

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ НАПРУГИ НА ПРИЄДНАННЯХ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЗМІННОГО СТРУМУ

У статті наведено результати досліджень режимів напруги на шинах тягових підстанцій змінного струму в первинній, районній та тяговій мережі. Отримано числові характеристики розподілів густини ймовірностей напруги. Проаналізовано автокореляційні функції напруги прямої та зворотної послідовності.

В статье приведены результаты исследований режимов напряжения на шинах тяговых подстанций переменного тока в первичной, районной и тяговой сети. Получены числовые характеристики плотностей распределений вероятностей напряжения. Проанализированы автокорреляционные функции напряжений прямой и обратной последовательности.

Research results of voltage modes at traction substation buses in primary, regional and traction network are presented in the article. Numeric characteristics of probability density distributions are obtained. Autocorrelation functions of positive and negative sequence voltages are analyzed.

ВСТУП

Швидкі темпи та глобальні масштаби тотальної електрифікації 60-х років змусили застосовувати тягові трансформатори з трьома обмотками на тягових підстанціях змінного струму. На перший погляд, зниження капітальних витрат внаслідок живлення великих районів від обмотки середньої напруги насправді призводить до збитків, пов'язаних із порушенням якості електричної енергії, і, як правило, найбільш вагомо у районних споживачів.

У споживачів, які живляться від районної обмотки тягового трансформатора, найчастіше виникає завищене значення напруги в мережі. Це викликано необхідністю підтримання мінімальної напруги в контактній мережі на лімітуючій блок-ділянці для забезпечення необхідного рівня пропускної спроможності системи електропостачання ділянки залізниці.

В деяких випадках залежно від розгалуженості нетягових електричних мереж та особливостей схем живлення контактної мережі практично неможливо забезпечити одночасно мінімальний рівень напруги в контактній мережі та дотримання нормованих показників якості у нетягових споживачів стосовно режимів напруги. Проблема ускладнюється моральним та фізичним зносом пристроїв регулювання напруги на тягових підстанціях. Для регулювання напруги застосовуються пристрої регулювання напруги під навантаженням (РПН), принцип дії яких базується на перемиканні анцапф первинної обмотки тягового трансформатора. Зміна кількості робочих витків обмотки 110 (154) кВ

призводить до зміни режиму напруги і у двох інших обмотках 35 (10) та 27,5 кВ.

В умовах експлуатації вибір режиму напруги на тягових підстанціях виконується на користь забезпечення безпеки руху поїздів та підтримання рівня напруги на лімітуючій блок-ділянці із запасом.

Метою даної роботи є аналіз режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму.

В якості об'єкта дослідження обрано шість тягових підстанцій Одеської залізниці, на яких проводились експериментальні дослідження.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Одним із найважливіших показників режиму роботи електроенергетичної системи, який безпосередньо впливає на якість електричної енергії, надійність електропостачання споживачів та економічність роботи системи електропостачання є напруга [1].

Тягова мережа змінного струму є специфічним споживачем електричної енергії. Для неї характерні наступні особливості:

1. Струми тягових навантажень є комплексними випадковими величинами, які неперервно змінюються в часі та по модулю і фазі в широкому діапазоні.

2. Внаслідок однофазних тягових навантажень та незважаючи на застосування відомих способів зниження несиметрії (приєднання фаз тягових підстанцій за правилом гвинта, нерегульованої компенсації реактивної потужності відстаючої фази), в електроенергетичній системі виникають несиметричні режими.

3. На сьогодні експлуатуються електровози змінного струму як з напівпровідниковими некерованими перетворювачами, так і з керованими. Некеровані перетворювачі викликають несинусоїдність тягових струмів, тобто появу в електроенергетичній системі поряд зі струмами основної частоти, струмів вищих гармонійних складових непарного порядку, починаючи з третього. В керованих перетворювачах окрім струмів, частоти яких кратні основній частоті в мережі, виникають також і некрлатні, які прийнято називати інтергармоніками.

Рівні напруги на шинах різних тягових підстанцій, як з пристроями компенсації реактивної потужності, так і без них (рис. 1 – 2) є випадковими процесами.

