

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання розрахункової практичної роботи

з освітнього компонента

***«ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ
СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ»***

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

Харків – 2026

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

Методичні вказівки складаються з типових практичних робіт за основними розділами освітньої компоненти «SMART GRID ТЕХНОЛОГІЇ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ, ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЦІ». Призначені для проведення практичних занять в дистанційному форматі як під керівництвом викладача, так і в автономному режимі. Рекомендовано для здобувачів вищої освіти другого (магістерського рівня) рівня зі спеціальності G3 «Електрична інженерія» усіх форм навчання.

Укладачі:

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

Рецензент

проф. О. М. Ананьєва

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Основні теоретичні відомості	6
1.1 Прийняті припущення та позначення	6
1.2 Активна, реактивна та повна потужності	7
1.3 Вплив реактивної потужності на мережу	8
1.4 Методи компенсації реактивної потужності	9
1.5 Схема досліджуваної системи та з'єднання батареї.....	11
1.6 Межі застосовності пасивної компенсації.....	13
2 Розрахункова частина	14
2.1 Розрахунок режиму без компенсації	14
2.2 Визначення потрібної ємності	15
2.3 Точний перерахунок режиму після компенсації.....	17
2.4 ККД мережі до та після компенсації.....	18
2.5 Повна компенсація та місце контролю $\cos(\varphi)$	20
2.6 Приклад виконання розрахунку	21
2.7 Завдання та вихідні дані за варіантами	23
3 Моделювання та перевірка результатів	27
3.1 Побудова моделі усталеного режиму.....	27
3.2 Рівняння моделі в часовій області	27
3.3 Порядок числового експерименту	28
3.4 Перевірка правильності та аналіз	29
4 Зміст та оформлення звіту	31
5 Питання для самоперевірки	33
Список літератури	34

ВСТУП

Методичні вказівки призначені для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності G3 «Електрична інженерія» освітньої програми «Електропостачання та ресурсозберігаючі технології» всіх форм здобуття освіти. Практична робота виконується в межах дисципліни «Основи проектування та моделювання систем електропостачання».

Тема роботи — розрахунок та моделювання конденсаторної компенсації реактивної потужності симетричного трифазного RL-навантаження з урахуванням активного опору та індуктивності живильної мережі.

Мета роботи — навчитися визначати ємність трифазної конденсаторної батареї, розраховувати усталені режими до і після її підключення, оцінювати струми, напруги, активні втрати та коефіцієнт корисної дії мережі, а також перевіряти результати засобами математичного моделювання.

Після виконання роботи здобувач має вміти складати пофазну схему заміщення; розрізняти активну, реактивну та повну потужності; обирати місце компенсації; визначати ємності для з'єднань «зірка» і «трикутник»; перевіряти баланси потужностей та пояснювати зміну режиму мережі.

Об'єкт дослідження складається з ідеального трифазного джерела синусоїдної напруги, послідовних R–L елементів мережі, симетричного навантаження з послідовно з'єднаних R–L елементів у кожній фазі та конденсаторної батареї, підключеної паралельно навантаженню після опору мережі.

Основний розрахунок виконують для заданого коефіцієнта потужності на шинах навантаження. Окремо досліджують повну компенсацію реактивної потужності навантаження. Коефіцієнт потужності на затискачах джерела

обчислюють у кожному режимі, оскільки індуктивність мережі також споживає реактивну потужність.

Робота передбачає аналітичний розрахунок за індивідуальним варіантом, перевірку комплексним методом або в моделювальному середовищі та оформлення звіту. Вихідні дані для 30 варіантів наведено в таблиці 2.2. Числовий приклад у підрозділі 2.6 є окремим навчальним прикладом.

1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Прийняті припущення та позначення

Розглядають симетричний усталений режим з частотою 50 Гц. Параметри елементів сталі; нелінійність, гармоніки, насичення магнітопроводів і власні активні втрати ідеальних конденсаторів та індуктивностей не враховують. Навантаження з'єднане зіркою. Нейтраль у пофазній схемі є розрахунковою: для симетричного трипровідного кола окремий нейтральний провідник не потрібний.

Таблиця 1.1 — Основні позначення

Позначення	Фізичний зміст	Одиниця
U_s, E	Лінійна напруга джерела та фазна напруга $E = U_s/\sqrt{3}$	В
R_s, L_s	Активний опір та індуктивність однієї фази мережі	Ом; Гн
R_L, L_L	Опір та індуктивність однієї фазної RL-гілки	Ом; Гн
U, U_L	Фазна та лінійна напруги шин навантаження	В
I_s, I_L	Лінійний струм мережі та струм фазної RL-гілки	А
C_Y, C_Δ	Ємність одного конденсатора відповідного з'єднання зірка/трикутник	Ф
Q_C	Додатний модуль реактивної потужності всієї батареї	ВАр
k_2	Заданий $\cos(\varphi)$ на шинах навантаження після компенсації	—

Позначення індексів змінних: індекс s позначає джерело або живильну мережу; L — навантаження; C — конденсаторну батарею; 0 — режим без компенсації; 1 — режим із заданою частковою компенсацією. Позначення (індекси) Y та Δ відповідають зірці й трикутнику. Комплексні діючі значення напруг і струмів позначено рискою зверху; модулі цих величин є діючими значеннями.

Усі потужності P , Q , S у подальших формулах — сумарні для трьох фаз. R_s , L_s , R_L та L_L задано для однієї фази.

1.2 Активна, реактивна та повна потужності

Активна потужність характеризує середню швидкість перетворення електричної енергії на тепло, механічну роботу та інші форми енергії. У прийнятій моделі потужність опору навантаження вважають корисною потужністю, доставленою споживачу. Втрати в активному опорі мережі до неї не належать.

Реактивний опір мережі та навантаження визначається виразами

$$X_L = \omega L; \quad X_L = \omega L_L; \quad X_S = \omega L_S; \quad \omega = 2\pi f \quad (1.1)$$

Активна реактивна та повна потужність однієї фази визначаються виразами

$$P = \sqrt{3} U_L I \cdot \cos(\varphi); \quad Q = \sqrt{3} U_L I \cdot \sin(\varphi); \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.2)$$

У формулі (1.2) U_L — лінійна напруга тієї трифазної ділянки, потужність якої визначають; I — її лінійний струм. Для джерела замість U_L підставляють U_s . Позначення U без індексу надалі відповідає фазній напрузі шин. Для синусоїдних напруг і струмів коефіцієнт потужності дорівнює косинусу кута зсуву між відповідними фазними напругою та струмом.

