3. Pismenny A.A. Improvement of Power Efficiency of Machines for Resistance Spot Welding by Longitudinal Compensation of Reactive Power. *The Paton Welding Journal*, 2014, no.1, pp.25-29.
4. Podnebennaya, S.K., Burlaka, V.V., Gulakov, S.V. On the problem of providing electromagnetic compatibility of power sources of resistance welding machines with electric mains. *The Paton Welding Journal*, 2016, no.12, pp.50-54. **doi: 10.15407/tpwj2016.12.09**.
5. Saleem J. Power Electronics for Resistance Spot Welding Equipment. Thesis work for the degree of Licentiate of Technology. Sundsvall, 2012. 42 p.
6. Wagner, M., Kolb, S. Efficiency improvements for high frequency resistance spot welding. Proceedings of 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, 2013, pp. 1-9. **doi: 10.1109/EPE.2013.6634720**.

Рецензент: В.Л. Малинов
д-р техн. наук, ПИИ ООО «Бюро Веритас Украина»

Статья поступила 15.08.2017

УДК 621.3

© Даєв М.В.[1], Дерев'ягін В.В.[2], Бялобржеський О.В.[3]

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ВИКРИВЛЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ДІЛЯНЦІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЗІ ЗВАРЮВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ

В роботі представлена модель системи електроспоживання ділянки цеху промислового підприємства при наявності у вузлі мережі зварювального агрегату. Модель розроблена у пакеті візуального програмування. З використанням відомих показників потужності електричної енергії оцінено вплив зварювальної установки на показники якості електричної енергії. При дослідженні режиму системи електроспоживання з використанням одночастотного фільтру отримано суттєве зниження викривлення струму та, як наслідок, потужності, але при цьому відзначається певне зростання постійної складової потужності та основної її гармоніки.
Ключові слова: *вищі гармоніки, зварювальний трансформатор змінного струму, сумарне гармонійне спотворення, імпеданс, показники якості.*

Даев М.В., Деревягин В.В., Бялобржеский А.В. Исследование распределения искривления мощности электроэнергии на участке электроснабжения со сварочной установкой. *В работе представлена модель системы электропотребления участка цеха промышленного предприятия при наличии в узле сети сварочного агрегата. Модель разработана в пакете визуального программирования. При использовании известных показателей мощности электрической энергии сделана оценка влияния сварочной установки на показатели качества электрической энергии. При исследовании режима системы электропотребления с использованием одночастотного фильтра получено существенное снижение искривления тока и, как следствие, мощности, но при этом отмечается некое увеличение постоянной составляющей мощности и ее основной гармоники.*
Ключевые слова: *высшие гармоники, сварочный трансформатор переменного тока, суммарное гармоническое искажения, импеданс, показатели качества.*

[1] *студент, Кременчуцький Національний Університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, maksim.daev@gmail.com*
[2] *студент, Кременчуцький Національний Університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, dereviahinvladyslav@gmail.com*
[3] *д-р техн. наук, доцент, Кременчуцький Національний Університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, seemal@kdu.edu.ua*

ISSN 2225-6733

M.V. Daiev, V.V. Dereviahin, O.V. Bialobrzeski. Research on the distribution of distortion of power generation on the area of electronic consumption with a welding equipment. *A model of the power consumption system at a site of an industrial enterprise, where there are consumers with linear and nonlinear characteristics is depicted in this work. In this case, linear customers include lathes and vertical drilling machines. A nonlinear consumer is an AC welding transformer. This distribution of consumers was made taking into account the argument that the nonlinearity that is caused by the operation of industrial machines is relatively small, compared with the nonlinearity that the welding transformer creates in its work. A working model was created in the visual programming package based on the scheme for replacing the power supply system of the workshop. This model makes it possible to obtain instantaneous values of the parameters of the quality indices of electrical energy of the investigated section of the shop. When carrying out the research using known electric power parameters, an assessment of the welding installation influence on the electrical energy quality indicators of the section of the shop of an industrial enterprise was made. The instantaneous powers of the network node have been estimated. An estimation of the influence of these instantaneous powers on the nature of the step-down transformer operation has been made. When studying the mode of the power consumption system without the use of filter compensating devices, a significant distortion in the current of the network, voltage and power can be observed. At the same time, using a single-frequency filter, on the high-voltage side of the welding transformer, a significant reduction in the total distortion of the current is obtained which influences on the change in the power parameter of the electric energy of the network. In this case, there is a definite increase in the constant component of the instantaneous power over one of the phases and its main harmonic.*
Keywords: *higher harmonics, AC welding transformer, THD, impedance, quality indicators.*

Постановка проблеми. Безперебійна робота всіх споживачів електричного енергії залежить від надійності системи електропостачання та якості електроенергії. Робота споживачів суттєво впливає на якісні параметри електричної енергії. Причому даний вплив, певним чином, залежить від параметрів схеми заміщення споживачів електроенергії з нелінійними характеристиками.