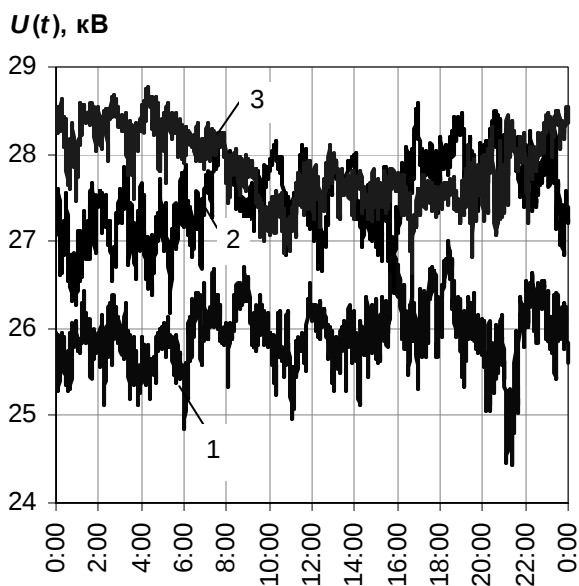


Рис. 1. Реалізації напруги на шинах тягових підстанцій з компенсацією реактивної потужності: 1, 2 – нерегульована; 3 – з плавним регулюванням

Наведені в табл. 1 статистичні характеристики режимів напруги тягової підстанції О за три послідовні доби спостереження змінюються досить незначно. Числові характеристики положення розподілу, такі як математичне очікування $M(U)$, мода $Mo(U)$ та медіана $Me(U)$ відрізняються між собою на величину не більше 0,4...0,6 %. Середньоквадратичне відхилення $\sigma(U)$ величини напруги відносно математичного очікування $M(U)$ складає близько 0,490 кВ. Розподіли напруги асиметричні відносно математичного очікування та крутизна кожного розподілу відрізняється від крутизни нормального закону розподілу. Центральні моменти 3-го та 4-го порядку, які описують ці

властивості розподілів $As(U)$ та $Ex(U)$, набувають від'ємних значень одного порядку.

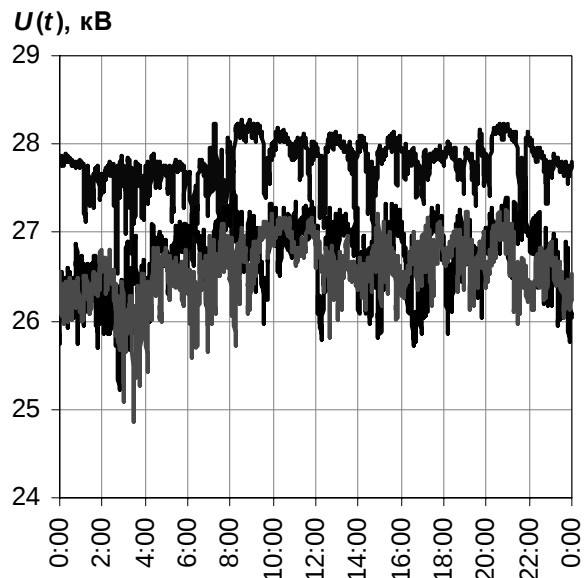


Рис. 2. Реалізації напруги на шинах тягових підстанцій без компенсації реактивної потужності

Оскільки розподіли ймовірностей кожної реалізації напруги практично не змінюються, то їх достатньо точно можна описати нормальним законом розподілу (рис. 3).

Таблиця 1

Числові характеристики напруги на шинах 27,5 кВ тягової підстанції О

Параметр	1 доба	2 доба	3 доба
$M(U)$, кВ	27,364	27,414	27,522
$Mo(U)$, кВ	27,599	27,349	27,621
$Me(U)$, кВ	27,456	27,431	27,540
$D(U)$, кВ ²	0,241	0,243	0,217
$\sigma(U)$, кВ	0,490	0,491	0,465
$As(U)$	-0,291	-0,124	-0,281
$Ex(U)$	-0,318	-0,333	-0,308

Значної зміни статистичні характеристики набувають при вимушеному режимі роботи тягових підстанцій. Дані табл. 2 показують, як змінились числові характеристики напруги при ускладненні руху поїздів внаслідок утворення ожеледі на проводах контактної мережі.

Погіршення струмознімання та велика кількість коротких замикань в контактній мережі призвели до пошкодження струмоприймачів

рухомого складу та відключення пристроїв електропостачання.