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad \tan(\varphi) = \frac{Q}{P} \quad (1.3)$$

В індуктивності енергія періодично накопичується в магнітному полі та повертається в коло. Тому реактивна потужність не є активною енергією, безповоротно втраченою в ідеальній котушці. Вона необхідна для створення магнітних полів багатьох електроприймачів. Небажані наслідки пов'язані з передаванням відповідного струму через реальну мережу.

Для індуктивного навантаження $Q > 0$: струм відстає від напруги. Для конденсатора реактивна потужність від'ємна: струм випереджає напругу. У цій роботі Q_C позначає додатний модуль потужності батареї; у балансі він входить зі знаком «мінус» [1].

1.3 Вплив реактивної потужності на мережу

За незмінних активної потужності та напруги зменшення $\cos \varphi$ збільшує струм. Це спричиняє додаткове нагрівання провідників, більші активні втрати, збільшення падіння напруги та використання частини пропускної здатності кабелів і трансформаторів для передавання реактивного струму [2].

$$I_S = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3}U_L} \quad \Delta P_S = 3I_S^2 R_S \quad (1.4)$$

$$\Delta U_L \approx \frac{R_S P + X_S Q}{U_L} \quad (1.5)$$

У формулах (1.4), (1.5) P та Q — потужності, що надходять на шини навантаження, U_L — їхня лінійна напруга. Формула (1.5) є наближенням для невеликого падіння напруги; точний розрахунок виконують комплексним методом. Після встановлення батареї замість Q навантаження використовують результуючу потужність $Q_L - Q_C$.

Наприклад, за однакових P і U_L підвищення $\cos(\varphi)$ від 0,70 до 0,95 зменшує струм до $0,70/0,95 \approx 0,737$ початкового значення. Втрати в тому самому опорі зменшуються до 0,543 початкового значення. Для заданого RL-навантаження ці співвідношення лише орієнтовні: після компенсації змінюється напруга, а разом із нею — активна потужність навантаження.

Коефіцієнт потужності та ККД мають різний зміст. $\cos(\varphi)$ характеризує співвідношення активної та повної потужностей, а ККД — частку активної потужності джерела, доставлену навантаженню. Навіть за $\cos(\varphi) = 1$ активні втрати в опорі мережі не зникають.

1.4 Методи компенсації реактивної потужності

Пасивна поперечна компенсація полягає в підключенні конденсаторів паралельно навантаженню. Частина реактивного струму циркулює між індуктивним навантаженням і батареєю, тому струм у живильній лінії зменшується. Саме цей спосіб досліджують у роботі.

Фіксовану батарею застосовують для відносно сталого навантаження; ступінчасту батарею з контакторним або тиристорним перемиканням — коли споживання реактивної потужності змінюється. Регулятор підключає потрібну кількість ступенів за виміряними параметрами режиму [3].

За місцем встановлення розрізняють індивідуальну, групову та централізовану компенсацію. Індивідуальна батарея встановлюється біля приймача, групова — на шинах групи приймачів, централізована — на вводі. Компенсація розвантажує насамперед ділянку між джерелом і точкою підключення батареї; встановлення батареї перед досліджуваною лінією не усуває реактивний струм у цій лінії [4].

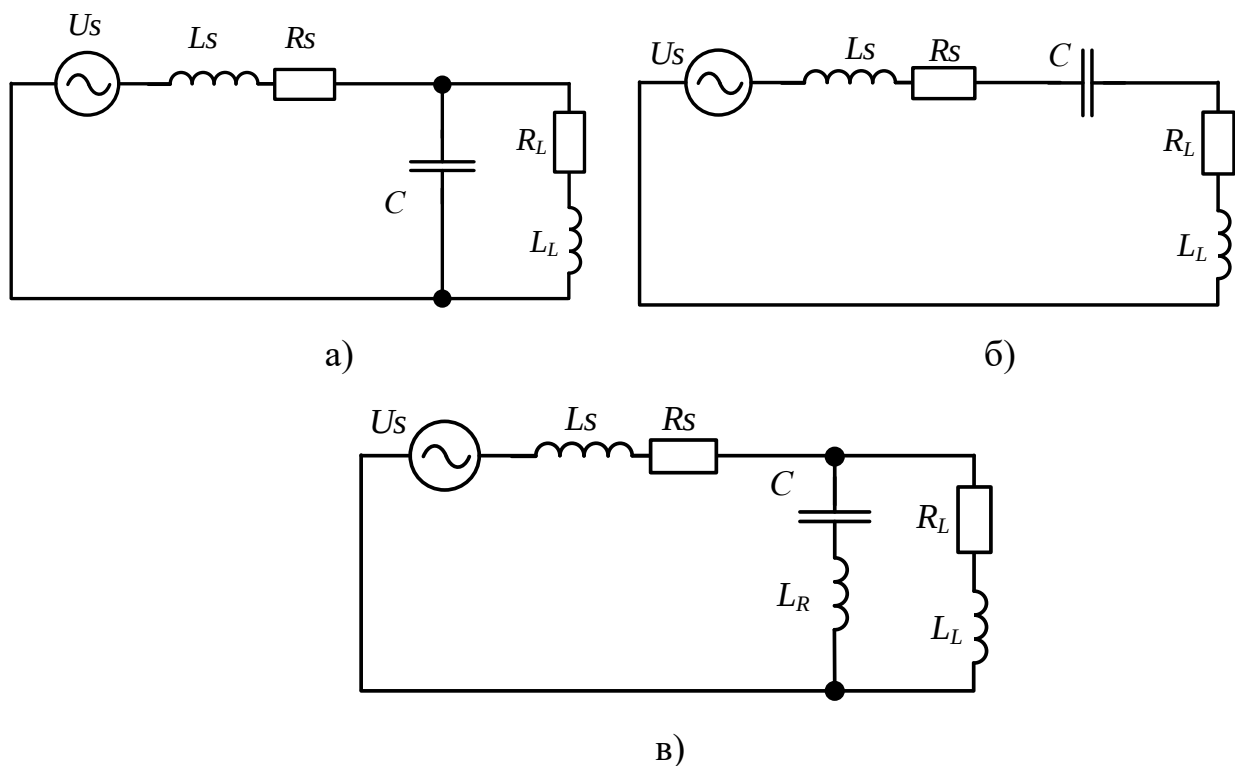
Поздовжня компенсація передбачає послідовне включення конденсатора в лінію для зменшення її результуючого реактивного опору. Вона змінює передавальні властивості мережі й не є еквівалентом локальної поперечної компенсації RL-навантаження.

