

2. Наличие и учет предсказанных значений метеорологических факторов (температуры и облачности) позволяет существенно снизить ошибку прогноза электрических нагрузок.
3. Для повышения точности прогноза нагрузки ЭЭС необходима достоверная информация о почасовых значениях облачности и температуры в центре ЭЭС.

1. Черненко П.А. Многоуровневое взаимосвязанное прогнозирование электрических нагрузок энергообъединения // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ. Енергоефективність: Зб. наук. пр.: ІЕД НАН України. – 2000. – С. 99–104. 2. Черненко П.А., Заславский А.И., Мартынюк А.В. Обработка и анализ информации для иерархического прогнозирования электрических нагрузок // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ. – К.: ІЕД НАН України, 2006. – № 2(14). – С. 47–49. 3. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геодезической информации. – М.: Недра, 1986. – 342 с. 4. Тараканов А.А. Краткосрочное прогнозирование нагрузок на основе информации комплекса РСДУ2. – ЭМА, 2004. 5. Макоклюев Б.И., Еч В. Ф. Учет влияния метеорологических факторов при прогнозировании электропотребления энергообъединений // Энергетик. – 2004. – № 6.

УДК 621.311.153.2

Е.Г. Курінний, О.М. Дмитрієва, В.О. Топчій
Донецький національний технічний університет, м. Донецьк

РОЗШИРЕННЯ ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ ФЛІКЕР-МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ

© Курінний Е.Г., Дмитрієва О.М., Топчій В.О., 2007

Розглядається проблема коливань напруги. Показано, що наявна флікер-модель занижує вимоги до коливань напруги. Запропоновано поширити концепцію флікеру на частоти, менші за 0,05 Гц. Порівнюються допустимі розмахи гармонічних коливань для існуючої і запропонованої флікер-моделей.

The problem of voltage oscillations is considered. It is shown that the existing flicker model underestimates requirements for voltage oscillations. It is proposed to expand the concept of flicker to the frequencies below 0.05 Hz. The permitted ranges of harmonic oscillations for the existing and proposed flicker models are compared.

Постановка задачі. Коливання $U_k(t)$ – це зміна діючих значень напруги відносно їхнього тренду – однохвилинних значень напруги. Вони призводять до коливань освітлення, які спричиняють додаткову втому людини і, як наслідок, погіршення зору й зменшення продуктивності. Універсальним показником електромагнітної сумісності (ЕМС) за коливаннями напруги є доза флікеру [1, 2]. Коливання вимірюються у процентах від номінальної напруги, частота¹ – в Гц, доза флікеру – у відносних одиницях (в.о.).

У [1] нижня межа частоти коливань, які враховуються, дорівнює 0,5 Гц, проте експериментальні дані (наприклад, [3]) свідчать про те, що коливання позначаються на людині й при частотах близько 0,001 Гц. Ця суперечливість якісно пояснена в [4]: в області низьких частот є особливо відчутною дія повільної адаптації зору (ПАЗ), яка пов'язана з фотохімічними процесами у мозку людини – на відміну від швидкої адаптації (ШАЗ), зумовленої електричними процесами [5].

Для врахування ПАЗ в [4, 6] запропоновано відповідну ланку у флікер-моделі під'єднати паралельно до ланки швидкої адаптації. Однак таке рішення є коректним лише за відсутності

¹ У [2] частота F вимірюється в $1/c$, $1/xv$ або $1/g$. Для переходу від Гц до цих одиниць потрібно λ помножити на множники $2(c\cdot\text{Гц})^{-1}$, $120(xv\cdot\text{Гц})^{-1}$ або $7200(g\cdot\text{Гц})^{-1}$.

фільтра вищих частот (ФВЧ), який у [1] має частоту зрізу $\lambda_{зв} = 0,05$ Гц. Нижчі частоти він не пропускає, тому блок ПАЗ не буде повністю виконувати свої функції.

