

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук

**СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.
ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ТА ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ**

Вінниця
ВНТУ
2012

УДК 621.311(075)
ББК 31.29-5я7
Б 91

Рецензенти:

В. В. Зорін, доктор технічних наук, професор
О. Г. Гриб, доктор технічних наук, професор
В. С. Костишин, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальностями «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент». Лист № 1/11-4739 від 09.06.11.

Бурбело, М. Й.

Б91 Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків : навчальний посібник / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 204 с.

ISBN 978-966-641-450-5

В навчальному посібнику висвітлені теоретичні та практичні аспекти побудови та функціонування систем електропостачання, що стосуються методів розрахунку електричних навантажень, вибору і розміщення підстанцій, розрахунку внутрішньозаводських та цехових мереж. Посібник розроблений у відповідності з програмою дисципліни «Системи електропостачання» і може бути використаний для студентів електротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів під час проведення лекційних і практичних занять, курсового і дипломного проектування.

УДК 621.311(075)
ББК 31.29-5я7

ISBN 978-966-641-450-5

© М. Бурбело, О. Бірюков, Л. Мельничук, 2012

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
1 ЕЛЕКТРИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ	9
1.1 Класифікація електроприймачів.....	9
1.2 Графіки навантажень	10
1.3 Фізичні величини, що характеризують навантаження	12
1.4 Показники графіків електричних навантажень.....	13
1.5 Розрахункове навантаження.....	15
1.6 Методи розрахунку навантажень	18
1.7 Розрахунок електричних навантажень промислових підприємств.....	25
1.8 Розрахунок навантажень житлових будинків	34
2 РОЗРАХУНОК ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	40
2.1 Розрахунок втрат потужності в лініях електропередачі та трансформаторах	40
2.2 Розрахунок навантажувальних втрат електроенергії в мережах 10 (6) кВ.....	41
2.3 Визначення еквівалентного опору електричної мережі за втратами електроенергії	46
2.4 Визначення втрат електроенергії в мережах 0,38 кВ	47
2.5 Визначення та розподілення втрат потужності між споживачами.....	49
3 НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНИХ СИСТЕМ.....	55
3.1 Показники надійності елементів та електропостачальних систем	55
3.2 Аналітичний метод розрахунку надійності ЕПС	57
3.3 Оцінювання збитків від перерв електропостачання.....	59
4 ЕКОНОМІЧНІСТЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНИХ СИСТЕМ	62
4.1 Техніко-економічні показники порівняльної ефективності	62
4.2 Техніко-економічний аналіз електропостачальних систем	64
4.3 Визначення економічної густини струму та вибір місць для розміщення понижувальних підстанцій	69
5 ВИБІР ТА РОЗМІЩЕННЯ ПІДСТАНЦІЙ.....	71
5.1 Навантажувальна здатність трансформаторів.....	72
5.2 Вибір трансформаторів ГПП.....	76
5.3 Вибір трансформаторів цехових ТП	79
5.4 Вибір місць для розміщення підстанцій	83
6 ЗОВНІШНЄ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	86
6.1 Схеми зовнішнього електропостачання підприємств	86
6.2 Схеми електропостачання міст	88
6.3 Схеми електропостачання сільськогосподарських районів	90
7 ВНУТРІШНЄ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ. РОЗПОДІЛЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НАПРУГОЮ 10 (6) КВ.....	92
7.1 Схеми заводських мереж.....	92

7.2 Вибір кабелів	95
7.3 Розрахунок струмів КЗ в мережах напругою вище 1000 В	100
7.4 Вибір високовольтних вимикачів.....	108
7.5 Комплектні розподільні пристрої.....	110
7.6 Комплектні трансформаторні підстанції	115
8 ВНУТРІШНЄ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ. РОЗПОДІЛЕННЯ	
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НАПРУГОЮ ДО 1000 В.....	122
8.1 Схеми та конструктивне виконання цехових мереж.....	122
8.2 Режими нейтралі.....	124
8.3 Вибір провідників цехових мереж.....	127
8.4 Вибір комутаційно-захисної апаратури	130
8.5 Перевірка захищеності від перевантажень, чутливості та селективності захисту цехових мереж.....	131
8.6 Розрахунок струмів КЗ в мережах напругою до 1000 В	135
9 КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	
9.1 Методика оплати за перетікання реактивної електроенергії.....	144
9.2 Види пристроїв КРП та їх вибір	148
9.3 Балансова задача КРП.....	153
9.4 Економічна задача КРП	155
9.5 Визначення економічного еквівалента реактивної потужності	158
10 ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	
10.1 Показники якості електричної енергії.....	163
10.2 Розрахунок усталених відхилень напруги і вибір відгалужень трансформаторів ТП.....	167
10.3 Розрахунок та заходи зменшення несинусоїдності напруги	170
10.4 Розрахунок та заходи зменшення несиметрії напруги і навантажень	174
10.5 Розрахунок та заходи зменшення провалів напруги	179
ЛІТЕРАТУРА.....	186
ДОДАТОК А Базові укрупнені показники вартості будівництва електричних мереж	188
ДОДАТОК Б Опори трансформаторів і струмоведучих елементів	190
ДОДАТОК В Допустимі значення струмів провідників.....	192
ДОДАТОК Г Технічні дані автоматичних вимикачів напругою до 1000 В	194
ДОДАТОК Д Технічні дані РПНН ТП і РП.....	198
Предметний покажчик.....	203

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АВР	–	автоматичне ввімкнення резерву
АД	–	асинхронний двигун
АПВ	–	автоматичне повторне ввімкнення
ГПП	–	головна понижувальна підстанція
ДПЕ	–	договір на постачання електроенергії
ЗРП	–	закритий розподільний пристрій 10 (6) кВ
ЕД	–	електричний двигун
ЕЕС	–	електроенергетична система
ЕН	–	електричні навантаження
ЕО	–	енергопостачальна організація
ЕП	–	електроприймач
ЕПС	–	електропостачальна система (система електропостачання)
КЗ	–	коротке замикання (електроустановки, трансформатора,...)
КЛ	–	кабельна лінія електропередачі
КРП	–	компенсація реактивної потужності
КРУ	–	комплектний розподільний пристрій (комірка)
КСО	–	камера одностороннього обслуговування
КТП	–	комплектна розподільна підстанція
КУ	–	компенсувальні установки
НХ	–	неробочий хід (трансформатора)
ПВН	–	пристрій високої напруги ввідний (10 кВ) ТП
ПГВ	–	підстанція глибокого вводу
ПЛ	–	повітряна лінія електропередачі
ПС	–	підстанція
ПТЕ	–	правила технічної експлуатації
ПУЕ	–	правила улаштування електроустановок
ПЯЕЕ	–	показники якості електричної енергії
РП	–	розподільний пункт (пристрій) 10 (6) кВ або 0,38 кВ
РПН	–	регулювання під навантаженням
РПНН	–	розподільний пристрій низької напруги (0,38 кВ) ТП
СД	–	синхронний двигун
СТК	–	статичні тиристорні компенсатори
ТП	–	трансформаторна підстанція
УД	–	упорядкована діаграма
ЦЕН	–	центр електричних навантажень
ШМ	–	шинопровід магістральний
ШР	–	шинопровід розподільний
ЩСУ	–	щит станцій управління
ЯЕЕ	–	якість електричної енергії

