

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ І МЕРЕЖІ
ЧАСТИНА II

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2021

УДК 621.311(075.8)

E50

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 16 від 25.06.2021 р.)

Автори:

Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський

Рецензенти:

В. В. Черкашина, доктор технічних наук, доцент

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

С. В. Матвієнко, кандидат технічних наук

Електричні системи і мережі. Частина 2 : навчальний посібник /
E50 Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський ;
за ред. П. Д. Лежнюка. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 159 с.

ISBN 978-966-641-875-6

У навчальному посібнику розглянуто загальні відомості про електричні системи та мережі, особливості їх функціонування та характеристики і параметри електричних систем та мереж; розглянуті питання в рукописі сприяють вивченню спеціальних дисциплін студентами. Навчальний посібник розроблено для студентів спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної та заочної форм навчання, які вивчають курс «Електричні системи і мережі».

УДК 621.311(075.8)

ISBN 978-966-641-875-6

© ВНТУ, 2021

ЗМІСТ

Передмова	5
1 ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ПЕРЕДАВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	6
1.1 Поняття режиму електроенергетичної системи	6
1.2 Векторна діаграма лінії електропередавання	14
1.3 Падіння та втрата напруги на ділянці електричної системи.....	19
1.4 Розрахунок лінії електропередавання з рівномірно розподіленим навантаженням	28
1.5 Електричний розрахунок радіальної електропередачі, яка живить декілька навантажень	31
1.6 Електричний розрахунок лінії із двостороннім живленням.....	38
1.7 Максимально допустиме навантаження та мінімально допустима напруга електропередачі	42
1.8 Кругові діаграми електропередачі.....	50
1.9 Характеристика потужності електропередачі	56
1.10 Динамічна стійкість електропередачі	63
1.11 Поняття неоднорідності електричних мереж.....	66
1.12 Самозбудження синхронних генераторів	72
1.13 Ферорезонанс в електричних мережах.....	76
<i>Контрольні запитання до 1 розділу</i>	81
2 ОСНОВИ ТЕОРІЇ МОДЕЛЮВАННЯ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ	86
2.1 Загальна характеристика задач моделювання усталених режимів електроенергетичних систем.....	86
2.2 Розрахункові схеми електроенергетичних систем.....	95
2.3 Еквівалентне перетворення розрахункових схем електричних систем.....	101
2.3.1 Еквівалентне заміщення струмів витоку та втрат потужностей додатковими фіктивними навантаженнями	103
2.3.2 Еквівалентне заміщення перерізів ділянок електричної мережі	103
2.3.3 Еквівалентне перетворення послідовно увімкнених ділянок розрахункових схем	104
2.3.4 Еквівалентне перетворення паралельно увімкнених ділянок розрахункових схем	105
2.3.5 Заміщення декількох джерел живлення одним еквівалентним	107

2.3.6 Еквівалентне перетворення трикутника опорів в зірку та зірки в трикутник.....	108
2.3.7 Перенесення електричних навантажень у суміжні пункти розрахункової схеми електричної системи	112
2.3.8 Еквівалентне заміщення електропередач фіктивними навантаженнями	115
2.4 Опорні за напругою та балансуєчі пункти розрахункових схем	116
2.5 Аналітичне подання розрахункових схем електричних систем в матричній формі	119
2.6 Формування розрахункових моделей усталених режимів електричних систем в матричній формі.....	126
2.7 Ітераційні методи моделювання режимів найпростішої електричної системи	137
2.8 Поняття про інженерну точність моделювання усталених режимів електроенергетичних систем та вибір початкових наближень невідомих параметрів	144
<i>Контрольні запитання до 2 розділу</i>	151
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	157

Передмова

Зміст навчального посібника відповідає частині програми курсу «Електричні системи і мережі», затвердженої для спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Рукопис призначається для студентів та аспірантів всіх форм навчання, які мають достатню підготовку в обсязі загального курсу і прагнуть отримати глибокі професійні знання.

Дисципліна «Електричні системи і мережі» є однією з базових дисциплін, в якій закладається фундамент спеціальної підготовки інженера-електроенергетика. Метою вивчення дисципліни є формування знань в теорії розрахунків та аналізу режимів електричних систем і мереж, забезпечення при їх проектуванні та експлуатації економічності, надійності, а також якості електричної енергії.