Метою статті є удосконалення флікер-моделі з урахуванням ПАЗ. Оскільки нелінійна частина флікер-моделі залишається незмінною, далі розглядається лише лінійна частина – блок СК сприйняття коливань (термін з [6]).

Початкова модель. Основою лінійної частини флікер-моделі ІЕС [1] (рис. 1, верхня гілка) є зважувальний фільтр ЗФ, який має передавальну функцію

$$W_{зф}(p) = \frac{kT_{к2}(T_{ф}p + 1)p}{(T_{к2}^2p^2 + T_{к1}p + 1)(T_{и1}p + 1)(T_{и2}p + 1)}, \quad (1)$$

де $k = 1,74802$, $T_{к1} = 0,015418$, $T_{к2} = 0,017385$, $T_{ф} = 0,069811$, $T_{и1} = 0,12989$, $T_{к2} = 0,007267$ секунди.

Виразу (1) відповідає амплітудно-частотна функція (АЧФ)

$$A_{зф}(\lambda) = k\omega T_{к2} \sqrt{\frac{1 + \omega^2 T_{ф}^2}{\left[(1 - \omega^2 T_{к2}^2)^2 + \omega^2 T_{к1}^2 \right] (1 + \omega^2 T_{и1}^2) (1 + \omega^2 T_{и2}^2)}}, \quad (2)$$

де $\omega = 2\pi\lambda$ – кутова частота коливань.

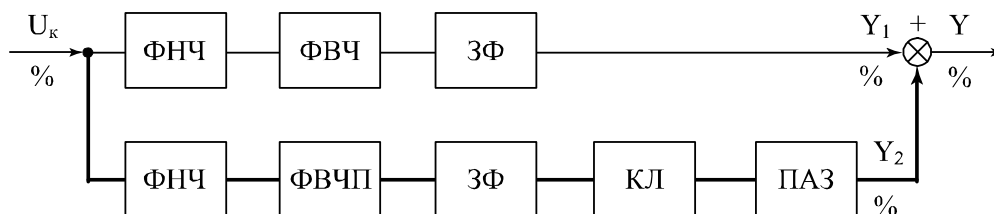


Рис. 1. Структурна схема блока СК

Цю АЧФ було отримано за результатами експериментів, які виконувалися у високо-частотному діапазоні частот. Такий емпіричний підхід має недоліки. По-перше, структура моделі не відокремлює процеси, які моделюються. Наприклад, в (1) не виділено навіть модель лампи розжарювання 60 Вт, яка використовувалася в експериментах. По-друге, як побачимо далі, у такому частотному діапазоні експерименти не могли врахувати дію ПАЗ.

Фільтри застосовуються для придушення низько- і високочастотних завад при вимірюванні доз флікеру. ФНЧ є фільтром Баттерворта шостого порядку з частотою зрізу $\lambda_{зп} = 35$ Гц, який має передавальну функцію [7]

$$W_{нч}(p) = \frac{1}{(T_{б2}^2p^2 + T_{б1}p + 1)(T_{б2}^2p^2 + T_{б3}p + 1)(T_{б2}^2p^2 + T_{б4}p + 1)} \quad (3)$$

і АЧФ

$$A_{нч}(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\lambda/\lambda_{зп})^{12}}}, \quad (4)$$

де сталі часу $T_{б1} = 0,0023537$, $T_{б2} = 0,004573$, $T_{б3} = 0,0064308$, $T_{б4} = 0,0087849$ с. ФВЧ є фільтром першого порядку з передавальною функцією і АЧФ

$$W_{вч}(p) = \frac{T_{в}p}{T_{в}p + 1}, \quad A_{вч}(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\lambda_{зв}/\lambda)^2}}, \quad (5)$$

де $T_{в} = 1/2\pi\lambda_{зв} = 3,1831$ с.

