

## Силовая электроника

УДК 621.314

**В.В. Рогаль**, канд. техн. наук, **Ю.С. Демченко**

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",  
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

### Коректор коефіцієнта потужності з адаптивним цифровим керуванням по піковому струму

*Цифрові системи керування все частіше застосовуються у силовій електроніці, що обумовлено рядом переваг цифрового керування над аналоговим. У даній статті представлений коректор коефіцієнта потужності з адаптивним цифровим керуванням по піковому струму. Описано принцип керування по піковому струму та вказані переваги і недоліки даного методу. Наведена схема коректора з адаптивним цифровим керуванням. Проведене комп'ютерне моделювання підтвердило працездатність розробленого коректора. Бібл. 14, рис. 6.*

**Ключові слова:** коректор коефіцієнта потужності; керування по піковому струму; цифрові системи; адаптивне керування.

#### Вступ

Цифрове керування імпульсними джерелами живлення стає все більш поширеним не тільки в потужних низькочастотних джерелах, а й у високочастотних низької та середньої потужності, включаючи DC/DC перетворювачі і однофазні випрямлячі з корекцією коефіцієнта потужності [6]. Передумовами для цього є підвищення продуктивності та зниження вартості цифрових засобів, а також наявність вбудованих аналогово-цифрових перетворювачів та широтно-імпульсних модуляторів [4]. У порівнянні з традиційними аналоговими системами керування (СК) цифрові регулятори мають наступні переваги: менша кількість дискретних компонентів, можливість реалізації нелінійних і складних алгоритмів управління, висока надійність, низька чутливість до старіння компонентів та вища гнучкість [11], [1].

Проте застосування цифрових засобів керування може призводити до більш високої вартості розробки та обмеження швидкодії у зв'язку з процесом квантування і затримками на обробку даних. Але сучасні мікроконтролери мають високу швидкодію при відносно низькій вартості, що зменшує їх обмеження у застосуванні [1].

Кількість досліджень, присвячених цифровим системам керування активними коректорами коефіцієнта потужності (АККП), постійно зростає. Наприклад, запропоноване цифрове керування АККП із зоною нечутливості [6], що дозволило покращити динамічні характеристики системи, а представлений новий цифровий контролер для коректора з граничним методом керування не потребує визначення моменту переходу струму дроселя через нуль [11]. Введення цифрового гребінчастого фільтру з автопідстроюванням в контур зворотного зв'язку по вихідній напрузі значно покращує динамічні характеристики [7]. Цифрове керування з прогнозуванням реалізоване в [2]. Розроблений коректор на основі цифрового сигнального процесора (ЦСП) TMS320LF2407 забезпечує коефіцієнт потужності вище, ніж 0,99 в усьому діапазоні вхідних напруг [10]. Розроблений АККП на основі стандартного мікроконтролера Siemens 80C166 забезпечує значно кращу динаміку системи у порівнянні із звичайними аналоговими схемами [1].

Особливо слід відзначити тенденцію використання програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) для реалізації АККП. Основною відмінністю від рішень на базі ЦСП є можливість одночасного виконання всіх процедур контролю, що забезпечує високу продуктивність і можливість реалізації складних та високошвидкісних алгоритмів керування [13]. Однак слід врахувати їх вищу вартість та відсутність вбудованих АЦП [3].

Одним із відомих методів керування АККП є керування по піковому струму. Перевагами даного методу є постійна частота перемикавання, режим неперервних струмів, що дозволяє застосовувати малогабаритний вхідний фільтр, необхідність вимірювання лише струму силового ключа, що дозволяє застосувати трансформатор струму та уникнути додаткових втрат потужності на вимірювальному резисторі, можливість прямого обмеження струму ключа.

Проте існують і наступні недоліки: спотворення форми кривої вхідного струму, що зростають за умови зменшення навантаження і збільшення вхідної напруги, чутливість до комутаційних завад, жорсткі умови закривання силового діода, виникнення субгармонічних коливань у разі, якщо коефіцієнт заповнення більший за 50 %, для усунення яких необхідне введення компенсуючої пилкоподібної напруги (КПН). Можливість виникнення субгармонік в системах силової електроніки досліджена в роботі [14].

