

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СПОТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В КОЛІ ЗМІННОГО СТРУМУ КОМПЛЕКСУ ТИРИСТОРНИЙ ВИПРЯМЛЯЧ – ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Б. А. Теницький, О. В. Бялобржеський, Р. А. Хорошко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: bogdan0633028766bogdan@gmail.com

Проведено дослідження споживання електричної енергії ділянки цеху промислового підприємства з установкою – обпалювальна піч, силова частина якої виконана за системою тиристорний випрямляч – двигун постійного струму. Дослідження проведено на моделі, складеної в спеціалізованому середовищі візуального програмування. Керуючись розрахунковими співвідношеннями рекомендованими стандартом IEEE 1459-2010 для визначення компонент потужності в модель введено відповідний вимірювальний блок. В результаті ланки експериментів встановлено, що потужність спотворення зумовлена гармоніками струму передається до понижуючого трансформатора підстанції без змін. При цьому потужність зумовлена гармоніками напруги при наближенні до понижуючого трансформатора підстанції значно зменшується. Процес розповсюдження зазначених компонент потужності потребує подальших досліджень.

Ключові слова: тиристорний випрямляч, система електроспоживання, компоненти потужності електричної енергії.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСКАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА КОМПЛЕКСА ТИРИСТОРНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Б. А. Теницкий, А. В. Бялобржеський, Р. А. Хорошко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: bogdan0633028766bogdan@gmail.com

Приведено исследование потребления электрической энергии участка цеха промышленного предприятия с установкой – обжиговая печь, силовая часть которой выполнена по системе тиристорный выпрямитель – двигатель постоянного тока. Исследование проведено на модели, составленной в специализированной среде визуального программирования. Руководствуясь расчетными соотношениями рекомендованными стандартом IEEE 1459-2010 для определения компонент мощности в модель введен соответствующий измерительный блок. В результате экспериментов установлено, что мощность искажения обусловлена гармониками тока передается до понижающего трансформатора подстанции без изменений. При этом мощность обусловлена гармониками напряжения при приближении к понижающего трансформатора подстанции значительно уменьшается. Процесс распространения указанных компонент мощности требует дальнейших исследований.

Ключевые слова: тиристорный выпрямитель, система электроснабжения, компоненты мощности электрической энергии.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Системи електропостачання промислових підприємств створюються для забезпечення живлення електроенергією промислових приймачів, до яких відносять електродвигуни різних приводів і механізмів, електричні печі, електролізні установки, апарати і машини для електричного зварювання, освітлювальні установки і т.і. Зазначені електричні установки та пристрої і система електропостачання мають взаємний вплив [1].

Розвиток технології виробництва продукції забезпечується шляхом провадження складних регульованих електроприводів в тому числі постійного струму, які відносяться до приймачів з нелінійним характером навантаження. Забезпечення технологічних вимог певним чином має іншу сторону, пов'язану з впливом на режимні параметри системи електропостачання. Зважаючи на період коли відбувалось проектування зазначених систем електропостачання, можна відмітити незначне розповсюдження приймачів з нелінійним характером навантаження [1]. Використання пасивних пристроїв для покращення режимних параметрів системи електропостачання не дає бажаних результатів, особливо у разі зміни параметрів режиму у часі [2]. В результаті

питання впливу зазначених приймачів на систему електропостачання є актуальним.

Аналіз попередніх досліджень Порушення параметрів режиму, які призводять до зміни якості електричної енергії, що характеризується певними показниками та їх чисельними нормативними значеннями на сьогоднішній день закріплені у державних стандартах з якості електроенергії [3].

Методи синтезу пасивних пристроїв для покращення показників якості електричної енергії у вузлі системи електропостачання базуються на певних принципах розрахунку. У разі компенсації реактивної потужності – це принципи резонансу на частоті основної гармоніки струму та напруги, з урахуванням обмежень за використанням конденсаторних батарей та потоку реактивної потужності [4]. В разі фільтрації вищих гармонік це методи розрахунку складно замкнених електричних схем із застосуванням принципу суперпозиції для кожної з гармонік струму та напруги [2].

Раціональне визначення засобів для підвищення якості електричної енергії існуватиме у випадку наявності показників які найбільш багатогранно будуть характеризувати кількість та якість електричної енергії.

