, що кінець кінцем призводить до аварії кабелю.

Зовнішній вигляд кабелів з паперовою ізоляцією зображено на рис. 3.5.

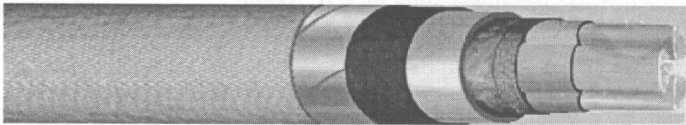


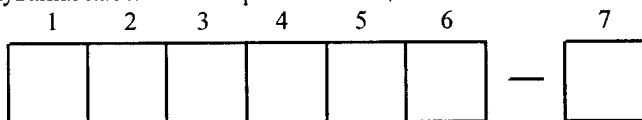
Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд паперових кабелів типу ААБ

Основними конструктивними елементами кабелю є:

- жила – алюмінієвий або мідний одножилний чи багатожильний;
- ізоляція жили – папір, просочений маслосумішшю;
- поясна ізоляція – папір, просочений маслосумішшю;
- оболонка – пресований алюміній або свинець;

- захисний шар – подушка з крепованого паперу і пластмасових стрічок, дві сталеві стрічки і зовнішній шар із скловолокна;
- панцир – виконаний сталевими смугами або оцинкованими дротами;
- зовнішнє захисне покриття – виконане з кабельного прядива.

Маркування кабелів з паперовою ізоляцією



- 1-е місце: А – алюмінієва жила;
- – мідна жила;
- 2-е місце: А – алюмінієва оболонка; С – свинцева оболонка;
- 3-е місце: Б – броня з плоских сталевих смуг;
П – броня з сталевих оцинкованих плоских дротів;
К – броня з круглих оцинкованих дротів;
Г – без броні і без захисного покриття;
- 4-е місце: - – паперова подушка;
л – паперова подушка з пластмасовою смугою;
2л – паперова подушка з двома пластмасовими смугами;
в – випресований полівінілхлоридний шланг;
п – випресований поліетиленовий шланг;
б – без подушки;
- 5-е місце: - – зовнішнє покриття з кабельного прядива;
н – з негорючого скловолокна;
Шв – полівінілхлоридний шланг;
Шп – поліетиленовий шланг;
Шпс – шланг із самозгасного поліетилену;
Г – без зовнішнього покриття на броні;
- 6-е місце: - – паперова ізоляція жил з в'язким просоченням;
У – паперова з підвищеною температурою нагрівання;
В – паперова зі збідненим просоченням;
- 7-е місце: Т – застосування в тропіках;
с – застосування в сільському господарстві.

Силові кабелі з паперовою ізоляцією, які просочені нестікаючою речовиною, позначають буквою Ц на початку.

Кабелі із зшитого поліетилену. Значного поширення набувають кабелі зі зшитого ПЕ. Практика експлуатації показала високу надійність таких кабелів, а їх пошкоджуваність виявилася в 2,5–8 разів меншою, ніж у кабелів з паперово-масляною ізоляцією.

На сьогодні налагоджено виробництво силових кабелів класу напруг 6, 10, 35 кВ у трифазному виконанні (рис. 3.6).

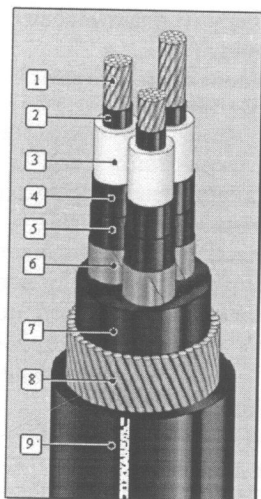


Рисунок 3.6 – Конструкція трижильного кабелю із зшитого ПЕ:

- 1 – багатодротова, ущільнена струмопровідна жила, алюмінієва або мідна;
- 2 – внутрішній екструдований напівпровідний шар;
- 3 – ізоляція із зшитого поліетилену;
- 4 – зовнішній екструдований напівпровідний шар;
- 5 – обмотка напівпровідниковим полотном;
- 6 – мідний екран;
- 7 – екструдована внутрішня оболонка;
- 8 – броня із сталевих оцинкованих дротів;
- 9 – екструдована зовнішня оболонка з ПВХ пластикату або поліетилену

Високі техніко-економічні показники кабелів зі зшитого ПЕ і зростаючі вимоги до підвищення надійності потужних систем електропостачання визначили необхідність створення комплексів для виробництва одножильних кабелів із ЗПЕ ізоляцією на середні й високі напруги. Одножильні кабелі зі ЗПЕ (рис. 3.7) виготовляють на напруги 6; 10; 35; 64/110 кВ.

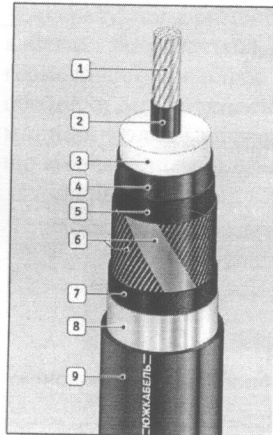


Рисунок 3.7 – Конструкція одножильного кабелю з ізоляцією із зшитого поліетилену:

- 1 – мідна або алюмінієва струмопровідна жила;
- 2 – внутрішній екструдований напівпровідний шар із зшитого ПЕ;
- 3 – екструдована ізоляція кабелю із зшитого поліетилену;
- 4 – зовнішній екструдований напівпровідний шар із зшитого ПЕ;
- 5 – шар електропровідного паперу або напівпровідникової водоблокувальної стрічки;
- 6 – мідний екран;
- 7 – розділювальний шар з кабельного паперу або проумовної тканини;
- 8 – алюмополімерна стрічка;
- 9 – екструдована зовнішня оболонка з ПВХ пластикату або поліетилену

Марки кабелів ПАТ «Завод Південкабель» містять такі позначення.
 Число кабелів — — один одножильний або трижильний (без позначення),
 3× — три одножильних кабелі, які скручені разом.

Матеріал жили А	– алюміній, – мідь, жила (без позначення).
Ізоляція	Пв – зшитий поліетилен.
Екранування	Э – мідний екран по ізольованій жилі, Эо – загальний мідний екран осердя трижильних кабелів, г – поздовжня герметизація екрана водонабухаючими стрічками; га – поздовжня і поперечна герметизація екрана водонабухаючими матеріалами і алюмополімерною стрічкою.
Броня (панцир) Б	– броня із сталевих смуг, К – броня із круглих сталевих дротів, Ак – броня із алюмінієвих круглих дротів.
Оболонка	П – оболонка із поліетилену або співполімеру поліетилену, Пу – посилена поліетиленова оболонка, В – оболонка із ПВХ пластиката, Внг – оболонка із ПВХ пластиката, що не поширює горіння, Внгд – оболонка із ПВХ пластиката, що не поширює горіння і з низьким виділенням диму і корозійних газів.

Використання силових кабелів із зшитого поліетилену, здатних до більших струмових навантажень і пропускнуї потужності за менших ємнісних струмів та діелектричних втрат, ніж у кабелів з паперовою ізоляцією, є світовою тенденцією підвищення надійності та безпеки потужних систем електропостачання.

Порівняння експлуатаційних характеристик кабелів на середні напруги зі ЗПЕ ізоляцією та з паперово-масляною ізоляцією наведено в табл. 3.7.

Відносна діелектрична проникність зшитого ПЕ становить 2,2–2,4; тоді як для кабелів з паперовою ізоляцією – 3,7–4,0, що істотно зменшує ємнісні струми замикання на землю. Коефіцієнт діелектричних втрат $\text{tg}\delta=10^{-4} \dots 10^{-3}$; тоді як для кабелів з паперовою ізоляцією – 10^{-2} , що істотно зменшує втрати електроенергії.

Кабелі зі зшитого ПЕ мають значно вищі технологічні, екологічні та експлуатаційні показники, зокрема, технологія їх виробництва є простішою і в них відсутні екологічно шкідливі рідкі компоненти, що дає змогу прокладати їх з довільними рівнями й кутами нахилу трас та без додаткового підігрівання за низьких температур (до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Це спрощує технологію будівництва та ремонту кабельних ліній особливо в районах щільних забудов, комунікацій, водних та інших перешкод. В табл. 3.8 наведено області застосування кабелів зі зшитого ПЕ.

Таблиця 3.7 – Експлуатаційні показники кабелів на середні напруги (до 35 кВ) з ізоляцією зі ЗПЕ та з паперово-масляною ізоляцією [31]

Основні експлуатаційні показники кабелів	Із зшитую ПЕ ізоляцією	З паперово-масляною ізоляцією
Тривало допустима температура жили	90 °С	60 °С
Температура за перевантажень (протягом 8 год. за 1 добу)	140 °С	90 °С
Максимальна температура жили для струмів КЗ	250 °С	160 °С
Густина струму КЗ для мідної жили (протягом 1 с)	143 А/мм ²	101 А/мм ²
Діелектрична проникність ізоляції, ϵ	2,2–2,4	3,7–4,0
Коефіцієнт діелектричних втрат, $\text{tg}\delta$	$10^{-4} - 10^{-3}$	10^{-2}
Допустимий перепад висот на трасі	Необмежений	≤ 15 м
Температура при прокладанні, не нижче	-20 °С	0 °С
Кількість пошкоджень на 100 км кабелю	< 1,5	> 17
Трудомісткість монтажу та ремонту кабельної лінії	Низька	Висока

Таблиця 3.8 – Область застосування основних марок кабелів із зшитого поліетилену

Марка кабелю	Рекомендовані області застосування
АПвЭгП, ПвЭгП	Для прокладання в землі (траншеях) з високою корозійною активністю ґрунту, за умови захисту кабелю від механічних ушкоджень
АПвЭгаП, ПвЭгаП	Для прокладання в землі, в сирих, частково затоплюваних приміщеннях, в несудноплавних водоймах у разі забезпечення механічного захисту кабелів
АПвЭБП, ПвЭБП, АПвЭАкП, ПвЭАкП	Для прокладання в землі (траншеях) з високою корозійною активністю ґрунту, в місцях, де можливий механічний вплив на кабель
АПвЭКП, ПвЭКП	Те саме, у т. ч. значні розтягувальні зусилля
АПвЭВ, ПвЭВ	Для одиночного прокладання в приміщеннях, каналах і тунелях та для прокладання в сухих ґрунтах за умови захисту кабелю від механічних пошкоджень
АПвЭБВ, ПвЭБВ, АПвЭАкВ, ПвЭАкВ	Для одиночного прокладання в приміщеннях, каналах і тунелях, в сухих ґрунтах, в місцях, де можливий механічний вплив на кабель
АПвЭКВ, ПвЭКВ	Те саме, у т. ч. значні розтягувальні зусилля

Умови вибору високовольтних кабелів:

- за нагрівом;
- за термічною стійкістю до дії струмів КЗ;
- за економічністю.

Вибір кабелів за нагрівом. Перевірка допустимого нагрівання кабелів виконується для нормального та післяаварійного режимів за умовами

$$I_p \leq k_1 k_2 k_3 I_{\text{доп}}; \quad I_{p.\text{па}} \leq \alpha k_1 k_2 k_3 I_{\text{доп}},$$

де I_p – розрахунковий струм; $I_{p.\text{па}}$ – розрахунковий струм для післяаварійного режиму; $I_{\text{доп}}$ – допустиме табличне значення струму для провідника даного типу, перерізу та умов прокладання; k_1, k_2, k_3 – поправні коефіцієнти, що характеризують температуру навколишнього середовища, кількість паралельно прокладених кабелів; питомий термічний опір ґрунта; α – коефіцієнт перевантаження в післяаварійному режимі. В додатку А наведено поправні коефіцієнти відповідно k_1, k_2, k_3 згідно з ПУЕ [5].

Кабелі з паперовою ізоляцією можна перевантажувати протягом п'яти діб на значення, що вказані в ПУЕ [5]. Згідно з ПУЕ для кабелів з паперовою ізоляцією, прокладених в трубах (в землі), в землі, в повітрі, допускаються перевантаження (тривалістю 6 год за коефіцієнта попереднього навантаження 0,8) відповідно на 10, 20, 25%. Для менших тривалостей перевантаження та коефіцієнта попереднього навантаження допустимі перевантаження дещо більші.

Вибір кабелів за термічною стійкістю до дії струмів КЗ. Переріз жил кабелів за термічною стійкістю до дії струмів КЗ

$$s \geq s_{\text{min}} = \frac{I_K \sqrt{t_{\text{вим}}}}{C_T},$$

де I_K – струм КЗ в А; $t_{\text{вим}}$ – сумарний час вимикання струму КЗ, який визначається витримкою часу основного захисту лінії (0,5...2 с), часом спрацювання високовольтного вимикача та відношенням струму КЗ в початковий момент виникнення КЗ до його усталеного значення; C_T – термічний коефіцієнт, $\text{А} \cdot \text{с}^{0,5} / \text{мм}^2$, значення якого становить 90...100 для паперових кабелів [1] і 94 – для кабелів із зшитого ПЕ.

