

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра механічної та електричної інженерії

МЕТОДИЧНІ РОЗРОБКИ
для виконання самостійної роботи
з навчальної дисципліни:
«ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ»

Освітньо-професійна програма
Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
галузь знань 14 Електрична інженерія
рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Методичні розробки для виконання самостійної роботи з навчальної дисципліни «Електричні мережі» для здобувачів рівня вищої освіти перший (бакалаврський) ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної форми навчання. Семенов А. Полтава: ПДАУ, 2025. 40 с.

Автор: Семенов Анатолій, професор кафедри механічної та електричної інженерії, кандидат фізико-математичних наук, доцент.

Рецензент:

Харак Руслан, доцент кафедри механічної та електричної інженерії, кандидат технічних наук.

Схвалено і рекомендовано до використання у навчальному процесі:

Кафедрою механічної та електричної інженерії:

Завідувач кафедри, к.т.н., доцент Станіслав ПОПОВ

«01» вересня 2025 р., протокол №1

Радою з якості вищої освіти спеціальності G3 Електрична інженерія:

Голова ради з якості вищої освіти, к.т.н., доцент Юлія БАСОВА

«01» вересня 2025 р, протокол №1

Технічний редактор: к. фіз.-мат., н., доцент кафедри А. Семенов

Комп'ютерна верстка: к. фіз.-мат., н., доцент кафедри А. Семенов

Усі права охороняються. Жодна частина цього видання не може бути відтворена у будь-якій формі без письмової згоди Полтавського державного аграрного університету

©ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
©СЕМЕНОВ А

ЗМІСТ

Вступ	3
Мета та завдання вивчення навчальної дисципліни	4
Тема 1. Загальна характеристика систем передавання та розподілення електричної енергії	5
Тема 2. Конструктивне виконання повітряних та кабельних ліній електропередавання	8
Тема 3. Номінальні напруги елементів електричних мереж. Режими нейтралей.....	12
Тема 4. Схеми заміщення електричних мереж та їх параметри	16
Тема 5. Розрахунок ustalених режимів розімкнутих та простих замкнутих електричних мереж.....	20
Тема 6. Методи розрахунку та аналізу втрат електричної енергії.....	24
Тема 7. Показники та норми якості електричної енергії, методи її забезпечення. Основи керування режимами електроенергетичних систем.....	29
ТЕМА 8. Основи проектування електричних мереж.....	34
Перелік літератури для самостійного вивчення дисципліни.....	39

ВСТУП

Рівень розвитку енергетики та електрифікації є ключовим показником техніко-економічного потенціалу будь-якої країни. Забезпечення електроенергією та теплом промислових підприємств, сільського господарства, транспорту та побутових потреб є актуальною та першочерговою задачею будь-якої країни.

У таких умовах особливого значення набуває підготовка фахівців, здатних проєктувати, аналізувати та експлуатувати електричні мережі різних рівнів напруги.

Дисципліна «Електричні мережі» посідає центральне місце у професійній підготовці інженерів-електриків та енергетиків, адже надає фундаментальні знання про структуру, параметри, режими роботи й закономірності функціонування електричних мереж та систем електропостачання. Мета її – надати знання в галузі теорії розрахунків і аналізу режимів електричних мереж і систем, а також забезпечити розуміння принципів економічності, надійності та якості електроенергії під час проєктування та експлуатації.

Основні завдання курсу – навчити студентів складати схеми заміщення, визначати їх параметри та розраховувати режими роботи електричних мереж і систем, використовувати методи підвищення їх ефективності, надійності та якості електроенергії.

Дисципліна «Електричні мережі» також забезпечує розуміння фізичної сутності процесів виробництва, передачі та споживання електроенергії, конструктивних елементів ліній електропередачі, підстанцій, комутаційних апаратів і систем релейного захисту.

Курс базується на знаннях фізики, інженерної та комп'ютерної графіки, теоретичних основ електротехніки, електротехнічних матеріалів, електричних машин та апаратів, технічної механіки, гідравліки, основ електропостачання, альтернативної енергетики та ресурсозбереження, КП «Електричні станції та підстанції», техніки високих напруг.

Методичні вказівки призначені для самостійного вивчення навчальної дисципліни «Електричні мережі».

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ВИВЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Мета – формування у студентів системного комплексу теоретичних знань та практичних навичок, необхідних для розрахунку, аналізу, проєктування, технічної експлуатації та оптимізації режимів роботи електричних мереж різних рівнів напруги.

Курс спрямований на забезпечення розуміння принципів побудови електричних мереж, закономірностей передачі та розподілу електроенергії, а також методів забезпечення їхньої надійності, економічності, енергоефективності та високої якості електричної енергії.

Завдання – вивчення улаштування електричних мереж, методів розрахунку усталених режимів розімкнутих та замкнутих електричних мереж та принципів регулювання режимів, розгляд показників та норм якості електричної енергії, методів розрахунку та аналізу втрат електричної енергії в елементах електричних мереж, освоєння підходів щодо проєктування електричних мереж та техніко-економічного обґрунтування рішень, виконання практичних робіт в обсязі освітньо-кваліфікаційної характеристики бакалавра.

Завдання дисципліни охоплює такі ключові теми:

1. Формування теоретичних знань про будову та класифікацію електричних мереж.
2. Опанування методів розрахунку параметрів електричних мереж.
3. Формування умінь аналізувати режими роботи електричних мереж.
4. Вивчення принципів координації ізоляції та безпеки експлуатації мереж.
5. Опанування сучасних методів підвищення ефективності та надійності мереж.
6. Розвиток практичних навичок роботи з технічною документацією та програмними засобами.
7. Формування здатності самостійно приймати технічні рішення.

Мета дисципліни та її завдання спрямовані на те, щоб студент отримав комплексне уявлення про електричні мережі, навчився виконувати їх розрахунок і аналіз, зрозумів принципи побудови та забезпечення надійності електропостачання, опанував сучасні інженерні методи та технології. Дисципліна є фундаментальною для майбутньої професійної діяльності інженера-електрика в галузях енергетики, електропостачання, промисловості та інфраструктури.

ТЕМА 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ ТА РОЗПОДІЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Характеристика змісту матеріалу, що є предметом самостійного опрацювання

1. Мета та задачі курсу.
2. Основні поняття і визначення.
3. Історичні етапи розвитку електроенергетики.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Системи передавання і розподілення електричної енергії є основою сучасної енергетики. Вони забезпечують транспорт електроенергії від джерел виробництва — електричних станцій — до споживачів різного рівня: промислових підприємств, аграрних об'єктів, комунальної інфраструктури та побутових потреб. Їх робота визначає надійність електропостачання, якість електричної енергії та ефективність усієї енергетичної системи держави.

Тема 1 формує фундаментальне розуміння структури, функцій і принципів роботи систем передавання та розподілу, а також і їх розвитку в історичному аспекті.

1. Мета та задачі курсу

Дисципліна «Електричні мережі» має на меті формування у студентів цілісного уявлення про будову, режими роботи, принципи проєктування та експлуатації електричних мереж і систем електропостачання. У рамках цієї теми основна увага зосереджується на:

Мета теми

- формування розуміння ролі та структури систем передавання та розподілення;
- засвоєння базових понять, що є фундаментом для подальшого вивчення курсу;
- ознайомлення з еволюцією електроенергетики та її сучасними тенденціями.

