

4. Bronshteyn I.M. Handbook of mathematics for engineers and students of higher technical educational institutions / I.M. Bronshteyn, K.A. Semendyaev. – М. : Nauka, Home edition of Physical and Mathematical Literature, 1986. – 544 p. (Rus.)

Рецензент: В.В. Чигарев
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 02.03.2015

УДК 621.311

© Гудим В.І.¹, Янків В.В.², Мамцяж Д.³

АНАЛІЗ ГАРМОНІК В МЕРЕЖАХ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗМІННОЇ НАПРУГИ

В роботі наведено результати експериментальних досліджень спектру гармонік в електричних контурах електродугового зварювального апарату змінної напруги, які він генерує під час технологічного процесу та основні енергетичні параметри, які негативно впливають на мережі електроживлення напругою 0,4/0,23 кВ.

Ключові слова: електродугові зварювальні апарати, вищі гармоніки, мережа електроживлення.

Гудым В.И., Янкив В.В., Мамцяж Д. Анализ гармоник в сети электросварочного оборудования переменного напряжения. В работе приведены результаты экспериментальных исследований спектра гармоник в электрических контурах электродугового сварочного аппарата переменного напряжения, которые он генерирует при технологическом процессе и основные энергетические параметры, которые негативно влияют на сети электропитания напряжением 0,4 / 0,23 кВ.

Ключевые слова: электродуговые сварочные аппараты, высшие гармоники, сеть электропитания.

V.I. Hudym, V.V. Yankiv, D. Mamcaj. Analysis of harmonics in the power supply networks of electric welding equipment of alternating voltage. Electric arc welding is widely used in construction and engineering for rigid connections of metal elements. Substantial nonlinearity of dynamic voltage-current characteristics of electric arcs in such equipment is a source of distortion in current and voltage sinusoids at the points of other electric receivers parallel joints. The voltage fluctuations from the nominal value result in changing luminous flux of bulbs, while current higher harmonics result in additional losses in electric motors. However, the problem of electric welding equipment influence on power lines wasn't paid proper attention to. Therefore, this work is to research electric arc equipment influence on power lines in order to find out the values and the spectrum of higher harmonics, and the prevailing amplitudes dynamics of change. In this paper the results of experimental researches of harmonics spectrum in electrical circuits of electric arc welding machine of alternating voltage that it generates during the technological process and the main energy parameters, that influence negatively on the power supply networks of 0,4/0,23 kV. Analyzing the results of the measurements we come to the conclusion that if the load factor is about 35% the power coefficient of the welding machine is 0,46, that is rather low. Such a result is economically disadvantageous since high

¹ д-р техн. наук, професор, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів; Краківська політехніка, м. Краків, Польща

² викладач, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, JankivVasyl@gmail.com

³ асистент, Краківська політехніка, м. Краків, Польща

reactive power results in a significant increase of active power losses in the elements of power supply. That's why reactive power compensation as well as higher harmonics filtration are necessitated.

Keywords: *electric arc welding machines, the higher harmonics, power supply network.*

Постановка проблеми. Електродугове зварювання широко використовується в галузі будівництва та машинобудування для жорсткого з'єднання металевих елементів, оскільки не всюди можливо і доцільно використовувати болтове з'єднання. Для цього використовують дугові електрозварювальні апарати постійної, змінної та імпульсної зварювальної напруги, які в процесі роботи негативно впливають на якість електричної енергії в живлячих мережах 0,4 кВ. Це досить негативно впливає на групи споживачів побутового та офісного секторів, які є дуже чутливі до вищих гармонік та коливання напруги [1].

Апаратура для дугового електрозварювання живиться від електромереж напругою 220/380 В, а електрична дуга таких апаратів є джерелом технологічного тепла і одночасно суттєвим нелінійним елементом електричного кола. Значення електромагнітних завад, які генерує обладнання такого типу, у багатьох випадках перевищують допустимі значення, які визначені нормами відповідного Державного стандарту України та країн Євросоюзу [2-4].

