

УДК 621.311

О. Г. Гриб, д. т. н., проф.;

О. М. Довгалюк, к. т. н., доц.

ОЦІНКА ЗАКОНУ РОЗПОДІЛУ ФУНКЦІЇ НАПРУГИ В МЕРЕЖАХ 6—35 КВ

Наведено результати аналізу напруги в електричних мережах 6—35 кВ для режимів максимальних і мінімальних навантажень. Зроблено виміри значень напруги в електричних мережах, для них побудовано емпіричні гістограми й виконано апроксимацію типовими аналітичними залежностями для всього періоду виміру, добового й годинного інтервалів. Кількісно підтверджено випадковий характер зміни напруги в мережі.

Сучасні електричні мережі є складними технічними системами, що складаються з великої кількості взаємозалежних і взаємодіючих елементів, з імовірнісним характером зміни параметрів режимів. Для оптимального керування режимами роботи таких електричних мереж необхідно виконати аналіз існуючих режимів їхньої роботи. Однією зі складових даного аналізу є оцінка закону розподілу досліджуваного параметра режиму.

Аналізу режимів напруги в електричних мережах приділялося багато уваги, Зважаючи на велике практичне значення цього питання [1—5]. До найбільш значущих розробок у цій області є роботи Архипова Н. К., Мельникова Н. А., Солдаткіної Л. А., Фокіна Ю. А., Зоріна В. В., Яндульського А. С. та ін. [6—8].

На сьогоднішній день з'явилась можливість як реєстрації режимів роботи мереж за допомогою більш точних приладів, так і використання для їхньої обробки сучасних й швидкодіючих засобів обчислювальної та комп'ютерної техніки. Це дає можливість аналізувати режими мереж на більш якісному рівні та продуктивніше використовувати отримані результати для корегування параметрів режимів їхньої роботи. Як наслідок, питання оптимального керування набули особливої актуальності.

У той же час проведений аналіз режимів електричних мереж враховує процеси тільки в межах окремих розрахункових точок мережі, не беручи до уваги всі особливості багаторівневої ієрархічно організованої структури електричних мереж.

Метою проведених досліджень є виявлення закономірностей зміни напруги в електричних мережах для розробки рекомендацій щодо оптимізації процесу регулювання напруги з урахуванням багаторівневої ієрархічно організованої структури мережі, а також імовірнісного характеру зміни параметрів її режиму.

Для оцінки закону розподілу функції напруги в електричних мережах м. Харкова було зроблено більше 50 вимірів на шинах 6, 10 й 35 кВ трансформаторних підстанцій, розташованих у центрах живлення навантажень. Тривалість безперервних вимірів напруги в зазначених точках мережі становила від 5 до 7 діб для режимів максимальних і мінімальних навантажень. Виміри проводились атестованим приладом «АНТЭС АК-3Ф».

За результатами проведених вимірювань для кожної точки мережі значення напруги були пред-

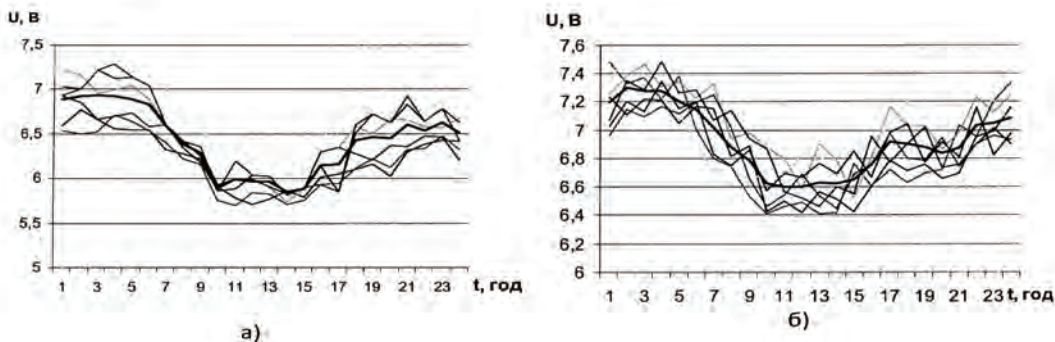


Рис. 1. Значення напруги в мережі 6 кВ: а — у режимі максимальних навантажень; б — у режимі мінімальних навантажень

ставлені у вигляді вибірки, що складається з n незалежних спостережень за випадковою функцією $U(t)$, вигляд яких показаний на рис. 1, рис. 2, рис. 3.