Метою даної роботи є розробка адаптивного цифрового методу керування по піковому струму активним однофазним коректором коефіцієнта потужності.

### Керування АККП по піковому струму

Функціональна електрична схема коректора коефіцієнта потужності з керуванням по піковому струму представлена на рис. 1. За сигналом від тактового генератора (ТГ) здійснюється відкривання силового ключа  $S$ . Закривання ключа відбувається в момент, коли сума сигналів з датчика струму (ДС) та з джерела пилкоподібної

напруги (ПГ) досягає еталонного синусоїдального сигналу  $I_{em}$ . Останній отримується перемноженням масштабованого миттєвого значення випрямленої вхідної напруги, що знімається з випрямляча, і сигналу з виходу підсилювача помилки за напругою (ППН). Таким чином, еталонний сигнал є синхронізованим та пропорційним напрузі мережі живлення. Частота генератора пилкоподібної напруги співпадає з частотою тактового генератора. Тригер  $T$  формує сигнал керування силовим ключем [12], [9].

На рис. 2 наведена діаграма струму дроселя за умови використання даного методу керування. Як видно з рисунку, пікове значення струму співпадає з еталонним сигналом.

Розглянемо більш детально процеси в коректорі у разі керування по піковому струму. На рис. 3 наведені діаграми струму дроселя в установлених режимах (суцільна лінія) та у випадку наявності збурення  $\hat{i}$  (штрихпунктирна лінія), де  $i^*$  – еталонний сигнал,  $m_1$ ,  $m_2$  – нахил наростання та спадання струму дроселя,  $m_{sc}$  – нахил КПН,  $T_s$  – період комутації,  $D$  – коефіцієнт заповнення,  $\Delta i(n)$ ,  $\Delta i(n+1)$  – відхилення струму від установлених значень.

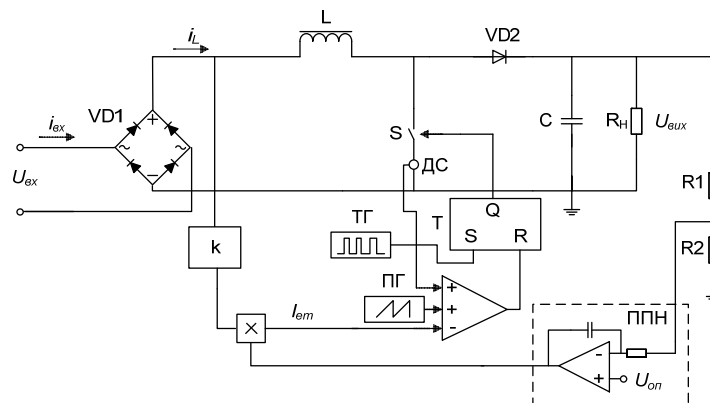


Рис. 1. Схема коректора коефіцієнта потужності з керуванням по піковому струму

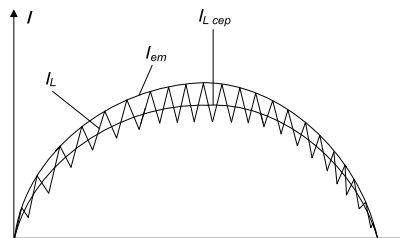


Рис. 2. Зображення діаграми струму дроселя при керуванні по піковому струму

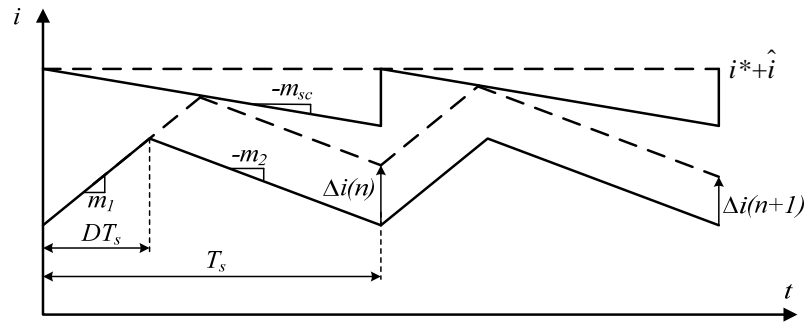


Рис. 3. Зображення діаграм струму дроселя в усталеному та збуреному режимі

Для рис. 3 можна записати [8]:

$$\Delta i(n+1) = -a \cdot \Delta i(n) + (1+a) \cdot \hat{i}(n+1), \quad (1)$$

де  $a = \frac{m_2 - m_{sc}}{m_1 + m_{sc}}$ .