Суттєва нелінійність динамічної вольт-амперної характеристики електричних дуг в такому обладнанні є джерелом появи спотворення синусоїди струму і напруги у точках паралельного приєднання інших споживачів. Залежно від параметрів мережі живлення, тобто її опору короткого замикання, нестабільність довжини та характеристики дуги викликає коливання напруги зі спектром частот до 1 Гц, а нелінійність дуг призводить до появи спектру частот від 10 Гц до кількох сотень Гц. Результатом коливання напруги від номінального значення є поява явища зміни світлового потоку освітлювальних ламп (флікер-ефект), а вищі гармоніки струмів замикаються через конденсаторні батареї та електричні двигуни, в результаті чого у них появляються додаткові втрати електричної енергії [2]. З погляду спотворення синусоїдної форми напруги і струму, викликаних роботою електродугових зварювальних апаратів, появляються неканонічні частоти, які дуже погано фільтруються пасивними точно настроєними фільтрами. Крім того зміна динамічної вольт амперної характеристики зварювальної дуги є причиною зміни переважаючої гармоніки напруги та струму в живлячій мережі, що вимагає застосування фільтра з можливістю зміни частоти поглинання [5].

Погіршення якості електроенергії, зокрема поява вищих гармонік напруг та струмів, призводить до зростання втрат електричної енергії у провідниках через явище скін-ефекту та додаткове їх нагрівання. Оскільки зварювальні трансформатори є однофазними споживачами, то під час їх роботи робочий струм замикається через нейтральний провідник, в якому струми третьої і кратних до третьої гармонік додаються, а їх діюче значення досягає значних величин. В ході експлуатації чотирипровідних мереж напругою 0,4 кВ помічено, що досить часто трапляються випадки перегрівання нейтральної жили чотирижильних кабелів у місцях їх приєднання до шин розподільчих шаф, ймовірно струмом, який часто перевищує допустиме значення для даного перерізу жили кабелю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливе значення у сучасній електроенергетиці приділяється питанням компенсації реактивної потужності, як у мережах цехів та підприємств, так і в більш широкому масштабі. Це дозволяє успішно вирішити ряд завдань, пов'язаних зі зниженням струмового навантаження генеруючих та транспортуючих пристроїв, зниженням струмів короткого замикання у лініях електропередач, зниженням втрат у системі передачі енергії, підвищенням надійності системи електропостачання, підвищенням якості живлячої напруги. Разом з тим проблемам впливу електродугового зварювального обладнання на живлячі мережі наділяється мало уваги, можливо через незначні потужності зварювальних трансформаторів у порівнянні з іншими електродуговими технологічними агрегатами, наприклад, електродуговими печами. Однак слід зауважити, що машинобудівельні заводи чи підприємства з виробництва залізобетонних конструкцій використовують одночасно біля сотні дугових електрозварювальних апаратів, які в сумі складають кілька мегават, що можна прирівняти до електродугової печі малої місткості.

Мета статті. Згадані відхилення показників якості електричної енергії є причиною швидкого зношення і псування офісного, побутового електрообладнання, освітлювальної апаратури

та ручного електроінструменту. Надзвичайно чутливим до спотворення форми напруги і одночасно вразливим цим спотворенням є електронне обладнання. Тому основним завданням даної роботи є дослідження впливу дугового електрозварювального обладнання на живлячі мережі, до яких одночасно приєднані інші споживачі, з метою виявлення значень вищих гармонік, їх спектр та динаміка зміни переважаючих амплітуд і на цій основі розробка і вибір методів та засобів, спрямованих на зниження негативного впливу такого електродугового зварювального обладнання на інші споживачі електричної енергії.

Виклад основного матеріалу. Заплановані дослідження виконано з використанням електрозварювального однофазного трансформатора типу PARVA 175e фірми Deca, параметри якого подано у таблиці 1. Принципова схема живлення зварювального апарату наведена на рисунку 1.