ВСТУП

Навчальний посібник з дисципліни «Системи електропостачання» призначений для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальністю “Електротехніка та електротехнології”.

Електропостачальною системою (ЕПС) називають сукупність електротехнічних установок, призначених для забезпечення споживачів електроенергією, об’єднаних технічно та організаційно спільністю процесів її передавання та розподілення.

Споживач електроенергії – юридична або фізична особа, яка споживає електричну енергію з метою організації технологічного процесу виробництва та задоволення життєво необхідних потреб. Споживачів ділять на промислові та непромислові підприємства, установи комунального господарства, міське та сільське населення.

Мета дисципліни – оволодіти основними принципами розрахунку та оптимізації ЕПС промислових підприємств, міст і сільського господарства.

Задачі:

- ознайомитись з сучасними методами розрахунку електричних навантажень (ЕН);
- ознайомитись з улаштуванням електричних установок напругою до і вище 1000 В;
- засвоїти проектні методики розрахунку зовнішнього та внутрішнього електропостачання;
- ознайомитись з оптимізаційними розрахунками прийняття рішень в ЕПС;
- вивчити основні положення розрахунку компенсації реактивної потужності;
- ознайомитись з основними вимогами і засобами забезпечення якості електроенергії.

Викладання курсу базується на дисциплінах: «Теоретичні основи електротехніки», «Математичні задачі електроенергетики», «Оптимізаційні задачі електроенергетики», «Електричні мережі», «Електрична частина станцій і підстанцій», «Перехідні процеси» та забезпечує підготовку до виконання бакалаврської роботи.

Після вивчення дисципліни студент повинен знати: типові схеми ЕПС, методи розрахунку ЕН, умови вибору основних елементів ЕПС.

На основі здобутих знань студент повинен уміти: вибирати переріз струмоведучих провідників, їх тип і спосіб прокладання, комутаційно-захисні апарати, оцінити допустимість навантажень силових трансформаторів, ліній електропередачі.

В посібнику наведено короткі теоретичні відомості та розглянуто приклади практичних розрахунків ЕПС. Посібник містить десять розділів. В першому розділі розглянуто класифікацію електроприймачів (ЕП), графіки ЕН і їх показники. Значну увагу приділено поняттям

розрахункового та максимального навантажень як одним із фундаментальних понять ЕПС. Проаналізовано методи та наведено приклади розрахунку навантажень.

Другий розділ присвячено аналізу втрат електроенергії. Наведено вирази для розрахунку втрат потужності та електроенергії в розподільних мережах, що відповідають чинній в Україні Методиці, а також результати досліджень, виконаних на кафедрі електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту (ЕСЕЕМ) ВНТУ щодо розподілу втрат електроенергії між споживачами.

Третій розділ присвячено аналізу надійності ЕПС. Тут наведено показники надійності елементів. Значну увагу приділено аналітичному методу розрахунку надійності та оцінці збитків від перерв електропостачання.

В четвертому розділі проаналізовано показники економічної ефективності ЕПС. Наведено приклад техніко-економічного порівняння варіантів схем електропостачання. Даються означення економічної густини струму, центра навантажень та центра електричної мережі.

П'ятий розділ „Вибір та розміщення підстанцій” містить питання аналізу навантажувальної здатності трансформаторів, вибору трансформаторів головної понижувальної підстанції (ГПП), а також цехових трансформаторних підстанцій (ТП). Наведено приклад вибору цехових підстанцій та вибору місць для розміщення понижувальних і розподільних підстанцій.

В шостому та сьомому розділах даються рекомендації стосовно вибору схем зовнішнього та внутрішньозаводського електропостачання. Виконуються розрахунки внутрішньозаводських мереж: вибір кабелів і вимикачів напругою 10 (6) кВ, розрахунок струмів коротких замикань (КЗ). Описані різні типи комплектних розподільних пристроїв (КРП) і трансформаторних підстанцій (ТП).

Розподілення електроенергії напругою до 1000 В – тема восьмого розділу. Тут наведено схеми та конструктивне виконання цехових мереж. Розглянуто режими нейтралі в мережах напругою до 1000 В. Виконуються розрахунки цехових мереж: вибір провідників, розрахунок втрат напруги, вибір комутаційно-захисної апаратури, перевірка комутаційної здатності, чутливості та селективності захисту, розрахунок струмів КЗ.

У дев'ятому розділі розглядаються питання компенсації реактивної потужності (КРП). Подано методику оплати за перетікання реактивної електроенергії. Розглянуто питання вибору і розміщення компенсуювальних установок (КУ), а також балансову та економічну задачі КРП. Значну увагу приділено новому підходу, який сформовано на кафедрі ЕСЕЕМ ВНТУ, щодо визначення економічного еквівалента реактивної потужності.

Десятий розділ присвячено якості електричної енергії (ЯЕЕ). Наведено показники якості електричної енергії (ПЯЕЕ) та вимоги до них згідно з ГОСТ 13109-97. Наведено приклади розрахунку рівнів напруги й

вибору відгалужень трансформаторів, несиметрії напруг, спотворення синусоїдності кривої напруги, коливань і провалів напруги.

Навчальний посібник може бути використаний під час проведення практичних занять, виконання курсового проекту та бакалаврської роботи.