Повертаючись до регульованих тиристорних випрямлячів, у певному випадку, коли в трифазному перетворювачі наявна симетрія навантаження, показниками, що характеризують кількість та якість електричної енергії є: активна потужність P , реактивну потужність Q , повна потужність, потужність спотворення [1]. Окрім цього слід враховувати вплив режиму тиристорного випрямляча на режим системи електропостачання.

Таким чином, відомі дослідження [5] не достатньо відбивають процеси розподілу компонент потужності електричної енергії.

Мета роботи – дослідження з використанням візуального програмування розподілу складових потужності у вузлах системи електроспоживання при регулюванні тиристорного випрямляча.

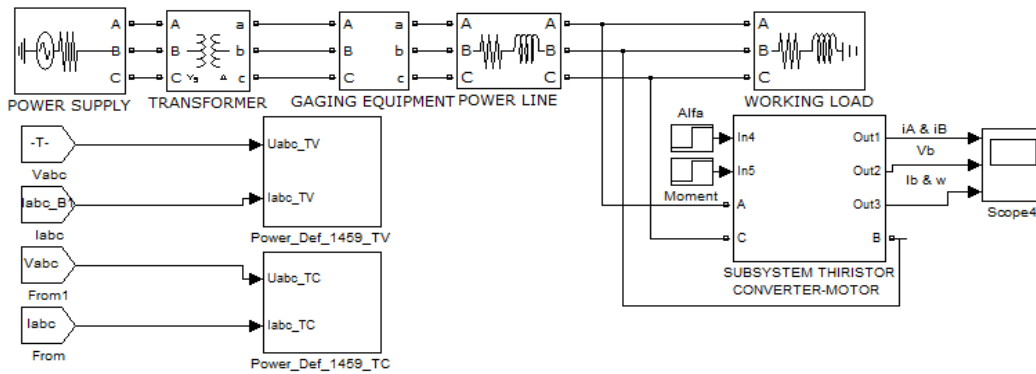


Рисунок 1 – Модель схеми електроспоживання цеху

Схема включає: *POWER SUPPLY* – джерело живлення ($U = 35 \text{ кВ}$, $f = 50 \text{ Гц}$); *TRANSFORMER* – трансформатор (ТДН – 10000/110-6P = 10 МВА, $f = 50 \text{ Гц}$, $U_1 = 35 \text{ кВ}$, $R_1 = 1,715e-5 \text{ Ом}$, $L_1 = 7,7986e-5 \text{ Гн}$, $U_2 = 6 \text{ кВ}$, $R_2 = 0,918e-5 \text{ Ом}$, $L_2 = 8,9381e-5 \text{ Гн}$); *POWER LINE* – лінія електропередач ($R = 2,9353 \text{ Ом}$, $L = 19,77e-4 \text{ Гн}$); *WORKING LOAD* – робоче навантаження ($P = 5219,47e3$, $Q = 3624,867e3$); *SUBSYSTEM THIRISTOR CONVERTER – MOTOR* – підсистема тиристорний перетворювач – двигун постійного стру-

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для досягнення зазначеної мети обрано об’єкт дослідження – систему електропостачання обпалювального цеху промислового підприємства. Особливість системи в наявності приймачів з нелінійними характеристиками – тиристорного випрямляча, який входить до складу електричного приводу обпалювальної печі. Зазначену схему еквівалентизовано наступними елементами: джерело живлення, понижуючий трансформатор, лінія електропередач, трансформатор живлення обпалювальну піч, тиристорний перетворювач, двигун і всі інші навантаження та складено у пакеті візуального програмування для виконання експериментів з дослідження потужності електричної енергії за умов регулювання тиристорного випрямляча (рис. 1).

му; *Power_Def_1459_TV* – вимірювальна підсистема для вимірювання параметрів струму та напруги обмотки вторинної напруги трансформатора, *Power_Def_1459_TC* – вимірювання параметрів кола змінного струму тиристорного випрямляча.

Система *SUBSYSTEM THIRISTOR CONVERTER-MOTOR* (рис. 2) забезпечує імітацію силової частини електричного приводу установки – обпалювальна піч.

