

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до практичних занять
із навчальної дисципліни

**«ПРИКЛАДНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ
В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ
СИСТЕМАХ»**

*(для здобувачів усіх форм навчання першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти спеціальності*

*141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2025

Методичні рекомендації до практичних занять із навчальної дисципліни «Прикладне програмне забезпечення для дослідження процесів в електротехнічних та енергетичних системах» (для здобувачів усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. Б. Єгоров, М. Л. Глєбова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 57 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. О. Б. Єгоров,
канд. техн. наук, доц. М. Л. Глєбова

Рецензент

Я. Б. Форкун, кандидат технічних наук, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 5 від 19.11.2024

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 Практичні роботи 1–2 Розрахунок силових електричних навантажень. Вибір силових трансформаторів з урахуванням компенсації реактивної потужності.....	5
2 Практичні роботи 3–4 Вибір електричних апаратів і струмопровідних частин	19
3 Практичні роботи 5–6 Розрахунки встановленого режиму СЕП на основі лінійних математичних моделей	29
4 Практичні роботи 7–8 Розрахунки встановленого режиму, СЕП на основі нелінійних математичних моделей	36
Список рекомендованих джерел.....	42
Додаток А.....	43
Додаток Б.....	50

ВСТУП

Метою практичних робіт із дисципліни «Прикладне програмне забезпечення для дослідження процесів в електротехнічних та енергетичних системах» є оволодіння методами розрахунку силових і освітлювальних навантажень; навчитися проводити вибір числа й потужності трансформаторів, компенсувальних пристроїв і комутаційної апаратури. Опанувати навичкам моделювання встановлених режимів СЕП на основі лінійних рівнянь стану (узагальненого рівняння стану й рівняння вузлових напруг) у середовищі Mathcad.

1 ПРАКТИЧНІ РОБОТИ 1–2

РОЗРАХУНОК СИЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ. ВИБІР СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З УРАХУВАННЯМ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Мета роботи: навчитися робити розрахунок силових електричних навантажень цеху:

- розрахунок силових навантажень електроприймачів (*ЕП*);
- розрахунок освітлювальних навантажень *ЕП*;
- вибір числа й потужності трансформаторів;
- вибір компенсувальних пристроїв.

Загальні положення

Електричні навантаження підприємств АПК визначають вибір всіх елементів системи електропостачання (*СЕП*) – від числа й потужності трансформаторів, параметрів апаратів, перетину струмопровідних частин, потужності компенсувальних пристроїв (*КП*).

Вихідними даними для розрахунку електричних навантажень за методом впорядкованих діаграм є:

- генеральний план цеху з нанесеним устаткуванням і зазначеної паспортної потужності *ЕП*;
- режими роботи, особливості й типи технологічних процесів *ЕП* у цеху;
- площа цеху;
- довідкові дані для встановлення значень розрахункових коефіцієнтів.

Сумарна паспортна потужність електроприймачів, кВт

$$P_{\Sigma \text{ПАСП}} = P_{\text{ПАСП}} \cdot n, \quad (1)$$

де n – число EP в групі;

$P_{ПАСП}$ – паспортна потужність EP , кВт.

Розрахунки такого типу зручно вести, заповнюючи даними таблицю 1.2.

Значення паспортних потужностей EP приводимо до тривалого режиму роботи при $TB = 100 \%$, де TB – тривалість увімкнення EP . Для цього паспортну потужність EP , що працюють у повторно короткочасному режимі ($ПКР$), приводимо до тривалого режиму роботи:

$$P_{НОМ} = P_{ПАСП} \sqrt{TB_{ПАСП}}, \text{ кВт.} \quad (2)$$

Для зварювального виробництва

$$P_{ном} = S_{пасп} \cdot \cos \varphi \sqrt{TB}, \text{ кВт.} \quad (3)$$

Для кожної характерної групи електроприймачів визначаємо середньозмінне активне навантаження за найбільш завантажену зміну, результати зводимо в таблицю 2.1.

$$P_p = P_{уст.} \times K_{\epsilon}, \quad (4)$$

є K_{ϵ} – коефіцієнт використання n -ї групи електроприймачів (дод. А табл. А.1.1).

Коефіцієнти використання одного K_{ϵ} або групи приймачів характеризують використання активної потужності і становлять відношення середньої активної потужності $p_{ном}$ або $P_{ном}$:

$$k_{\epsilon} = p_p / p_{ном}; \quad K_B = P_p / P_{НОМ}.$$

Середню реактивну потужність за найбільш завантажену зміну для групи силових приймачів (з робочим струмом) однакового режиму роботи визначають множенням середньої активної потужності цієї групи на $tg \varphi$, що відповідає груповому коефіцієнту потужності:

$$Q_p = P_p \times tg \varphi \quad (5)$$

де $tg \varphi$ – коефіцієнт реактивної потужності, що відповідає коефіцієнту активної потужності $\cos \varphi$, характерного для електроприймачів цього режиму роботи.

1. Визначимо сумарні дані середньомісячних значень навантажень, результати зводимо в таблицю 2.1

$$\sum_i^m P_p = \sum_i^m P_{НОМ} K_u \quad \sum_i^m Q_p = \sum_i^m P_p \operatorname{tg} \varphi . \quad (6)$$

2. Визначимо груповий коефіцієнт використання навантаження у вузлі, результати зводимо в таблицю 2.1.

$$K_{u, \text{гp}} = \frac{\sum_i^m P_{\text{cmi}}}{\sum_i^m P_{\text{Hi}}} , \quad (7)$$

де $\sum_i^m P_{НОМ}$ – сумарна встановлена потужність.

На формування абсолютного максимуму групового графіка навантаження впливає ряд випадкових величин:

- число $EП$ у вузлі, що розраховується;
- їхні накопичені потужності;
- режим роботи енергоприймачів.

Груповий графік навантаження є вихідною величиною, по якій вибираються параметри навантаження $СЕП$ по нагріванню.

У своїй роботі користуємося методикою визначення розрахункового максимуму навантаження за допомогою поняття ефективного числа $EП$.

Під ефективним числом приймачів групи різних за номінальною потужністю й режиму роботи приймачів розуміють число однорідних за режимом роботи приймачів однакової потужності, що спричиняє те саме розрахункове навантаження, що й розглянута група різних за номінальною потужністю й режимом роботи приймачів.

Визначимо ефективне число EP за формулою (6), результати зводимо в таблицю 2.1

$$n_{\text{э}} = \frac{2 \times \sum_i^m P_{\text{НОМ}}}{P_{\text{НОМ max}}}, \quad (8)$$

де $P_{\text{НОМ max}}$ – номінальна потужність найбільш потужного EP у розрахунковому вузлі.

За значеннями групового коефіцієнта використання й ефективного числа електроприймачів по таблиці визначимо значення коефіцієнта розрахункового навантаження K_P . Так само необхідно враховувати групове значення коефіцієнта використання $K_{\text{в.гp}}$ і ефективного числа EP .

Коефіцієнт максимуму активної потужності K_{max} визначають за довідковими таблицями залежно від ефективного числа електроприймачів групи $n_{\text{эф}}$ (дод. А табл. А.1.2) або за діаграмою, наведеною на рисунку А.1.1 (дод. А) залежно від групового коефіцієнта використання $K_{\text{в}}$ й $n_{\text{эф}}$.

Як розрахункова максимальна активна потужність приймається таке тривале 30-хвилинне навантаження, що еквівалентне очікуваному навантаженню, що змінюється, по найбільш важкому тепловому впливу, тобто по максимальній температурі або по тепловому зношуванню ізоляції провідника або трансформатора. Розрахуємо максимальне навантаження:

$$P_p = K_P \sum_i^m P_p \quad (9)$$

з огляду на особливості використання реактивної потужності електроприймачів, що мало залежить від активної потужності електроприймачів, прийmemo:

$$Q_p = \sum_i^m Q_p.$$

Розрахуємо повне силове навантаження у вузлі:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}. \quad (10)$$

Розрахунок освітлювальних навантажень:

– установлена потужність освітлювальних електроустановок $P_{p.o.}$, розраховується методом питомої щільності P_{ydo} , $кВт/м$, по виразу:

$$P_{HO} = P_{ydo} \times F \times 10^{-3}, \quad (11)$$

де F – площа цеху,

P_{ydo} – питома щільність освітлювального навантаження (дод. А табл. А.1.3).

Питомою потужністю $P_{уд}$ називається відношення сумарної потужності всіх ламп, установлених у певному приміщенні, до площі освітлюваної поверхні (підлоги) ($Вт/м^2$).

Визначення розрахункового навантаження від освітлювальних ЕП

$$P_{p.o.} = K_{co} \cdot K_{пра} \cdot P_{HO}, \quad (12)$$

де K_{co} – коефіцієнт використання освітлювальних установок (дод. А, табл. А.1.4);

$K_{пра}$ – коефіцієнт, що враховує витрати потужності в пускорегулювальних апаратах (ПРА) газорозрядних ламп.

В установках з газорозрядними лампами розрахункова максимальна потужність включає втрати потужності в пускорегулювальній апаратурі (ПРА):

– для люмінесцентних ламп при стартерних схемах запалювання

$$K_{пра} = 1,2;$$

– для люмінесцентних ламп при безстартерних схемах запалювання

$$K_{пра} = 1,3;$$

– для ртутних ламп ДРЛ

$$K_{пра} = 1,1.$$

Розрахункове реактивне навантаження (за $\cos\phi = 0,95$; $\tan\phi = 0,33$)

$$Q_{p.o.} = P_{p.o.} \times \tan\phi.$$

Повне розрахункове освітлювальне навантаження:

$$S_p = \sqrt{(P_{\delta})^2 + (Q_{\delta})^2}, \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

Визначимо максимум навантаження всього по цеху

$$\begin{aligned}\Sigma P_{pm} &= P_{\Sigma CM} + P_{p.o.}, \text{ кВт} \\ \Sigma Q_{pm} &= Q_{\Sigma CM} + Q_{p.o.}, \text{ квар}\end{aligned}\quad (13)$$

$$\Sigma S_{pm} = \sqrt{(\Sigma P_{pm})^2 + (\Sigma Q_{pm})^2}, \text{ кВ}\cdot\text{А} \quad (14)$$

Вибір числа й потужності цехових трансформаторів

Вибір числа й потужності цехових трансформаторів здійснюється одночасно з вибором засобів компенсації реактивної потужності на основі техніко-економічних розрахунків, виходячи з питомої щільності навантаження, активного розрахункового навантаження й інших факторів, що обумовлюються технічними умовами.

Порядок вибору числа цехових трансформаторів

Для кожної технологічно концентрованої групи цехових трансформаторів однакової потужності їхнє мінімальне число, необхідне для живлення активного максимального розрахункового навантаження, визначається за формулою:

$$N_{т.мин} = \frac{P_p + P_{p.o.}}{\beta \cdot S_{н.тр.}} + \Delta N, \text{ шт.}, \quad (15)$$

де $P_p + P_{p.o.}$ – розрахунковий максимум активного навантаження (від силових і освітлювальних ЕП) цієї групи трансформаторів;

β – коефіцієнт завантаження трансформаторів;

$S_{н.тр.}$ – номінальна потужність трансформаторів;

ΔN – добавка до найближчого більшого цілого числа трансформаторів.

Примітка. Коефіцієнт завантаження трансформаторів у рекомендуються в межах 0,7–0,8. Необхідно, щоб при обраній номінальній потужності

трансформаторів ΔN було б мінімальним. Це забезпечить максимальне використання встановленої потужності трансформаторів.