Рекомендований перелік тем практичних занять, який використовується на кафедрі ЕСЕМ ВНТУ:

1. Графіки і показники ЕН.
2. Розрахунок ЕН методом упорядкованих діаграм.
3. Розрахунок ЕН підприємства методом коефіцієнта попиту.
4. Розрахунок втрат електричної енергії.
5. Розрахунок надійності ЕПС.
6. Оцінка навантажувальної здатності трансформаторів.
7. Вибір та розміщення підстанцій.
8. Порівняння економічності систем зовнішнього електропостачання.
9. Розрахунок заводської мережі
10. Вибір провідників в мережах напругою до 1000 В.
11. Вибір автоматичних вимикачів і запобіжників.
12. Розрахунок струмів трифазного і однофазного КЗ.
13. Розрахунок КРП.
14. Розрахунок рівнів напруги і вибір відпайок трансформаторів.
15. Розрахунок несиметрії напруг.
16. Розрахунок несинусоїдності напруг.
17. Розрахунок провалів напруги.

На кафедрі ЕСЕМ ВНТУ рекомендовано такий зміст курсового проекту:

1. Розрахунок електричних навантажень.
2. Вибір та розміщення підстанцій.
3. Розрахунок розподільних мереж напругою вище 1000 В.
4. Розрахунок розподільних мереж напругою до 1000 В.

Бакалаврська робота містить додатковий розділ з компенсації реактивної потужності, якості електричної енергії чи інший, що відповідає темі бакалаврської роботи.

Автори вдячні рецензентам Владлену Володимировичу Зоріну, Олегу Герасимовичу Грибу, Володимирі Степановичу Костишину, а також Артуру Веніаміновичу Праховнику і Миколі Адамовичу Денисенку за підтримку та слушні зауваження.

1 ЕЛЕКТРИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ

1.1. Класифікація електроприймачів

Електроприймач (ЕП) – пристрій для виконання роботи шляхом перетворення електроенергії в інші види – механічну, світлову, теплову, хімічну. Класифікація ЕП здійснюється за такими основними експлуатаційно-технічними ознаками: за напругою та струмом, режимом роботи, технологічним призначенням, надійністю електропостачання.

За напругою всі ЕП можна поділити на дві групи: до 1000 В і вище 1000 В. За струмом всі ЕП можна розділити на такі види: трифазні та однофазні приймачі, які працюють від мережі змінного струму промислової частоти (50 Гц); приймачі, які працюють за підвищеної чи зниженої частоти, а також приймачі постійного струму.

За режимом роботи приймачі можна віднести до одного з трьох режимів.

Тривалий режим – це такий режим, за якого приймачі працюють з незмінним або малозмінним навантаженням. В цьому режимі перевищення температури окремих частин електричної частини чи апарата не виходить за встановлені межі.

Короткочасний режим – це такий режим, за якого робочий період настільки малий, що окремі частини машини чи апарата не встигають досягнути встановленої температури. Водночас період зупинки машини чи апарата настільки тривалий, що машина встигає охолонути до температури навколишнього середовища.

Повторно-короткочасний режим – це такий режим, за якого робочі періоди чергуються з паузами, а тривалість всього циклу не перевищує 10 хвилин.

За технологічним призначенням ЕП ділять на такі групи: електродвигуни верстатів (тривалий режим із змінним характером навантаження – група А), електродвигуни загальнопромислових механізмів (вентиляторів, насосів, компресорів) (тривалий режим із сталим характером навантаження – група Б), джерела світла, підйомно-транспортні механізми (повторно-короткочасний режим), електротехнологічні установки – зварювальні, електротермічні, електрохімічні тощо.

За надійністю електропостачання споживачі, згідно з ПУЕ, поділяються на три категорії:

- I категорія – споживачі, перерва електропостачання яких пов'язана з загрозою для життя та здоров'я людей, можливістю аварій, виходу з ладу дорогого основного обладнання, порушення нормальної діяльності масової кількості міських чи сільських мешканців. Такі споживачі повинні житися від двох незалежних джерел з автоматичним увімкненням резервного джерела. Перерва в електропостачанні може бути допущена

лише на час автоматичного відновлення живлення. Доцільним є використання технологічного резерву.

Серед споживачів I категорії виділяють особливу групу, неперервна робота яких необхідна для безаварійної зупинки виробництва з метою запобігання загрозі життю чи здоров'ю людей, можливості аварій, виходу з ладу дорогого основного обладнання. Для них повинно бути передбачене третє резервне джерело з автоматичним його ввімкненням.

- II категорія – споживачі, перерва в електропостачанні яких призводить до масового недовипуску продукції, масових простоїв робітників, механізмів і промислового транспорту, порушення нормальної діяльності значної кількості міських чи сільських мешканців. Вони мають житися від двох незалежних джерел, але допускається ручне ввімкнення резервного джерела. Допускається живлення однією повітряною лінією, однією кабельною лінією, виконаною двома кабелями, від одного трансформатора за наявності централізованого складського резерву та можливості відновлення електропостачання протягом однієї доби.

- III категорія – споживачі, які не підпадають під визначення споживачів I та II категорій. Вони можуть житися від одного джерела, однак перерва в електропостачанні не повинна перевищувати однієї доби.

1.2 Графіки навантажень

Електричне навантаження (ЕН) – це узагальнене поняття, яке характеризує і режим споживання, і режим роботи елементів ЕПС. ЕН задається активною (P), реактивною (Q) потужностями, а також повною потужністю (S), струмом (I), коефіцієнтом потужності ($\cos \varphi$), коефіцієнтом реактивної потужності ($\operatorname{tg} \varphi$) [1]. Причому

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi; Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi,$$

де U – лінійна напруга мережі.

Режим роботи споживачів електричної енергії змінюється протягом доби, тижня, року. Змінюється і ЕН всіх елементів передавання електроенергії. Зміну навантажень у часі прийнято зображати у вигляді графіків активних і реактивних навантажень – змінних, добових, місячних та річних. Неперервний добовий графік навантаження (рис. 1.1) відображає всі особливості зміни навантаження, а вибір швидкості запису дозволяє розглядати зміну навантаження протягом заданого інтервалу часу.

Добові графіки навантажень можна побудувати за показами лічильників активної та реактивної енергій (рис. 1.2), що встановлюються на лініях, які відходять від розподільних пристроїв підстанцій промислових підприємств. Для цього фіксують покази лічильників через певний інтервал часу (60 або 30 хвилин). Добові графіки обов'язково будують для двох режимних днів – зимового (близько 22 грудня) і літнього (близько 22 червня).

З річних найбільший інтерес являє графік ЕН за тривалістю (рис. 1.3). Це графік, в якому всі значення ЕН розміщені в порядку їх спадання. Такий графік називають упорядкованою діаграмою (УД). Площа річного графіка за тривалістю дорівнює спожитій за рік електроенергії W . Річний графік будують за добовими графіками режимних днів.