Найбільшими винуватцями такого впливу є споживачі з нелінійними характеристиками. Розповсюджені споживачі: лампи розжарювання, сталеплавильні печі, двигуни, дроселі, газорозрядні лампи та ін. [1]. В даній роботі цим обладнанням є зварювальна установка змінного струму. Більшість зварювальних установок – це однофазні споживачі, тому рівномірне розподілення навантаження по фазам не завжди успішне, особливо через наявність потужних установок. Через це в мережі виникає несиметрія та несинусоїдальність струму і напруги [2, 3].

Потік електроенергії, який зумовлений роботою зварювального обладнання, характеризується потужністю та розповсюджується в системі електропостачання. Ця потужність може впливати на завантаження силових трансформаторів цехових підстанцій.

В результаті доцільно оцінити зазначений потік потужності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема, яка пов’язана з якістю показників електроенергії, не нова та включає в себе науково-технічні та техніко-економічні заходи. Ці заходи дозволяють зменшити втрати, викликані роботою нелінійного навантаження [4, 5, 6-8]. Для оцінки спотворення потужності електричної енергії розроблено багато методів, один з яких визначено стандартом [9]. Він дозволяє проаналізувати гармонічні складові потужності [2, 3].

Метою роботи є дослідження впливу зварювальної установки змінного струму на показники якості системи електропостачання.

Виклад основного матеріалу. Як відзначено у роботах [2, 3], істина полягає в тому, що контрольована ділянка навантаження керованих або некерованих випрямлячів виконана набором перемикачів. Вони періодично або послідовно підключені або відключені до одного або декількох лінійних або майже лінійних навантажень в живильній лінії. Правильна назва цьому явищу – параметричне навантаження.

Для цілей даного дослідження всі гармоніки, які генеруються в мережу, будуть розглядатися під єдиною назвою – нелінійне навантаження.

ISSN 2225-6733

Використовуючи підхід, описаний в [2, 3], на рисунку 1 (а, б) зображена схема, де нелінійне навантаження *NL* живиться від мережі, яка має еквівалентну схему, що складається з джерела синусоїдальної напруги в поєднанні з опором R_s та індуктивністю L_s.

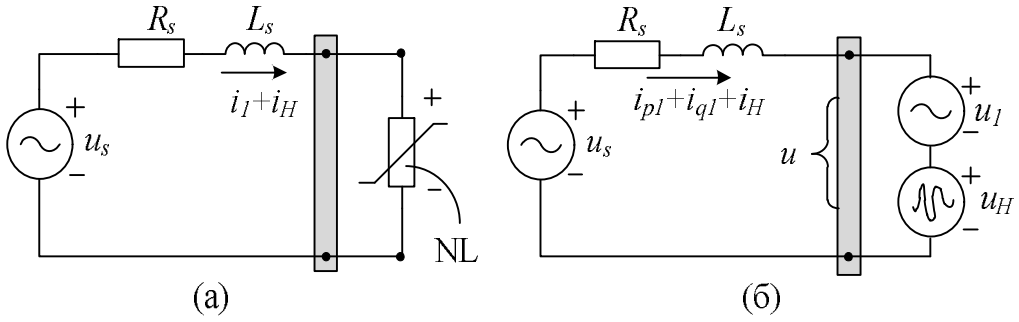


Рис. 1 – Загальний випадок представлення нелінійного навантаження: а – базова схема; б – еквівалентна лінійна схема

Значення струму, який протікає в контурі, розділяється на основне та повне гармонічне:

$$i = i_1 + i_H,$$

де $i_1 = \hat{I}_1 \cdot \sin(\omega \cdot t - \theta_1)$; $I_H = \sum_{h \neq 1} \hat{I}_h \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot t + \alpha_h)$.

Напруга нелінійного навантаження *u* може буде представлена двома еквівалентними напругами з протилежними полярностями (рис. 1, б), де основна фазна напруга береться в якості опорної:

$$u = u_1 - u_H,$$

де $u_1 = \hat{U}_1 \cdot \sin(\omega \cdot t)$; $u_H = \sum_{h \neq 1} \hat{U}_h \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot t + \alpha_h + \theta_h)$.

Струм i_1 складається з активного струму у фазі з напругою u_1 і реактивного струму у квадратурі з u_1:

$$i_{p1} = \hat{I}_1 \cdot \cos(\theta_1) \cdot \sin(\omega \cdot t),\ i_{q1} = -\hat{I}_1 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \cos(\omega \cdot t).$$

Причиною такого поділу струмів є необхідність розрахунку основної миттєвої активної потужності, яка буде вимірюватися на клемах *NL*.