Основні задачі теми

Студент повинен:

1. Засвоїти загальні принципи побудови електроенергетичної системи, зокрема:

- місце електричних мереж у структурі виробництва, передавання та споживання;
 - відмінності між мережами різних рівнів напруги.
2. Розібратися з класифікацією електричних мереж, включаючи:
- магістральні, розподільчі, внутрішньозаводські, локальні мережі;
 - радіальні, кільцеві, магістральні схеми.
3. Оволодіти базовими поняттями та термінами, які застосовуються в електроенергетиці.
4. Зрозуміти історичні етапи становлення електроенергетичної галузі, що визначили сучасний стан систем передавання та розподілення.
5. Закласти основу для подальших розрахункових і аналітичних тем, пов'язаних із параметрами, втратами, перепадами напруги, надійністю тощо.

2. Основні поняття і визначення

Для повноцінного розуміння структури електроенергетичної системи потрібно оперувати базовими визначеннями.

Електроенергетична система (ЕЕС) - Комплекс взаємопов'язаних електричних станцій, ліній передачі, підстанцій, мереж та споживачів, який забезпечує виробництво, передачу, розподіл та споживання електроенергії.

Система передавання електричної енергії - Частина ЕЕС, що складається з ліній електропередачі (ЛЕП) високої та надвисокої напруги (110–750 кВ і вище), призначена для транспорту електроенергії на великі відстані з мінімальними втратами.

Система розподілення електричної енергії - Мережа середньої та низької напруги (0,4–35 кВ), яка забезпечує розподіл електроенергії безпосередньо до кінцевих споживачів.

Підстанція - Об'єкт, що забезпечує трансформацію напруги, комутацію і захист ліній та споживачів.

Лінія електропередачі (ЛЕП) - Споруда, що складається з проводів, опор, ізоляторів і арматури, призначена для передачі електроенергії.

Електричний розподіл - Процес перетворення, розгалуження та подавання електроенергії різним групам споживачів.

Режим електричної мережі - Сукупність значень напруг, струмів, потужностей та частоти в окремих точках мережі.

3. Історичні етапи розвитку електроенергетики

Розвиток систем передавання та розподілення електроенергії пройшов кілька ключових етапів:

1. Початковий (кінець XIX століття)

- Досліди М. Фарадея та створення першого генератора.
- Побудова перших електростанцій змінного та постійного струму (Т. Едісон, Н. Тесла).
- Поява перших ЛЕП на напругу 1–5 кВ для освітлення міст.

2. Перехід до змінного струму (1880–1920 рр.)

- Доведення ефективності передачі енергії на великі відстані змінним струмом.
- Впровадження трансформаторів для підвищення та пониження напруги.
- Збільшення рівня напруг передачі до 35–110 кВ.

3. Створення національних електричних систем (1930–1960 рр.)

- Об'єднання електростанцій у єдину ЕЕС.
- Розвиток високовольтних ЛЕП 150–330 кВ.
- Масове будівництво підстанцій і розподільчих мереж.

4. Етап надвисоких напруг (1960–1990 рр.)

- Поява ЛЕП 500 кВ та 750 кВ.
- Розвиток методів координації ізоляції та релейного захисту.
- Міждержавні енергосистеми, енергокільця Європи.

5. Сучасний етап (1990 – теперішній час)

- Автоматизація, телеметрія, Smart Grid.
- Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).
- Використання гнучких систем передачі (FACTS), HVDC-ліній постійного струму.
- Енергетичні ринки та цифровізація управління.
- Впровадження систем енергосховищ (BESS) та мікромереж (Microgrid).

Питання для самоперевірки

1. Мета та задачі вивчення курсу.
2. Визначення понять «електрична мережа», «електроенергетична система».
3. Визначення понять «енергетична система», «електрична система».

Висновки

Перша тема закладає базові знання щодо структури електроенергетичної системи, її ключових елементів, принципів роботи та історичного розвитку. Розуміння цих аспектів є фундаментом для всіх подальших тем дисципліни, пов'язаних з параметрами електричних мереж, аналізом режимів, ефективністю та надійністю електропостачання.

Література: [1–5]

ТЕМА 2. КОНСТРУКТИВНЕ ВИКОНАННЯ ПОВІТРЯНИХ ТА КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Характеристика змісту матеріалу, що є предметом самостійного опрацювання

1. Конструктивне виконання повітряних ліній електропередавання.
2. Конструктивне виконання кабельних ліній електропередавання.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Лінії електропередавання (ЛЕП) є ключовими елементами електричних мереж. Вони забезпечують передачу електроенергії від електричних станцій до підстанцій та кінцевих споживачів. За конструктивними ознаками лінії поділяються на повітряні та кабельні.

У цій темі вивчаються їхня будова, основні конструктивні елементи, особливості монтажу та експлуатації.

1. Конструктивне виконання повітряних ліній електропередавання

Повітряні лінії електропередавання (ПЛ) — це електричні мережі, в яких струмопровідні проводи прокладені відкрито по опорах у повітрі. Їх застосовують для передавання енергії на середні та великі відстані.

1.1. Основні елементи повітряних ліній

1.1.1. Провод(и) ЛЕП

- Матеріали: алюмінієві (АЛ), сталевалюмінієві (АС), композитні проводи.
- Характеристики: низька маса, корозійна стійкість, достатня механічна міцність.

- Типи проводів: одинарні, розщеплені (для напруг 330–750 кВ).

1.1.2. Опори

Опори призначені для підтримання проводів на необхідній висоті.

Типи опор:

- Проміжні — для прямих ділянок ліній.
- Кутові — на поворотах траси.
- Анкерні — сприймають механічні зусилля розтягування.
- Спеціальні — при переходах через річки, балки, автошляхи.

Матеріали опор:

- залізобетонні,
- металеві ґратчасті,
- дерев'яні (низьковольтні).

1.1.3. Ізоляторні підвіски

Забезпечують електричне відокремлення проводів від опор.

Види ізоляторів:

- порцелянові,
- скляні,
- композитні (силіконові).

1.1.4. Грозозахисні троси

Розташовуються над фазними проводами та захищають лінію від прямих ударів блискавки.

1.1.5. Арматура

Комплектуючі для кріплення проводів і ізоляторів:

- натяжні затискачі,
- з'єднувальні муфти,
- підвісні затискачі,
- розпірки (для розщеплених фаз).

1.2. Параметри та особливості повітряних ліній

- Висота підвісу проводів залежить від класу напруги та умов місцевості.

- Струмopовідні проводи піддаються впливу вітру, ожеледі, температури.

- ПЛ мають нижчі капітальні витрати порівняно з кабельними лініями.

- Надійність роботи залежить від якості монтажу, стану арматури, грозового захисту.

2. Конструктивне виконання кабельних ліній електропередавання
Кабельні лінії електропередавання (КЛ) застосовуються там, де прокладання повітряних ліній неможливе або недоцільне: у містах, промислових зонах, підземних переходах та складних геологічних умовах.

2.1. Основні елементи кабельної лінії

2.1.1. Струмопровідна жила

Виконується з:

- міді (висока провідність),
- алюмінію (нижча вартість, менша маса).

