

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

щодо організації самостійної роботи студентів всіх форм навчання та контрольні завдання для студентів заочної форми навчання з вивчення дисципліни

“Математичні задачі енергетики”

для студентів спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

2024

Методичні вказівки щодо організації самостійної роботи студентів всіх форм навчання та контрольні завдання для студентів заочної форми навчання з вивчення дисципліни "Математичні задачі енергетики" для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Укл.: Д.О. Кулагін – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024 – 28 с.

Укладач: Д.О. Кулагін, д-р техн. наук, професор, професор кафедри ЕПП

Рецензент: Ю.Г. Качан, д-р техн. наук, професор, професор кафедри ЕПП

Відповідальний за випуск: О.А. Шрам, канд. техн. наук, доц., зав. кафедри ЕПП

Затверджено
на засіданні кафедри
«Електропостачання
промислових підприємств»
Протокол № 6 від 31.01.24

Затверджено
на засіданні НМК
електротехнічного факультету
Протокол № 6 від 25.04.24

ЗМІСТ

Особливості самостійного вивчення дисципліни студентами всіх форм навчання.....	4
Загальні вимоги до виконання практичних робіт.....	18
Практична робота № 1.....	19
Практична робота № 2.....	21
Практична робота № 3.....	23
Практична робота № 4.....	25
Практична робота № 5.....	26
Перелік посилань.....	28

Особливості самостійного вивчення дисципліни студентами всіх форм навчання

Мета викладання дисципліни

- вивчення основних положень математичного апарату для проведення досліджень з питань функціонування, проектування, аналізу та керування енергетичними об'єктами;

- математичне забезпечення підготовки фахівців, здатних розв'язувати спеціалізовані задачі та практичні проблеми електроенергетики, що передбачає застосування теорій і методів фізики та інженерних наук і характеризується комплексністю та невизначеністю умов.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен отримати такі компетентності:

загальні компетентності:

K01. Здатність до абстрактного мислення, аналізу і синтезу.

K02. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

K05. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

K06. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми.

фахові компетентності:

K11. Здатність вирішувати практичні задачі із застосуванням систем автоматизованого проектування і розрахунків (САПР).

K12. Здатність вирішувати практичні задачі із залученням методів математики, фізики та електротехніки.

K13. Здатність вирішувати комплексні спеціалізовані задачі і практичні проблеми, пов'язані з роботою електричних систем та мереж, електричної частини станцій і підстанцій та техніки високих напруг.

K16. Здатність вирішувати комплексні спеціалізовані задачі і практичні проблеми, пов'язані з проблемами виробництва, передачі та розподілення електричної енергії.

K17. Здатність розробляти проекти електроенергетичного, електротехнічного та електромеханічного устаткування із дотриманням вимог законодавства, стандартів і технічного завдання.

K22. Уміти знаходити, аналізувати та узагальнювати положення нормативно-правових актів, судову практику, положення джерел міжнародного права стосовно галузі енергетики.

Очікувані програмні результати навчання:

ПР05. Знати основи теорії електромагнітного поля, методи розрахунку електричних кіл та уміти використовувати їх для вирішення практичних проблем у професійній діяльності.

ПР06. Застосовувати прикладне програмне забезпечення, мікроконтролери та мікропроцесорну техніку для вирішення практичних проблем у професійній діяльності.

ПР07. Здійснювати аналіз процесів в електроенергетичному, електротехнічному та електромеханічному обладнанні, відповідних комплексах і системах.

ПР08. Обирати і застосовувати придатні методи для аналізу і синтезу електромеханічних та електроенергетичних систем із заданими показниками.

ПР09. Уміти оцінювати енергоефективність та надійність роботи електроенергетичних, електротехнічних та електромеханічних систем.

ПР17. Розв'язувати складні спеціалізовані задачі з проєктування і технічного обслуговування електромеханічних систем, електроустаткування електричних станцій, підстанцій, систем та мереж.

ПР19. Застосовувати придатні емпіричні і теоретичні методи для зменшення втрат електричної енергії при її виробництві, транспортуванні, розподіленні та використанні.

ПР20. Здатність знаходити, аналізувати та узагальнювати положення нормативно-правових актів, судову практику, положення джерел міжнародного права стосовно галузі енергетики.

Програма навчальної дисципліни

Модуль 1.

Змістовий модуль 1 Рівняння усталеного режиму електроенергетичної системи.

Лекція 1. Система електропостачання, як об'єкт математичного дослідження. Мета та задачі дисципліни, її зміст та зв'язок з спеціальними дисциплінами. Загальні відомості про системи електропостачання. Режими роботи системи електропостачання, показники, що визначають режим роботи системи. Задачі, що виникають при проєктуванні та експлуатації систем електропостачання. Роль математики в розв'язанні задач електропостачання. Задача розрахунку усталеного режиму електроенергетичної системи, її технічне та математичне формулювання. Технічне формулювання задачі розрахунку усталеного режиму. Поняття про балансний і базисний вузли. Загальні свідомості про схеми заміщення системи. Вузлові струми. Залежні та незалежні параметри режиму. Математичне формулювання задачі розрахунку усталеного режиму. Основні особливості рівнянь усталеного режиму, шляхи подолання виникаючих труднощів. Рівняння стану лінійного електричного кола. Зовнішня ітерація. [1, с. 5 – 37, 70 – 74].

Лекція 2. Рівняння законів Кірхгофа та Ома у матричній формі. Поняття про орієнтований (спрямований) граф електричної мережі. Матриця сполучень віток у вузлах. Перший закон Кірхгофа у матричній формі. Матриця сполучень віток у незалежні контури. Другий закон Кірхгофа у матричній формі, різні форми його запису. Закон Ома у матричній формі. Клітинні (блочні) матриці. Прямий метод визначення струморозподілу. Узагальнене рівняння законів Кірхгофа. Метод вузлових напруг у матричній формі. Лінеаризоване рівняння вузлових напруг балансу струмів. Обчислення матриці вузлових провідностей. Розрахунки струмів, потоків потужності в лініях і втрат потужності в мережі при використанні методу вузлових напруг. [4, с. 31-47, 53-56; 6, с. 143-155; 229 - 236].