Виконавши z-перетворення виразу (1) отримаємо:

$$H(z) = \frac{\Delta i(z)}{\hat{i}(z)} = (1+a) \cdot \frac{z}{z+a}. \quad (2)$$

З (2) видно, що у разі виконання умови  $m_1 < m_2$  та відсутності КПН ( $m_{sc}=0$ ) величина  $a$  більше одиниці і система має полюс поза колом одиничного радіусу.  $m_1 < m_2$  якщо коефіцієнт заповнення  $D$  більший за 0,5. Цим пояснюється виникнення субгармонік в системі за умови  $D > 0,5$ . Для забезпечення стійкості вводиться додаткова компенсуюча пилкоподібна напруга з нахилом  $m_{sc}$  (рис. 3). У цьому разі необхідно, щоб виконувалася умова  $\left| \frac{m_2 - m_{sc}}{m_1 + m_{sc}} \right| < 1$ , тобто необхідна величина нахилу КПН становить

$$m_{sc} > \frac{1}{2}(m_2 - m_1). \quad (3)$$

Для перетворювача підвищуючого типу

$$m_1 = \frac{U_{ex}}{L}, \quad m_2 = \frac{U_{вух} - U_{ex}}{L} \quad \text{та}$$

$$m_{sc} > \frac{0.5U_{вух} - U_{ex}}{L}.$$

### Адаптивне цифрове керування

У разі відсутності збурення  $\hat{i}(n+1)$  вираз (1) має вигляд:

$$\Delta i(n+1) = -\frac{m_2 - m_{sc}}{m_1 + m_{sc}} \cdot \Delta i(n), \quad (4)$$

Як видно з (4), коливання струму можуть бути придушені всього за один такт у випадку, якщо  $m_{sc}=m_2$ . Система у цьому разі має найменшу тривалість перехідного процесу. У подальшому дана умова називається повною компенсацією.

Особливістю АККП є те, що вхідна напруга змінюється в часі. А отже, для забезпечення повної компенсації необхідно змінювати величину нахилу компенсуючої пилкоподібної напруги. Це може бути досягнуто аналоговим контролером, але такий метод призводить до суттєвого ускладнення системи керування. У даній роботі представлена цифрова система (рис. 4), що забезпечує адаптивне керування коректором коефіцієнта потужності без ускладнення структури контролера. Дана СК може бути реалізована на основі цифрового сигнального процесора (ЦСП) або мікроконтролера.

Адаптивний алгоритм керування забезпечує потрібний нахил КПН в усьому інтервалі зміни вхідної та вихідної напруги. У цьому разі сама величина нахилу пилкоподібної напруги враховується під час обчислення порогового значення струму  $i_{cmp}$  (рис. 5).