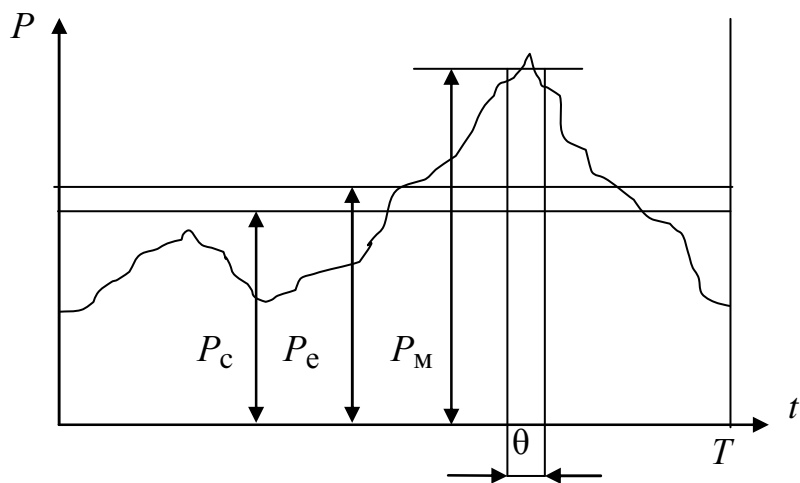


Рисунок 1.1 – Неперервний графік ЕН

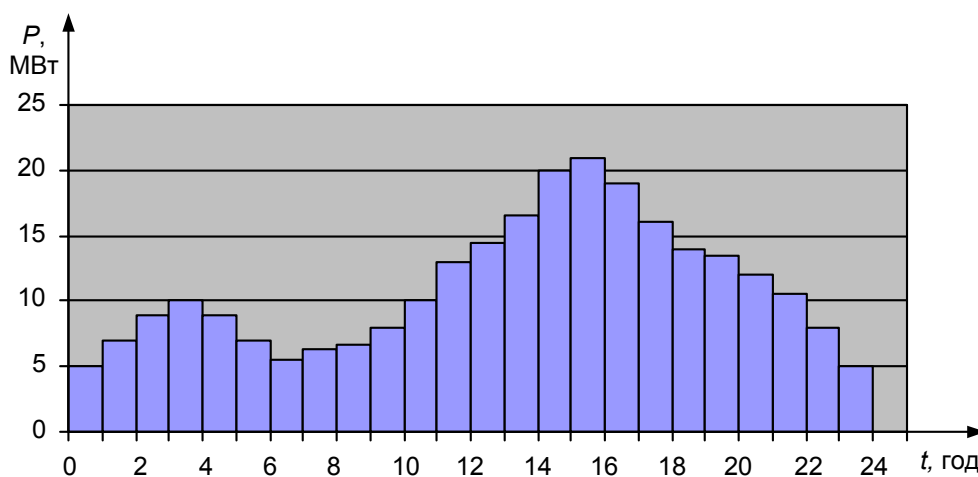


Рисунок 1.2 – Графіки ЕН, що побудовані за показами лічильника

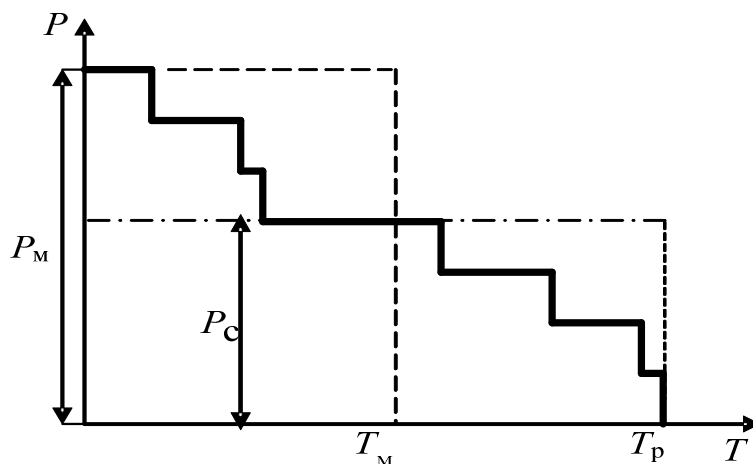


Рисунок 1.3 – Річний графік ЕН за тривалістю

1.3 Фізичні величини, що характеризують навантаження

ЕН характеризують за допомогою середніх, ефективних і максимальних значень активної, реактивної потужностей та струму.

Середнє значення активної потужності можна визначити як відношення спожитої активної електроенергії W_a за розрахунковий період до його тривалості T :

$$P_c = \frac{W_a}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{\sum_{i=1}^m P_i t_i}{\sum_{i=1}^m t_i} = \frac{\sum_{i=1}^m P_i}{m},$$

де m – кількість вимірювань.

Середнє навантаження характеризує споживання електричної енергії. Однак воно не характеризує втрат потужності та електроенергії, які пропорційні квадрату струму. Для визначення втрат електроенергії використовують ефективне (середньоквадратичне) навантаження

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt}; P_e \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m P_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^m t_i}}; P_e \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m P_i^2}{m}}, P_e \geq P_c.$$

Чим більша нерівномірність графіка навантаження, тим більше відношення ефективної до середньої потужностей. Ще одна особливість полягає в тому, що ефективне навантаження залежить від інтервалу дискретизації графіків навантажень θ . Із зменшенням інтервалу дискретизації одного і того ж графіка ЕН значення ефективної потужності збільшується.

Аналогічно розраховують середнє та ефективне значення реактивної потужності.

Середнє та ефективне значення повної потужності визначають за формулами

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2}; S_e = \sqrt{P_e^2 + Q_e^2}.$$

Максимальне навантаження визначають як найбільше з середніх значень навантаження за ковзний вздовж графіка інтервал часу тривалістю $\vartheta=30$ хв.:

$$P_M = \max_t \frac{1}{\vartheta} \int_{t-\vartheta}^t P(t) dt.$$

1.4 Показники графіків електричних навантажень

Показники графіків ЕН поділяються на індивідуальні, групові та річні. Індивідуальні графіки характеризуються перервністю споживання електричної енергії (рис. 1.4).