За другим законом Кірхгофа напруга для основної частоти буде дорівнювати:

$$u_s = R_s \cdot i_1 + L_s \cdot \frac{di_1}{dt} + u_1.$$

Таким чином, можна розрахувати основну миттєву потужність, яка подається з u_s:

$$u_s \cdot i_1 = u_s \cdot \left(i_{p1} + i_{q1}\right) = R_s \cdot i_1 \left(i_{p1} + i_{q1}\right) + L_s \cdot \left(i_{p1} + i_{q1}\right) \frac{di_1}{dt} + u_1 \cdot i_{p1} + u_1 \cdot i_{q1}.$$

Неактивні компоненти є результатом взаємодії між u_s з i_H, тому:

$$u_s \cdot i_H = R_s \cdot i_1 \cdot i_H + L_s \cdot i_H \frac{di_1}{dt} + u_1 \cdot i_H.$$

Таким чином, основна миттєва активна та реактивна потужність буде дорівнювати:

$$p_{p1} = u_1 \cdot i_{p1} = \hat{U}_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \left[\hat{I}_1 \cdot \cos(\theta_1) \cdot \sin(\omega \cdot t)\right];$$

$$p_{q1} = u_1 \cdot i_{q1} = \hat{U}_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \left[-\hat{I}_1 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \cos(\omega \cdot t)\right].$$

В результаті протікання струму i_1 через u_s можна записати неактивні компоненти:

$$u_s \cdot i_{p1} = R_s \cdot i_1 \cdot i_{p1} + L_s \cdot i_{p1} \frac{di_1}{dt} + p_{p1};$$

$$u_s \cdot i_{q1} = R_s \cdot i_1 \cdot i_{q1} + L_s \cdot i_{q1} \frac{di_1}{dt} + p_{q1}.$$

ISSN 2225-6733

За Кірхгофом можемо записати гармонійну напругу:

$$u_H = \sum_{h\neq 1} u_h = R_s \cdot \sum_{h\neq 1} i_h + L_s \cdot \sum_{h\neq 1} \frac{di_h}{dt} = R_s \cdot i_H + L_s \frac{di_h}{dt}.$$

Гармонійна напруга дає можливість розрахувати миттєві потужності через наявність в колі струму i_1 та i_H:

$$u_H \cdot i_1 = R_s \cdot i_H \cdot i_1 + L_s \cdot i_1 \frac{di_H}{dt};$$

$$u_H \cdot i_H = \sum_{h\neq 1} u_h \cdot \sum_{h\neq 1} i_h = \sum_{h\neq 1} u_h \cdot i_h + \sum_{\substack{m\neq n \\ m,n\neq 1}} u_m \cdot i_n =$$

$$= R_s \cdot \sum_{h\neq 1} i_h^2 + R_s \cdot \sum_{\substack{m\neq n \\ m,n\neq 1}} i_m \cdot i_n + L_s \cdot \left[\sum_{h\neq 1} i_h \frac{di_h}{dt} + \sum_{\substack{m\neq n \\ m,n\neq 1}} i_m \frac{di_n}{dt} \right].$$

Проводячи аналіз компонент потужності, відображення яких представлене на рис. 2, можна сказати, що частина потужності, що зумовлена вищими гармонійними складовими, буде викликати втрати напруги та потужності в елементах мережі електропостачання. Це призведе до спотворення напруги в місці приєднання нелінійного навантаження. При цьому режим і характер цього навантаження визначатимуть склад потужності, споживаної зазначеними споживачами.

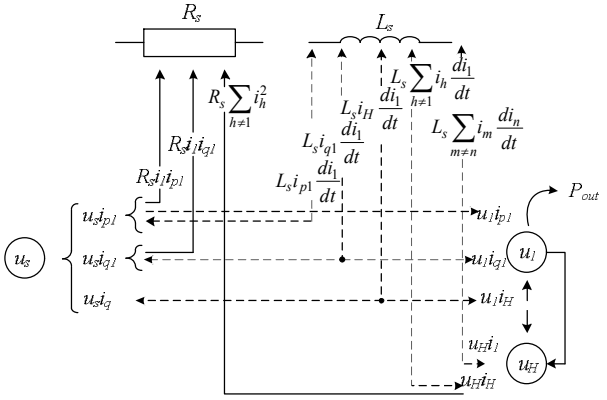


Рис. 2 – Потік миттєвих потужностей

На рис. 3 зображена модель системи електропостачання цеху, складена в програмному середовищі. В цій моделі були використані наступні елементи: трифазне джерело напруги *Three-PhaseSource:* частота f = 50 Гц, $U_н$ = 10 кВ, відношення реактивного опору до активного *X/R*= 7; силовий трансформатор потужністю 400 кВА зі з'єднанням обмоток D/Y_g: $U_{ВН}$ = 10 кВ, $U_{НН}$= 380В; блок *Three-PhaseSeriesRLCBranch* призначений для відображення активного та індуктивного опору ділянки мережі ШМА2 (r = 0,665 мОм, L = 0,0015 мГн), ШРА3 (r = 10,05 мОм, L = 0,032 мГн), ШРА4 (r = 4,785 мОм, L = 0,0198 мГн) та проводу, який з'єднує ШМА2 зі ШРА3 (r = 9,3 мОм, L = 0,0007 мГн) та ШРА4 зі зварювальним обладнанням (r = 0,3 мОм, L = 0,3 мкГн); блок еквівалентного навантаження *EquivalentloadSHRA4 P* = 29,3 кВт, *Q*=40,6 кВАр, *Equivalentload SHRA3P* = 85,15 кВт, *Q* = 32,9 кВАр; одночастотний фільтр:$U_н$ = 0,4 кВ, потужність *Q* = 33,78 кВАр, частота синхронізації – 350 Гц.

