

6. Tesla Nikola. *Leksii i stat'i* [Lectures and articles]. Moscow, Tesla Print Publ., 2003. 386 p. (Rus.)
7. Iavorskii B.M., Detlaf A.A., Lebedev A.K. *Spravochnik po fizike dlia inzhenerov i studentov VU-Zov* [Physics handbook for engineers and students of universities]. Moscow, Oniks Publ., 2006. 1056 p. (Rus.)
8. Atabekov G.I. *Osnovy teorii tsepei* [Fundamentals of circuit theory]. Leningrad, Energiia Publ., 2006. 220 p. (Rus.)
9. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p. (Rus.)

Рецензент: А.В. Гнатов
д-р техн. наук, проф., ХНАДУ

Статья поступила: 01.12.2017

УДК 621.316.722

doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142548

© Хорошко Р.А.¹ Теницький Б.А.² Бялобржеський О.В.³

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В КОЛІ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ, ЩО ЖИВИТЬ СИНХРОННИЙ ДВИГУН

В роботі шляхом моделювання проведено дослідження розподілу потужності електричної енергії системи електроживлення виробничого цеху. В якості енергоємного об'єкту з нелінійним навантаженням обрано привід синхронного двигуна, що керується тиристорним перетворювачем. В ході досліджень розглянуто вплив даної системи на потужність електричної енергії.

Ключові слова: компоненти потужності, синхронний двигун.

Хорошко Р.А., Теницький Б.А., Бялобржеский А.В. Исследование динамических характеристик мощности электрической энергии в цепи тиристорного регулятора напряжения, что питает синхронный двигатель. В работе путем моделирования проведено исследование распределения мощности электрической энергии системы электроснабжения производственного цеха. В качестве энергоёмкого объекта с нелинейной нагрузкой выбрано привод синхронного двигателя, управляемого тиристорным преобразователем. В ходе исследований рассмотрено влияние данной системы на мощность электрической энергии.

Ключевые слова: компоненты мощности, синхронный двигатель.

R.A. Khoroshko, B.A. Tenitsky, O.V. Bialobrzhesky. Dynamic characteristics research of electric output in the circuit with thyristor voltage regulator supplying the synchronous motor. Societal development is followed by increasing consumption of electrical energy. Sharp increase of energy consumption is conditioned by escalation of production and technological advancement. The number of industrial consumers is rising, most of which are non-linear, non-symmetrical and ever-changing. Primarily they are semiconductor converters of high power capacity. These are thyristor converters and thyristor regulators. Thyristor voltage regulators are widespread in different production spheres. Mostly they are used as soft start devices for synchronous and asynchronous machines.

¹ студент, КрНУ «Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського», м. Кременчук, metacritic@ukr.net

² студент, КрНУ «Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського», м. Кременчук

³ канд. техн. наук, доцент, КрНУ «Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського», м. Кременчук, seemal@kdu.edu.ua

Thyristor transducers and thyristor voltage regulators are used to control the modes of electrical installations as well. Higher harmonics emerge during thyristor converter's operation. These upper harmonics can cause overheating and breakdown of neutral conductors, false starts of fuses and automatic switches, accelerated aging of wires and cables, additional power losses in transformers, distortion of voltage sine wave, premature wear and failure of capacitors in power compensation installations, failures of computer and telecommunication hardware, lower power factor of electrical installations and incorrect metering. Proper evaluation of electrical energy quality is one of the most important problems for industrial enterprises in the conditions of modern technological advancement. The up-to-date standard which declares the order of evaluating electrical power components is IEEE 1459-2010 standard. The standard provides the definitions used for measuring electric power quantities under sinusoidal, non-sinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. The mathematical expressions used in the past are listed, as well as the new expressions, and the explanations of the new definitions features.

Keywords: power components, synchronous motor.

Постановка проблеми. При роботі тиристорних перетворювачів в системах електропостачання виникають вищі гармонійні складові. В умовах сучасного технологічного розвитку одним з найважливіших питань для промислових підприємств є достовірна оцінка якості електроенергії [1]. В наш час актуальним стандартом, який декларує порядок визначення компонент потужності електричної енергії, є стандарт IEEE 1459-2010 [2]. В даному стандарті для реалізації алгоритму визначення складових потужності покладена вимога передачі максимальної потужності від джерела споживачеві, а саме – прямої послідовності основної гармоніки [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Тиристорні перетворювачі та тиристорні регулятори напруги використовуються для управління режимами електротехнічних установок. В теорії електропривода отримані аналітичні залежності моменту асинхронного електродвигуна від напруги та втрат енергії в усталених режимах роботи при номінальних параметрах живлячої мережі [4]. В роботі [5] виконані дослідження активних та реактивних потужностей основної гармоніки в мережі з тиристорним перетворювачем та двигуном постійного струму в квазістатичних режимах. Відомі також дослідження з оцінкою рівня втрат від вищих гармонік у синхронних двигунах [6], але при цьому питання розподілу показників електричної енергії для подібних систем, працюючих за умов частих пусків та гальмувань, не досліджені.