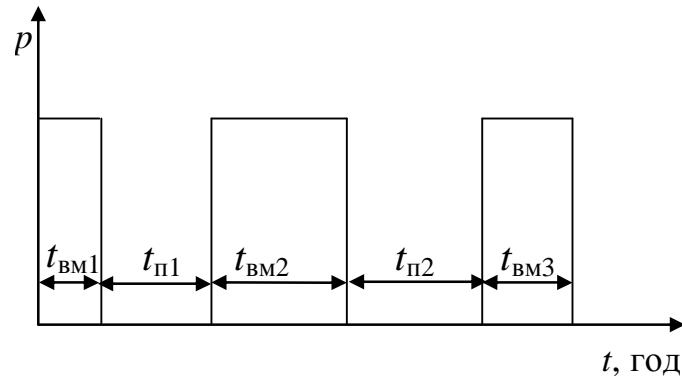


Рисунок 1.4 – Графік активної потужності окремого електроприймача

Показники індивідуальних графіків навантажень:

1) $k_{\text{ВМ}}$ – коефіцієнт ввімкнення – відношення суми інтервалів часу, протягом якого ЕП був ввімкнений, до часу зміни (циклу):

$$k_{\text{ВМ}} = \frac{t_{\text{ВМ}}}{T}, \quad t_{\text{ВМ}} = \sum_i^n t_{\text{ВМ}.i}.$$

2) k_3 – коефіцієнт завантаження – відношення середньої потужності за час, протягом якого ЕП був ввімкнений протягом зміни (циклу), до його номінальної потужності:

$$k_3 = \frac{P_{\text{с.ВМ}}}{P_{\text{Н}}}.$$

3) $k_{\text{В}}$ – коефіцієнт використання – відношення середньої потужності до номінальної потужності ЕП:

$$k_{\text{В}} = \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{Н}}} = k_{\text{ВМ}} \cdot k_3.$$

4) $k_{\text{Ф}}$ – коефіцієнт форми – відношення ефективної потужності до середньої потужності:

$$k_{\text{Ф}} = \frac{P_{\text{е}}}{P_{\text{с}}}.$$

Для ЕП з графіком ЕН, зображеним на рис. 1.4, $k_{\text{Ф}} \approx 1,05 / \sqrt{k_{\text{ВМ}}}$.

Групові графіки ЕН формуються індивідуальними графіками окремих ЕП шляхом підсумовування для кожного моменту часу навантаження всіх індивідуальних споживачів.

$$P(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t) \quad Q(t) = \sum_{i=1}^n q_i(t).$$

Вони характеризуються меншою нерівномірністю ніж індивідуальні (див. рис. 1.1).

Показники групових графіків ЕН:

1) K_B – коефіцієнт використання

$$K_B = \frac{P_c}{P_H} = \frac{\sum_i p_{ci}}{\sum_i p_{Hi}} = \frac{\sum_i k_{Bi} p_{Hi}}{\sum_i p_{Hi}}.$$

2) K_Φ – коефіцієнт форми

$$K_\Phi = \frac{P_e}{P_c}; \quad K_\Phi^2 - 1 = \frac{k_{\Phi i}^2 - 1}{n_e}.$$

де $k_{\Phi i} = \text{const}$;

n_e – ефективна кількість ЕП – це така кількість ЕП однакової потужності, яка за розрахунковим навантаженням еквівалентна групі різних за потужністю ЕП

$$n_e = \frac{(\sum p_{Hi})^2}{\sum p_{Hi}^2}.$$

Важливими є також такі показники групових графіків ЕН:

- коефіцієнт заповнення та коефіцієнт нерівномірності графіка:

$$K_{з.г} = \frac{P_c}{P_{\max}}; \quad K_{\text{нер}} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}};$$

- коефіцієнт максимуму активного навантаження, який визначається для найбільш завантаженої зміни:

$$K_M = \frac{P_M}{P_c};$$

- коефіцієнт попиту:

$$K_{\Pi} = \frac{P_M}{P_H}.$$

Показники річних графіків навантажень:

- кількість годин використання максимуму навантаження T_M :

$$T_M = \frac{W_a}{P_M} = \frac{\int_0^{T_p} P(t) dt}{P_M}.$$

- час максимальних втрат:

$$\tau = \frac{\int_0^{T_p} S^2(t) dt}{S_M^2}.$$

- коефіцієнт форми річного графіка:

$$K_{ф.р} = \sqrt{\frac{\int_0^{T_p} S^2(t) dt}{S_c^2 T_p}}.$$

1.5 Розрахункове навантаження

Основною величиною, за значенням якої вибирають кабелі, проводи, комутаційно-захисні апарати, трансформатори та інше електротехнічне обладнання, є розрахункове навантаження.

Розрахунковим навантаженням називають таке незмінне в часі навантаження, яке за найбільш важкою тепловою дією – максимальною температурою нагрівання або тепловим старінням ізоляції – еквівалентне очікуваному змінному в часі навантаженню.

Розрахункове максимальне навантаження, яке визначене за максимальною температурою нагрівання провідників, називають скорочено розрахунковим навантаженням. Розрахункове навантаження, яке визначене за тепловим зносом ізоляції, називають розрахунковим навантаженням за зносом ізоляції. На даний час розрахункове навантаження за зносом ізоляції не використовується.

За незмінного навантаження, коли струм не перевищує допустимого струму провідника $I_{доп}$, температура провідника менша від тривало допустимої температури провідника $\theta_{доп}$. Тривало допустима температура $\theta_{доп}$ для проводів, шнурів і кабелів з гумовою та пластмасовою ізоляцією, а також для кабелів з свинцевою, полівінілхлоридною та гумовою оболонками становить 65 °С, а для кабелів з паперовою ізоляцією до 3 кВ – 80 °С; до 6 кВ – 65 °С; до 10 кВ – 60 °С і до 20 та 35 кВ – 50 °С. Для кожного провідника з певним поперечним перерізом, типом ізоляції та видом прокладання в ПУЕ наведені значення тривало допустимого струму $I_{доп}$, які відповідають умові допустимого нагрівання струмоведучої жили незмінним за часом струмом.

Для змінного графіка навантаження $I(t)$ вибір провідника потрібно проводити за усередненим на певному інтервалі часу струмом, який за нагріванням еквівалентний розрахунковому струму I_p .