Приклад 3.2. Вибрати кабелі для живлення двотрансформаторної підстанції системи внутрішнього електропостачання підприємства напругою 10 кВ (рис. 3.8). Потужність ТП – 2×1000 кВ·А. Розрахункове навантаження $S_p = 1300$ кВ·А. Струм КЗ $I_K = 2,5$ кА, сумарний час вимикання струму КЗ $t_{\text{вим}} = 1,5$ с. Розрахунок допустимого струму кабелю виконати для таких умов прокладання: середньорічна температура ґрунту – 20 С; термічний опір ґрунту – 1,2 К·м/Вт; глибина прокладання – 0,7 м.

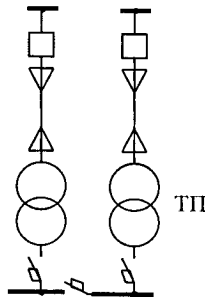


Рисунок 3.8 – Схема живлення двотрансформаторної ТП

Розв’язування. Розрахунковий струм для нормального і післяаварійного режимів

$$I_p = \frac{S_p / 2}{\sqrt{3} U_{\text{ном}}} = \frac{1300 / 2}{\sqrt{3} \cdot 10} = 37,5 \text{ А};$$

$$I_{p.\text{па}} = 2 I_p = 2 \cdot 37,5 = 75 \text{ А}.$$

Переріз жил кабелів за термічною стійкістю до дії струмів КЗ

$$s \geq s_{\text{min}} = \frac{I_k \sqrt{t_{\text{вим}}}}{C_T} = \frac{2500 \sqrt{1,5}}{92} = 33 \text{ мм}^2,$$

де $C_T = 92 \text{ А} \cdot \text{с}^{0,5} / \text{мм}^2$ – для кабелів з алюмінієвими суцільними жилами, паперовою ізоляцією і номінальною напругою 10 кВ, що потребує збільшення перерізу жил кабелю до 35 мм^2 .

Вибираємо кабель ААБ 10 3×35 з допустимим струмом $I_{\text{доп}} = 115 \text{ А}$ для нормальних умов прокладання. Допустимий струм для заданих умов прокладання кабелів в траншеї розраховується за допомогою поправного коефіцієнта $k_1 = 0,93$ (середньорічна температура ґрунту – 20 °С):

$$I'_{\text{доп}} = k_1 I_{\text{доп}} = 0,93 \cdot 115 = 107 \text{ А}.$$

Вибір перерізу кабелів 6, 10, 35 кВ за економічністю. Вибір перерізу кабелів за економічною густиною струму здійснюють за формулою

$$s_{\text{ек}} = \frac{I_p}{j_{\text{ек}}},$$

де $j_{\text{ек}}$ – економічна густина струму.

Сформулюємо задачу визначення економічної густини струму в ЛЕП мережі у вигляді задачі мінімізації зведених річних витрат

$$Z = E(a_0 + a_1 s)l + 3\rho l^2 \frac{l}{s} c_0 \tau \rightarrow \min,$$

де $E = (E_n + E_a + E_o)$ – сумарний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень; a_0, a_1 – коефіцієнти, що характеризують залежності вартості ліній від перерізу.

Знайшовши похідну зведених річних витрат за площею перерізу та прирівнявши її до нуля

$$\frac{\partial Z}{\partial s} = E a_1 l - 3\rho l^2 \frac{l}{s^2} c_0 \tau = 0,$$

отримаємо
$$j_{\text{ек}}^2 = \frac{E a_1}{3\rho c_0 \tau}.$$

Збільшення вартості кабелів приводить до збільшення економічної густини струму, а збільшення часу максимальних витрат і ціни електроенергії, навпаки, до її зменшення.

Значення економічної густини струму для різних типів кабельних та повітряних ЛЕП залежно від часу використання максимального навантаження T_M було наведено в ПУЕ-86. Під час розрахунків економічної густини струму, яка наведена в ПУЕ, було взято $E=0,2$.

Однак економічні умови змінилися і використовувати ці значення не можна, а в ПУЕ-2014 економічна густина струму взагалі відсутня.

Приклад 3.3. Вибрати кабель за економічністю для часу використання максимального навантаження $T_M=5000$ год для прикладу 3.2. В табл. 3.9 наведено вартості кабелів ААБ2л.

Таблиця 3.9 – Вартість кабелів з паперовою ізоляцією в 2016 році

$s, \text{мм}^2$	3×35	3×50	3×70	3×95	3×120	3×150	3×185	3×240
ААБ2л	122,86	138,16	162,39	197,25	227,86	258,89	302,26	373,25

Значення зведених річних витрат, які визначені для кабелів ААБ2л перерізом відповідно 35, 50, 70, 95 мм^2 для часу використання максимального навантаження $T_M=4000$ год ($\tau=2405$ год) станом на 2016 рік ($c_0=2,5$ грн/кВт·год), будуть:

$$Z_{35} = 0,2 \cdot 122,86 + 3 \cdot 37,5^2 \cdot 0,868 \cdot 2,5 \cdot 2405 \cdot 10^{-6} = 46,10 \text{ тис. грн};$$

$$Z_{50} = 0,2 \cdot 138,16 + 3 \cdot 37,5^2 \cdot 0,648 \cdot 2,5 \cdot 2405 \cdot 10^{-6} = 43,67 \text{ тис. грн};$$

$$Z_{70} = 0,2 \cdot 162,39 + 3 \cdot 37,5^2 \cdot 0,443 \cdot 2,5 \cdot 2405 \cdot 10^{-6} = 43,40 \text{ тис. грн};$$

$$Z_{95} = 0,2 \cdot 197,25 + 3 \cdot 37,5^2 \cdot 0,320 \cdot 2,5 \cdot 2405 \cdot 10^{-6} = 47,57 \text{ тис. грн}.$$

Отже, для заданих умов економічними є перерізи кабелів 50 і 70 мм^2 .

Вибір кабелів із зшитого ПЕ за нагрівом. .Перевірка допустимого нагрівання кабелів із зшитого ПЕ виконується для нормального та післяаварійного режимів за умовами

$$I_p \leq k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k_6 I_{\text{доп}}; \quad I_{p.\text{па}} \leq \alpha k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k_6 I_{\text{доп}},$$

де k_1 – коефіцієнт, що характеризує температуру навколишнього середовища; k_2 – коефіцієнт, що характеризує глибину прокладення кабелів в землі; k_3 – коефіцієнт, що характеризує питомий термічний опір ґрунту; k_4 – коефіцієнт, що характеризує кількість паралельно прокладених кабелів в землі; k_5 – коефіцієнт, що характеризує кількість паралельно прокладених кабелів в повітрі; k_6 – коефіцієнт, що характеризує вплив перерізу екрана.

Для кабелів із зшитого ПЕ як базові взято температури 20 °С і 30 °С, відповідно, при прокладанні в землі і в повітрі [5]. В додатку Б наведено значення поправних коефіцієнтів для кабелів із зшитого ПЕ. Для кабелів з ізоляцією зі зшитого ПЕ, прокладених в землі та в повітрі, в післяаварійному режимі допускається перевантаження на 20%. Таке значення отримано з умови знаходження температури струмопровідних жил в діапазоні від 90°С до 130°С тривалістю 8 год протягом доби і сумарною тривалістю не більше 72 год протягом року або 1000 год за термін експлуатації.

Приклад 3.4. Вибрати кабелі для живлення двох двотрансформаторних підстанцій 2×1600 кВ·А системи внутрішнього електропостачання підприємства напругою 10 кВ. Передбачається радіальна схема живлення з прокладанням чотирьох кабелів в траншеї. Розрахункове навантаження $P_p=3200$ кВт, $\cos\varphi=0,8$. Струм КЗ $I_k=2,5$ кА, сумарний час вимикання струму КЗ $t_{\text{вим}}=1,5$ с. Розрахунок допустимого струму кабелю виконати для таких умов прокладання: глибина прокладання – 0,7 м; термічний опір ґрунту – 1,2 К·м/Вт; середньорічна температура ґрунту – 20 °С.

Розв’язування. Розрахунковий струм для нормального і післяаварійного режимів

$$I_p = \frac{P_p / 2}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos\varphi} = \frac{3200 / 4}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,8} = 58 \text{ А};$$

$$I_{p.\text{па}} = 2 I_p = 2 \cdot 58 = 116 \text{ А}.$$

Переріз жил кабелів за термічною стійкістю до дії струмів КЗ

$$s \geq s_{\text{min}} = \frac{I_k \sqrt{t_{\text{вим}}}}{C_T} = \frac{2500 \sqrt{1,5}}{94} = 33 \text{ мм}^2,$$

де $C_T = 94 \text{ А} \cdot \text{с}^{0,5} / \text{мм}^2$ – для кабелів з алюмінієвими жилами та ізоляцією із зшитого поліетилену.

Вибираємо кабель АПвЭгаПу 3×35-10 з допустимим струмом $I_{\text{доп}}=119$ А для нормальних умов прокладання. Допустимий струм для

заданих умов прокладання кабелів в траншеї розраховується за допомогою поправних коефіцієнтів $k_1 = 1,0$ (середньорічна температура ґрунту – 20 °С), $k_2 = 1,09$ (для теплового опору ґрунту 1,2 К·м/Вт), $k_3 = 1,015$ (для глибини прокладання 0,7 м): $k_4 = 0,86$ (для двох кабелів, які залишаються в роботі в післяаварійному режимі):

$$I'_{\text{доп}} = k_2 k_3 k_4 I_{\text{доп}} = 1,09 \cdot 1,015 \cdot 0,86 \cdot 119 = 113 \text{ А.}$$

Вибираємо кабель АПвЕгаПу 3×50-10 з допустимим струмом $I_{\text{доп}} = 140$ А в нормальних умовах прокладання, для якого $I'_{\text{доп}} = 133$ А.

Приклад 3.5. [32] Вибрати кабелі для живлення двох трансформаторів ТМ-4000/10 підприємства. Лінія складається з двох груп одножильних кабелів АПвЕГП, групи можуть бути розташовані трикутником або в площині. Лінія до підприємства прокладається в ґрунті (в траншеї), а на території підприємства по естакаді. Відстань між групами кабелів в траншеї 200 мм, а на естакаді дорівнює діаметру групи кабелів, зв'язаних в трикутник. Лінія має ділянку переходу в трубах довжиною 20 м, прокладених в землі, кожний кабель в окремій трубі. Розрахункова температура повітря 30 °С, ґрунту – 20 °С. Глибина прокладання в землі 1 м, питомий тепловий опір ґрунту становить 100 см·К/Вт.

Розв'язування. Розрахунковий струм кабельної лінії в режимі допустимого перевантаження трансформатора на 40% становить:

$$I_p = \frac{1,4 \cdot S_{\text{н.т}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}}} = \frac{1,4 \cdot 4000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 323,3 \text{ А.}$$

Необхідно вибрати номінальний переріз жили кабелю, допустимий струм для якого не менший 324 А.

Для кабелів, прокладених в землі:

а) для способу прокладання трикутником вибираємо кабель з алюмінієвими жилами, номінальним перерізом жили 240 мм², для якого допустимий струм в землі 367 А.

Допустимий струм для заданих умов прокладання кабелів в траншеї розраховується за допомогою поправних коефіцієнтів $k_2 = 0,97$, $k_3 = 1,18$, $k_4 = 0,83$:

$$I'_{\text{доп}} = k_2 k_3 k_4 I_{\text{доп}} = 0,97 \cdot 1,18 \cdot 0,83 \cdot 367 = 348,7 \text{ А.}$$

Отже, перерізу жили 240 мм² для вибраних умов прокладання достатньо;

б) для способу прокладання в площині: допустимий струм номінального перерізу жили 240 мм² в землі 373 А.

Допустимий струм для заданих умов прокладання кабелю в траншеї визначається з урахуванням коефіцієнтів $k_2 = 0,97$, $k_3 = 1,18$, $k_4 = 0,83$:

$$I'_{\text{доп}} = k_2 k_3 k_4 I_{\text{доп}} = 0,97 \cdot 1,18 \cdot 0,83 \cdot 373 = 354,4 \text{ А;}$$

в) для ділянки кабелю, прокладеного в землі в окремих трубах, допустимий струм становить 351 А; поправні коефіцієнти $k_2 = 0,97$, $k_3 = 1,14$, $k_4 = 0,85$:

$$I'_{\text{доп}} = k_2 k_3 k_4 I_{\text{доп}} = 0,97 \cdot 1,14 \cdot 0,85 \cdot 351 = 329,9 \text{ А};$$

г) для кабелю, прокладеного в повітрі (на естакаді), допустимий струм становить 502 А, поправний коефіцієнт $k_5 = 1,00$:

$$I'_{\text{доп}} = k_5 I_{\text{доп}} = 1,00 \cdot 502 = 502 \text{ А}.$$

Таким чином, вибраний номінальний переріз 240 мм² забезпечує пропускну спроможність лінії по всій довжині траси за вибраних способів прокладання.