Фільтрокомпенсувальні пристрої містять конденсатори та реактори. Вони дозволяють поєднати компенсацію на основній частоті з керуванням частотною характеристикою кола. Реактор і конденсатор потрібно розраховувати спільно; формулу ємності звичайної батареї не можна безпосередньо переносити на таку гілку.

Інші засоби — синхронні компенсатори, статичні тиристорні компенсатори SVC та перетворювальні компенсатори STATCOM. Вони забезпечують регулювання реактивної потужності; перетворювальні пристрої можуть формувати заданий реактивний струм у межах свого струмового ресурсу. У цій практичній роботі їхні алгоритми не моделюють.

1.5 Схема досліджуваної системи та з'єднання батареї

В режимі без компенсації конденсаторна гілка C_Y на рисунку 1.1, а відсутня. Активний і індуктивний опір мережі R_S і L_S послідовно включені між джерелом напруги і шинами навантаження. R_L та L_L утворюють послідовну гілку. Для забезпечення компенсації реактивної потужності індуктивного характеру компенсуючий конденсатор C_Y підключено паралельно навантаженню мережі. Струм мережі дорівнює векторній сумі струмів навантаження і батареї. При цьому ємнісний струм конденсаторної гілки має компенсувати.



а) поперечна (ємнісна) компенсація; б) повздовжня (ємнісна) компенсація;
в) поперечна (ємнісно-індуктивна) компенсація

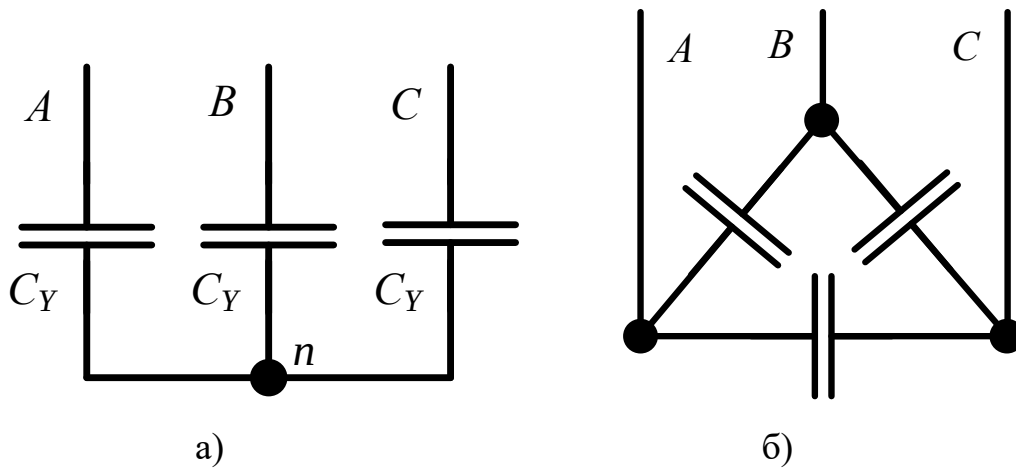
Рисунок 1.1 — Основні схеми пасивної компенсації

Для трифазної електричної мережі з трьома фазами А, В, С підключення компенсуючих конденсаторів може реалізовуватись за схемою зірка, чи схемою трикутник.

За з'єднання зіркою кожен конденсатор перебуває під фазною напругою $U_L/\sqrt{3}$; за з'єднання трикутником — під лінійною напругою U_L . Зірка на рисунку 1.2 має спільну точку n . У симетричному режимі вона може бути ізольованою від нейтралі джерела.

$$Q_C = 3\omega C_Y \left(\frac{U_L}{\sqrt{3}}\right)^2 = \omega C_Y U_L^2 \quad (1.6)$$

$$Q_C = 3\omega C_\Delta U_L^2; \quad C_Y = 3C_\Delta \quad (1.7)$$



а) за схемою зірка; б) за схемою трикутник

Рисунок 1.2 — З'єднання трьох компенсуючих конденсаторів до трифазної мережі

У формулах (1.6-1.7) C_Y і C_{Δ} — ємності одного конденсатора, а не сума трьох ємностей. Однакова сумарна реактивна потужність батареї потребує втричі меншої ємності кожного елемента трикутника, проте його робоча напруга має відповідати лінійній напрузі.

1.6 Межі застосовності пасивної компенсації

Надлишкова ємність може спричинити ємнісний характер споживання, збільшення струму та підвищення напруги. Тому батарею добирають до фактичного режиму і, за потреби, перемикають ступенями. Значення $\cos \varphi = 1$ не є універсальною метою для всіх точок мережі та режимів.

Ємність батареї разом з індуктивністю мережі змінює резонансні властивості системи. За наявності гармонік можливе підсилення струмів і напруг; оцінювання лише основної частоти не гарантує придатності батареї для реальної установки [5].

Під час практичного проєктування додатково перевіряють допустимі напругу й струм конденсаторів, гармонічний склад, комутаційні струми, розрядні кола, захист і тепловий режим. Наведені далі формули призначені для навчального розрахунку усталеного симетричного режиму; комутаційне обладнання за ними не обирають.