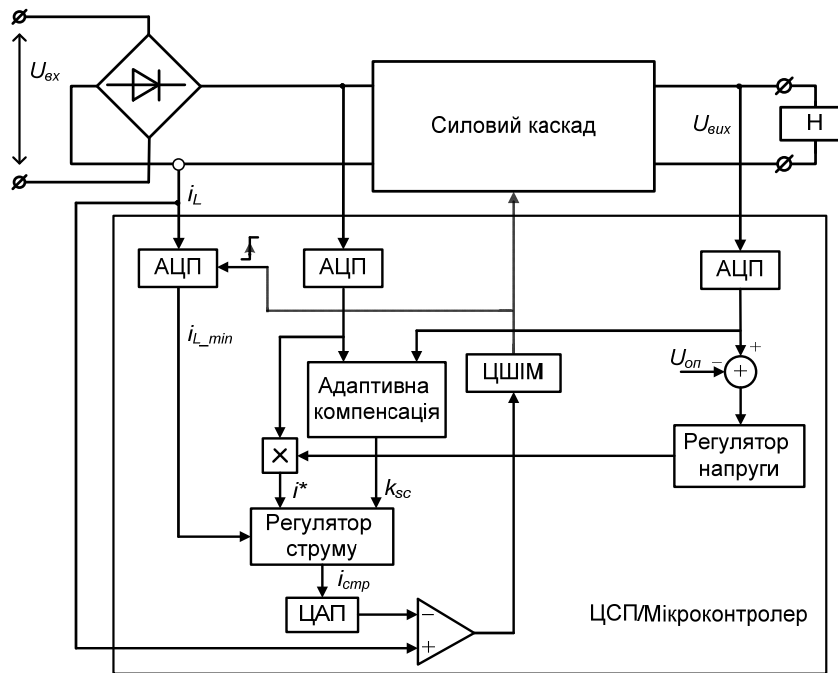


Рис. 4. Схема АКПП із цифровою системою керування

Для рис. 5 справедливі наступні вирази [5]:

$$i_{cmp} = i_n + m_1 \cdot DT_s, \quad (5)$$

$$i_{cmp} = i^* - m_{sc} \cdot DT_s. \quad (6)$$

Використовуючи (5) та (6) можна записати:

$$DT_s = \frac{i^* - i_n}{m_1 + m_{sc}}. \quad (7)$$

Підставивши (7) в (6) отримуємо:

$$i_{cmp} = i^* - m_{sc} \frac{i^* - i_n}{m_1 + m_{sc}}. \quad (8)$$

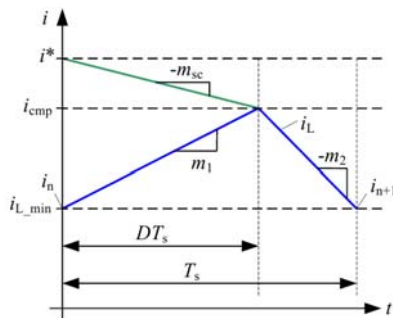


Рис. 5. Формування порогового значення струму

Введемо коефіцієнт компенсації  $k_{sc}$ :

$$k_{sc} = \frac{m_{sc}}{m_1}. \quad (9)$$

Тоді (8) можна переписати у вигляді:

$$i_{cmp} = \frac{1}{1 + k_{sc}} (i^* + k_{sc} i_n). \quad (10)$$

Отже, порогове значення визначається еталонним сигналом  $i^*$  та величиною струму  $i_n$  на початку такту, а коефіцієнт  $k_{sc}$  враховує нахил КПН. Мінімальне значення  $k_{sc}$  становить  $\frac{0,5U_{eux} - U_{ex}}{U_{ex}}$ , а повне  $-\frac{U_{eux} - U_{ex}}{U_{ex}}$ .

### Результати моделювання

У середовищі Simulink розроблена модель коректора для підтвердження справедливості запропонованого адаптивного цифрового керування. На рис. 6 представлений вхідний струм моделі у випадку мінімальної компенсації.

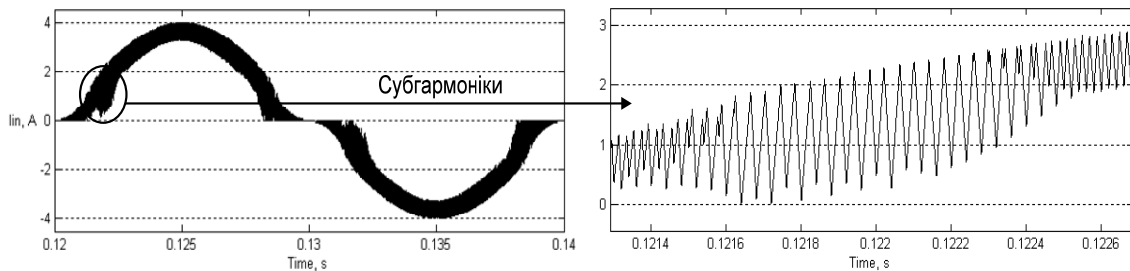


Рис. 6. Результати моделювання у разі мінімальної компенсації

Як видно з отриманих результатів, у разі мінімальної компенсації в системі виникають субгармонічні коливання, що загасають за декілька десятків тактів. Як показало моделювання, у разі повної компенсації субгармоніки в системі взагалі не виникають.