Метою даної роботи є дослідження динамічних характеристик потужності електричної енергії в колі тиристорного регулятора напруги, що живить синхронний двигун, з використанням стандарту IEEE 1459-2010.

Виклад основного матеріалу. *Матеріал і методика дослідження.* В даній роботі розглядається система електропостачання цеху обпалювання окатишів. Для проведення досліджень дану систему було зібрано в програмному пакеті MatLab. Схема складається з блоків, що є еквівалентними елементами системи. Об'єктом дослідження даної математичної моделі є система тиристорний перетворювач – синхронний двигун, що імітує собою електричну систему шарового млина. В даній установці застосовано синхронний двигун типу СДЗ-2-250-1500У3. Для зручності споживачі цеху було об'єднано в одну групу та представлено у вигляді активно – індуктивного навантаження.

Досліджувана система електроспоживання (рис. 1) складається з наступних елементів: трифазне джерело живлення, яке імітує параметри мережі, (1): $U = 35$ кВ; двохобмотувальний трансформатор цехової підстанції (2): $P = 10000$ кВА, $U_1 = 35$ кВ, $U_2 = 6$ кВ; блок вимірювання струму та напруги мережі (3); активно-індуктивний опір лінії та шинопроводу (4): $R = 0,084$ Ом, $L = 0,000067$ Гн; система «тиристорний регулятор – двигун змінного струму» (5); блок, що задає графічний інтерфейс осцилографам, (6) [7]; блок завдання кута керування тиристорами регулятора (7); блок, що імітує навантаження сторонніх споживачів, (14). Для визначення показників потужності електричної енергії в контрольованих вузлах (сторони нижчої напруги трансформатора та статорного кола синхронного двигуна) введено блоки вимірювальних підсистем (8) та (9). Сигнал на ці підсистеми подається з адресних портів (10-13). Підсистеми (8) та (9) ідентичні та забезпечують визначення компонент потужностей [2], які характеризують кількість та якість електричної енергії.

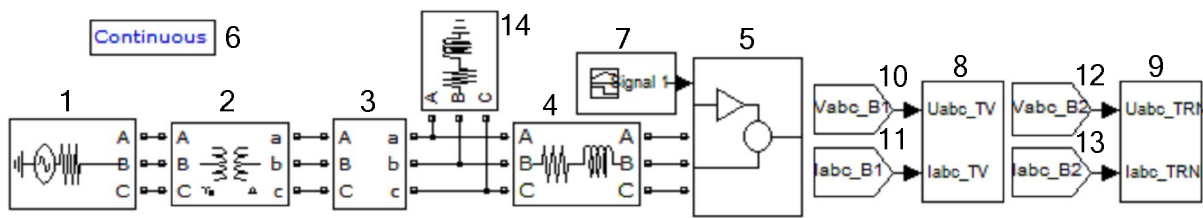


Рис. 1 – Схема системи електроживлення

Вважаючи струм та напругу періодичними несинусоїдальними сигналами, що складаються з двох компонент [2]: фундаментальної i_1, u_1 та решти членів i_H, u_H :

$$i = i_1 + i_H;$$

$$u = u_1 + u_H,$$

які визначаються:

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

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

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

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

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:

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

де T – період; k – позитивне ціле число; τ – точка початку вимірювання.

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 вищих гармонійних складових напруги та струму:

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

Потужність розділяють на складові – фундаментальну P_1 та нефундаментальну P_H – наступним чином:

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

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

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

Фундаментальну реактивну потужність [2] визначають як:

$$Q_1 = \frac{\omega}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i_1 \left[\int u_1 dt \right] dt = U_1 I_1 \sin \varphi_1.$$

Також використовується поняття повної потужності:

$$S = UI,$$

де U, I – діючі значення напруги та струму. При цьому доцільність використання поняття

повної потужності полягає у наданні їй змісту, міри кількості активної потужності, що може передаватися в навантаження з синусоїдальним струмом та напругою, які мають відповідні діючі значення.