Основні задачі дисципліни, викладені в навчальному посібнику, – навчити розраховувати падіння та втрата напруги на ділянці електричної системи, проводити розрахунок лінії електропередавання з рівномірно розподіленим навантаженням, радіальної електропередачі, яка живить декілька навантажень, а також лінії із двостороннім живленням. Крім того, навчити визначати максимально допустиме навантаження та мінімально допустима напруга електропередачі, складати розрахункові схеми електроенергетичних систем, опорні за напругою та балануючі пункти розрахункові схеми.

Зміст курсу базується на знаннях вищої математики, теоретичних основ електротехніки, прикладної механіки, програмування, електричних машин, математичних задач електроенергетики.

У навчальному посібнику систематизовано та використано теоретико-методологічні результати досліджень вітчизняних та зарубіжних шкіл, розосереджені в різних спеціальних виданнях і журнальних статтях.

1 ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ПЕРЕДАВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

1.1 Поняття режиму електроенергетичної системи

Режимом електроенергетичної системи називають її стан, пов'язаний із процесами вироблення, передавання, розподілу та споживання електричної енергії. Кожний режим енергосистеми характеризується сукупністю параметрів – частоти змінного струму, струмів або потужностей джерел та споживачів електричної енергії, напруг у вузлах робочої схеми, струморозподілу та потокорозподілу потужностей по ділянках схеми, втрат потужностей в устаткуванні електричних мереж та сумарних втрат потужності в енергосистемі. Такі характеристики називають параметрами режиму електроенергетичної системи.

Режимні параметри електроенергетичної системи поділяють на **локальні** та **загальносистемні**. До загальносистемних параметрів відносять частоту змінного струму та сумарні втрати потужності. Всі інші параметри є локальними, оскільки характеризують режими окремих елементів електричної системи. Разом з тим, всі режимні параметри тісно пов'язані між собою єдиним та одночасним процесом виробництва, передавання, розподілу та споживання електричної енергії у відповідності із загальнофізичним законом збереження енергії.

Всі режими електроенергетичних систем поділяють на **усталені** та **перехідні**. **Усталені режими** системи характеризуються незмінністю їх параметрів протягом певного тривалого проміжку часу. Очевидно, що забезпечити усталені режими сучасних електроенергетичних систем практично неможливо. Дійсно, через велику кількість приймачів електричної енергії, під'єднаних до електричних мереж, в електричній системі постійно відбуваються комутаційні перемикання, пов'язані із увімкненням одних приймачів та вимкненням інших. Такі комутації мають стохастичний характер та призводять до зміни технологічних режимів окремих споживачів електричної енергії та породжує перманентні перехідні режими енергосистеми.

Перехідні режими електроенергетичних систем характеризуються зміною у часі їх параметрів через комутаційні перемикання, аварійні збурення тощо. Загалом розрізняють три типи перехідних режимів, які мають місце в електроенергетичних системах:

- 1) електромагнітні перехідні режими;
- 2) електромеханічні перехідні режими;
- 3) тривалі перехідні режими.

Електромагнітні перехідні режими пов'язані із процесами обміну енергією між реактивними елементами робочих схем електричних мереж –

поздовжніми індуктивностями ліній електропередач, індуктивностями обмоток силових трансформаторів та реакторів, зарядними ємностями ліній, ємностями компенсаційних конденсаторів тощо. Такі перехідні режими виникають внаслідок комутаційних перемикань робочих схем, є короткотривалими, швидкими та характеризуються сталими часу порядку $10^{-2} \dots 10^{-3}$ с.

Електромеханічні перехідні процеси пов'язані із коливаннями роторів електричних машин, зокрема синхронних генераторів, викликані раптовим накиданням навантаження на електричну машину. Такі перехідні режими триваліші за електромагнітні, їх стала часу має порядок $10^{-1} \dots 1$ с.

Тривалі перехідні режими відбуваються в електроенергетичних системах внаслідок великих збурень та пов'язані із процесами у теплофікаційному та гідравлічному обладнанні електричних станцій. Справа в тому, що для суттєвого збільшення навантаження теплової електричної станції після великого системного збурення необхідно виробити більшу кількість пару, що потребує, у свою чергу, збільшення кількості подачі палива у топку котла. На гідравлічних електричних станціях різке збільшення навантаження обмежене гідравлічним ударом на лопатки гідротурбін. Все це визначає певний час, необхідний для зміни навантаження електричної станції та може розглядатися як перехідний режим енергосистеми. Такі перехідні режими є найбільш тривалими (саме тому вони мають таку назву) та характеризуються сталими часу порядку $10 \dots 10^2$ с.