### Висновки

Розроблено адаптивний алгоритм керування активним коректором коефіцієнта потужності, що забезпечує придушення субгармонік струму. Показано, що за умови  $m_{sc}=m_2$  система має найменшу тривалість перехідного процесу.

Результати моделювання показали, що розроблена цифрова система дозволяє отримати близький до синусоїдального вхідний струм коректора, а запропонований алгоритм керування забезпечує повну компенсацію в усьому діапазоні зміни вхідної та вихідної напруг.

### Список використаних джерел

1. Buso S., Mattavelli P., Rossetto L., Spiazzi G. Simple Digital Control Improving Dynamic Performance of Power Factor Preregulators // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 13, September 1998. – P. 814-823.
2. Chen J., Prodic A., Erickson R.W., Maksimovic D. Predictive digital current programmed control // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 18, No. 1, January 2003. – P. 411-419.
3. De Castro A., Zumel P., García O., Riesgo T., Uceda J. Concurrent and Simple Digital Controller of an AC/DC Converter with Power Factor Correction Based on an FPGA // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 18, No. 1, January 2003. – P. 334-343.
4. Fu M., Chen Q. A DSP based controller for power factor correction (PFC) in a rectifier circuit // Proceedings of IEEE APEC Conference. – 2001. – P. 144-149.
5. Grote T., Schafmeister F., Figge H., Frohleke N., Ide P., Bocker J. Adaptive Digital Slope Compensation for Peak Current Mode Control // Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. – P. 3523 - 3529.
6. Prodic A., Maksimovic D., Erickson R.W. Dead-zone digital controllers for improved dynamic response of low harmonic rectifiers // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 1, January 2006. – P. 173-181.
7. Prodic A., Maksimovic D., Erickson R.W. Self-tuning digitally controlled low-harmonic rectifier having fast dynamic response // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 18, No. 1, January 2003. – P. 420-428.
8. Ridley R. An Accurate and Practical Small-Signal Model for Current-Mode Control // [Online]. Available: [http://encon.fke.utm.my/nikd/Dc\\_dc\\_converter/Current/curr.pdf](http://encon.fke.utm.my/nikd/Dc_dc_converter/Current/curr.pdf).
9. Rossetto L., Spiazzi G., Tenti P. Control Techniques for Power Factor Correction Converters // Proceedings of Power Electronics, Motion Control (PEMC), September 1994. – P. 1310-1318.
10. Ye Z.Z., Jovanović M.M., Irving B.T. Digital Implementation of a Unity-Power-Factor Constant-Frequency DCM Boost Converter // Proceedings of IEEE APEC Conference. – 2005. – P. 818-824.
11. Yeh C.-A., Ho K.-M., Lai Y.-S., Takahashi F., Hamaogi M. Digital-Controlled Power Factor Corrector with Transition Current Mode Control without Zero Current Detection // The Eighth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, November 2-5, 2009. – P. 198-203.
12. Васильев А.О., Худяков В.Ф., Хабузов В.А. Анализ современных методов и технических средств коррекции коэффициента мощности у импульсных устройств // Силова електроніка № 2, 2004. – С. 72-77.
13. Степенко С.А. Обзор и перспективы развития исследований, посвящённых коррекции коэффициента мощности // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: нові рішення в сучасних технологіях – 2013. – №18. – С. 34-41.
14. Стжелецки Р., Коротеев И.Е., Жуйков В.Я. Хаотические процессы в системах силовой электроники. – Киев: Аверс, 2001. – 197 с.

Поступила в редакцію 3 сентября 2015 г.

УДК 621.314

**В.В. Рогаль**, канд. техн. наук, **Ю.С. Демченко**

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",  
ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

## **Корректор коэффициента мощности с адаптивным цифровым управлением по пиковому току**

*Цифровые системы управления все чаще применяются в силовой электронике, что обусловлено рядом преимуществ цифрового управления над аналоговым. В данной статье представлен корректор коэффициента мощности с адаптивным цифровым управлением по пиковому току. Описан принцип управления по пиковому току и указаны преимущества и недостатки данного метода. Представлена схема корректора с адаптивным цифровым управлением. Проведенное компьютерное моделирование подтвердило работоспособность разработанного корректора. Библи. 14, рис. 6.*

**Ключевые слова:** корректор коэффициента мощности; управление по пиковому току; цифровые системы; адаптивное управление.

