

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**П. Д. Лежнюк, В. О. Комар**

**РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ  
В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ**

2-е видання

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом “Електротехніка та електротехнології”

Вінниця  
ВНТУ  
2010

УДК 621.311–52.003

А 80

*Рецензенти:*

**Ю. О. Варецький**, доктор технічних наук, професор

**В. В. Назаров**, доктор технічних наук, професор

**М. М. Черемісін**, кандидат технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Міністерством освіти і науки України.  
Лист № 1.4/18–Г–676 від 25.03.08

**Лежнюк, П. Д.**

Л 49 Регулювання напруги в електричних системах. Навчальний посібник / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар. — 2-е вид. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. — 171 с.

ISBN 978-966-641-353-9

В посібнику розглянуті засоби і способи регулювання напруги як одного з основних показників якості електроенергії, з метою оптимізації режиму роботи енергосистеми і, як наслідок, споживачів.

Посібник розроблений у відповідності з планом кафедри і програмою дисципліни “Електричні системи та мережі” і призначений для студентів спеціальності “Електричні системи та мережі”, також може бути корисний для студентів інших енергетичних спеціальностей.

УДК 621.311–52.003

ISBN 978-966-641-353-9

© П. Лежнюк, В. Комар, 2010

## ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ І ВПЛИВ ЇЇ НА НОРМАЛЬНУ РОБОТУ СПОЖИВАЧІВ .....	8
1.1 Якість електричної енергії.....	8
1.2 Характеристики електроенергії і її показники якості.....	11
1.3 Приклади впливу якості електроенергії на функціонування технічних пристроїв .....	25
1.4 Забезпечення якості електроенергії.....	29
2 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ .....	31
2.1 Баланс реактивної потужності і його зв'язок з напругою .....	31
2.2 Споживачі і джерела реактивної потужності .....	34
2.3 Компенсація реактивної потужності в електричних мережах.....	38
2.4 Застосування технічних пристроїв для регулювання напруги в електричних мережах.....	40
2.5 Закони регулювання напруги і реалізація їх в електричних мережах .....	45
3 ДЖЕРЕЛА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЯК ЗАСІБ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ .....	51
3.1 Задачі, які розв'язуються з використанням джерел реактивної потужності.....	51
3.2 Особливості джерел реактивної потужності .....	51
3.3 Синхронні генератори електростанцій .....	53
3.4 Синхронні компенсатори .....	56
3.5 Батареї конденсаторів .....	57
3.6 Статичні тиристорні компенсатори на базі БК.....	61
3.7 Реактори .....	63
3.8 Комбіновані ДРП.....	67
4 РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ З РЕГУЛЮЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ .....	69
4.1 Трансформатори з перемиканням відгалужень без збудження .....	69
4.2 Основні схеми пристроїв РПН .....	73
4.3 Схеми трансформаторів і автотрансформаторів з РПН .....	80
4.4 Основні елементи конструкції пристроїв РПН .....	85
4.5 Перспективи розвитку перемикальних пристроїв .....	89
4.6 Особливості випробувань і експлуатації регульованих трансформаторів.....	89
5 РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ .....	92
5.1 Структура регулювання напруги в ЕЕС .....	92
5.2 Балансування реактивної потужності вузла навантаження .....	94
5.3 Регулятори напруги.....	97
5.4 Настроювання регуляторів напруги .....	98

5.5	Регулювання напруги в розподільних мережах .....	103
5.6	Регулювання режиму батареї конденсаторів.....	106
6	<b>АВТОМАТИЗАЦІЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НАПРУГИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ З РПН.....</b>	<b>111</b>
6.1	Особливості автоматичного регулювання коефіцієнтів трансформації трансформатора .....	111
6.2	Автоматичні регулятори коефіцієнтів трансформації.....	113
6.3	Автоматичний контроль та керування функціонуванням трансформаторів з РПН в ЕЕС.....	124
6.4	Регулювальний ефект і ранжування регулювальних пристроїв.....	135
6.5	Визначення оптимальної області параметрів регулювальних пристроїв .....	138
7	<b>ЗМЕНШЕННЯ НЕСИНУСОЇДНОСТІ І НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....</b>	<b>141</b>
7.1	Несинусоїдність та способи її усунення .....	141
7.1.1	Задачі несинусоїдності кривих напруги і струму .....	141
7.1.2	Джерела гармонік в електричній мережі .....	142
7.1.3	Зменшення несинусоїдності напруги та струму .....	144
7.1.4	Поширення вищих гармонік в електричних мережах .....	147
7.2	Несиметричність напруги і її зменшення .....	151
7.2.1	Причини несиметричності напруги в електричних мережах і їх характеристика .....	151
7.2.2	Розрахунок несиметричних режимів електричних мереж .....	157
7.2.3	Симетрування напруги в електричних мережах .....	164
	Література.....	168
	Словник термінів .....	169