Усі ланки з'єднані послідовно, тому загальна передавальна функція

$$W_1(p) = W_{нч}(p) \cdot W_{вч}(p) \cdot W_{зф}(p). \quad (6)$$

Перемножуються також і АЧФ:

$$A_1(\lambda) = A_{нч}(p) \cdot A_{вч}(p) \cdot A_{зф}(p). \quad (7)$$

АЧФ (7) подано на рис. 2 кривою 1. Її максимум, який дорівнює одиниці, досягається при частоті 8,85 Гц. Відзначимо, що в табл. В.1 з [2] дається значення 1052 мин^{-1} , якому відповідає частота 8,77 Гц.

По суті, вихідний процес $Y_1(t)$ моделює реакцію мозку людини на коливання світлового потоку, але тільки у високочастотному діапазоні коливань.

Сутність рішення. Насамперед відзначимо, що фільтри застосовуються при вимірюванні доз флікеру у діючих електричних мережах спеціалізованим приладом – флікерметром. Але оцінку ЕМС можна зробити і без флікерметра. Для цього достатньо записати зміну напруги, а всі перетворення і розрахунки виконати у комп'ютері загального призначення². Очевидно, що результати оцінювання ЕМС за двома способами повинні бути однаковими, а це означає, що фільтри повинні бути й у флікер-моделі, а не тільки у флікерметрі, де вони є передбаченими.

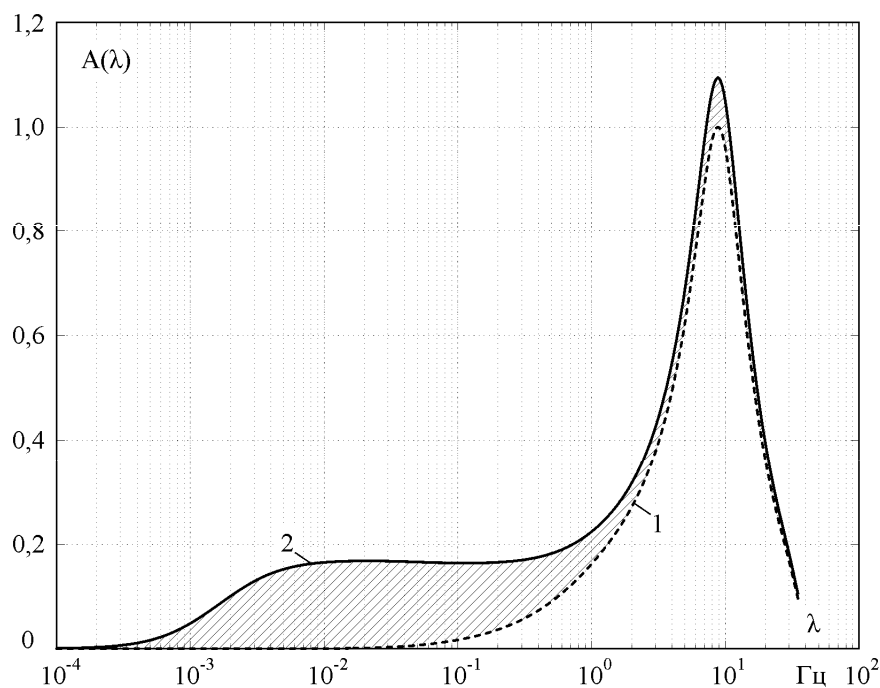


Рис. 2. АЧФ блоків СК:

1 – без урахування і 2 – з урахуванням ПАЗ

ШАЗ має сталу часу $T_{ш} = 0,0016 \text{ с}$, а ПАЗ – $T_{п} = 70 \text{ с}$. ПАЗ відносно ШАЗ діє з коефіцієнтом $k_{п} = 0,09$. Моделі адаптації приймаються у вигляді реальних диференціальних ланок з передавальними функціями і АЧФ

$$W_{ш}(p) = \frac{T_{ш}p}{T_{ш}p + 1},$$

$$A_{ш}(\lambda) = \frac{\omega T_{ш}}{\sqrt{1 + \omega^2 T_{ш}^2}}, \quad (8)$$

² На наш погляд, цей спосіб є доцільнішим.