2.1.2. Ізоляція

Матеріал залежить від класу напруги:

- Полімерні діелектрики:
 - зшитий поліетилен (XLPE) — стандарт сучасних КЛ,
 - поліетилен (ПЕ),
 - ПВХ.
- Паперова просочена ізоляція (ППІ):
 - застосовується у старих КЛ високої напруги.

2.1.3. Екрани

Служать для вирівнювання електричного поля:

- напівпровідникові екрани,
- металеві екрани (мідні/алюмінієві стрічки або дріт).

2.1.4. Захисні оболонки

Забезпечують механічний захист:

- поліетиленова,
- бітумна,
- броньована (металева стрічка).

2.1.5. Кабельні муфти та кінцеві опори

Призначені для:

- з'єднання окремих відрізків кабелю,
- підключення кабелю до обладнання.

2.2. Способи прокладання кабельних ліній

КЛ можуть прокладатися:

- у землі (траншейне прокладання),
- у кабельних каналах або тунелях,
- на естакадах і лотках,
- під водою (морські й річкові переходи),
- у блоках з поліетиленових труб.

Особливу увагу приділяють тепловим умовам, щоб запобігти перегріву жив.

2.3. Особливості експлуатації кабельних ліній

- У КЛ важливо забезпечити відведення тепла.
- Полімерна ізоляція чутлива до часткових розрядів і вологи.
- Контроль включає вимірювання опору ізоляції, діагностику часткових розрядів, тепловізійну зйомку.
- КЛ характеризуються вищою вартістю та складністю ремонту порівняно з ПЛ.

2.4. Порівняння повітряних і кабельних ліній

Параметр	Повітряні ЛЕП	Кабельні ЛЕП
Вартість будівництва	Нижча	Вища
Візуальний вплив	Високий	Мінімальний
Доступність для ремонту	Висока	Складна
Надійність у негоду	Низька	Висока
Пропускна спроможність	Висока	Залежить від теплових умов
Експлуатаційний ресурс	30–50 років	25–40 років

Висновки

У цій темі розглянуто конструктивні особливості повітряних та кабельних ліній електропередавання, їх будову, принципи компонування й експлуатаційні властивості. Розуміння конструкції ЛЕП є необхідною складовою для подальшого вивчення питань параметрів електричних мереж, режимів роботи, надійності та техніко-економічних показників.

Питання для самоперевірки

1. Будова повітряних ліній.
2. Улаштування кабельних ліній.
3. Марки проводів повітряних ліній.
4. Типи опор повітряних ліній за матеріалом.
5. Призначення захисної оболонки кабеля.

Література: [1–5]

ТЕМА 3. НОМІНАЛЬНІ НАПРУГИ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ. РЕЖИМИ НЕЙТРАЛЕЙ

*Характеристика змісту матеріалу,
що є предметом самостійного опрацювання*

1. Поняття про номінальні напруги.
2. Класифікація електричних мереж.
3. Режими нейтралей.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Електричні мережі функціонують на певних рівнях напруг, які визначаються їх призначенням, конструктивним виконанням та техніко-економічними вимогами. Одним з базових понять у розрахунку та експлуатації електричних мереж є номінальна напруга, що використовується для уніфікації обладнання, стандартизації режимів роботи та забезпечення сумісності елементів.

Іншою ключовою характеристикою мережі є режим нейтралі, який визначає спосіб з'єднання нейтральної точки трансформатора або генератора із землею. Режим нейтралі впливає на величину струмів замикання на землю, вибір захисних апаратів, рівень ізоляції та безпеку роботи мережі.

У межах цієї теми розглядаються базові поняття про напруги, класифікацію мереж за рівнями напруги та різні режими нейтралей, які застосовуються в електроенергетичній системі.

1. Поняття про номінальні напруги

1.1. Визначення номінальної напруги

Номінальна напруга — це значення напруги, на яке розраховані елементи електричної мережі, електрообладнання та апаратура. Вона встановлюється згідно зі стандартами (ДСТУ, ІЕС) та служить основою для вибору апаратів, кабелів, ізоляції, трансформаторів і режимів експлуатації.

1.2. Види напруг у мережах

У мережах використовують такі терміни:

- Номінальна напруга – умовна характеристика класу мережі.
- Робоча напруга – фактична напруга під час нормального режиму, що допускає відхилення ($\pm 5\%$, $\pm 10\%$).
- Максимальна робоча напруга (U_m) – верхня межа для розрахунку ізоляції.

- Напруга короткого замикання – напруга, що виникає під час КЗ, використовується для оцінки стійкості обладнання.

1.3. Стандартні номінальні напруги в Україні та Європі

Низька напруга (НН)

- 0,4 кВ

Середня напруга (СН)

- 6 кВ
- 10 кВ
- 20 кВ
- 35 кВ

Висока напруга (ВН)

- 110 кВ
- 150 кВ
- 220 кВ

Надвисока напруга (НВН)

- 330 кВ
- 400 кВ
- 500 кВ

Надзвисока напруга (НЗН)

- 750 кВ
- 800 кВ (HVDC)

У системах постійного струму HVDC

±400 кВ, ±500 кВ, ±800 кВ.

2. Класифікація електричних мереж

Електричні мережі класифікуються залежно від їх функцій, рівня напруги, конструктивних особливостей та схеми побудови.

2.1. За рівнем напруги

- Мережі низької напруги (НН) — 0,4 кВ, 0,23/0,4 кВ;
- Мережі середньої напруги (СН) — 6, 10, 20, 35 кВ;
- Мережі високої напруги (ВН) — 110, 150, 220 кВ;
- Мережі надвисокої і надзвисокої напруги — 330–750 кВ.

2.2. За функціональним призначенням

- Магістральні мережі — передавання енергії між районами, підстанціями, країнами.
- Розподільчі мережі — подача енергії споживачам.
- Мережі електропостачання підприємств — внутрішні системи.

2.3. За схемою побудови

- Радіальні — характерні для низької напруги.
- Кільцеві (замкнені) — підвищена надійність.
- Магістральні — променеві, з гілками.
- Мережі з подвійним живленням — резервовані схеми.

2.4. За середовищем прокладання

- Повітряні лінії (ПЛ) — дешевші, доступні для експлуатації.
- Кабельні лінії (КЛ) —

2.5. За типом струму застосовуються у міських зонах, під землею чи під водою.

- Мережі змінного струму (АС) — домінують у світі.
- Мережі постійного струму (DC/HVDC) — для далеких передач, міждержавних перетоків та ВДЕ.

3. Режими нейтралей

Режим нейтралі — це спосіб з'єднання нейтральної точки джерела (генератора, трансформатора) із землею. Режим визначає:

- величину струму замикання на землю,
- напруги на неушкоджених фазах,
- вимоги до ізоляції,
- вибір релейного захисту.

3.1. Основні режими нейтралі

1. Ізольована нейтраль

- Нейтраль не з'єднана із землею.
- Характерна для мереж 6–35 кВ.
- Струм замикання на землю малий (ємнісний).
- Переваги: менші пошкодження при однофазному КЗ.
- Недоліки: можливість резонансних перенапруг (ферорезонанс).