Таблиця 1

Технічні дані зварювального апарату Deca PARVA 175e

Параметр	Номінальне значення
Напруга живлення зварювального трансформатора	230 В
Потужність зварювального апарату	2 – 5 кВт
Напруга на виводах вторинної обмотки	45 – 48 В
Межі зварювального струму	40 – 160 А
Уставка захисту від струму перевантаження	16 А
Діаметр рекомендованих електродів	1,6 – 4 мм
Маса зварювального апарату	18 кг

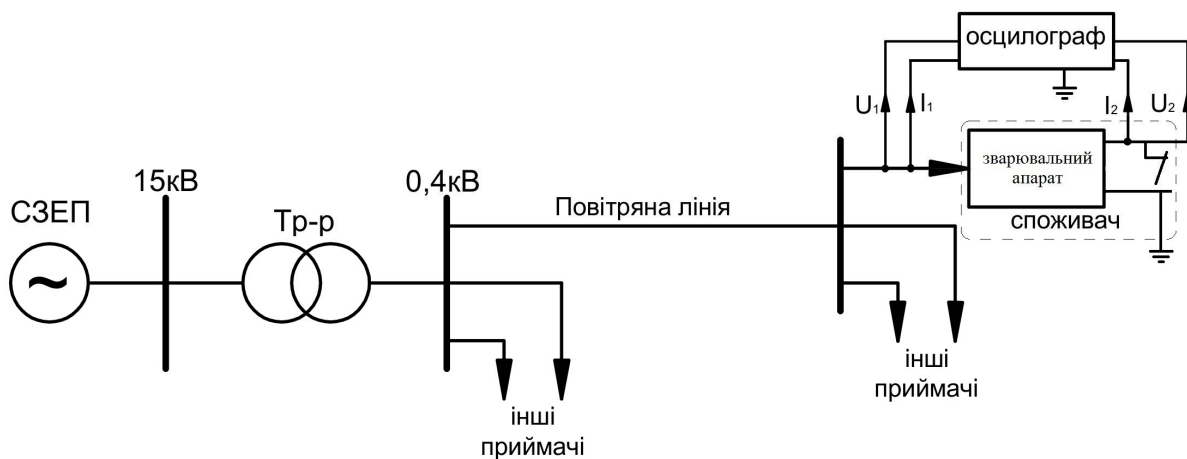


Рис. 1 – Принципова схема живлення дугового електрозварювального апарату

Первинна обмотка зварювального трансформатора приєднана за допомогою двожильної кабельної лінії K та трифазної чотирипровідної повітряної лінії 0,4 кВ довжиною 200 м, виконаної алюмінієвими проводами перерізом 35 мм², до шин трансформаторної підстанції. Шини трансформаторної підстанції 0,4 кВ приєднані до виводів вторинної обмотки силового трансформатора потужністю 63 кВА, напругою 15/0,4 кВ та схемою з'єднання обмоток «трикутник-зірка з нульовим проводом». Первинна обмотка силового трансформатора напругою 15 кВ приєднана до системи зовнішнього електропостачання.

Активний опір повітряної лінії 0,4 кВ становить 173 мОм та реактивний 16 мОм, а кабельної лінії – активний і реактивний 153,1 мОм і 3,2 мОм відповідно. Технічні характеристики та деякі параметри силового трансформатора наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Параметри силового трансформатора

Параметр	Значення
Номінальна потужність, S_N	63 кВА
Напруга первинної обмотки, U_1	15 кВ
Напруга вторинної обмотки, U_2	0,4 кВ
Напруга короткого замикання, U_k	6,5 %
Індуктивність короткого замикання, L_k	0,323 мГн

Повний опір петлі короткого замикання і джерела живлення, приведений до напруги 230 В, дорівнює 1,187 Ом.