До моделі включено трифазні мультиметри *Three-PhaseV-I Measurement.* Вони встановлені на 4 контрольних точках схеми електропостачання: на стороні *НН* силового трансформатора, після шини ШМА1, ШРА3, на стороні *ВН* зварювального трансформатора; функціональні блоки *Fcn1 – Fcn 3* для оцінки струму, напруги та потужності фази А ділянки мережі зі зварювальним обладнанням; блок *Fcn* для оцінки сумарної трифазної потужності. Блок *Fcn1* включає в себе вираз $u(1)$, $u(4)$, де $u(1)$ – сигнал напруги, $u(4)$ – сигнал струму; *Fcn2, Fcn3* – $u(4)$ та $u(1)$, відповідно; *Fcn* – $u(1)u(4)+u(2)u(5)+u(3)u(6)$, де $u(1)$, $u(2)$, $u(3)$ – сигнали напруги, $u(4)$, $u(5)$, $u(6)$ – сигнали струму; блок для відображення миттєвого опору системи *Impedance measurement*.

ISSN 2225-6733

Для перерахунку фазного струму та напруги, активної, реактивної, повної потужностей та сумарного гармонійного спотворення напруги були використані блоки підсистем, вигляд яких представлений на рис. 4. Відповідно, блоки підсистеми мають своє функціональне значення: входи 1 та 2 – вхідні сигнали трифазної напруги та трифазного струму; *RMS* – середньоквадратичне значення трифазної напруги та струму; блок *Power (3ph, Instantaneous)* – перерахунок миттєвої активної та реактивної потужності трифазної мережі; *Real–Imaging to Complex* – математична операція, за допомогою якої виводяться реальні або мнимі частини вхідного сигналу, тобто потужності; *THD* –перерахунок сумарного гармонійного спотворення напруги по кожній із фаз; $|u|$ – відповідає за розрахунок повної потужності трифазної мережі; вихід 1 – вихідний сигнал підсистеми, який з'єднується з дисплеєм та несе інформацію про числові значення всіх вище перерахованих параметрів [10].

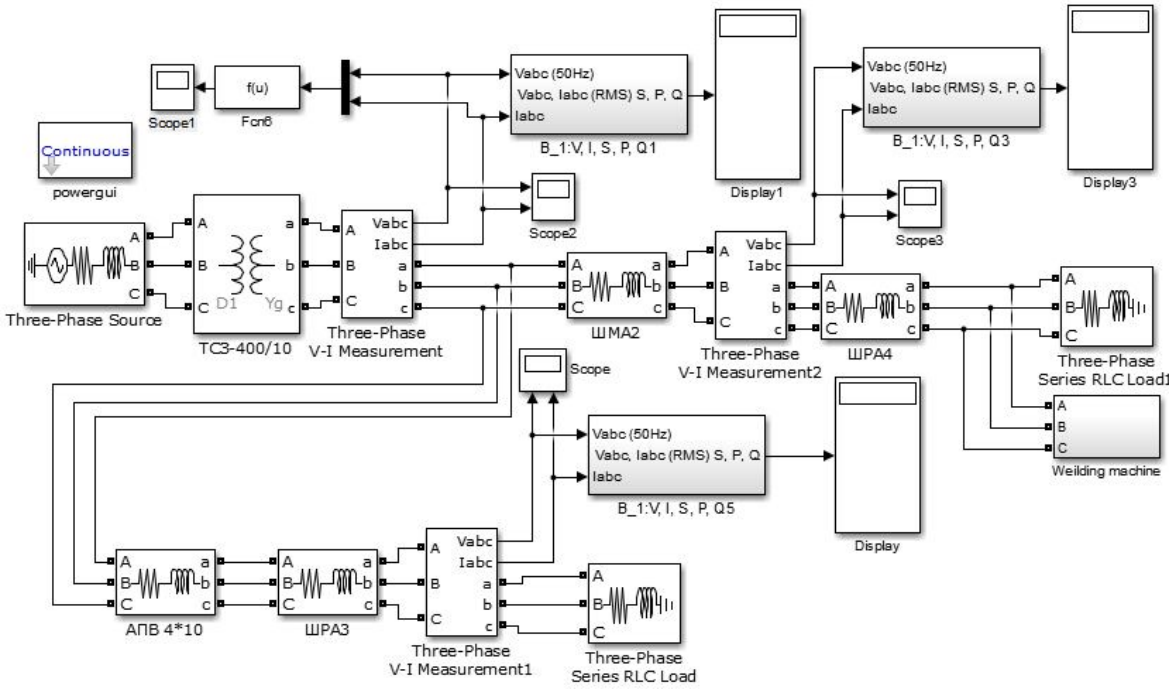


Рис. 3 – Схема заміщення системи електропостачання цеху в програмному пакеті Matlab