2. Компенсована нейтраль

- Використовується дугогасна котушка (катушка Пітерсена).
- Компенсується ємнісний струм замикання на землю.
- Підвищує надійність та зменшує пошкодження кабельних ліній.

3. Глухозаземлена нейтраль

- Нейтраль жорстко з'єднана з землею.
- Характерна для мереж 110 кВ і вище.
- Великі струми замикання на землю.

- Необхідний швидкодійний релейний захист.
- Переваги: стабільність, відсутність перенапруг.

4. Ємнісно та активно-ємнісно заземлена нейтраль

- Для обмеження струму однофазного кз.
- Використовується у розподільчих мережах.

5. R-заземлена (через резистор) нейтраль

- Струм замикання обмежується резистором.
- Використовується в промислових електромережах 6–35 кВ.

3.2. Вплив режиму нейтралі на мережу

Показник	Ізольована	Компенсована	Глухозаземлена
Струм замикання на землю	малий	мінімальний	великий
Перенапруги	можливі	знижені	мінімальні
Пошкодження при однофазних кз	незначні	дуже малі	значні
Вибір релейного захисту	складний	складний	простий
Застосування	6–35 кВ	6–35 кВ	110 кВ+

Висновки

У темі розглядаються базові характеристики електричних мереж: номінальні напруги, класифікація та режими нейтралі. Розуміння цих аспектів є фундаментальним для подальшого вивчення електричних режимів, розрахунку струмів короткого замикання, вибору ізоляції, параметрів обладнання та побудови схем електроживлення.

Питання для самоперевірки

1. Ряд номінальних напруг.
2. Класифікація електричних мереж за родом струму.
3. Класифікація електричних мереж за конфігурацією.
4. Класифікація електричних мереж за конструктивним виконанням.
5. Класифікація електричних мереж за роллю в схемі електропостачання.
6. Класифікація електричних мереж по місцю розташування і характеру споживачів.
7. Режими нейтралей електричних мереж.

Література: [1–5]

ТЕМА 4. СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ТА ЇХ ПАРАМЕТРИ

*Характеристика змісту матеріалу,
що є предметом самостійного опрацювання*

1. Загальні відомості.
2. Повітряні і кабельні лінії.
3. Трансформатори і автотрансформатори.
4. Споживачі. Джерела енергії.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Розрахунок режимів електричних мереж — напруг, струмів, втрат та потоків потужності — виконується не за реальними фізичними схемами, а за їх математичними моделями, які називаються схемами заміщення. Вони дозволяють врахувати електричні параметри елементів мережі в узагальненому та спрощеному вигляді, що суттєво полегшує аналіз складних систем.

Схеми заміщення застосовуються при розрахунках:

- нормальних і післяаварійних режимів,
- падіння напруги,
- струмів короткого замикання,
- поточкорозподілу,
- параметрів компенсації та регулювання напруги.

У межах цієї теми вивчається структура схем заміщення основних елементів електричних мереж: повітряних і кабельних ліній, трансформаторів і автотрансформаторів, джерел живлення та споживачів.

1. Загальні відомості
- 1.1. Поняття схеми заміщення

Схема заміщення — це еквівалентна електрична схема, яка відображає основні параметри елемента мережі у вигляді опорів, провідностей, джерел ЕРС та інших узагальнюючих величин.

У схемах заміщення використовують:

- активний опір R ,
- реактивний опір X (індуктивний або ємнісний),
- повний опір $Z = R + jX$,
- провідність Y ,
- еквівалентні джерела ЕРС.

1.2. Типи схем заміщення

- Однолінійні схеми — загальна структурна схема мережі.
- Фазні схеми — для аналізу трифазних несиметричних режимів.
- Фазові еквіваленти — для симетричних режимів (метод симетричних складових).
- Г-подібна, П-подібна, Т-подібна схеми — для ліній передачі.

2. Повітряні і кабельні лінії

Повітряні та кабельні лінії є протяжними елементами, параметри яких розподілені вздовж довжини. Для їх моделювання використовують параметри на одиницю довжини:

- R — активний опір провідників;
- X_L — індуктивний опір;
- X_C — ємнісний опір;
- G — провідність ізоляції.

2.1. Схема заміщення ліній передачі

Для ліній довжиною до 100 км застосовується Г-подібна схема.

Для довгих ліній (понад 100 км) — розподілена схема або П-подібна.

2.2. Повітряні лінії (ПЛ)

- Мають менший ємнісний вплив, ніж кабельні.
- Параметри залежать від відстані між проводами, типу проводу, кліматичних умов.

- Активний опір малий, але значні індуктивні опори.

2.3. Кабельні лінії (КЛ)

- Характеризуються високою ємністю через близькість жил і металевий екран.
- Активний опір вищий, ніж у ПЛ.
- Ємність може впливати на роботу мережі (підвищення напруги на холостому ході).

Схема заміщення кабелю враховує:

- опір жил;
- провідність ізоляції;
- ємність між жилами та екраном.

3. Трансформатори і автотрансформатори

Трансформатори є ключовими елементами мереж передачі та розподілення.

3.1. Еквівалентна схема трансформатора

Схема заміщення трансформатора включає:

- R_{w1}, R_{w2} — опори обмоток;
- X_{L1}, X_{L2} — розсіювальні індуктивності;
- R_m — опір магнітних втрат;
- X_m — магнітна реактивність (намагнічування).

Еквівалентна схема може бути:

- рознесена (для точних розрахунків),
- приведена до однієї сторони (для спрощення).

3.2. Автотрансформатори

Автотрансформатор має спільну частину обмотки, що створює такі особливості моделі:

- менші втрати;
- нижча вартість;
- складніші умови КЗ → вимагають точних розрахунків параметрів.

Еквівалентна схема включає:

- взаємну індуктивність;
- опори розсіювання;
- опір навантаження.

4. Споживачі. Джерела енергії

4.1. Споживачі електричної енергії

Споживачі моделюються відповідно до характеру навантаження:

1) *Активне навантаження (резистивне)*

- R-навантаження
- використовує тільки активну потужність
- приклад: лампи розжарювання, електронагрівачі

2) *Реактивне навантаження*

- індуктивне: двигуни, трансформатори (X_L)
- ємнісне: конденсаторні батареї (X_C)

3) *Змішане навантаження*

- описується повним опором $Z = R + jX$

У схемах заміщення споживачі подаються:

- у вигляді опору,
- або у вигляді комплексної потужності $S = P + jQ$.

4.2. Джерела енергії

Джерела електроенергії моделюються за допомогою:

1) Джерела напруги (ЕРС)

- використовуються для моделювання генераторів
- схема включає внутрішній опір X_d або X_d'

2) Джерела струму

- застосовуються у методі вузлових потенціалів
- використовуються в аналізі потоків потужності

Параметри джерел включають:

- е.р.с.,
- синхронну реактивність,
- внутрішній опір,
- режим збудження.

Висновки

У темі розглядаються принципи побудови схем заміщення основних елементів електричних мереж та визначення їх параметрів. Схеми заміщення дозволяють:

- моделювати поведінку складних енергетичних систем,
- виконувати розрахунок режимів роботи,
- аналізувати втрати, перенапруги та потоки потужності,
- забезпечувати правильний вибір обладнання та оптимальну

побудову мереж.