В результаті аварійних відключень обладнання та наявності значного дугового струмознімання характер зміни режиму напруги в тяговій мережі другої доби принципово відрізнявся від першої.

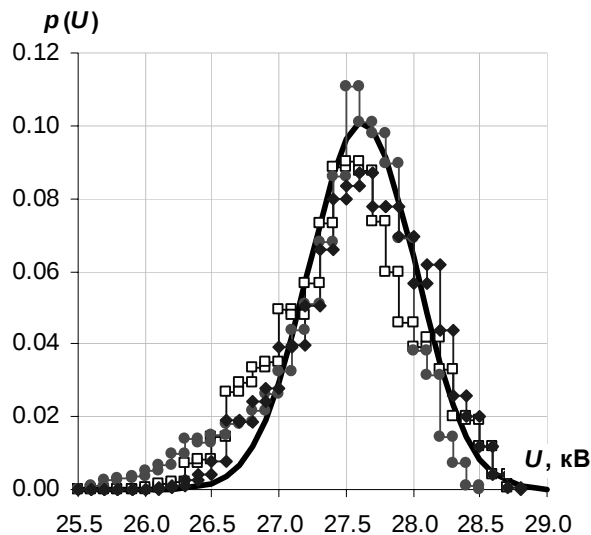


Рис. 3. Функції густини розподілів ймовірностей напруги на шинях тягової підстанції О

У вимушеному режимі роботи системи тягового електропостачання закон розподілу щільності ймовірностей напруги на шинях 27,5 кВ тягової підстанції можна отримати у вигляді суперпозиції двох нормальних законів (рис. 4).

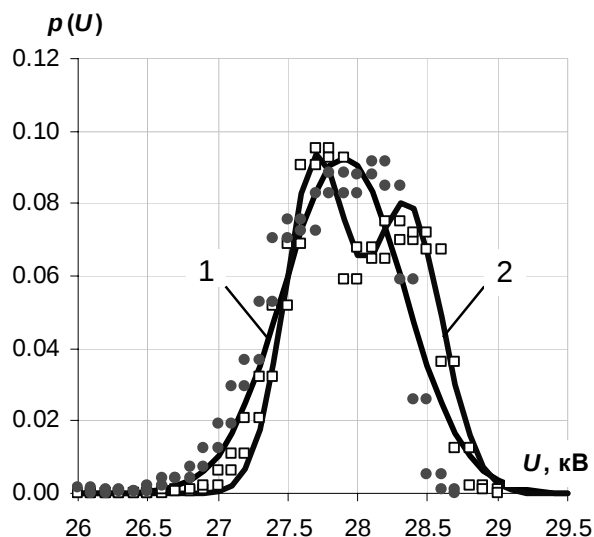


Рис. 4. Функції густини розподілів ймовірностей напруги на шинях тягової підстанції Ч:
1 – нормальний режим; 2 – вимушений режим

Загалом по всім шести тяговим підстанціям числові характеристики положення розподілу змінювались в межах 25,93...27,87 кВ, дисперсія розподілів 0,079...0,203 кВ. Асиметрія розподілу завжди набувала від'ємних значень – від -0,058 до -1,0. Ексцеси розподілів набували як додатних, так і від'ємних значень в межах від -0,766 до 1,617 (табл. 2).

Таблиця 2

Числові характеристики режимів напруги на шинях 27,5 кВ тягових підстанцій

Параметр	З компенсацією			Без компенсації		
	З	О	Ч	Ш	П	Т
$M(U)$	25,93	27,54	27,87	26,58	26,72	27,79
$Mo(U)$	25,96	27,87	27,59	26,63	26,84	27,84
$Me(U)$	25,94	27,57	27,85	26,63	26,80	27,84
$D(U)$	0,14	0,20	0,17	0,12	0,17	0,08
$\sigma(U)$	0,38	0,45	0,41	0,35	0,41	0,28
$As(U)$	-0,28	-0,29	-0,06	-0,72	-0,59	-1,0
$Ex(U)$	0,70	-0,43	-0,77	1,04	-0,32	1,62

Режими напруги на районній та первинній обмотках проаналізуємо окремо для прямої та зворотної послідовностей. Як видно з рис. 5, характер зміни напруги в первинній мережі (154 кВ) прямої послідовності двох тягових підстанцій З та О подібні, проте відрізняються за величиною.