UDC 621.314

**V. Rohal, Yu. Demchenko**

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",  
st. Polytechnique, 16, Kiev, 03056, Ukraine.

## **Power factor corrector with adaptive digital peak current mode control**

*Digital control systems are increasingly used in power electronics due to the whole number of advantages of digital control over analog. Power factor corrector with adaptive digital peak current mode control is presented in this article. The principle of peak current mode control is described. The advantages and disadvantages of this mode are listed. The scheme of the corrector with adaptive digital control is depicted. Conducted computer simulation confirmed the validity of the designed corrector. Reference 14, figures 6.*

**Keywords:** power factor corrector; peak current mode control; digital systems; adaptive control.

### **References**

1. Buso, S., Mattavelli, P., Rossetto, L., Spiazzi, G. (1998). Simple Digital Control Improving Dynamic Performance of Power Factor Preregulators. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 13, pp. 814-823.
2. Chen, J., Prodic, A., Erickson, R. W., Maksimovic, D. (2003). Predictive digital current programmed control. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 18, No. 1, pp. 411-419.
3. De Castro, A., Zumel, P., Garcia, O., Riesgo, T., Uceda, J. (2003). Concurrent and Simple Digital Controller of an AC/DC Converter with Power Factor Correction Based on an FPGA. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 18, No. 1, pp. 334-343.
4. Fu, M., Chen, Q. (2001). A DSP based controller for power factor correction (PFC) in a rectifier circuit. Proceedings of IEEE APEC Conference, pp. 144-149.
5. Grote, T., Schafmeister, F., Figge, H., Frohliche, N., Ide, P., Bocker, J. (2009). Adaptive Digital Slope Compensation for Peak Current Mode Control. Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 3523 - 3529.
6. Prodic, A., Maksimovic, D., Erickson, R. W. (2006). Dead-zone digital controllers for improved dynamic response of low harmonic rectifiers. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 1, pp. 173-181.

7. *Prodic, A., Maksimovic, D., Erickson, R. W.* (2003). Self-tuning digitally controlled low-harmonic rectifier having fast dynamic response. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 18, No. 1, pp. 420-428.
8. *Ridley, R.* An Accurate and Practical Small-Signal Model for Current-Mode Control // [Online]. Available: [http://encon.fke.utm.my/nikd/Dc\\_dc\\_converter/Current/curr.pdf](http://encon.fke.utm.my/nikd/Dc_dc_converter/Current/curr.pdf).
9. *Rossetto, L., Spiazzi, G., Tenti, P.* (1994). Control Techniques for Power Factor Correction Converters. *Proceedings of Power Electronics, Motion Control (PEMC)*, pp. 1310-1318.
10. *Ye Z.Z., Jovanović M.M., Irving B.T.* (2005), Digital Implementation of a Unity-Power-Factor Constant-Frequency DCM Boost Converter. *Proceedings of IEEE APEC Conference*, pp. 818-824.
11. *Yeh, C.-A., Ho, K.-M., Lai, Y.-S., Takahashi, F., Hamaogi, M.* (2009). Digital-Controlled Power Factor Corrector with Transition Current Mode Control without Zero Current Detection. *The Eighth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, pp. 198-203.
12. *Vasilev, A. O., Khudiakov, V. F., Khabuzov, V. A.* (2004). Analysis of modern methods and technical means of correction of power-factor at the impulsive power supplies. *Power electronics*, № 2, pp. 72-77. (Rus.)
13. *Stepenko S. A.* (2013), Review and prospects of the development of the research devoted to power factor correction. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, №18, pp. 34–41. (Rus.)
14. *Stzheletski, R., Koroteev, I. E., Zhuikov, V. Ya.* (2001), Chaotic processes in power electronic systems. – Kyiv: Avers, p. 197. (Rus.)