

### ДОСЛІДЖЕННЯ СПОТВОРЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ДІЛЯНЦІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗІ ЗВАРЮВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ

**В. В. Дерев'ягін, О. В. Бялобржеський, М. В. Даєв**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

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

Досліджено вплив зварювальної установки постійного струму на показники якості електричної енергії ділянки механічного цеху за допомогою імітаційного моделювання. Отримано гармонійний склад миттєвої потужності, струму та напруги, а також значення імпедансу однієї з фаз. Доведено, що зварювальна установка призводить до суттєвого спотворення форми сигналу струму, а відповідно і миттєвої потужності, що відображається на завантаженні понижуючого трансформатора розподільної підстанції. З'ясовано, що найбільший вклад в спотворення форми сигналу струму вносять п'ята та сьома гармоніки. Застосовано фільтрокомпенсуючий пристрій для зменшення впливу цих гармонік струму. В результаті суттєво зменшилась гармонічна складова в сигналі струму та напруги, а відповідно й потужності. При цьому відзначається певне зростання постійної складової потужності та її основної гармоніки, що потребує подальшого дослідження причин такого перерозподілу.

**Ключові слова:** вищі гармоніки, система електропостачання, зварювальний трансформатор постійного струму, нелінійне навантаження, сумарне гармонійне спотворення, імпеданс.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКАЖЕНИЯ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА УЧАСТКЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СО СВАРОЧНОЙ УСТАНОВКОЙ

**В. В. Деревягин, О. В. Бялобржеский, М. В. Даев**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

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

Исследовали влияние сварочной установки постоянного тока на показатели качества электрической энергии участка механического цеха с помощью имитационного моделирования. Получены гармонический состав мгновенной мощности, тока и напряжения, а также значение импеданса одной из фаз. Доказано, что сварочная установка приводит к существенному искажению формы сигнала тока, а соответственно и мгновенной мощности, что отражается на загрузке понижающего трансформатора распределительной подстанции. Выяснено, что наибольший вклад в искривление формы сигнала тока вносят пятая и седьмая гармоники. Применено фильтрокомпенсирующее устройство для уменьшения влияния этих гармоник тока. В результате существенно уменьшилась гармоническая составляющая в сигнале тока и напряжения, а соответственно и мощности. При этом отмечается некоторое увеличение постоянной составляющей мощности и ее основной гармоники, что требует дальнейшего исследования причин такого распределения.

**Ключевые слова:** высшие гармоники, система электроснабжения, сварочный трансформатор постоянного тока, нелинейная нагрузка, суммарное гармоническое искажение, импеданс.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Безперерійна робота всіх споживачів електричної енергії залежить від надійності системи електропостачання та якості електроенергії. Робота споживачів суттєво впливає на якісні параметри електричної енергії. Причому зазначений вплив певним чином залежить також від параметрів схеми заміщення споживачів з лінійними 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 постійного струму.

Серед навантажень з нелінійними характеристиками особливе місце займають зварювальні установки. 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 відповідною потужністю та розповсюджується в системі електропостачання. Ця потужність впливає на зава-

нтаження понижуючих трансформаторів цехових підстанцій та, відповідно режим інших навантажень що приєднані до загальної мережі [4]. В результаті, доцільно оцінити зазначений потік потужності.

*Аналіз попередніх досліджень.* 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 [5–8]. Для оцінки спотворення потужності електричної енергії розроблені певні методики, одна з яких визначена стандартом [9] та передбачає аналіз гармонійного складу потужності електричної енергії.

Метою роботи є дослідження впливу зварювального обладнання постійного струму на систему електропостачання цеху.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Багато інженерів під нелінійним навантаженням описують всі категорії обладнання, які генерують гармоніки. Як зазначено в роботі [3], істина полягає в тому, що контрольована ділянка навантаження керованих або некерованих випрямлячів виконана набором перемикачів, які періодично або послідовно підключають або відключають одне чи декілька лінійних або майже лінійних навантажень до мережі

електропостачання. Правильна назва такому навантаженню – параметричне навантаження. Для цілей даного дослідження всі навантаження, що генерують вищі гармоніки в мережу, розглядаються під єдиною назвою – нелінійне навантаження.