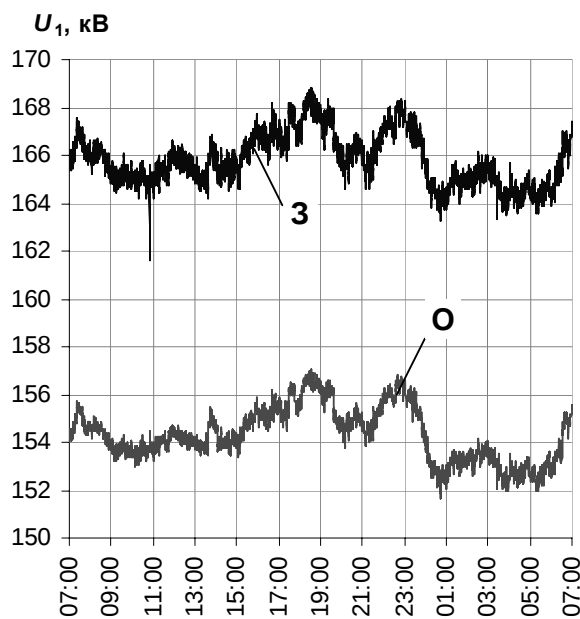


Рис. 5. Рівень напруги прямої послідовності на шинях первинної напруги двох підстанцій

Характери зміни напруги в районній мережі кожної підстанції, навпаки, не подібні, проте практично рівні середні значення на інтервалі спостереження (рис. 6).

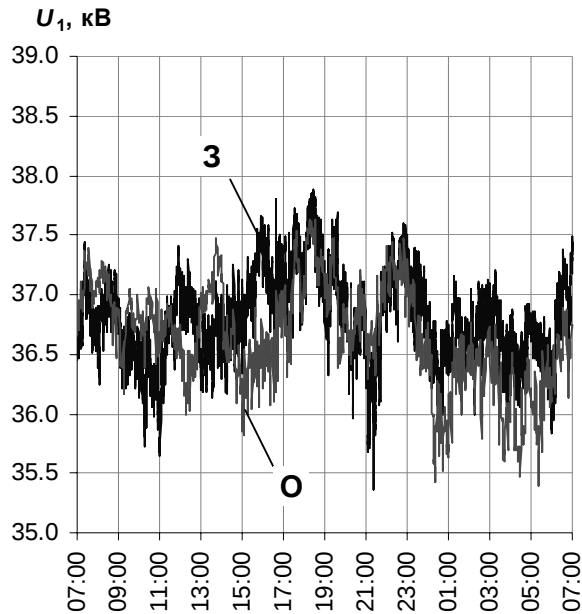


Рис. 6. Рівень напруги прямої послідовності на шинах районної напруги двох підстанцій

Режими напруги в первинній мережі мають характерні тримодальні розподіли (рис. 7). В загальному випадку математичне очікування, мода та медіана не співпадають між собою. Розкид значень в первинній мережі відносно математичного очікування складає більше 1 кВ, що є найбільшим значенням порівняно з розподілами напруги в тяговій та районній мережі.

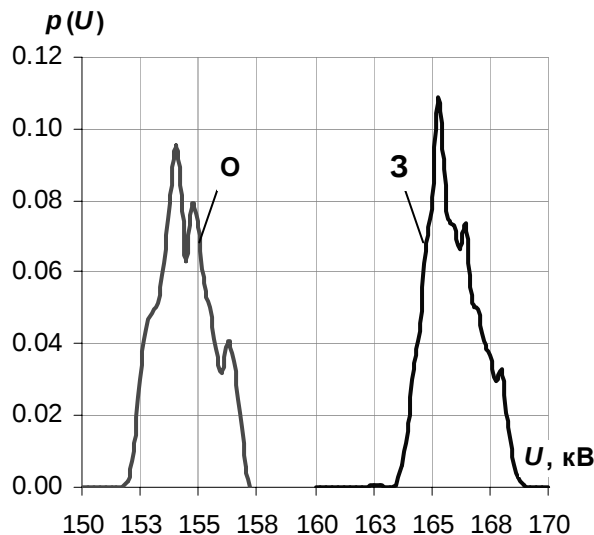


Рис. 7. Функції густини розподілів ймовірностей напруги прямої послідовності первинної мережі

Числові характеристики положення в розподілах напруги районної мережі різних тягових підстанцій (рис. 8) практично співпадають при різних значеннях характеристик положення в первинній завдяки пристроям регулювання напруги.