Лекція 3. Метод контурних струмів у матричній формі. Дерева та хорди спрямованого (орієнтованого) графа електричної мережі. Лінеаризоване рівняння контурних струмів. Зв'язок контурних струмів зі струмами віток. Алгоритм обчислення матриці контурних опорів. Узагальнене рівняння стану електричного кола. Матриці узагальнених параметрів системи. Розрахунки ustalених режимів систем великої складності. Класифікація методів розв'язання рівнянь ustalених режимів. Точні та ітераційні методи розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Методи обертання матриці коефіцієнтів, метод послідовного упорядкованого виключення невідомих (метод Гаусса), алгоритми метода Гаусса зі зворотним ходом, схема Жордана розв'язку лінійних рівнянь на комп'ютері. [3, с. 161-187; 4, с.148-168].

Лекція 4. Методи LU – перетворення. Фактори, що впливають на точність розв'язку систем рівнянь. Специфіка систем лінійних рівнянь ustalених режимів електроенергетичної системи. Урахування слабкої заповненості матриці коефіцієнтів. Чисельні методи розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Метод простої ітерації, умови збіжності. Метод прискореної ітерації (метод Гаусса – Зейделя), умови збіжності, алгоритм розв'язування на комп'ютері. [3, с. 188-214; 4, с.148-168; 187-193; 6, с. 394-409]. Нелінійні рівняння вузлових напруг у формі балансу струмів і у формі балансу потужностей у матричному запису. Розв'язування систем нелінійних рівнянь вузлових напруг у формі балансу струмів методом Гаусса – Зейделя, умови збіжності. Прискорення збіжності. [3, с. 237-248; 267-270; 4, с. 202-207; 219-221; 6, с. 185-193, 202-207]

Лекція 5. Розв'язання систем нелінійних і трансцендентних рівнянь вузлових напруг у формі балансу потужностей методом Ньютона. Алгоритм розв'язування систем нелінійних рівнянь методом Ньютона. Розв'язування систем нелінійних і трансцендентних рівнянь вузлових напруг у формі балансу потужностей методом Ньютона. [3, с. 230-237; 4, с. 210-212; 6, с. 207-208]. Поліпшення збіжності метода Ньютона (методи “по параметру”).

Розрахунки режимів систем великої складності. Еквівалентування частин електроенергетичної системи. Розділення системи на підсистеми. [3, с. 267-270; 4, с. 223-224; 7, с. 442-462; 469-479]

Змістовий модуль 2 Застосування теорії випадкових подій при розрахунках надійності систем електропостачання

Лекція 6. Застосування теорем додавання та множення ймовірностей у розрахунках надійності, основаних на використанні паралельно – послідовних структур. Теорема додавання ймовірностей для несумісних і сумісних подій. Теорема множення ймовірностей для незалежних та залежних подій. Основні поняття теорії надійності: система, елемент, виріб, об'єкт, надійність, безвідмовність, відмова, роботоздатність, довговічність, ремонтпридатність. [1, с. 34-53; 4, с. 344-348; 10, с. 8-11]. Показники надійності електроенергетичних систем. Метод паралельно-послідовних структур розрахунків надійності. Потоки відмов і відновлень, частота відмов, середній час роботи елемента (системи), середній час відновлення, середня ймовірність знаходження елемента (системи) у роботоздатному стані (коефіцієнт готовності), середня ймовірність відмовного стану, коефіцієнт вимушеного простою. Розрахунки надійності, основані на використанні паралельно-послідовних структур.[4, с. 383-391; 10, с. 26-30; 39-45].

Лекція 7. Методи розрахунків надійності складних структур. Формули повної ймовірності та Бейєса. Теорема розкладу та її застосування для визначення ймовірностей відмови та безвідмовної роботи складних схем електричних з'єднань. Методи структурного аналізу складних схем, методи мінімальних шляхів і мінімальних перерізів. [1, с. 54-58; 4, с. 347-348]. Метод мінімальних перерізів. Вибір мінімальних перерізів для складних схем шляхом побудови можливих підграфів графа структурної схеми надійності електричної мережі. Алгоритм розрахунку надійності складних структур методом мінімальних перерізів. [10, с. 47-54].

Модуль 2.

Застосування теорії ймовірностей та математичної статистики у задачах електроенергетики

Змістовий модуль 3. Випадкові величини в електроенергетиці

Лекція 8. Закони розподілу ймовірностей та їх властивості. Послідовність незалежних випробувань (схема Бернуллі) та її використання в електроенергетиці. Дискретні та неперервні випадкові величини в

електроенергетиці, їх закон розподілу ймовірностей: функція й густина розподілу ймовірностей та їх властивості. [1, с. 67 – 84; 4, с. 348]. Числові характеристики випадкових величин та їх властивості. Математичне сподівання та його властивості. Середня потужність за інтервал усереднювання, як математичне сподівання випадкової величини — потужності групи електроприймачів. Дисперсія та її властивості. Стандартне (середньоквадратичне) відхилення. [1, с. 84-103; 219 - 224].