Разом з цим повну потужність розділяють на фундаментальну:

$$S_1 = U_1 I_1;$$

$$S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2,$$

що відповідає відомим представленням потужності для моногармонічних струмів та напруг, та нефундаментальну повну потужність:

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

яку поділяють на три складові:

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

де

$$D_I = U_1 I_H - \text{потужність спотворення струму};$$

$$D_U = U_H I_1 - \text{потужність спотворення напруг};$$

$S_H = U_H I_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2}$ – гармонічна повна потужність, де D_H – потужність гармонічних спотворень:

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

На рисунку 2 наведено систему «тиристорний регулятор – двигун змінного струму» (рис. 1. блок 5), сформовану в середовищі візуального програмування. Схема включає наступні блоки: систему імпульсно-фазового управління (1); блокування (2); зустрічно-паралельно ввімкнені тиристорні модулі (3-5); підсистему пуску синхронного двигуна (6); блоки синхронізації за напругою фаз (7-9); блоки комутації синхронного двигуна на підсинхронній швидкості (10-11); навантаження власних потреб (12); порти, через які підсистема отримує живлення (13); порт, через який блок фазового управління отримує сигнал керування (14).

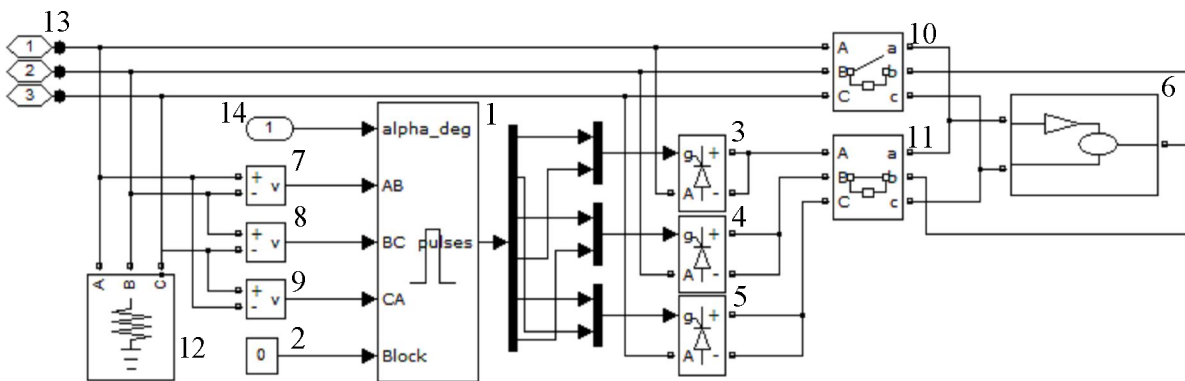


Рис. 2 – Схема підсистеми тиристорного регулятора напруги двигуна змінного струму

Схема пуску синхронного двигуна, що наведена на рисунку 3, має у своєму складі: синхронний двигун, що імітує привід шарового млина (1); блок, що забезпечує обмеження зміни сигналу (2); блок зміни потужності на валу двигуна (3); блок комутації обмотки збудження з пускового опору на незалежне джерело (4); блоки завдання потужності та напруги (5-7); блок масштабування (8), який імітує пусковий активний опір; блок детектування підсинхронної швидкості (9); RS-тригер (10) для фіксації моменту досягнення підсинхронної швидкості; осцилограф (11), що відображає параметри синхронного двигуна; осцилограф (12), що відображає напругу в колі двигуна; блок вимірювання фазних струмів та напруг статора синхронного двигуна (13); адресний порт (14); порти, через які підсистема отримує живлення (15).

Для дослідження показників енергоспоживання в перехідному режимі з обмеженням струму статора сформовано залежність кута керування тиристорним регулятором у часі

(рис. 4), що в кінцевому випадку реалізує плавний пуск двигуна [8].