Для трансформаторів цехових підстанцій потрібно зазвичай приймати такі коефіцієнти завантаження:

– для цехів з переважним навантаженням 1-ї категорії при двох трансформаторних підстанціях – $\beta = 0,65 - 0,7$;

– для цехів з переважним навантаженням 2-ї категорії при двох трансформаторних підстанціях із взаємним резервуванням трансформаторів – $\beta = 0,7 - 0,8$;

– для цехів з переважним навантаженням 2-ї категорії за можливості використання централізованого резерву трансформаторів і для цехів з навантаженням 3-ї категорії – $\beta = 0,9 - 0,95$.

Економічно оптимальне число трансформаторів визначається:

$$N_{opt} = N_{т.мин} + m, \text{ шт.}, \quad (16)$$

де m – додаткове число трансформаторів, обумовлене по кривих, рисунок А.1.2 (дод. А) залежно від $N_{т.мин}$ і ΔN .

За обраним економічно оптимальним числом трансформаторів визначають найбільшу реактивну потужність Q , квар, що доцільно передавати через трансформатори в мережу напругою до 1 кВ:

$$Q_m = \sqrt{(\beta \cdot N_{opt} \cdot S_{н.тр})^2 - (P_p + P_{р.о.})^2}, \text{ квар.} \quad (17)$$

Сумарна потужність низьковольтних батарей конденсаторів (НБК), квар, що забезпечує економічно оптимальне число трансформаторів, визначається:

$$Q_{нк1} = Q_{p\Sigma} - Q_m, \text{ квар.} \quad (18)$$

Примітка. Підкореневе вираження не повинне бути негативним. Позитивне підкореневе вираження забезпечується варіюванням коефіцієнта завантаження цехових трансформаторів так, щоб зменшуване було вище від'ємника.

Потужність *НБК*, що доводиться на один трансформатор:

$$Q'_{HK1} = \frac{Q_{HK1}}{N_{opt}}, \text{ квар.} \quad (19)$$

За цим значенням вибирають стандартні (довідкові) значення комплектних конденсаторних установок $Q'_{HK1.CPP}$ (дод. А, табл. А.1.7).

Тоді сумарна потужність комплектних конденсаторних установок для цієї групи оптимального числа цехових трансформаторів складе:

$$Q''_{HK1.CPP} = N_{opt} \cdot Q'_{HK1.CPP}, \text{ квар.} \quad (20)$$

Нескомпенсована реактивна потужність у мережі до 1 кВ складе:

$$Q_{неск} = (Q_p + Q_{p.o.}) - Q''_{HK1.CPP}, \text{ квар.} \quad (21)$$

Визначення додаткової потужності *KУ* в мережі напругою до 1 кВ із метою оптимального зниження втрат активної потужності, викликаних перетіканнями *РМ*.

Визначення потужності *НБК* із метою оптимального зниження втрат, викликаних перетіканнями реактивної потужності:

$$Q_{HK2} = Q_{неск} - \gamma \cdot N_{тз} \cdot S_{нт}, \text{ квар,} \quad (22)$$

де γ – розрахунковий коефіцієнт, обумовлений залежно від коефіцієнтів K_1 і K_2 (дод. А, табл. А.1.5, А.1.6) і схеми живлення цехових ТП по кривих (дод. А, рис. А.1.3).

Опис програмного забезпечення

Робота виконується за допомогою програми *ELTX*. Програма дозволяє:

- робити розрахунок силових і освітлювальних навантажень;
- проаналізувати вплив $\cos\varphi$ приймачів на споживання реактивної потужності;
- робити вибір потужності й кількості силових трансформаторів, варіюючи коефіцієнтом завантаження трансформатора.

У структуру програми *ELTX* входять основні елементи:

– розрахунок електричних навантажень – робить основний розрахунок;
– довідник двигунів (довідник груп *ЕП*) – дозволяє вводити паспортні дані електроприймачів:

- найменування електроприймача;
- паспортну потужність;
- коефіцієнт використання;
- коефіцієнт активної потужності ($\cos\varphi$).

Довідник видів виробництва – дозволяє вводити дані, що характеризують освітлювальне навантаження цього виробництва:

- найменування виробництва (цеху);
- коефіцієнт попиту освітлювальних установок ($K_{c.o.}$);
- коефіцієнт втрати потужності ($K_{ПРА}$);
- питому площа освітлювальних навантажень ($P_{уд.o.}$).

Довідник трансформаторів.

Найменування (наприклад *ТМ 250*).

Потужність трансформатора.

У рядку стану відображається допоміжна інформація для виконання певних дій.

Довідкові дані можна вводити й редагувати як до виконання розрахунку, так і в процесі роботи.

Методика проведення практичної роботи

1. Ознайомитися з методикою розрахунку силових і освітлювальних навантажень.

2. У запропонованому меню виберіть вкладку «**Розрахунок електричних навантажень**» натисніть кнопку «Enter» (рис. 1.1).

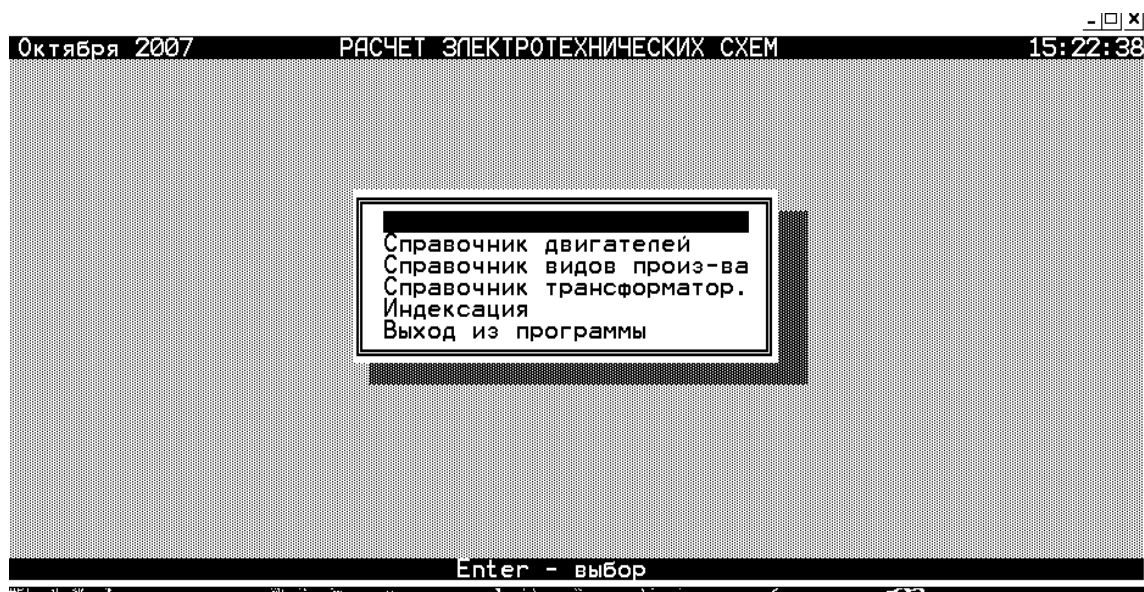


Рисунок 1.1 – Розрахунок електричних навантажень

3. У підменю «*Довідник груп ЕП*» вибираємо групу електроприймачів натисканням клавіші Enter, або додаємо нову групу ЕП, за допомогою клавіші INS (рис. 1.2).

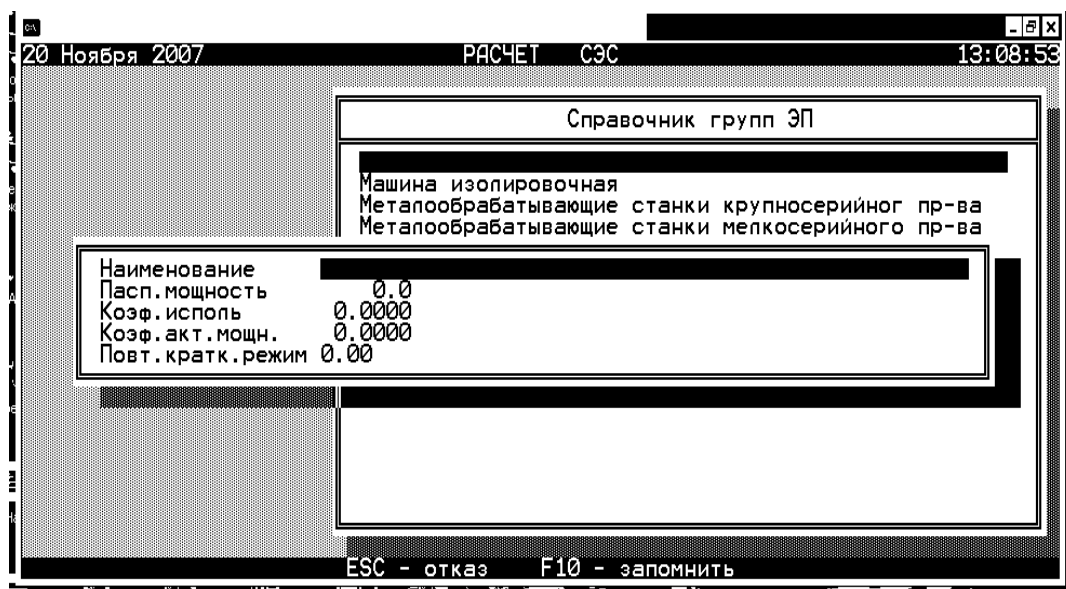


Рисунок 1.2 – Робота з довідковою системою

4. У вікні «Найменування» характерних груп увести кількість електроприймачів.

5. Клавiшею F10 здійснюється розрахунок силових навантажень, а так само розрахунок ефективного числа електроприймачів по всьому вузлі навантаження ($n_{эф}$) і середньозважений (груповий) коефіцієнт використання ($K_{и. гр.}$).

6. Для розрахунку освітлювальних навантажень необхідно ввести такі дані:

- коефіцієнт розрахункового навантаження (K_p) – вибирається згідно з таблицею А.1.2 або рисунка А.1.1 додатка А;
- площа цеху вибирається відповідно до вихідних даних;
- тангенс кута освітлювального навантаження – для компенсованих ПРА з парною кількістю паралельно включених ламп;
- вид виробництва (рис. 1.3).

Наименование характерных гр
Краны, теперы

Эффективное число ЗП – 1000

Наименование	
Коефф. спроса освет. установок	0.0000
Коефф. потери мощности	0.0000
Удельная плотность осв. нагр.	0.000

Справочник видов производства

ESC – отказ F10 – запомнить

Рисунок 1.3 – Розрахунок освітлювальних установок

7. Клавiшею F10 здійснюється розрахунок силових і освітлювальних навантажень, виводиться на екран розрахунковий максимум активного й реактивного навантаження цеху.

8. Згідно з розрахунковими даними зробити вибір потужності силових трансформаторів і коефіцієнта завантаження, (цехові ТП із числом трансформаторів більше двох зазвичай не доцільні).

9. Клавiшею F10 вивести розрахунок на екран.