$$W_{\Pi}(p) = \frac{k_{\Pi} T_{\Pi} p}{T_{\Pi} p + 1},$$

$$A_{\Pi}(\lambda) = \frac{k_{\Pi} \omega T_{\Pi}}{\sqrt{1 + \omega^2 T_{\Pi}^2}}. \quad (9)$$

Оскільки сталі часу двох видів адаптації значно відрізняються одна від одної, то і частотні діапазони їхньої дії також практично є розділеними. Це дає змогу розділити і відповідні реакції.

Структура частини моделі, яка додається (рис. 1, нижня гілка), виконує ті самі функції, що й наявної моделі, але у низькочастотному діапазоні. ФНЧ залишається таким, як і у флікерметрі ІЕС.

Частоту зрізу $\lambda_{зп} = 0,001$ Гц фільтра вищих частот ФВЧП приймаємо такою, що дорівнює нижній межі кривої коливальності в [3]. Цей фільтр має таку саму структуру, що і ФВЧ, але інший параметр $T_{ВП} = 1/2\pi\lambda_{зп} = 159,15$ с. Його передавальна функція і АЧФ описуються аналогічними (5) виразами:

$$W_{ВЧП}(p) = \frac{T_{ВП} p}{T_{ВП} p + 1},$$

$$A_{ВЧП}(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\lambda_{зп}/\lambda)^2}}. \quad (10)$$

Для урахування ПАЗ в ЗФ потрібно ланку ШАЗ замінити на ПАЗ. Хоча у ЗФ ланка ШАЗ не є явно вираженою, її можна виключити, поділивши передавальну функцію (1) на передавальну функцію (8). У структурній схемі це досягається послідовним під'єднанням коректувальної ланки КА, яка має передавальну функцію й АЧФ:

$$W_{кл}(p) = \frac{1}{W_{ш}(p)} = \frac{T_{ш} p + 1}{T_{ш} p}, \quad (11)$$

$$A_{кл}(\lambda) = \frac{1}{A_{ш}(\lambda)} = \frac{\sqrt{1 + \omega^2 T_{ш}^2}}{\omega T_{ш}}. \quad (12)$$

Ланка ШАЗ характеризується функціями (9). Процес $Y_2(t)$ на виході цієї ланки являє собою низькочастотну компоненту загальної реакції, яка дорівнює сумі реакцій:

$$Y(t) = Y_1(t) + Y_2(t). \quad (13)$$

Передавальна функція ланки ПАЗ становить

$$W_2(p) = W_{нч}(p) W_{вчп}(p) W_{зф}(p) W_{кл}(p) W_{\Pi}(p).$$

Блок СК має передавальну функцію

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) = W_{нч}(p) W_{зф}(p) W_{вч}(p) + W_{нч}(p) W_{зф}(p) W_{вчп}(p) W_{кл}(p) W_{\Pi}(p). \quad (14)$$

Відзначимо, що вираз (14) можна записати у вигляді

$$W(p) = W_{нч}(p) W_{зф}(p) [W_{вч}(p) + W_{вчп}(p) W_{кл}(p) W_{\Pi}(p)].$$

Ця формула є еквівалентною (14), але їй відповідає інша структурна схема флікер-моделі, у якій до послідовного з'єднання ФНЧ і ЗФ додаються дві паралельні гілки: з ФВЧ і ФВЧП, КЛ, ПАЗ. Для визначення АЧФ не має значення, яку схему приймати, проте при використанні часових характеристик зручнішою є схема на рис. 1, тільки з паралельним з'єднанням гілок.