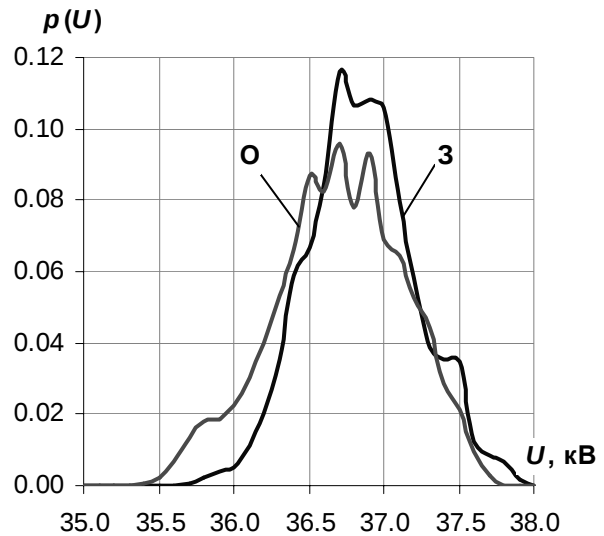


Рис. 8. Функції густини розподілів ймовірностей напруги прямої послідовності районної мережі

Для всіх підстанцій на приєднаннях первинної та районної мереж центральні моменти 4-го порядку набувають від'ємних значень (табл. 3), що свідчить про плосковершинний характер функцій густини розподілу ймовірностей. Асиметрія розподілів може приймати як додатні, так і від'ємні значення, що вказує на наявність скошеності розподілу вправо чи вліво відносно нормального розподілу.

Таблиця 3

Числові характеристики режимів напруги в первинній та районній мережі

Параметр	Первинна мережа		Районна мережа	
	3	O	3	O
$M(U)$	165,817	154,330	36,800	36,648
$Mo(U)$	165,982	153,776	36,707	36,808
$Me(U)$	165,711	154,240	36,786	36,658
$D(U)$	1,201	1,283	0,132	0,190
$\sigma(U)$	1,096	1,133	0,364	0,436
$As(U)$	0,284	0,182	0,095	-0,244
$Ex(U)$	-0,480	-0,739	-0,030	-0,298

Отримані результати вказують на наявність і малих, і великих змін в числових характеристиках. З цього випливає, що строго стаціонарних процесів в системі тягового електропостачання не відбувається [2].

Проте за досить малих змін процес зміни напруги можна вважати стаціонарним у вузькому сенсі [3].

За значних змін числових характеристик процес зміни напруги вважають або слабо стаціонарним, або взагалі нестаціонарним.

Таким чином, стаціонарними у вузькому сенсі будуть режими напруги за нормального режиму роботи системи тягового електропостачання.

При виникненні вимушених режимів режим напруги необхідно розглядати в якості слабо стаціонарного чи нестаціонарного процесу.

Для аналізу випадкових процесів застосовують автокореляційні функції, які дозволяють виявити наявність не випадкових складових та оцінити не випадкові параметри цих процесів [4].

Для більш детального аналізу режимів напруги на шинах тягових підстанцій визначимо для кожної реалізації напруги автокореляційні функції.

Як видно з рис. 9 – 11, автокореляційні функції напруги на шинах 27,5 кВ тягових підстанцій в первинній та районній мережі мають випадкові та не випадкові складові. Причому, в первинній мережі тягових підстанцій не випадкові складові превалюють над випадковими.

