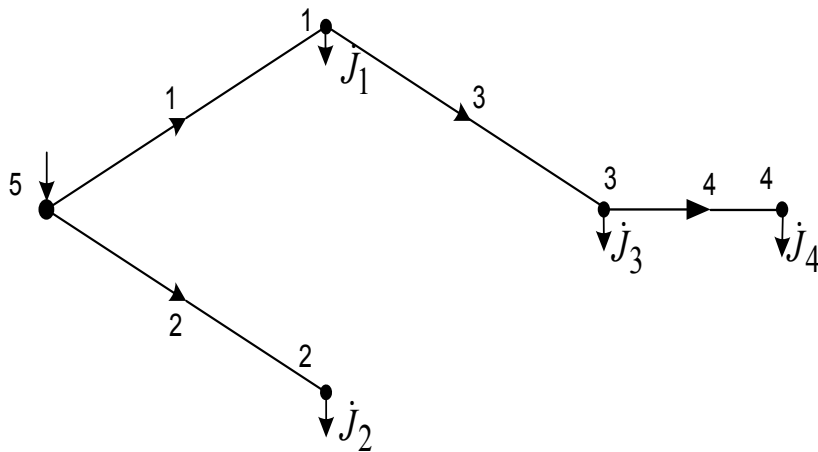


М. Й. Бурбело, С. В. Бевз, О. М. Кравець

МАТЕМАТИЧНІ ЗАДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. Й. Бурбело, С. В. Бевз, О. М. Кравець

МАТЕМАТИЧНІ ЗАДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ

Практикум

Вінниця
ВНТУ
2021

УДК 621.311(075)

Б91

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки (протокол № 15 від 31.05.2021 р.)

Рецензенти:

С. М. Балюта, доктор технічних наук, професор

В. О. Комар, доктор технічних наук, професор

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

Бурбело, М. Й.

Б91 Математичні задачі електроенергетики : практикум / Бурбело М. Й., Бевз С. В., Кравець О. М. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 126 с.

ISBN 978-966-641-857-2

В практикумі висвітлено методи розрахунку усталених режимів електричних мереж, застосування теорії ймовірностей та математичної статистики для аналізу надійності та електричних навантажень, чисельні методи розрахунку перехідних режимів та методи аналізу стійкості систем. Практикум призначений для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

УДК 621.311(075)

ISBN 978-966-641-857-2

©ВНТУ, 2021

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1 МЕТОДИ АНАЛІЗУ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ.....	6
1.1 Розрахункова та заступна схеми.....	6
1.2 Основні топологічні поняття.....	9
1.3 Закони електричних кіл в матричній формі.....	13
1.4 Узагальнене рівняння стану в матричній формі.....	16
1.5 Вузлове рівняння стану в матричній формі.....	17
1.6 Контурне рівняння стану в матричній формі.....	21
1.7 Розрахунок електричних мереж в режимі заданої потужності.....	24
1.8 Розрахунок втрат потужності.....	29
1.9 Прямі методи розв'язування рівнянь стану електричних мереж.....	36
1.10 Ітераційні методи розв'язування рівнянь стану електричних мереж.....	38
2 ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ЙМОВІРНОСТЕЙ І МАТЕМАТИЧНОЇ СТАТИСТИКИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ.....	50
2.1 Основні поняття теорії ймовірностей.....	50
2.2 Ймовірнісні моделі надійності електричних мереж.....	52
2.3 Методи мінімальних шляхів та перерізів.....	55
2.4 Моделі розподілу часу безвідмовної роботи.....	61
2.5 Аналіз надійності електричних мереж напругою 10-35 кВ.....	64
2.6 Ймовірнісні моделі електричних навантажень.....	66
2.7 Статистичний аналіз електричних навантажень.....	72
2.8 Лінійні регресійні моделі.....	79
3 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ.....	87
3.1 Математичні моделі перехідних режимів.....	87
3.2 Чисельні методи розв'язування диференціальних рівнянь.....	92
3.3 Приклади моделювання перехідних режимів.....	101
3.4 Застосування операторного методу.....	106
3.5 Моделювання систем автоматичного керування.....	109
3.6 Аналіз статичної стійкості систем.....	113
ЛІТЕРАТУРА.....	124

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АД	– асинхронний двигун
ВП	– виконавчий пристрій
ЕП	– електроприймач
ЕПС	– електропостачальна система (система електропостачання)
ЕРС	– електрорушійна сила
КЗ	– коротке замикання
КРП	– компенсація реактивної потужності
Л	– лінія електропередачі (на схемі)
ЛЕП	– лінія електропередачі
МНК	– метод найменших квадратів
ОК	– об'єкт керування
ПС	– підстанція
П	– пропорційний (регулятор)
ПІ	– пропорційно-інтегрувальний (регулятор)
ПІД	– пропорційно-інтегрувально-диференціальний (регулятор)
Р	– регулятор (на схемі)
САК	– система автоматичного керування
СД	– синхронний двигун
Т	– трансформатор (силовий)
УКЕ	– установка контактного електрозварювання

ВСТУП

Практикум розроблено згідно з програмою дисципліни «Математичні задачі електроенергетики» для спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Перший розділ присвячено методам аналізу усталених симетричних режимів електричних мереж. Коротко розглянуто питання подання електричної мережі заступними схемами та у вигляді графа. Сформовано матричні рівняння стану для аналізу усталених режимів методами рівнянь Кірхгофа, вузлових напруг та контурних струмів. Розглянуто особливості розрахунку електричних мереж з використанням вузлових рівнянь у формі балансу струмів та балансу потужностей. Наведено методи та алгоритми прямих та ітераційних розрахунків усталених режимів електричних мереж.