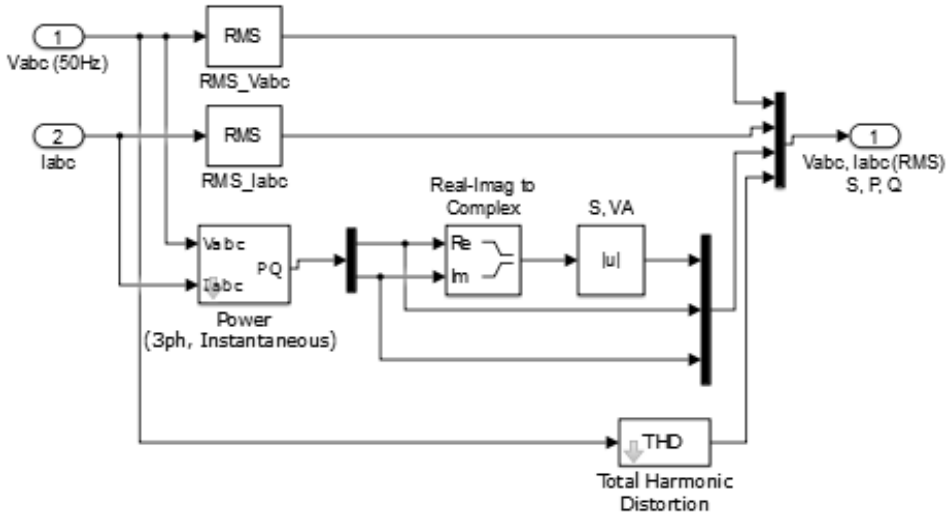


Рис. 4 – Блок підсистеми для визначення фазного струму та напруги, активної, реактивної, повної потужностей та сумарного гармонійного спотворення напруги

ISSN 2225-6733

Робота трифазного зварювального трансформатора потужністю 300 кВА, обмотки якого мають з'єднання Y_g/Y_g, була реалізована за допомогою трьох розрядників (*Surge Arrester*). Такий вибір базувався на оцінці нелінійної характеристики даного елементу [10]. Пробивна напруга розрядників була навмисно вибрана меншою за амплітудне значення напруги на ділянці схеми зі зварювальним трансформатором для створення штучного КЗ, яке імітує роботу зварювального трифазного трансформатора.

З використанням пакету візуального програмування досліджено модель системи споживання електричної енергії ділянки цеху промислового підприємства.

Для визначення взаємного впливу лінійного та нелінійного навантаження на долю спотворення миттєвої потужності виконано досліди. Вони базувалися на дослідженні параметрів режиму роботи зварювального трансформатора з номінальним навантаженням та з використанням одночастотного фільтра, який встановлений у колі первинної напруги зварювального трансформатора [11]. Методика вибору фільтру представлена в літературному джерелі [12]. Оцінено графіки частотних характеристик потужності, струму та напруги мережі. Оцінка базувалася на методиці, що наведена в літературних джерелах [2, 3].

Ділянка схеми зі зварювальним обладнанням була внесена до підсистеми, вигляд якої відображено на рисунку 5.

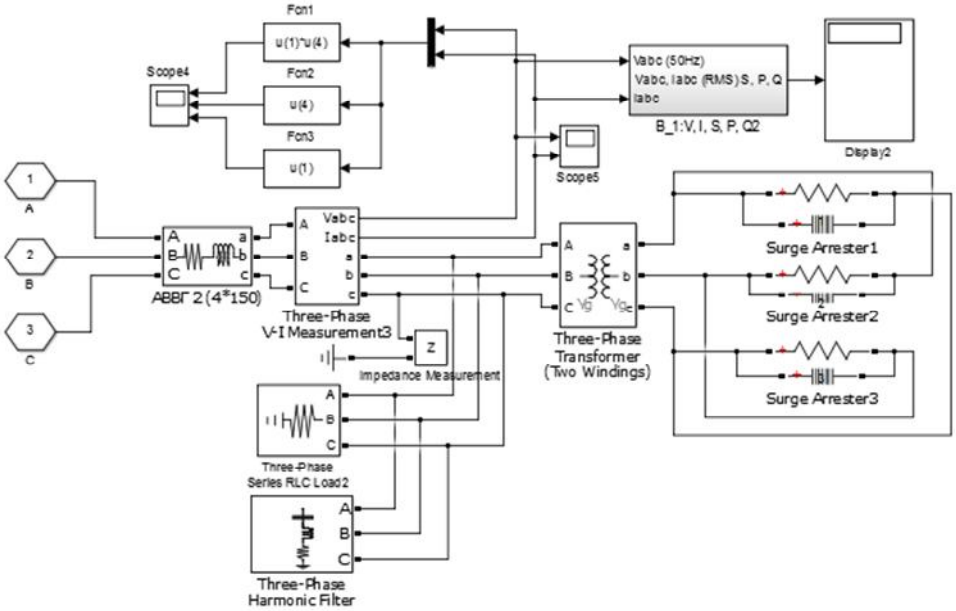


Рис. 5 – Підсистема, яка відображає схематичне з'єднання елементів ділянки цеху зі зварювальною установкою

При проведенні досліджень роботи системи електропостачання при наявності в ній одночастотного фільтру та при його відсутності оцінено значення імпедансу системи (рис. 6).

