

**АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНО-КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ТЕОРІЇ
СТАЦІОНАРНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ
ОБВІДНОЇ НАПРУГИ ПРИ РОБОТІ РІЗКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

У даній роботі розглянуто метод моделювання обвідної напруги в мережах з різкозмінним навантаженням, заснований на спектрально-кореляційній теорії стаціонарних випадкових процесів. Наведено параметри кореляційних функцій коливань напруги, що створюються деякими типами технологічних агрегатів з різкозмінним режимом роботи. Наведена математична модель електромагнітних процесів, що протікають при роботі різкозмінних навантажень, дозволяє вирішити комплекс питань, пов'язаних з розрахунками коливань напруги в практиці проектування і експлуатації.

Ключові слова: різкозмінне навантаження, моделювання, випадковий процес, кореляційна функція, диференційовність.

Саєнко Ю.Л., Бараненко Т.К. Аспекты применения спектрально-корреляционной теории стационарных случайных процессов для моделирования огибающей напряжения при работе резкопеременных нагрузок. Рассмотрен метод моделирования огибающей напряжения в сетях с резкопеременными нагрузками, основанный на спектрально-корреляционной теории стационарных случайных процессов. Использование спектрального представления кривой напряжения с учетом частотных характеристик исследуемых объектов позволяет в полной мере учесть влияние частоты изменения различных показателей качества электроэнергии на различные виды электрооборудования и технологические процессы. Приведены параметры корреляционных функций колебаний напряжения, создаваемых некоторыми типами технологических агрегатов с резкопеременным режимом работы. Показано использование интеграла Дюамеля для приближенного определения ординат реализации случайной функции огибающей напряжения, имеющей известную корреляционную функцию. Огибающая напряжения в сети с резкопеременной нагрузкой получена путем аппроксимации приложенного на вход электрической цепи воздействия с помощью совокупности единичных функций, сдвинутых друг относительно друга на время, равное шагу дискретизации Δt . Показано, что при достаточно малом шаге дискретизации Δt и большой длине реализации T выборочный алгоритм дает очень малую применительно к моделированию случайного процесса погрешность (не более 10%). Приведен алгоритм определения длины реализации T и шага дискретизации Δt , приведены выражения дисперсий производной случайного процесса для различных корреляционных функций. Рассмотрена необходимость выполнения условия дифференцируемости стационарного случайного процесса при решении ряда задач, связанных с режимами резкопеременных нагрузок, приведены соответствующие выражения дисперсий производной случайного процесса для различных корреляционных функций. Приведенная математическая модель электромагнитных процессов, протекающих при работе резкопеременных нагрузок, позволяет решить комплекс вопросов, связанных с расчетами колебаний напряжения в практике проектирования и эксплуатации.

Ключевые слова: резкопеременная нагрузка, моделирование, случайный процесс, корреляционная функция, дифференцируемость.

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ylys62@i.ua

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, tbaranenko@gmail.com

Yu.L. Sayenko, T.K. Baranenko. Aspects of the spectral-correlation theory of stationary random processes application for modelling the voltage envelope with rapidly varying loads. The method of modelling the voltage envelope in networks with rapidly varying loads based on the spectral-correlation theory of stationary random processes has been considered. The use of the voltage curve spectral form, taking into account the frequency characteristics of the objects under study, makes it possible to fully take into account the effect of the frequency of power quality indices changes on various types of electrical equipment and technological processes. The correlation functions parameters of voltage fluctuations generated by some types of technological installations with rapidly varying mode of operation are given. The application of the Duhamel integral for the approximate determination of the ordinates of the random function realization of the voltage envelope, which has a known correlation function, is shown. The voltage envelope in the network with a rapidly varying load is obtained by approximating the applied impact to the input of electrical circuit using a set of unit functions which are shifted relative to each other by a time equal to the discretization step Δt . It has been shown that with a sufficiently small discretization step Δt and a large sampling length T , the sampling algorithm gives a very small error as applied to modelling a random process (no more than 10%). An algorithm for determining the sampling length T and the discretization step Δt has been given as well as the expressions for the variances of the derivative of the random process for different correlation functions. The necessity of fulfilling the condition of differentiability of a stationary random process when solving a number of problems associated with rapidly varying loads modes has been considered, corresponding expressions for the variances of the derivative of a random process for different correlation functions are given. The mathematical model of electromagnetic processes occurring during the operation of rapidly varying loads allows solving a number of issues related to the calculation of voltage fluctuations in the practice of design and operation.