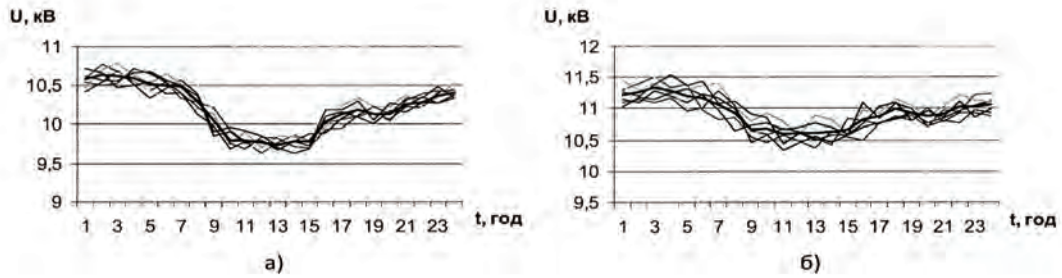


Рис. 2. Значення напруги в мережі 10 кВ: а — у режимі максимальних навантажень; б — у режимі мінімальних навантажень

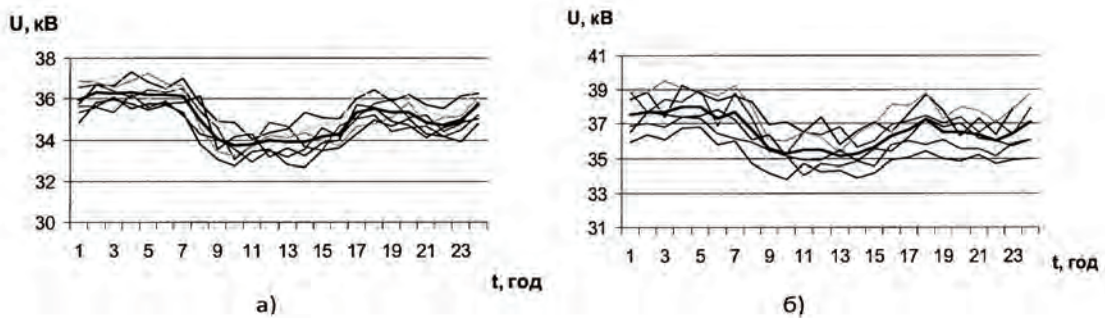


Рис. 3. Значення напруги в мережі 35 кВ: а — у режимі максимальних навантажень; б — у режимі мінімальних навантажень

Для всіх досліджуваних точок мережі було визначено інтегральні імовірнісні характеристики випадкової функції напруги: математичне очікування $M[U(t)]$, дисперсія $D[U(t)]$, середнь-оквадратичне відхилення $\sigma[U(t)]$.

Далі для них було побудовано емпіричні гістограми з усередненням експериментальних даних

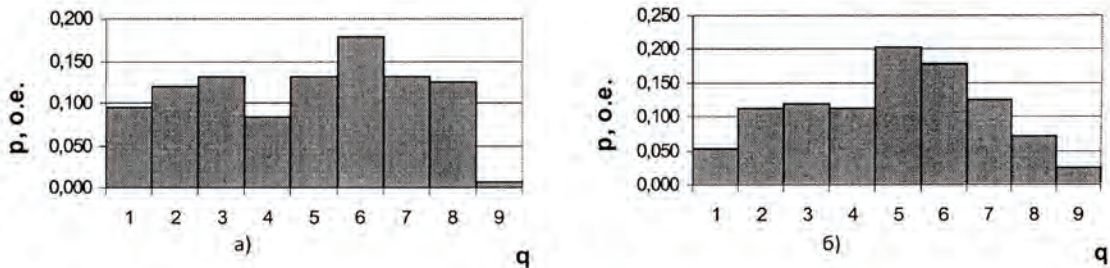


Рис. 4. Гістограми функції напруги в мережі 6 кВ: а — у режимі максимальних навантажень; б — у режимі мінімальних навантажень