Перевірка кабелів із зшитого ПЕ на термічну стійкість до дії струмів КЗ

Для кабелів з ізоляцією зі зшитого ПЕ регламентується значення допустимого струму КЗ $I_{\text{доп.к}(1с)}$ тривалістю 1 с, яке визначене за нагріванням жили від температури 90 °С до гранично допустимої температури 250 °С. Якщо тривалість вимикання КЗ відмінна від 1 с, то допустимий струм розраховують за формулою

$$I_{\text{доп.к}} = \frac{I_{\text{доп.к}(1с)}}{\sqrt{t_{\text{вим}}}}.$$

Для кабелів з ізоляцією зі зшитого ПЕ регламентується також значення допустимого струму КЗ струмопровідного екрана $I_{\text{доп.екр}(1с)}$ тривалістю 1 с. Якщо тривалість вимикання КЗ відмінна від 1 с, то допустимий струм можна перерахувати за вищенаведеною формулою.

Струмопровідні екрани і броню одножильних кабелів заземлюють з обох кінців. Допускається заземлювати струмопровідні екрани одножильних кабелів принаймні в одній точці (з одного кінця). У разі заземлення з одного боку можливий винос високого потенціалу, що створює загрозу для здоров'я людей, а у разі заземлення з обох боків по екрану протікає значний струм, який призводить до перегріву кабелів.

Спосіб заземлення екрана в одній точці дає змогу уникати значних втрат електроенергії в струмопровідних екранах одножильних кабелів під час експлуатації КЛ. Спосіб застосовують із перевіркою значень наведеної струму жили кабелю в нормальному робочому режимі.

Перевірку виконують, виходячи із фактичної довжини КЛ (або ділянки КЛ) і значення питомої наведеної ЕРС на 1 км КЛ, яке визначають для ударного струму КЗ:

$$E = X_{\text{ек}} k_y I_{\text{к}}^{(3)} l,$$

де $X_{\text{ек}}$ – питомий індуктивний опір екрану; k_y – ударний коефіцієнт; $I_{\text{к}}^{(3)}$ – струм трифазного КЗ; l – довжина КЛ.

Наведена напруга на незаземленому кінці екрана в нормальному робочому режимі не має перевищувати допустимого діючого значення напруги змінного струму, що становить 70% значення випробувальної напруги оболонки кабелю постійного струму. Згідно з СОУ 45.2-31032472-10:2009 кабелі напругою 10 кВ дозволено заземлювати з одного боку КЛ, якщо наведено ЕРС

$$E \leq 0,7U_{\text{вип}},$$

де $U_{\text{вип}}$ – випробувальна напруга заводу-виробника.

Значення наведеного струму в екранах одножильних КЛ, що заземлені з обох боків, визначають за формулою:

$$I_{\text{ек}} = I_{\text{ж}} \sqrt{\frac{x_0^2}{x_0^2 + r_{0(70)\text{ек}}^2}},$$

де x_0 – питоме значення взаємоіндуктивного опору; $r_{0(70)\text{ек}}$ – питоме значення активного опору екрана кабелю для температури 70 °С.

Значення наведеного струму в екрані в разі розташування кабелів за схемою «трикутник» впритул один до одного визначають за формулою:

$$I_{\text{ек}} \approx I_{\text{ж}} \sqrt{\frac{0,009}{0,009 + r_{0(70)\text{ек}}^2}}.$$

Значення наведеного струму в екрані в разі розташування кабелів за схемою «у площині» на відстані одного діаметра між кабелями визначають за формулою [5]

$$I_{\text{ек}} = I_{\text{ж}} \sqrt{0,75 \frac{0,017}{0,017 + r_{0(70)\text{ек}}^2} + 0,25 \frac{0,01}{0,01 + r_{0(70)\text{ек}}^2}}.$$

Згідно з Інструкцією ПАТ «Завод Південкабель» перерахунок питомих опорів для температури Θ для мідних і алюмінієвих жил слід виконувати за формулами, відповідно:

$$r_{0(\Theta)} = r_{0(20)} \frac{242,5 + \Theta}{262,5}; \quad r_{0(\Theta)} = r_{0(20)} \frac{228 + \Theta}{248}.$$

Питомий активний опір екрана кабелю розраховують множенням значення опору за стандартної температури 20 °С на коефіцієнт 1,19 для екрана із міді і 1,2 – для екрана з алюмінію [5].

Для одножильних КЛ розрахунковим видом КЗ також є подвійне замикання на землю, яке відбувається в двох місцях КЛ – на з'єднувальній муфті біля ПС на відстані однієї будівельної довжини кабелю (на одній фазі) та на кінцевій муфті біля ПС (на іншій фазі).

3.4 Розрахунок струмів КЗ в мережах напругою вище 1000 В

Розрахунок струмів КЗ виконується з метою перевірки вибраних вимикачів і кабелів. Тому необхідно визначити такі величини: періодичну складову струму трифазного КЗ в початковий момент часу $I_{п0}$, ударний струм КЗ $i_{уд}$, періодичну та аперіодичну складові в момент початку розходження контактів $I_{пт}$ та $i_{ат}$, тепловий імпульс B_K .

Заданою величиною для розрахунку струмів КЗ є опір системи, початкове значення періодичної складової струму КЗ $I_{п0}$ на високій стороні ПС 110/10 кВ, 110/35/10 кВ або потужність трифазного КЗ $S_K = \sqrt{3}U_{в.н}I_{п0}$.

Розрахунок струмів КЗ можна виконувати в іменованих або відносних одиницях. Послідовність розрахунку струмів КЗ така: складають розрахункову схему та заступну схему; вказують точки, в яких необхідно визначити струм КЗ; знаходять опори елементів СЕП; визначають розрахункові величини: $I_{п0}$, $i_{уд}$, $I_{пт}$, $i_{ат}$ від енергосистеми та від високовольтних ЕД, а також тепловий імпульс B_K .

Опори елементів в іменованих одиницях визначають за формулами:

$$X_c = \frac{U_{с.н}^2}{S_K}; \quad X_l = X_0 l \left(\frac{U_{с.н}}{U_{с.н.л}} \right)^2;$$

$$X_T = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{U_{с.н}^2}{S_{ном.т}}; \quad X_d = \frac{X_d''}{100} \cdot \frac{U_{с.н}^2}{S_{ном.д}},$$

де $U_{с.н}$ – середня номінальна напруга точки, в якій виникає КЗ (6,3; 10,5; 37; 115; 230 кВ); $U_{с.н.л}$ – середня номінальна напруга лінії; $U_{к\%}$ – напруга короткого замикання трансформатора; X_d'' – надперехідний опір ЕД; $S_{ном.т}$, $S_{ном.д}$ – номінальні потужності трансформатора та ЕД.

Початкове діюче значення струму трифазного КЗ:

$$I_{п0.с} = \frac{U_{с.н}}{\sqrt{3} \cdot X_{\Sigma}},$$

де X_{Σ} – сумарний опір до точки КЗ.

Приклад 3.6. Визначити струми КЗ в мережі напругою 6 кВ (рис. 3.9), що живиться від енергосистеми через трансформатор 35/6 кВ потужністю 4000 кВ·А ($U_{к\%} = 7,5\%$) за наявності чотирьох потужних високовольтних двигунів СДН 2-17-21-16 потужністю 450 кВт ($X_d'' = 23,8\%$). Потужність КЗ на стороні 35 кВ ГПП 200 МВ·А.

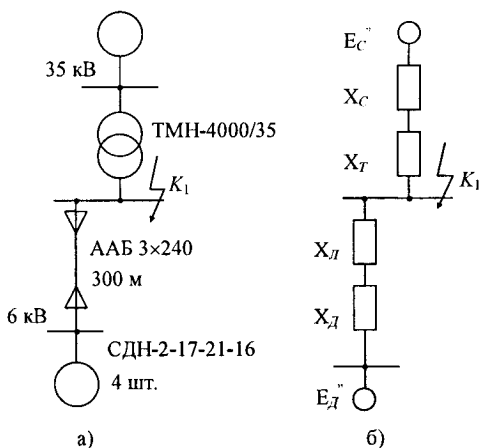


Рисунок 3.9 – Розрахункова та заступна схеми заводської мережі

Розв'язування. Опори елементів заступної схеми:

$$X_c = \frac{U_{c.n}^2}{S_k} = \frac{6,3^2}{200} = 0,198 \text{ Ом};$$

$$X_T = \frac{U_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_{c.n}^2}{S_{ном.т}} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{6,3^2}{4} = 0,744 \text{ Ом};$$

$$X_л = X_{0л} = 0,08 \cdot 0,3 = 0,024 \text{ Ом};$$

$$X_д = \frac{X_{д\%}''}{100} \cdot \frac{U_{c.n}^2}{S_{ном.д}} = \frac{23,8}{100} \cdot \frac{6,3^2}{4 \cdot 0,485} = 4,87 \text{ Ом}.$$

Сумарні опори від системи та від двигунів для точки К1:

$$X_{\Sigma c} = X_c + X_T = 0,198 + 0,744 = 0,942 \text{ Ом}.$$

$$X_{\Sigma д} = X_д + X_л = 4,87 + 0,024 = 4,894 \text{ Ом}.$$

Початкові діючі значення струму трифазного КЗ:

$$I_{п0.c} = \frac{U_{c.n}}{\sqrt{3} \cdot X_{\Sigma c}} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,942} = 3,9 \text{ кА};$$

$$I_{п0.д} = \frac{U_{c.n}}{\sqrt{3} \cdot X_{\Sigma д}} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 4,894} = 0,7 \text{ кА}.$$

Сталі часу загасання аперіодичної складової $T_{a.c} = 0,03 \text{ с}$, $T_{a.д} = 0,037 \text{ с}$
 [1]. Ударний струм КЗ:

$$i_{уд.с} = \sqrt{2}I_{п0.с} \left(1 + e^{-\frac{0,01}{T_{а.с}}} \right) = \sqrt{2} \cdot 3,9 \left(1 + e^{-\frac{0,01}{0,03}} \right) = 9,4 \text{ кА};$$

$$i_{уд.д} = \sqrt{2}I_{п0.д} \left(1 + e^{-\frac{0,01}{T_{а.д}}} \right) = \sqrt{2} \cdot 0,7 \left(1 + e^{-\frac{0,01}{0,037}} \right) = 1,7 \text{ кА}.$$

Періодична складова струму від енергосистеми не змінюється, тому:

$$I_{пт.с} = I_{п0.с} = 3,9 \text{ кА};$$

$$I_{пт.д} = I_{п0.д} \gamma(\tau) = 0,7 \cdot 0,71 = 0,5 \text{ кА},$$

де $\gamma(\tau)$ визначено з графіків [1] для синхронних електродвигунів СДН при

$$\tau = t_{рз.мін} + t_{в.в} = 0,01 + 0,055 = 0,065 \text{ с}.$$

Аперіодична складова струму КЗ для $t = \tau = 0,065 \text{ с}$:

$$i_{а.с} = \sqrt{2}I_{п0.с} e^{-\frac{t}{T_{а.с}}} = \sqrt{2} \cdot 3,9 e^{-\frac{0,065}{0,03}} = 0,6 \text{ кА};$$

$$i_{а.д} = \sqrt{2}I_{п0.д} e^{-\frac{t}{T_{а.д}}} = \sqrt{2} \cdot 0,7 e^{-\frac{0,065}{0,037}} = 0,2 \text{ кА}.$$

Тепловий імпульс визначаємо в такій послідовності.

Стала часу загасання аперіодичної складової схеми:

$$T_{а.сх} = \frac{T_{а.с}I_{п0.с} + T_{а.д}I_{п0.д}}{I_{п0.с} + I_{п0.д}} = \frac{0,03 \cdot 3,9 + 0,037 \cdot 0,7}{3,9 + 0,7} = 0,03 \text{ с}.$$

Стала часу загасання періодичної складової електродвигунів:

$$T_{п.д} \approx -\frac{\tau}{\ln(\tau)} = \frac{-0,065}{\ln 0,71} = 0,19 \text{ с}.$$

Час вимкнення КЗ:

$$t_{вим} = t_{рз} + t_{п.в} = 0,5 + 0,1 = 0,6 \text{ с}.$$

Тепловий імпульс:

$$W_k = I_{п0.с}^2 (t_{вим} + T_{а.сх}) + I_{п0.д}^2 (0,5T_{п.д} + T_{а.сх}) + 2I_{п0.с}I_{п0.д} (T_{п.д} + T_{а.сх}) = \\ = 3,9^2 (0,6 + 0,03) + 0,7^2 (0,5 \cdot 0,19 + 0,03) + 2 \cdot 3,9 \cdot 0,7 (0,19 + 0,03) = 10,8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Струм подвійного КЗ на землю, яке відбувається в двох місцях КЛ – на з'єднувальній муфті біля ПС на відстані однієї будівельної довжини кабелю (на одній фазі) та на кінцевій муфті біля ПС (на іншій фазі) [33, 34] розраховують за формулою

$$I_K^{(1,1)} = \frac{c \cdot U_H}{\sqrt{(X_{1.1C} + X_n)^2 + R_n^2}},$$

де $X_{1.1C}$ – опір системи за подвійного КЗ; R_n – опір петлі фаза–екран.