Сформовані знання є базою для всіх наступних тем дисципліни, пов'язаних із розрахунками, аналізом режимів і оптимізацією роботи електричних мереж.

Питання для самоперевірки

1. Поздовжні параметри схем заміщення повітряних і кабельних ліній.
2. Поперечні параметри схем заміщення повітряних і кабельних ліній.
3. Параметри схем заміщення двообмоткових трансформаторів і автотрансформаторів.
4. Параметри схем заміщення багатообмоткових трансформаторів і автотрансформаторів.
5. Параметри схем заміщення споживачів енергії.
6. Параметри схем заміщення джерел енергії.

Література: [1–5]

ТЕМА 5. РОЗРАХУНОК УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ РОЗІМКНУТИХ ТА ПРОСТИХ ЗАМКНУТИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Характеристика змісту матеріалу, що є предметом самостійного опрацювання

1. Розрахунок усталеного режиму лінії з навантаженням в кінці лінії.
2. Спад напруги та його складові. Втрати напруги.
3. Розрахунок сталих режимів роботи розімкнених електричних мереж.
4. Розрахунок усталених режимів простих замкнених мереж.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Усталений (стаціонарний) режим електричної мережі — це режим, у якому всі параметри (напруги, струми, потужності) залишаються незмінними в часі за умов стабільного навантаження. Розрахунок таких режимів є основою аналізу працездатності електричних мереж, оскільки дозволяє визначити:

- розподіл напруг уздовж ліній,
- струми у гілках мережі,
- втрати електроенергії,
- рівень навантаження джерел,
- коректність вибору кабелів, проводів, трансформаторів.

Розрахунок сталих режимів виконується для двох типів схем:

- 1) розімкнених (радіальних) мереж,
- 2) простих замкнених (кільцевих) мереж.

Ці базові схеми є спрощеними моделями реальних електричних систем та становлять основу для більш складних розрахунків поточкорозподілу.

1. Розрахунок усталеного режиму лінії з навантаженням в кінці лінії

У розімкнених мережах (радіальних схемах) найпоширеніша задача — визначення напруги та струму в лінії, яка живить навантаження в кінцевій точці.

1.1. Модель лінії електропередачі

Лінія описується параметрами:

- R — активний опір,
- X — реактивний (індуктивний) опір,
- $Z = R + jX$ — повний опір.

1.2. Навантаження в кінці лінії

Навантаження задається:

- у вигляді повного опору Z_n ,
- або у вигляді потужності $S = P + jQ$.

1.3. Основні співвідношення

1. Струм у лінії:

$$I = \frac{S^*}{\sqrt{3}U_2}$$

2. Падіння напруги в лінії:

$$\Delta U = I(R + jX)$$

3. Напруга на початку лінії:

$$U_1 = U_2 + \Delta U$$

(модуль U_1 повинен бути близьким до номінального).

1.4. Вплив потужності навантаження

- при індуктивному навантаженні ($Q > 0$) напруга в кінці лінії зменшується;
- при ємнісному навантаженні може виникати ефект Феранті — підвищення напруги в кінці лінії.

2. Спад напруги та його складові. Втрати напруги

2.1. Поняття спаду напруги

Спад напруги — це різниця між напругою на початку та в кінці лінії:

$$\Delta U = U_1 - U_2$$

Він містить активну та реактивну складові.

2.2. Складові спаду напруги

У випадку трифазної лінії:

$$\Delta U = IR \cos \varphi + IX \sin \varphi$$

- Активна складова ($IR \cos \varphi$) визначається активними втратами.
- Реактивна складова ($IX \sin \varphi$) залежить від індуктивності лінії та реактивного навантаження.

2.3. Відносний спад напруги

$$\Delta U \% = (U_1 - U_2) / U_{\text{ном}} \cdot 100\%$$

Допустимі значення:

- для мереж 0,4 кВ: 5–10 %,
- для мереж 6–35 кВ: 7–8 %,
- для ВН: 1–3 %.

2.4. Втрати потужності

Активні втрати:

$$\Delta P = 3I^2 R$$

Реактивні втрати:

$$\Delta Q = 3I^2 X$$

3. Розрахунок сталих режимів роботи розімкнених електричних мереж

Розімкнені мережі — це мережі без замкнених контурів, найчастіше радіального типу.

3.1. Основні властивості радіальних мереж

- струм у кожній гілці визначається лише споживачами в цій гілці;
- напрямок потоку потужності — від джерела до навантажень;
- немає перетоків між паралельними гілками.

3.2. Алгоритм розрахунку

1. Визначення розрахункового навантаження.
2. Розрахунок струмів у кінцевих ділянках.
3. Розрахунок спадів напруг уздовж лінії.
4. Визначення напруг у вузлах.
5. Розрахунок втрат.
6. Перевірка відповідності нормам ($U_2 \geq 0,95 U_{ном}$).

3.3. Особливості розрахунку

- у радіальних мережах критичним є вузол найбільш віддалений від підстанції;
- для ліній великої довжини враховують ємнісні струми;
- для несиметричних режимів застосовують метод симетричних складових.

4. Розрахунок усталених режимів простих замкнених мереж

Замкнені (кільцеві) мережі містять один контур і характеризуються перетоками потужності в різних напрямках залежно від навантаження вузлів.

4.1. Особливості замкнених мереж

- енергія надходить у вузол з двох сторін → підвищена надійність;

- можливість перерозподілу потоків потужності;
- складніший аналіз режимів порівняно з радіальними мережами.

4.2. Основні співвідношення

У простому кільці з двома джерелами або одним джерелом і кількома навантаженнями течуть контурні струми, що визначаються з рівнянь:

$$\sum U = \sum IZ$$

Використовують методи:

- рівнянь вузлових потенціалів,
- контурних струмів,
- методу приведених схем.

4.3. Алгоритм розрахунку

1. Скласти однолінійну схему.
2. Замінити всі елементи їхніми комплексними опорами.
3. Скласти систему рівнянь за першою або другою формою

Кірхгофа.

4. Визначити:
 - струми в гілках,
 - потоки потужності,
 - напруги у вузлах.
5. Виконати перевірку:
 - баланс потужності,
 - допустимі навантаження кабелів і проводів.

4.4. Особливі випадки

кільце з одним живленням → можливі перевантаження однієї гілки;

кільце з двома підстанціями → потоки залежать від різниці напруг;

кільце з регулюванням напруги — розрахунок ускладнюється.

Висновки

У цій темі розглянуто основи розрахунку ustalених режимів розімкнених і замкнених електричних мереж. Опанування матеріалу дозволяє студентам:

- визначати параметри режиму ліній з навантаженням,
- розраховувати спади напруги та втрати,
- аналізувати роботу радіальних та кільцевих мереж,
- застосовувати принципи потокорозподілу в електричних мережах,

- оцінювати якість електропостачання та відповідність режиму нормативним вимогам.

Оволодіння цими навичками є обов'язковою базою для подальшого вивчення теми коротких замикань, координації ізоляції та оптимізації режимів електричних мереж.