## Перелік скорочень

АВР – автоматичне вмикання резерву  
АД – асинхронний двигун  
АПВ – автоматичне повторне вмикання  
АРЗ – автоматичні регулятори збудження  
АСДУ – автоматизовані системи диспетчерського управління  
АТ – автотрансформатор  
БК – батареї конденсаторів  
ВН – висока напруга  
ДРП – джерела реактивної потужності  
ЕЕС – електроенергетична система  
ЕМЗ – електромагнітні завади  
ЕМС – електромагнітна сумісність  
ЕП – електроприймач  
ЕРС – електрорушійна сила  
КРП – компенсація реактивної потужності  
КУ – компенсуючі установки  
ЛЕП – лінії електропередач  
НН – низька напруга  
ПБЗ – перемикач без збудження  
ПЛ – повітряні лінії  
ПЯЕ – показники якості електроенергії  
РО – регулювальна обмотка  
РТ – розподільний трансформатор  
РПН – регулювання під навантаженням  
СД – синхронний двигун  
СЕП – система електропостачання  
СН – середня напруга  
СК – синхронні компенсатори  
СТК – статичні тиристорні компенсатори  
ТУ – технічні умови  
УПК – установки поздовжньої компенсації  
ЦЖ – центр живлення  
ШР – шунтувальні реактори  
ЯЕ – якість електроенергії

## ВСТУП

Основними показниками якості електроенергії при живленні від електричних мереж трифазного струму є відхилення і коливання частоти та напруги, ступінь несинусоїдальності форми кривої напруги, несиметрія напруги і зсув нейтралі. Норми на ці показники якості електроенергії в точках мереж, до яких безпосередньо приєднуються електроприймачі, визначаються ГОСТом. Відхилення показників якості електроенергії, зокрема рівня напруги, від номінальних значень поділяються на нормально допустимі, яких повинні дотримуватися протягом 95% часу доби, і максимально допустимі, які не повинні бути перевищені протягом всього часу, включаючи післяаварійні режими.

Вимоги до точності дотримування норм відхилення напруги різні для різних видів навантаження. Наприклад, досить чутливими до відхилень напруги є освітлювальні установки. Показник ступеня залежностей світлового потоку і терміну служби ламп розжарювання складає відповідно 3,61 і 13,57, тому при зниженні напруги на 10% світловий потік зменшується на 32%, а при підвищенні напруги на 10% термін служби знижується в 4 рази. Люмінесцентні лампи менш чутливі до відхилень напруги, проте, при великих зниженнях напруги лампи або не спалахують, або мигають, що різко знижує термін їх служби.

Значний збиток від відхилень напруги може бути в промислових електротермічних і електролізних установках. Зниження напруги живлення дугових електропечей всього на 8% призводить до такого різкого зниження температури, що плавка взагалі не може бути доведена до кінця. Відхилення, а тим більше швидкі коливання напруги в межах  $\pm 5\%$  повністю порушують нормальну роботу установок електролізу для виробництва хлору і каустичної соди.

Відхилення напруги впливає і на роботу асинхронних двигунів, які масово використовуються в промисловості і господарстві. Відхилення напруги від її номінального значення впливає на значення електромагнітного моменту двигуна, на його швидкість, а тим самим і на продуктивність механізмів, які він приводить в рух.

Суттєво впливає значення напруги також на процес транспортування та розподілу електроенергії в електроенергетичній системі (ЕЕС). Цей вплив проявляється, наприклад, на значенні втрат електроенергії під час її транспортування. Від напруги залежать навантажувальні втрати електроенергії в елементах системи з активним опором та, особливо, втрати на коронування. За хорошої погоди втрати на коронування пропорційні квадрату напруги, а під час опадів та інієутворенні ці втрати залежать від напруги вже в четвертому – шостому степені.

Значення напруги впливає на процес старіння ізоляції електрообладнання і, відповідно, на його ресурс і якість функціонування.