Позначивши

$$T_2^2 = T_{в} T_{ш} / k_{\Pi}, \quad T_1 = T_{в} + T_{ш} + (1/T_{\Pi} + 1/T_{пв}) T_2^2,$$

з урахуванням (5), (9)–(11) отримаємо передавальну функцію

$$W(p) = \frac{k_{\Pi} T_{\Pi} T_{\text{ВП}}}{T_{\text{Ш}}} W_{\text{нч}}(p) W_{\text{зф}}(p) \frac{p(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}{(T_{\text{В}} p + 1)(T_{\text{ВП}} p + 1)(T_{\Pi} p + 1)}. \quad (15)$$

Відповідну АЧФ

$$A(\lambda) = \frac{k_{\Pi} T_{\Pi} T_{\text{ВП}}}{T_{\text{Ш}}} A_{\text{нч}}(\lambda) A_{\text{зф}}(\lambda) \omega \sqrt{\frac{(1 - \omega^2 T_2^2)^2 + \omega^2 T_1^2}{(1 + \omega^2 T_{\text{В}}^2)(1 + \omega^2 T_{\text{ВП}}^2)(1 + \omega^2 T_{\Pi}^2)}} \quad (16)$$

подано на рис. 2 кривою 2. Вона має максимум 1,0965 при частоті 8,79 Гц.

Максимум АЧФ є більшим за одиницю, оскільки додається реакція гілки ПАЗ. У зв'язку з цим при нормуванні є два варіанти: або пронормувати АЧФ, щоб вона дорівнювала одиниці при 8,79 Гц, або залишити її без зміни. У першому варіанті потрібно було б зменшити допустиму дозу флікери. Прийнемо зручніший другий варіант, залишивши цю норму такою, що дорівнює одиниці.

Зіставлення флікери-моделей. Зіставимо наявну і запропоновану флікери-моделі на прикладі періодичних гармонічних коливань з амплітудою B , яка дорівнює половині розмаху коливань δU . У цьому окремому випадку ЕМС можна оцінювати за кривою коливань – залежності допустимих розмахів $\delta \hat{U}$ від частоти. Для її визначення потрібно виразити дозу флікери через розмах і частоту коливання. Оскільки кожна точка кривої коливань повинна давати допустиму дозу флікери, для знаходження допустимих розмахів потрібно вираз для дози прирівняти до одиниці.

Величина дози флікери напруги не залежить від фази гармонічного коливання, тому достатньо розглянути лише амплітуди. Реакція лінійної частини буде гармонічною з амплітудою у процентах

$$B_Y = B A(\lambda) = \frac{1}{2} \delta U A(\lambda). \quad (17)$$

Для переходу до в.о. ординати реакції потрібно помножити на коефіцієнт k_Y , який дорівнює 16 (%)/в.о. [6].

У [1] додаткову втому людини моделює блок квадратичного інерційного згладжування, який складається з квадратора та інерційної ланки зі сталою часу $T_3 = 0,3$ с. Піднесення до квадрата дає дві складові: постійну величину

$$B_Z = \frac{1}{2} B_Y^2 = \frac{1}{8} k_Y^2 \delta U^2 A^2(\lambda) \quad (18)$$

і косинусоїду з подвійною частотою та амплітудою (18). Ланка інерційного згладжування має АЧФ

$$A_3(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T_3^2}}. \quad (19)$$

Після згладжування отримаємо гармонічний процес зорового відчуття $S(t)$ з амплітудою

$$B_S = B_Z A_3(2\lambda) = \frac{1}{8} k_Y^2 \delta U^2 A^2(\lambda) A_3(2\lambda), \quad (20)$$

з подвійною частотою, до якого додається постійно величина (18).

У [2] використовується поняття інтегральної імовірності E_S у процентах, яка являє собою імовірність викиду процесу $S(t)$ за рівень $P = S$. Вона подається виразом (10) з [6], який запишемо у вигляді

$$E_S = \frac{100}{\pi} \arccos \frac{P - B_Z}{B_S} \quad (21)$$

у межах $B_Z - B_S \leq P \leq B_Z + B_S$.