Лекція 9. Нормальний закон розподілу ймовірностей та його використання в електроенергетиці. Густина та функція розподілу ймовірностей випадкової величини, що підлягає нормальному закону розподілу ймовірностей. Імовірність попадання випадкової величини, що підлягає нормальному закону розподілу ймовірностей, на задану ділянку. Використання табличних знань стандартної нормальної функції розподілу, функції Лапласа, та інтеграла ймовірностей. Правило “ k - сигм” при нормальному законі розподілу ймовірностей. [1, с. 116-106; 116-127]. Закони розподілу неперервних та дискретних випадкових величин, що найчастіше використовуються в енергетиці. Закони рівномірної густини, та експоненціальний (показниковий). Закони розподілу дискретних випадкових величин: біноміальний, закон Пуассона, їх застосування в розрахунках навантажень і надійності [1, с. 103-115; 525 - 527]

Лекція 10. Математична модель “випадкова величина” у методах імовірнісного моделювання систем електропостачання. Використання математичної моделі “випадкова величина” при розрахунках втрат потужності та електроенергії в мережах 0,38 – 110 кВ. Застосування законів розподілу ймовірностей випадкових величин у методах розрахунків електричних навантажень. [12, с. 18-21]. Імовірнісні характеристики надійності як функції часу. Основні математичні моделі відмов. Імовірності безвідмовної роботи та відмови на заданому часовому інтервалі, густина розподілу ймовірностей випадковій величині – часу безвідмовної роботи, інтенсивність відмови, зв’язок між ними Імовірності відновлення та невідновлення на заданому часовому інтервалі, густина розподілу ймовірностей випадкової величині – часу відновлення, інтенсивність відновлення, зв’язок між ними. Основні математичні моделі відмов. Розподіли Вейбулла та експоненціальний випадкової величині – часу безвідмовної роботи. Розрахунки показників надійності як функцій часу при послідовному, та паралельному сполученні елементів. [10, с. 24-29; 32-33; 39-45]

Змістовий модуль 4 Системи випадкових величин в електроенергетиці. Кореляційний та регресійний аналіз

Лекція 11. Системи випадкових величин в електроенергетиці. Функція розподілу й густина розподілу системи випадкових величин і їх властивості. Закони розподілу окремих величин, що входять у систему. Залежні й незалежні випадкові величини. Числові характеристики систем випадкових величин. Кореляційний момент, коефіцієнт кореляції, дисперсія суми залежних випадкових величин. Використання математичної моделі “система випадкових величин” у розв’язку задачі вирівнювання групового графіка навантаження та при розрахунках електричних навантажень. [1, с. 159-187; 13, с. 27-28]. Комплексні випадкові величини та їх числові характеристики. Використання моделі “система комплексних випадкових величин” для визначення параметрів режиму системи електропостачання. [1, с. 402-404; 12, с. 30-31]. Функції регресії, прямі лінії середньоквадратичної регресії. Рівняння й функції регресії системи двох випадкових величин. Рівняння прямих середньоквадратичної регресії, їх використання при прогнозуванні попиту потужності та електроенергії у системі електропостачання. [1, с. 188-192; 347-365; 4, с. 120-127]

Змістовий модуль 5 Випадкові процеси та їх характеристики

Лекція 12. Випадкові процеси та їх характеристики. Визначення випадкового процесу. Переріз і реалізація випадкового процесу. Класифікація випадкових процесів. Закони розподілу та основні характеристики випадкового процесу: математичне сподівання, дисперсія, середньоквадратичне відхилення, кореляційна функція, нормована кореляційна функція. Основні властивості характеристик випадкового процесу. Взаємна кореляційна функція двох випадкових процесів. Матриця взаємних кореляційних функцій векторного випадкового процесу. [1, с. 370-385; 4, с. 371-375; 5, с. 12-20; 24-46]. Стаціонарні випадкові процеси. Визначення стаціонарного випадкового процесу в широкому та вузькому смислу. Властивості характеристик стаціонарного процесу. Ергодична властивість стаціонарного процесу. Вирази для математичного сподівання, дисперсії та кореляційної функції ергодичного стаціонарного випадкового процесу, достатні умови ергодичності стаціонарного випадкового процесу по математичному сподіванню. Електричне навантаження як стаціонарний ергодичний процес. [1, с. 419-427; 457-467; 5, с. 305-311]

Змістовий модуль 6 Застосування методів математичної статистики в електроенергетиці

Лекція 13. Застосування методів математичної статистики в електропостачанні. Задачі математичної статистики. Статистичні оцінки числових характеристик випадкових величин. Математична модель незалежних вимірювань. Незміщені, спроможні та ефективні оцінки. Методи знаходження оцінок. Оцінки для математичного сподівання, дисперсії, оцінки для числових характеристик системи випадкових величин. Рівняння емпіричних прямих середньоквадратичної регресії. [1, с. 312-317; 4, с. 363-364; 367-369]

Лекція 14. Довірчий інтервал, довірча ймовірність. Оцінка невідомої функції розподілу випадкової величини — електричного навантаження. [1, с. 131-139; 143-158; 317-330; 3, с. 365-367, 369-371].

Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Рівняння усталеного режиму електроенергетичної системи.	25
2	Застосування теорії випадкових подій при розрахунках надійності систем електропостачання	8
3	Випадкові величини в електроенергетиці	12
4	Системи випадкових величин в електроенергетиці. Кореляційний та регресійний аналіз	4
5	Випадкові процеси та їх характеристики	4
6	Застосування методів математичної статистики в електроенергетиці	7
	Разом	60

Індивідуальні завдання

Для студентів заочної форми навчання – 1 контрольна робота, яка полягає у виконанні практичних робіт, наведених нижче.

Для студентів денної форми навчання 1 розрахунково-графічна робота на 2 години.

Методи навчання

Робочою програмою передбачені такі форми організації навчального процесу як лекції, практичні роботи, самостійна робота студентів, консультації та контрольні заходи.