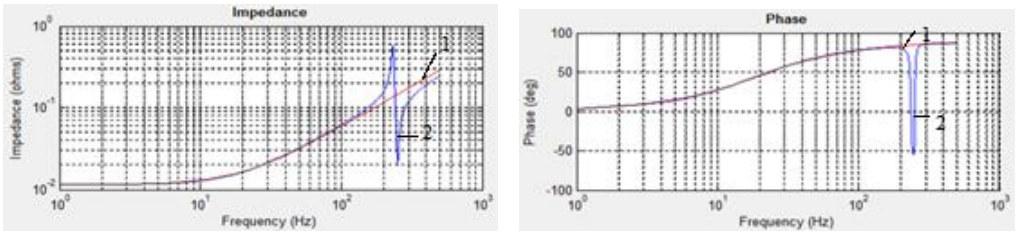


Рис. 6 – Графіки імпедансу та фазового здвигу: 1 – без фільтру; 2 – з фільтром

Враховуючи те, що зварювальна установка змінного струму має нелінійний характер, мережевий струм трансформатора має суттєві спотворення. Ці спотворення пояснює показник

ISSN 2225-6733

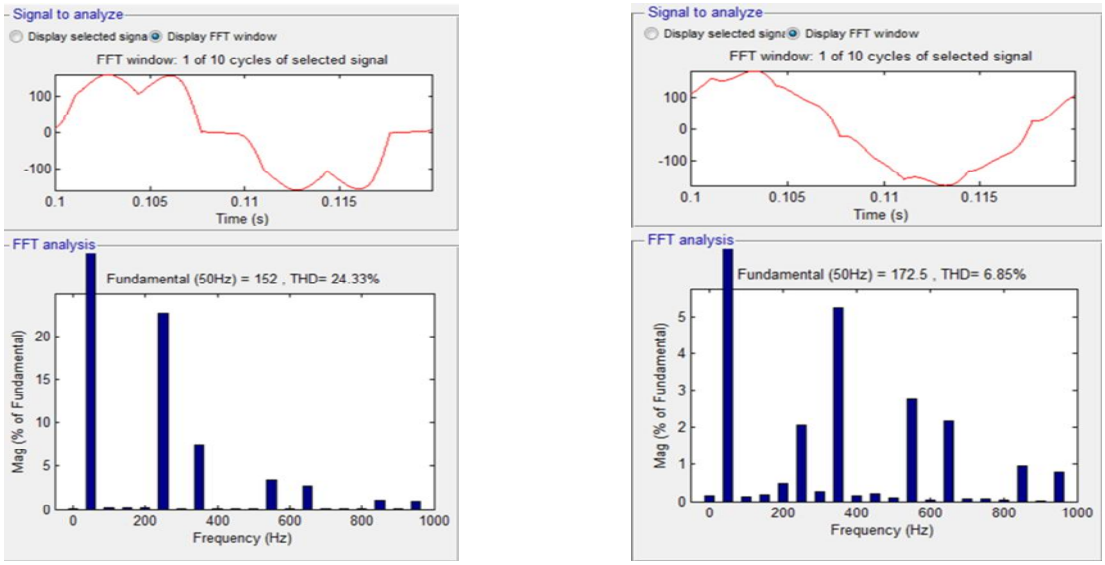
THD_I = 24,33% (рис. 7, а). Значення цього струму не створюють суттєвого впливу на форму сигналу напруги та її рівень спотворення – THD_U = 2,11% (рис. 8, а). Рівень спотворення потужності визначається комбінацією гармонійних спотворень струму та напруги – THD_P = 30,11% (рис. 9, а). При використанні одночастотного фільтру рівень викривлення значень та форм струму і потужності суттєво зменшується, напруги – несуттєво зростає: $THD_{I.f}$ = 6,85% (рис. 7, б), $THD_{U.f}$ = 2,62% (рис. 8, б), $THD_{P.f}$ = 10,38% (рис. 9, б).