Обробка результатів роботи

1. Результати розрахунків звести в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Розрахунок електричних навантажень напругою до 1 кВ

Групи ЕП	Р _{пасп} , кВт	п, шт.	Р _{ПАСП} , кВт	Р _{ном} , кВт	К _и	$\frac{\cos \varphi}{\operatorname{tg} \varphi}$	Розрахункові навантаження	
							Р _р , кВт	Q _р , квар
Переробні агрегати	15	5	75	75	0,75	0,65/1,17	56,2	65,76
Вентилятори	5,5	3	16,5	16,5	0,2	0,5/1,73	3,30	5,72
Крани, тельфери ТВ = 25 %	6,2	4	24,8	19,84	0,2	0,65/1,17	3,97	4,64
Нагрівачі	5,0	20	100,0	100,0	0,35	0,7/1,02	35,0	35,71
Додаткове встаткування	5,0	37	185,0	185,0	0,3	0,65/1,17	55,5	64,89
Сушильна камера	8,0	3	114,0	114,0	0,8	0,95/0,33	91,2	29,98
Разом				584,14			261	224,3

2. Сумарні активні й реактивні потужності навантажень:

$$\sum_i^m P_p = 261,60 \text{ кВт} \qquad \sum_i^m Q_p = 224,34 \text{ квар}.$$

3. Середньозважений (груповий) коефіцієнт використання по вузлу навантаження:

$$K_{u.гр} = \frac{\sum_i^m P_{pi}}{\sum_i^m P_{Hi}} = 261,60 / 581,14 = 0,45$$

4. Визначаємо ефективне число ЕП:

$$n_g = \frac{2 \times \sum_i^m P_{HOM}}{P_{HOM \max}} = \frac{2 \cdot 584,14}{38} \cong 31.$$

5. Коефіцієнт розрахункового навантаження K_p , $K_p = 0,8$.

6. Максимальне навантаження дорівнює:

$$P_p = K_p \sum_i^m P_{CM} = 261,60 \cdot 0,8 = 209,28 \text{ кВт}.$$

7. Повне силове навантаження у вузлі:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{209,28^2 + 224,34^2} = \sqrt{94124,71} = 306,8 \text{ кВа}.$$

8. Освітлювальні навантаження: за $F = 648 \text{ м.}^2$

Розрахункове активне освітлювальне навантаження:

$$P_{HO} = P_{ydd} \times F \times 10^{-3} = 25 \cdot 648 \cdot 10^{-3} = 16,2 \text{ кВт}$$

$$P_{p.o.} = K_{co} \cdot K_{пра} \cdot P_{HO} = 16,2 \cdot 1,2 \cdot 0,95 = 18,47 \text{ кВт.}$$

Розрахункове реактивне навантаження (при $\cos\phi = 0,95$; $\tan\phi = 0,33$)

$$Q_{PO} = P_{PO} \times \tan\phi = 18,47 \times 0,33 = 6,1 \text{ квар.}$$

9. Повне розрахункове освітлювальне навантаження:

$$S_p = \sqrt{(P_p)^2 + (Q_p)^2} = \sqrt{18,47^2 + 6,1^2} = 19,45, \text{ кВа.}$$

9. Визначимо максимум навантаження всього по цеху

$$\Sigma P_{pm} = P_{\Sigma CM} + P_{p.o.} = 209,28 + 18,47 = 227,75 \text{ кВт}$$

$$\Sigma Q_{pm} = Q_{\Sigma CM} + Q_{p.o.} = 224,34 + 6,1 = 230,43 \text{ квар}$$

$$\Sigma S_{pm} = \sqrt{(\Sigma P_{pm})^2 + (\Sigma Q_{pm})^2} = \sqrt{227,75^2 + 230,43^2} = 323,99 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

10. Розраховуємо мінімальну кількість цехових трансформаторів:

$$N_{T \min} = \frac{227,75}{0,85 \cdot 160} = 1,92,$$

де k_3 – приймаємо рівним 0,74, $S_{н.тр} = 160 \text{ кВа.}$

11. Визначимо оптимальне число цехових трансформаторів:

$$N_{T\Omega} = N_{T \min} + m,$$

де m – додаткове число, що визначається по кривих (рис. А.1.2 дод. А).

Тому що $m = 0,01$, те

$$N_{T\Omega} = 1,92 + 0,08 = 2.$$

12. Найбільша реактивна потужність, що доцільно передавати через трансформатори в мережу, напругою до 1 кВ:

$$Q_m = \sqrt{((2 \times 0,77 \times 250)^2 - (512,04)^2)} = 39,19 \text{ квар}$$

Сумарна потужність *НБК* для цієї групи трансформаторів, що забезпечує економічно оптимальне число трансформаторів:

$$Q_{HK1} = Q_{P\Sigma} - Q_m = 230,43 - 64,85 = 165,58 \text{квар}.$$

Потужність *НКБ*, що доводиться на один цеховий трансформатор:

$$Q'_{HK1} = \frac{Q_{HK1}}{N_{TЭ}} = \frac{165,58}{2} = 82,79 \text{квар}.$$

По цій величині вибираємо типорозмір *ККУ-0,38 кВ*:

– *УКЛ(П)-0,38-75-108УЗ*.

Тоді сумарна потужність установлених у цеху комплектних *КУ* складе:

$$Q''_{HK} = 2 \cdot 75 = 150 \text{квар}.$$

Некомпенсована реактивна потужність у мережі до 1кВ складе:

$$Q_{неск.} = Q_{P\Sigma} - Q''_{HK} = 230,43 - 150 = 80,43 \text{квар}.$$

Додаткова потужність *НКБ* для цієї групи трансформаторів, Q_{HK2} , з метою оптимального зниження втрат:

$$Q_{HK2} = Q_{неск.} - Y \cdot N_m \cdot S_T,$$

$$Q_{HK2} = 80,43 - 0,44 \cdot 2 \cdot 160 = -47,57 \text{квар}.$$

Оскільки $Q_{HK2} < 0$, то для цієї групи трансформаторів реактивна потужність Q_{HK2} приймається рівною 0, і установка додаткових джерел реактивної потужності не потрібна.

14. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Основні режими роботи електроприймачів. Класифікація ЕП.
2. Методи визначення розрахункових електричних навантажень. Чим визначається вибір методу розрахунку електричних навантажень у різних гілках промисловості?
3. Вибір числа й потужності трансформаторів цехових ТП із урахуванням компенсації реактивної потужності.
4. Джерела реактивної потужності в мережах підприємств АПК.

2 ПРАКТИЧНІ РОБОТИ 3–4

ВИБІР ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ І СТРУМОПРОВІДНИХ ЧАСТИН

Мета роботи: навчитися правильно вибирати електричні апарати й струмопровідні частини за умовами нагрівання й у відповідності до струмів розціплювачів.

Програма роботи

Вивчити вимоги на вибір автоматичних вимикачів і струмопровідних частин. Набути практичних навичок вибору параметрів автоматів і їхньої перевірки за вимикальною здатністю та чутливістю захистів. Навчитися правильно вибирати марку й перетин струмопровідних частин за умовами нагрівання довгостроково припустимими струмами, особливо виходячи з техніко-економічних показників.

Загальні відомості

Вибір електричних апаратів

Автоматичний повітряний вимикач призначений для автоматичного розмикання електричних кіл при аварійних режимах і для рідких комутаційних перемикачів за нормальних режимів роботи.

Автомати вибирають із дотриманням таких вимог:

$$U_{\text{ном.а.}} > U_{\text{ном.с}}, \text{ А,}$$

де $U_{\text{ном.а.}}$, $U_{\text{ном.с}}$ – відповідно номінальні напруги автомата й ділянки, мережі, В;

$$I_{\text{расч.ном.}} \geq I_{\text{расч.}}, \text{ А}$$

де $I_{\text{расч.ном.}}$ – номінальний струм розціплювача, А;

$I_{\text{расч.}}$ – розрахунковий струм ділянки ланцюга, що захищається, А.

- за місцем розміщення в схемі, з урахуванням особливостей;
- технологічного процесу ділянки мережі (електроприймача), що захищена автоматом.

Всі обрані автомати перевіряють:

- за здатністю, що вимикає:

$$I_{\text{пред.откл.}} \geq I_{\text{к.з.макс.}}^{(3)}, \text{ А,}$$

де $I_{\text{к.з.макс.}}^{(3)}$ – максимальний струм трифазного короткого замикання,

А – на чутливість захистів:

$$I_{\text{к.з.мин.}}^{(1)} \geq 3I_{\text{расц.ном.}},$$

де $I_{\text{к.з.мин.}}^{(1)}$ – мінімальний струм однофазного к. з.;

$I_{\text{расц.ном.}}$ – номінальний струм розціплювача вповільненого спрацьовування, А.

Вибір марки й перетину струмопровідних частин

У внутрішньоцехових мережах напругою до 1 кВ у невибухонебезпечних приміщеннях перетин проводів вибирають за умовою нагрівання довгостроково припустимим струмом за умовою:

$$I_{p \max} \leq I_{\text{дол доп}},$$

де $I_{p \max}$ – розрахунковий максимальний струм лінії, А;

$I_{\text{дол доп}}$ – довгостроково припустимий струм стандартних перетинів, А.

При розрахунку ланцюга по нагріванню спочатку вибирають марку провідника, залежно від характеру середовища в цеху, конфігурації цеху й способу прокладки мережі.

Вибір перетинів проводів і кабелів напругою до 1 кВ розпочинають після вибору захисних апаратів, тому що обраний за умовою нагрівання перетин струмопровідних частин необхідно перевірити на відповідність захистів за умовою:

$$I_{\text{дол доп}} \geq k_3 \cdot I_3$$

де I_3 – номінальний струм розціплювача або струм спрацьовування розціплювача, A ;

k_3 – коефіцієнт захисту, (дод. А табл. А.2.2).

Для обраних невибухонебезпечних й не пожежонебезпечних умов експлуатації устаткування (робота з можливим технологічним перевантаженням (металорізальні верстати, підйомно-транспортне встаткування, зварювальні агрегати), проводку й кабелі передбачається вибирати з гумовою ізоляцією – коефіцієнт захисту k_3 приймаємо згідно з таблицею А.2.2 (дод. А).

Обраний й перевірений на відповідність захистів перетин кабелю перевіряють по втраті напруги за умовою:

$$\Delta U_{\text{действ}} \leq \Delta U_{\text{дон}}$$

$$\Delta U_{\text{дон}} = 0,05 U_{\text{ном}}$$

$$0,05 U_{\text{ном}} = 0,05 \cdot 380 \text{ В} = 19 \text{ В}$$

$$\Delta U_{\text{действ}} = \sqrt{3} \cdot I_p \cdot l \cdot (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi),$$

де I_p – розрахунковий струм лінії, A ;

l – довжина лінії, $км$, визначається за генпланом цеху;

r_0, x_0 – відповідно питомі активні й індуктивні опори провідника, $Ом/км$ – довідкові дані для стандартних перетинів, (див. дод. А табл. А.2.3).

Індуктивний опір $x_0 = 0,06 \text{ Ом/км}$.

Вихідні дані для розрахунку

Для електроприймачів, наведених у таблиці 2.1, згідно з варіантом, визначити струми розціплювачів. Вибрати параметр і тип автоматів, виходячи з розрахункової схеми (рис. 2.1), де зазначені місця розміщення автоматів і їхнє призначення. Напруга мережі $380В$.