Під час викладання курсу використовуються наступні методи навчання:

- розповідь – для оповідної, описової форми розкриття навчального матеріалу;
- пояснення – для розкриття сутності певного явища, закону, процесу;
- бесіда – для усвідомлення за допомогою діалогу нових явищ, понять;
- ілюстрація – для розкриття предметів і процесів через їх символічне зображення (рисунок, схеми, графіки);
- практична робота – для використання набутих знань у розв’язанні практичних завдань;
- аналітичний метод – уявного (практичного) розкладу цілого на частини з метою вивчення їх суттєвих ознак;
- індуктивний метод – для вивчення явищ від одиничного до загального;
- дедуктивний метод – для вивчення навчального матеріалу від загального до окремого, одиничного;
- проблемний виклад матеріалу – для створення проблемної ситуації.

Очікувані результати навчання з дисципліни

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен отримати такі компетентності:

загальні компетентності:

- Здатність до абстрактного мислення, аналізу і синтезу.
- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.
- Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

– Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми.

фахові компетентності:

- Здатність вирішувати практичні задачі із застосуванням систем автоматизованого проектування і розрахунків (САПР).
- Здатність вирішувати практичні задачі із залученням методів математики, фізики та електротехніки.

- Здатність вирішувати комплексні спеціалізовані задачі і практичні проблеми, пов'язані з роботою електричних систем та мереж, електричної частини станцій і підстанцій та техніки високих напруг.

- Здатність вирішувати комплексні спеціалізовані задачі і практичні проблеми, пов'язані з проблемами виробництва, передачі та розподілення електричної енергії.

- Здатність розробляти проекти електроенергетичного, електротехнічного та електромеханічного устаткування із дотриманням вимог законодавства, стандартів і технічного завдання.

- Уміти знаходити, аналізувати та узагальнювати положення нормативно-правових актів, судову практику, положення джерел міжнародного права стосовно галузі енергетики.

Очікувані програмні результати навчання:

- Знати основи теорії електромагнітного поля, методи розрахунку електричних кіл та уміти використовувати їх для вирішення практичних проблем у професійній діяльності.

- Застосовувати прикладне програмне забезпечення, мікроконтролери та мікропроцесорну техніку для вирішення практичних проблем у професійній діяльності.

- Здійснювати аналіз процесів в електроенергетичному, електротехнічному та електромеханічному обладнанні, відповідних комплексах і системах.

- Обирати і застосовувати придатні методи для аналізу і синтезу електромеханічних та електроенергетичних систем із заданими показниками.

- Уміти оцінювати енергоефективність та надійність роботи електроенергетичних, електротехнічних та електромеханічних систем.

- Розв'язувати складні спеціалізовані задачі з проектування і технічного обслуговування електромеханічних систем, електроустаткування електричних станцій, підстанцій, систем та мереж.

- Застосовувати придатні емпіричні і теоретичні методи для зменшення втрат електричної енергії при її виробництві, транспортуванні, розподіленні та використанні.

- Здатність знаходити, аналізувати та узагальнювати положення нормативно-правових актів, судову практику, положення джерел міжнародного права стосовно галузі енергетики.

Засоби оцінювання

Контроль успішності студентів денної форми навчання здійснюється за результатами:

- захисту звітів про виконання практичних робіт;

- двох рубіжних модульних контролів;
- залікової роботи.

Контроль успішності студентів заочної форми навчання здійснюється за результатами:

- захисту звітів про виконання практичних робіт;
- захисту контрольної роботи;
- залікової роботи.

Критерії оцінювання

Оцінювання успішності студентів здійснюється окремо за кожний модуль на відповідному рубіжному модульному контролі (РМК) за 100-бальною шкалою.

Під час контролю враховуються наступні види робіт:

- робота студента на лекціях оцінюється до 12 балів;
- виконання та захист практичних робіт оцінюється до 60 балів;
- модульні контрольні роботи – до 28 балів (2 роботи 14 балів).

Шкала оцінювання

– Сума балів за всі види навчальної діяльності	– для заліку
– 90 – 100	–
– 82-89	–
– 74-81	– зараховано
– 64-73	
– 60-63	
– 35-59	– не зараховано з можливістю повторного складання
– 0-34	– не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

Методичне забезпечення

1. Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни "Математичні задачі енергетики" для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціалізації «Енергетичний

менеджмент» всіх форм навчання / Укл.: Д.О. Кулагін – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018 – 22 с.

2. Програма, методичні вказівки з вивчення дисципліни "Математичні задачі енергетики" та контрольні завдання для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціалізації «Енергетичний менеджмент» заочної форми навчання / Укл.: Д.О. Кулагін – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018 – 17 с.

3. Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни "Математичні задачі енергетики" для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціалізації «Електротехнічні системи електроспоживання» всіх форм навчання / Укл.: Д.О. Кулагін – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018 – 22 с.

4. Програма, методичні вказівки з вивчення дисципліни "Математичні задачі енергетики" та контрольні завдання для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціалізації «Електротехнічні системи електроспоживання» заочної форми навчання / Укл.: Д.О. Кулагін – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018 – 17 с.

Рекомендована література

Базова

1. Математичне моделювання в електроенергетиці: Підручник / Кириленко О.В., Сегеда М.С., Буткевич О.Ф., Мазур Т.А. Львів: Вид. «Львівська політехніка», 2010. – 608 с. (2 пр., ел).

2. Перхач В.С. Математичні задачі електроенергетики. – Львів, “Вища школа”, 1989.- 464 с. (50пр).

3. Романюк Ю.Ф. Електричні системи та мережі (Розділ 4.5 Розрахунок режимів електричних мереж на електронно – обчислюваних машинах) – К.: Знання, 2007. – 292 с. (5 пр.).

4. Gelfand I. M. Calculus of Variations / I. M. Gelfand, Izrail Moiseevitch Gelfand, S. V. Fomin. – Courier Dover Publications, 2000 – 232 p. (ел.)