Використовуючи підхід визначений в [3], на рисунку 1 (а), (б) зображена схема, де нелінійне навантаження  $NL$  підключене до мережі, яка має схему заміщення, що складається з джерела синусоїдальної напруги, з'єднаного послідовно з активним опором  $R_s$  та індуктивністю  $L_s$ .

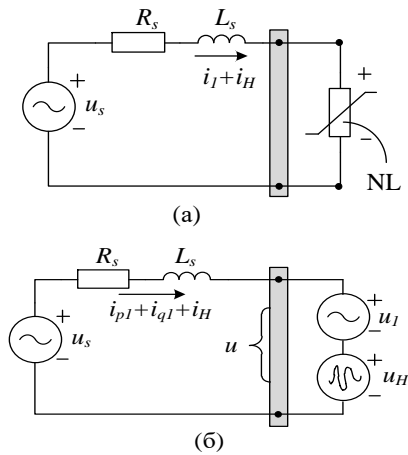


Рисунок 1 – Загальний випадок представлення нелінійного навантаження: а – базова схема; б – еквівалентна лінійна схема

Полігармонійний струм, що протікає в контурі, розділяється на основний та повний гармонійний:

$$i = i_1 + i_H, \quad (1)$$

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

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

$$u = u_1 - u_H, \quad (2)$$

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

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

$$i_{p1} = \hat{I}_1 \cos(\theta_1) \sin(\omega t); \quad (3)$$

$$i_{q1} = -\hat{I}_1 \sin(\theta_1) \cos(\omega t). \quad (4)$$

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

За другим законом Кірхгофа напруга для основної частоти буде рівна:

$$u_s = R_s i_1 + L_s \frac{di_1}{dt} + u_1. \quad (5)$$

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

$$u_s i_1 = u_s (i_{p1} + i_{q1}) = R_s i_1 (i_{p1} + i_{q1}) + L_s (i_{p1} + i_{q1}) \frac{di_1}{dt} + u_1 i_{p1} + u_1 i_{q1}. \quad (6)$$

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

$$u_s i_H = R_s i_1 i_H + L_s i_H \frac{di_1}{dt} + u_1 i_H. \quad (7)$$

Таким чином, основна миттєва активна та реактивна потужності будуть дорівнювати:

$$p_{p1} = u_1 i_{p1} = \hat{U}_1 \sin(\omega t) [\hat{I}_1 \cos(\theta_1) \sin(\omega t)]; \quad (8)$$

$$p_{q1} = u_1 i_{q1} = \hat{U}_1 \sin(\omega t) [-\hat{I}_1 \sin(\theta_1) \cos(\omega t)]. \quad (9)$$

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

$$u_s i_{p1} = R_s i_1 i_{p1} + L_s i_{p1} \frac{di_1}{dt} + p_{p1}; \quad (10)$$

$$u_s i_{q1} = R_s i_1 i_{q1} + L_s i_{q1} \frac{di_1}{dt} + p_{q1}. \quad (11)$$

За Кірхгофом можемо записати гармонійну напругу:

$$u_H = \sum_{h=1} u_h = R_s \sum_{h=1} i_h + L_s \sum_{h=1} \frac{di_h}{dt} = R_s i_H + L_s \frac{di_H}{dt}. \quad (12)$$

Гармонійна напруга дає можливість розрахувати миттєві потужності, через наявність в колі струмів  $i_1$  та  $i_H$ :

$$u_H i_1 = R_s i_H i_1 + L_s i_1 \frac{di_H}{dt}; \quad (13)$$

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

$$= R_s \sum_{h=1} i_h^2 + R_s \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n=1}} i_m i_n + L_s \left[ \sum_{h=1} i_h \frac{di_h}{dt} + \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n=1}} i_m \frac{di_n}{dt} \right]. \quad (14)$$