Реактивний опір системи за подвійного КЗ на землю:

$$X_{1,1C} = \frac{2 \cdot c \cdot U_{\Pi}}{\sqrt{3} I_K^{(3)}}$$

Опір петлі фаза–екран визначають за питомими опорами жили та екрана

$$R_n = (R_{жк} + m \cdot R_{ек}) \cdot l,$$

де $R_{жк}$ – опір жили кабелю для $T=90$ °С, Ом/км; $R_{ек}$ – опір екрана кабелю для $T=70$ °С, Ом/км; m – коефіцієнт струму в екрані ($m=0,9$); l – довжина кабельної лінії, км.

Приклад 3.7. Вибрано кабель АПвЭгП-10 1×240/70. Допустимий односекундний струм короткого замикання для вибраного перерізу жили кабелю 22,7 кА, екрана 14,2 кА [5]. Релейний захист вимикає струм короткого замикання через 0,5 с. Значення струму трифазного КЗ 27 кА. Перевірити екран на термічну стійкість до дії наведеним струмом трифазного КЗ та подвійного КЗ на землю.

Розв’язування. Допустимий струм КЗ тривалістю 0,5 с буде

$$I_{\text{доп.к}} = \frac{I_{\text{доп.к(1с)}}}{\sqrt{t_{\text{вим}}}} = \frac{22,7}{\sqrt{0,5}} = 32,1 \text{ кА.}$$

Допустимий струм короткого замикання для екрана буде

$$I_{\text{доп.к}} = \frac{I_{\text{доп.к(1с)}}}{\sqrt{t_{\text{вим}}}} = \frac{14,2}{\sqrt{0,5}} = 20,1 \text{ кА.}$$

Питомий опір мідного екрана для температури 70 °С

$$r_{0(\Theta)} = r_{0(20)} \frac{242,5 + \Theta}{262,5} = 0,268 \frac{312,5}{262,5} = 0,319 \text{ Ом/км.}$$

Значення наведеного струму в екрані одножильних кабелів у разі розташування кабелів у вершинах рівностороннього трикутника впритул один до одного та в площині будуть, відповідно

$$I_{\text{ек.тр}} = 27 \frac{0,097}{\sqrt{0,097^2 + 0,319^2}} = 27 \cdot 0,29 = 7,9 \text{ кА,}$$

$$I_{\text{ек.пл}} = 27 \frac{0,150}{\sqrt{0,150^2 + 0,319^2}} = 27 \cdot 0,43 = 11,5 \text{ кА.}$$

Таким чином, вибраний кабель АПвЭгП-10 1×240/70 умовам термічної стійкості екрана до наведеного струму відповідає.

Для першої точки КЗ, що знаходиться на кінцевій муфті на початку лінії величина струму $K(1,1)$ в мережі з ізолюваною (компенсованою) нейтраллю може бути знайдена як:

$$I_K^{(1,1)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_K^{(3)} = 3,282 \text{ кА;}$$

де $I_K^{(3)}$ – максимальний струм трифазного КЗ в точці приєднання до мережі.

Реактивний опір системи за подвійного КЗ на землю:

$$X_{1,1C} = \frac{2 \cdot c \cdot U_H}{\sqrt{3} I_K^{(3)}} = 3,359 \text{ Ом}$$

де $c=1,05$.

За питомими опорами жили та екрана визначимо опір петлі фаза–екран

$$R_n = (R_{жс} + m \cdot R_{ек}) \cdot l = 0,207 \text{ Ом},$$

де R_n – опір петлі фаза–екран, Ом; $R_{жс}$ – опір жили кабелю для $T=90$ °С, Ом/км; $R_{ек}$ – опір екрана кабелю для $T=70$ °С, Ом/км; m – коефіцієнт струму в екрані ($m=0,9$); l – довжина кабельної лінії, км.

Визначаємо струм подвійного КЗ на землю

$$I_K^{(1,1)} = \frac{c \cdot U_H}{\sqrt{(X_{1,1C} + X_n)^2 + R_n^2}} = 3,22 \text{ кА}.$$

Розрахунковий струм подвійного замикання на землю значно менший, що задовольняє вимоги. Тобто, екран перерізом 35 мм^2 буде термічно стійким у даному випадку.

3.5 Вибір високовольтних вимикачів

В останні роки для електричних мереж напругою 6, 10, 35 кВ переважно застосовують вакуумні вимикачі. Їх частка в країнах Європи та США досягає 70 %, в Японії – 100 %. Вакуум як дугогасильне та ізолювальне середовище завдяки своїм властивостям дозволяє створювати комутаційні апарати в найпростішому з конструктивної точки зору вигляді.

Основні параметри і характеристики вимикачів ВРС 10 Рівненського заводу високовольтної апаратури наведено в табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Технічні дані вимикачів

№	Найменування параметра	ВРС10
1	Номінальний струм ($I_{ном.в}$), А	630, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000
2	Номінальний струм вимкнення ($I_{н.вимк}$), кА	20, 31,5, 40
3	Струм електродинамічної стійкості ($i_{дин}$), кА	52, 80, 102
4	Струм термічної стійкості (I_T), кА (3с)	20, 31,5, 40
5	Власний час ввімкнення, мс	90, 120
6	Власний час вимкнення, мс	35–50
7	Повний час вимкнення, мс	65

Продовження таблиці 3.10

№	Найменування параметра	ВРС10
8	Допустимий вміст аперіодичної складової, %	40, 35, 40
9	Комутаційний ресурс, для $I_{\text{ном}}=1000 \text{ А}$	50000, 30000, 10000
10	Комутаційний ресурс, для $I_{\text{н.вимк.}}=20 \text{ кА}$	100, 40, 50

Високовольтні вимикачі вибирають за номінальною напругою і розрахунковим струмом з врахуванням післяаварійних режимів та можливих нерівномірностей розподілу струмів між лініями і секціями шин

$$U_{\text{ном.в}} \geq U_{\text{ном.мережі}}; I_{\text{ном.в}} \geq I_{\text{р.па}}$$

де $I_{\text{р.па}}$ – розрахунковий струм для післяаварійного режиму.

Високовольтні вимикачі мають бути перевірені на комутаційну здатність, на динамічну стійкість, а також на термічну стійкість до дії струмів КЗ. Перевірка комутаційної здатності здійснюється за умовами

$$I_{\text{н.вимк.}} \geq I_{\text{пт}}; \sqrt{2}I_{\text{н.вимк.}} \left(1 + \frac{\beta_{\text{н}}}{100}\right) \geq \sqrt{2}I_{\text{пт}} + i_{\text{ат}},$$

де $I_{\text{н.вимк.}}$ – номінальний струм вимкнення вимикача; $\beta_{\text{н}}$ – нормований процентний вміст аперіодичної складової струму КЗ (30%...40%); $I_{\text{пт}}$, $i_{\text{ат}}$ – відповідно періодична та аперіодична складові струму КЗ на момент початку розходження контактів вимикача, тобто на момент початку розмикання; τ – розрахунковий час початку розмикання ($\tau = t_{\text{рз.мін}} + t_{\text{в.в}}$).

Перша умова характеризує здатність до розмикання періодичної складової струму КЗ, а друга – здатність до розмикання повного струму з урахуванням аперіодичної складової струму КЗ.

Перевірка вимикачів на динамічну стійкість до дії струмів КЗ здійснюється за умовами

$$I_{\text{дин}} \geq I_{\text{п0}}; i_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд}},$$

де $I_{\text{дин}}$, $i_{\text{дин}}$ – діюче та максимальне миттєве значення повного струму електродинамічної стійкості, який проходить через вимикач і не пошкоджує його; $i_{\text{уд}}$ – ударний струм КЗ.

Перевірка вимикачів на термічну стійкість до дії струмів КЗ здійснюється за умовою

$$I_{\text{т}}^2 t_{\text{т}} \geq B_{\text{к}},$$

де $I_{\text{т}}$ – струм термічної стійкості вимикача протягом часу $t_{\text{т}}$ (3 с); $B_{\text{к}}$ – розрахункове значення теплового імпульсу.

Приклад 3.8. Вибрати високовольтні вимикачі двотрансформаторної ПС 35/6 кВ з трансформаторами потужністю 4000 кВ·А. Для установлення на стороні 6 кВ вибрано вакуумні вимикачі ВРС 10. Власний час

вимкнення вимикача 0,05 с. Перевірити вимикачі на стійкість до дії струмів КЗ. Результати розрахунку струмів КЗ взяти з прикладу 3.7.

Розв'язування. Розрахунок струмів для нормального та післяаварійного режимів

$$I_{Т.НОМ} = \frac{S_{Т.НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 6} = 385 \text{ А};$$

$$I_{р.па}^{ВВ} = 1.8 \cdot I_{Т.НОМ} = 1.8 \cdot 385 = 693 \text{ А};$$

$$I_{р.па}^{СВ} = 1.4 \cdot I_{Т.НОМ} = 1.4 \cdot 385 = 539 \text{ А}.$$

Номинальний струм ввідних, секційного та відхідних вимикачів $I_{НОМ.В} = 1000 \text{ А} > I_{р.па}^{ВВ}$, $I_{НОМ.В} = 630 \text{ А} > I_{р.па}^{СВ}$, $I_{НОМ.В} = 630 \text{ А} > I_{р.па}^B$. Умови вибору вимикачів наведено в табл. 3.11.

Таблиця 3.11 – Вибір вимикачів ГПП

Умови вибору	Дані для вимикачів	Дані розрахунків
$I_{Н.ВИМК.} \geq I_{ПТ}$	$I_{Н.ВИМК.} = 20 \text{ кА}$	$I_{ПТ} = I_{ПТ.С} + I_{ПТ.Д} = 3,9 + 0,5 = 4,4 \text{ кА}$
$\sqrt{2}I_{Н.ВИМК.} \left(1 + \frac{\beta_{Н}}{100}\right) \geq \sqrt{2}I_{ПТ} + i_{аТ}$	$\sqrt{2}I_{Н.ВИМК.} \left(1 + \frac{\beta_{Н}}{100}\right) \geq \sqrt{2} \cdot 20 \cdot \left(1 + \frac{30}{100}\right) = 36,8 \text{ кА}$	$\sqrt{2}I_{ПТ} + i_{аТ} = \sqrt{2} \cdot 4,4 + (0,6 + 0,2) \approx 7,0 \text{ кА}$
$i_{ДИН} \geq i_{УД}$	$i_{ДИН} = 51 \text{ кА}$	$i_{УД} = i_{УД.С} + i_{УД.Д} = 9,4 + 1,7 = 11,1 \text{ кА}$
$I_{Т}^2 t_{Т} \geq B_{К}$	$I_{Т}^2 t_{Т} = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}$	$B_{К} = 10,8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

Приклад виконання головної схеми підстанції підприємства наведено на рис. 3.10. У цьому випадку ввід в підстанцію виконано одножильними кабелями зі зшитого поліетилену.