Електродуговий зварювальний апарат призначений для виконання незначних зварювальних робіт в умовах домашніх господарств чи ремонтних майстерень (ремонт автомобілів та іншої техніки). Процес зварювання двох кусків сталеві бляхи товщиною 1,5 мм здійснювався ручним способом, для цього було використано червоні електроди MOST 6012 діаметром 2,5 мм, покриті замазкою з домішками целюлози, які широко використовуються для зварювання сталевих виробів технологічною напругою між виводами вторинної обмотки $U_3 \geq 42 \text{ В}$.

Для реєстрації миттєвих значень струмів та напруг використано осцилограф типу ATTENADS1022CL, для вимірювання параметрів високої напруги використовувався прилад HANTEKT3100 і струмопроводи СІЕСА6 та СЕМСР-11.

На рисунку 2 наведено осцилограми миттєвого значення напруги і струму в мережі 230 В, з яких видно спотворення синусоїдної форми напруги та сильне спотворення синусоїдної форми струму за рахунок вмісту непарних гармонік. Одночасно з рисунка можна помітити певну несиметрію напруги та достатню несиметрію струму відносно нульового значення. З наведеного можна допустити присутність у струмі як непарних так і парних гармонік. Разом з тим струм є квазіперіодичним у часі.

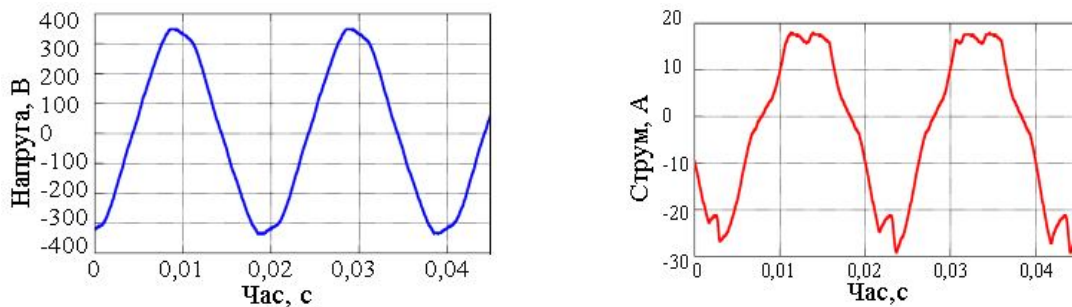


Рис. 2 – Осцилограма миттєвого значення напруги і струму мережі живлення 230 В

На рисунку 3 наведено осцилограму миттєвого значення напруги та струму зварювальної дуги на промисловій частоті, яка є типовою для електричних дуг. З осцилограми виразно видно імпульси напруги запалювання та інтервал стійкого горіння дуги. Незначна несиметрія напруги відносно нульового значення свідчить про різні емісійні властивості зварювального металу і електрода. Оцінюючи форму напруги можна допустити присутність широкого спектру гармонік як парних, так і непарних. Не дивлячись на незначну несиметрію, середні значення напруги дуги на кожному з півперіодів майже рівні і досягають 13 В.

Проаналізувавши осцилограму струму дуги видно, що його додатна і від'ємна амплітуди є різними, але періодичність в часі зберігається. Аналізуючи якісно форму струму можна допустити, що він містить досить значні третю і п'яту гармоніки, які найбільше спотворюють синусоїдну форму.