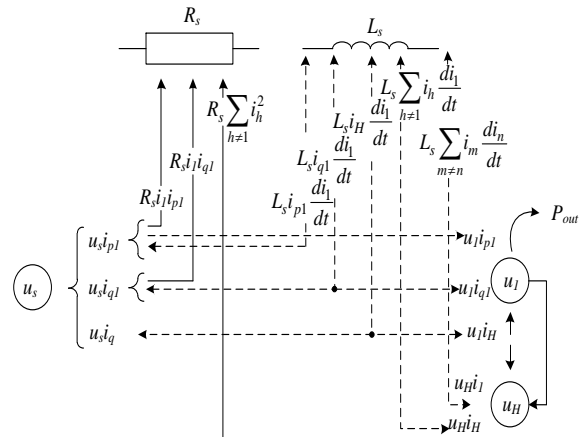


Рисунок 2 – Потік миттєвих потужностей

Як впливає з аналізу компонент потужності зображених на рис. 2, частина потужності зумовлена вищими гармонійними буде викликати втрати напруги та потужності в елементах мережі електропостачання спотворюючи напругу в місці підключення нелінійного навантаження. При цьому як режим нелінійного навантаження так і характер лінійного навантаження приєднаного до загальної точки визначатимуть склад потужності споживаної зазначеними споживачами.

На рис. 3 наведено модель системи електроживлення складену у середовищі візуального програмування. Модель має у своєму складі наступні елементи: трифазне джерело напруги *Three-Phase Source* ( $f = 50$  Гц,  $U_n = 10$  кВ); силовий трансформатор потужністю 400 кВА зі з'єднанням обмоток  $D/Y_g$  ( $U_{BH} = 10$  кВ,  $U_{HH} = 380$  В); блок *Three-Phase Series RLC Branch* для відображення активного та індуктивного опору шин ШМА1 ( $r = 0,665$  мОм,  $L = 1,5$  мкГн), ШРА1 ( $r = 4,785$  мОм,  $L = 19,8$  мкГн), ШРА2 ( $r = 10,05$  мОм,  $L = 32$  мкГн) та кабелю, що з'єднує ШМА1 зі ШРА2 ( $r = 9,3$  мОм,  $L = 0,7$  мкГн) та ШРА1 зі зварювальною установкою ( $r = 0,3$  мОм,  $L = 0,28$  мкГн); блоки еквівалентного навантаження *Equivalent load SHRA1* ( $P = 40,65$  кВт,  $Q = 53,82$  кВАр), *Equivalent load SHRA2* ( $P = 61,7$  кВт,  $Q = 121,6$  кВАр) та двочастотний трифазний фільтр *Three-Phase Harmonic Filter* ( $U_n = 0,4$  кВ,  $Q = 10$  кВАр, частоти синхронізації – 250 та 350 Гц) розрахованого за рекомендаціями [10], для зниження рівня п'ятої та сьомої гармонік.

Також в модель введені трифазні мультиметри *Three-Phase V-I Measurement*, які встановлено на 4 контрольних точках; функціональні блоки *Fcn1-Fcn3* для оцінки миттєвої потужності, струму й напруги фази А, блок *Fcn* для оцінки сумарної миттєвої потужності трьох фаз та блок для відображення імпедансу фази С *Impedance measurement*.

Блок *Fcn1* виконує множення сигналу напруги фази А на струм фази А, а блоки *Fcn2* та *Fcn3* відображують сигнали струму та напруги фази А, відповідно. Блок *Fcn* має наступний вираз:  $u_a \cdot i_a + u_b \cdot i_b + u_c \cdot i_c$ .

Для перерахунку фазної напруги та струму, активної, реактивної, повної потужностей та сумарного гармонійного спотворення напруги були використані блоки підсистем, вигляд яких представлений на рис. 4. Блоки підсистеми мають функціональне значення:  $V_{abc}(50\text{Hz})$  та  $I_{abc}$  – вхідні сигнали трифазної напруги та трифазного струму;  $RMS\_V_{abc}$  та  $RMS\_I_{abc}$  – розрахунок середньоквадратичного значення трифазної напруги та струму; блок *Power*

(*3ph, Instantaneous*) – перерахунок миттєвої активної та реактивної потужності трифазної мережі; *Real-Imag to Complex* – математична операція, за допомогою якої виводиться реальні або мнимі частини вхідного сигналу потужності; *THD* – перерахунок сумарного гармонійного спотворення напруги по кожній з фаз; *S, VA* – відповідає за розрахунок повної потужності трифазної мережі;  $V_{abc}, I_{abc}$  (RMS). *S, P, Q* – вихідний сигнал підсистеми, який несе інформацію про числові значення всіх вище перерахованих параметрів.