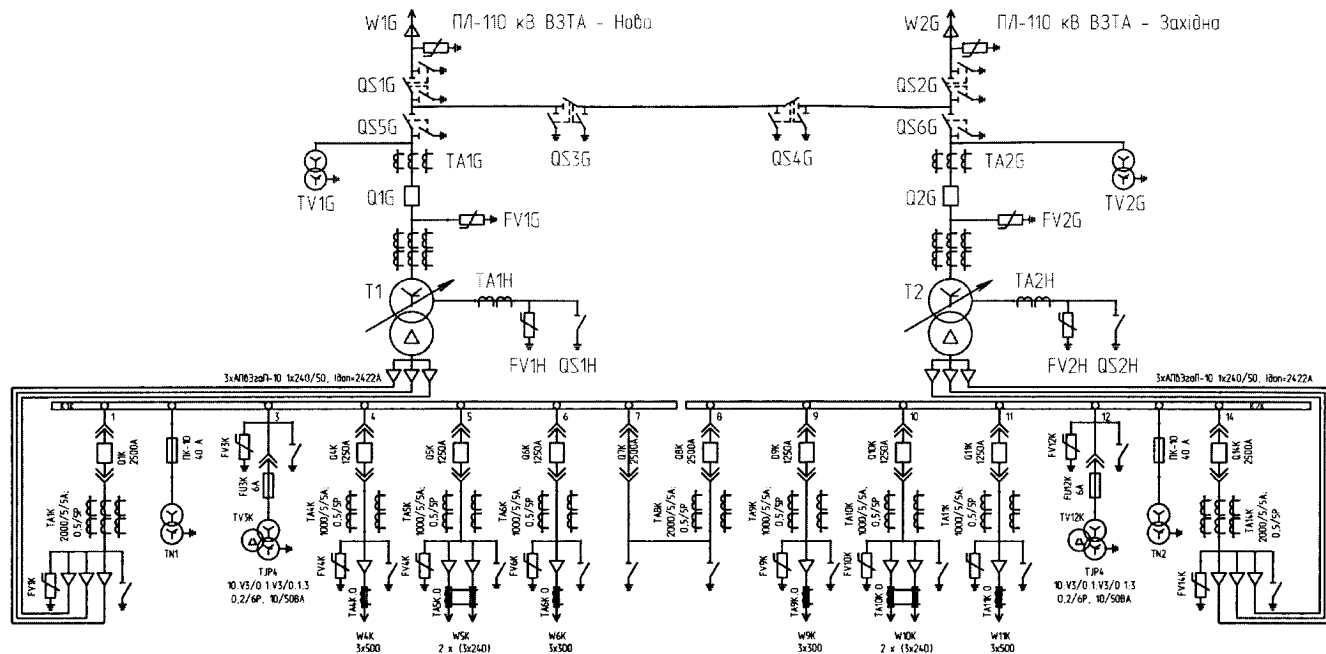


Рисунок 3.10 – Головна схема підстанції підприємства

ЛІТЕРАТУРА

1. Справочник по проектированию электроснабжения / [под ред. Ю. Г. Барыбина и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
2. Электрические нагрузки промышленных предприятий / [Волобринский С. Д., Каялов Г. М., Клейн П. И., Мешель Б. С.]. – Л. : Энергия, 1971. – 264 с.
3. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию / [под ред. А. А. Федорова]. – М. : Энергоатомиздат, 1986.
Т.1 – 580 с., 1987.
Т.2 – 591с.
4. Указания по расчету электрических нагрузок (РТМ 36.18.32.4-92). – М. : ВНИПИ Тяжпромэлектропроект, 1992.
5. Правила улаштування електроустановок. – Міненерговугілля України, 2014. – 793 с.
6. Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення : ДБН В.2.5-23:2010. – [Чинні від 2010–10–01]. – К. : Мін-во регіонального розвитку та будівництва України, 2010.
7. IEC60364-5-52-2009. Low Voltage Electrical Installations. Part 5-52.
8. IEC 60502-1. 2004. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). – Part 1: Cables for rated voltages of 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) and 3 kV ($U_m = 3,6$ kV).
9. Струми короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 0. Обчислення сили струму (IEC 60909-0:2001, ITD) : ДСТУ IEC 60909-0:2007. – [Чинний від 2009-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2009.
10. Струми короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 4. Обчислення сили струму короткого замикання (IEC TR 60909-4:2000, ITD) : ДСТУ IEC TR 60909-4:2008. – [Чинний від 2009-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2009.
11. Методичні вказівки СОУ-Н ЕЕ 40.11-21677681-48. Розрахунок струмів короткого замикання в мережі напругою до 1 кВ електростанцій та підстанцій з урахуванням впливу електричної дуги. – К. : Міністерство енергетики та вугільної промисловості, 2011. – 80 с.
12. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ : ГОСТ

- 28249-93. – [Действ. с 1995-01-01]. – М. : Издательство стандартов, 1994. – 66 с.
13. Беляев, А. В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ / А. В. Беляев. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 176 с.
 14. SACE Tmax XT. Новые низковольтные автоматические выключатели на номинальный ток до 250 А. Технический каталог.
 15. ABB Tmax. Низковольтные автоматические выключатели на номинальный ток до 1600 А. Каталог.
 16. ABB Emax. Низковольтные автоматические выключатели на номинальный ток от 800 до 6300 А. Каталог.
 17. Автоматические выключатели и выключатели-разъединители низкого напряжения Compact NS 80-1600 А. Каталог 2006.
 18. Автоматические выключатели и выключатели нагрузки низкого напряжения на большие токи Masterpact NT и NW. Каталог 2006.
 19. Руководство по устройству электроустановок. Технические решения «Шнейдер Электрик» / Техническая коллекция Schneider Electric. – 2009. – 469 с.
 20. Аппаратура распределения и управления до 4000 А/ Техническое руководство Legrand. – 2011. – 276 с.
 21. SIEMENS. Circuit breakers. 3VT molded case circuit breakers up to 1600 А. – 2008. – 262 с.
 22. Автоматические выключатели серий IZMX16, IZMX40. Каталог 2012.
 23. Автоматические выключатели в литых корпусах HYUNDAI: серия Hi. Каталог.
 24. Автоматические выключатели в литом корпусе (MCSE) HYUNDAI: серия U. Каталог.
 25. Промышленные автоматические выключатели ETIPBREAK. Каталог 2011.
 26. Воздушные автоматические выключатели ETIPOWER. Каталог.
 27. Селективность автоматических выключателей АББ в сетях низкого напряжения. Серия проектировщика. – 2007. – № 1. – 54 с.
 28. Зорин В. В. Системы электроснабжения общего назначения : учебник для студентов вузов / В. В. Зорин, В. В. Тисленко. – Чернигов : ЧГТУ, 2005. – 341 с.
 29. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: Проектирование и расчет / А. С. Овчаренко и др. – Киев : Техніка, 1987. – 185 с.
 30. IEC 60076-7:2005. Power transformers – P. 7: Loading guide for oil-immersed power transformers. – 2005. – 62 p.

31. Золотарьов В. М. Електротехнологічний комплекс для виробництва високовольтних та надвисоковольтних кабелів з полімерною ізоляцією : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук : спеціальність 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / В. М. Золотарьов. – К. : ІЕД НАН України. – 2010. – 40 с.
32. РД К28-003-2007. Руководство по выбору, прокладке, монтажу, испытаниям и эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 6 до 35 кВ ЗАО завод «Южкбель».
33. Дмитриев М. В. Заземление экранов силовых кабеле 6–500 кВ / Дмитриев М. В.– СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2010. – 152 с.
34. Зорін В. В. Електричні мережі та системи / В. В. Зорін, Є. А. Штогрин, Р. О. Буйний. – Ніжин: В-во «Аспект-Поліграф», 2011. – 248 с.

Додаток А

Допустимий струм для проводів та кабелів з пластмасовою та паперовою ізоляцією

Таблиця А.1 – Допустимий тривалий струм для проводів з полівінілхлоридною та гумовою ізоляцією з мідними жилами

Переріз струмо- провідної жили, мм ²	Струм, А, для проводів, прокладених					
	від- крито	в одній трубі				
		двох одно- жильних	три одно- жильних	чотири одно- жильних	одного дво- жильного	одного три- жильного
1,5	23	19	17	16	18	15
2,5	30	27	25	25	25	21
4	41	38	35	30	32	27
6	50	46	42	40	40	34
10	80	70	60	50	55	50
16	100	85	80	75	80	70
25	140	115	100	90	100	85
35	170	135	125	115	125	100
50	215	185	170	150	160	135
70	270	225	210	185	195	175
95	330	275	255	225	245	215
120	385	315	290	260	295	250
150	440	360	330			
185	510					
240	605					
300	695					
400	830					

Таблиця А.2 – Допустимий тривалий струм для проводів з полівінілхлоридною та гумовою ізоляцією з алюмінієвими жилами

Переріз струмо- провідної жили, мм ²	Струм, А, для проводів, прокладених					
	від- крито	в одній трубі				
		двох одно- жильних	три одно- жильних	чотири одно- жильних	одного дво- жильного	одного три- жильного
2,5	24	20	19	19	19	16
4	32	28	28	23	25	21
6	39	36	32	30	31	26
10	60	50	47	39	42	38
16	75	60	60	55	60	55
25	105	85	80	70	75	65

Продовження таблиці А.2

35	130	100	95	85	95	75
50	165	140	130	120	125	105
70	210	175	165	140	150	135
95	255	215	200	175	190	165
120	295	245	220	200	230	190
150	340	275	255			
185	390					
240	465					
300	535					
400	645					

Таблиця А.3 – Допустимий тривалий струм для проводів з мідними жилами з гумовою ізоляцією в металевих захисних оболонках і кабелів з мідними жилами з гумовою ізоляцією у свинцевій, полівінілхлоридній, найритовій або гумовій оболонках, броньованих і неброньованих

Переріз струмопровідної жили, мм ²	Три-, чотирижильних у разі прокладання	
	в повітрі	в землі
1,5	19	27
2,5	25	38
4	35	49
6	42	60
10	55	90
16	75	115
25	95	150
35	120	180
50	145	225
70	180	275
95	220	330
120	260	385
150	305	435
185	350	500

Примітка. Струми наведено для проводів і кабелів як з PEN-жилою, так і без неї

Таблиця А.4 – Допустимий тривалий струм для кабелів з алюмінієвими жилами з гумовою або пластмасовою ізоляцією в свинцевій, полівінілхлоридній і гумовій оболонках, броньованих і неброньованих

Переріз струмопровідної жили, мм ²	Трижильних у разі прокладання	
	в повітрі	в землі
2,5	19	29
4	27	38
6	32	46
10	42	70
16	60	90
25	75	115
35	90	140
50	110	175
70	140	210
95	170	225
120	200	295
150	235	335
185	270	385

Примітка. Допустимі тривалі струми для чотирижильних кабелів з пластмасовою ізоляцією на напругу до 1 кВ можна вибирати за таблицею як для трижильних кабелів, але з коефіцієнтом 0,92.

Таблиця А.5 – Допустимий тривалий струм для кабелів з мідними жилами та ізоляцією з полівінілхлоридного пластикату і полімерних композицій, що не містять галогенів

Номінальний переріз жили, мм ²	Допустимі струмові навантаження кабелів, А			
	одножильних ¹		багатожильних ²	
	у повітрі	у землі	у повітрі	у землі
1	2	3	4	5
1,5	22	30	21	27
2,5	30	39	27	36
4	39	50	36	47
6	50	62	46	59
10	68	83	63	79
16	89	107	84	102
25	121	137	112	133
35	147	163	137	158
50	179	194	167	187
70	226	237	211	231
95	280	285	261	279
120	326	324	302	317
150	373	364	346	358

Продовження таблиці А.5

1	2	3	4	5
185	431	412	397	405
240	512	477	472	471
300	591	539	542	533
400	685	612	633	611
500	792	690		
625/630	910	774		
800	1030	856		
1000	1143	933		

Таблиця А.6 – Допустимий тривалий струм для кабелів з алюмінієвими жилами та ізоляцією з полівінілхлоридних пластикатів і полімерних композицій, які не містять галогенів

Номинальний переріз жили, мм ²	Допустимі струмові навантаження кабелів, А			
	Одножильних ¹		Багатожильних ²	
	у повітрі	у землі	у повітрі	у землі
2,5	22	30	21	28
4	30	39	29	37
6	37	48	37	44
10	50	63	50	59
16	68	82	67	77
25	92	106	87	102
35	113	127	106	123
50	139	150	126	143
70	176	184	161	178
95	217	221	197	214
120	253	252	229	244
150	290	283	261	274
185	336	321	302	312
240	401	374	359	363
300	464	423	424	417
400	544	485	501	482
500	636	556		
625/630	744	633		
800	858	713		
1000	972	793		

Примітки.

1. Прокладання за схемою «у трикутник» впритул.

2. Для визначення допустимих струмових навантажень чотирижильних кабелів з жилами однакового перерізу в чотирипровідних мережах у разі завантаження всіх жил в усталеному режимі, а також для п'ятижильних кабелів ці значення потрібно помножити на коефіцієнт 0,93.

Таблиця А.7 – Допустимий тривалий струм для кабелів з мідними жилами і з ізоляцією із зшитого поліетилену на напругу до 3 кВ за змінного струму

Номинальний переріз жили, мм ²	Допустимі струмові навантаження кабелів, А			
	одножильних ¹		багатожильних ²	
	у повітрі	у землі	у повітрі	у землі
1,5	28	33	25	31
2,5	36	42	34	40
4	47	54	45	52
6	59	67	56	64
10	82	89	78	86
16	108	115	104	112
25	146	147	141	144
35	180	176	172	173
50	220	208	209	205
70	279	255	265	253
95	345	306	327	304
120	403	348	381	347
150	464	392	437	391
185	538	443	504	442
240	641	515	598	515
300	739	501	688	583
400	860	661	807	669
500	997	746		
625/630	1149	840		
800	1302	932		
1000	1451	1019		

Примітка 1. Прокладання за схемою «у трикутник» впритул.