В другому розділі розглянуто застосування теорії ймовірностей для побудови моделей аналізу надійності. Подано основи теорії ймовірностей, на основі яких сформовано правила аналізу надійності для послідовного та паралельного з'єднання елементів. Значну увагу приділено розрахунку надійності замкнених мереж методами мінімальних шляхів та перерізів, а також методом базисних перерізів. Розглянуто експоненціальну модель розподілу часу безвідмовної роботи, а також модель Вейбулла–Гнеденко. Наведено приклад розрахунку часу безвідмовної роботи та недовідпущення електроенергії розподільних мереж напругою 10–35 кВ. Розглянуто принципи формування електричних навантажень з використанням біноміального закону розподілу та закону Пуассона. Значну увагу приділено методам статистичної обробки експериментальних даних, зокрема, оціненню математичного сподівання та середньоквадратичного відхилення, перевірці гіпотез щодо законів розподілу електричних навантажень. Розглянуто питання побудови регресійних моделей електроспоживання.

Третій розділ присвячено методам аналізу перехідних режимів. Проаналізовано чисельні явні та неявні одно- та багатокрокові методи розв'язування диференціальних рівнянь. Виконано розрахунки перехідних процесів лінійних та нелінійних електричних кіл. Виконано розрахунки перехідного процесу пуску асинхронного двигуна. Розглянуто моделі систем автоматичного керування. Проведено розрахунки статичної стійкості систем автоматичного керування з використанням алгебраїчних та частотних критеріїв. Розглянуто застосування логарифмічних частотних характеристик для аналізу стійкості систем. Проаналізовано стійкість нелінійної системи другим прямим методом Ляпунова.

ЛІТЕРАТУРА

1. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики / Под ред. В. А. Веникова. М. : Высшая школа, 1981. 288 с.
2. Перхач В. С. Математичні задачі електроенергетики. Львів : Вища школа. Вид-во при Львів. ун-ті, 1982. 380 с.
3. Кириленко О. В., Сегеда М. С., Буткевич О. Ф., Мазур Т. А. Математичне моделювання в електроенергетиці : підручник. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. 608 с.
4. Бурбело М. Й. Математичні задачі електроенергетики. Математичне моделювання електропостачальних систем. Вінниця : ВНТУ, 2016. 185 с.
5. Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем ; под ред. Л. А. Жукова. М. : Энергия, 1979. 456 с.
6. Войнаровський А. Ж., Клименко О. М. Форма автоматизованого введення даних // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2012, № 1. С. 146–150.
7. Охорзин В. А. Прикладная математика в системе MATHCAD. Санкт-Петербург : Изд-во «Лань», 2008. 352 с.
8. Крылов В. И., Бобков В. В., Монастырный П. И. Вычислительные методы : в 2-х томах. М. : Наука, 1976. Т. 1. 304 с., Т. 2. 310 с.
9. Электрические системы. Электрические сети / В. А. Веников и др. ; под ред. В. А. Веникова и В. А. Строева. М. : Высшая школа, 1998. 511 с.
10. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей : учебник. М. : Наука, 1988. 448 с.
11. Єжов С. М. Теорія ймовірностей, математична статистика і випадкові процеси : навчальний посібник. К. : ВПЦ Київський університет, 2001. 140 с.
12. Казанський С. В., Матеєнко Ю. П., Сердюк Б. М. Надійність електроенергетичних систем. К. : НТУ «КПІ», 2011. 216 с.
13. Фокин Ю. А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения. М. : Энергоатомиздат, 1985. 240 с.
14. Гук Ю. Б., Синенко М. М., Тремясов В. А. Расчет надежности схем электроснабжения. Л. : Энергоатомиздат, 1990. 216 с.
15. Обоскалов В. П. Структурная надежность электроэнергетических систем. Екатеринбург : УрФУ, 2012. 194 с.
16. Сеньо П. С. Теорія ймовірностей та математична статистика. Киев : Знання, 2007. 556 с.
17. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. М. : Высшая школа, 2001. 327 с.
18. Хайрер Э. Нёрсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. М. : Мир, 1990. 512 с.

19. Хайрер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. М. : Мир, 1999. 685 с.

20. Демирчян К. С., Бутырин П. А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. М. : Высшая школа, 1988. 335 с.

21. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М. : Наука, 1989. 304 с.

22. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування. К. : Либідь, 1997. 544 с.

23. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / Пер. с англ. Б. И. Копылова. М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с.

Навчальне видання

**Михайло Йосипович Бурбело,
Світлана Володимирівна Бевз,
Олександр Миколайович Кравець**

МАТЕМАТИЧНІ ЗАДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ ПРАКТИКУМ

Рукопис оформив *М. Бурбело*

Редактор *Т. Старічек*

Оригінал-макет виготовила *О. Кушнір*

Підписано до друку 16.08.2021 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 7,25.
Наклад 50 (1-й запуск 1–21) пр. Зам. № 2021-082.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
інформаційний редакційно-видавничий центр.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua;
E-mail: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.