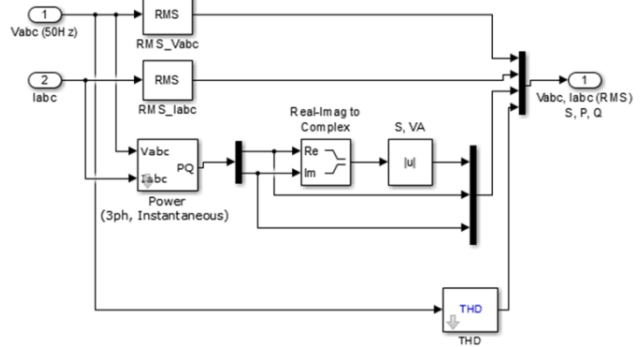


Рисунок 4 – Блок підсистеми для визначення фазного струму та напруги, активної, реактивної, повної потужностей та сумарного гармонійного спотворення напруги

Робота зварювальної установки постійного струму була земітована за допомогою трансформатора потужністю 300 кВА (*transforms*), обмотки якого з'єднані  $Y_g/Y_g$ , з'єднаного з трифазним випрямлячем (*Universal Bridge*) до виходів якого підключені з'єднані паралельно резистор (R) та елемент, який має вольт-амперну характеристику що близька до характеристики електричної дуги (*Surge Arrester*), що в свою чергу з'єднані послідовно з вимикачем (*Breaker*), до керуючого входу якого приєднали генератор імпульсів (*Pulse Generator*), який емітує нерівномірність ручного зварювання.

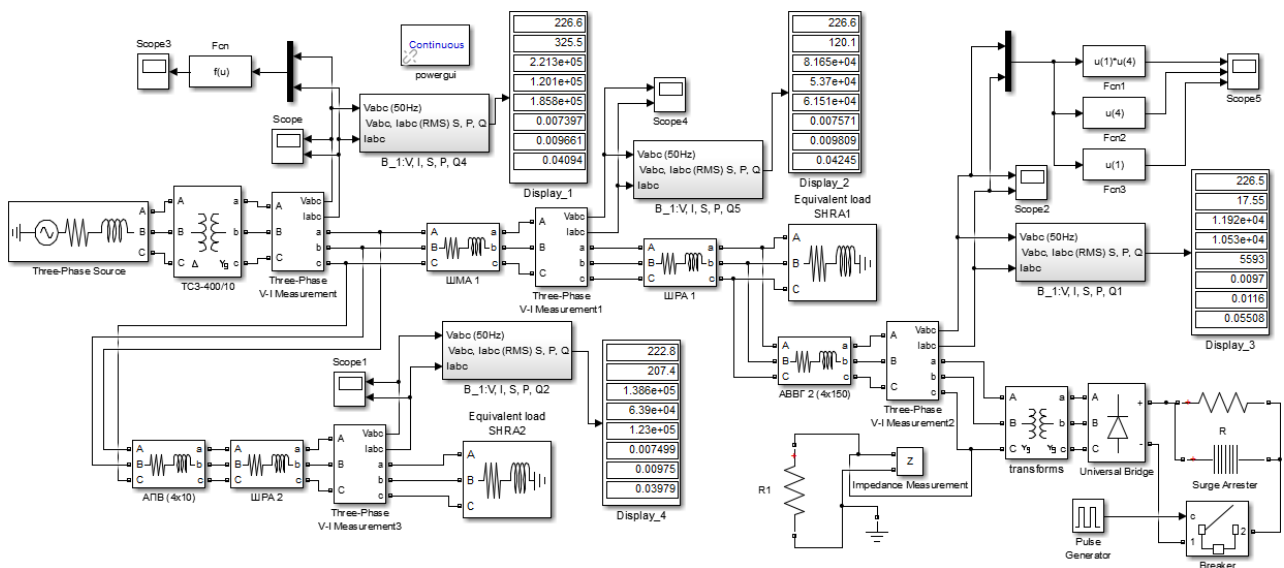


Рисунок 3 – Схема заміщення системи електропостачання цеху в програмному пакеті Matlab