Для оцінки розрахункового навантаження I_p використовують принцип максимуму середнього навантаження, згідно з яким розрахункове навантаження визначається як найбільше усереднене на інтервалі $3T_0$ навантаження:

$$I_p = \max_t I_{3T_0}(t) = \frac{1}{3T_0} \int_{t-3T_0}^t I(t) dt.$$

Провідники середніх перерізів мають постійну часу нагрівання $T_0 = 10$ хвилин (табл. 1.1), а тому їх вибір здійснюється за півгодинним розрахунковим струмом. Провідники менших перерізів нагріваються швидше, однак, оскільки вони живлять окремі ЕП, їх вибирають за номінальним струмом ЕП. Провідники більших перерізів нагріваються повільніше, а тому при виборі їх за півгодинним розрахунковим струмом матимуть певний запас.

Таблиця 1.1 – Постійні часу нагрівання провідників:

s, мм ²	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150
T ₀ , хв.	3	4,2	5,5	7,2	9	12	15	18,3	21,4	24,2

Розрахункове навантаження I_p повністю визначається графіком $I(t)$. Перегрівання трижильного провідника відносно температури навколишнього середовища описується диференціальним рівнянням першого порядку

$$C \frac{d\vartheta}{dt} + A\vartheta = 3I^2 R,$$

де C – теплоємність проводу або кабелю; A – коефіцієнт тепловіддачі, який враховує сумарну віддачу тепла в навколишнє середовище за рахунок теплопровідності, конвекції і випромінювання; R – опір однієї жили проводу або кабелю.

Зростання опору під час нагрівання провідника визначається за виразом: $R = R_0(1 + \alpha\vartheta)$, де R_0 – опір однієї жили проводу або кабелю за 20°C; $\alpha \approx 0,0039$ – температурний коефіцієнт опору.

Якщо прийняти $I = I_{\text{доп.}}$; $\vartheta = \vartheta_{\text{доп.}}$; $R = R_{\text{доп.}}$, то

$$A = \frac{3I_{\text{доп.}}^2}{\vartheta_{\text{доп.}}} R_{\text{доп.}}$$

Підставивши значення A в останнє рівняння, отримують вираз для сталої часу нагрівання провідника

$$T_0 = \frac{C}{A} = \frac{C\vartheta_{\text{доп.}}}{3I_{\text{доп.}}^2 R_{\text{доп.}}}.$$

Для знаходження розрахункового струму I_p за даним графіком $I(t)$ зручно замінити температуру перегрівання ϑ прямо пропорційною допоміжною змінною z за формулою

$$z = \vartheta \frac{I_{\text{доп.}}^2}{\vartheta_{\text{доп.}}}.$$

Тоді диференціальне рівняння нагрівання провідників без урахування і з урахуванням температурного коефіцієнта опору відповідно набуде вигляду

$$T_0 \frac{dz_0}{dt} + z_0 = I^2; \quad (1.1)$$

$$T_0 \frac{dz_1}{dt} + z_1 = \frac{R(z_1)}{R_{\text{доп.}}} I^2. \quad (1.2)$$

В рівнянні (1.1) лише T_0 залежить від площі перерізу провідника.

Дослідження показали, що останні рівняння можна використовувати не тільки для наближеного розрахунку перегрівання заданого провідника, але й для визначення з достатньою точністю розрахункового струму I_p за заданим графіком навантаження $I(t)$.

З рівняння (1.1) наближене значення ϑ_{0M} найбільшого перегрівання буде $\vartheta_{0M} = z_{0M} \frac{\vartheta_{\text{доп.}}}{I_{\text{доп.}}^2}$. За визначенням розрахункового струму I_p ми

повинні отримати ту ж найбільшу ординату z_{0M} , що і при заданому графіку $I(t)$. Отже,

$$I_p^{(0)} = \sqrt{z_{0M}}. \quad (1.3)$$

Так само, коли z_{1M} є найбільшою ординатою інтеграла $z_1(t)$ рівняння (1.2), то підстановка $I(t) = I_p$ після перетворень приведе до виразу

$$I_p^{(1)} = \sqrt{\frac{(1 + \alpha \vartheta_{\text{доп.}}) z_{1M}}{1 + \alpha \vartheta_{\text{доп.}} \frac{z_{1M}}{I_{\text{доп.}}^2}}}. \quad (1.4)$$

На рис. 1.5 показано графік навантаження та інтегральну криву перегрівання, яку обчислено за формулою (1.1) для кабелю АСБ 10-(3×50).

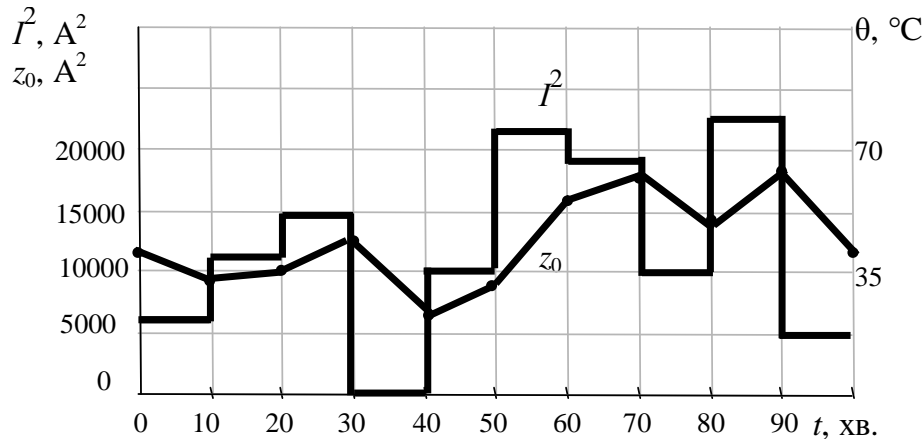


Рисунок 1.5 – Графіки навантаження та перегрівання кабелю

Проаналізувавши залежності $z_0(t)$, можна зробити висновок, що розрахункові значення струму знаходяться на дев'ятому інтервалі, де перегрівання кабелю є найбільшим.

Розрахункові струми з наведеного графіка для кабелю АСБ 10-(3×50) за наближеною та точною формулами, відповідно (1.3) і (1.4), будуть:

$$I_p^{(0)} \approx \sqrt{1,751 \cdot 10^4} = 132 \text{ А}; \quad I_p^{(1)} = \sqrt{1,844 \cdot 10^4} = 136 \text{ А}.$$

У даному випадку наближена формула занижує розрахунковий струм на 3%.

Проаналізувавши графік навантаження можна дійти висновку, що найбільше усереднене на інтервалі 30 хвилин (постійна часу нагрівання кабелю перерізом 50 мм² становить 12 хвилин) навантаження було на інтервалі часу 60...90 хвилин. Це значення $I_p \approx 136 \text{ А}$.