5. Cassel Kevin W. Variational Methods with Applications in Science and Engineering / Cassel Kevin W. – Cambridge University Press, 2013. – 432 p. (ел.)

6. Lebedev L. P. The Calculus of Variations and Functional Analysis with Optimal Control and Applications in Mechanics / Lebedev L. P., Cloud M. J. – World Scientific, 2003. – 436 p. (ел.)

7. Logan J. David. Applied Mathematics / Logan J. David. – 3rd Ed. – Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, 2006. – 546 p. (ел.)

8. Кулагін Д. О. Проектування систем керування тяговими електропередачами моторвагонних поїздів : монографія / Д. О. Кулагін. – Бердянськ : ФО-П Ткачук О. В., 2014. – 154 с. (1 пр., ел).

9. Кулагін Д. О. Інформаційні управляючі системи та технології : колективна монографія / Д. О. Кулагін., П. Д. Андрієнко, [та ін.]. – Донецьк : Донбас, 2014. – 218 с. (1 пр., ел).

10. Системи прийняття рішень в економіці, техніці та організаційних сферах: від теорії до практики: колективна монографія у 2т. Т.2. / за заг. ред. Савчук Л. М. / Павлоград : АРТ Синтез-Т, 2014. – 429 с. – ISBN 978-617-7232-00-0 (повне вид.), ISBN 978-966-97393-9-1 (том 2). (1 пр., ел).

11. Кулагін Д. О. Інтеграція економічних та технічних процесів: сучасний стан та перспективи розвитку: колективна монографія / за заг. ред. Савчук Л. М. / Х. : Вид-во «Діса плюс», 2015. – 480 с. – ISBN 978-617-7064-86-1. (1 пр., ел).

12. Кулагін Д. О. Дослідження роботи тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 при збуреннях в електричних колах / Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д. // Електротехніка та електроенергетика. – 2012. – № 1. – С. 30–34. (1 пр., ел).

13. Кулагін Д. О. Розробка елементів системи керування тяговою електропередачею дизель-поїзда ДЕЛ-02 / Кулагін Д. О. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 1/2012 (17). – С. 77–80. (1 пр., ел).

14. Кулагін Д. О. Розробка математичної моделі тягового перетворювача частоти дизель-поїзда / Кулагін Д. О. // Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. – 2012. – № 2 (73). – С. 96–99. (1 пр., ел).

15. Кулагін Д. О. Аналіз режимів роботи модернізованої тягової електропередачі автономного локомотива / Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д., Андрієнко Д. С. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 2/2012 (18). – С. 615–617. (1 пр., ел).

16. Кулагін Д. О. Баланс потужностей рухомого складу в процесі рекуперації електричної енергії / Кулагін Д. О. // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 36(1009). – С. 392–393. (1 пр., ел).

17. Кулагін Д. О. Спосіб апроксимації кривої намагнічування тягового асинхронного двигуна / Кулагін Д. О. // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. – №2. – С. 66-70.

18. Кулагін Д. О. Особливості задачі раціонального керування модулем вектора потокозчеплення тягового асинхронного двигуна дизель-поїзда / Кулагін Д. О. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2013. – № 2. – С. 155–157. (1 пр., ел).

19. Кулагін Д. О. Врахування впливу насичення магнітних кіл на механічні характеристики тягових асинхронних двигунів / Д. О. Кулагін // Праці Одеського політехнічного університету. – 2014. – № 1(43). – С. 147–153. (1 пр., ел).

20. Кулагін Д. О. Визначення динамічних індуктивностей асинхронного двигуна з урахуванням процесів насичення / Кулагін Д. О. // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – №1. – С. 55–60. (1 пр., ел).

21. Кулагін Д. О. Аналіз енергетичних потоків тягового перетворювача частоти / Кулагін Д. О. // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – № 15(91). – С. 337–339. (1 пр., ел).

22. Кулагін Д. О. Аналіз роботи керуючої системи тягового перетворювача частоти моторвагонного рухомого складу / Кулагін Д. О. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2014. – № 5. – С. 23–26. (1 пр., ел).

23. Кулагін Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення / Кулагін Д. О. // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 6. – С. 49–55. (1 пр., ел).

24. Кулагін Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітних кіл / Кулагін Д. О. // Науковий вісник НГУ. – 2014. – № 6. – С. 103–110. (1 пр., ел).

Допоміжна

25. Кулагін Д. О. Побудова схеми тягової електропередачі моторвагонного поїзда з можливістю рекуперації / Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д. // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 7. – С. 121–126. (1 пр., ел).

26. Кулагін Д. О. Проектування інтелектуальної системи керування тяговими електроприводами / Кулагін Д. О., Роменський І. С. // Восточно-європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 9(74). – С. 41–46. (1 пр., ел).

27. Кулагін Д. О. Особливості вибору тягових електродвигунів для побудови систем рухомих електротехнічних комплексів / Кулагін Д. О., Чернецький Б. С. // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – № 2/1(22). – С. 9–12. (1 пр., ел).

28. Кулагін Д. О. Визначення особливостей побудови тягових електроприводів промтранспорту / Кулагін Д. О. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2014. – № 2. – С. 147–152. (1 пр., ел).

29. Кулагін Д. О. Особливості побудови тягових електроприводів рухомих електротехнічних комплексів / Кулагін Д. О., Чернецький Б. С. // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – № 3/1(23). – С. 13–17. (1 пр., ел).

30. Kulagin D. O. Analysis of Modes Traction Frequency Converter / Kulagin D. O., Chernetskiy B. S. // *Electrotechnic and Computer Systems*. – 2015. – № 19(95). – P. 92-94. (1 пр., ел).

31. Кулагін Д. О. Дослідження електромагнітних процесів самозбудження асинхронного тягового двигуна при рекуперативному гальмуванні з живленням від джерела обмеженої потужності / Кулагін Д. О. // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2015. – №1. – С. 39-45. (1 пр., ел).