Примітка 2. Для визначення допустимих струмових навантажень чотирижильних кабелів з жилами однакового перерізу в чотирипровідних мережах у разі завантаження всіх жил в установленому режимі, а також для п'ятижильних кабелів ці значення потрібно помножити на коефіцієнт 0,93.

Таблиця А.8 – Допустимий тривалий струм для кабелів з алюмінієвими жилами та ізоляцією із зшитого поліетилену на напругу до 3 кВ за змінного струму

Номінальний переріз жили, мм ²	Допустимі струмові навантаження кабелів, А			
	Одножильних ¹		Багатожильних ²	
	у повітрі	у землі	у повітрі	у землі
2,5	26	34	24	32
4	35	44	34	42
6	43	54	43	50
10	58	71	58	67
16	79	93	78	87
25	112	114	108	112
35	138	136	134	135
50	171	161	158	157
70	216	198	203	195
95	267	237	248	233
120	313	271	290	267
150	360	304	330	299
185	419	346	382	341
240	501	403	453	397
300	580	455	538	455
400	682	523	636	527
500	800	599		
625/630	936	685		
800	1081	773		
1000	1227	862		

Примітка 1. Прокладання за схемою «у трикутник» впритул.

Примітка 2. Для визначення допустимих струмових навантажень чотирижильних кабелів з жилами однакового перерізу в чотирипровідних мережах у разі завантаження всіх жил в усталеному режимі, а також для п'ятижильних кабелів ці значення потрібно помножити на коефіцієнт 0,93.

Таблиця А.9 – Допустимий тривалий струм для трижильних кабелів з алюмінієвими жилами з паперовою ізоляцією в свинцевій або алюмінієвій оболонці, прокладених в землі

Переріз струмопровідної жили, мм ²	Струм, А для кабелів		
	трижильних напругою, кВ		чотирижильних до 1 кВ
	6	10	
10	60	–	65
16	80	75	90
25	105	90	115
35	125	115	135
50	155	140	165
70	190	165	200
95	225	205	240
120	260	240	270
150	300	275	305
185	340	310	345
240	390	355	–

Таблиця А.10 – Допустимий тривалий струм для трижильних кабелів з алюмінієвими жилами з паперовою ізоляцією в свинцевій або алюмінієвій оболонці, прокладених в повітрі

Переріз струмопровідної жили, мм ²	Струм, А для кабелів		
	трижильних напругою, кВ		чотирижильних до 1 кВ
	6	10	
10	42	-	45
16	50	46	60
25	70	65	75
35	85	80	95
50	110	105	110
70	135	130	140
95	165	155	165
120	190	185	200
150	225	210	230
185	250	235	260
240	290	270	-

Таблиця А.11 – Поправний коефіцієнт на струми для кабелів, неізолюваних і ізолюваних проводів і шин залежно від температури землі і повітря

Нормована температура середовища, °С	Нормована температура жил, °С	Поправний коефіцієнт на струми для розрахункової температури середовища, °С												
		-5 і нижче	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50	
15	80	1,14	1,11	1,08	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78	0,73	0,68	
25	80	1,24	1,20	1,17	1,13	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,74	
25	70	1,29	1,24	1,20	1,15	1,11	1,05	1,00	0,94	0,88	0,81	0,74	0,67	
15	65	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63	0,55	
25	65	1,32	1,27	1,22	1,17	1,12	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61	
15	60	1,20	1,15	1,12	1,06	1,00	0,94	0,88	0,82	0,75	0,67	0,57	0,47	
25	60	1,36	1,31	1,25	1,20	1,13	1,07	1,00	0,93	0,85	0,76	0,66	0,54	
15	55	1,22	1,17	1,12	1,07	1,00	0,93	0,86	0,79	0,71	0,61	0,50	0,36	
25	55	1,41	1,35	1,29	1,23	1,15	1,08	1,00	0,91	0,82	0,71	0,58	0,41	
15	50	1,25	1,20	1,14	1,07	1,00	0,93	0,84	0,76	0,66	0,54	0,37	-	
25	50	1,48	1,41	1,34	1,26	1,18	1,09	1,00	0,89	0,78	0,63	0,45	-	

Таблиця А.12 – Поправний коефіцієнт на кількість працюючих кабелів, які лежать поряд в землі (у трубах або без труб)

Відстань між кабелями в просвіті, мм	Коефіцієнт за кількості кабелів					
	1	2	3	4	5	6
100	1,00	0,90	0,85	0,80	0,78	0,75
200	1,00	0,92	0,87	0,84	0,82	0,81
300	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86	0,85

Таблиця А.13 – Поправний коефіцієнт на допустимий тривалий струм для кабелів, прокладених в землі, залежно від питомого термічного опору землі

Характеристика землі	Питомий опір, см·К/Вт	Поправний коефіцієнт
Пісок вологістю понад 9%, піщано-глинистий ґрунт вологістю понад 14%	80	1,05
Нормальні ґрунт і пісок вологістю 7–9%, піщано-глинистий ґрунт вологістю 12–14%	120	1,00
Пісок вологістю понад 4% і менше 7%, піщано-глинистий ґрунт вологістю 8–12%	200	0,87
Пісок вологістю до 4%, кам'янистий ґрунт	300	0,75

Таблиця А.14 – Допустимі струми короткого замикання для кабелів із ПВХ пластикатів і композицій, що не містять галогенів, кабелів із зшитого поліетилену, а також вогнестійких кабелів

Номінальний переріз жили, мм ²	Допустимі струми односекундного короткого замикання кабелів, кА з ізоляцією			
	із ПВХ пластикатів і композицій, що не містять галогенів		із зшитого поліетилену, а також вогнестійких кабелів	
	Мідна жила	Алюмінієва жила	Мідна жила	Алюмінієва жила
1,5	0,17	-	0,21	-
2,5	0,27	0,18	0,34	0,22
4	0,43	0,29	0,54	0,36
6	0,65	0,42	0,81	0,52
10	1,09	0,70	1,36	0,87
16	1,74	1,13	2,16	1,40
25	2,78	1,81	3,46	2,24
35	3,86	2,50	4,80	3,09
50	5,23	3,38	6,50	4,18
70	7,54	4,95	9,38	6,12
95	10,48	6,86	13,03	8,48
120	13,21	8,66	16,43	10,71
150	16,30	10,64	20,26	13,16
185	20,39	13,37	25,35	16,53
240	26,80	17,54	33,32	21,70
300	33,49	21,90	41,64	27,12
400	39,60	26,00	55,20	36,16
500	49,50	32,50	69,00	45,20
625/630	62,37	40,95	86,95	56,95
800	79,20	52,00	110,40	72,33
1000	99,00	65,00	138,00	90,40

Додаток Б

Допустимий струм для кабелів із зшитого ПЕ на напругу до 35 кВ

Таблиця Б.1 – Допустимий тривалий струм для одножильних кабелів із зшитого ПЕ з мідними жилами на напругу до 35 кВ

Переріз струмо-провідної жили, мм ²	безпосередньо в землі		в трубах в землі		в повітрі		
	трикутник	площина з просвітом	трикутник	площина поряд	трикутник	площина поряд	площина з просвітом
1×35	166	172	157	159	198	203	238
1×50	196	203	186	188	238	243	286
1×70	239	246	227	229	296	303	356
1×95	285	293	271	274	361	369	434
1×120	323	332	308	311	417	426	500
1×150	361	366	343	347	473	481	559
1×185	406	410	387	391	543	550	637
1×240	469	470	447	453	641	647	745
1×300	526	524	510	510	735	739	846
1×400	590	572	571	571	845	837	938
1×500	651	630	631	617	980	957	1056
1×630	724	694	702	680	1113	1077	1182
1×800	795	756	771	741	1255	1203	1312

Таблиця Б.2 – Допустимий тривалий струм для одножильних кабелів із зшитого ПЕ з алюмінієвими жилами на напругу до 35 кВ

Переріз струмо-провідної жили, мм ²	безпосередньо в землі		в трубах в землі		в повітрі		
	трикутник	площина з просвітом	трикутник	площина поряд	трикутник	площина поряд	площина з просвітом
1×35	129	134	122	123	154	157	185
1×50	152	157	144	146	184	189	222
1×70	186	192	176	178	230	236	278
1×95	221	229	210	213	280	287	338
1×120	252	260	240	242	324	332	391
1×150	281	288	267	271	368	376	440
1×185	317	324	303	307	424	432	504
1×240	367	373	351	356	502	511	593
1×300	414	419	397	402	577	586	677
1×400	470	466	451	457	673	676	769
1×500	526	522	505	512	786	785	881
1×630	593	584	569	572	907	899	1001
1×800	664	647	637	634	1041	1024	1132

Таблиця Б.3 – Допустимий тривалий струм для трижильних неброньованих кабелів із зшитого ПЕ з мідними та алюмінієвими жилами на напругу до 35 кВ

Переріз струмо-провідної жили, мм ²	Номінальний переріз екрана, мм ²	Допустимий струм для кабелів з мідними та алюмінієвими жилами у разі прокладання					
		мідних			алюмінієвих		
		в землі безпосередньо	в землі в трубі	в повітрі	в землі	в землі в трубі	в повітрі
3×35	16	153	133	170	119	103	132
3×50*	16	181	158	204	140	122	158
3×70*	16	221	193	253	171	150	196
3×95*	16	262	231	304	203	179	236
3×120*	16	298	264	351	232	205	273
3×150	25	334	297	398	260	231	309
3×185	25	377	336	455	294	262	355
3×240	25	434	390	531	340	305	415
3×300	25	489	441	606	384	346	472

Примітка. * – кабелі, які виготовляються на напругу 35 кВ.

Таблиця Б.4 – Поправний коефіцієнт на температуру землі і повітря для кабелів із зшитого ПЕ

Спосіб прокладання	Поправний коефіцієнт на струми для розрахункової температури середовища, °С										
	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50	+55	+60
в землі (20 °С)	1,07	1,04	1,00	0,96	0,93	0,89	0,85	0,80	0,76	-	-
в повітрі (30 °С)	-	-	1,08	1,04	1,00	0,96	0,91	0,87	0,82	0,76	0,71

Таблиця Б.5 – Поправний коефіцієнт на питомий термічний опір ґрунту для кабелів із зшитого ПЕ

Переріз жили, 150 мм ²	Питомий термічний опір ґрунту, см·К/Вт						
Тип, спосіб прокладання	70	80	90	100	200	250	300
одножильних прокладених в трубах	1,24	1,20	1,16	1,13	0,91	0,83	0,78
трижильних прокладених безпосередньо в землі	1,27	1,22	1,18	1,15	0,90	0,83	0,77
трижильних прокладених в трубах	1,16	1,13	1,11	1,09	0,93	0,88	0,83

Таблиця Б.6 – Поправний коефіцієнт на питомий термічний опір ґрунта для одножильних кабелів із зшитого ПЕ, прокладених безпосередньо в землі

Переріз жили, мм ²	Питомий термічний опір ґрунта, см·К/Вт						
	70	80	90	100	200	250	300
1×35	1,30	1,25	1,21	1,16	0,89	0,81	0,75
1×50	1,32	1,26	1,21	1,16	0,89	0,81	0,74
1×70	1,33	1,27	1,22	1,17	0,89	0,81	0,74
1×95	1,34	1,28	1,22	1,18	0,89	0,80	0,74
1×120	1,34	1,28	1,22	1,18	0,88	0,80	0,74
1×150	1,35	1,28	1,23	1,18	0,88	0,80	0,74
1×185	1,35	1,29	1,23	1,18	0,88	0,80	0,74
1×240	1,36	1,29	1,23	1,18	0,88	0,80	0,73
1×300	1,36	1,30	1,24	1,19	0,88	0,80	0,73
1×400	1,37	1,30	1,24	1,19	0,88	0,79	0,73
1×500	1,38	1,31	1,24	1,19	0,87	0,79	0,73
1×630	1,38	1,31	1,25	1,20	0,87	0,79	0,73
1×800	1,39	1,32	1,25	1,20	0,87	0,79	0,73

Таблиця Б.7 – Поправний коефіцієнт на глибину прокладання для кабелів ПАТ із зшитого ПЕ, прокладених в землі

Глибина прокла- дання, м	Прокладених безпосередньо в землі			Прокладених в землі в трубах		
	Одножильних		Трижиль- них	Одножильних		Трижиль- них
	до 185 мм ²	>185 мм ²		до 185 мм ²	>185 мм ²	
0,50	1,04	1,06	1,04	1,04	1,05	1,03
0,60	1,02	1,04	1,03	1,02	1,03	1,02
0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,00	0,98	0,97	0,98	0,98	0,97	0,99
1,25	0,96	0,95	0,96	0,96	0,95	0,97
1,50	0,95	0,93	0,95	0,95	0,93	0,96
1,75	0,94	0,91	0,94	0,94	0,92	0,95
2,00	0,93	0,90	0,93	0,93	0,91	0,94
2,50	0,91	0,88	0,91	0,91	0,89	0,93
3,00	0,90	0,86	0,90	0,90	0,88	0,92