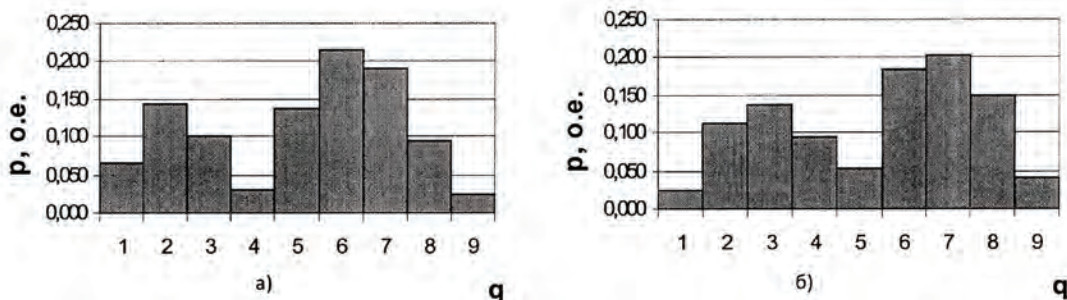


Рис. 5. Гістограми функції напруги в мережі 10 кВ: а — у режимі максимальних навантажень; б — у режимі мінімальних навантажень

по всьому періоду вимірів [9]. Для побудови групованого ряду вся область виміру випадкової ве-

личини $U(t)$ була розбита на q інтервалів, величина яких h наведена в табл. 1. Вигляд отриманих емпіричних гістограм для режиму максимальних і мінімальних навантажень у досліджуваній мережі показано на рис. 4, рис. 5, рис. 6.

Зроблено апроксимацію побудованих гістограм аналітичними залежностями за методом найменших квадратів [10]. За зовнішнім виглядом гістограм було обрано аналітичні функції, які найточніше описують досліджувані закони розподілу: нормальний, рівномірний, Ерланга, гамма-розподілу, поліноміальний, логістичний.

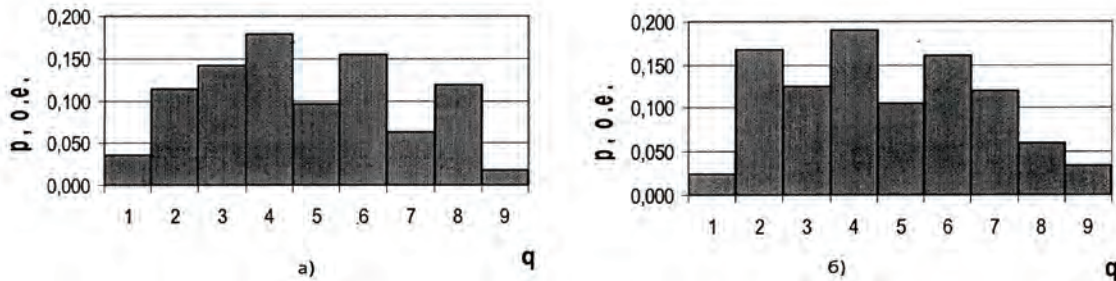


Рис. 6. Гістограми функції напруги в мережі 35 кВ: а — у режимі максимальних навантажень; б — у режимі мінімальних навантажень

Таблиця 1

Тривалість інтервалів розбивки групованих статистичних рядів функції напруги

Напруга мережі, кВ	У режимі максимальних навантажень			У режимі мінімальних навантажень		
	$U_{\min}, В$	$U_{\max}, В$	$h, В$	$U_{\min}, В$	$U_{\max}, В$	$h, В$
6	5735	7508	125	5955	7982	120
10	9630	10780	140	10330	11560	150
35	32670	37290	435	33820	39580	420

Для всіх розглянутих аналітичних функцій відповідно до [10] було визначено значення середньоквадратичної помилки Σ^2 й індексу кореляції I_k

$$\Sigma^2 (f) = \sum_{i=1}^q (f_{\text{експі}} - f_{\text{теорі}})^2 ; \tag{1}$$

$$I_k (f) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^q (f_{\text{експі}} - f_{\text{теорі}})^2}{\sum_{i=1}^q (f_{\text{експі}} - \bar{f}_{\text{експі}})^2}} ; \tag{2}$$

де q — кількість інтервалів розбивки групованого статистичного ряду залежно від тривалості інтервалу розбивки h і варіаційного розмаху випадкової величини ($U_{\max} - U_{\min}$), $f_{\text{експ}}$, $f_{\text{теор}}$ — значення функції, отримані експериментальним шляхом і теоретичним за відповідним аналітичним виразом, $\bar{f}_{\text{експі}}$ — середнє вибіркве функції, отримане за експериментальним даними.