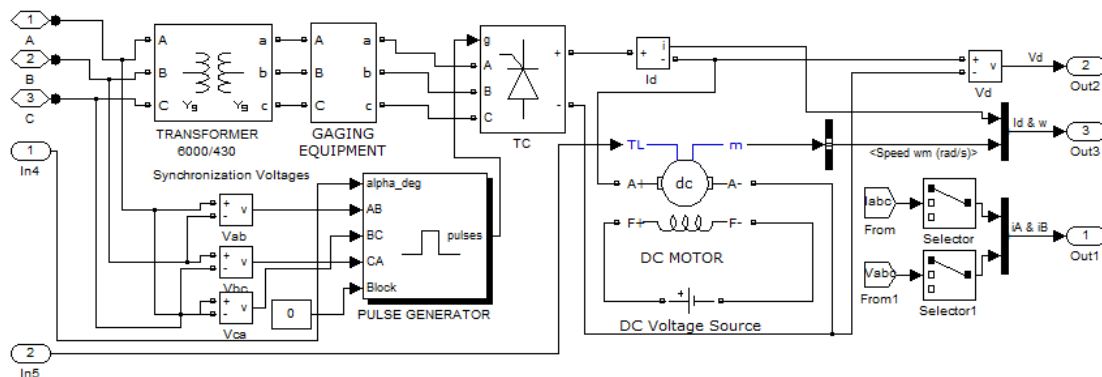


Рисунок 2 – Модель підсистеми *SUBSYSTEM THIRISTOR CONVERTER-MOTOR*

В підсистему введено понижуючий трансформатор - *TRANSFORMER 6000/43* ($P = 630 \text{ кВА}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $U_1 = 6 \text{ кВ}$, $R_1 = 1,715e-5 \text{ Ом}$, $L_1 = 7,7986e-5 \text{ Гн}$, $U_2 = 430 \text{ В}$; $R_2 = 0,918e-5 \text{ Ом}$, $L_2 = 8,9381e-5 \text{ Гн}$); вторинна обмотка якого з’єднана з

трифазним мостовим тиристорним блоком *TC*, напруга та струм якого контролюються з використанням блоку вимірювання - *GAGING EQUIPMENT*. Клеми постійного струму тиристорного випрямляча з’єднані через датчик струму (I_d), з двигуном пос-

тійного струму $-DCmotor(P=180 \text{ кВт}, n = 1750 \text{ об/хв.}, U = 300 \text{ В})$. Обмотка збудження двигуна отримує живлення від джерела постійної напруги. Вихідна напруга тиристорного випрямляча контролюється датчиком напруги (V_d). Додатково за виходом m виконується контроль частоти обертання вала двигуна. Керування тиристорами випрямляча здійснюється по входу g блоку TC . Імпульси керування генеруються блоком $Pulsegenerator$, який з використанням датчиків напруги синхронізований з мережею. Силові порти A, B, C призначені для зв'язку підсистеми із системою електропостачання. За входом $In 4$ до підсистеми подають сигнал еквівалентний куту керування α . За входом $In 5$ до підсистеми подають сигнал еквівалентний моменту навантаження двигуна. Вихідні порти $Out 1-3$ призначені для передачі контрольованих параметрів двигуна до блоку відображення ($Scope 4$).

Компоненти потужності електричної енергії достатньо якісно і ґрунтовно викладені в стандарті IEEE 1459-2010 [6]. Визначення деяких компонент потужності електричної енергії згідно з зазначеним стандартом виконано в моделі блоками $Power_Def_1459_TV$ та $Power_Def_1459_TC$. При цьому покладаючи струм та напругу періодичними несинусоїдальними з двох компонент: фундаментальної i_1, u_1 та решти членів i_H, u_H ,

$$i = i_1 + i_H;$$

$$u = u_1 + u_H,$$

які визначають

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \psi_{i1});$$

$$u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \psi_{u1});$$

$$i_H = \sum_{k \neq 1} \sqrt{2}I_k \sin(k\omega t + \psi_{ik});$$

$$u_H = \sum_{k \neq 1} \sqrt{2}U_k \sin(k\omega t + \psi_{uk}),$$

де U_k, I_k - амплітуди гармонійних складових напруги та струму; ψ_{i1}, ψ_{u1} - початкові фази відповідних гармонійних напруги та струму, потужність визначають шляхом множення

$$p = ui,$$

Визначають активну потужність

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p_a dt = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} uidt,$$