2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Розрахунок режиму без компенсації

За початкову фазу приймають фазу напруги джерела E . Комплексні опори мережі та навантаження визначають за формулою (2.1). Усі параметри мають бути переведені в основні одиниці СІ.

$$\overline{Z}_S = R_S + j\omega L_S; \quad \overline{Z}_L = R_L + j\omega L_L; \quad E = \frac{U_S}{\sqrt{3}} \quad (2.1)$$

$$\overline{I}_0 = \frac{E}{\overline{Z}_S + \overline{Z}_L}; \quad \overline{U}_0 = E - \overline{I}_0 \overline{Z}_S = \overline{I}_0 \overline{Z}_L \quad (2.2)$$

$$I_0 = |\overline{I}_0|; \quad U_{L0} = \sqrt{3} |\overline{U}_0| \quad (2.3)$$

Без батареї струм мережі збігається зі струмом RL-гілки. Активна й реактивна потужності навантаження та втрати в мережі становлять:

$$P_{L0} = 3I_0^2 R_L; \quad Q_{L0} = 3I_0^2 X_L \quad (2.4)$$

$$\Delta P_{S0} = 3I_0^2 R_S; \quad Q_{s, \text{line}, 0} = 3I_0^2 X_S \quad (2.5)$$

$$P_{S0} = P_{L0} + \Delta P_{S0}; \quad Q_{S0} = Q_{L0} + 3I_0^2 X_S \quad (2.6)$$

$$S_{S0} = \sqrt{P_{S0}^2 + Q_{S0}^2} = \sqrt{3} U_S I_0 \quad (2.7)$$

$$k_{S0} = \frac{P_{S0}}{S_{S0}}; \quad k_{L0} = \frac{R_L}{\sqrt{R_L^2 + X_L^2}} \quad (2.8)$$

Індекс s , у формулі (2.5) позначає реактивну потужність лише індуктивності лінії; Q_{s0} у формулі (2.6) — реактивну потужність джерела. Ці величини не слід ототожнювати.

2.2 Визначення потрібної ємності

Нехай k_2 — заданий коефіцієнт потужності сукупності «RL-навантаження під'єданого до ємнісного компенсатора реактивного навантаження» на шинах навантаження. Задачею є досягти нульової реактивної потужності. Заданий показник не стосується затискачів джерела.

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{X_L}{R_L}\right); \quad \varphi_2 = \arccos(k_2) \quad (2.9)$$

Формула підбору компенсації за потужностями має вигляд [6]:

$$Q_{C.calc} = P_L \cdot (\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)) \quad (2.10)$$

У формулі (2.10) P_L , Q_C та напруга батареї мають належати одному й тому самому режиму. За незмінної напруги ця формула безпосередньо задає потрібну потужність. Якщо використати P_{L0} та U_{L0} , можна визначити ємність, але фактичну потужність батареї після підключення необхідно перерахувати за новою напругою.

$$C_Y = \frac{Q_{C.calc}}{\omega U_L^2}; \quad C_\Delta = \frac{Q_{C.calc}}{3\omega U_L^2} \quad (2.11)$$

Для навантаження зі сталими R_L та L_L зручно використовувати провідність G . Позначимо G додатною активною провідністю, B_L — додатним модулем індуктивної реактивної провідності:

Комплексні провідності визначаються виразами

$$\frac{1}{Z_L} = G - jB_L; \quad G = \frac{R_L}{R_L^2 + X_L^2}; \quad B_L = \frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} \quad (2.12)$$

Залишкова реактивна потужність на шинах дорівнює $3U^2(B_L - \omega C_Y)$, а активна — $3U^2G$. Їхнє відношення не залежить від напруги. Звідси отримують точну для заданої RL-моделі формулу:

$$C_Y = \frac{B_L - G \tan(\varphi_2)}{\omega} = \frac{X_L - R_L \tan(\varphi_2)}{\omega(R_L^2 + X_L^2)} \quad (2.13)$$

$$C_\Delta = \frac{C_Y}{3}; \quad C_{Y.full} = \frac{B_L}{\omega} = \frac{L_L}{R_L^2 + (\omega L_L)^2} \quad (2.14)$$

Формула (2.13) справедлива для часткової компенсації за $k_2 \geq k_{L0}$. Якщо розрахунок дає від'ємну ємність, конденсатор для заданої цілі не потрібний; постановку завдання слід перевірити. За $k_2 = 1$ маємо повну компенсацію навантаження, для якої $C_{Y.full}$ визначено формулою (2.14).

Не можна використовувати $C = 1/(\omega^2 L_L)$ як формулу компенсації послідовного RL-навантаження. Вона описує іншу умову — взаємне

зрівноваження реактивних опорів ідеальних L і C ; у досліджуваній паралельній структурі потрібно враховувати активний опір RL -гілки.

2.3 Точний перерахунок режиму після компенсації

Незалежно від фізичного з'єднання батареї трифазну симетричну систему розраховують через еквівалентну пофазну ємність C_Y . Для фактичного трикутника попередньо приймають $C_Y = 3C_A$.

$$\bar{Y} = \frac{1}{Z_L} + j\omega C_Y = G + jB; \quad B = \omega C_Y - B_L; \quad (2.15)$$

$$\bar{U}_1 = \frac{E}{1 + Z_S \bar{Y}}; \quad \bar{I}_{S1} = \bar{U}_1 \bar{Y}; \quad (2.16)$$

$$\bar{I}_{L1} = \frac{\bar{U}_1}{Z_L}; \quad \bar{I}_{C1} = j\omega C_Y \bar{U}_1; \quad \bar{I}_{S1} = \bar{I}_{L1} + \bar{I}_{C1}; \quad (2.17)$$

$$U_{L1} = \sqrt{3} |\bar{U}_1|; \quad I_{S1} = |\bar{I}_{S1}|; \quad I_{L1} = |\bar{I}_{L1}|. \quad (2.18)$$

Струм I_{C1} у формулі (2.17) є еквівалентним лінійним струмом батареї. У зірці він одночасно є струмом одного конденсатора. У трикутнику струм кожного конденсатора дорівнює $\omega C_A U_{L1}$, а лінійний струм батареї — $\sqrt{3}$ разів більший.

$$P_{L1} = 3 I_{L1}^2 R_L = 3 |\bar{U}_1|^2 G; \quad Q_{L1} = 3 I_{L1}^2 X_L; \quad (2.19)$$

$$Q_{C1} = 3\omega C_Y \left| \overline{U_1} \right|^2; \quad Q_{b1} = Q_{L1} - Q_{C1}; \quad (2.20)$$

$$P_{S1} = 3I_{S1}^2 R_S; \quad P_{S1} = P_{L1} + \Delta P_{S1}; \quad Q_{S1} = Q_{b1} + 3I_{S1}^2 X_S; \quad (2.21)$$

$$k_{b1} = \frac{P_{L1}}{\sqrt{P_{L1}^2 + Q_{L1}^2}}; \quad k_{S1} = \frac{P_{S1}}{\sqrt{P_{S1}^2 + Q_{S1}^2}}. \quad (2.22)$$

Під час перевірки потрібно отримати $k_{b1} = k_2$ та $Q_{b1} \geq 0$. Значення k_{S1} може бути меншим через реактивну потужність індуктивності мережі. Модулі струмів I_{S1} , I_{L1} та I_{C1} не додають арифметично: додають їхні комплексні значення.