32. Kulagin D. O. Rolling electrical complex on the basis of the criterion of minimizing the area under the curve movement / Kulagin D. O. // *Scientific Bulletin of National Mining University*. – 2016. – № 2. – С. 60-67. (1 пр., ел).

Інформаційні ресурси

1. Національна бібліотека ім. В.І.Вернадського / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.nbuv.gov.ua/>

2. Система дистанційного навчання НУ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА» / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://moodle.zp.edu.ua/>

Загальні вимоги до виконання практичних робіт.

Варіант завдання обирається за трьома цифрами. В задачах практичної роботи даний номер позначається літерами:

а – остання цифра поточного року, в якому виконується робота (наприклад, якщо зараз на календарі 2024 р., то а=4);

б – цифра, яка залежить від номера академічної групи:

Загальний вигляд номера академічної групи	Значення б
Е(або Ез)-111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 110	0
Е(або Ез)-121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 120	1
Е(або Ез)-511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 510	2
Е(або Ез)-521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 520	3
Е(або Ез)-111сп, 112сп, 113сп, 114сп, 115сп, 116сп, 117сп, 118сп, 119сп, 110сп	4
Е(або Ез)-511сп, 512сп, 513сп, 514сп, 515сп, 516сп, 517сп, 518сп, 519сп, 510сп	5
Е(або Ез)-111_2, 112_2, 113_2, 114_2, 115_2, 116_2, 117_2, 118_2, 119_2, 110_2	6
Е(або Ез)-511_2, 512_2, 513_2, 514_2, 515_2, 516_2, 517_2, 518_2, 519_2, 510_2	7
Всі інші позначення групи, не охоплені вище, для груп Е(або Ез)-1**	8
Всі інші позначення групи, не охоплені вище, для груп Е(або Ез)-5**	9

с – остання цифра номера студента у списку групи на сайті <https://portal.zp.edu.ua/> (наприклад, якщо ваш номер у списку групи на порталі 13, то с =3).

Практична робота № 1.

Тема: «Рівняння усталеного режиму електроенергетичної системи»

Для заданих на рис. 1.1 схем електропостачання відповідно до вихідних даних свого варіанту, наданих в табл. 1.1, 1.2, виконати наступне:

- скласти два види схем заміщення (перша схема, на якій електростанції представити джерелами напруги, а трансформатори, лінії та навантаження – опорами; друга схема, на якій електростанції та навантаження представити у вигляді струмів завдання, а лінії та трансформатори – опорами);
- у відповідності із заданим балансуєчим вузлом скласти рівняння за законами Кірхгофа;
- скласти граф для схеми електропостачання;
- скласти всі можливі варіанти дерев для свого графа, визначити кількість та позначити на схемах вітки дерев та хорди;
- скласти першу та другу матрицю інценденцій;
- скласти узагальнене рівняння стану електроенергетичної системи, не вирішуючи його.

Таблиця 1.1 – Номер балансуєчого вузла

b=	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер балансуєчого вузла	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

Таблиця 1.2 – Номер схеми

c=	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер схеми	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4

При вирішенні задачі скористатися прикладом, наведеним в [1, глава 1].

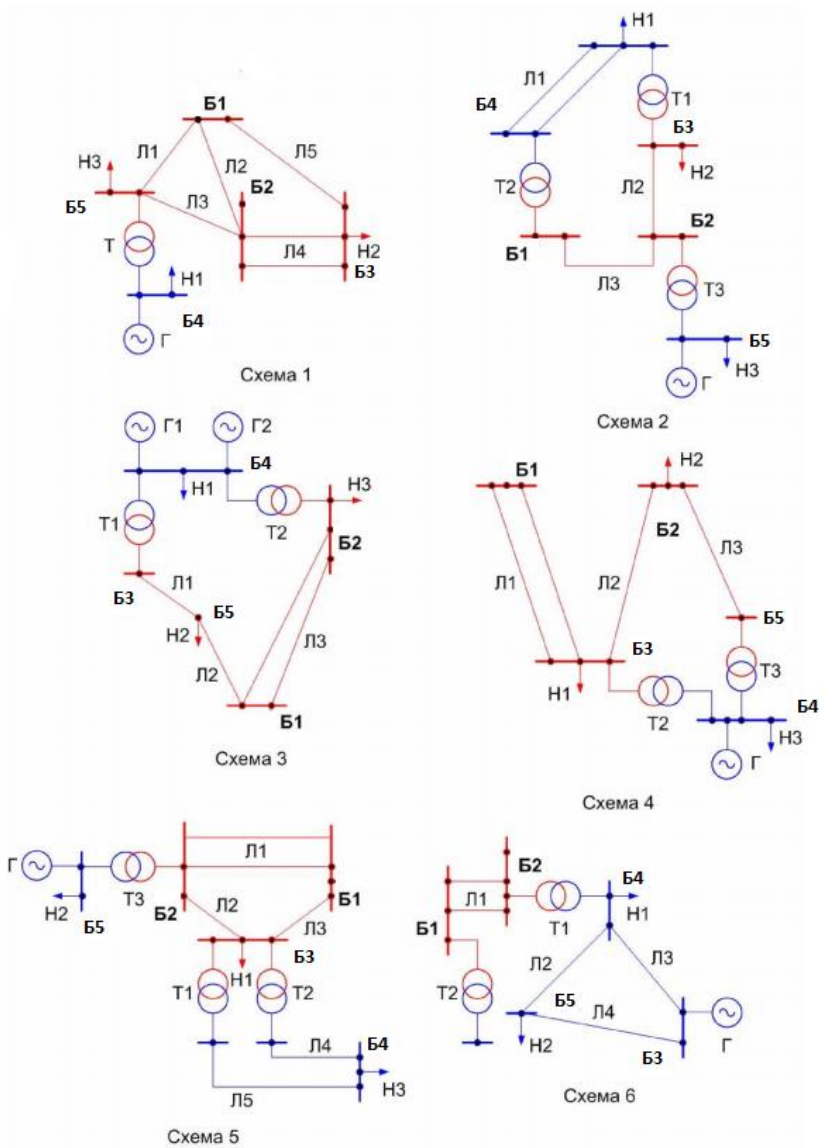


Рисунок 1.1 – Схеми електропостачання

Практична робота № 2.