Таблиця Б.8 – Поправний коефіцієнт на кількість працюючих поряд трижильних або груп одножильних кабелів із зшитого ПЕ, прокладених впритул один до одного

Тип кабелів і спосіб прокладання	Коефіцієнт за кількості трижильних або груп одножильних кабелів				
	2	3	4	5	6
одножильні безпосередньо в землі	0,73	0,60	0,54	0,49	0,46
трижильні безпосередньо в землі	0,80	0,69	0,62	0,57	0,54
одножильні в землі кожен в окремій трубі	0,78	0,66	0,59	0,55	0,51
трижильні в землі кожен в окремій трубі	0,85	0,75	0,69	0,65	0,62

Таблиця Б.9 – Поправний коефіцієнт на кількість працюючих поряд трижильних або груп одножильних кабелів із зшитого ПЕ за відстані між центрами кабелів 200 мм

Тип кабелів і спосіб прокладання	Коефіцієнт за кількості трижильних або груп одножильних кабелів				
	2	3	4	5	6
одножильні безпосередньо в землі	0,83	0,73	0,68	0,63	0,61
трижильні безпосередньо в землі	0,86	0,77	0,72	0,68	0,65
одножильні в землі кожен в окремій трубі	0,85	0,75	0,70	0,66	0,64
трижильні в землі кожен в окремій трубі	0,88	0,80	0,75	0,72	0,69

Таблиця Б.10 – Поправний коефіцієнт для різних екранів

Переріз екрана	Алюмінієві жили перерізом					Мідні жили перерізом				
	300	400	500	630	800	300	400	500	630	800
25	1					1				
35	0,99	1	1	1	1	0,99	1	1	1	1
50	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98
70	0,97	0,98	0,98	0,98	0,97	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96
95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,96	0,97	0,97	0,96	0,95	0,94
120	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,96	0,96	0,95	0,93	0,92

Таблиця Б.11 – Допустимі значення односекундного струму КЗ жили та екрана для кабелів із зшитого ПЕ

Переріз струмопровід ної жили, мм ²	Допустимий односекундний струм КЗ, кА		
	жили		екрана
	мідн.	алюм.	мідн.
16	-	-	3,3
25	3,6	2,4	5,1
35	5,0	3,3	7,1
50	7,2	4,7	10,2
70	10,0	6,6	14,2
95	13,6	8,9	19,3
120	17,2	11,3	24,4
150	21,5	14,2	30,4
185	26,5	17,5	
240	34,3	22,7	
300	42,9	28,2	
400	57,2	37,6	
500	71,5	47,0	
630	90,1	59,0	
800	114,4	75,2	
1000	-	-	
1200	-	-	

Додаток В
Опори трансформаторів і струмоведучих елементів

Таблиця В.1 – Опори понижувальних трансформаторів 10(6)/0,4кВ (приведені до сторони 0,4 кВ, мОм) [1]

З'єднання обмоток	$S_{\text{НОМ.Т}}$ кВ·А	$U_{\text{к}}$ %	R_{T}	X_{T}	$R_{0\text{T}}$	$X_{0\text{T}}$	$Z_{\text{T}}^{(1)}$
Y/Y ₀ -12	100	4,5	31,5	65	254	582	779
	160	4,5	16,6	41,7	151	367	486
	250	4,5	9,4	27,2	96,5	235	311
	400	4,5	5,5	17,1	55,6	149	195
	630	5,5	3,1	13,6	30,2	95,8	128
	1000	5,5	1,7	8,6	19,6	60,6	81
	1600	5,5	1	5,4	16,3	50,0	63,5
Δ/Y ₀ -11	160	4,5	16,6	41,7	16,6	41,7	135
	250	4,5	9,4	27,2	9,4	27,2	86,3
	400	4,5	5,9	17	5,9	17	54
	630	5,5	3,4	13,5	3,4	13,5	42
	1000	5,5	1,9	8,6	1,9	8,6	26,4
	1600	5,5	1,1	5,4	1,1	5,4	16,5
	2500	5,5	0,64	3,46	0,64	3,46	10,56

Примітка. Для визначення опорів трансформаторів, приведених до високої сторони (10 кВ), вказаний в таблиці опір необхідно домножити на 625 – коефіцієнт трансформації в квадраті (10/0,4=25)²

Таблиця В.2 – Питомі опори комплектних шинопроводів, мОм/м

Тип шинопроводу	Номінальна напруга, кВ	Номінальний струм, А	Опір фази, мОм/м		Опір нульового провідника, мОм/м		Опір петлі фаза-нуль $Z_{\text{ф-н}}$
			r_1	x_1	$r_{\text{нп}}$	$x_{\text{нп}}$	
ШМА4-1650	0,38/0,66	1600	0,030	0,014	0,037	0,042	0,087
ШМА4-2500		2500	0,017	0,008			0,082
ШМА 73(16)		1600	0,031	0,022			0,160
ШМА4-3200	0,38/0,66	3200	0,010	0,005	0,064	0,035	0,053
ШМА68П	0,38/0,66	2500	0,020	0,020	0,070	0,046	0,112
ШМА68П	0,38/0,66	4000	0,013	0,015	0,070	0,045	0,103
ШЗМ 16		1600	0,014	0,006			0,07
ШРА73 (ШРА4)	0,38	250	0,210	0,210	0,120	0,210	0,59
ШРА73 (ШРА4)	0,38	400	0,150	0,170	0,162	0,164	0,38
ШРА73 (ШРА4)	0,38	630	0,1	0,13	0,162	0,164	0,33

Таблиця В.3 – Питомі опори чотирижильного кабелю з мідними жилами за температури жили 65 °С, мОм/м

Переріз жил кабелю, мм ²	Опір чотирижильного кабелю, мОм/м			
	$r_1 = r_2$	$x_1 = x_2$	r_0	x_0
4×6	3,54	0,1	4,24	1,49
4×10	2,13	0,095	2,88	1,34
4×16	1,33	0,09	2,12	1,14
4×25	0,85	0,089	1,63	0,91
4×35	0,61	0,086	1,33	0,74
4×50	0,43	0,086	1,05	0,58
4×70	0,3	0,073	0,85	0,42
4×95	0,22	0,072	0,66	0,35
4×120	0,18	0,07	0,54	0,31
4×150	0,14	0,07	0,45	0,28
4×185	0,115	0,069	0,37	0,27

Таблиця В.4 – Питомі опори чотирижильних кабелів з алюмінієвими жилами в неprovідній оболонці, за температури жили 20 °С, мОм/м

Переріз жил кабелю, мм ²	Значення питомих опорів				
	$r_1 = r_2$	$x_1 = x_2$	r_0	x_0	$Z_{ф-н}$
4×2,5	15,4	0,1			29,64
3×4 + 1×2,5 (4×4)	9,61	0,098	11,71	2,11	24,08 (18,52)
3×6 + 1×4 (4×6)	6,41	0,094	8,71	1,968	14,43 (12,34)
3×10 + 1×6 (4×10)	3,84	0,088	5,9	1,811	9,88 (7,41)
3×16 + 1×10 (4×16)	2,4	0,084	4,39	1,558	5,92 (4,43)
3×25 + 1×16 (4×25)	1,54	0,072	3,42	1,258	3,70 (2,96)
3×35 + 1×16 (4×35)	1,1	0,068	2,97	1,241	3,35 (2,12)
3×50 + 1×25 (4×50)	0,769	0,066	2,449	0,949	2,22 (1,48)
3×70 + 1×35 (4×70)	0,549	0,065	2,039	0,741	1,59 (1,06)
3×95 + 1×50 (4×95)	0,405	0,064	1,665	0,559	1,13 (0,78)
3×120+1×50 (4×120)	0,32	0,064	1,54	0,545	1,05 (0,62)
3×150 + 1×70	0,256	0,063	1,276	0,43	0,82
3×185 + 1×70	0,208	0,063			0,73

Таблиця В.5 – Опір жил (екранів) кабелів із зшитого ПЕ постійному струму за 20 °С, Ом/км.

Переріз струмопровідної жили (екрана), мм ²	Питоме значення опору не більше	
	Мідн.	Алюм.
16	1,15	-
25	0,727	1,20
35	0,524	0,868
50	0,387	0,641
70	0,268	0,443
95	0,193	0,320
120	0,153	0,253
150	0,124	0,206
185	0,0991	0,164
240	0,0754	0,125
300	0,0601	0,100
400	0,0470	0,0778
500	0,0366	0,0605
630	0,0283	0,0469
800	0,0221	0,0367
1000	0,0176	0,0291
1200	0,0151	0,0247

Таблиця В.6 – Індуктивний опір однофазних кабелів із зшитого ПЕ

Переріз струмопровідної жили, мм ²	Питоме значення індуктивного опору, Ом/км					
	6 кВ		10 кВ		35 кВ	
	трик.	площ.	трик.	площ.	трик.	площ.
1×25	0,149	0,197	0,155	0,202	-	-
1×35	0,141	0,190	0,146	0,195	-	-
1×50	0,132	0,182	0,137	0,187	0,163	0,210
1×70	0,123	0,173	0,128	0,178	0,153	0,201
1×95	0,116	0,167	0,121	0,172	0,145	0,194
1×120	0,107	0,160	0,112	0,164	0,135	0,184
1×150	0,103	0,156	0,108	0,160	0,130	0,180
1×185	0,098	0,151	0,102	0,155	0,124	0,174
1×240	0,093	0,147	0,097	0,150	0,118	0,169
1×300	0,090	0,145	0,092	0,147	0,113	0,164
1×400	0,086	0,142	0,088	0,143	0,107	0,160
1×500	0,082	0,138	0,083	0,139	0,101	0,155
1×630	0,134	0,134	0,078	0,135	0,095	0,149
1×800	0,074	0,131	0,074	0,132	0,091	0,145

Таблиця В.7 – Індуктивний опір трифазних кабелів із зщитого ПЕ

Переріз струмопровідної жили, мм ²	Питоме значення індуктивного опору, Ом/км		
	6 кВ	10 кВ	35 кВ
3×25	0,128	0,135	-
3×35	0,120	0,128	-
3×50	0,112	0,119	0,151
3×70	0,104	0,111	0,142
3×95	0,098	0,105	0,134
3×120	0,090	0,096	0,125
3×150	0,087	0,092	0,120
3×185	0,082	0,088	0,114
3×240	0,078	0,083	0,108
3×300	0,076	0,079	0,103

Таблиця В.8 – Питомі опори повітряних ЛЕП

Марка алюмінієвого проводу	Питомі опори проводів			
	R_0 , Ом/км	X_0 , Ом/км		
		10 кВ	35 кВ	110 кВ
А – 16	1,98	0,398	-	-
А – 25	1,28	0,385	-	-
А – 35	0,92	0,374	-	-
А – 50	0,64	0,363	0,446	-
А – 70	0,46	0,349	0,435	-
А – 95	0,34	0,339	0,423	-
А – 120	0,27	0,332	0,411	-
А – 150	0,21	0,324	0,403	-
АС – 25	1,38	0,350	-	-
АС – 35	0,91	0,339	0,451	-
АС – 50	0,63	0,336	0,435	-
АС – 70	0,45	0,329	0,423	0,443
АС – 95	0,33	0,318	0,414	0,432
АС – 120	0,27	0,312	0,401	0,420
АС – 150	0,21	0,305	0,395	0,413
АС – 185	0,17			
АСО – 240	0,13			

Додаток Г
Технічні дані автоматичних вимикачів

Таблиця Г.1 – Номінальна вимикальна здатність автоматів Tmax XT

Вимикач	Характеристика	фазний струм, кА	міжфазний струм, кА
T1	B C N S H	25 40 65 85 100	18 25 36 50 70
T2	N S H L V	65 85 100 150 200	36 50 70 85
T3	N S H	65 85 100	36 50 70 120 200
T4	N S H L V	65 85 100 150 200	36 50 70 120 150

Таблиця Г.2 – Уставки магнітних розчіплювачів автоматів Tmax XT для захисту двигунів MF/MA

$I_{н.р.}, A$	1	2	4	8,5	12,5	20	32	52	80	100
$I_{с.ем.}, A$ (XT2)	14	28	56	120	175	120... 280	192... 448	314... 728	480... 1120	600... 1400
$I_{н.р.}, A$	10	12,5	20	32	52	80	100	125	160	200
$I_{с.ем.}, A$ (XT3)							600... 1200	750... 1500	960... 1920	1200... 2400
$I_{с.ем.}, A$ (XT4)	50... 100	62,5... 125	100... 200	160... 320	260... 520	400... 800	500... 1000	625... 1250	800... 1600	1000... 2000