Наприклад, систематичне відхилення напруги на +10% від номінального значення зменшує строк служби трансформаторів майже вдвічі.

Можна констатувати, що вплив напруги і її характеристик (відхилення від номінального значення, коливання, несинусоїдність, несиметрія фаз) носить як місцевий, так системний характер. В першому випадку це вплив на техніко-економічні показники електроприймачів, в другому – вплив на техніко-економічні показники електричних мереж ЕЕС в цілому. Відповідно постають різні задачі щодо регулювання напруги. Вони відрізняються за метою, способами приведення показників якості напруги до їх нормативних значень, технічними засобами регулювання тощо.

Регулювання напруги в електричних мережах тісно пов'язане з регулюванням реактивної потужності. Власне від балансу реактивної потужності залежить рівень напруги в мережах. Обидва ці процеси взаємозв'язані і не завжди їх можна розмежувати. Комплексний підхід до регулювання напруги і реактивної потужності дозволяє одночасно підтримувати показники якості напруги в допустимому діапазоні і досягати зменшення втрат електроенергії в електричних мережах.

Однією з особливостей напруги як параметра режиму ЕЕС є те, що якість її має здатність погіршуватися на шляху від джерела електроенергії до споживача. Будучи якісною на шинах електростанцій, через втрати в лініях, трансформаторах та інших елементах ЕЕС і через вплив факторів, що спотворюють форму синусоїди, напруга на шинах підстанцій споживачів уже може не відповідати вимогам щодо її якості. Компенсувати втрати напруги в електричних мережах можна шляхом централізованого та місцевого її регулювання. В першому випадку це здійснюється збудженням генераторів на станціях та регулюванням коефіцієнтів трансформації трансформаторів і зміною навантаження (генерування) джерел реактивної потужності (ДРП) на підстанціях 110 – 750 кВ. На місцевому рівні регулювання напруги і покращення її якості здійснюється локальними регуляторами, встановленими на підстанціях і в центрах живлення безпосередньо біля споживачів електроенергії.

За способом підтримки значення напруги в електричних мережах процес регулювання напруги на всіх рівнях в ЕЕС може реалізовуватися оперативним втручанням диспетчера (ручне керування) або автоматично за допомогою спеціальних регуляторів. При цьому регулювання може здійснюватися за різними законами.

Таким чином, як бачимо, проблема регулювання напруги в ЕЕС є складною і багатопланою. Для ефективного її вирішення необхідні глибокі знання і постійна увага.

## ЛІТЕРАТУРА

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1998.
2. Аберсон М. Л. Оптимизация регулирования напряжения. – М.: Энергия, 1975. – 160 с.
3. Баркан Я. Д. Автоматизация режимов по напряжению и реактивной мощности. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
4. Баркан Я. Д. Эксплуатация электрических систем. – М.: Высшая школа, 1990. – 304 с.
5. Веников В. А., Идельчик В. И., Лнсеев М. С. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 214 с.
6. Воротницкий В. Э., Лежнюк П. Д., Серова И. А., Стан В. В. Методика по оценке эффективности применения трансформаторов с РПН и автоматического регулирования напряжения в замкнутых электрических сетях. РД 34.46.504-90. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1990. – 36 с.
7. Дж. Арриллага, Д. Бредли, П. Боджер. Гармоники в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
8. Электрические системы. Электрические сети / Под ред. Веникова В. А., Строева В. А. – М.: Высшая школа, 1998.
9. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
10. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
11. Идельчик В. И. Электрические системы и сети. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
12. Лежнюк П. Д., Кулик В. В. Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 188 с.
13. Маркушевич Н. С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 104 с.
14. Мокин Б. И., Выговский Ю. Ф. Автоматические регуляторы в электрических сетях. – Киев: Техника, 1985. – 104 с.
15. Овчаренко Н. И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем. – М.: НЦ ЭНАС, 2001. – 504 с.
16. Порудоминский В. В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой. – М.: Энергия, 1974. – 288 с.
17. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике. – М.: Энергоатомиздат, 1995.
18. Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – Киев: Наукова думка, 1985. – 268 с.
19. Якобсон И. А. Наладка и эксплуатация переключающих устройств силовых трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 120 с.