Питання для самоперевірки

1. Визначення параметрів режиму лінії електропередачі навантаженням аналітичним методом.
2. Спад напруги та його складові.
3. Втрати напруги.
4. Векторні діаграми при різних навантаженнях лінії.
5. Порядок розрахунку сталого режиму магістральної мережі.
6. Порядок розрахунку сталого режиму розгалуженої мережі одного рівня номінальної напруги.
7. Порядок розрахунку сталого режиму розгалуженої мережі розгалуженої мережі декількох номінальних напруг.
8. Порядок розрахунку усталеного режиму мережі з двостороннім живленням при однакових значеннях напруг джерел живлення.
9. Порядок розрахунку усталеного режиму мережі з двостороннім живленням при різних значеннях напруг джерел живлення.

Література: [1 – 5]

ТЕМА 6. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ТА АНАЛІЗУ ВТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

*Характеристика змісту матеріалу,
що є предметом самостійного опрацювання*

1. Поняття про час максимального навантаження і час максимальних втрат.
2. Методи розрахунку втрат електроенергії.
3. Структура втрат електроенергії.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Втрати електричної енергії є неминучими в будь-якій електричній мережі. Вони виникають унаслідок протікання струму через опір проводів, трансформаторів, контактних з'єднань та інших елементів системи.

Зменшення втрат електроенергії є одним із ключових завдань сучасної енергетики, оскільки втрати:

- знижують енергоефективність електричних мереж,
- збільшують експлуатаційні витрати,
- потребують додаткової генерації електроенергії,
- впливають на екологічні показники (надлишкове спалювання палива на електростанціях).

Тема охоплює визначення часу найбільшого навантаження та максимальних втрат, методи розрахунку втрат і структуру втрат енергії в електричних мережах.

1. Поняття про час максимального навантаження і час максимальних втрат

1.1. Час максимального навантаження

Час максимального навантаження $t_{\max}$ — це проміжок часу, протягом якого електрична мережа працює з найбільшою активною потужністю або струмом.

Цей період визначається за графіками навантаження (добовими, тижневими, сезонними).

Характерні особливості:

- у промислових мережах $t_{\max}$ часто припадає на 8–16 год;
- у побутових мережах — на вечірній максимум (18–22 год);
- у сільських мережах — залежить від роботи насосних станцій, підприємств АПК.

1.2. Час максимальних втрат

Втрати пропорційні квадрату струму:

$$\Delta P = I^2 R$$

Отже, час максимальних втрат не завжди збігається з часом максимального навантаження.

Причини:

- у нічні години при зниженні напруги може бути збільшений струм,
- робота реактивних компенсуювальних пристроїв,
- зміна перетоків у мережах.

1.3. Добовий графік втрат

Втрати мають дві характерні частини:

- постійні (незалежні від навантаження) — у трансформаторах,
- змінні (пропорційні навантаженню) — у лініях.

Графік втрат може мати два піки:

- ранковий максимум,
- вечірній максимум.

2. Методи розрахунку втрат електроенергії

Втрати електроенергії поділяються на:

- активні втрати потужності ΔP ,
- втрати електроенергії ΔW за певний час.

2.1. Метод технічних розрахунків (аналітичний)

Використовується формула:

$$\Delta P = I^2 R$$

Для трифазної мережі:

$$\Delta P = 3I^2 R$$

Енергія втрат:

$$\Delta W = \Delta P \cdot t$$

де t — час роботи мережі у відповідному режимі.

За графіком навантаження:

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n I_i^2 R \Delta t_i$$

2.2. Метод еквівалентного часу максимальних втрат

Вводиться еквівалентний час $t_{\text{екв}}$, протягом якого втрати при максимальному струмі дорівнюють реальним втратам за добу:

$$\Delta W = I_{\text{max}}^2 R t_{\text{екв}}$$

Зручно для оцінки втрат за добовими графіками.

2.3. Метод коефіцієнтів навантаження

Використовується для мереж із неповними даними:

$$\Delta W = I_{max}^2 t k_H^2$$

або через потужності:

$$\Delta W = P_{max}^2 R_{екв} t k_H^2$$

де $k_H = P_{cp} / P_{max}$ — коефіцієнт завантаження.

2.4. Метод добових графіків навантаження

Проводиться побудова:

- графіка навантаження ($P(t)$, $Q(t)$, $I(t)$),
- графіка втрат ($I^2(t)R$).

Далі:

$$\Delta W = \int I^2(t) R dt$$

На практиці інтеграл замінюється сумою.

2.5. Метод імітаційного моделювання

Використовується у сучасних програмних комплексах (ETAP, PowerFactory, Matlab Simulink):

- враховує коливання напруги,
- змінні перетоки,
- зміни конфігурації мережі,
- вплив ВДЕ і батарей накопичення.

3. Структура втрат електроенергії

Втрати складаються з технічних та комерційних.

3.1. Технічні втрати

Виникають у всіх фізичних елементах мережі.

1. Втрати в лініях електропередачі

- активні втрати I^2R — основна частка;
- корона (у високовольтних ЛЕП 220–750 кВ);
- діелектричні втрати в кабелях.

2. Втрати в трансформаторах

- постійні втрати в сталі (магнітні, холостого ходу),
- змінні втрати (в міді, I^2R),
- додаткові втрати (струми Фуко, розсіювання).

3. Втрати в обладнанні розподільчих пунктів і підстанцій

- у комутаційних апаратах,
- у шинах,
- у контактах.

4. Втрати реактивної потужності

Зростання струмів у мережі через $Q \rightarrow$ збільшуються втрати в проводах.

3.2. Комерційні втрати

Пов'язані з:

- похибками обліку,
- крадіжками електроенергії,
- неточностями вимірювання,
- несправністю лічильників.

У сучасних Smart Grid системах комерційні втрати зменшуються завдяки:

- цифровим лічильникам,
- АМІ-системам,
- системам дистанційного збору даних.

Висновки

У цій темі розглядаються основи розрахунку втрат електроенергії в електричних мережах, поняття часу максимальних навантажень і максимальних втрат, основні методи визначення втрат та їх структура. Розуміння процесів формування втрат дозволяє:

- підвищити енергоефективність мереж,
- зменшити експлуатаційні витрати,
- правильно вибрати переріз проводів і кабелів,
- оптимізувати режими роботи мережі,
- забезпечити надійну і стабільну роботу електропостачання.

Питання для самоперевірки

1. Поняття про час максимального навантаження.
2. Поняття про час максимальних втрат.
3. Методи розрахунку втрат електроенергії.
4. Структура втрат електроенергії.

Література: [1 – 5]

ТЕМА 7. ПОКАЗНИКИ ТА НОРМИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, МЕТОДИ ЇЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ. ОСНОВИ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

1. Показники та норми якості електричної енергії.
2. Методи забезпечення якості електричної енергії.
3. Методи регулювання напруги.
4. Основні принципи керування режимами електроенергетичних систем.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Якість електричної енергії (ЯЕЕ) — один із ключових параметрів роботи електроенергетичних систем (ЕЕС). Від якості напруги й частоти залежить надійність роботи електрообладнання, тривалість його служби, рівень втрат електроенергії та стабільність функціонування промислових процесів.

Порушення якості електроенергії може призвести до:

- перегріву електродвигунів,
- аварійних зупинок виробництва,
- порушення роботи АСУ та ЕОМ,
- передчасного пошкодження трансформаторів, кабелів, електронних пристроїв.