Keywords: rapidly varying load, modelling, random process, correlation function, differentiability.

Постановка проблеми. Широке застосування в промисловості різкозмінних електричних навантажень тісно пов'язане з проблемою забезпечення електромагнітної сумісності і нормалізацією показників якості електроенергії. Крім виникнення коливань напруги, додаткових втрат електроенергії в системах електропостачання споживачів з різкозмінним режимом роботи також має місце поява гармонійних і інтергармонійних складових в спектрі напруги і струму. Це пов'язано як із застосуванням різних перетворювачів для живлення різкозмінних навантажень (наприклад, тиристорні приводи прокатних станів), так і нелінійною вольт-амперною характеристикою самих навантажень (дугові сталеплавильні печі (ДСП), зварювальні апарати і т. п.). Важливим аспектом є вибір коректних методів моделювання, які істотно залежать від характеру і особливостей модельованого процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянемо підхід до моделювання кривих напруги в електричних мережах з різкозмінним навантаженням. У загальному випадку до задання моделювання напруги в електричних мережах можна підійти з таких позицій:

- 1) напруги вважати незмінними в часі і їх величини задавати дискретно;
- 2) напруги розглядати як процеси, що змінюються в часі, але детерміновані. При цьому закони зміни можна розглядати як періодичні процеси, що представляються, наприклад, рядом Фур'є;
- 3) напруги розглядати як змінні випадкові процеси.

Численні дослідження показують, що величини напруг в електричних мережах не залишаються незмінними протягом тривалих проміжків часу. При цьому зміни в фазах можуть бути різними. Використання спектрального уявлення кривої напруги з урахуванням частотних характеристик досліджуваних об'єктів дозволяє в повній мірі врахувати вплив частоти зміни різних показників якості електроенергії при впливі неякісної електроенергії на різні види електрообладнання та технологічні процеси.

Одним із способів прогнозування величин електромагнітних завод є моделювання кривих напруги в електричних мережах з різкозмінним навантаженням, при цьому спотворення напру-

ги слід розглядати як змінні випадкові процеси зі своїми законами розподілу, видами і параметрами кореляційних функцій. В цьому випадку для вирішення поставленого завдання необхідно відтворити реальні процеси зміни обвідної напруги з задаваними і змінюваними в певних межах статистичними і деякими іншими характеристиками цих випадкових процесів [1-5].

Як відомо, основними необхідними характеристиками є кореляційна функція і спектральна характеристика. При цьому рішення задачі істотно спрощується, якщо розглянуті процеси зміни обвідної напруги характеризуються нормальним законом розподілу і є стаціонарними або кусочно-стаціонарними. У більшості практичних завдань останнє, як правило, виконується.

Мета статті – аналіз методу моделювання обвідної напруги в мережах з різкозмінним навантаженням, заснований на спектрально-кореляційній теорії стаціонарних випадкових процесів.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що нормовані кореляційні функції $k_U(\tau)$ для ділянок стаціонарності випадкових процесів $U(t)$ зміни напруги досить добре апроксимуються виразами виду [6]:

$$k_U(\tau) = e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau; \quad (1)$$

$$k_U(\tau) = e^{-\alpha|\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 |\tau| \right), \quad (2)$$

де α – коефіцієнт загасання кореляційної функції; ω_0 – власна частота кореляційної функції.

Діапазони зміни α і ω_0 кореляційних функцій напруги видів (1) і (2), що створюються деякими типами технологічних агрегатів, наведені в табл. 1. Для несиметричних навантажень наведені параметри кореляційних функцій змін напруги прямої U_1 (верхні значення) і зворотної U_2 (нижні значення) послідовностей.