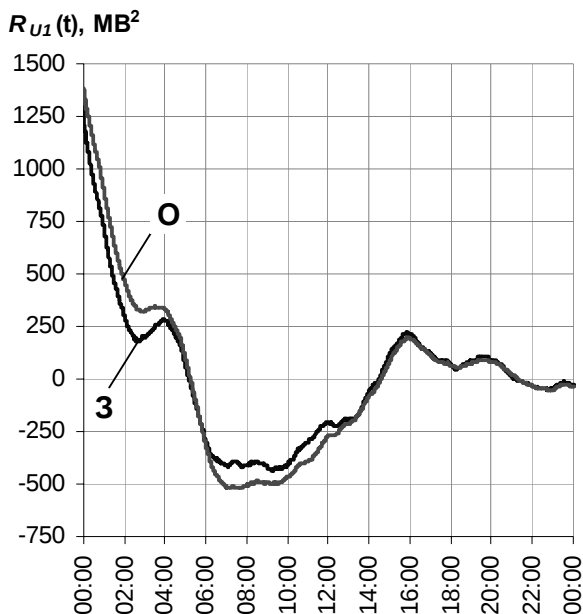


Рис. 9. Автокореляційні функції напруги прямої послідовності на шинах первинної напруги

Крім того, автокореляційні функції напруги прямої послідовності в первинній мережі для двох різних тягових підстанцій практично співпадають (рис. 9). Це вказує на те, що характер зміни тягового навантаження несуттєво впливає на характер зміни напруги прямої послідовності в первинній мережі тягових підстанцій.

Характер зміни напруги прямої послідовності в районній мережі подібний до відповідного в первинній мережі, проте автокореляційні функції напруги двох різних підстанцій (рис. 10) суттєво відрізняються між собою та мають в собі складові з різними значеннями періодів.

Таким чином, спотворення режиму напруги в районній обмотці тягового трансформатора визначається джерелами, які не присутні в первинній мережі тягових підстанцій.

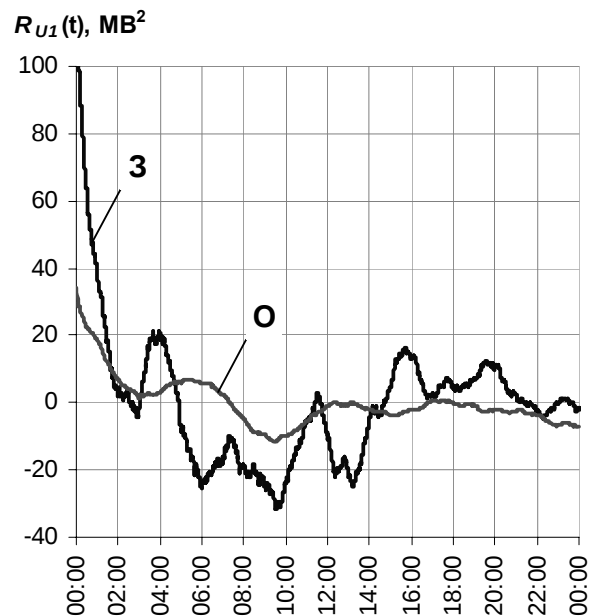


Рис. 10. Автокореляційні функції напруги прямої послідовності на шинах районної напруги

Характери зміни напруги зворотної послідовності в первинній та районній мережі між собою не подібні, суттєво відрізняються і їх автокореляційні функції (рис. 12, 13).

Невідповідність періодів складових напруги зворотної послідовності з періодами складових прямої послідовності свідчить про різні причини їх виникнення.

Логічно припустити, що безпосередньо тягове навантаження визначає наявність випадкових складових в автокореляційних функціях напруги прямої та зворотної послідовності.

Як видно з рис. 13 – 14, напруга зворотної послідовності в районній мережі має в собі ще більшу кількість періодичних складових, тобто

змінюється частіше від напруги прямої послідовності.