Ефективне значення напруги та струму

$$U = \sqrt{\frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} u^2 dt}; I = \sqrt{\frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i^2 dt}$$

Ефективне значення напруги та струму вищих гармонійних

$$U_H = \sqrt{\sum_{k \neq 1} U_k^2}; I_H = \sqrt{\sum_{k \neq 1} I_k^2}.$$

потужність розділяють на складові – фундаментальну P_1 та не фундаментальну P_H наступним чином:

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p_a dt = P_1 + P_H;$$

$$P_1 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} u_1 i_1 dt = U_1 I_1 \cos \varphi_1;$$

$$P_H = U_0 I_0 + \sum_{k \neq 1} U_k I_k \cos \varphi_k = P - P_1.$$

Повна потужність

$$S = UI,$$

Повну потужність розділяють на фундаментальну

$$S_1 = U_1 I_1,$$

що відповідає відомим представленням потужності для моно гармонічних струмів та напруг, та не фундаментальну повну потужність

$$S_N^2 = S^2 - S_1^2,$$

яку поділяють на три складові

$$S_N^2 = D_I^2 + D_U^2 + S_H^2,$$

потужність спотворення струму

$$D_I = U_1 I_H,$$

потужність спотворення напруги

$$D_U = U_H I_1,$$

гармонічна повна потужність

$$S_H = U_H I_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2},$$

де D_H - потужність гармонічних спотворень

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2}.$$

На рис. 3-6 наведені часові діаграми напруги та струму мережевого кола тиристорного випрямляча та вторинної обмотки цехового трансформатора. Аналіз часових діаграм показує очікувані викривлення струму перетворювача, які впливають на характер його напруги. Причому зазначені викривлення не істотні і незначно впливають на напругу та струм цехового понижуючого трансформатора.

Для обґрунтування зазначеного зауваження виконано ланку експериментів в ході яких змінювався кут керування тиристорним випрямлячем. Результати експерименту зведені та відбиті у вигляді графіків на рис. 7-10.

Аналіз графічних залежностей на рис. 7 та 8 показує, що значні зміни у активній та неактивній потужностях в колі змінного струму тиристорного випрямляча не призводять до подібної зміни в колі вторинної обмотки цехового трансформатора. Таким чином доля потужності зазначеного характеру є незначною та не впливає на завантаження цехового трансформатора.

Аналіз залежності потужності викривлення представленої на рис. 9-10 показує, що потужність викривлення зумовлена вищими гармонійними струму розповсюджується без змін з кіл змінного струму тиристорного випрямляча до кіл вторинної обмотки цехового трансформатора причому. В той же час потужність викривлення зумовлена вищими гармоніками напруги суттєво зменшена, таким чином викривлення потужності електричної енергії розповсюджується мережею саме потужністю викривлення зумовленою гармоніками струму.

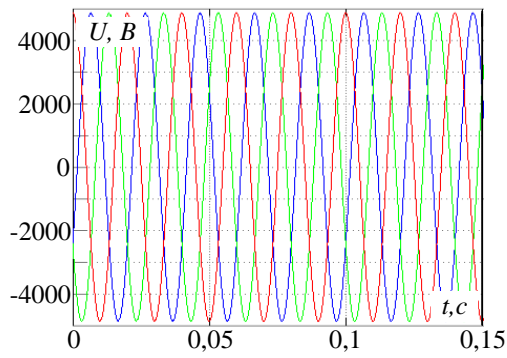


Рисунок 3 – Результати експерименту зняті з SCOPE на вторинній обмотці цехового трансформатора