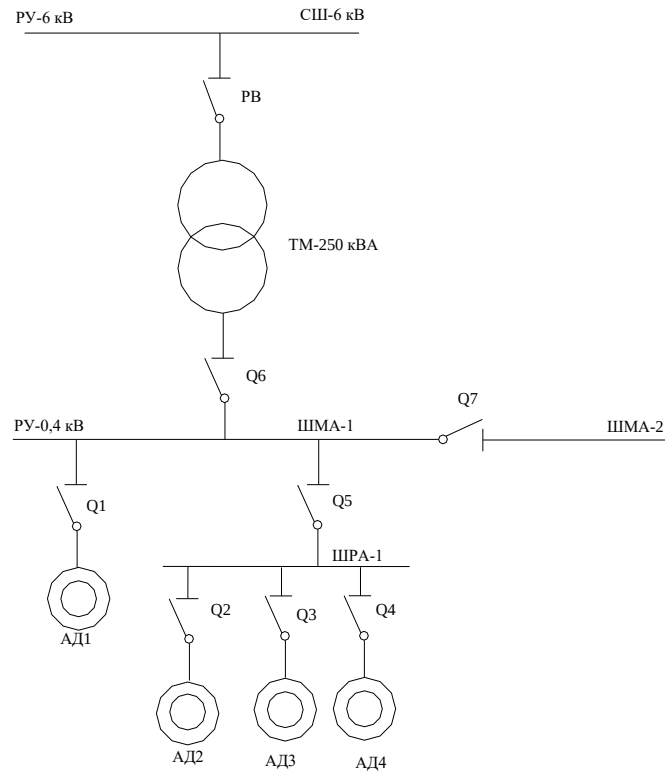


Рисунок 2.1 – Електрична схема розподільного пункту з автоматичними вимикачами

Автомати QF_1 - QF_4 захищають асинхронні двигуни з параметрами, зазначеними в таблиці 2.1. Двигуни встановлені в приміщенні з нормальним середовищем. Режим роботи двигунів визначається режимом роботи приводного механізму.

Автомат QF_5 – забезпечує захист *ЕП*, під'єднаних до розподільного шинопроводу *ШРА1*.

Автомат QF_6 – вступної, параметри якого визначаються встановленою потужністю трансформатора з урахуванням можливих перевантажень, припустимих ГОСТ 14209-85.

Автомат QF_7 – секційний, параметри якого визначаються по вхідному автомату.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики електроустаткування цеху

$P_{\text{ном. пасп., кВт}}$	75	55	45	37	30	22	18,5	90	45
Тип двигуна	5AM280M8	5AM28058	5AM250M8	5AM25058	5AM225M8	5A20018	5A200M8	5AM31558	5M25056
n_2 про/хв ⁻¹	735	735	735	735	735	730	730	740	985
$\cos \varphi$	0,83	0,83	0,75	0,72	0,8	0,8	0,7	0,85	0,85
$\eta, \%$	94,5	94,5	92,5	92	91,5	91	90	94,5	86,5
Кратність пускових струмів	6	6,2	6,7	6,7	5,5	6,7	6,7	6,0	6,0
Варіант	Вибір електроприймачів								
1	АД1		АД 2		АД 4		АД 3		
2		АД 1		АД 2		АД 3		АД 4	
3			АД 2		АД 1		АД 3		АД 4
4	АД2			АД 1		АД 4		АД 3	
5		АД 3			АД 4			АД 1	АД 2

Для вибору силового трансформатора по встановленій потужності EP , коефіцієнт використання варто приймати згідно з варіантом.

Таблиця 2.2 – Груповий коефіцієнт використання силового навантаження

Номер варіанта	I	II	III	IV
K_u	0,53	0,77	0,78	0,7

Обробка результатів роботи

Дано:

АД-1:5АМ315М6

$$P_n = 15 \text{ кВт}; \quad \eta = 87,5\%; \quad \cos\varphi = 0,79, \quad \frac{I_i}{I_m} = 5,3$$

АД-2 5АМ315М8

$$P_n = 7,5 \text{ кВт}; \quad \eta = 87,0\%; \quad \cos\varphi = 0,74, \quad \frac{I_i}{I_m} = 5,3$$

АД-3 5А160М8

$$P_n = 11 \text{ кВт}; \quad \eta = 87\%; \quad \cos\varphi = 0,74, \quad \frac{I_i}{I_m} = 5,3$$

АД-4 АИРМ1325

$$P_n = 15 \text{ кВт}; \quad \eta = 87,5\%; \quad \cos\varphi = 0,79, \quad \frac{I_i}{I_m} = 5,3$$

Вибір параметрів автоматів $QF_1 - QF_4$ – починаємо з визначення номінальних струмів двигунів, що захищені автоматами.

$$I_{н.дв.} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi \cdot \eta}, \quad A;$$

$$I_{н.дв.1} = \frac{15}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,875 \cdot 0,79} = 32,97 \text{ А};$$

результати розрахунку зводимо в таблицю 2.2.

Визначаємо кратність пускових струмів, а потім і пусковий струм двигунів:

$$I_{пуск} = k_n \cdot I_{н.дв.}, \quad A;$$

$$I_{пуск1} = 7 \cdot 32,97 = 174,74 \text{ А};$$

По розрахункових величинах приймаємо до установки автомат типу $A3110/60$ з номінальними параметрами (дод. А табл. А.2.1). При виборі номінального струму комбінованого електромагнітного розціплювача автомата, убудованого в шафу, варто враховувати тепловий поправочний коефіцієнт 0,85:

$$I_{н.расц.} = \frac{I_{н.дв.}}{0,85}, \quad A;$$

$$I_{н.расц.} = \frac{174,74}{0,85} = 38,79 \text{ А}.$$

Вибираємо розціплювач із номінальним струмом

$$I_{н.расц.} = 40 \text{ A.}$$

Установлюємо неможливість спрацьовування (налаштуємо захист від пускових струмів) автомата при пуску двигуна:

$$I_{ср.эл.} = 1,25 \cdot I_{пуск}, \text{ A};$$

$$I_{ср.эл.} = 1,25 \cdot 174,74 = 218,42 \text{ A.}$$

Приймаємо уставку струму розціплювача 300 A.

Розраховуємо навантаження шинопроводу ШРА-1

За підключення до шинопроводу ШРА-1 трьох двигунів розрахунковим завантаженням буде сума номінальних струмів цих двигунів.

$$I_{P,ШРА-1} = \sum_1^3 I_{НОМ.ДВ.} = 17,70 + 25,97 + 32,97 = 76,63 \text{ A};$$

Піковий струм шинопроводу ШРА-1 визначається з умови пуску найбільш потужного двигуна, приєднаного до шинопроводу:

$$I_{пик} = I_{пуск.мах} + \sum_1^{n-1} I_{ном.дв.} = 17,70 + 25,97 + 174,74 = 152,74 \text{ A}$$

Вибираємо номінальний струм електромагнітного розціплювача автомата QF-5 з урахуванням теплового поправкового коефіцієнта:

$$I_{н.расц.} \geq I_{P,ШРА-1}$$

Перевіряємо неможливість спрацьовування автоматів при пуску найбільш потужного двигуна (налаштування від пускових струмів):

$$1,25 \cdot I_{пик} \leq I_{ср.эл.расц.}$$

$$1,25 \cdot 152,74 \leq 400$$

$$190,92 \text{ A} \leq 400 \text{ A}$$

Вибір вхідного автомата. Вхідні автомати вибирають за встановленою потужністю цехових трансформаторів з урахуванням їхнього можливого перевантаження в післяаварійному режимі, відповідно до ГОСТ 14209-89.

$$I_{н.ав.} = \frac{1,4 \cdot S_{номт}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} \text{ A.}$$

Розрахунок потужності силового трансформатора

Кількість трансформаторів приймаємо рівним $N = 1$.

Середню активну потужність за найбільш завантажену зміну для групи силових приймачів з однаковим режимом роботи визначаємо шляхом множення сумарної номінальної потужності групи робочих електроприймачів $P_{ном}$, наведеної для приймачів повторно-короткочасного режиму (ПКР) роботи у $TB = 100 \%$, на їх груповий коефіцієнт використання:

$$P_p = K_p \sum_i^m P_{ном} = 0,8 \cdot (15 + 7,5 + 11 + 15) = 38,8 \text{ кВт}$$

Освітлювальні навантаження для рішення цього завдання допускається не враховувати.

$$Nm_{min} = \frac{P_{p.} + P_{p.o.}}{\beta \cdot S_{н.тр.}} + \Delta N ;$$

$$Nm_{min} = \frac{38,8}{0,65 \cdot 63} + 0,08 = 1 \text{ шт.}$$

$$I_{н.ав.} = \frac{1,4 \cdot S_{номт}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{1,4 \cdot 63}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 134,01 \text{ А.}$$

За струмом післяаварійного режиму з урахуванням поправкового теплового коефіцієнта вибираємо номінальний струм селективного автомата з незалежною від величини струму витримкою часу при к. з.:

$$\frac{I_{н.ав.}}{0,85} \leq I_{ном расч}$$

$$157,6 < 160.$$

Приймаємо до установки автомат $A3710/160$, $I_{н.а.} = 160 \text{ А.}$

Секційний автомат вибираємо за навантаженням секції або за ступенем нижче вхідного автомата:

$$I_{р.секции} = \frac{(0,6 \div 0,7) \cdot I_{н.ав.}}{0,85}, \text{ А.}$$

Приймаємо до установки автомат типу $A3710/160$.

Підбираємо за таблицею А.2.2 (дод. А) чотирижильний кабель із алюмінієвими жилами марки $АВВГ$ перетином 10 мм^2 , для якого довгостроково-

припустимий струм дорівнює 27 А. Підставляючи числові значення в співвідношення:

$$I_{\text{дл доп}} \geq k_z \cdot I_z,$$

знаходимо, що необхідні умови виконуються. Тому приймаємо до установки кабель перетином 10 мм²,

$$I_{\text{дл доп}} = 45 \text{ А.}$$

Аналогічно вибираємо перетин проводів до двигунів АД2–АД4.

Розподільний ШРА-1 – оскільки навантаження незначне, розподіл навантаження (ШРА) виконаємо кабельною лінією АВВГ 4 × 50 $I_{\text{ном}} = 110 \text{ А}$.

Оскільки КУ підключені до шин вторинної напруги цехових ТП, переструми РМ знижуються в мережі до місця їхнього приєднання й не впливають на режим РМ у мережі 0,38 кВ.

Тому значення коефіцієнта активної потужності $\cos \varphi$ визначаємо за розрахунковим силовим навантаженням

$$\cos \varphi = \frac{P_p}{S_p} = \frac{2073,39}{3448,71} = 0,6; \quad \sin \varphi = 0,8$$

$$\Delta U_{\text{дійств}} = \sqrt{3} \cdot I_p \cdot l \cdot (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi)$$
$$\Delta U_{\text{дійств}} = \sqrt{3} \cdot 139,13 \cdot 0,1 \cdot (0,5 \cdot 0,6 + 0,06 \cdot 0,8) = 8,4 \text{ В.}$$

Розрахунки показали, що обрані перетини проводів задовольняють необхідним умовам.

Контрольні запитання

1. Дати порівняльну характеристику автоматів і запобіжників.
2. Дати порівняльну характеристику універсальних автоматів і тих, що налаштовуються.
3. Перелічіть умови вибору автоматів з різними типами розціплювачів.
4. Яке призначення відсічення в автоматів?
5. Що становить перевантажувальна характеристика встаткування?

6. Як узгоджуються між собою захисна характеристика з перевантажувальною під час здійснення захисту від струмів к. з. і від струмів перевантаження?