Зворотна функція

$$P = B_Z + B_S \cos(\pi E_S/100) = \frac{1}{8} k_Y^2 \delta U^2 A^2(\lambda) [1 + A_3(2\lambda) \cos(\pi E_S/100)]. \quad (22)$$

У [1, 2] задаються не рівні, а імовірності: 0,1; 1; 3; 10 і 50 %, які позначимо через E_{Si} , де i – індекс числових значень. Це дає змогу записати формулу (Б.10) з [2] для дози флікеру у компактному вигляді:

$$P_{St} = \sqrt{\sum_i a_i P_i},$$

де $a_{0,1} = 0,0314$, $a_1 = 0,0525$, $a_3 = 0,0657$, $a_{10} = 0,28$, $a_{50} = 0,08$.

Підставивши сюди вираз (22) і позначивши суми

$$c_1 = \sum_i a_i = 0,5096, \quad c_2 = \sum_i a_i \cos(\pi E_i/100) = 0,4072,$$

отримаємо дозу флікеру гармонічних коливань

$$P_{St} = \frac{1}{2\sqrt{2}} k_Y \cdot \delta U \cdot A(\lambda) \sqrt{c_1 + c_2 A_3(2\lambda)}. \quad (23)$$

Допустима доза дорівнює одиниці, тому при $P_{St} = 1$ з (23) знайдемо допустимий розмах

$$\delta \hat{U}(\lambda) = \frac{2\sqrt{2} k_Y}{A(\lambda) \sqrt{c_1 + c_2 A_3(2\lambda)}}. \quad (24)$$

Формули (23) і (24) є придатними для обох флікер-моделей. Підставивши в (24) АЧФ (7), отримаємо криву коливань для флікер-моделі ІЕС (рис. 3, крива 1), а АЧФ (16) – для моделі, що пропонується (крива 2). Відзначимо, що у табл. 1 з [1] частотний діапазон кривої коливань прийнято від 0,5 до 25 Гц, хоча він потрібен бути від 0,05 до 35 Гц – відповідно до частот зрізу фільтрів.