Таблиця 1

Параметри кореляційних функцій коливань напруги

Навантаження	Кореляційна функція виду (1)		Кореляційна функція виду (2)	
	α, c^{-1}	ω_0, c^{-1}	α, c^{-1}	ω_0, c^{-1}
Стан 950	0,190 - 0,430	0,590 - 1,270	0,410 - 0,760	0,620 - 1,310
Блюмінг 1150	0,330 - 0,410	0,980 - 1,310	0,380 - 0,630	1,050 - 1,430
Стан 250	0,036 - 0,074	0,870 - 1,110	0,640 - 0,960	0,130 - 0,210
ДСП-200	2,200 - 3,760	3,130 - 6,950	2,600 - 4,050	3,800 - 80,50
	2,980 - 5,920	3,560 - 7,620	4,210 - 6,120	4,300 - 8,170
Рудно-термічна піч	0,029 - 0,043	0,083 - 0,120	0,058 - 0,095	0,122 - 0,480
	0,090 - 0,130	0,170 - 0,250	0,120 - 0,260	0,230 - 0,640

Для наближеного визначення ординат реалізації випадкової функції $u(t)$, що має відому кореляційну функцію $k_U(\tau)$, скористаємося інтегралом Дюамеля:

$$u_{\text{вх}}(t) = \int_0^t h(\tau) u_{\text{вх}}(t-\tau) d\tau, \quad (3)$$

де $h(\tau)$ – імпульсна перехідна функція; $u_{\text{вх}}(t)$ – випадкова функція, що приймає значення в інтервалі $0 \div 1$ («білий шум»).

Інтеграл Дюамеля (3) має фізичний зміст, що полягає в тому, що добуток $h(t_2 - t_1)u(t_1)dt_1$ можна розглядати як врахування впливу зовнішнього «імпульсу» інтенсивністю $u(t_1)dt_1$, що надійшов на «вхід» системи в момент часу t_1 , на «виході» системи в момент часу t_2 [7].

Інтеграл Дюамеля може бути отриманий, якщо апроксимувати прикладений на вході кола вплив за допомогою сукупності одиничних функцій, зсунутих одна від одної на час, що дорівнює Δt , тобто

$$u_{aux}(t) = \sum_{i=0}^t h(i\Delta t) u_{ex}(t - i\Delta t), \quad (4)$$

де $i = 0, 1, 2, \dots$; Δt – крок дискретизації функції $u_{ex}(t)$, вибір якого, так само як і вибір довжини реалізації T функції $u_{ex}(t)$, розглянуто нижче.

Згідно [8] для кореляційних функцій видів (1) і (2), що найбільш часто можна зустріти, маємо:

- для кореляційної функції виду (1)

$$h(\tau) = \frac{\alpha^2 + \omega_0^2}{\omega_0} \sqrt{(\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2} - \alpha)^2 + \omega_0^2} \cdot e^{-\alpha|\tau|} \sin \left[\omega_0 \tau + \arctg \frac{\omega_0}{\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2} - \alpha} \right]; \quad (5)$$

- для кореляційної функції виду (2)

$$h(\tau) = \frac{\alpha^2 + \omega_0^2}{\omega_0^2} e^{-\alpha\tau} \sin \omega_0 \tau. \quad (6)$$

Для перевірки точності апроксимації функції $u(t)$, визначеної за формулою (3), порівнювалися значення кореляційних функцій заданої $k_U(\tau)$ і побудованої для отриманої реалізації $\tilde{u}(t)$ ($\tilde{k}_U(\tau)$).

Похибка обчислених значень $\tilde{k}_U(\tau)$ залежить від довжини реалізації $u(t)$ і кроку дискретизації Δt , причому зазвичай $\Delta t = \Delta\tau$, де $\Delta\tau$ – крок побудови кореляційної функції.

Аналіз показує, що вплив кроку дискретизації на похибку обчислених значень $k_U(\tau)$ в порівнянні з похибкою від кінцівки довжини реалізації дуже малий, якщо крок дискретизації обраний так, що на умовний інтервал загасання кореляційної функції τ , припадає не менше десяти точок.

Математичний експеримент показав, що при досить малому кроці дискретизації і великій довжині реалізації вибірковий алгоритм дає дуже малу стосовно до моделювання випадкового процесу похибку (не більше 10%), що ілюструють рис. 1 і рис. 2.