Для визначення взаємного впливу лінійного та нелінійного навантаження на рівень спотворень потужності виконано декілька досліджень. Досліджено електричні параметри режиму у разі роботи зварювальної установки з номінальним навантаженням та з використанням двох частотного фільтра в первинному колі зварювального трансформатора. При цьому використано методику аналізу гармонійного складу параметрів режиму [2]. Частотні характеристики вузла до якого підключається двох частотний фільтр наведені на рис. 5.

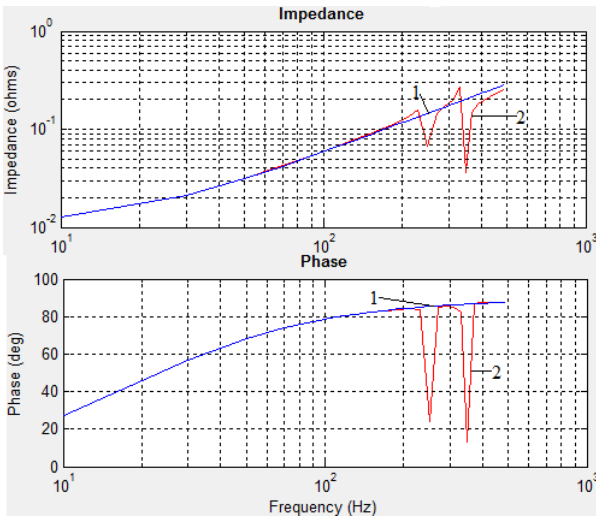


Рисунок 5 – Залежність повного опору та фазового зрушення фази С від частоти: 1 – без фільтра; 2 – з фільтром

У зв'язку з нелінійним характером навантаження в колі постійного струму випрямляча зварювальної установки мережевий струму трансформатора (рис. 6, а) має суттєві спотворення що відбиває показник  $THD_I = 51,64\%$ . Цей струм не суттєво впливає на форму та рівень напруги (рис. 7, а) яка має показник викривлення  $THD_U = 0,88\%$ . В той же час форма сигналу потужності (рис. 8, а) як комбінація гармонік струму та напруги має рівень викривлень  $THD_P = 83,04\%$ . При цьому в гармонійному складі потужності домінують компоненти з нульовою та першою гармоніками потужності. Застосування двох частотного фільтра призводить до суттєвого зниження викривлення струму  $THD_{I,f} = 17,29\%$  (рис. 6, б), що відбувається за рахунок зниження рівня відповідних гармонік та підвищення основної гармоніки струму  $I_{1,f} = 38,17 \text{ A} > I_1 = 31,48 \text{ A}$ . Закономірно якіснішою стає форма напруги  $THD_{U,f} = 0,44\%$  (рис. 7, б) та значно знижуються викривлення потужності  $THD_{P,f} = 26,32\%$  (рис. 8, б). Суттєво знижуються вищі гармонійні потужності, але при цьому збільшується постійна складова потужності та її перша гармоніка.