1.6 Методи розрахунку навантажень

За наявності графіків навантажень можна знайти всі розрахункові величини, що необхідні для проектування та експлуатації ЕПС. Водночас безпосередньо за графіками ЕН на практиці знаходять ці величини тільки для окремих потужних ЕП з практично незмінним графіком навантаження. В довідковій літературі для наближених розрахунків наводяться характерні

добові та річні графіки навантаження підприємств різних галузей промисловості. Однак такі графіки показують лише характер зміни навантаження, властивий підприємствам даної галузі промисловості.

Для окремих груп ЕП графіків ЕН, як правило, немає, але й за їх наявності аналіз великої кількості графіків в різних точках ЕПС надзвичайно ускладнив би розрахунок навантажень. Через це на практиці широко використовують не графіки, а теоретичні чи емпіричні методи розрахунку ЕН.

Статистичний метод використовується для знаходження розрахункових навантажень в діючих ЕПС і є основою для побудови інших методів.

Для застосування статистичного методу потрібні експериментально зняті графіки навантаження не менше п'яти найбільш завантажених змін. Це пояснюється тим, що тільки найбільш завантажені зміни характеризуються стаціонарністю навантаження і п'ять змін дають достатньо даних для статистичної обробки. Найбільш завантаженою називають зміну, під час якої випускають найбільш енергоємну продукцію і яка повторюється не менше п'яти разів на рік. За інтервалу дискретизації 30 хвилин за зміну отримують 16 значень ЕН, а за п'ять змін мають 80 значень.

Математична обробка експериментальних даних дуже проста. Розрахункове навантаження визначають за формулою, відомою з математичної статистики:

$$P_p = P_c + \beta \sigma_{\vartheta}[P], \quad (1.5)$$

де P_c – середнє навантаження; β – кратність розсіювання випадкової величини; $\sigma_{\vartheta}[P]$ – середньоквадратичне відхилення активної потужності за інтервалу дискретизації $\vartheta = 30$ хвилин.

Кратність розсіювання β залежить від гарантованої ймовірності того, що потужність буде меншою, ніж максимальна потужність. Якщо гарантована ймовірність приймається 0,95, то β можна приймати 1,647. Це з урахуванням того, що навантаження мають близький до нормального закону розподіл.

Середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_{\vartheta}[P] = \sqrt{P_e^2 - P_c^2}.$$

Якщо дискретність відліків була іншою, наприклад одна година, то середньоквадратичне відхилення перераховують за формулою

$$\sigma\sqrt{\theta} = \sigma_1\sqrt{\theta_1}.$$

Для розрахунку середньоквадратичного відхилення декількох груп ЕП використовують формулу

$$\sigma^2 = \sum_i^n \sigma_i^2 + \sum_{i \neq j}^n 2K_{ij},$$

де K_{ij} – коваріанти навантажень між i -ою та j -ою групами ЕП.

Розрахункове активне навантаження декількох груп ЕП визначається з урахуванням коваріації графіків навантажень

$$P_p = \sum_{i=1}^n P_{c.i} + \beta \sqrt{\sum_i^n \sigma_i^2 + \sum_{i \neq j}^n 2K_{ij}}.$$

Метод упорядкованих діаграм (метод коефіцієнта максимуму) був довгий час основним методом розрахунку ЕН силових ЕП. Метод упорядкованих діаграм (УД) розроблено Г. М. Каяловим. В його основу покладено ймовірнісне моделювання. Навантаження розглядається як випадкова величина, а для теоретичного обґрунтування використані УД показників графіків ЕН, які за математичною суттю є функціями розподілу цих показників. На рис. 1.6 подано перехід від УД активної потужності до її функції розподілу.

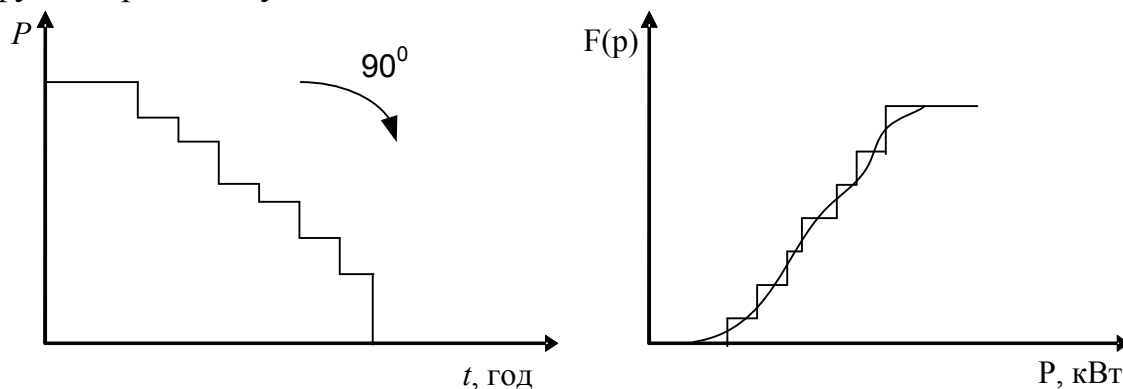


Рисунок 1.6 – Перехід від упорядкованої діаграми до функції розподілу випадкової величини

Відповідно до статистичного методу

$$P_p = P_c + \beta\sigma = P_c + \beta\sqrt{P_e^2 - P_c^2} = P_c(1 + \beta\sqrt{K_\phi^2 - 1}).$$

Для застосування статистичного методу на етапі проектування потрібна статистика з K_ϕ для груп ЕП, але такої статистики немає.

Згідно з роботами Г. М. Каялова [2] коефіцієнт форми можна виразити через коефіцієнт використання та ефективну кількість ЕП, якщо припустити, що

$$K_\phi^2 - 1 \approx \frac{k_\phi^2 - 1}{n_e}; \quad k_\phi \approx \frac{1,05}{\sqrt{k_{BM}}},$$

а коефіцієнт ввімкнення визначити з формули $k_B = k_3 \cdot k_{BM} = 0,8k_{BM}$.