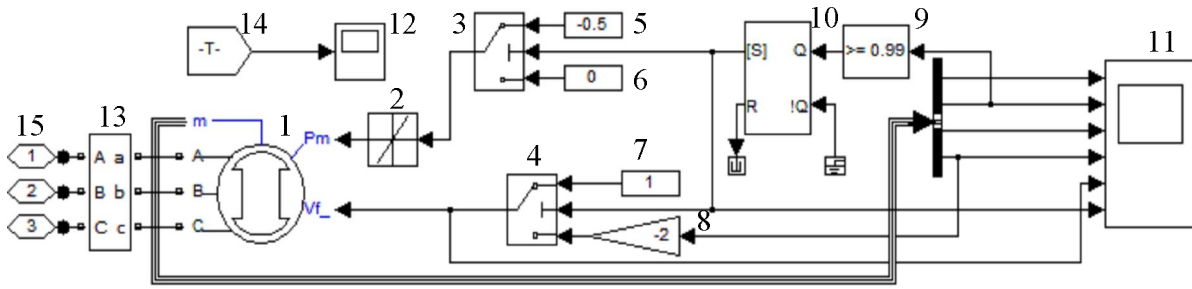


Рис. 3 – Підсистема пуску синхронного двигуна

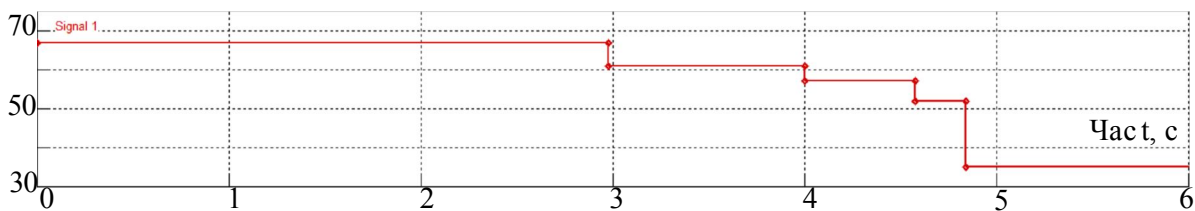


Рис. 4 – Сигнал керування тиристорним перетворювачем

Результати досліджень. Для перевірки працездатності та адекватності моделі виконано контроль та реєстрацію часових діаграм струму, моменту та швидкості обертання синхронного двигуна. Вони представлені на рисунку 5. За технічними даними машини момент її інерції призводить до досить тривалого запуску при моделюванні. Щоб зменшити цей час, параметр коефіцієнту інерції машини знижено до $H = 1$ с.

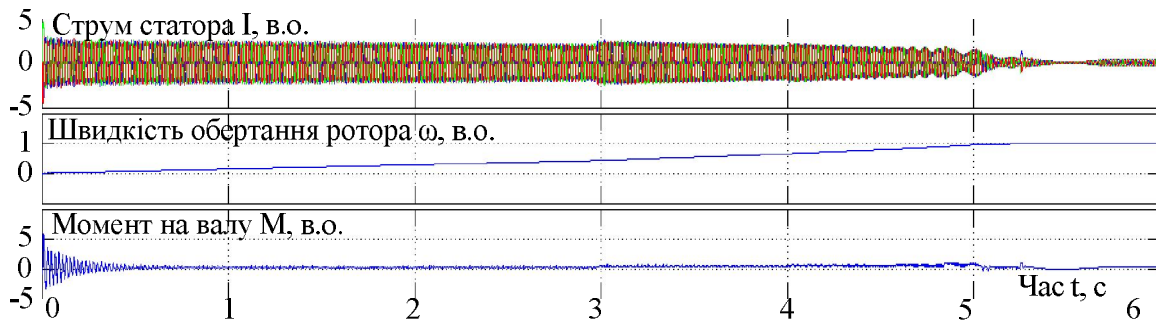


Рис. 5 – Струм статора, швидкість обертання та електромагнітний момент синхронного двигуна

В ході попередніх досліджень встановлено, що при малому куті керування тиристорами на інтервалі часу 4,8-6 с (рис. 4) відбувається зрив регулювання тиристорного регулятора. Також обмотка збудження перемикається на джерело живлення. Це забезпечується блоками 10, 11 (рис. 2).

Проведено дослідження характеру споживаної системою потужності. Для аналізу визначені певні компоненти потужності. Процес запуску супроводжується виникненням гармонік як струму, так і напруги, та їх зміною під час пуску. Цікавим є розподіл потоків електричної енергії. Вони зумовлені основною гармонікою струму та напруги і вищими гармоніками в колі статора синхронного двигуна та на обмотках нижчої напруги трансформатора. В ході виконання дослідження отримані діаграми зміни у часі наступних компонент потужності електричної енергії [2]:

- 1) активної потужності прямої послідовності основної гармоніки – рис. 6, а;
- 2) реактивні потужності прямої послідовності основної гармоніки – рис.6, б;
- 3) потужності спотворення зумовленої гармоніками напруги – рис. 7, а;
- 4) потужності спотворення зумовленої гармоніками струму – рис. 7, б.