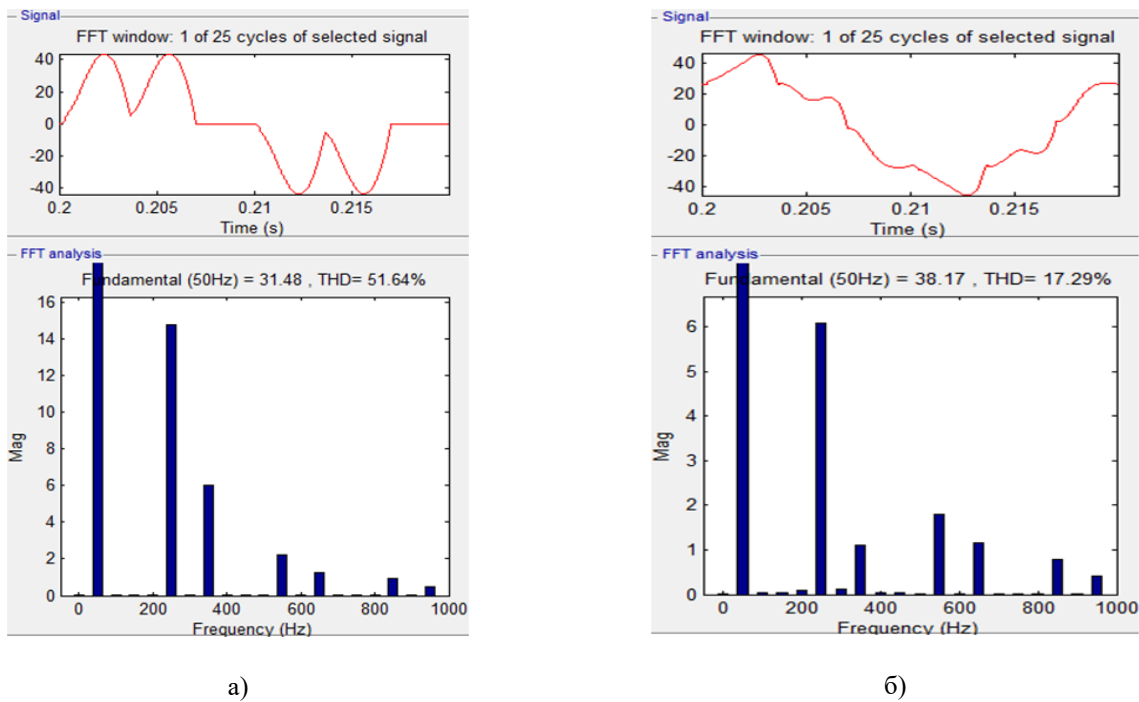
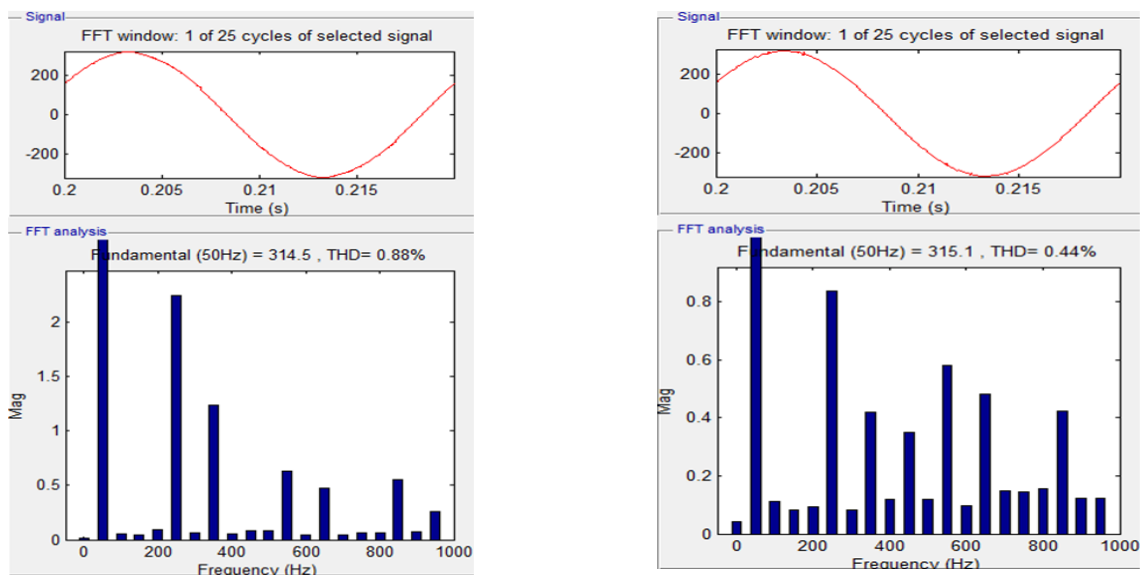
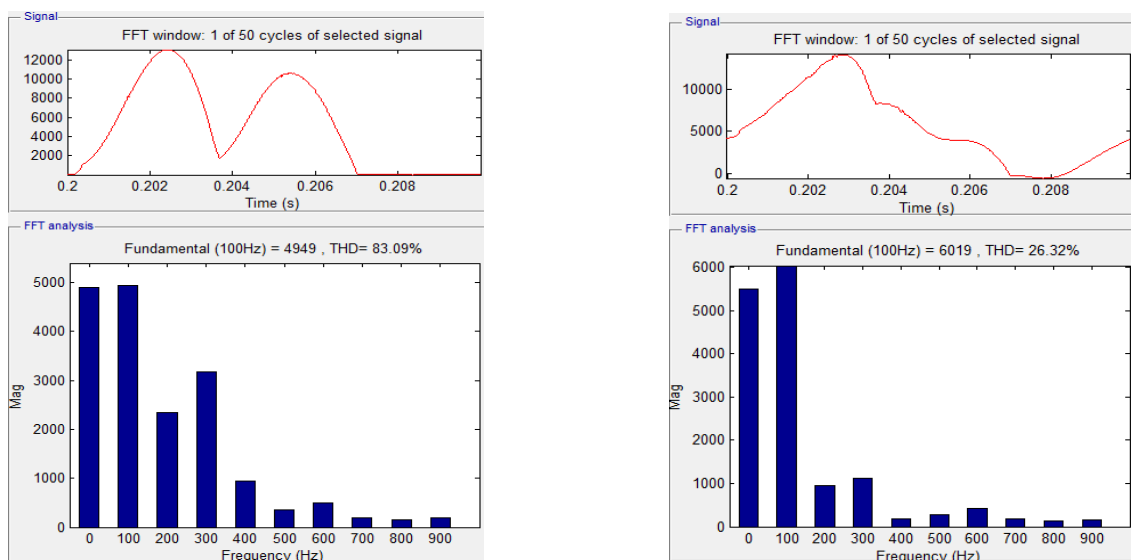