Всі розглянуті перехідні режими в електроенергетичній системі відбуваються одночасно, накладаються один на інший, визначаючи динаміку флуктуації системи в просторі станів у часі.

Разом з тим, у кожний момент будь-якого перехідного режиму в електроенергетичній системі має виконуватися закон збереження енергії, що дозволяє розглядати **квазіусталені режими** – режими, параметри яких залишаються незмінними протягом нескінченно малого проміжку часу. Це дозволяє представити рух електричної системи в просторі станів в перехідному режимі послідовністю квазіусталених режимів.

Режими трифазних електричних систем змінного струму поділяють на симетричні та несиметричні, синусоїдні та несинусоїдні.

Симетричним режимом трифазної електричної системи називають такий, в якому фазні параметри режиму збігаються за абсолютною величиною та відрізняються за фазою на кут $\pm 120^\circ$. Для забезпечення симетрії режимів електроенергетичних систем необхідно забезпечити симетрію параметрів робочої схеми електричної мережі, симетрію електричних навантажень та симетрію фазних ЕРС на шинах генераторів. Очевидно, що суворе дотримання всіх цих вимог практично неможливе, тому майже всі режими електроенергетичних систем є **несиметричними**.

Відповідно до чинних нормативів нормально та гранично допустимі значення коефіцієнтів несиметрії напруги за зворотною та нульовою послідовностями дорівнюють 2% та 4% відповідно. Це означає, що у більшості практичних випадків несиметрія є незначною і нею можна знехтувати. Однак, можливі ситуації, коли несиметрія виявляється значною і її обов'язково слід враховувати під час аналізу режимів електроенергетичних систем. Розрізняють три основні причини виникнення несиметричних режимів електроенергетичних систем:

1) несиметричне навантаження фаз, зумовлене пофазною розбіжністю ЕРС генераторів, коефіцієнтів трансформації трансформаторів і автотрансформаторів, нерівномірним розподілом навантажень за фазами тощо. Така несиметрія має стохастичний характер і в більшості практичних випадків зумовлює незначні відхилення від нормального режиму енергосистеми;

2) розбіжність параметрів окремих фаз електричних мереж, зумовлена, головним чином, геометричною несиметрією розташування фазних проводів у просторі. Наприклад, за розташування проводів лінії електропередачі на опорах у вершинах рівнобічного трикутника, їх взаємне розташування є симетричним, проте відносно землі проводи виявляються закріпленими на різній висоті. Це спричинить несиметрію ємнісних поперечних провідностей лінії. За горизонтального розміщення проводів вони перебувають на однаковій висоті відносно землі, але їх взаємне розміщення несиметричне. Це призводить до появи розбіжності між взаємними індуктивностями і ємністю між проводами різних фаз електропередачі;

3) неповнофазні режими електричних мереж, зумовлені короткочасним вимкненням однієї або двох фаз лінії у разі коротких замикань та інших аварійних збурень, або тривалим вимкненням під час пофазного ремонту лінії або іншого устаткування.

Поділення режимів електроенергетичних систем на *синусоїдні* та *несинусоїдні* визначається формою кривої змінного струму. Сучасні електроенергетичні системи змінного струму в загальному випадку характеризуються несинусоїдними напругами та струмами. Це пояснюється низкою факторів, зокрема, насиченістю електричних систем вентильними перетворювачами, конструктивними особливостями синхронних генераторів тощо. Зазвичай, несинусоїдність кривих струму в електроенергетичних системах є незначною і нею можна знехтувати. Проте, можливі ситуації, коли несинусоїдність режиму стає суттєвою і її обов'язково необхідно враховувати під час аналізу режимів електроенергетичних систем.

В подальшому під режимом електроенергетичної системи будемо розуміти симетричний синусоїдний режим трифазної системи змінного струму. Фактично такий режим є режимом прямої послідовності основної