Критерій згоди Пірсона дозволив оцінити ступінь погодженості експериментальної й кожної з теоретичних функцій щільності розподілу напруги [10]. Значення критерію визначалося за формулою

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^q \frac{(f_{\text{експі}} - f_{\text{теорі}})^2}{f_{\text{теорі}}} . \tag{3}$$

Гіпотеза про закон розподілу приймалася, якщо виконувалася умова

$$\chi^2 \leq \chi_{\mu, \lambda}^2 , \tag{4}$$

де $\chi_{\mu, \lambda}^2$ — табличне значення [10], обумовлене залежно від кількості ступенів вільності μ і ймовірності λ того, що величина, розподілена за законом χ^2 , перевищить це значення.

Кількість ступенів вільності визначено за формулою

$$\mu = q - \psi - 1, \tag{5}$$

де ψ — кількість параметрів розподілу.

Результати розрахунку критерію χ^2 показано в табл. 2—4. Із наведених таблиць випливає, що умова (4) не виконується, а отже, жодна з розглянутих залежностей не описує закон розподілу досліджуваної випадкової величини з необхідною вірогідністю. Таким чином, для досліджуваної функції напруги не існує єдиної щільності ймовірностей на розглянутому інтервалі.

Таблиця 2

Результати розрахунку критерію Пірсона для мережі 6 кВ

Закон розподілу випадкової величини	Режим максимальних навантажень						Режим мінімальних навантажень					
	Σ^2	I_k	χ^2	μ	λ	$\chi^2_{\mu,\lambda}$	Σ^2	I_k	χ^2	μ	λ	$\chi^2_{\mu,\lambda}$
Нормальне	3,483	0,809	1,978	6	0,95	1,64	2,767	0,921	2,086	6	0,95	1,64
Рівномірне	5,474	0,860	2,106	6	0,95	1,64	6,559	0,838	1,896	6	0,95	1,64
Ерланга	3,734	0,777	2,248	6	0,95	1,64	2,987	0,907	1,898	6	0,95	1,64
Гамма-розподіл	3,657	0,787	1,967	6	0,95	1,64	2,943	0,910	2,641	6	0,95	1,64
Поліноміальне	4,029	0,832	0,627	3	0,95	0,352	3,291	0,925	0,957	3	0,95	0,352
Логістичне	5,234	0,471	1,783	6	0,95	1,64	6,078	0,518	1,868	6	0,95	1,64

Для детальнішого аналізу режиму напруги в мережі було визначено закон розподілу випадкової функції напруги на добовому інтервалі. Дослідження показали, що на добовому інтервалі для досліджуваної функції напруги також не існує єдиної щільності ймовірностей.

Таблиця 3

Результати розрахунку критерію Пірсона для мережі 10 кВ

Закон розподілу випадкової величини	Режим максимальних навантажень						Режим мінімальних навантажень					
	Σ^2	I_k	χ^2	μ	λ	$\chi^2_{\mu,\lambda}$	Σ^2	I_k	χ^2	μ	λ	$\chi^2_{\mu,\lambda}$
Нормальне	2,914	0,859	2,084	6	0,95	1,64	3,409	0,871	1,869	6	0,95	1,64
Рівномірне	5,329	0,822	2,369	6	0,95	1,64	6,278	0,721	2,412	6	0,95	1,64
Ерланга	3,342	0,809	2,651	6	0,95	1,64	3,834	0,834	1,898	6	0,95	1,64
Гамма-розподіл	3,762	0,751	2,428	6	0,95	1,64	3,730	0,843	1,717	6	0,95	1,64
Поліноміальне	2,738	0,913	1,236	3	0,95	0,352	3,730	0,899	0,578	3	0,95	0,352
Логістичне	4,823	0,532	1,837	6	0,95	1,64	5,969	0,512	1,853	6	0,95	1,64