Рисунок 6 – Спектральний гармонійний склад струму фази А: а – без фільтра; б – з фільтром



а) б)

Рисунок 7 – Спектральний гармонійний склад напруги фази А: а – без фільтру; б – з фільтром



а) б)

Рисунок 8 – Спектральний гармонійний склад миттєвої потужності фази А: а – без фільтру; б – з фільтром

**ВИСНОВКИ.** В результаті виконання досліджень режиму вузла цехової системи електроспоживання з використанням пакету імітаційного моделювання, визначено показники впливу зварювального обладнання на режим споживання електричної енергії, отримані результати збігаються із раніше відомими. На відміну від відомих показників електричної енергії використано гармонійний склад потужності однієї з фаз. При дослідженні режиму системи електроспоживання з використанням двох частотного фільтру отримано суттєве зниження викривлення струму та, як наслідок потужності, але при цьому відзначається певне зростання постійної складової потужності (~12%) та основної її гармоніки (~22%), що потребує подальшого дослідження причин такою перерозподілу.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Кабышев А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий / Томский политех. ун-т. Томск: Издательство ТПУ, 2012. 233 с.
2. Власенко Р. В., Бялобржеський О. В. Аналіз енергетичних процесів в трифазному силовому активному фільтрі з використанням спектрального моделювання. *Електротехніка та електроенергетика*. 2014. № 1. С. 12–18.
3. Emanuel A. E. Power definitions and the physical mechanism of power flow. United Kingdom. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, Wiley & Sons Ltd Publ., 2010. 264 p.
4. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий 4-е изд. Москва: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.

5. Czarnecki L. S. Harmonics and Power Phenomena. *The Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. 2000. Supplement 1. pp. 195-218.

6 Arrillaga J. and N. R. Watson. Power System Harmonics. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 412 p.

7. Давидов О. Ю., Бялобржеський О. В. Аналіз засобів компенсації реактивної потужності. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2010. № 3. С. 132–136.