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Баркан Я. Д. Эксплуатация электрических систем : учеб. пособие для электроэнергет. спец. вузов / Баркан Я. Д. — М. : Высш. шк., 1990. — 304 с.
2. Брацлавский С. Х. Специальные расчеты электропередач сверхвысокого напряжения / Барцлавский С. Х., Гершенгорн А. И., Лосев С. Б. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 312 с.
3. Веников В. А. Дальние электропередачи. Специальные вопросы / Веников В. А. — М.-Л. : ГЭИ, 1960. — 312 с.
4. Идельчик В. И. Электрические системы и сети : учеб. для вузов / Идельчик В. И. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.
5. Крюков К. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи / К. П. Крюков, Б. П. Новгородцев. — Л. : Энергия, 1970. — 392 с.
6. Маркович И. М. Режимы энергетических систем / Маркович И. М. — М. : Энергия, 1969. — 352 с.
7. Мельник В. П. Математичні моделі електроенергетичних систем: навч. посіб. / Мельник В. П. — К. : ІСДО, 1993. — 336 с.
8. Мельников Н. А. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330—500 кВ / Мельников Н. А., Рокотян С. С., Шеренцис А. Н. ; под общ. ред. С. С. Рокотяна. — М. : Энергия, 1974. — 472 с.
9. Правила устройства электроустановок. Минэнерго СССР. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 640 с.
10. Сегеда М. С. Математичне моделювання в електроенергетиці: навч. посібник / Середа М. С. — Л. : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2002. — 300 с.
11. Сенди К. Современные методы анализа электрических систем / Сенди К. — М. : Энергия, 1971. — 360 с.
12. Справочник по проектированию линий электропередачи / Под ред. М. А. Реута и С. С. Рокотяна. — М. : Энергия, 1980. — 296 с.
13. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д. Л. Файбисовича. — М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2005. — 320 с.
14. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 352 с.
15. Справочник по строительству подстанций 110-750 кВ / Под ред. М. А. Реута. — М. : Энергоиздат, 1982. — 272 с.
16. Сулейманов В. Н. Расчет и регулирование установившихся режимов работы электрических сетей энергосистем: учеб. пособие / Сулейманов В. Н. — К. : НМК ВО, 1992. — 216 с.

17. Теоретические основы электротехники / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. — СПб. : Питер, 2006. — Т. 2. — 576 с.
18. Федин В. Т. Многокритериальная оценка экологических характеристик воздушных линий электропередачи / В. Т. Федин, А. В. Корольков. — Минск : УП «Технопринт», 2002. — 104 с.
19. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей (специальные вопросы) / Холмский В. Г. — М. : Высш. шк., 1975. — 280 с.
20. Чехов В. И. Экологические аспекты передачи электроэнергии / Чехов В. И. — М. : Изд-во МЭИ, 1991. — 44 с.
21. Электрические системы. Режимы работы электрических систем / Под ред. В. А. Веникова. — М. : Высш шк., 1975. — 344 с.
22. Электрические системы. Т. 2. Электрические сети / Под ред. В. А. Веникова. — М. : Высш. шк., 1971. — 440 с.
23. Электрические системы. Т. 3. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения / Под ред. В. А. Веникова. — М. : Высш. шк., 1972. — 368 с.
24. Лыкин А. В. электрические системы и сети : учеб. пособие / Лыкин А. В. — М. : Университетская книга; Логос, 2008. — 254 с.
25. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи : підручник / Сегеда М. С. — Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. — 488 с.
26. Сулейманов В. Н. Электрические сети и системы : учеб. / В. Н. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. — К. : НТУУ «КПІ», 2007. — 504 с.
27. Электрические системы. Т. 2. Электрические сети : учебное пособие для электроэнергетич. вузов / В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков, Л. А. Солдаткина / Под ред. В. А. Веникова. — М. : Высшая школа, 1971. — 440 с.
28. Электрические системы и сети : учеб. / Н. В. Буслова, В. Н. Винославский, Г. И. Денисенко, В. С. Перхач ; под ред. Г. И. Денисенка. — К. : Вища шк., 1986. — 584 с.
29. Электрические системы. Электрические сети : учеб. для электроэнерг. спец. вузов / В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков и др. ; под ред. В. А. Веникова, В. А. Строева. — М. : Высш. Шк., 1998. — 511 с.
30. Блок В. М. Электрические сети и системы : учебное пособие для электроэнергет. спец. вузов / Блок В. М. — М. : Высш. шк., 1986. — 430 с.

Навчальне видання

**Юлія Володимирівна Малогулко
Олександр Борисович Бурикін
Теймураз Луарсабович Кацадзе
Володимир Васильович Нетребський**

ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ І МЕРЕЖІ.

Частина II

Навчальний посібник

Рукопис оформлено *Ю. Малогулко*

Редактор *О. Ткачук*

Оригінал-макет виготовив *Г. Багдасар'ян*

Підписано до друку 2.11.2021 р.
Формат 29,7×42 ¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк.
Наклад 50 (1-й запуск 1-21) пр. Зам. № 2021-113.

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;
Email: irvc.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.