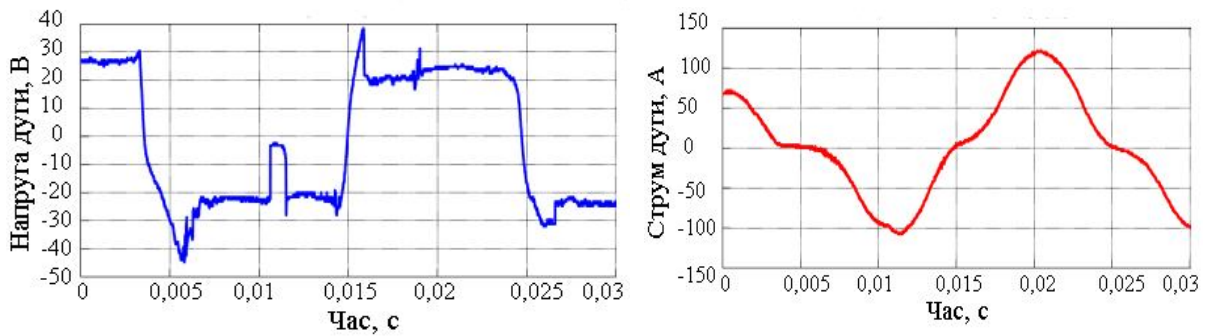


Рис. 3 – Осцилограма миттєвого значення напруги та струму дуги

За допомогою вимірювальної апаратури одночасно виконано розклад миттєвих значень напруг і струмів мережі живлення та зварювальної дуги за допомогою швидкого перетворення Фур'є в межах від першої до 25 гармоніки включно. Результати гармонійного аналізу наведено у вигляді гістограм.

На рис. 4 наведено характеристику гармонік напруги зварювальної дуги. Внаслідок різних емісійних характеристик зварюваних металів і металу, з якого виготовлено електроди, а також нелінійності вольт-амперної характеристики дуги, напруга дуги містить значну третю гармоніку, величина якої досягає 5,7 В, що становить приблизно 32 % від основної. Крім того присутня п'ята гармоніка величиною біля 3,5 В та друга гармоніка біля 3,2 В. Значення четвертої, дев'ятої, сьомої, восьмої та тринадцятої гармонік знаходяться в межах від 2 В до 1 В. Внаслідок присутності вказаних гармонік коефіцієнт гармонік напруги дуги дорівнює 14,2 %, що є значно вище від значення, яке допускається Європейськими чи Національними нормами будь-якої країни на якість електричної енергії.

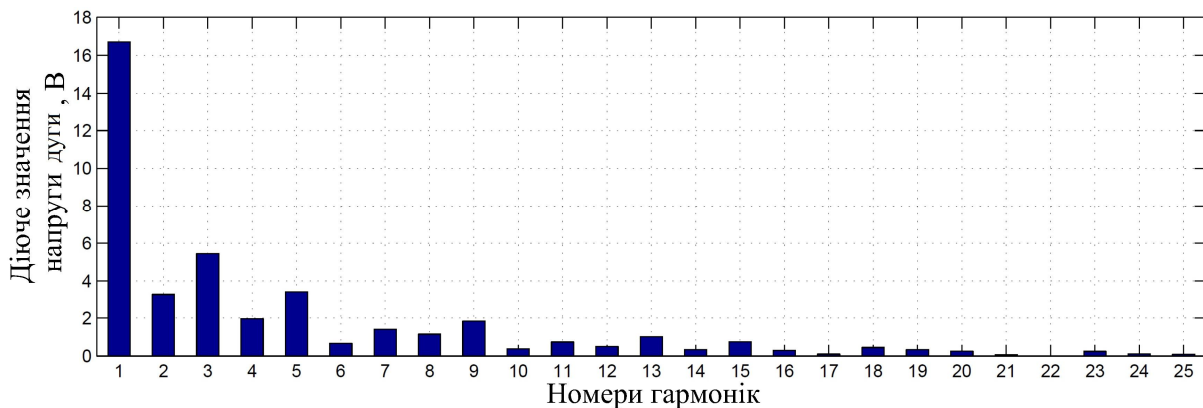


Рис. 4 – Гістограма спектру гармонік напруги зварювальної дуги

З рисунка 5 видно, що внаслідок особливостей частотної характеристики контуру дуги та мережі живлення струм дуги містить біля 12 А третьої гармоніки та понад 6 А другої гармоніки, що становить 24 % та 13 % відповідно відносно амплітуди основної гармоніки. Амплітуди п'ятої, четвертої та шостої гармонік знаходяться в межах 2,5 – 1 А. Амплітуди решти гармонік заходять в межах до 1А. У зв'язку з цим коефіцієнт гармонік струму дуги досягає 25,5%, що свідчить про сильне спотворення форми струму дуги. Хоча в більшості країн світу нормами не обмежується коефіцієнт гармонік струму, однак цілком очевидно, що таке значення є недопустиме.