8. Климов В. П., Москалев А. Д. Проблемы высших гармоник в современных системах электропи-

тания. *Практическая силовая электроника*. 2002. № 5. С. 26–32.

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]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. 52 p.

10. Боярская Н. П., Довгун В. П., Шевченко Е. С., Егоров Д. Э. Широкополосные силовые фильтры гармоник. *Ползуновский вестник*. 2013. № 4-2. С. 34–38.

## RESEARCH OF POWER DISTORTION IN THE POWER SUPPLY AREA WITH WELDING EQUIPMENT

V. Dereviahin, O. Bialobrzheski, M. Daiev

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: dereviahinvladyslav@gmail.com

**Purpose.** The article aims to explore the influence of the direct current welding machine on the electrical supply system of the mechanical shop. **Methodology.** When performing the work, the method of analysis an instantaneous power by its spectrum was used. The section of the industrial enterprise power supply system, which includes consumers with both linear and nonlinear characteristics, is examined in this paper. As a non-linear consumer DC welding machine was used. The electrical energy flow caused by operation of the welding equipment is characterized in a certain way by the power and distributed in the power supply system, affecting the loading of the step-down transformers of the shop sub-stations. As a result, the necessity of estimating this power flow arises. A model of the power supply system of the workshop, based on the equivalent circuit was created in the visual programming package. It allowed to obtain instantaneous values of the electrical energy quality indicators of the investigated section of the workshop. The assessment of the effect of the DC welding machine on the harmonic composition of current, voltage, instantaneous power and electrical energy quality indicators, such as the total harmonic distortion of current and voltage was carried out in the research. The powers effect on the operation of the step-down transformer was estimated. **Findings.** When researching of mode of the power supply system without using a filter compensating device, there was a significant distortion of the current and instantaneous power of the network. It was found out that the fifth and seventh current harmonics make the greatest contribution in distortion of the current waveform. A significant reduction in the total harmonic distortion of the current, and as a result of instantaneous power, was achieved by applying a two-frequency filter on the high voltage side of the welding transformer. **Originality.** The shape of power spectrum to a certain extent reflects the efficiency of filter circuits. **Practical value.** When setting up the passive filters to reduce current harmonics, when assessing their efficiency, the spectrum of power harmonics should be additionally taken into account.

**Key words:** harmonics, electric supply system, direct current welding transformer, nonlinear load, total harmonic distortion, impedance.

### REFERENCES

1. Kabyshev, A. V. (2012), *Kompensaciya reaktivnoj moshchnosti v ehlektrostanovkah promyshlennyh predpriyatij* [Compensation of reactive power in electrical installations of industrial enterprises], Izdatelstvo TPU, Tomsk, Russia.

2. Vlasenko, R. V., Bialobrzhevsky, O. V. (2014), "The analysis of energy processes in three-phase active power filter using spectral modeling", *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, no.1, pp.12-18.

3. Emanuel, A. E. (2010), Power definitions and the physical mechanism of power flow. ISBN: 978-0-470-66074-4, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom.

4. Zhezhelenko, I. V. (2000), *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniia prompredpriatii* [Higher harmonics in the power supply systems of the industrial enterprises], Energoatomizdat, Moscow, Russia.

5. Czarnecki, L. S. (2000), "Harmonics and Power Phenomena", *The Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, Supplement 1. pp. 195-218.

6. Arrillaga, J., Watson, N. R. (2003), Power System Harmonics, ISBN: 0470851295, John Wiley & Sons, Inc., New York, US.

7. Davydov, O. Yu., Bialobrzhevsky, O. V. (2010), "Analysis of facilities of indemnification of reactive-power is in electrical engineering systems", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 3, pp. 132-136.

8. Klimov, V. P., Moskaev, A. D. (2002), "Problems of higher harmonics in modern power systems", *Prakticheskaja silovaja elektronika*, no. 5, pp. 26-32.

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], *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, New York, US.

10. Boyarskaya, N. P., Dovgun, V. P., Shevchenko, E. S., Egorov, D. E. (2013) "Broadband Power Filters of Harmonics", *Polzunovskiy vestnik*, no. 4-2, pp. 34-38.

Стаття надійшла 01.10.2018.