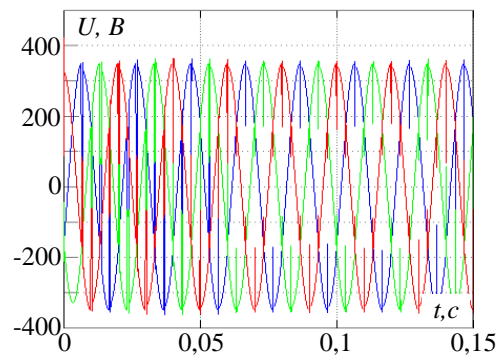


Рисунок 4 – Результати експерименту зняті з SCOPE2 на тиристорному перетворювачі

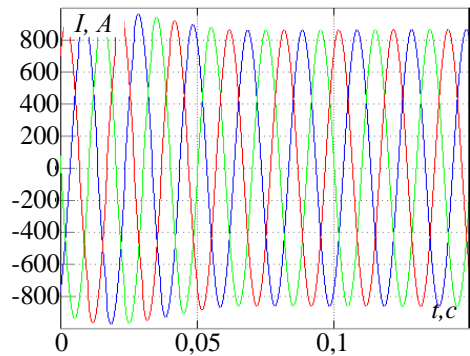


Рисунок 5 – Результати експерименту зняті з SCOPE1 на вторинній обмотці цехового трансформатора

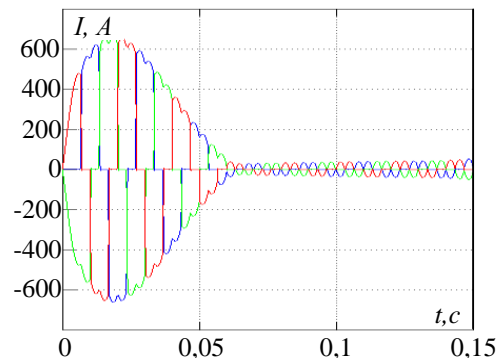


Рисунок 6 – Результати експерименту зняті з SCOPE3 на тиристорному перетворювачі

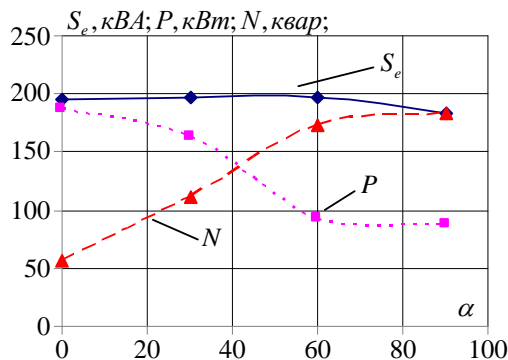


Рисунок 7 – Залежність S_e, P, N від кута відкриття тиристорів α при моменті $M = M_{НОМ}$ на тиристорному перетворювачі

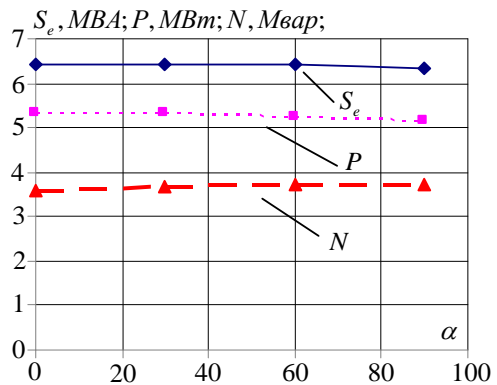


Рисунок 8 – Залежність S_e, P, N від кута відкриття тиристорів α при моменті $M = M_{НОМ}$ на вторинній обмотці цехового трансформатора

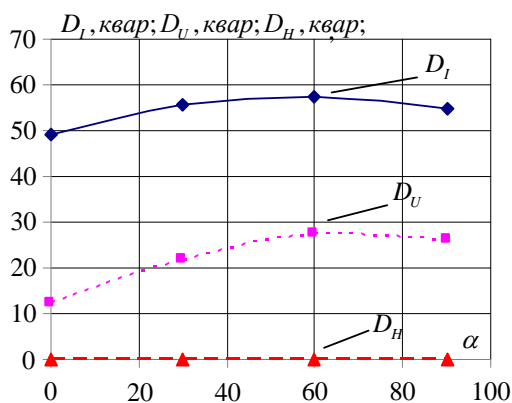


Рисунок 9 – Залежність D_I, D_U, D_H від кута відкриття тиристорів α при моменті $M = M_{НОМ}$ на тиристорному перетворювачі