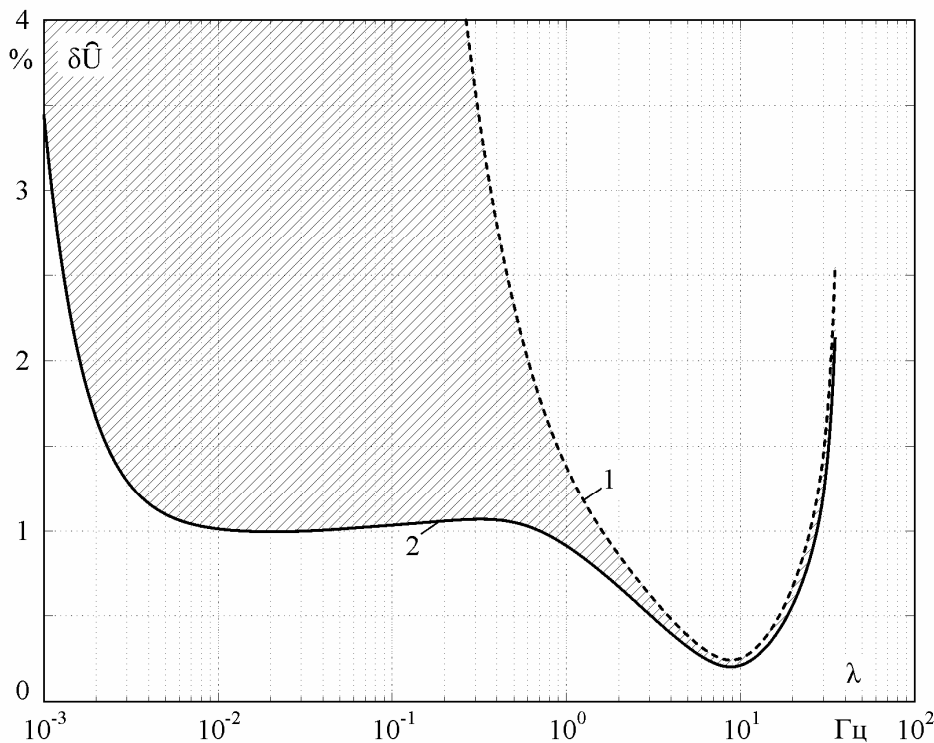


Рис. 3. Допустимі розмахи гармонічних коливань у функції їхньої частоти

В області частот коливань, які є вищими за 4 Гц, криві коливань відрізняються мало. Мінімум кривої 1 дорівнює 0,202 %, а кривої 2 – 0,242 %. Саме за цієї обставини експериментальні дослідження у високочастотній області не дали змоги виявити необхідність врахування ПАЗ. В області малих частот флікер-модель, що існує, дає занижену оцінку ЕМС – тим більшу, чим меншою є частота. Область заниження розташована між кривими 1 і 2 (штриховка на рис. 3). Поличка на кривій коливань виникає тому, що в зоні частот від 0,007 до 0,4 Гц АЧФ (9) майже не змінюється.

Висновок. Щоб запобігти заниженню оцінок ЕМС за дозою флікеру, необхідно враховувати ПАЗ, доповнюючи лінійну частину існуючої флікер-моделі паралельною ланкою, що моделює ПАЗ.

1. IEC 61000-4-15. *Electromagnetic compatibility – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 15: Flickermeter – Functional and design specifications*, 1997. 2. ГОСТ 13109-97. *Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения*. – 1999. 3. Watson J. F. *Power supply to critical loads // Power Engineering*. – December 1966. – Part 2. 4. Шидловский А.К., Куренный Э.Г. *Введение в статистическую динамику систем электроснабжения*. – К.: Наук. думка, 1984. – 271 с. 5. Шабанов-Кушниренко Ю.П. *Математическое моделирование некоторых функций человеческого зрения*. – В кн.: *Проблемы бионики*. – М.: Наука, 1973. 6. Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Куренный Д., Цыганкова Н.В. *Совершенствование модели фликера // Электричество*. – 2003. – № 2. 7. Гутников В.С. *Фильтрация измерительных сигналов*. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.

УДК 621.313.322-81.621.311.22

О.С. Міняйло, К.Б. Покровський, О.І. Маврін, Н.Г. Мальцева
Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів

ДИФЕРЕНЦІЙНІ РІВНЯННЯ СТАНУ АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА У РЕЖИМІ ДВОФАЗНОГО ЗАМИКАННЯ

© Міняйло О.С., Покровський К.Б., Маврін О.І., Мальцева Н.Г., 2007

Отримано диференційні рівняння стану асинхронізованого турбогенератора (АСТГ) у режимі двофазного замикання для визначення характеристик струмів несиметричного режиму роботи генератора.

In work the differential equations of a condition of doubly fed induction generator in a mode of biphas short circuit for definition of the characteristics of currents of asymmetrical mode of operations of the generator are received.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку енергосистеми відбувається збільшення нерівномірності добових графіків навантаження енергосистем, що призводить до загострення проблеми використання теплових конденсаційних електростанцій як засобів регулювання графіків навантаження енергосистеми [1]. Можливості асинхронізованих турбогенераторів відігравати значну роль у цьому процесі, зокрема, у регулюванні реактивної потужності, доведені багаторічним досвідом експлуатації в умовах Бурштинської ТЕС [1]. АСТГ порівняно з традиційними синхронними турбогенераторами мають певні як конструктивні відмінності, так і відмінності довготривалих режимів, меж динамічної стійкості, ефективності регулювання напруги в перехідних режимах, які необхідно обов’язково враховувати