Тому вивчення показників якості, нормування параметрів, а також методів їх забезпечення є важливою складовою підготовки інженера-електрика.

1. Показники та норми якості електричної енергії

Якість електричної енергії регламентується стандартами ДСТУ EN 50160, ІЕС 61000, Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), Правилами користування електричною енергією (ПКЕЕ).

Основні нормовані показники:

1.1. Частота електричного струму

Номінальна частота в Україні: 50 Гц

Допустимі відхилення (EN 50160):

- $\pm 1\%$ у нормальних умовах
- $\pm 2\%$ у разі значних перехідних режимів

Коливання частоти впливають на:

- роботу генераторів і синхронних двигунів,

- швидкість обертання механізмів,
- стабільність АСУ.

1.2. Відхилення напруги

Номінальна напруга повинна утримуватися в межах:

$U_{\text{ном}} \pm 5\%$ (в нормальних умовах)

допускається до $\pm 10\%$ у післяаварійних режимах.

Відхилення напруги веде до:

- підвищених струмів,
- перегріву кабелів і трансформаторів,
- порушення роботи побутових і промислових електроприймачів.

1.3. Несиметрія напруг

Несиметрія — це різниця між фазними напругами.

Допустимі значення: до 2 %, у промислових мережах допускають до 4 %.

Несиметрія спричиняє:

- підвищені втрати,
- вібрації й перегрів двигунів,
- перешкоди в лініях зв'язку.

1.4. Гармонічні та спотворення форми напруги

Причини появи гармонік:

- частотні перетворювачі, тиристорні приводи,
- імпульсні джерела живлення,
- електронні пристрої.

Рівень спотворень характеризується коефіцієнтом THD (Total Harmonic Distortion):

$$\text{THD} \leq 8\% \text{ (за EN 50160)}$$

Підвищений THD призводить до:

- перегріву трансформаторів,
- резонансних явищ,
- збоїв електронного обладнання.

1.5. Показники флікерів (мерехтіння)

Зумовлені коливаннями напруги через:

- зварювальні апарати,
- великі електродвигуни під час пуску,

- зміни навантаження в промислових цехах.

Показники нормуються як короточасний (P_{st}) та довгочасний (P_{lt}) флікери.

1.6. Короточасні та довготривалі перерви електропостачання

Нормуються показниками SAIDI, SAIFI, які характеризують надійність ЕЕС.

У побутовому секторі допустимі кілька хвилин на рік, у промисловості — значно менше.

2. Методи забезпечення якості електричної енергії

2.1. Методи регулювання напруги

1) На підстанціях:

- перемикання відпайок трансформатора (РПН);
- автоматичне регулювання напруги (АРВ);
- встановлення реакторів і конденсаторних установок.

2) У мережі:

- компенсація реактивної потужності (КРП),
- застосування статичних компенсаторів (SVC, STATCOM),
- оптимізація потоків потужності.

2.2. Компенсація реактивної потужності

Покращує:

- коефіцієнт потужності,
- рівень напруги,
- зменшує втрати.

Засоби:

- конденсаторні батареї,
- тиристорні регулятори (TSC/TCR),
- гібридні установки,
- синхронні компенсатори.

2.3. Обмеження гармонічних спотворень

Використовують:

- активні та пасивні фільтри гармонік,
- дроселі реакторів,
- лінійні фільтри,
- багатофазні випрямлячі.

2.4. Методи підвищення симетрії навантаження

- рівномірний розподіл однофазних навантажень;
- застосування симетруючих трансформаторів;
- балансування фаз за допомогою АСКТП.

2.5. Захист споживачів від перенапруг

Застосовують:

- обмежувачі перенапруг (ОПН),
- грозозахисні троси,
- пристрої плавного пуску двигунів,
- стабілізатори напруги.

3. Основи керування режимами електроенергетичних систем

Керування режимами ЕЕС передбачає підтримання:

- потрібного рівня напруги,
- частоти,
- балансу потужності,
- допустимих потоків у лініях.

3.1. Баланс активної потужності

Визначає частоту в системі:

$$P_{\text{ген}} = P_{\text{навантаження}} + \Delta P_{\text{втрати}}$$

Недостатність генерації → падіння частоти.

Надлишок генерації → підвищення частоти.

Керування:

- регулюванням частоти генераторів,
- автоматичним керуванням навантаженням (demand response).

3.2. Баланс реактивної потужності

Визначає рівень напруги:

$$Q_{\text{ген}} + Q_{\text{компенсація}} = Q_{\text{споживачів}}$$

Нестача реактивної потужності → падіння напруги.

Надлишок → перенапруга та додаткові втрати.

3.3. Керування поточкорозподілом

Мета:

- уникнення перевантаження ліній,
- оптимізація потоків активної та реактивної потужності.

Засоби:

- зміна коефіцієнта трансформації,
- переключення зв'язків між підстанціями,
- FACTS-пристрої (STATCOM, SVC, UPFC).

3.4. Автоматизовані системи керування

Сучасні Smart Grid системи включають:

- АСКЕЕ — автоматизований облік електроенергії,
- SCADA — системи диспетчерського контролю,
- EMS (Energy Management System) — система управління енергосистемою,

- системи прогнозування навантаження.

Вони забезпечують:

- раннє виявлення аварійних режимів,
- автоматичне відновлення живлення (self-healing),
- оптимальне регулювання режимів.

Висновки

У темі розглянуто ключові показники та норми якості електричної енергії, методи їх регулювання та забезпечення, а також основи керування режимами електроенергетичних систем.

Розуміння цих питань необхідне для:

- забезпечення стабільної роботи електричних мереж,
- підвищення якості електропостачання споживачів,
- оптимізації режимів ЕЕС,
- впровадження сучасних систем керування та Smart Grid технологій.

Питання для самоперевірки

1. Показники якості електричної енергії.
2. Норми якості електричної енергії.
3. Методи забезпечення якості електричної енергії.
4. Методи регулювання напруги.

5. Критерії керування режимами електроенергетичних систем.
Література: [1 – 5]

ТЕМА 8. ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Характеристика змісту матеріалу, що є предметом самостійного опрацювання

1. Техніко-економічні основи проектування електричних мереж.
2. Вибір номінальної напруги мережі.
3. Вибір перерізів проводів за методом економічної щільності струму.
4. Вибір перерізів проводів за методом економічних інтервалів.
5. Урахування технічних обмежень під час вибору перерізу проводів.
6. Розрахунок місцевих мереж за допустимою втратою напруги.
7. Вибір потужності силових трансформаторів.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Проектування електричних мереж — це складний інженерний процес, спрямований на створення технічно надійної, енергоефективної та економічно обґрунтованої системи електропостачання. Воно включає вибір напруги, проводів, кабелів, трансформаторів, а також визначення конфігурації мережі, втрат напруги та економічних показників.

Мета проектування — забезпечити споживачів електричною енергією необхідної якості з мінімально можливими витратами та високою надійністю.

1. Техніко-економічні основи проектування електричних мереж

Проектування базується на поєднанні технічних та економічних вимог. До технічних відносять:

- надійність електропостачання,
- якість електричної енергії,
- безпечність роботи,
- відповідність ПУЕ, ДСТУ, ІЕС та іншим нормам.