Після підключення батареї фазна напруга на навантаженні змінюється. Тому при сталих R_L та L_L змінюються також I_{L1} , P_{L1} і Q_{L1} . Підстановка початкового струму навантаження у формули після компенсації порушує баланс потужностей.

2.4 ККД мережі до та після компенсації

Межі досліджуваної мережі: від затискачів ідеального джерела до шин RL-навантаження. Корисною є активна потужність, доставлена в RL-навантаження; втратами є нагрівання активного опору мережі R_S . Власні втрати джерела та внутрішній ККД електроприймача не входять до цієї моделі.

$$\eta_0 = \frac{P_{LO}}{P_{SO}} = \frac{P_{LO}}{P_{LO} + 3I_0^2 R_S} = \frac{R_L}{R_L + R_S}, \quad (2.23)$$

$$\eta_1 = \frac{P_{L1}}{P_{S1}} = \frac{P_{L1}}{P_{L1} + 3I_{S1}^2 R_S} . \quad (2.24)$$

ККД за формулами (2.23), (2.24) є безрозмірним числом; для подання у відсотках його множать на 100. Спрощення $\eta_0 = R_L/(R_L + R_S)$ можливе лише тому, що до компенсації через обидва опори проходить однаковий струм. Після компенсації цю формулу застосовувати не можна.

Залежність значення ККД від величини компенсуючого конденсатора визначається виразом

$$\eta(C_Y) = \frac{G}{G + R_S \left[G^2 + (\omega C_Y - B_L)^2 \right]} ; \quad (2.25)$$

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + R_S G} . \quad (2.26)$$

Формула (2.25) отримана підстановкою $P_L = 3U^2 G$ та $I_s^2 = U^2(G^2 + B^2)$. Для ідеальної батареї у прийнятій моделі ККД максимальний при нульовій результуючій реактивній провідності навантаження з батареєю. Це не означає ані нульових втрат, ані обов'язково мінімальної абсолютної потужності втрат серед усіх можливих режимів зі змінною напругою.

$$\delta_P = \frac{\Delta P_{SO} - \Delta P_{S1}}{\Delta P_{SO}} 100\% ; \quad \delta_1 = \frac{I_O - I_{S1}}{I_O} 100\% ; \quad (2.27)$$

$$\Delta \eta_{PP} = 100(\eta_1 - \eta_0) ; \quad \delta_U = \frac{U_{L1} - U_{L0}}{U_{L0}} 100\% . \quad (2.28)$$

$\Delta\eta_{pp}$ подають у відсоткових пунктах. Наприклад, зміна ККД від 96 % до 98 % дорівнює 2 відсотковим пунктам. Відносне зростання ККД — інша величина: $(\eta_1 - \eta_0)/\eta_0 \cdot 100 \%$.

При врахуванні активних втрат потужності в активному опорі реальної конденсаторної батареї, у балансі джерела додають $P_{C,loss}$. Тоді $\eta = P_L/(P_L + \Delta P_s + P_{C,loss})$, а струми і напруги перераховують з урахуванням активної провідності батареї. У базових варіантах $P_{C,loss} = 0$.

2.5 Повна компенсація та місце контролю $\cos \varphi$

За умови $C_Y = C_{Y,full}$ реактивна потужність RL-навантаження повністю компенсується на його шинах: $Q_b = 0$. Однак у джерела залишається додатна реактивна потужність індуктивності лінії:

$$Q_{S,full} = 3I_{S,full}^2 X_S > 0; \quad X_S > 0. \quad (2.29)$$

Для додаткового дослідження можна знайти ємність, яка забезпечує $Q_s = 0$ саме на джерелі. Із формул балансу та визначення B отримуємо:

$$Q_S = 3U^2 \left[-B + X_S (G^2 + B^2) \right]; \quad B = \omega C_Y - B_L; \quad (2.30)$$

$$X_S B^2 - B + X_S G^2 = 0. \quad (2.31)$$

За $X_S > 0$ та $1 - 4X_S^2 G^2 \geq 0$ існують дійсні корені. Для навчального дослідження обирають малий корінь; великому кореню може відповідати

неприйнятний режим із великими струмами. Напругу та струм обов'язково перевіряють за формулами (2.15)–(2.22).

$$B_* = \frac{1 - \sqrt{1 - 4X_S^2 G^2}}{2X_S}; \quad C_{Y.S} = \frac{B_L + B_*}{\omega}. \quad (2.32)$$

За $X_S = 0$ умова $Q_S = 0$ дає $B = 0$. Якщо дискримінант від'ємний, у межах цієї моделі зміною лише шунтувальної ємності досягти $Q_S = 0$ неможливо. Знайдена ємність $C_{Y,s}$ при $X_S > 0$ перевищує ємність повної компенсації навантаження, а ККД зазвичай трохи нижчий за максимум (2.26).

2.6 Частковий приклад виконання розрахунку

Прийmemo окремий навчальний набір: $U_s = 400$ В; $f = 50$ Гц; $R_s = 0,08$ Ом; $L_s = 0,20$ мГн; $R_L = 2$ Ом; $L_L = 6$ мГн; $k_2 = 0,95$. Навантаження з'єднане зіркою. Необхідно знайти ємності батареї обох з'єднань та порівняти три усталені режими.

$$\omega = 314,159 \text{ рад/с}; \quad X_L = 1,88496 \text{ Ом}; \quad X_S = 0,062832 \text{ Ом}; \quad (2.33)$$

$$\overline{I}_0 = \frac{230,94}{2,08 + j1,94779} \text{ А}; \quad I_0 = 81,043 \text{ А}. \quad (2.34)$$

За формулами (2.3)–(2.8) отримуємо $U_{L0} = 385,777$ В; $P_{L0} = 39,408$ кВт; $Q_{L0} = 37,141$ квар; $\Delta P_{s0} = 1,576$ кВт; $k_{s0} = 0,72992$. ККД до компенсації: $\eta_0 = 2/(2 + 0,08) = 0,961538$, або 96,154 %.

$$G = 0,264793 \text{ S}; \quad B_L = 0,249562 \text{ S}; \quad \tan(\varphi_2) = \tan(\arccos(0,95)) = 0,328684; \quad (2.35)$$

$$C_Y = \frac{0,249562 - 0,264793 \cdot 0,328684}{314,159} = 517,344 \text{ мкФ}; \quad (2.36)$$

$$C_\Delta = \frac{C_Y}{3} = 172,448 \text{ мкФ}; \quad C_{Y,full} = 794,38 \text{ мкФ}. \quad (2.37)$$

Кожна з трьох ємностей зірки становить 517,344 мкФ, а кожна з трьох ємностей трикутника — 172,448 мкФ. Для повної компенсації навантаження кожна ємність трикутника дорівнює 264,793 мкФ. Наведені значення не округлюють до каталожних ступенів: спочатку перевіряють теоретичний розрахунок.