На рисунках 6 і 7 наведені гістограми гармонік напруги і струму системи живлення 230 В, отримані на тому самому інтервалі часу, що і для напруги і струму дуги. Гармоніки напруги та струму системи живлення 230 В містять досить значну другу, а також третю та п'яту гармоніки. Помітним є зменшення третьої і збільшення другої гармоніки в порівнянні з напругою та струмом дуги, яке відбувається внаслідок різних електронних емісій зварюваних металів та ме-

талу електрода, що в свою чергу викликає появу другої гармоніки. Однак, не зважаючи на цю відмінність, з оцінки отриманих результатів виникає висновок про потребу застосування фільтрів другої, третьої та п'ятої гармонік струмів з метою обмеження проникнення цих гармонік в мережу живлення. Враховуючи незначну потужність зварювальних апаратів, виникає задача вибору параметрів цих фільтрів з точки зору їх структури та параметрів основних елементів (ємностей конденсаторів та індуктивностей реакторів), а також індивідуальних фільтрів чи фільтрів для групи одночасно працюючих зварювальних апаратів.

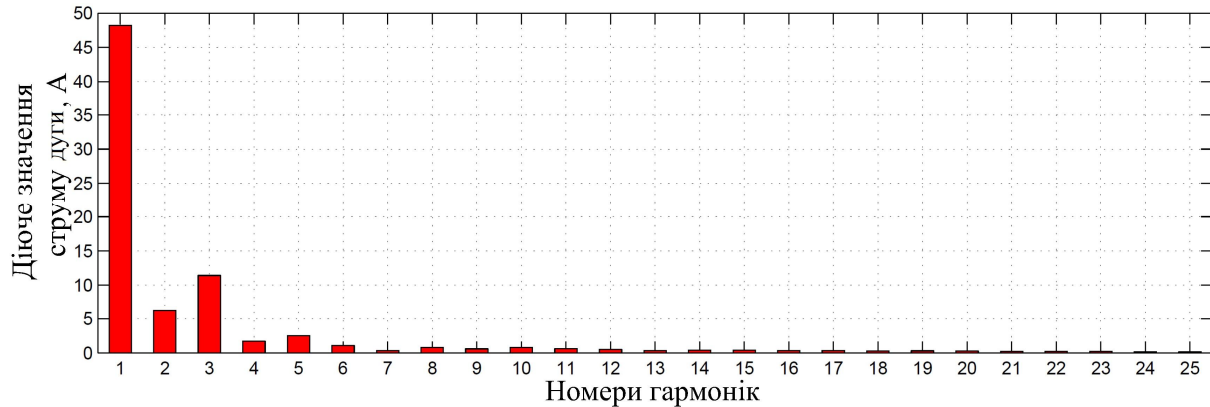


Рис. 5 – Гістограма спектру гармонік струму зварювальної дуги

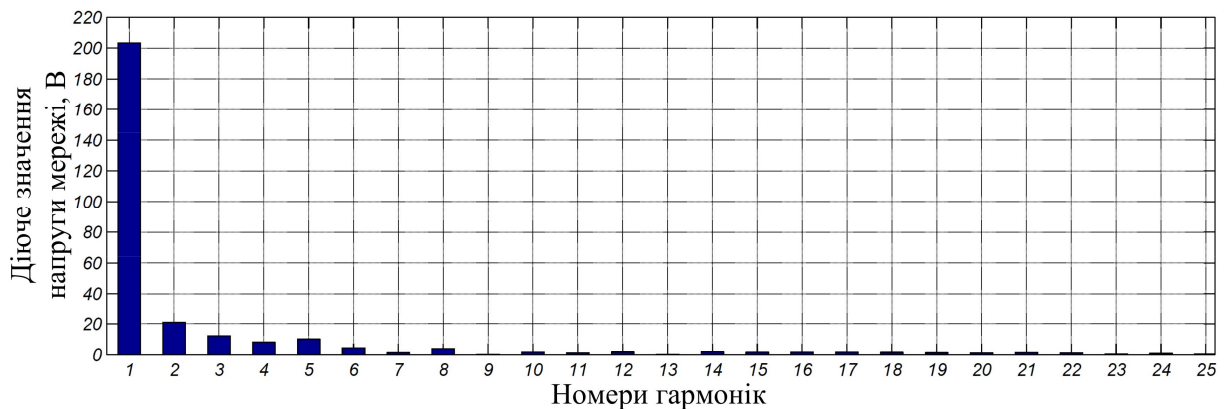


Рис. 6 – Гістограма спектру гармонік напруги мережі



Рис. 7 – Гістограма спектру гармонік струму мережі

Порівнюючи кількісні значення гармонік, наведених на гістограмах (рис. 4, 5, 6, 7) без додаткових обчислень є очевидним, що коефіцієнти гармонік напруги та струму системи живлення

кількісно є досить близькими до відповідних коефіцієнтів гармонік напруг і струмів дуги.

Разом з тим було здійснено вимірювання основних експлуатаційних величин зварювального апарату і системи живлення, які наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

Результати вимірювання електричних величин

Величина	Значення	Одиниця вимірювання
Вхідна напруга зварювального апарату, U_I	238,77	[В]
Струм на вході зварювального апарату, I_I	15,86	[А]
Активна споживана потужність апарату, P_I	1,74	[кВт]