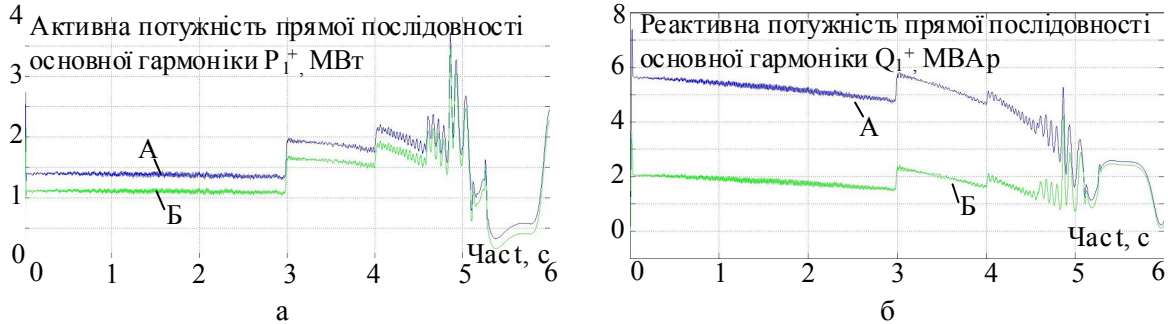


Рис. 6 – Результати вимірювання потужностей прямої послідовності: а – активна потужність прямої послідовності основної гармоніки (А – на стороні низької напруги трансформатора; Б – в колі статора синхронного двигуна); б – реактивна потужність прямої послідовності основної гармоніки (А – на стороні низької напруги трансформатора; Б – в колі статора синхронного двигуна)

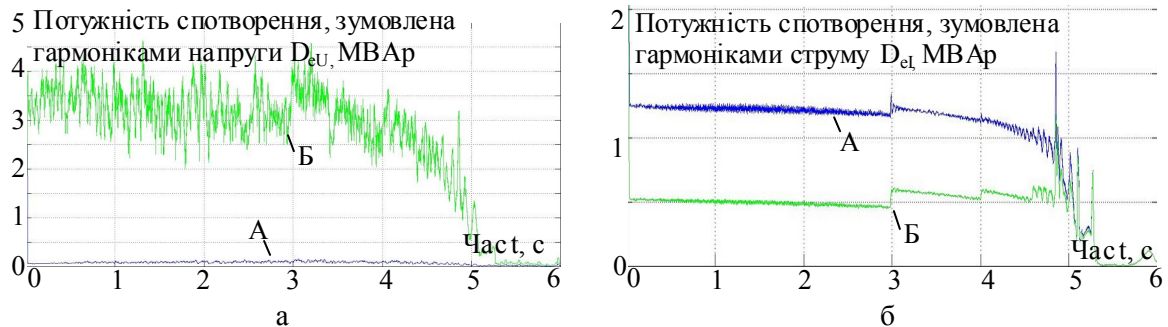


Рис. 7 – Результати вимірювання потужностей спотворення: а – потужності спотворення, зумовлені гармоніками напруги (А – на стороні низької напруги трансформатора; Б – в колі статора синхронного двигуна); б – потужності спотворення, зумовлені гармоніками струму (А – на стороні низької напруги трансформатора; Б – в колі статора синхронного двигуна)

На рисунку 6, а, активна потужність прямої послідовності основної гармоніки в колі статора синхронного двигуна (Б) суттєво нижча, ніж на стороні низької напруги трансформатора (А) через наявність сторонніх споживачів (рис. 1, блок 14).

Графіки, наведені на рисунках 6, б та 7, а, підтверджують відомі міркування – зі зменшенням кута керування тиристорним регулятором зменшується зсув фази між струмом та напругою основної гармоніки, тому активна потужність зростає. В той же час характер зміни реактивної потужності на інтервалі (0-4 с) (рис.6, б) не відповідає зазначеним міркуванням.

При цьому потужність спотворення, викликана гармоніками напруги, що виникають при роботі системи «тиристорний регулятор напруги – синхронний двигун», передається в мережу, але виявляється в ній як потужність спотворення, викликана гармоніками струму. Визначення причин такої зміни компонент потужності потребує додаткових досліджень. Перспективою таких досліджень є більш чітке розуміння компонент потужностей, що в подальшому може дати можливість для виведення математичних залежностей, що будуть пояснювати характер поведінки даних компонент. Володіння такими математичними залежностями в перспективі дозволить більш точно оцінювати параметри потужностей та конструювати більш досконалі моделі електричних машин.