7. Як забезпечується селективність дії автоматів?

8. За якими параметрами перевіряють обрані автомати?

9. У яких випадках допускається не перевіряти автомати на чутливість захистів?

10. Як перевірити автомат на вимикальну здатність і на чутливість захистів для приміщень із нормальним навколишнім середовищем (у вибухонебезпечних приміщеннях)?

3 ПРАКТИЧНІ РОБОТИ 5–6

РОЗРАХУНКИ ВСТАНОВЛЕНОГО РЕЖИМУ СЕП НА ОСНОВІ ЛІНІЙНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Мета роботи. Моделювання встановлених режимів СЕП на основі лінійних рівнянь стану (узагальненого рівняння стану й рівняння вузлових напруг) у середовищі *Mathcad*.

Короткі теоретичні відомості

Завдання розрахунків і аналізу режимів, що встановилися, є базовим як під час проектування, так і керування електроенергетичними системами (СЕП) [1, 2, 7].

Під час проектування СЕП розрахунки режимів, що встановилися, проводяться з метою вибору й уточнення параметрів проєктованої системи. У процесі експлуатації подібні розрахунки дозволяють оперативно керувати й прогнозувати роботу СЕП. Водночас здійснюється оцінка допустимості режиму по технічних умовах устаткування.

Постановка завдання розрахунків режиму функціонування визначається особливостями СЕП як складної технічної системи, яка містить у собі велику кількість елементів, що виробляють, перетворюють, передають, розподіляють, споживають електроенергію й утворюють складнозамкнену розгалужену структуру.

Режимом роботи СЕП називається *стан* системи в будь-який момент часу або на деякому інтервалі часу.

Під *встановленим режимом* розуміється такий стан СЕП, коли параметри системи на розглянутому інтервалі часу зберігаються незмінними або змінюються достатньо повільно. Завдання розрахунків режимів, що встановилися, СЕП зводиться до визначення сукупності параметрів, що

характеризують роботу системи: напруг у різних точках системи, струмів у її елементах, потоків і втрат потужності і т. д.

Проведення розрахунків встановленого режиму пов'язане з рядом основних етапів:

- попереднє перетворення й перехід до розрахункової схеми електричної системи;
- формування рівняння стану по відомих вихідних даних з урахуванням структури розрахункової схеми;
- вибір методу розрахунків, складання алгоритму й програми на ЕОМ;
- проведення розрахунків встановленого режиму на ЕОМ;
- аналіз точності отриманих результатів.

В основі розв'язку завдання розрахунків режиму лежить використання математичних моделей макрорівня, що становлять лінійні рівняння стану (наприклад, узагальнене рівняння стану, рівняння вузлових напруг [1, 2, 7]) і нелінійні рівняння стану (наприклад, рівняння вузлових напруг у формі балансу потужності або у формі балансу струмів [2]).

Математичні моделі макрорівня, застосовувані в завданні розрахунків встановлених режимів засновані на законах Ома й Кирхгофа, представлених у матричній формі запису.

Розглянемо дві форми лінійних рівнянь стану, які дозволяють здійснити розрахунок встановленого режиму при спрощеному представленні навантаження й генерації потужності за допомогою лінійних джерел струму (що задає струму).

Модель 1. Класичною формою лінійної моделі є *узагальнене рівняння стану*.

$$\text{1-й закон Кирхгофа:} \quad MIB = J; \quad (3.1)$$

$$\text{2-й закон Кирхгофа:} \quad NZB IB = EK, \quad (3.2)$$

де M – матриця інцидентій 1-го роду описує зв'язок гілок і вузлів схеми.

Структура Правила формування

$$M = \begin{matrix} \text{В} \\ \text{У} \\ \text{З} \\ \text{Л} \\ \text{И} \end{matrix} \begin{matrix} i \\ j \end{matrix} \begin{matrix} \text{Гілки} \\ m_{ij} \end{matrix} \quad m_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо} \\ -1, & \text{якщо} \\ 0, & \end{cases} \begin{matrix} \bullet \xrightarrow{j} \\ \bullet \xleftarrow{j} \\ \end{matrix}$$

M – матриця інциденцій 2-го роду описує зв'язок гілок і незалежних контурів

Структура Правила формування

$$N = \begin{matrix} \text{К} \\ \text{О} \\ \text{Н} \\ \text{Т} \\ \text{У} \\ \text{Р} \\ \text{И} \end{matrix} \begin{matrix} i \\ j \end{matrix} \begin{matrix} \text{Гілки} \\ n_{ij} \end{matrix} \quad n_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо} \\ -1, & \text{якщо} \\ 0, & \end{cases} \begin{matrix} \bullet \xrightarrow{j} \\ \bullet \xleftarrow{j} \\ \bullet \xrightarrow{i} \end{matrix}$$

n – кількість вузлів; m – кількість гілок; L – кількість незалежних контурів

Вектор струмів, що задають, матриця опорів гілок

$$J = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} \quad Z_B = \begin{bmatrix} Z_1 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & Z_m \end{bmatrix} = Y_B^{-1}$$

Вектор струмів гілок Вектор ЕРС гілок Вектор контурних струмів

$$I_B = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix} \quad E_B = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix} \quad E_K = N E_B = \begin{bmatrix} E_{K1} \\ E_{K2} \\ \vdots \\ E_{KL} \end{bmatrix}$$

Узагальнене рівняння стану, отримане на основі 1-го й 2-го законів Кирхгофа, має вигляд:

$$AI_B = F, \quad (3.3)$$

де $A = \begin{bmatrix} M \\ \dots \\ NZ_B \end{bmatrix}$ – блокова матриця коефіцієнтів;

$F = \begin{bmatrix} J \\ \dots \\ E_K \end{bmatrix}$ – блокова матриця вільних членів рівнянь.

Представлена модель є універсальною, але не економічною через велику розмірність системи рівнянь (3.3). Тому найбільше в практиці розрахунків встановлених режимів поширене рівняння вузлових напруг.

Модель 2. Лінійна форма *рівняння вузлових напруг*.

$$Y_y U_\Delta = J - MY_B E_B, \quad (3.4)$$

де $Y_y = MY_B M^T$ – матриця вузлових провідностей;

$U_\Delta = [U_i - U_0]$ – матриця вузлових напруг;

U_0 – базисна напруга балансуєчого вузла;

$Y_B = Z_B^{-1}$ – матриця провідностей гілок;

E_B – матриця ЕРС гілок;

J – вектор задавальних струмів.

Якщо в схемі заміщення навантаження й генерація потужності моделюються за допомогою струмів, що задають, то $E_B = 0$ і рівняння вузлових напруг має вигляд

$$Y_y U_\Delta = J. \quad (3.5)$$

Алгоритм розрахунків встановленого режиму по рівнянню вузлових напруг містить у собі такі етапи.

1. Розрахунки вузлових напруг по рівнянню (3.5)

$$U_\Delta = Y_y^{-1} J.$$

$$2. \text{ Визначення рівнів напруг у вузлах } U = U_{\Delta} + U_{\zeta}. \quad (3.6)$$

Можливе виконання етапів 1 і 2 одночасно.

$$U = Y_y^{-1}(J - Y_{\zeta}U_{\zeta}), \quad (3.7)$$

Y_{ζ} – матриця провідностей гілок, що зв'язують вузли схеми з балансуючим вузлом B .

3. Розрахунки падінь напруг у гілках схеми

$$U_B = M^T U_{\Delta} = M^T (U - U_{\zeta}). \quad (3.8)$$

4. Визначення струмів у гілках схеми

$$I_B = Y_B (U_B + E_B). \quad (3.9)$$

5. Розрахунки потоків потужності P, Q .

Завдання на практичну роботу

1. *Розрахунки встановленого режиму по лінійних моделях для мережі змінного струму.*

Розрахувати струми в гілках розрахункової схеми мережі змінного струму (дод. Б), використовуючи узагальнене рівняння стану. Вихідні дані по варіантах наведено в додатку Б та в таблицях до кожної схеми.

Алгоритм розрахунків

$\Rightarrow$ Увести вихідні дані вектор-м, N , стовпець опорів гілок Z , вектор задавальних струмів, J , навантаження вектор ЕРС гілок E_B .

$\Rightarrow$ Сформувати діагональну матрицю опорів Z_B , використовуючи вбудовану функцію $Z_B = \text{diag}(Z)$.

$\Rightarrow$ Розрахувати проміжну матрицю $H = N \cdot Z_B$, матрицю контурних ЕРС E_K .

⇒ Сформувати блокові матриці коефіцієнтів A і вільних членів рівняння F , використовуючи вбудовану функцію *stack*, наприклад:

$$A := \text{stack}(M, H).$$

⇒ Розрахувати струми в гілках схеми по узагальненому рівнянню стану через зворотну матрицю коефіцієнтів.

Визначити параметри встановленого режиму для розрахункової схеми, по рівнянню вузлових напруг у лінійній формі.

Алгоритм розрахунків

⇒ Розрахувати матрицю вузлових провідностей по $Y_y = MY_B M^T$.

⇒ Визначити рівні напруг у вузлах по (3.7), або використовуючи (3.5) і (3.6), $U_6 = 10,5$ кВ.

⇒ Розрахунки падінь напруг у гілках схеми по (3.8).

⇒ Визначення струмів у гілках схеми по (3.9).

Зрівняти результати розрахунків – струми в гілках схеми, отримані по **Моделі 1 і Моделі 2.**

2. Розрахунки встановленого режиму по лінійних моделях для мережі змінного струму.

Визначити параметри встановленого режиму для розрахункової схеми, додаток Б, по рівнянню вузлових напруг у лінійній формі. Вихідні дані по варіантах наведено в таблицях до кожної схеми додатку Б. Розрахунки провести з урахуванням одиниць виміру параметрів.

Алгоритм розрахунків

⇒ Увести вихідні дані M , вектор-стовпець опорів гілок Z (Ом), вектор струмів, що задають, навантаження $J(\text{ка}) U_6 = 220$ кВ.

⇒ Сформувати діагональну матрицю провідностей гілок у сименсах

$$Y_{B_i,i} = \frac{1}{Z_i}, \text{ де } i := 1 \dots 7.$$

⇒ Сформувати матрицю провідностей гілок, що зв'язують вузли схеми з балансуючим Y_6 у сименсах.

⇒ Розрахувати матрицю вузлових провідностей у сименсах.

⇒ Розрахувати напруги у вузлах схеми в кіловольтах.

⇒ Визначити модуль і фазу напруг у кіловольтах і градусах.

⇒ Розрахувати вектор спадань напруги в гілках схеми в кіловольтах.

⇒ Розрахувати струми в гілках схеми в кілоамперах.

⇒ *Здійснити перевірку результатів по балансу струмів:* сума задавальних струмів має дорівнювати току балансуючого вузла зі зворотним знаком. Струм балансуючого вузла дорівнює алгебраїчній сумі струмів гілок, пов'язаних з вузлом B з урахуванням їхнього напрямку.

4 ПРАКТИЧНІ РОБОТИ 7–8

РОЗРАХУНКИ ВСТАНОВЛЕНОГО РЕЖИМУ СЕП НА ОСНОВІ НЕЛІНІЙНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Мета роботи. Моделювання встановлених режимів СЕП на основі нелінійних рівнянь стану в середовищі Mathcad.