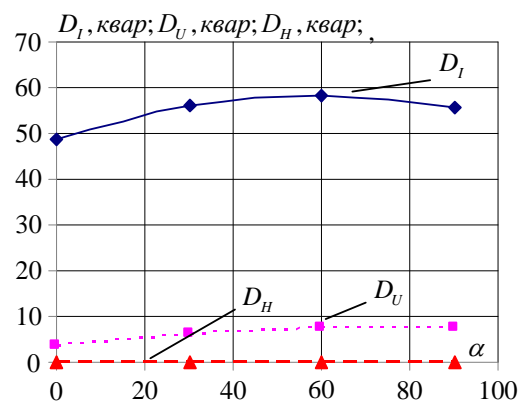


Рисунок 10 – Залежність D_I, D_U, D_H від кута відкриття тиристорів α при моменті $M = M_{НОМ}$ на вторинній обмотці цехового трансформатора

ВИСНОВКИ. З використанням прийомів та засобів візуального програмування виконано дослідження споживання електричної енергії ділянки цеху промислового підприємства з установкою, силова частина якої виконана за системою тиристорний випрямляч – двигун постійного струму. Керуючись розрахунковими співвідношеннями рекомендованими стандартом IEEE 1459-2010 для визначення компонент потужності в модель введений відповідний вимірвальний блок. В результаті ланки експериментів в ході яких змінювався кут керування тиристорним випрямлячем, встановлено що потужність спотворення зумовлена гармоніками струму передається до понижуючого трансформатора підстанції без змін, в той час як потужність зумовлена гармоніками напруги значно зменшується. Процес розповсюдження зазначених компонент потужності потребує подальших досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – 3-ие изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
2. Власенко Р. В., Бялобржеський О. В. Оцінка складових потужності електричної мережі при роботі силового активного фільтру за стандартом IEEE 1459-2010. Енергетика, економіка, технології, екологія – Київ, НТУУ «КПІ». Матеріали міжнародної конференції «Інтелектуальні енергетичні системи – ESS`15» 2015. №4 (42), 2015. С. 57–62.
3. Шидловський А. К., Кузнецов В. Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. К.: Наукова думка, 2002. 268 с.
4. Давидов О. Ю., Бялобржеський О. В. Аналіз засобів компенсації реактивної потужності. *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КДУ, 2010. Вип. 3/2010(62) ч. 1. С. 132–136.
5. Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. І. Енергозбереження засобами промислового електропривода. К.: Кондор, 2005. 408 с.
6. Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Й. Моделирование электромеханических систем. Кременчук, 1999. 204 с.
7. Карлик Є. П., Бялобржеський О. В. Дослідження споживання електричної енергії електродвигунами змінного і постійного струму з електричними перетворювачами. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КрНУ імені Михайла Остроградського, 2011. Вип. 2/2011 (14). С. 50–53.
8. Домнин И. Ф., Жемеров Г. Г., Крылов Д. С., Сокол Е. И. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники. *Технічна електродинаміка, тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*. 2004. ч. 1. С. 81–90.
9. Власенко Р. В., Бялобржеський О. В. Адаптивне управління релейним регулятором струму трифазного силового активного фільтру. *Електротехніка та електроенергетика*. 2014. № 2. С. 11–21.
10. Терёхин В. В. Основы моделирования в MATLAB. Часть 2. Simulink. Новокузнецк 2004. – 212 с.

THE RESEARCH OF THE ELECTRICAL ENERGY DISTORTION CHARACTERISTICS IN THE ALTERNATING CURRENT CIRCUIT OF THE THYRISTOR RECTIFIER - DC MOTOR COMPLEX

B. Tenytskiy, A. Biaiobrzzeski, R. Horoshko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul.Pershotravneva, 20, Kremenchuk, Ukraine.E-mail: bogdan0633028766bogdan@gmail.com