При цьому, спостерігається збільшення постійної складової та основної гармоніки:

– струму $I_1 = 152\ A > I_{1.f} = 172,5\ A$;

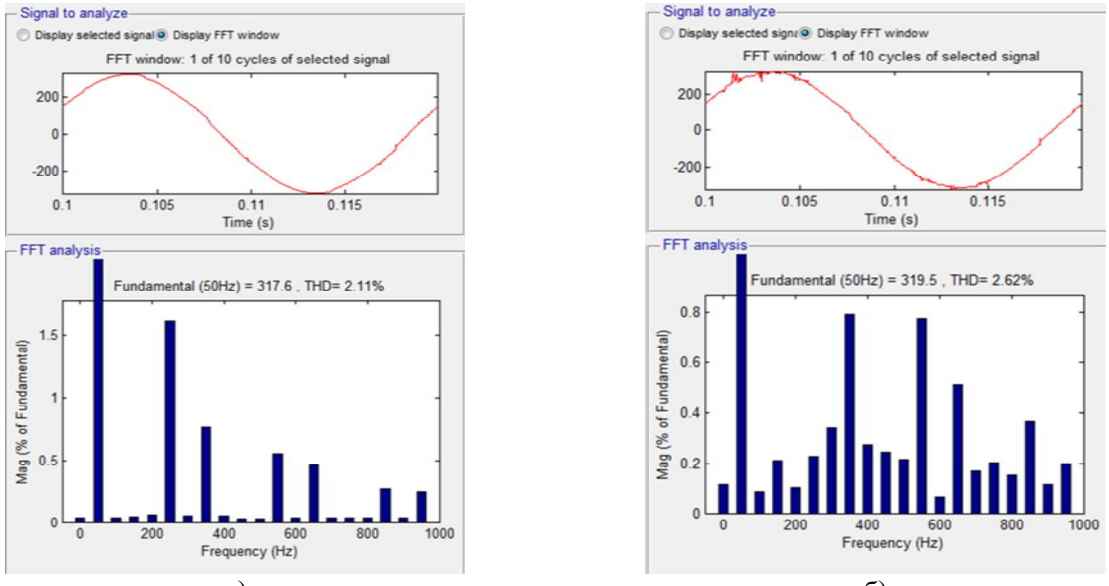
– напруги $U_1 = 317,6\ B > U_{1.f} = 319,5\ B$;

– потужності $P_1 = 2,424 \cdot 10^4\ Bm > P_{1.f} = 2,766 \cdot 10^4\ Bm$.



а) б)

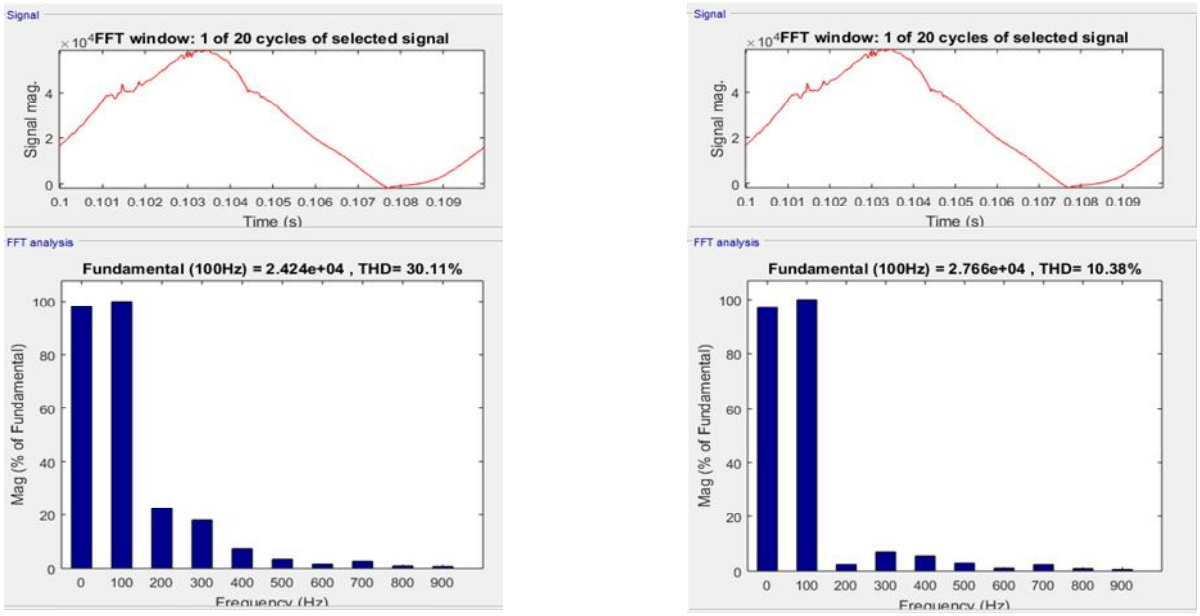
Рис. 7 – Спектральний гармонійний склад струму фази А: а – без фільтру; б – з фільтром



а) б)

Рис. 8 – Спектральний гармонійний склад напруги фази А: а) без фільтру; б) з фільтром

ISSN 2225-6733



а) б)

Рис. 9 – Спектральний гармонійний склад потужності фази А: а) без фільтру; б) з фільтром

Висновки

В результаті виконання досліджень режиму вузла цехової системи електроспоживання з використанням пакету імітаційного моделювання визначені певні показники впливу зварювального обладнання на режим споживання електричної енергії. На відміну від відомих показників електричної енергії, використано гармонійний склад потужності однієї з фаз. При дослідженні режиму системи електроспоживання з використанням одночастотного фільтру отримано суттєве зниження викривлення струму та, як наслідок, потужності, але при цьому відзначається певне зростання постійної складової потужності (~6%) та основної її гармоніки (~14%). Вплив на зростання зазначених компонент потужності перерозподілу гармонік струму та напруги потребує подальших досліджень.