Короткі теоретичні відомості

Нелінійні рівняння стану дозволяють здійснити розрахунок встановленого режиму при представленні навантаження й генерації потужності за допомогою нелінійних джерел струму [2].

$$j_K(\dot{U}) = \frac{S_K^*(\dot{U})}{\sqrt{3}U_K^*}, \quad (4.1)$$

де $J_K(U)$ – нелінійне джерело струму; S_K^* – потужність трьох фаз вузла К; U_K^* – сполучений комплекс міжфазної напруги вузла К.

Як вихідні дані використовується $S_H = \text{const}$, $S_T = \text{const}$.

Існують дві форми вистави нелінійних рівнянь вузлових напруг.

Модель 3. Рівняння вузлових напруг у формі балансу струмів

$$\dot{Y}_y \dot{U} = \sqrt{3} \cdot j(\dot{U}) - \dot{Y}_6 U_6. \quad (4.2)$$

Наприклад, для тривузлової схеми:

$$\begin{cases} \dot{Y}_{11}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{12}\dot{U}_2 + \dot{Y}_{13}\dot{U}_3 = \frac{S_1^*}{U_1^*} - \dot{Y}_{16}U_6 \\ \dot{Y}_{21}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{22}\dot{U}_2 + \dot{Y}_{23}\dot{U}_3 = \frac{S_2^*}{U_2^*} - \dot{Y}_{26}U_6, \\ \dot{Y}_{31}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{32}\dot{U}_2 + \dot{Y}_{33}\dot{U}_3 = \frac{S_3^*}{U_3^*} - \dot{Y}_{36}U_6, \end{cases}$$

де $Y_{i6} = -Y_{i1} - Y_{i2} - Y_{i3}$.

Модель 4. Рівняння вузлових напруг у формі балансу потужності

$$U_{\text{diag}}^* (\dot{Y}_y \dot{U} + \dot{Y}_6 U_6) = S^*. \quad (4.3)$$

Наприклад, для тривузлової схеми:

$$\begin{cases} \dot{U}_1^* (\dot{Y}_{11} \dot{U}_1 + \dot{Y}_{12} \dot{U}_2 + \dot{Y}_{13} \dot{U}_3 + \dot{Y}_{16} U_6) = S_1^*, \\ \dot{U}_2^* (\dot{Y}_{21} \dot{U}_1 + \dot{Y}_{22} \dot{U}_2 + \dot{Y}_{23} \dot{U}_3 + \dot{Y}_{26} U_6) = S_2^*, \\ \dot{U}_3^* (\dot{Y}_{31} \dot{U}_1 + \dot{Y}_{32} \dot{U}_2 + \dot{Y}_{33} \dot{U}_3 + \dot{Y}_{36} U_6) = S_3^*. \end{cases}$$

Завдання на практичну роботу

Здійснити розрахунок встановленого режиму на основі нелінійної моделі: рівняння вузлових напруг у формі балансу потужності. Вихідні дані по варіантах наведено в додатку Б.

Алгоритм розрахунків

1. Установити індексацію масивів з одиниці (за замовчуванням індекси елементів масивів починаються з нуля) $ORIGIN := 1$.

2. Під час виконання роботи використовувати можливості роботи *Mathcad* з одиницями виміру. Увести додаткові одиниці виміру, відсутні в системі:

$$MVA := 10^3 \cdot kV \cdot amp$$

$$Mwatt := MVA$$

$$Mvar := MVA.$$

3. Увести вихідні дані – погонні параметри ЛЕП (використовувати можливості *Mathcad* роботи з одиницями виміру):

$r_0(ohm/km)$; $x_0(ohm/km)$; $b_0(siemens/km)$ – погонні параметри ЛЕП;

$l(km)$ – довжина ЛЕП; $P_H(Mwatt)$; $Q_H(Mvar)$ – потужність навантаження;

$U_0 = 222 kV$ – базисна напруга; $U_{\text{ном}} = 220 kV$ – номінальна напруга.

4. Розрахувати параметри ЛЕП:

5. Сформувати матрицю вузлових провідностей.

Скласти й увести матрицю інциденцій 1-го роду **M**.

Розрахувати матрицю провідностей гілок в *siemens*.

$$i := 1...5 \quad Y_{b_i, i} := \frac{1}{Z_i}.$$

Розрахувати матрицю вузлових провідностей в *siemens*.

$$Y_y := MY_b M^T.$$

Розрахувати ємнісні провідності поперечних гілок і додати їх до діагональних власних провідностей вузлів матриці Y_y .

Наприклад, перший вузол розрахункової схеми пов'язаний з гілками 3 і 5 (рис. 4.1):

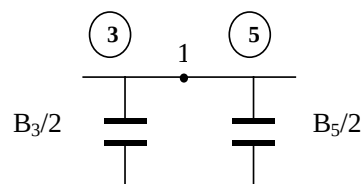


Рисунок 4.1 – Фрагмент розрахункової схеми

Для вузла 1: $Y_{y1,1} := Y_{y1,1} + \frac{B_3 + B_5}{2}.$

Додати стовпець матриці вузлових провідностей, відповідний до балансуєчого вузла.

Наприклад, для розрахункової схеми вигляду (рис. 4.2).

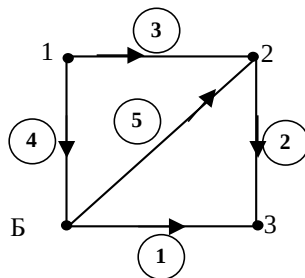


Рисунок 4.2 – Розрахункова схема

$$Y_{y1,4} := -\frac{1}{Z_4} \quad Y_{y2,4} := -\frac{1}{Z_5} \quad Y_{y3,4} := -\frac{1}{Z_1}.$$

6. Розрахувати значення вузлових напруги з використанням нелінійних рівнянь вузлових напруг у формі балансу потужності.

Приклад із програми в середовищі Mathcad:

Початкове наближення

$$U1 := (1.0 - i \cdot 0.15) \cdot U_{\text{non}}$$

$$U2 := U1$$

$$U3 := U1$$

Вирішальний блок

Given

$$U1 \cdot \left(\overline{Y_{y_{1,1}}} \cdot \overline{U1} + \overline{Y_{y_{1,2}}} \cdot \overline{U2} + \overline{Y_{y_{1,3}}} \cdot \overline{U3} + \overline{Y_{y_{1,4}}} \cdot \overline{U0} \right) = S_1$$

$$U2 \cdot \left(\overline{Y_{y_{2,1}}} \cdot \overline{U1} + \overline{Y_{y_{2,2}}} \cdot \overline{U2} + \overline{Y_{y_{2,3}}} \cdot \overline{U3} + \overline{Y_{y_{2,4}}} \cdot \overline{U0} \right) = S_2$$

$$U3 \cdot \left(\overline{Y_{y_{3,1}}} \cdot \overline{U1} + \overline{Y_{y_{3,2}}} \cdot \overline{U2} + \overline{Y_{y_{3,3}}} \cdot \overline{U3} + \overline{Y_{y_{3,4}}} \cdot \overline{U0} \right) = S_3$$

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} := \text{Minerr} (U_1, U_2, U_3)$$

Функція *Minerr* дозволяє визначити можливий розв'язок з мінімальною помилкою. Позначення $\overline{Y_{y_{1,1}}}$ – сполучене комплексне значення вузлової провідності.

7. Розрахувати значення параметрів встановленого режиму.

Модуль напруги в (kV) і фазу напруги в градусах (deg)

У програмі **Mathcad**: модуль визначається операцією $|U1|$, фаза – $\arg(U1)$.

Значення напруг на початку й кінці кожних гілок.

Приклад для схеми (рис. 4.2) із програми в середовищі **Mathcad**:

$$U_i := \begin{pmatrix} U_0 \\ U_2 \\ U_1 \\ U_1 \\ U_0 \end{pmatrix} \quad U_k := \begin{pmatrix} U_3 \\ U_3 \\ U_2 \\ U_0 \\ U_2 \end{pmatrix}.$$

Значення струмів у гілках схеми в *amp*, використовувати векторну операцію:

$$\overrightarrow{I} := \left(\frac{U_i - U_k}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{Z} \right).$$

Значення потоків потужності на початку й наприкінці кожної гілок:

$$\Rightarrow \text{на початку гілок } i - S_{i \text{ нач}} = \sqrt{3} \cdot U_{i \text{ нач}} \cdot \overline{I} - |U_{i \text{ нач}}|^2 \cdot \frac{B_i}{2}.$$

З використанням векторних операцій із програми в **Mathcad**:

$$\overrightarrow{S_i} := (\sqrt{3} \cdot \overrightarrow{U_i} \cdot \overline{\overrightarrow{I}}) - \left[(|U_i|)^2 \frac{B_i}{2} \right];$$

$$\Rightarrow \text{наприкінці гілок } i - S_{i \text{ кон}} = \sqrt{3} \cdot U_{i \text{ кон}} \cdot \overline{I} + |U_{i \text{ кон}}|^2 \cdot \frac{B_i}{2}.$$

У середовищі **Mathcad** за допомогою векторних операцій представлення аналогічне.

Значення втрат потужності в гілках схеми:

$$\Delta P = \operatorname{Re}(S_{\text{нач}} - S_{\text{кон}}),$$

$$\Delta Q = \operatorname{Im}(S_{\text{нач}} - S_{\text{кон}}).$$

8. Здійснити перевірку результатів по балансу потужності: баланс потужності у схемі повинен відповідати потужності балансуючого вузла. Потужність балансуючого вузла дорівнює алгебраїчній сумі потоків потужності гілок, пов'язаних з вузлом Б з урахуванням їхнього напрямку.

Приклад для схеми (рис. 4.2) із програми в середовищі **Mathcad**:

– баланс потужності в схемі:

$$\sum_{i=1}^3 P_{H_i} + \sum dP + i \cdot \left(\sum_{i=1}^3 Q_{H_i} + \sum dQ \right) ;$$

– потужність балансуєчого вузла: $S_{H5} + S_{H1} - S_{K4}$.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прикладне програмне забезпечення для дослідження процесів в електротехнічних і енергетичних системах [Електрон. ресурс] : конспект лекцій для здобувачів усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії» / О. Б. Єгоров, М. Л. Глебова; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 87 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/60078/1/2021%20печ%20103Л%20%20Прикладне%20Програмне%20забезпечення%20конспект%20українск.pdf>, вільний (дата звернення 12.02.2025). – Назва з екрана.
2. Лозинський А. О. Розв’язування задач електромеханіки в середовищах пакетів MathCAD і MATLAB : навч. посіб. / А. О. Лозинський, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук. – 2-ге вид., доповн. – Львів : «Магнолія 2006», 2015. – 335 с.
3. Математичне моделювання в електроенергетиці : підручник / [О. В. Кириленко та ін.] ; за ред. М. С. Сегеди. – Львів : Львівська політехніка, 2010. – 608 с.
4. Методичні вказівки до практичних робіт з курсу «Відновлювані джерела енергії» / М. Г. Тарасенко, В. І. Гетманюк. – Тернопіль : Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2012. – 65 с.