Purpose. The research was realized on a model system «thyristor rectifier - the DC motor». According to the calculated ratios, recommended by the standard IEEE 1459-2010 it was collected in a specialized visual programming environment. **Methodology.** Mathematical simulation of the industrial plant with installation – roaster was applied. According to the calculated ratios, recommended by the standard IEEE 1459-2010 the power part of the model was made as the system «thyristor rectifier - the DC motor». **Results.** The research of electricity consumption of the industrial plant with installation site the power part of which was made on the system «thyristor rectifier - a DC motor» was realized by using the visual programming techniques and means. A corresponding measuring block was introduced into the model for the determination of the power component that guided by the calculated ratios recommended by the IEEE 1459-2010 standard. As a result of the experiments links, during which the control angle of the thyristor rectifier was changed, It was established that the power of the distortion caused by the current harmonics is transferred to the substation lowering transformer unchanged, while the power due to harmonics of the voltage is significantly reduced. The process of distributing these power components requires further research. **Originality.** For the first time, it was carried the research of the electrical energy consumption of the site of the industrial plant with installation – roaster, guided by the directions recommended by the IEEE 1459-2010 Standard for the system «thyristor rectifier - the DC motor». **Practical value.** The experimental studies have confirmed the adequacy of the model which allows to determine the power component for the system «thyristor rectifier - the DC motor» and others. The use of passive devices to improve the regime parameters of electricity distribution systems doesn't produce the expected results, particularly in the case when the regime parameters are time-varying. As a result, the question of the influence of such consumers on the power supply system is actual issue. References 10, figures 10.

Key words: thyristor rectifier, power-supply system, component power electric energy.

REFERENCES

1. Zhezhelenko, I. V., Saenko, Yu. L. (2000), “*Pokazatili kachestva elektroenergii I ih control na promishlennix predpiyatiyah*” [Power quality and control of industrial plants], Moscow, Energoatomizdat, 252 p.
2. Vlasenko, R. V., Bialobrzhesky, O. V. (2015), “*Otsinka skladovuh potygnosti elektrichnoi meregi pru roboti sulovogo aktivnoho filtra za standartom IEEE 1459-2010*” [Estimate power to standard IEEE 1459-2010 at work active power filter] KPI № 4 (42), pp. 57 – 62.
3. Shidlovsky, A. K., Kuznetsov, V. G. (2002), “*Povisheniya kachestva energii v elektrichnih senyah*” [Improving the quality of energy in electrical networks] Naykova dymka, Kiiv, pp. 268.
4. Davydov, O. Yu., Bialobrzhevsky, O. V. (2010), “*Analiz zasobiv kompensatii reaktivnoi potygnosti*” [Analysis of reactive power compensation methods] Visnyk Kremenichuk National University, 2010, № 3, pp. 132–136.
5. Zakladnyy, O. M., Prakhovnyk, A. V., Solovey, O. I. (2005) “*Energozberegennya zasobamu promuslovogo electroprivoda*” [Energy saving by means of industrial electric drive] K. Kondor, pp. 408.
6. Chorniy, O. P., Lugovoy, A. V., Rodkin, D. Y. (1999) “*Modelyvannya elektromehanichnuh sistem*” [Modeling of electromechanical systems] Kremenichuk, pp. 204.
7. Karlyk, Ye. P., Bialobrzhes'kyu, O. V. (2011) “*Doslidzhennay spozhuvannay elektrichnoi energii elektrodvugunamu zminnoho i postiynoho strymu z elektruchnumu peretvoryvachamu*” [Research electricity consumption ac and dc motors with electrically converters] Kremenichuk natsional'nyy universytet imeni Muxayla Ostrogradskoho *Electromexanichni i energozberigaychi sustemu*, pp.50-53.
8. Domnin, I. F., Zhemerov, G. G., Krylov, D. S., Sokol, E. I. (2004) “*Sovremennyye teorii moshchnosti i ikh ispol'zovaniye v preobrazovatel'nykh sistemakh silovoy elektroniki*” [Modern theories of power and their use in converter systems of power electronics] *Tekhnichna elektrodynamika, tematychnyy vypusk "Problemy suchasnoyi elektrotekhniki"*, pp. 81 - 90.
9. Vlasenko, R. V., Bialobzhezhsy, O. V. (2014) “*Adaptyvne upravlinnya releynym rehulyatorom strumu tryfaznoho sylovoho aktyvnoho fil'tru*” [Adaptive control of the relay current regulator of the three-phase power active filter] *Elektrotekhnika ta elektroenerhetyka № 2*, pp.11 – 21.
10. Teryohin, V. V. (2004), “*Osnovyi modelirovaniya v MATLAB Chast2. Simulink*” [Fundamentals of Modeling in MATLAB Parts2], Novokuznetsk, pp. 212.

Стаття надійшла 04.10.2018.