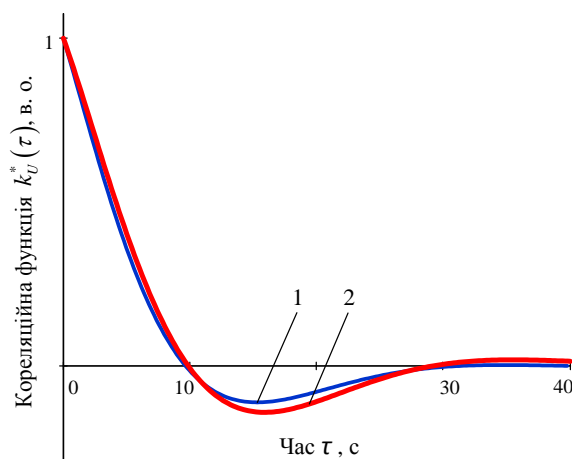


Рис. 1 – Нормовані кореляційні функції вихідного випадкового процесу – 1 і модельованого – 2 при $\alpha = 0,13 \text{ c}^{-1}$; $\omega_0 = 0,16 \text{ c}^{-1}$

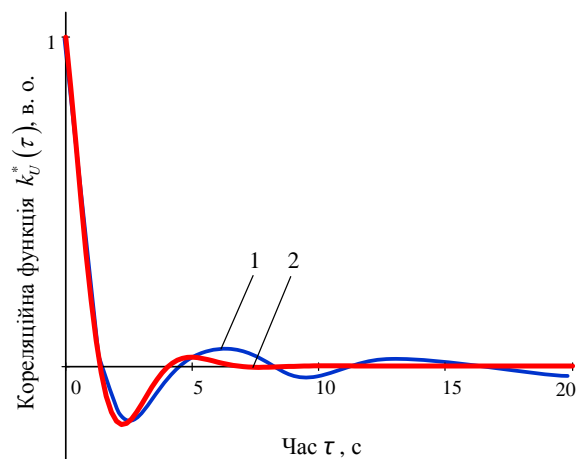


Рис. 2 – Нормовані кореляційні функції вихідного випадкового процесу – 1 і модельованого – 2 при $\alpha = 0,7 \text{ c}^{-1}$; $\omega_0 = 1,16 \text{ c}^{-1}$

Тому для заданих кореляційних функцій виду (1) і (2) доцільний наступний алгоритм визначення T і Δt .

1. Визначається перший нуль кореляційної функції. При цьому:

- для кореляційної функції виду (1)

$$\tau_0 = \frac{\pi}{2\omega_0}; \tag{7}$$

- для кореляційної функції виду (2)

$$\tau_0 = \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{\alpha}{\omega_0} \right). \tag{8}$$

2. Для додання спільності зі статистичними розрахунками була прийнята для всіх видів графіків навантаження однакова величина умовного інтервалу загасання $\tau_3 = 6/\alpha$ (найбільше з виявлених значень).

3. Крок дискретизації Δt вибирається в такий спосіб

$$\Delta t = \begin{cases} \frac{1}{10} \tau_0, & \text{якщо } \tau_0 < \tau_3; \\ \frac{1}{10} \tau_3, & \text{якщо } \tau_3 < \tau_0. \end{cases} \tag{9}$$

4. Довжина реалізації

$$T = 40\tau_3, \tag{10}$$

тому при такому співвідношенні виходить найменша похибка в усіх випадках апроксимації функції $\tilde{k}_U(\tau)$ функцією $k_U(\tau)$.

При вирішенні ряду задач, пов'язаних з режимами різкозмінних навантажень, часто застосовуються методи теорії викидів випадкових процесів. Основною умовою в цьому випадку є диференційовність стаціонарного випадкового процесу, для чого достатньою умовою є існування другої похідної від кореляційної функції $k_U(\tau)$ при нульовому значенні її аргументу, тобто

$$\sigma_U^2 = - \left. \frac{d^2 k_U(\tau)}{d\tau^2} \right|_{\tau=0}, \tag{11}$$

де σ_U^2 – дисперсія похідної випадкової функції $u(t)$.

Такої вимозі відповідають кореляційні функції видів $\sigma_U^2 e^{-\alpha^2 \tau^2}$, $\sigma_U^2 e^{-\alpha^2 \tau^2} \cos \omega_0 \tau$, $\sigma_U^2 e^{-\alpha|\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 |\tau| \right)$ і $\sigma_U^2 e^{-\alpha|\tau|} (1 + \alpha|\tau|)$, які мають безперервні похідні в точці $\tau = 0$.