Вихідними даними для розрахунку є номінальні потужності ЕП, а також статистичні дані коефіцієнтів використання та коефіцієнтів потужності різних груп ЕП. Для визначення цих коефіцієнтів на багатьох підприємствах різних галузей промисловості були визначені навантаження

ЛІТЕРАТУРА

1. Справочник по проектированию электроснабжения / [под ред. Ю. Г. Барыбина и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
2. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С. Д. Волобринский, Г. М. Каялов, П. И. Клейн, Б. С. Мешель. – Л. : Энергия, 1971. – 264 с.
3. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию / [под ред. А. А. Федорова]. – М. : Энергоатомиздат, 1986.– Т.1 – 580 с., 1987.– Т.2 – 591с.
4. Указания по расчету электрических нагрузок (РТМ 36.18.32.4-92). – М. : ВНИПИ Тяжпромэлектропроект, 1992.
5. Правила устройства электроустановок. – Харків : Изд-во «Форт», 2009. – 704 с.
6. Поспелов Г. Е. Потери мощности и энергии в электрических сетях / Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч. – М. : Энергоиздат, 1981. – 216 с.
7. Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0,38 – 150 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних втрат електроенергії. (ГНД 34. 09. 104 – 2003). – К. : Міністерство палива та енергетики України, 2004. – 115 с.
8. Бурбело М. Й. Стимулювання зменшення втрат в електричних мережах : монографія / М. Й. Бурбело, Л. М. Мельничук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2008. – 110 с.
9. Дерзський В. Г. Розрахунок втрат електроенергії в розподільних мережах 0,38 кВ / В. Г. Дерзський // Енергетика и электрификация. – 2005. – № 9. – С. 32–40.
10. Методика определения экономической эффективности капитальных вложений в энергетику. – Киев : Минэнерго Украины, 1999. (ГКД – 340000002).
11. Анчарова Т. В. Выбор мощности трансформаторов в системах промышленного электроснабжения / Т. В. Анчарова, Ю. М. Тюханов, В. Н. Усихин // Промышленная энергетика. – 1989. – № 4. – С. 33–34.
12. Зорин В. В. Системы электроснабжения общего назначения : учебник для студентов вузов / В. В. Зорин, В. В. Тисленко. – Чернигов : ЧГТУ, 2005. – 341 с.
13. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: Проектирование и расчет / А. С. Овчаренко и др. – Киев : Техніка, 1987. – 185 с.
14. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования / [под ред. Ю. Г. Барыбина и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 464 с.
15. Рожкова Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – М. : Энергия, 1980. – 600 с.
16. Беляев А. В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ / Беляев А. В. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 176 с.

17. ГОСТ 28249-89. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ.
18. Методика розрахунків плати за перетоки реактивної електроенергії між енергопостачальною організацією та її споживачами. – Київ : Міненерго України, 1999.
19. Указания по проектированию установок компенсации реактивной мощности в электрических сетях общего назначения промышленных предприятий (РТМ 38.18.32.6-92) // Инструктивные и информационные материалы по проектированию электроустановок. – М. : Тяжпромэлектропроект, 1993. – № 2. – С. 22–55.
20. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах / Железко Ю. С. – М. : Энергоиздат, 1981. – 200 с.
21. Сиуда И. И. Алгоритм расчета мощности компенсирующих устройств в сетях электроэнергетических систем / И. И. Сиуда, В. И. Свешников // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1978. – № 2. – С. 148–152.
22. Ковалев И. Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей / Ковалев И. Н. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 200 с.
23. Рогальський Б. С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління / Рогальський Б. С. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 236 с.
24. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. с 01.01.99.
25. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / Жежеленко И. В. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
26. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – К. : Наукова думка, 1987. – 268 с.
27. Бурбело М. Й. Квазізрівноважені вимірювальні канали для симетрувальних установок : монографія / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2009. – 96 с.
28. Матур Р. М. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности / Матур Р. М. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 155 с.
29. Бурбело М. Й. Динамічна компенсація реактивної потужності в пускових режимах електроприводів : монографія / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 104 с.

Предметний покажчик

- автоматичні вимикачі, 130
 - розчіплювачі, 130
 - перевірка захищеності ліній, 131
 - перевірка селективності, 134
 - перевірка чутливості, 133
- втрати електричної енергії, 39
 - метод часу максимальних втрат, 39, 40
 - метод середніх навантажень, 40, 41
- головна понижувальна підстанція (ГПП), 71, 75
- економічний еквівалент реактивної потужності, 158
- електроприймачі, 9
 - класифікація, 9
 - ефективна кількість, 20
- кабелі, 95
- комплектні розподільні пристрої, 110
- комплектні трансформаторні підстанції, 115
- методи розрахунку навантажень, 19
 - статистичний метод, 19
 - метод упорядкованих діаграм, 20
 - емпіричні методи, 24
- навантаження електричні, 12
 - розрахункове, 16
 - середнє, 12
 - середньоквадратичне, 12
- показники навантажень
 - коефіцієнт ввімкнення, 13
 - коефіцієнт використання, 13
 - коефіцієнт завантаження, 13
 - коефіцієнт максимуму, 14
 - коефіцієнт форми, 14, 39–47
- показники надійності
 - тривалість відновлення, 55, 56
 - тривалість планового ремонту, 55, 56
 - частота відмов, 55, 56
 - частота планових ремонтів, 55, 56
 - недовідпуск електроенергії, 60
 - збитки від переривання електропостачання, 59–61
- показники якості електроенергії
 - відхилення напруги, 163
 - відхилення частоти, 163
 - коливання напруг, 163, 164
 - несиметрія напруги
 - за зворотною послідовністю, 153
 - за нульовою послідовністю, 154
 - несинусоїдність напруг, 164, 165
- провідники, 95, 127
 - вибір за економічною густиною струму, 95
 - вибір за нагрівом, 96
 - вибір за втратами напруги, 129
- термін окупності капітальних вкладень, 62
- трансформатори, 70
 - навантажувальна здатність, 70
 - вибір відгалужень трансформатора, 167
- час використання максимального навантаження, 15, 40
- час максимальних втрат, 15, 40
- центр електричних навантажень, 69
- цехова розподільна мережа, 122
 - радіальна мережа, 122
 - магістральна мережа, 123

Навчальне видання

**Михайло Йосипович Бурбело
Олександр Олександрович Бірюков
Людмила Михайлівна Мельничук**

**СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.
ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ТА ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ**

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна

Оригінал-макет підготував М. Бурбело

Підписано до друку 10.01.2012 р.

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. друк. арк.13,1.

Наклад 300 (I-й запуск 1-100) прим. Зам. № 2012-004.

Вінницький національний технічний університет,
науково-методичний відділ ВНТУ.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, к. 2201.

Тел. (0432) 59-87-36.

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

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-87-38.

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