Тема: «Використання основних понять теорії ймовірності при аналізі режимів роботи електроенергетичної системи»

Енергосистема має n агрегатів (табл. 2.1), потужністю P (табл. 2.2) кожний. Максимальне навантаження енергосистеми повністю відповідає кількості встановлених генеруючих агрегатів та їх потужності.

Таблиця 2.1 – Кількість генеруючих агрегатів в енергосистемі

$c=$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n	8	9	10	11	12	10	9	8	11	13

Таблиця 2.2 – Потужність одного генеруючого агрегату в енергосистемі

$b=$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P, \text{МВт}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	200

Ймовірність аварійного стану агрегатів однакова і наведена в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Ймовірність аварійного стану генеруючих агрегатів в енергосистемі

$a=$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
q	0,02	0,03	0,04	0,01	0,05	0,02	0,03	0,01	0,02	0,04

Необхідно визначити оптимальну кількість додаткових агрегатів, якщо розрахункові витрати на кожний новий агрегат складають 950000 умовних одиниць (у.о.) за рік, а збиток від недовідпуску електроенергії складає 0,65 у.о./кВт·год.

Для простоти графік навантаження прийняти ступінчастим з кроком, який дорівнює потужності одного генеруючого агрегату в енергосистемі. Ймовірність навантаження системи номінальною потужністю прийняти рівною 0,04, а ймовірності навантаження іншими ступенями з кроком, який дорівнює потужності одного генеруючого агрегату в енергосистемі, у сторону зменшення приймати рівними на 0,02 більше, ніж на попередній ступені. При цьому

кількість ступенів обирається виходячи з розрахунку ймовірності втрати певної кількості агрегатів із загальної кількості (за формулою біноміального розподілу).

При вирішенні задачі скористатися прикладом 3.11, наведеним в [1, глава 3].

Практична робота № 3.

Тема: «Аналіз та прогнозування випадкових процесів в електроенергетичних системах»

Нехай в електроенергетичній системі протягом 5 діб спостерігались потужності попиту, за характерні години доби, які задано в табл. 3.1 – 3.5.

Таблиця 3.1 – Величини потужностей попиту (задано в ГВт), протягом 4 години відповідних діб

a =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 доба	5	6	4	8	5	6	6	8	6	9
2 доба	7	8	5	7	4	7	5	9	6	8
3 доба	5	5	5	6	5	8	6	8	5	8
4 доба	4	6	6	6	4	8	6	8	4	7
5 доба	6	4	4	7	4	6	7	7	6	6

Таблиця 3.2 – Величини потужностей попиту (задано в ГВт), протягом 10 години відповідних діб

c =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 доба	13	14	12	11	10	15	12	15	12	14
2 доба	11	11	11	10	11	14	13	16	13	15
3 доба	12	15	14	11	13	15	11	17	15	16
4 доба	10	15	13	12	11	14	11	16	11	16
5 доба	13	14	12	13	10	13	12	15	12	14

Таблиця 3.3 – Величини потужностей попиту (задано в ГВт), протягом 16 години відповідних діб

b =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 доба	9	10	9	12	9	11	8	9	12	11
2 доба	8	11	10	11	10	12	9	10	10	11
3 доба	9	11	10	12	9	11	9	10	10	10
4 доба	10	12	11	12	8	10	10	9	11	12
5 доба	8	10	10	10	9	12	8	11	12	10

Таблиця 3.4 – Величини потужностей попиту (задано в ГВт), протягом 19 години відповідних діб

b =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 доба	18	16	18	20	19	20	23	22	24	21
2 доба	19	15	18	21	19	21	22	21	24	21
3 доба	20	16	21	22	18	22	22	23	25	20
4 доба	19	17	20	21	19	20	23	22	25	19
5 доба	20	16	19	20	20	19	24	22	25	20

Таблиця 3.5 – Величини потужностей попиту (задано в ГВт), протягом 24 години відповідних діб

c =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 доба	9	11	8	9	12	9	10	9	12	9
2 доба	10	12	9	10	10	8	11	10	11	10
3 доба	9	11	9	10	10	9	11	10	12	9
4 доба	8	10	10	9	11	10	12	11	12	8
5 доба	9	12	8	11	12	8	10	10	10	9

Розглядаючи попит, як випадковий процес, визначити величини математичних сподівань, дисперсії, стандартних відхилень та кореляційних коефіцієнтів для вказаних перерізів процесу та на основі цих даних спрогнозувати попит у 19 годин, якщо попит о 10 годині складав 12 ГВт.

При вирішенні задачі скористатися прикладом 3.18, наведеним в [1, глава 3].

Практична робота № 4.

Тема: «Використання критеріїв стійкості для аналізу роботи електроенергетичної системи»

Для електроенергетичної системи з відомим характеристичним рівнянням виду $D(p)=\alpha_0 \cdot p^5+\alpha_1 \cdot p^4+\alpha_2 \cdot p^3+\alpha_3 \cdot p^2+\alpha_4 \cdot p+\alpha_5$, де відповідні коефіцієнти характеристичного рівняння задані в таблицях 4.1–4.3 перевірити стійкість електроенергетичної системи наступними методами:

1. За допомогою критерію Рауса, визначивши також кількість коренів рівняння в правій півплощині.
2. За допомогою критерію Гурвиця.
3. За допомогою критерію Михайлова (в першому та другому формулюванні).