Висновки

При дослідженні еквівалентної схеми електропостачання з використанням моделювання встановлено, що для системи «тиристорний регулятор напруги – синхронний двигун» за умов реалізації режиму пуску з регулюванням кута керування потужність спотворення, викликана гармоніками напруги, передається в мережу, але виявляється в ній як потужність спотворення, викликана гармоніками струму.

Список використаних джерел:

1. Жежеленко И.В. Качество электрической энергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 161 с.
2. IEEE 1459-2010 Standard Definition for the measurement of Electric Power Quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced or unbalanced conditions. – IEEE Power and Energy Society. – Introduced 19-03-2010. – New York, 2010. – 40 p.
3. Willems, J.L. The Apparent Power Concept and the IEEE standard 1459-2000 / J.L. Willems, J.A. Ghijselen, A.E. Emanuel // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20, issue 2. – Pp. 876-884.
4. Лавріненко Ю.М. Основи електроприводу / Ю.М. Лавріненко, О.Ю. Сиявський, В.В. Савченко. – Київ, 2010. – 161 с.
5. Карлик Є.П. Дослідження споживання електричної енергії електродвигунами змінного і постійного струмів з електричними перетворювачами / Є.П. Карлик, О.В. Бялобржеський // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2011. – Вип. 2 – С. 50-53.
6. Особливості регулювання електродвигунів пристроями силової перетворювальної техніки промислового електроприводу / І.В. Пантелеєва [та ін.] // Комунальне господарство міст. – 2012. – № 112. – С. 61-65.
7. Терехин В.В. Основы моделирования в MATLAB: в 2 ч. / В.В. Терехин. – Новокузнецк : Кузбассвузиздат, 2004. – 2 ч. – 212 с. – (Simulink).
8. Моделювання електромеханічних систем / О.П. Чорний, А.В. Луговий, Д.Й. Родькін, Г.Ю. Сисюк, О.В. Садовий. – Кременчук, 2001. – 410 с.

References:

1. Zhezhelenko I.V. *Kachestvo elektrycheskoi enerhyu na promyshlennykh predpriyatiakh* [Quality of electric energy at industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1981. 161 p. (Rus.)
2. IEEE 1459-2010 Standard Definition for the measurement of Electric Power Quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced or unbalanced conditions. IEEE Power and Energy Society. New York, 2010. 40 p.
3. Willems J.L., Ghijselen J.A., Emanuel A.E. The Apparent Power Concept and the IEEE standard 1459-2000. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, vol. 20, iss. 2, pp. 876-884.
4. LavrInenko Y.M. *Osnovi elektroprivodu* [The basics of the electric drive]. Kiev, 2010. 161 p. (Ukr.)
5. Karlik E.P., Byalobrzheskyi A.V. Doslidzhennia spozhivannia elektrichnoi energii elektrodvignunami zminnogo i postiinogo strumiv z elektrichnimi peretvoriuvachami [Research electricity consumption ac and dc motors with electrically converters]. *Elektromekhanichni i energozberigaiuchi sistemi – Electromechanical and energy saving systems*, 2011, no. 2, pp. 50-53. (Ukr.)
6. Pantyleeva I.V. Osoblivosti reguluvannya elektrodvignuniv pristroyami silovoyi peretvoryvalnoyi tehniky promislovogo elektroprivodu [Peculiarities of regulation of electric motors by devices of power transforming technology of an industrial electric drive]. *Komunalne gospodarstvo mist – Municipal economy of cities*, 2012, no. 112, pp. 61-65. (Ukr.)
7. Teryohin V.V. *Osnovni modelirovaniya v MATLAB. Chast 2. Simulink* [Fundamentals of modeling in MATLAB. Part 2. Simulink]. Novokuznetsk, Kuzbassvuzizdat Publ., 2004. 212 p. (Rus.)
8. Chorniy O.P. *Modelyuvannya elektromehanichnih sistem* [Modeling of electromechanical systems], Kremenchuk, 2001. 410 p. (Ukr.)

Рецензент: С.С. Старостін
д-р техн. наук, проф., КрНУ

Стаття надійшла 06.01.2018