Таблиця Г.3 – Характеристика розчіплювачів Екір LS/I

Функція захисту	Поріг спрацювання	Час спрацювання	Можливість вимк-ня	Функція
L – від перевантаження з обернено залежною витримкою часу спрацювання згідно з стандартом IEC 60947-2	Ручне налаштування: $I_{с.п.} = 0,4...1 \times I_{н.р.}$ крок 0,04 Точність: спрацювання між $1,05...1,3 \times I_{с.п.}$ (IEC 60947-2)	Ручне налаштування: $t_{с.п.} = 12-36$ с для $I = 3 I_{с.п.}$ Точність: $\pm 10\%$	-	$t = k/t^2$
S – від КЗ з незалежною витримкою часу ($t=k$)	Ручне налаштування: $I_{с.в.} = 1-1,5-2-2,5-3-3,5-4,5-5-5,5-6,5-7-7,5-8-8,5-9-10 \times I_{н.р.}$	$t_{с.в.} = 0,1-0,2$ с Точність: $\pm 20\%$	Так	$t = k$
I – від КЗ з регульованим порогом і миттєвим спрацюванням	Ручне налаштування: $I_{с.в.} = 1-1,5-2-2,5-3-3,5-4,5-5-5,5-6,5-7-7,5-8-8,5-9-10 \times I_{н.р.}$ Точність: $\pm 20\%$	Миттєве спрацювання	Так	$t = 0$

Таблиця Г.4 – Характеристика розчіплювачів Екір LSI

Функція захисту	Поріг спрацювання	Час спрацювання	Можливість вимкнення	Функція
L – від перевантаження з обернено-залежною витримкою часу	Ручне налаштування: $I_{c.p} = 0,4...1 \times I_{н.р}$ крок 0,02 Точність: спрацювання між 1,05...1,3 $I_{c.p}$	Ручне налаштування: $t_{c.p} = 3-12-36-72$ с для $I = 3 I_{c.p}$ Точність: $\pm 10\%$	-	$t = k/t^2$
	Електронне налаштування: $I_{c.p} = 0,2...1 \times I_{н.р}$ крок 0,01 Точність: спрацювання між 1,05...1,3 $I_{c.p}$	$t_{c.p} = 3...72$ с для $I = 3 I_{c.p}$ крок 0,2 Точність: $\pm 10\%$ до $2 \times I_{н.р}$ $\pm 20\%$ від $2 \times I_{н.р}$	-	$t = k/t^2$
S – від КЗ з обернено-залежною ($t=k/I^2$) або незалежною ($t=k$) часу	Ручне налаштування: $I_{c.в} = 1-1,5-2-2,5-3-3,5-4,5-5-5,5-6,5-7-7,5-8-8,5-9-10 \times I_{н.р}$	$t_{c.в} = 0,05-0,10-0,20-0,40$ с для $10 \times I_{н.р}$	Так	$t = k/t^2$ або $t = k$
	Електронне налаштування: $I_{c.в} = 1...10 I_{н.р}$ крок 0,1	$t_{c.в} = 0,05...0,40$ с для $10 \times I_{н.р}$ (крок 0,01)	Так	$t = k/t^2$ або $t = k$
Г – від КЗ з регульованим порогом і миттєвим спрацюванням	Ручне налаштування: $I_{c.в} = 1-1,5-2-2,5-3-3,5-4,5-5,5-6,5-7-7,5-8-8,5-9-10 \times I_{н.р}$ Точність: $\pm 20\%$	Миттєве спрацювання	Так	$t = k$
	Електронне налаштування: $I_{c.в} = 1...10 \times I_{н.р}$ Крок 0,1 Точність: $\pm 20\%$	Миттєве спрацювання	Так	$t = k$
G – від замикання на землю із незалежною витримкою часу	Ручне налаштування: $I_{c.з} = 0,2-0,25-0,45-0,55-0,75-0,8-1 \times I_{н.р}$ Точність: $\pm 10\%$	$t_{c.з} = 0,1-0,2-0,4-0,8$ с Точність: $\pm 15\%$	Так	$t = k/t^2$
	Електронне налаштування: $I_{c.з} = 0,2...1 \times I_{н.р}$ (крок 0,1)	$t_{c.з} = 0,1...0,8$ с (крок 0,01 с)	Так	$t = k/t^2$

Таблиця Г.5 – Характеристика розчіплювачів Екір М-LIU

Функція захисту	Поріг спрацювання	Час спрацювання	Можливість вимкнення	Функція
L – від перевантаження з обернено-залежною витримкою часу спрацювання згідно зі стандартом IEC 60947-4-1	Ручне налаштування: $I_{c.n} = 0,4 \dots 1 \times I_{н.р}$ крок 0,04 Точність: спрацювання між 1,05...1,3 $I_{c.n}$	Ручне налаштування: Клас спрацювання 3E, 5E, 10E, 20E; Точність: $\pm 10\%$ до $2 I_{н.р}$ $\pm 20\%$ від $2 I_{н.р}$	-	$t = k/t^2$
I – від КЗ з регульованим порогом і миттєвим спрацюванням	Ручне налаштування: $I_{c.в} = 6 \dots 13 I_{н.р}$ крок 1 Точність: $\pm 20\%$	Миттєве спрацювання	-	$t = k$
U – від перекосу фазного струму або обриву фази, з незалежною витримкою часу	Ручне налаштування: $I_b = 50 \% I_n$ якщо увімкнено Точність: $\pm 15\%$	Ручне налаштування: $t_b = 2$ с якщо увімкнено Точність: $\pm 10\%$	Так	$t = k$

Таблиця Г.6 – Номінальна вимикальна здатність автоматів Tmax

Вимикач	Характеристика	фазний струм, кА	міжфазний струм, кА
T1	BCN	25 40 50	16 25 36
T2	NSHL	65 85 100 120	36 50 70 85
T3	NS	50 85	36 50
T4	NSHLV	70 85 100 200 200	36 50 70 120 200
T5	NSHLV	70 85 100 200 200	36 50 70 120 200
T6	NSHL	70 85 100 200	36 50 70 100
T7	SHLV	85 100 200 200	50 70 120 150

Таблиця Г.7 – Характеристика розчіплювачів PR221DS автоматичних вимикачів Tmax

Функція захисту	Поріг спрацювання	Час спрацювання	Можливість вимкнення	Функція
L – від перевантаження з обернено залежною витримкою часу спрацювання згідно зі стандартом IEC 60947-2	Ручне налаштування: $I_{c.п}=0,4...1 \times I_{н.р}$ крок 0,04	Ручне налаштування: $t_{c.п} = 3, 6$ с для $I=6 I_{c.п}$ (T2) $t_{c.п} = 3, 12$ с для $I=6 I_{c.п}$ (T4, T5)	-	$t = k/I^2$
S – від КЗ з залежною витримкою часу ($t=k/I^2$)	Ручне налаштування: $I_{c.в}=1...10 \times I_{н.р}$ (всього 15 значень)	$t_{c.в} = 0,1, 0,25$ с (для струму $8I_{н.р}$)	Так	$t = k/I^2$
I – від КЗ з регульованим порогом і миттєвим спрацюванням	Ручне налаштування: $I_{c.в}=1...10 \times I_{н.р}$	Миттєве спрацювання	Так	$t = 0$

Таблиця Г.8 – Характеристика розчіплювачів PR22DS/P автоматичних вимикачів Tmax

Функція захисту	Поріг спрацювання	Час спрацювання	Можливість вимкнення	Функція
L – від перевантаження з обернено-залежною витримкою часу	Ручне налаштування: $I_{c.n} = 0,4...1 \times I_{н.р}$ крок 0,02 Точність: спрацювання між 1,05...1,3 $I_{c.n}$	Ручне налаштування: $t_{c.n} = 3-6-9-12$ (18) с для $I = 6 I_{c.n}$ Точність: $\pm 10\%$	-	$t = k/l^2$
	Електронне налаштування: $I_{c.n} = 0,2...1 \times I_{н.р}$ крок 0,01	Електронне налаштування: $t_{c.n} = 3...18$ с для $I = 6 I_{c.n}$ крок 0,5 с.	-	$t = k/l^2$
S – від КЗ з обернено-залежною або незалежною витримкою часу	Ручне налаштування: $I_{c.в} = 0,6-10 \times I_{н.р}$ (всього 15 уставок)	Ручне налаштування: $t_{c.в} = 0,05-0,10-0,25-0,50$ с для $8 \times I_{н.р}$	Так	$t = k/l^2$ або $t = k$
	Електронне налаштування: $I_{c.в} = 0,6...10 I_{н.р}$ крок 0,1	Електронне налаштування: $t_{c.в} = 0,05...0,50$ с для $8 \times I_{н.р}$ крок 0,01	Так	$t = k/l^2$ або $t = k$
I – від КЗ з регульованим порогом і миттєвим спрацюванням	Ручне налаштування: $I_{c.в} = 1,5...12 I_{н.р}$ (всього 15 уставок)	Миттєве спрацювання	Так	$t = k$
	Електронне налаштування: $I_{c.в} = 1,5...12 I_{н.р}$ (крок 0,1)	Миттєве спрацювання	Так	$t = k$
G – від замикання на землю із незалежною витримкою часу	Ручне налаштування: $I_{c.з} = 0,2...1 \times I_{н.р}$ (всього 7 уставок)	$t = 0,1$ с для $3.25 \times I_{c.з}$, $t = 0,2$ с для $2.25 \times I_{c.з}$, $t = 0,4$ с для $1.6 \times I_{c.з}$ $t = 0,8$ с для $1.25 \times I_{c.з}$	Так	$t = k/l^2$
	Електронне налаштування: $I_{c.з} = 0,2...1 \times I_{н.р}$ (крок 0,1)	0,1...0,8 с (крок 0,01 с)	Так	$t = k/l^2$

Таблиця Г.9 – Уставки магнітних розчіплювачів TM16D – TM250D автоматів Compact NS160/250

$I_{н.р.}, A$	16	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250
$I_{с.ем.}, A$ NS100	190	300	400	500	500	500	640	800	-	-	-	-
$I_{с.ем.}, A$ NS160 NS250	190	300	400	500	500	500	1000	1250	1250	1250	5+10 $I_{н.р.}$	

Таблиця Г.10 – Характеристика розчіплювачів STR22 автоматів Compact NS100 – NS250

Функція захисту	Поріг спрацювання	Час спрацювання	Функція
L – від перевантаження з оберненозалежною витримкою часу спрацювання	$I_{с.п.}=0,4...1 \times I_{н.р.}$ Регульована 48 поз.	для 1,5 $I_{с.п.}$ 90...180 с для 6 $I_{с.п.}$ 5...7,5 с для 7,2 $I_{с.п.}$ 3,2...5,0 с	$t = k$
S – від КЗ з незалежною витримкою часу ($t=k$)	$I_{с.в.} = 2...10 I_{с.п.}$ Регульована 8 поз. Точність: $\pm 15\%$	постійна; витримка перед вимкненням ≤ 40 мс повний час вимкнення ≤ 60 мс	$t = k$
I – від КЗ з регульованим порогом і миттєвим спрацюванням	$I_{с.в.} \geq 11 \times I_{н.р.}$	Миттєве спрацювання	$t = 0$

Таблиця Г.11 – Характеристика розчіплювачів STR53 автоматів Compact NS400 - NS630

Функція захисту	Поріг спрацювання	Час спрацювання	Функція
L – від перевантаження з оберненозалежною витримкою часу спрацювання	$I_{с.п.}=0,4...1 \times I_{н.р.}$ Регульована 48 поз.	Напр., для $I_{н.р.}=250$ 34...50 с для 1,5 $I_{с.п.}$ 1,5...2,0 с для 6 $I_{с.п.}$ 1,0...1,4 с для 7,2 $I_{с.п.}$	$t = k$
S – від КЗ з незалежною витримкою часу ($t=k$)	$I_{с.в.} = 1,5...10 I_{с.п.}$ Регульована 8 поз. Точність: $\pm 15\%$	$t_{с.в.} = 0; 0,1; 0,2; 0,3$ с; $t_{в.в.} 60 \leq$ мс $t_{п.в.} \leq 140$ мс	$t=k$ ($t=k/l^2$)
I – від КЗ з миттєвим спрацюванням	$I_{с.в.}=1,5...11 \times I_{н.р.}$ 8 поз. Точність: $\pm 15\%$	Миттєве спрацювання	$t = 0$

Навчальне видання

Михайло Йосипович Бурбело

РОЗРАХУНОК ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Навчальний посібник

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет підготував М. Бурбело

Підписано до друку 23.11.2017 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 7,16. Зам. № 2017-410.
Наклад 50 (1-й запуск 1-20) пр. Зам. № 2017-410.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
інформаційний редакційно-видавничий центр.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 59-85-32, 59-87-38.
press.vntu.edu.ua;
E-mail: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.