## СЛОВНИК ТЕРМІНІВ

<b>1. Автоматичне вмикання резерву</b>	<i>Automatic reserve enclosing</i>
<b>2. Автоматичне повторне ввімкнення</b>	<i>Automatic reclosing</i>
<b>3. Автоматичне регулювання збудження</b>	<i>Automatic regulation of excitation</i>
<b>4. Автоматичне частотне розвантаження</b>	<i>Automatic frequency unloading</i>
<b>5. Автотрансформатор</b>	<i>Autotransformer</i>
<b>6. Активна потужність</b>	<i>Active power</i>
<b>7. Асинхронний двигун</b>	<i>Asynchronous engine</i>
<b>8. Відхилення напруги</b>	<i>Deflection of voltage</i>
<b>9. Відхилення частоти</b>	<i>Deflection of frequency</i>
<b>10. Вітка електричного кола</b>	<i>Branch of electric circuit</i>
<b>11. Втрата напруги в елементі мережі</b>	<i>Loss of voltage in the element of power system</i>
<b>12. Гармоніка напруги (струму)</b>	<i>Harmonic curve of voltage (current)</i>
<b>13. Двоколова повітряна лінія змінного струму</b>	<i>Two-circuit transmission line of alternative current</i>
<b>14. Джерело реактивної потужності</b>	<i>Source of reactive power</i>
<b>15. Диспетчерське керування</b>	<i>Dispatcher's management</i>
<b>16. Допустимий рівень завад</b>	<i>Admissible level of barrier</i>
<b>17. Електроенергетична система</b>	<i>Electro-power system</i>
<b>18. Електромагнітна завада</b>	<i>Electromagnetic hindrance</i>
<b>19. Електромагнітна сумісність</b>	<i>Electromagnetic hindrance</i>
<b>20. Зона нечутливості</b>	<i>Area of insensitivity</i>
<b>21. Індуктивна завада</b>	<i>Inductive barrier</i>
<b>22. Коливання напруги</b>	<i>Oscillation of voltage</i>
<b>23. Компенсація реактивної потужності</b>	<i>Balance of reactive power</i>

<b>24. Конденсаторна батарея</b>	<i>Condenser battery</i>
<b>25. Лінія електропередачі</b>	<i>Electric transmission line</i>
<b>26. Небаланс активної потужності</b>	<i>Unbalance of active power</i>
<b>27. Несиметрія напруги</b>	<i>Asymmetry of voltage</i>
<b>28. Несинусоїдність напруги</b>	<i>Nonsinusoidation of voltage</i>
<b>29. Номінальна напруга</b>	<i>Nominal voltage</i>
<b>30. Повна потужність</b>	<i>Full power</i>
<b>31. Показники якості електроенергії</b>	<i>Indexes of quality of electric power</i>
<b>32. Провали напруги</b>	<i>Failures of voltage</i>
<b>33. Пряма компенсація реактивної потужності</b>	<i>Direct compensation of reactive power</i>
<b>34. Пряма (зворотна, нульова) послідовність</b>	<i>Positive (negative, zero) sequence</i>
<b>35. Реактивна потужність</b>	<i>Reactive power</i>
<b>36. Регулювання напруги</b>	<i>Arrangement of voltage</i>
<b>37. Регулювання напруги трансформаторів</b>	<i>Arrangement of voltage of transformers</i>
<b>38. Силовий трансформатор</b>	<i>Power transformer</i>
<b>39. Синхронний генератор</b>	<i>Synchronous generator</i>
<b>40. Синхронний компенсатор</b>	<i>Synchronous compensator</i>
<b>41. Споживач електроенергії</b>	<i>Consumer of electric power</i>
<b>42. Система електропостачання</b>	<i>Electro-supplying system</i>
<b>43. Струм вищих гармонік</b>	<i>Higher harmonics' current</i>
<b>44. Тимчасова перенапруга</b>	<i>Temporary overstrain</i>
<b>45. Усталений режим</b>	<i>Steady-state behavior</i>
<b>46. Центр живлення</b>	<i>Supplying center</i>
<b>47. Якість електричної енергії</b>	<i>Quality of electric energy</i>

*Навчальне видання*

Петро Дем'янович Лежнюк  
Вячеслав Олександрович Комар

**РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ  
В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ**

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено В. О. Комаром  
Редактор О. Д. Скалоцька

Підписано до друку 31.03.2010 р.  
Формат 29,7× 42 ¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 10,9  
Наклад.200 прим. Зам. № 2010-056

Вінницький національний технічний університет,  
видавництво "УНІВЕРСУМ-Вінниця".  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.  
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) 59-85-32.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.