Після підключення батареї з $k_2 = 0,95$ за формулою (2.16) отримуємо $U_{L1} = 389,599 \text{ В}$, $I_{s1} = 62,696 \text{ А}$. Струм RL-гілки збільшується до 81,846 А внаслідок підвищення напруги, хоча струм джерела зменшується. Фактична потужність батареї $Q_{C1} = 24,670 \text{ квар}$.

Результати розрахунку навчального прикладу представлено в таблиці 2.1

За часткової компенсації струм джерела зменшився приблизно на 22,64 %, активні втрати мережі — на 40,15 %, а ККД зріс на 1,553 %. Водночас активна потужність джерела не зменшилась: приріст потужності навантаження через підвищення напруги перевищив зниження втрат. Для навантаження зі сталим опором це закономірний результат.

Перевірка активного балансу: $41,136 \approx 40,192 + 0,943 \text{ кВт}$. Перевірка реактивного балансу: $13,951 \approx 37,880 - 24,670 + 0,741 \text{ квар}$. Незначні розбіжності останнього знака зумовлені округленням. Баланси слід перевіряти за неокругленими проміжними величинами.

Таблиця 2.1 — Результати розрахунку навчального прикладу

Показник	Без компенсації	$k_2 = 0,95$	Повна компенсація
C_Y , мкФ	0	517,344	794,380
U_L , В	385,777	389,599	391,650
I_s , А	81,043	62,696	59,875
I_L , А	81,043	81,846	82,277
P_L , кВт	39,408	40,192	40,617
Q_L , квар	37,141	37,880	38,280
Q_C , квар	0	24,670	38,280
Q_b , квар	37,141	13,211	0
ΔP_s , кВт	1,576	0,943	0,860
P_s , кВт	40,984	41,136	41,477
Q_s , квар	38,379	13,951	0,676
$\cos(\varphi)$ на шинах	0,72773	0,95000	1,00000
$\cos(\varphi)$ джерела	0,72992	0,94702	0,99987
η , %	96,154	97,707	97,926

2.7 Завдання та вихідні дані за варіантами

Для свого варіанта необхідно виконати наведені нижче завдання (таблиця 2.2). У всіх варіантах $f = 50$ Гц; джерело та навантаження симетричні; навантаження з'єднане зіркою. U_s — діюча лінійна напруга ідеального

джерела. Усі R і L задано на фазу; опір мережі не множать на довжину або на два.

1 Виписати вихідні дані, перевести їх в одиниці СІ та накреслити трифазну і пофазну схеми без батареї та з батареєю на шинах навантаження.

2 Розрахувати режим без компенсації: комплексні значення струмів і напруг, а також P_{L0} , Q_{L0} , P_{s0} , Q_{s0} , S_{s0} , ΔP_{s0} , k_{L0} , k_{s0} та η_0 .

3 Визначити ємність кожного конденсатора зірки та трикутника для заданого k_2 . Показати збіг результатів формул (2.10), (2.11) і (2.13) для сталого RL-навантаження.

4 Перерахувати режим компенсації реактивної потужності при приєднанні конденсаторної батареї. Визначити U_{L1} , I_{s1} , I_{L1} , лінійний струм батареї та струм окремого конденсатора, P_{L1} , Q_{L1} , Q_{C1} , Q_{b1} , P_{s1} , Q_{s1} , S_{s1} , ΔP_{s1} , k_{b1} , k_{s1} та η_1 .

5 Повторити розрахунок для повної компенсації на шинах: $k_2 = 1$. Перевірити, що $Q_b = 0$, а Q_s дорівнює реактивній потужності лінії.

6 Порівняти три режими. Визначити зміну струму, напруги, втрат і ККД за формулами (2.27), (2.28). Перевірити баланси активної та реактивної потужностей.

7 Побудувати залежності $I_s(C_Y)$, $U_L(C_Y)$, $Q_s(C_Y)$, $k_s(C_Y)$ та $\eta(C_Y)$ для C_Y від 0 до $1,25C_{Y,full}$. Використати не менше 20 рівновіддалених точок і додатково позначити точну розраховану ємність для заданого k_2 .

8 Виконати перевірку моделюванням за розділом 3. Пояснити відмінність між струмом мережі та струмом навантаження, а також між компенсацією на шинах і на джерелі.

Додаткове завдання: за формулами (2.30)–(2.32) знайти ємність для $Q_s = 0$, перевірити допустимість отриманого режиму в межах навчальної моделі та порівняти ККД з режимом повної компенсації навантаження.

Примітка: k_2 задано на шинах навантаження для сукупності RL-гілки та конденсаторної батареї. Для кожного варіанта потрібно розрахувати обидва з'єднання батареї. Наведені дані є навчальними наборами параметрів, а не паспортними характеристиками конкретного об'єкта.

У всіх трьох режимах одного варіанта U_s , f , R_s , L_s , R_L та L_L залишаються незмінними. Змінюють лише ємність батареї. Не слід примусово підтримувати незмінними напругу шин або активну потужність навантаження: це означало б іншу математичну модель.

Таблиця 2.2 — Вихідні дані для індивідуального розрахунку

Варіант	U_s , В	R_s , Ом	L_s , мГн	R_L , Ом	L_L , мГн	k_2
1	380	0,030	0,100	1,40	5,35	0,92
2	400	0,038	0,125	1,52	5,43	0,95
3	415	0,046	0,150	1,64	5,48	0,98
4	380	0,054	0,175	1,76	5,48	0,92
5	400	0,062	0,200	1,88	5,44	0,95
6	415	0,070	0,225	2,00	5,36	0,98
7	380	0,078	0,250	2,12	5,24	0,92
8	400	0,086	0,275	2,24	5,07	0,95
9	415	0,094	0,100	2,36	9,02	0,98
10	380	0,102	0,125	2,48	8,87	0,92
11	400	0,030	0,150	2,60	8,68	0,95
12	415	0,038	0,175	2,72	8,47	0,98
13	380	0,046	0,200	2,84	8,22	0,92
14	400	0,054	0,225	2,96	7,93	0,95
15	415	0,062	0,250	3,08	7,61	0,98

Продовження таблиці 2.2.