Реактивна споживана потужність апарату, Q_I	3,36	[квар]
Повна споживана потужність, S_I	3,79	[кВА]
$\cos \varphi$	0,46	[-]

Аналізуючи результати вимірювань, наведені у таблиці 3, зауважуємо, що при коефіцієнті завантаження активною потужністю зварювального апарату біля 35% його коефіцієнт потужності є досить низький і становить 0,46, тобто є значно нижчим ніж цього вимагають постачальники електричної енергії. Такий режим є економічно не вигідним, оскільки велика реактивна потужність призводить до значного зростання втрат активної потужності в елементах системи електропостачання. Одночасно зауважуємо, що вхідна напруга зварювального трансформатора перевищує номінальну (230 В) приблизно на 3%, що до певної міри викликало підмагнічування осердя трансформатора і, відповідно, додаткового спотворення форми струму в системі живлення. Значне споживання реактивної потужності довело струм зварювального апарату практично до номінального значення, хоча споживання активної потужності майже в два рази менше від реактивної, а повна потужність навіть не досягає номінальної активної. Це підтверджує необхідність застосування компенсації реактивної потужності, яке доцільно реалізовувати в комплексі з фільтрацією вищих гармонік. У випадку електродугових зварювальних апаратів доцільно розробляти і застосовувати індивідуальні фільтри з можливою зміною фільтрувальних характеристик [5].

Висновки

Підсумовуючи вище викладене можна зробити наступні висновки:

1. Електродугові зварювальні апарати однофазної змінної напруги є потужними генераторами вищих гармонік напруг та струмів зі спектром від другої до восьмої гармонік включно у випадку стабільного горіння дуги. Вказані гармоніки напруги і струму майже без зміни свого значення поширюються у мережу живлення, спотворюючи їх форму. Серед усіх гармонік найбільшу амплітуду має друга, яка в напрузі досягає 10 %, а в струмі 22 % від першої гармоніки і найменшу (біля 1,5 %) має сьома гармоніка.