Таблиця 4.1 – Коефіцієнти характеристичного рівняння

a=	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α_5	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1
α_4	2	3	1	2	3	1	2	3	1	3

Таблиця 4.2 – Коефіцієнти характеристичного рівняння

b=	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α_3	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4
α_2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1

Таблиця 4.3 – Коефіцієнти характеристичного рівняння

c=	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α_1	5	4	3	5	4	3	5	4	3	5
α_0	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1

При вирішенні задачі скористатися прикладами, наведеними в [1, глава 5].

Практична робота № 5.

Тема: «Дослідження процесів оптимального транспортування електроенергії від джерел живлення до споживачів»

В електроенергетичній системі є два вузла з джерелами живлення та три вузла зі споживачами електричної енергії. Потужності джерел електричної енергії $P_{дж}$ наведено в табл. 5.1, а потужності споживачів електричної енергії $P_{сп}$ – в табл. 5.2.

Таблиця 5.1 – Потужності джерел електричної енергії, МВт

a=	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{дж1}$	110	100	130	120	105	115	125	135	140	145
$P_{дж2}$	90	100	70	80	95	185	75	65	60	35

Таблиця 5.2 – Потужності джерел електричної енергії, МВт

b=	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{сп1}$	70	75	65	55	95	85	60	85	60	75
$P_{сп2}$	80	65	70	50	75	70	40	45	65	60
$P_{сп3}$	50	60	65	95	30	45	100	70	75	65

Питомі витрати z_{ij} (де i – номер вузла з джерелом живлення, j – номер вузла зі споживачем електричної енергії) на транспортування потужності між вузлами джерел живлення та споживачів електричної енергії наведено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Питомі витрати на транспортування потужності між вузлами джерел живлення та споживачів електричної енергії, у.о./МВт

c=	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
z_{11}	1,1	1,2	1,15	1,4	1,35	1,05	1,25	1	1,2	1,4
z_{12}	1,2	1,1	1,1	1,25	1,2	1,15	1,05	1,1	1,15	1,05
z_{13}	1,3	1,4	1,2	1,3	1,1	1,1	1,15	1,2	1,05	1
z_{21}	1,5	1,35	1,35	1,2	1,25	1,2	1,3	1,35	1,25	1,1
z_{22}	1,4	1,15	1,4	1,1	1,3	1,3	1,35	1,4	1,3	1,2
z_{23}	1,25	1,3	1,25	1,35	1,4	1,25	1,4	1,05	1,35	1,25

Взаємне розташування споживачів електричної енергії (B_1, B_2, B_3) та джерел живлення (A_1, A_2) показано на рис. 5.1. Лініями відповідно показано можливі до спорудження лінії електропередач, питомі витрати на транспортування потужності між вузлами джерел живлення та споживачів електричної енергії по яких наведено в табл. 5.3.

На рис. 5.1 величину потужності в МВт, яка передається відповідною лінією електропередачі позначено x_{ij} (де i – номер вузла з джерелом живлення, j – номер вузла зі споживачем електричної енергії)

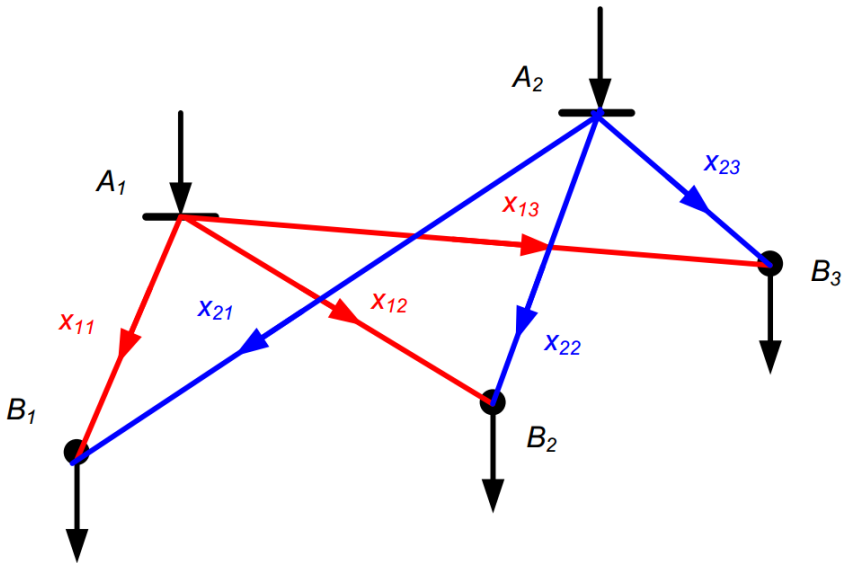


Рисунок 5.1 – Взаємне розташування споживачів електричної енергії та джерел живлення

В даній задачі потрібно скласти математичну модель для вирішення транспортної задачі з оптимального транспортування електроенергії від джерел до споживачів.

При вирішенні задачі скористатися методами вирішення транспортної задачі, наведеними в [4].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Математичне моделювання в електроенергетиці: Підручник / Кириленко О.В., Сегеда М.С., Буткевич О.Ф., Мазур Т.А. Львів:Вид. «Львівська політехніка», 2010. – 608 с.
2. Перхач В.С. Математичні задачі електроенергетики. – Львів, “Вища школа”, 1989.- 464 с.
3. Романюк Ю.Ф. Електричні системи та мережі (Розділ 4.5 Розрахунок режимів електричних мереж на електронно – обчислюваних машинах) – К.: Знання, 2007. – 292 с.
4. Gelfand I. M. Calculus of Variations / I. M. Gelfand, Izrail Moiseevitch Gelfand, S. V. Fomin. – Courier Dover Publications, 2000 – 232 p.