ДОДАТОК А

Параметри споживачів та електрообладнання для розрахунків - додати

Таблиця А.1.1 – Значення коефіцієнтів K_u використання й $\cos \varphi$ потужності

Найменування електроприймачів	Коефіцієнти	
	Використання K_u	Потужність $\cos \varphi$
1	2	3
Агрегати дрібносерійного виробництва з нормальним режимом роботи	0,12–0,14	0,4–0,5
Верстати переробного сільськогосподарського виробництва	0,16	0,5–0,6
Штампувальні преси, автомати, верстати	0,17	0,65
Приводи очисних барабанів, бігунів і ін.	0,2–0,24	0,65
Переносний електроінструмент	0,06	0,5
Вентилятори	0,6–0,65	0,8
Насоси, компресори, двигун-генератори	0,7	0,8
Крани при ТВ = 25 %	0,05	0,5
Те саме при ТВ = 40 %	0,1	0,5
Елеватори, транспортери, шнеки, неблоковані конвеєри	0,4	0,75
Елеватори, транспортери, шнеки, заблоковані конвеєри	0,55	0,75
Зварювальні трансформатори дугового зварювання	0,2	0,4

Продовження таблиці А.1.1

1	2	3
Однопостові зварювальні двигун-генератори	0,3	0,6
Зварювальні двигун-генератори	0,5	0,7
Зварювальні машини шовні	0,2	0,4
Те саме, стикові й точкові	0,2–0,25	0,6
Зварювальні дугові автомати	0,35	0,5
Печі опору з автоматичним завантаженням виробів, сушильні шафи, нагрівальні прилади	0,75–0,8	0,95
Печі опору з неавтоматичним завантаженням виробів	0,5	0,95
Індукційні печі низької частоти	0,7	0,35

Таблиця А.1.2 – Значення коефіцієнтів розрахункового навантаження K_p на шинах низької напруги цехових трансформаторів і для магістральних шинопроводів напругою до 1 кВ

n_{Σ}	Коефіцієнт використання K_p							
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7 і більше
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	1,0
3	2,94	2,17	1,8	1,42	1,23	1,14	1,08	1,0
4	2,28	1,73	1,46	1,19	1,06	1,04	1,0	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

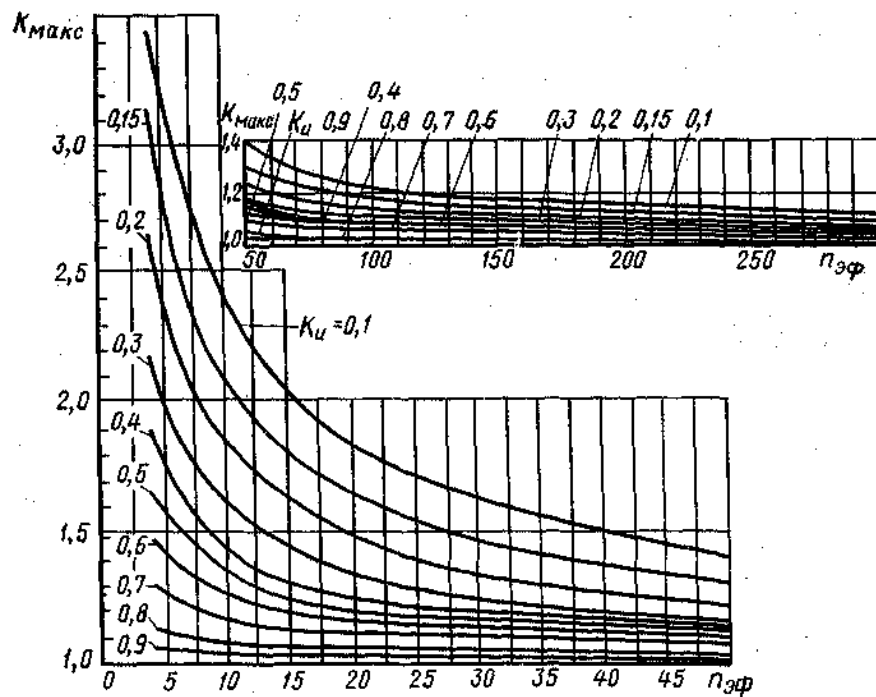


Рисунок А.1.1 – Графік залежності K_{max} від K_u й $n_{эф}$

Таблиця А.1.3 – Орієнтовні питомі щільності навантажень на 1 м² корисної площі

Ч. ч.	Цех, корпус, завод	Щільність навантаження, Вт/м ²	
		силової	освітлювальної
1	Цехи: переробні	230–370	12–19
2	молочної промисловості	260–280	12–19
3	обробки деревини	300–580	11–16
4	механоскладальні	280–390	12–19
5	електрозварювальні й термічні	300–600	13–15
6	металоконструкцій	350–390	11–13
7	інструментальні	330–560	15–16
8	деревообробні	75–140	14–17
9	блоки допоміжних цехів	260–300	17–18
10	Інженерні корпуси	270–330	16–20
11	Центральні заводські лабораторії	130–290	20–27

Таблиця А.1.4 – Коефіцієнт попиту освітлювальних навантажень

Ч. ч.	Найменування виробництва, цеху	Кс.о.
1	Дрібні виробничі будинки й торговельні приміщення	1
2	Виробничі будинки, що складаються з окремих більших прольотів	0,95
3	Адміністративні будинки, бібліотеки й підприємства громадського харчування	0,9
4	Виробничі будинки, що складаються з декількох окремих приміщень	0,85
5	Лабораторні й конторсько-побутові будинки, лікувальні, дитячі й навчальні установи	0,8
6	Складські будинки, розподільні пристрої й підстанції	0,6
7	Зовнішнє й аварійне освітлення	1

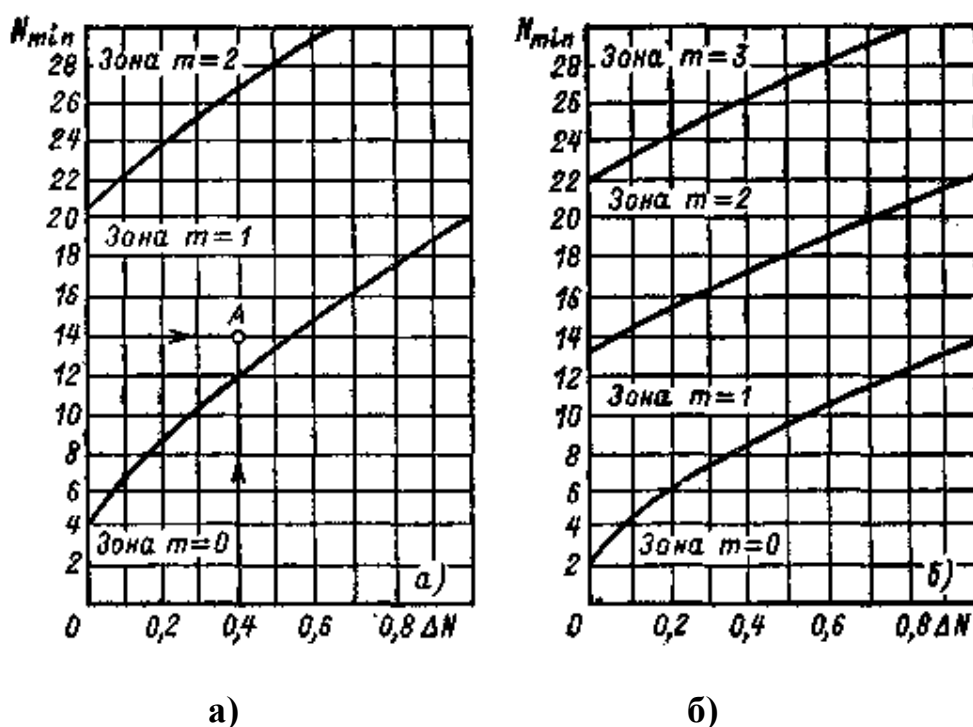


Рисунок А.1.2 – Зони для визначення додаткового числа трансформаторів

a) $K_3 = 0,7 \div 0,8$ б) $K_3 = 0,9 \div 1$

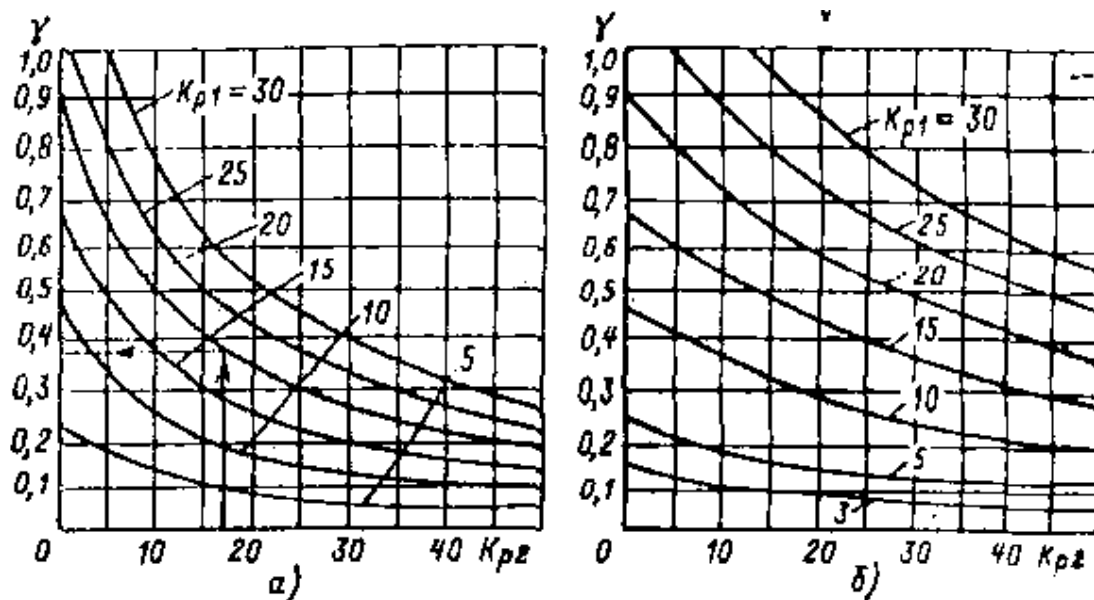


Рисунок А.1.3 – Криві визначення коефіцієнта для радіальної схеми живлення трансформаторів напругою 6 (а) і 10 кВ (б)

Таблиця А.1.6 – Значення коефіцієнта K_{p2}

Потужність трансформатора $S_{\text{ном.т.}}, \text{кВа}$	Коефіцієнт K_{p2} при довжині живильної лінії l , км				
	До 0,5	0,5–1,0	1,0–1,5	1,5–2	вище 2
400	2	4	7	10	17
630	2	7	10	15	27
1000	2	7	10	15	27
1600	3	10	17	23	40
2500	5	16	26	36	50

Таблиця А.1.7 – Комплектні конденсаторні установки напругою 0,38 кВ

Ч. ч.	Тип	Номінальна потужність, кВар
1	2	3
1	УКН-0,38-75УЗ	75
2	УКТ-0,38-75УЗ	75
3	УКТ-0,38-108УЗ	108

Продовження таблиці А.1.7

1	2	3
4	УКН-0,38-150УЗ	150
5	УКТ-0,38-150УЗ	150
6	УКЛ(П)Н-0,38-216-108УЗ	216
7	УКЛ(П)Н-0,38-324-108УЗ	324
8	УКЛ(П)Н-0,38-432-108УЗ	432
9	УКЛ(П)-0,38-300-150УЗ	300
10	УКЛ(П)-0,38-450-150УЗ	450
11	УКЛ(П)Н-0,38-600-108УЗ	600
12	УКЛ(П)Н-0,38-108-36УЗ	108
13	УКЛ(П)Н-0,38-216-36УЗ	216
14	УКЛ(П)Н-0,38-150-50УЗ	150
15	УКЛ(П)Н-0,38-300-50УЗ	300