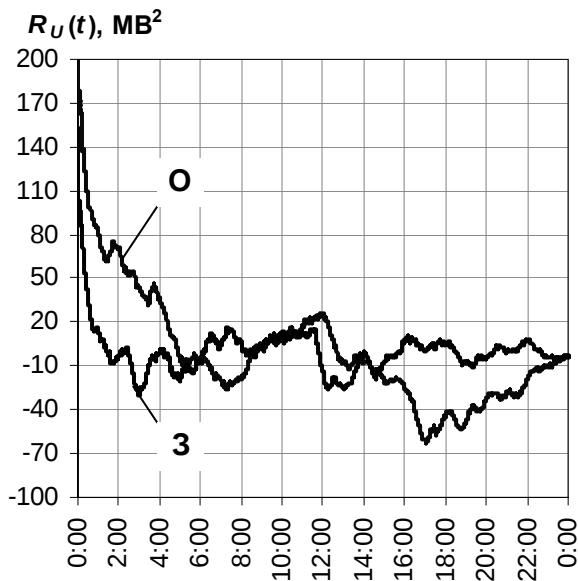


Рис. 11. Автокореляційні функції напруги на шинах тягової підстанції 27,5 кВ

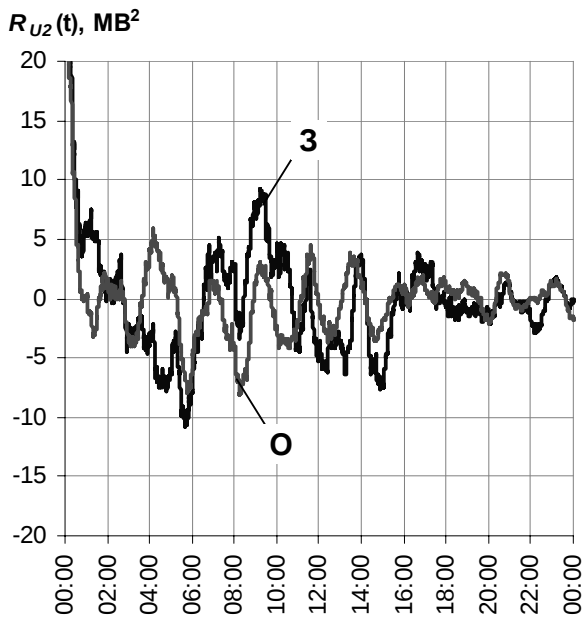


Рис. 12. Автокореляційні функції напруги зворотної послідовності на шинах первинної напруги

ВИСНОВКИ

1. В загальному випадку величину напруги на кожному приєднанні тягової підстанції можна вважати випадковою величиною, в основі розподілів щільності ймовірностей якої виступає один або сума нормальних законів.

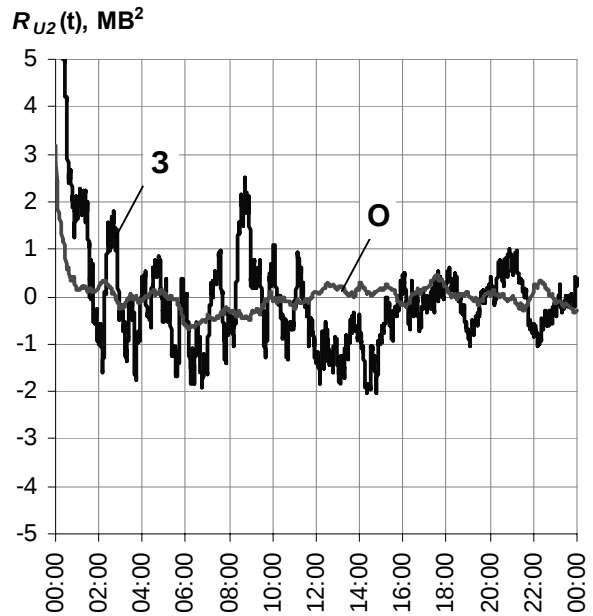


Рис. 13. Автокореляційні функції напруги зворотної послідовності на шинах районної напруги

2. В нормальному режимі роботи системи тягового електропостачання процес зміни напруги можна вважати стаціонарним у вузькому сенсі. Вимушені режими викликають відповідні зміни в режимах напруги, тривалість яких визначить процес зміни напруги або стаціонарним в широкому сенсі, або нестаціонарним.

3. Розглядаючи окремо режими напруги прямої та зворотної послідовностей, за допомогою автокореляційних функцій можна виявити не випадкові складові, превалююче значення яких виявлено в напрузі прямої послідовності первинної мережі.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Тимофеев, Д. В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками [Текст] / Д. В. Тимофеев. – М.: Энергия, 1972. – 296 с.
2. Bollen, M. H. J. Signal Processing of Power Quality Disturbances [Текст] / M. H. J. Bollen, I. Y. H. Gu. – Piscataway, NJ.: IEEE Press, 2006. – 861 p.
3. Отнес, Р. Прикладной анализ временных рядов [Текст] / Р. Отнес, Л. Энуксон. – М.: Мир, 1982. – 428 с.
4. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных [Текст] / Дж. Бендат, Л. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 527 с.

Надійшла до редколегії 16.09.2009.

Прийнята до друку 24.09.2009.