Список використаних джерел:

1. Глушков В.М. Компенсация реактивной мощности в электроустановка промышленных предприятий / В.В. Глушков, В.П. Грибин. – М. : Энергия, 1975. – 100 с.
2. Emanuel A.E. On the assessment of harmonic pollution / A.E. Emanuel // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1995. – Vol. 10. – № 5. – Pp. 1693-1698.
3. Emanuel A.E. Harmonic generation modeling and harmonic power flow in power systems / A.E. Emanuel // Proceedings of the 2-nd International conference on harmonics in power systems. – Manitoba, 1986. – Pp. 158-163.
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – 4-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
5. Арриллага Д. Гармоники в электрических системах / Д. Арриллага, Д. Бредли, П. Боджер. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
6. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах / Ю.С. Железко. – М. : Энергоиздат. – 1981. – 200 с.
7. Климов В.П. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания / В.П. Климов, А.Д. Москалев // Практическая силовая электроника. – 2002. – № 5. – С. 26-32.
8. Супронович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок / Г. Супронович; Пер. с польского под ред. В.А. Лабунцова. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 137 с.

9. IEEE 1459-2010. IEEE Standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced or unbalanced conditions. – Entered. 2010-03-19. NY. : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. – 52 p.
10. Черных И.В. Simulink : среда создания инженерных приложений / И.В. Черных; Под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2004. – 491 с.
11. Власенко Р.В. Аналіз енергетичних процесів в трифазному силовому активному фільтр із використанням спектрального моделювання / Р.В. Власенко, О.В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – № 1. – С. 12-18.
12. Широкополосные силовые фильтры гармоник / Н.П. Боярская, В.П. Довгун, Е.С. Шевченко, Д.Э. Егоров // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4-2. – С. 34-38.

References:

1. Glushkov V.M., Gribin V.P. *Kompensatsiia reaktivnoi moshchnosti v elektroustanovka promyshlennykh predpriiatii* [Compensation of reactive power in the electrical installation of industrial shop]. Moscow, Jenergija Publ., 1975. 100 p. (Rus.)
2. Emanuel A.E. On the assessment of harmonic pollution. Institute of Electrical and Electronics Engineers transactions on Power Delivery. *IEEE Transactions on Power Delivery,* 1995, vol. 10, no.5, pp. 1693-1698.
3. Emanuel A.E. Harmonic generation modeling and harmonic power flow in power systems, proceedings of the second international conference on harmonics in power systems. *Proceedings of the 2-nd International conference on harmonics in power systems*. Manitoba, 1986, pp. 158-163.
4. Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniia prompredpriiatii* [Higher harmonics in power supply systems of industrial shop]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 2000. 331 p. (Rus.)
5. Arrillaga D., Bredli D., Bodzher P. *Garmoniki v elektricheskih sistemah* [Harmonics in electrical systems]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1990. 320 p. (Rus.)
6. Zhelezko Yu.S. *Kompensatsiia reaktivnoi moshchnosti v slozhnykh elektricheskikh sistemakh* [Compensation of reactive power in complex electric systems]. Moscow, Jenergoizdat Publ., 1981. 200 p. (Rus.)
7. Klimov V.P., Moskalev A.D. Problemy vysshikh garmonik v sovremennykh sistemakh elektropitaniia [Problems of higher harmonics in modern power systems]. *Prakticheskaia silovaia elektronika – Practical power electronics*, no.5, pp. 26-32. (Rus.)
8. Supronovich G. *Uluchshenie koeffitsienta moshchnosti preobrazovatel'nykh ustanovok* [Improvement of the power factor of conversion facilities]. Moscow, Energoatomvyd Publ., 1985. 137 p. (Rus.)
9. IEEE 1459–2010. IEEE Standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced or unbalanced conditions. New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Publ., 2010. 52 p.
10. Chernykh I.V. *Simulink : sreda sozdaniya inzhenernyh prilozhenij* [Simulink : environment for creating engineering applications]. Moscow, DIALOG-MIFI Publ., 2004. 491 p. (Rus.)
11. Vlasenko R.V., Byalobrzhevsky O.V. Analiz energetichnikh protsesiv v trifaznomu silovomu aktivnomu fil'tr iz vikoristanniam spektral'nogo modeliuvannia [Analysis of energy processes in a three-phase active power filter with using spectral modelling]. *Elektrotekhnika ta elektroenergetika – Electrical Engineering and Power Engineering*, 2014, no.1, pp.12-18. (Ukr.)
12. Boyarskaya N.P., Dovgun V.P., Shevchenko E.S., Egorov D.Je. Shirokopolosnye silovye fil'try garmonik [Broadband power filters for harmonics]. *Polzunovskij vestnik – Polzunovsky almanac*, 2013, no.4-2, pp. 34-38. (Rus.)

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

Стаття надійшла 18.07.2017