2. Враховуючи те, що коефіцієнт гармонік напруги дуги та в мережі електроживлення перевищує 14%, що є значно більше ніж передбачено вимогами державних стандартів та міжнародних норм на якість електричної енергії, для зниження вмісту гармонік у живильній мережі необхідно запропонувати певні технічні рішення, які б знизили цей рівень до допустимих значень. Серед таких рішень ефективним є застосування фільтрів вищих гармонік струмів.

3. Враховуючи особливості впливу зварювальних електродугових апаратів змінної напруги на мережі електроживлення доцільно застосовувати індивідуальні фільтрокомпенсуючі пристрої з метою одночасного фільтрування вищих гармонік струмів і компенсації реактивної потужності та покращити режими електродугового зварювального обладнання.

Список використаних джерел:

1. Повышение эффективности использования электроэнергии в системах электротехнологии / А.К. Шидловский [и др.]. – Киев : Наукова думка, 1990. – 240 с.
2. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – М. : Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.

3. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – Киев : Госстандарт Украины, 1999.
4. Жаркин А.Ф. Нормативно-правовое регулирование качества электрической энергии. Анализ украинских и европейских законодательных актов и нормативно-технических документов / А.Ф. Жаркин, В.А. Новский, С.А. Палачев. – Киев : Институт электродинамики НАН Украины, 2010. – 167 с.
5. Гудим В.І. Технічні засоби зниження гармонік в електропостачальних системах / В.І. Гудим // Технічна електродинаміка. – 1996. – №3. – С. 30-35.

Bibliography:

1. Increase of the efficiency use of energy in the systems of electrotechnology / A.K. Shydlovsky [et al.]. – Kiyev : Naukova vumka, 1990. – 240 p. (Rus.)
2. Zhezhelenko I.V. Quality of electric energy in industrial plants / I.V. Zhezhelenko, Yu.L. Saenko. – M. : Energoatomizdat, 2005. – 261 p. (Rus.)
3. GOST 13109-97. Electrical energy. Requirements to the quality of electrical energy in electric networks of general purpose. – Kiev : State Standard of Ukraine, 1999. (Rus.)
4. Zharkin A.F. Normative and legal regulation of the quality of electric energy. The analysis of Ukrainian and European legislative acts and normative and technical documents / A.F. Zharkin, V.A. Novskiy, S.A. Palachev. – Kiev : Institute of electrodynamics NAS of Ukraine, 2010. – 167 p. (Rus.)
5. Gudym V.I. Technical facilities reduction of harmonics in the electricity supply systems / V.I. Gudym // Technical electrodynamics. – 1996. – №3. – P. 30-35. (Ukr.)

Рецензент: О.І. Скрипник
д-р техн. наук, директор ТзОВ «Елекс»

Стаття надійшла 06.05.2015

УДК 621.7:62-192:669.02/09

© Гулаков С.В.¹, Щербаков С.В.²

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО
АНАЛИЗА ANSYS ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ
ВОЗДЕЙСТВИИ ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ НАГРЕВА**

Рассмотрены вопросы применения современных средств анализа напряженно-деформированного состояния цилиндрических конструкций при воздействии локальным источником нагрева. С применением системы конечно-элементных расчетов ANSYS разработана методика, позволяющая с большой эффективностью выполнять моделирование напряженно-деформированного состояния деталей конструкций и прогнозировать распределение деформаций с целью обеспечения необходимых условий дальнейшей сборки и эксплуатации. Применение современных методов численного и графического анализа дало возможность получить прогнозируемые результаты для реализации широкого спектра технологических вариантов изготовления различных конструкций с максимальной эффективностью, оптимальными энергетическими и временными затратами.

Ключевые слова: составные изделия, локальный источник нагрева, сварочные напряжения и деформации, математическое моделирование, конечно-элементный анализ.

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, gulakov_s_v@pstu.edu

² ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, sherbakov_s_v@pstu.edu