Варіант	U_s , В	R_s , Ом	L_s , мГн	R_L , Ом	L_L , мГн	k_2
16	380	0,070	0,275	3,20	7,24	0,92
17	400	0,078	0,100	3,32	12,69	0,95
18	415	0,086	0,125	3,44	12,30	0,98
19	380	0,094	0,150	3,56	11,89	0,92
20	400	0,102	0,175	3,68	11,45	0,95
21	415	0,030	0,200	3,80	10,99	0,98
22	380	0,038	0,225	3,92	10,50	0,92
23	400	0,046	0,250	4,04	9,98	0,95
24	415	0,054	0,275	4,16	9,41	0,98
25	380	0,062	0,100	4,28	16,36	0,92
26	400	0,070	0,125	4,40	15,73	0,95
27	415	0,078	0,150	4,52	15,09	0,98
28	380	0,086	0,175	4,64	14,44	0,92
29	400	0,094	0,200	4,76	13,77	0,95
30	415	0,102	0,225	4,88	13,08	0,98

3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПЕРЕВІРКА РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Побудова моделі усталеного режиму

Перевірку можна виконати в математичному пакеті з комплексною арифметикою або в середовищі моделювання електричних кіл. Для комплексної моделі достатньо послідовно реалізувати формули (2.1)–(2.28). Використовують діючі значення, а не амплітуди.

У схемній моделі задають три синусоїдні джерела зі зсувами фаз 0° , -120° та $+120^\circ$. Амплітуда кожної фазної напруги дорівнює $\sqrt{2}U_s/\sqrt{3}$. У кожній фазі послідовно з джерелом встановлюють R_s і L_s , а після них — навантаження R_L – L_L . Батарею підключають до шин після елементів мережі.

Вимірювання виконують у двох місцях: на виході джерела та на шинах навантаження. Окремо вимірюють струм RL-гілки й струм батареї. Результати для зірки C_Y та трикутника $C_\Delta = C_Y/3$ мають збігатися за лінійними струмами й потужностями симетричного усталеного режиму.

3.2 Рівняння моделі в часовій області

Для симетричного режиму достатньо однієї фази відносно розрахункової нейтралі. За підключеної батареї $C_Y > 0$ станами є струм мережі i_s , струм навантаження i_L та напруга u на шинах:

$$e(t) = \sqrt{2}E \sin(\omega t); \quad (3.1)$$

$$L_s \frac{di_s}{dt} = e(t) - R_s i_s - u(t); \quad (3.2)$$

$$L_L \frac{di_L}{dt} = u(t) - R_L i_L; \quad (3.3)$$

$$C_Y = i_S - i_L. \quad (3.4)$$

Для фаз В і С аргумент синуса зсувають відповідно на $-2\pi/3$ та $+2\pi/3$. Рівняння (3.2)–(3.4) описують симетричну пофазну модель. Несиметричний режим із плаваючою нейтраллю потребує окремого розрахунку її потенціалу.

За відсутності батареї не можна підставляти $C_Y = 0$ у вираз для похідної напруги. Для цього режиму використовують скорочене рівняння:

$$(L_s + L_L) \frac{di_o}{dt} = e(t) - (R_s + R_L) i_o; \quad u_0 = R_L i_o + L_L \frac{di_o}{dt}. \quad (3.5)$$

Мета моделювання — перевірка усталених режимів. Для кожної ємності виконують окремий запуск. Нульові початкові умови дозволені, але початкову ділянку перехідного процесу не використовують для порівняння з комплексним розрахунком.

3.3 Порядок числового експерименту

Як початкові налаштування приймають тривалість моделювання 1 с і максимальний крок 10 мкс. Усталеність перевіряють порівнянням діючих значень за двома останніми періодами; якщо різниця перевищує 0,1 %, час моделювання збільшують. Крок зменшують удвічі та перевіряють, що основні результати змінюються менш ніж на 0,1 %.

Для обчислення діючих значень і середніх потужностей використовують ціле число періодів після завершення перехідного процесу, наприклад останні п'ять періодів. $T = 1/f$, а $T_w = mT$ — тривалість вікна, де m — додатне ціле число.

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_w} \int_{t_0}^{t_0+T_w} i^2(t) dt} ; \quad (3.6)$$

$$P_{RMS} = \frac{1}{T_w} \int_{t_0}^{t_0+T_w} (e_A i_{SA} + e_B i_{SB} + e_C i_{CA}) dt . \quad (3.7)$$

Аналогічно визначають потужність навантаження за його фазними напругами та струмами. Реактивну потужність для цієї лінійної синусоїдної моделі обчислюють за зсувом фаз основної гармоніки або за балансом елементів. Коефіцієнт потужності P/S сам по собі не визначає знак Q : потрібно вказати, випереджає струм напругу чи відстає.

Не слід оцінювати усталену реактивну потужність за формулою $Q = \sqrt{(S^2 - P^2)}$ на ділянці перехідного процесу. Навіть в усталеному режимі ця формула дає лише модуль Q ; знак визначають окремо.

3.4 Перевірка правильності та аналіз

Перевірка виконаних розрахунків може бути виконана за допомогою наступних виразів

$$\varepsilon_p = \frac{|P_s - P_L - \Delta P_s|}{P_s} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_Q = \frac{|Q_s - Q_L - 3I_s^2 X_s|}{S_s} . \quad (3.9)$$

Для аналітичного розрахунку з неокругленими числами залишки балансів мають бути близькими до машинної похибки. Після округлення рекомендується $\varepsilon_P, \varepsilon_Q \leq 0,1 \%$. Нормування реактивного залишку на S_s усуває ділення на майже нульове Q_s у режимі компенсації.

Результати часової та комплексної моделей для струму, напруги, активної потужності і втрат мають відрізнятися не більше ніж на 1 %. Для реактивної потужності поблизу нуля оцінюють абсолютну різницю, нормовану на S_s . Ці межі є навчальними критеріями перевірки числового розрахунку.