Економічні вимоги передбачають:

- мінімізацію капітальних витрат (кабелі, опори, трансформатори, будівництво),
- оптимізацію експлуатаційних витрат (втрати енергії, амортизація),
- вибір оптимальної конфігурації мережі,
- забезпечення економічних режимів роботи обладнання.

Розрахунок вартості охоплює:

- первинні капітальні інвестиції,
- витрати на ремонт і обслуговування,
- річні втрати електричної енергії,
- довговічність елементів мережі.

2. Вибір номінальної напруги мережі

Номінальна напруга визначає:

- пропускну спроможність мережі,
- втрати енергії,
- вартість обладнання,
- безпеку експлуатації.

Основні критерії вибору:

1. Потужність, що передається

Чим більша потужність, тим вища необхідна напруга:

$$U \sim \sqrt{P}$$

2. Відстань передавання

Для дальніх передач використовують напруги 110–750 кВ.

3. Економічні міркування

Вища напруга → дорожче обладнання, але менші втрати.

4. Стандарти напруг

В Україні: 0,4; 6; 10; 20; 35; 110; 150; 220; 330; 750 кВ.

5. Майбутній розвиток мережі

Потенційне зростання навантаження враховується у проєктних рішеннях.

3. Вибір перерізів проводів за методом економічної щільності струму

Метод ґрунтується на виборі мінімального перерізу, за якого сумарні затрати (капітальні + експлуатаційні) є найменшими.

Економічна щільність струму $J_{ек}$ - це оптимальна густина струму, при якій досягається мінімум річних витрат:

$$J_{ек} = I / F$$

де I - робочий струм, F – переріз проводу.

Для мереж:

- 0,4 кВ → $J_{ек} \approx 2-3 \text{ А/мм}^2$

- 6–10 кВ → 0,8–1,2 А/мм²
- 35 кВ і вище → 0,5–0,7 А/мм²

Переріз вибирають за формулою:

$$F=I/J_{\text{ек}}$$

Переваги методу:

- враховує економіку втрат,
- забезпечує оптимальний режим.

Недоліки:

- не враховує технічні обмеження (нагрів, механічну міцність).

4. Вибір перерізів проводів за методом економічних інтервалів

Метод стосується повітряних ліній і ґрунтується на виборі найбільш економічної відстані між підстанціями або точками живлення.

Основні положення:

- вводиться оптимальна довжина $L_{\text{ек}}$,
- підстанції встановлюють через рівні економічні інтервали,
- провід вибирається виходячи з:
 - довжини інтервалу,
 - втрат енергії,
 - капітальних витрат на лінію.

Цей метод дозволяє мінімізувати:

- сумарні витрати на лінії,
- число підстанцій,
- втрати напруги.

5. Урахування технічних обмежень під час вибору перерізу проводів

До технічних вимог належать:

1) Допустимий нагрів проводу

Температура не повинна перевищувати:

- 70–90 °С для кабелів із ПВХ,
- 90–110 °С для XLPE,
- 80 °С для алюмінієвих проводів ПЛ.

2) Допустимий допустимий струм

Струм повинен бути меншим за термічний допустимий.

3) Механічна міцність ПЛ

Для повітряних ліній враховують:

- вітрове навантаження,
- ожеледні відкладення,

- довжину прольоту,
- тип опор та арматури.

4) Допустимий спад напруги

Відповідно до ПУЕ:

- не більше 5 % у мережах до 1 кВ,
- 7–8 % у мережах 6–10 кВ.

5) Струми короткого замикання

Провід має витримувати термічну та електродинамічну дію КЗ.

6. Розрахунок місцевих мереж за допустимою втратою напруги

Місцеві мережі (цехові, квартальні, внутрішньоквартальні) проєктують із дотриманням норм.

Основна формула:

$$\Delta U = IR \cos \varphi + IX \sin \varphi$$

і для трифазної мережі:

$$\Delta U \% = \Delta U / U_{\text{ном}} \cdot 100 \%$$

Нормативи:

- мережі до 1 кВ: $\Delta U \leq 5 \%$ (освітлення — до 3 %),
- мережі 6–10 кВ: $\Delta U \leq 7-8 \%$,
- мережі низької напруги з довгими кабелями → необхідно

враховувати ємність.

Під час розрахунку:

1. визначають довжини ліній,
2. вибирають попередні перерізи,
3. перевіряють втрати напруги,
4. при необхідності збільшують переріз.

7. Вибір потужності силових трансформаторів

Трансформатор вибирають за:

- потужністю навантаження,
- графіком навантаження,
- допустимими перевантаженнями,
- вимогами надійності.

Основна умова:

$$S_{\text{тр}} \geq S_{\text{розр}}$$

де $S_{\text{розр}}$ — розрахункова потужність навантаження.

Додаткові критерії:

- Коефіцієнт попиту $k_{\text{п}}$
(враховує нерівномірність споживання)
- Коефіцієнт завантаження трансформатора

$$k_{\text{зав}} = S_{\text{факт}} / S_{\text{ном}}$$

- Надійність

Для важливих споживачів ставлять 2 трансформатори:

N-1 → повинен працювати при виході одного з ладу.

- Вибір схеми трансформатора
(Δ/Y , Y/Y , Δ/Δ) — залежно від категорійності електропостачання.

Висновки

У темі розглянуто основні принципи та методи проектування електричних мереж, критерії вибору напруги, перерізу проводів, силових трансформаторів, а також підходи до техніко-економічної оптимізації.

Опанування цих знань дозволяє студентам:

- правильно проектувати конфігурації мереж,
- обирати обладнання з урахуванням технічних та економічних вимог,
- аналізувати втрати напруги,
- забезпечувати надійність та якість електропостачання,
- розуміти принципи побудови сучасних енергетичних систем.

Питання для самоперевірки

1. Техніко-економічні критерії проектування електричних мереж.
2. Вибір номінальної напруги мережі.
3. Вибір перерізів проводів за методом економічної щільності струму.
4. Вибір перерізів проводів за методом економічних інтервалів.
5. Урахування технічних обмежень під час вибору перерізу проводів.
6. Розрахунок місцевих мереж за допустимою втратою напруги.
7. Критерії вибору потужності силових трансформаторів

Література: [1 – 5]

Рекомендовані джерела інформації

1. Зайцев М.О., Кучанський В.О., Гунько І.О. Підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи електричних мереж та електроустаткування. Монографія. Друкарня ФОП Гуляєва В.М., 2021. 156 с.

2. Електричні мережі та системи: метод. вказівки до виконання лабораторної роботи «Розрахунок режимів роботи електричної мережі з двостороннім живленням в середовищі EWB» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми навч. зі спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Держ. біотехнол. ун-т; авт.-уклад.: О. А. Савченко, С. А. Попадченко. Харків: [б. в.], 2023. 31 с.

3. Електричні мережі та системи: Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С. П. Шевчук, О. В. Мейта. Електронні текстові данні (1 файл: 4,46 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 167 с.

4. Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика: навчальний посібник / Стаднік М.І., Видмиш А.А., Штуць А.А., Колісник М.А. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2020. 332 с.

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