Таблиця 4

Результати розрахунку критерію Пірсона для мережі 35 кВ

Закон розподілу випадкової величини	Режим максимальних навантажень						Режим мінімальних навантажень					
	Σ^2	I_k	χ^2	μ	λ	$\chi^2_{\mu,\lambda}$	Σ^2	I_k	χ^2	μ	λ	$\chi^2_{\mu,\lambda}$
Нормальне	6,586	0,512	2,538	6	0,95	1,64	5,858	0,594	1,732	6	0,95	1,64
Рівномірне	7,095	0,337	2,059	6	0,95	1,64	6,454	0,289	1,948	6	0,95	1,64
Ерланга	6,581	0,513	1,771	6	0,95	1,64	5,939	0,579	2,102	6	0,95	1,64
Гамма-розподіл	7,188	0,348	1,967	6	0,95	1,64	6,179	0,529	1,716	6	0,95	1,64
Поліноміальне	5,887	0,779	0,854	3	0,95	0,352	3,923	0,898	1,016	3	0,95	0,352
Логістичне	7,412	0,257	1,647	6	0,95	1,64	6,212	0,522	2,573	6	0,95	1,64

Це дозволяє зробити висновок, що функція напруги для всіх досліджуваних точок мережі є випадковою послідовністю, яка близька до процесів марківського типу. Її частковий опис, достатній для вирішення інженерних задач, у тому числі й аналізу режиму напруги в мережі, можна представити одномірною інтегральною функцією розподілу

$$F(U, t) = \int_{-\infty}^U p(U, t) dU, \quad (6)$$

де U — напруга на елементі мережі, t — поточний час.

Для достовірного опису такого процесу може бути використана тільки послідовність миттєвих щільностей імовірностей, побудованих для кожного моменту часу окремо. Для кожного з таких інтервалів побудовано гістограми й визначено закон розподілу напруги для кожної години доби. Аналіз даних гістограм показав, що вони апроксимуються нормальним законом розподілу.

Таким чином, імовірнісним описом досліджуваного процесу зміни напруги в мережах 6—35 кВ може служити тільки послідовність миттєвих щільностей імовірностей, побудованих для кожного моменту часу.

Висновки

1. Оцінка закону розподілу функції напруги в мережах 6—35 кВ показала, що для досліджуваної випадкової величини на добовому інтервалі не існує єдиної щільності ймовірностей.

2. Для достовірного опису характеру зміни напруги в режимах максимальних і мінімальних навантажень може бути використана тільки послідовність миттєвих щільностей імовірностей, побудованих для кожного моменту часу, які апроксимуються нормальним законом розподілу.

Виявлені особливості режимів напруги в мережах 6—35 кВ дозволять надалі оптимальним чином корегувати закон його регулювання для підвищення ефективності експлуатації мереж.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мельников Н. А., Солдаткина Л. А. Регулирование напряжения в электрических сетях. — М.: Энергия, 1968. — 152 с.
2. Холмский В. Г. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей (специальные вопросы). — М.: Высшая школа, 1975. — 280 с.
3. Маркушевич Н. С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 104 с.
4. Кузнецов В. Г., Тугай Ю. И., Бженев В. А. Оптимизация режимов электрических сетей. — К.: Наукова думка, 1992. — 216 с.
5. Зорін В. В. Моделювання та оптимізація параметрів та режимів систем електропостачання міст // Наукові вісті Національного технічного університету «КПІ». — 1998. — № 2. — С. 18—24.
6. Лежнюк П. Д., Аль-Хайтмер Абдалла. Оптимизация режимов электрических сетей с учетом ущерба, вызываемого отклонениями напряжения // Энергетика. — 1991. — № 11. — С. 27—31.
7. Яндудский А. С., Головатюк Н. Ф., Хлыстов В. М. Вопросы регулирования напряжения в электрических сетях // Энергетика и электрификация. — 1996. — № 4. — С. 36—38.
8. Фокин Ю. А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 256 с.
9. Математическая статистика / Иванова В. М., Калинина В. Н., Нещумова Л. А., Решетникова И. О. — М.: Высшая школа, 1975. — 398 с.
10. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие. — М.: Высшая школа, 2000. — 479 с.

Рекомендована кафедрою метрології та промислової автоматики

Надійшла до редакції 21.10.08
Рекомендована до друку 20.11.08

Гриб Олег Герасимович — завідувач кафедри, **Довгалюк Оксана Миколаївна** — доцент.
Кафедра електропостачання міст, Харківська національна академія міського господарства