Таблиця А.2.1 – Автоматичні вимикачі

Вимикач, тип	Номінальний струм	Термобіметалевий розціплювач	Електромагнітний розціплювач
	Іном, А	Іном, А	Номінальна уставка
А3710Б	160	16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160	630
		32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160	1 600
А 3720 Б	250	160, 200, 250	2 500
А 3730 Б	400	250, 320, 400	4 000
А 3740	630	250–630	1 890–6 300

Таблиця А.2.2 – Активні опори алюмінієвих проводів і кабелів, Ом/км

Перетин кабелю, мм^2	Кабель із алюмінієвими жилами, Ом/км
1	2
2,5	25
4	20
6	18
10	11
16	7
25	4
35	3
50	2
70	1
95	0,8
120	0,7

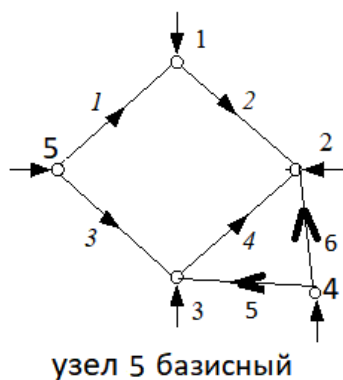
Таблиця А.2.3 – Параметри комплектних шинопроводів

Тип шинопроводу	$U_n, \text{кВ}$	$I_n, \text{А}$	Опір фази, мОм		Опір нульового провідника, мОм	
			r_1	x_1	r_{nn}	x_{nn}
1	2	3	4	5	6	7
ШМА1–1250	0,38	1250	0,034	0,016	0,054	0,063
ШМА1–1600	0,38	1600	0,030	0,014	0,037	0,012
ШМА1–3200	0,38	3200	0,01	0,025	0,061	0,035
ШМА1–4000	0,38	4000	0,013	0,015	0,007	0,045
ШРА73	0,38	250	0,21	0,21	0,12	0,21
ШРА73	0,38	400	0,15	0,17	0,162	0,164
ШРА73	0,38	630	0,1	0,13	0,162	0,164

ДОДАТОК Б

Розрахункові схеми та параметри до практичних робіт 5, 6, 7, 8

1. Варіант. Напруга вузла 5 220 кВ.



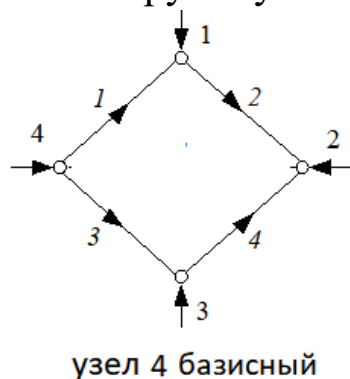
Струми навантажень

№	I_a , кА	I_r , кА
1	1	0,5
2	2	1
3	0,5	2
4	1,5	1

опори ліній

№	R , ом	X , ом
1	1	3
2	0,5	1
3	2	2
4	1,5	1
5	2	0,5
6	1	1

2. Варіант. Напруга вузла 4 110 кВ,



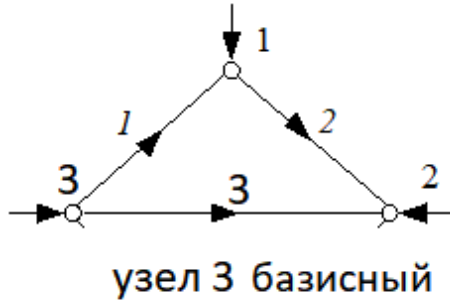
Струми навантажень

№	I_a , кА	I_r , кА
1	1,5	0,5
2	1	1
3	0,5	1

опори ліній

№	R, ом	X, ом
1	1,5 _	1
2	0,5	1
3	1	2
4	1,5	1,5 _

3. **Варіант.** Напруга вузла 3 35 кВ,



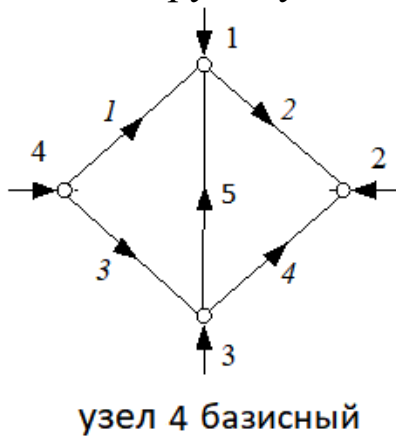
Струми навантажень

№	Ia, кА	Ir, кА
1	3	2,5 _
2	4	3

опори ліній

№	R, ом	X, ом
1	2,5	3
2	1,5 _	4
3	4	3

4. **Варіант.** Напруга вузла 4 110 кВ,



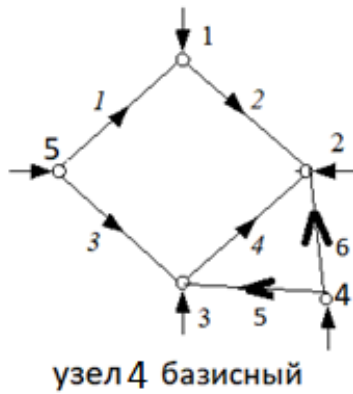
Струми навантажень

№	Ia, кА	Ir, кА
1	1,5 _	0,5
2	1	1
3	0,5	1

опори ліній

№	R, ом	X, ом
1	1,5 _	1
2	0,5	1
3	1	2
4	1,5	1,5 _
5	1	0,5

5. **Варіант.** Напряга вузла 4 35 кВ,



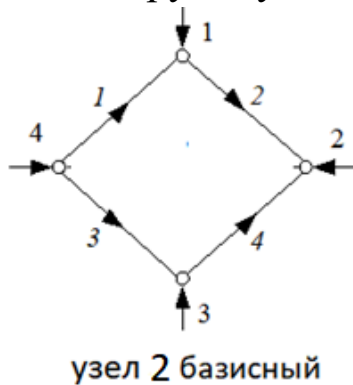
Струми навантажень

№	Ia , кА	Ir , кА
1	1	0,5
2	2	1
3	0,5	2
5	1,5	1

опори ліній

№	R, ом	X, ом
1	2	4
2	3,5 _	4
3	3	2,5 _
4	2,5 _	3
5	4	2,5 _
6	3	2

6. **Варіант.** Напряга вузла 2 220 кВ,



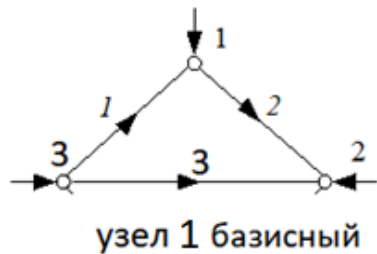
Струми навантажень

№	I_a , кА	I_r , кА
1	1,5	0,5
3	1	1
4	0,5	1

опори ліній

№	R , ом	X , ом
1	1,5	1,5
2	0,5	1
3	1,5	0,5
4	2,5	1,5

7. **Варіант.** Напруга вузла 1 220 кВ,



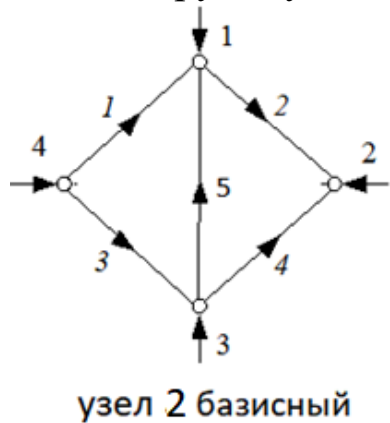
Струми навантажень

№	I_a , кА	I_r , кА
2	1	1,5
3	2	1

опори ліній

№	R , ом	X , ом
1	1,5	1
2	1	2
3	1	1,5

8. **Варіант.** Напруга вузла 2 35 кВ,



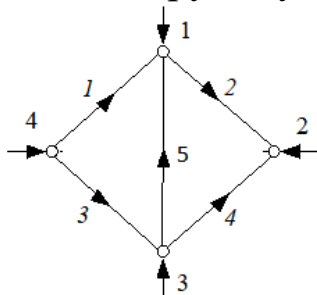
Струми навантажень

№	I_a , кА	I_r , кА
1	2,5	2,5
3	3	2
4	3,5	4

опори ліній

№	R , ом	X , ом
1	2,5	3
2	2	1,5
3	3	2
4	2,5	3,5
5	3	1,5

9. **Варіант.** Напруга вузла 4 35 кВ,



узел 4 базисный

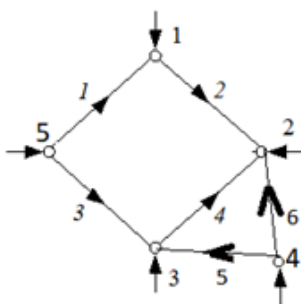
Струми навантажень

№	I_a , кА	I_r , кА
1	1,5	0,5
2	1	1
3	0,5	1

опори ліній

№	R , ом	X , ом
1	1,5	1
2	0,5	1
3	1	2
4	1,5	1,5
5	1	0,5

10. **Варіант.** Напруга вузла 4 150 кВ,



узел 4 базисный

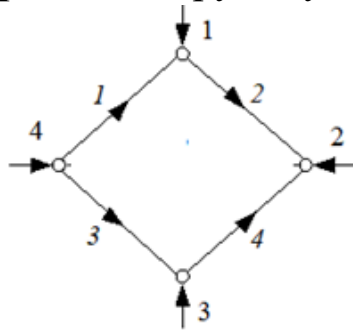
Струми навантажень

№	I_a , кА	I_r , кА
1	1	0,5
2	2	1
3	0,5	2
5	1,5	1

опори ліній

№	R , ом	X , ом
1	2	4
2	3,5	4
3	3	2,5
4	2,5	3
5	4	2,5
6	3	2

11. **Варіант.** Напряга вузла 2 110 кВ,



узел 2 базисный

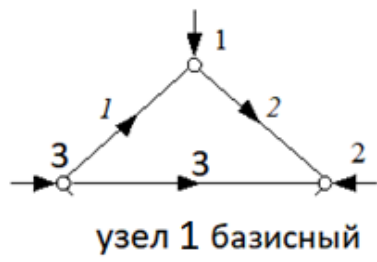
Струми навантажень

№	I_a , кА	I_r , кА
1	1,5	0,5
3	1	1
4	0,5	1

опори ліній

№	R , ом	X , ом
1	1,5	1,5
2	0,5	1
3	1,5	0,5
4	2,5	1,5

12. **Варіант.** Напруга вузла 1 330 кВ,



Струми навантажень

№	I_a , кА	I_r , кА
2	1	1,5
3	2	1

опори ліній

№	R, ом	X, ом
1	1,5	1
2	1	2
3	1	1,5

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації

до практичних занять
із навчальної дисципліни

**«ПРИКЛАДНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ
В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ
СИСТЕМАХ»**

*(для здобувачів усіх форм навчання першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

Укладачі: **ЄГОРОВ** Олексій Борисович,
ГЛЄБОВА Марина Леонідівна

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

Редактор *О. В. Михаленко*

Комп'ютерне верстання *М. Л. Глєбова*

План 2022, поз. 226М

Підп. до друку 11.02.2025. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 3,0.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Чорноглазівська (Маршала Бажанова), 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.