За розбіжностей перевіряють: лінійні та фазні величини; амплітуди й діючі значення; мГн і Гн; ємність одного елемента та всієї батареї; знак реактивної потужності; місце вимірювання; завершення перехідного процесу. Порівнювати слід режими з однаковими параметрами джерела та RL-навантаження.

На графіку $\eta(C_Y)$ позначають максимум за $C_{Y,full}$. На графіку $Q_s(C_Y)$ позначають перехід від індуктивного до ємнісного характеру, якщо він потрапляє в обраний діапазон. Пояснюють, чому цей перехід не обов'язково збігається з максимумом ККД. Для $k_s(C_Y)$ додатково вказують знак Q_s .

4 ЗМІСТ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт подають українською мовою. Він має містити титульний аркуш із назвою дисципліни, темою роботи, номером варіанта, відомостями про здобувача та викладача; мету; вихідні дані; схеми; послідовний розрахунок; результати моделювання; порівняльну таблицю; графіки й висновки.

Кожний розрахунковий етап супроводжують формулою в загальному вигляді, підстановкою числових значень з одиницями та результатом. Формули у Word оформлюють як редаговані математичні об'єкти. Проміжні розрахунки виконують щонайменше з шістьма значущими цифрами; результати подають із точністю, достатньою для перевірки балансу.

У порівняльній таблиці наводять три стовпці режимів: без батареї, задана компенсація, повна компенсація навантаження. Для кожного режиму зазначають C_Y , C_{Δ} , U_L , I_s , I_L , Q_C , P_L , Q_L , P_s , Q_s , S_s , ΔP_s , $\cos(\varphi)$ на шинах, $\cos(\varphi)$ джерела та η . Окремо подають струми елементів батареї й залишки балансів.

На кожному графіку зазначають назву величини, позначення осей, одиниці, масштаб і розрахункові точки. Ємність на осі абсцис подають як ємність одного елемента зірки C_Y у мкФ. Скріншот схеми не замінює числових результатів та їхнього аналізу.

У висновках потрібно пояснити: наскільки зменшилися струм мережі та активні втрати; як змінились напруга, потужність навантаження і ККД; чи досягнуто заданого k_2 ; чому $\cos(\varphi)$ джерела відрізняється від $\cos(\varphi)$ на шинах; які наслідки має надлишкова ємність. Необхідно навести числові значення для свого варіанта.

Для оформлення звіту використовують формат А4, шрифт Times New Roman 14 пт, міжрядковий інтервал 1,5, вирівнювання основного тексту за шириною. Нумерацію формул, таблиць і рисунків виконують у межах розділів;

одиниці вимірювання вказують у заголовках таблиць та підписах осей. За наявності окремих кафедральних вимог до студентської звітності застосовують їх. Перед і після окремо поданих формул залишають по одному вільному рядку.

5 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

- 1 Який фізичний зміст мають активна, реактивна та повна потужності?
- 2 Чому реактивна потужність індуктивності не є активними втратами енергії?
- 3 Як низький коефіцієнт потужності впливає на струм, нагрівання та пропускну здатність мережі?
- 4 Чим відрізняються коефіцієнт потужності та ККД мережі?
- 5 Чому конденсатор зменшує реактивний струм живильної мережі?
- 6 Чому батарею в цій роботі встановлено після R_s і L_s ?
- 7 Чим відрізняються індивідуальна, групова та централізована компенсація?
- 8 Які напруги прикладено до конденсаторів зірки та трикутника?
- 9 Чому для однакової сумарної потужності $C_Y = 3C_\Delta$?
- 10 Як отримати формулу ємності зі співвідношення $Q_C = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$?
- 11 Чому в точній формулі компенсації RL-гілки присутній активний опір R_L ?
- 12 Чому після компенсації потрібно перераховувати напругу й активну потужність RL-навантаження?

13 Чи може струм RL-гілки зрости одночасно зі зменшенням струму джерела?

14 Чому при $Q_b = 0$ джерело продовжує віддавати реактивну потужність?

15 За якої ємності ККД прийнятої ідеалізованої моделі максимальний?

16 Чи гарантує підвищення ККД зменшення активної потужності джерела при незмінному RL-навантаженні?

17 Чому не можна підставляти $C = 0$ у диференціальне рівняння $du/dt = (i_s - i_L)/C$?

18 Як перевірити баланси потужностей і завершення перехідного процесу?

19 Які наслідки має надлишкова компенсація та чому потрібно враховувати резонанс?

20 Як зміниться розрахунок при врахуванні активних втрат конденсаторної батареї?

Список літератури

1 Бурбело М. Й. Проектування систем електропостачання. Приклади розрахунків: навч. посіб. 2-ге вид., перероб. і доп. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 148 с.

2 Шкрабець Ф. П. Електропостачання: навч. посібник. Дніпро: НГУ, 2015. 540 с.

3 Мілих В. І., Павленко Т. П. Електропостачання промислових підприємств: підручник. Харків: ФОП Панов А. М., 2016. 272 с.

4 Малогулко Ю. В., Бурикін О. Б., Кацадзе Т. Л., Нетребський В. В. Електричні системи і мережі. Частина 1 : навчальний посібник / за ред. П. Д. Лежнюка. Вінниця : ВНТУ, 2020. 200 с.

5 Малогулко Ю. В., Бурикін О. Б., Кацадзе Т. Л., Нетребський В. В. Електричні системи і мережі: навч. посібник / за ред. П. Д. Лежнюка. Вінниця: ВНТУ, 2021. Ч. 2. 159 с.

6 Бурбело М. Й., Бірюков О. О., Мельничук Л. М. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків: навч. посібник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 204 с.

7 Schneider Electric. Reactive power of capacitors. Electrical Installation Guide. URL: https://www.electrical-installation.org/enwiki/Reactive_power_of_capacitors

8 Schneider Electric. Why improve the power factor?. Electrical Installation Guide. URL: https://www.electrical-installation.org/enwiki/Why_improve_the_power_factor%3F

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання розрахункової практичної роботи

з освітнього компонента

«ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ»

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

Відповідальний за випуск Плахтій О. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

Підписано до друку 17.08.2026 р.

Умовн. друк. арк. 2,0. Тираж . Замовлення № .

Видавець та виготовлювач Український державний університет
залізничного транспорту,

61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.

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