Такі ж кореляційні функції як $\sigma_U^2 e^{-\alpha|\tau|}$, $\sigma_U^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau$ відповідають недиференційованим процесам. У табл. 2 наведені вирази дисперсій похідної випадкового процесу для різних кореляційних функцій.

Таблиця 2

Дисперсії похідної випадкового процесу для різних кореляційних функцій	
Кореляційна функція $k_U(\tau)$	Дисперсія σ_U^2
$\sigma_U^2 e^{-\alpha \tau } \left(\cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$\sigma_U^2 (\alpha^2 + \omega_0^2)$
$\sigma_U^2 e^{-\alpha^2 \tau^2}$	$2\sigma_U^2 \alpha^2$
$\sigma_U^2 e^{-\alpha^2 \tau^2} \cos \omega_0 \tau$	$2\sigma_U^2 \alpha^2$
$\sigma_U^2 e^{-\alpha \tau } (1 + \alpha \tau)$	$\sigma_U^2 \alpha^2$

Для конкретизації математичних моделей ударних навантажень як джерел коливань напруги в вузлі мережі необхідно знати α і ω_0 . Визначення їх аналітичним шляхом важко, тому в практичних розрахунках доцільно користуватися експериментальними значеннями для конкретних електроприймачів (див. табл. 1).

Висновки

1. У зв'язку з тим, що коефіцієнт загасання і частота коливань кореляційної функції різні в різних фазах мережі, слід вибирати найменші значення α і ω_0 . Це відповідає самому несприятливому випадку з точки зору впливу коливань на зір і електрообладнання.

2. Наведена математична модель різкозмінних навантажень дозволяє вирішити комплекс питань, пов'язаних з розрахунками коливань напруги в практиці проектування і експлуатації.

Перелік використаних джерел:

1. Parkinson D.B. Simulation of stochastic processes with known correlation functions / D.B. Parkinson // *Reliability Engineering & System Safety*. – 1993. – Vol. 40. – № 3. – Pp. 213-220. – Mode of access: DOI: 10.1016/0951-8320(93)90061-3.
2. Antoni Jérôme. Fast computation of the spectral correlation / Jérôme Antoni, Ge Xin, Nacer Hamzaoui // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2017. – Vol. 92. – Pp. 248-277. – Mode of access: DOI: 10.1016/j.ymsp.2017.01.011.
3. Мислович М. Моделювання діагностичних сигналів електроенергетичного обладнання за допомогою лінійних випадкових процесів з дискретним часом в рамках енергетичної теорії / М. Мислович, Т. Пристайло, М. Самойленко // *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. – 2016. – Вип. 87. – С. 5-11.
4. Костюк В.О. Системний огляд методів дослідження енергоустановок з мінливими технологічними показниками й практичні аспекти моделювання / В.О. Костюк // *Проблеми загальної енергетики*. – 2015. – Вип. 2. – С. 39-47.
5. Лозинський О.Ю. Розвиток методів та засобів комп'ютерного моделювання для дослідження електричних режимів дугової сталеплавильної печі / О.Ю. Лозинський, Я.С. Паранчук, Р.Я. Паранчук, Ф.Д. Матіко // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2018. – № 3. – С. 28-36. – Режим доступу: DOI: 10.20998/2074-272X.2018.3.04.
6. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
7. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций / А.А. Свешников. – М. : Наука, 1968. – 463 с.
8. Бобнев М.П. Генерирование случайных сигналов / М.П. Бобнев. – М. : Энергия, 1971. – 240 с.

References:

1. Parkinson D.B. Simulation of stochastic processes with known correlation functions. *Reliability Engineering & System Safety*, 1993, vol. 40, № 3, pp. 213-220. doi: 10.1016/0951-8320(93)90061-3.
2. Antoni Jérôme, Xin Ge, Hamzaoui Nacer. Fast computation of the spectral correlation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, vol. 92, pp. 248-277. doi: 10.1016/j.ymsp.2017.01.011.
3. Myslovych M., Prystajlo T., Samojlenko M. Modeljuvannja diagnostychnyh sygnaliv elektroenergetychnogo obladnannja za dopomogoju linijnyh vypadkovykh procesiv z dyskretnym chasom v ramkah energetychnoi' teorii' [Design of diagnostic signals using electricity linear random processes with discrete time energy in theory]. *Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, construction, road and melioration machines*, 2016, iss. 87, pp. 5-11. (Ukr.)
4. Kostjuk V.O. Systemnyj ogljad metodiv doslidzhennja energoustanovok z minlyvymy tehnologichnymy pokaznykamy j praktychni aspekty modeljuvannja [System overview of the methods used to study power units with variable process parameters, and practical aspects of modeling]. *Problemy zagal'noi' energetyky – The problems of general energy*, 2015, iss. 2, pp. 39-47. (Ukr.)
5. Lozyns'kyj O.Ju., Paranchuk Ja.S., Paranchuk R.Ja., Matiko F.D. Rozvytok metodiv ta zasobiv komp'juternogo modeljuvannja dlja doslidzhennja elektrychnykh rezhymiv dugovoi' staleplavyl'noi' pechi [Development of methods and means of computer simulation for studying arc furnace electric modes]. *Elektrotehnika i elektromehanika – Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, № 3, pp. 28-36. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.04. (Ukr.)
6. Zhezhelenko I.V., Saenko Ju.L. *Kachestvo jelektroenergii na promyshlennyh predpriyatijah*

- [Electric power quality at industrial enterprises]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 2005, 261 p. (Rus.)
7. Sveshnikov A.A. *Prikladnye metody teorii sluchajnyh funkcij* [Applied methods of random functions theory]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 463 p. (Rus.)
 8. Bobnev M.P. *Generirovanie sluchajnyh signalov* [Generating random signals]. Moscow, Jenergija Publ., 1971. 240 p. (Rus.)

Рецензент: О.М. Холькін
д-р фіз.-мат. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 28.02.2019

УДК 621.316.7

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181432

© Бурбело М.Й.¹, Гадай А.В.², Степура О.В.³

УМОВНІ ПОТУЖНОСТІ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ ЗА НЕСИМЕТРИЧНИХ НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМІВ ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ІЗ ЗАЗЕМЛЕНОЮ НЕЙТРАЛІЮ

В статті проаналізовано несиметричні несинусоїдні режими трифазних мереж із заземленою нейтраллю. Показано, що умовні потужності нульової послідовності q_{β} і q_{α} які є, відповідно, активною та реактивною умовними потужностями нульової послідовності, містять складники, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю, які характеризуються, відповідно, постійною та змінною складовими q_{β} і q_{α} .

Ключові слова: електричні мережі, несиметричні несинусоїдні режими, умовні потужності нульової послідовності.

Бурбело М.И., Гадай А.В., Степура А.В. Условные мощности нулевой последовательности в несимметричных несинусоидальных режимах трехфазных электрических сетей с заземленной нейтралью. В статье проанализированы несимметричные несинусоидальные режимы трехфазных сетей с заземленной нейтралью. Показано, что условные мощности нулевой последовательности q_{β} и q_{α} которые являются, соответственно, активной и реактивной условными мощностями нулевой последовательности, содержат составляющие, обусловленные несимметрией и несинусоидальностью, характеризующиеся, соответственно, постоянной и переменной составляющими q_{β} и q_{α} .

Ключевые слова: электрические сети, несимметричные несинусоидальные режимы, условные мощности нулевой последовательности.

M.J. Burbelo, A.V. Hadaj, O.V. Stepura. Conductivity power of zero sequence for asymmetrical non-sinusoidal modes of three-phase electrical network with grounded neutral wire. The paper analyzes the work of a three-phase network with grounded neutral wire with nonlinear asymmetric consumers based on the theory of instantaneous power. In non-symmetric, non-sinusoidal modes of three-phase electric networks with grounded neutral wire, instantaneous reactive power contains three components. The regime's imbalance is characterized by instantaneous active and reactive conditional capacities of zero sequence q_{β} and q_{α} . Conditional powers of the zero sequence q_{β} and q_{α} contain components that are due to asymmetry and non-sinusoidal mode character,

¹ д-р техн. наук, професор, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, burbelomj@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, hadaj@meta.ua

³ директор, ТОВ ІТЦ «Енергооблік», м. Вінниця, Stepura74@gmail.com