

УДК 621.311

Г.І. Лагутін, А.М. Панченко, А.І. Гарагуля

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

**ВИЩІ ГАРМОНІКИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

В процесі споживання електричної енергії відбувається спотворення синусоїди через вплив електроспоживачів з імпульсними джерелами живлення. В цій статті розглядається проблема виникнення вищих гармонік в електричних мережах та їх вплив на окремі елементи системи електропостачання. Також вноситься пропозиція щодо розробки портативного пристрою для вимірювання показників якості електричної енергії.

**Ключові слова:** вищі гармоніки, системи нульової, прямої та зворотної послідовності, поверхневий ефект, ефект близькості, системи електропостачання, показники якості електричної енергії, портативний пристрій для вимірювання показників якості електричної енергії.

**Вступ**

**Постановка проблеми.** Відомо, що якість споживаної електричної енергії значно впливає на роботу приймачів та терміни їх експлуатації. За останнє десятиріччя різко зросла кількість пристроїв з імпульсними блоками живлення, однією з особливостей яких є емісія вищих гармонік в мережу, що негативно впливають як на окремі елементи, так і на всю систему електропостачання в цілому. Вищі гармоніки є небезпечними і для військових споживачів електричної енергії, оскільки в період, коли не ведеться бойова робота, вони живляться від державної мережі. У теперішній час є актуальною проблема утримання військової техніки у працездатному стані та економія державних коштів. Оскільки вищі гармоніки викликають некоректну роботу деяких електричних апаратів та передчасне псування окремих елементів системи електропостачання, то гостро постає питання необхідності вчасно виявляти відхилення показників якості електричної енергії від стандарту та вживати заходи щодо їх усунення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблеми, що викликаються вищими гармоніками в системах електропостачання, достатньо повно висвітлені як в українських, так і закордонних виданнях [1 – 8]. В періодичних виданнях регулярно з'являються статті, присвячені цій тематиці, що свідчить про актуальність тематики, що розглядається. Крім того, проводиться багато досліджень впливу вищих гармонік на різні елементи мережі та розробляються пристрої, якими можна їх виміряти. Комерційні компанії досягли значних успіхів в цьому напрямку та запропонували ряд портативних приладів, які дозволяють вимірювати необхідні показники якості електричної енергії. Але ці пристрої зазвичай іноземного виробництва та коштують десятки тисяч гривень, що робить їх недоступними для багатьох організацій.

**Метою статті** є аналіз впливу вищих гармонік на різні елементи електричних мереж, можливих методів та способів боротьби з ними, а також внесення пропозицій щодо розробки портативного пристрою для вимірювання показників якості електричної енергії.

**Викладення основного матеріалу**

Через нелінійність навантажень їх струми містять спектр вищих гармонік, які призводять до небезпечних явищ в електричних мережах і викликають небажані наслідки (рис. 1).

Вищі гармоніки в системах електропостачання можуть призводити до таких негативних наслідків:

*перегрів та руйнування нульових робочих провідників.* Більшість електричних мереж в Україні відносяться до «старих», які проектувалися лише на лінійні навантаження; у них переріз нульового проводу дорівнює половині перерізу фазного проводу, тому що при лінійних навантаженнях струм, що протікає по нульовому провіднику, значно менше фазного струму. Але при нелінійному навантаженні струми нульового робочого проводу можуть перевищувати фазні струми майже у 1,73 рази через те, що навіть при симетричному навантаженні фазні струми вищих гармонік, порядок яких кратний трьом, утворюють систему нульової послідовності, тобто в кожній фазі в будь-який момент часу ці складові є однаковими за величиною та за фазою. Тому при нелінійних навантаженнях струм в нульовому проводі дорівнює потрібному значенню струмів гармонік, кратних трьом (рис. 2);

Вищі гармоніки в системах електропостачання можуть призводити до таких негативних наслідків:

*перегрів та руйнування нульових робочих провідників.* Більшість електричних мереж в Україні відносяться до «старих», які проектувалися лише на лінійні навантаження; у них переріз нульового проводу дорівнює половині перерізу фазного проводу, тому що при лінійних навантаженнях струм, що протікає по нульовому провіднику, значно менше фазного струму. Але при нелінійному навантаженні струми нульового робочого проводу можуть перевищувати фазні струми майже у 1,73 рази через те, що навіть при симетричному навантаженні фазні струми вищих гармонік, порядок яких кратний трьом, утворюють систему нульової послідовності, тобто в кожній фазі в будь-який момент часу ці

складові є однаковими за величиною та за фазою. Тому при нелінійних навантаженнях струм в нуль-

вому проводі дорівнює потрійному значенню струмів гармонік, кратних трьом (рис. 2);

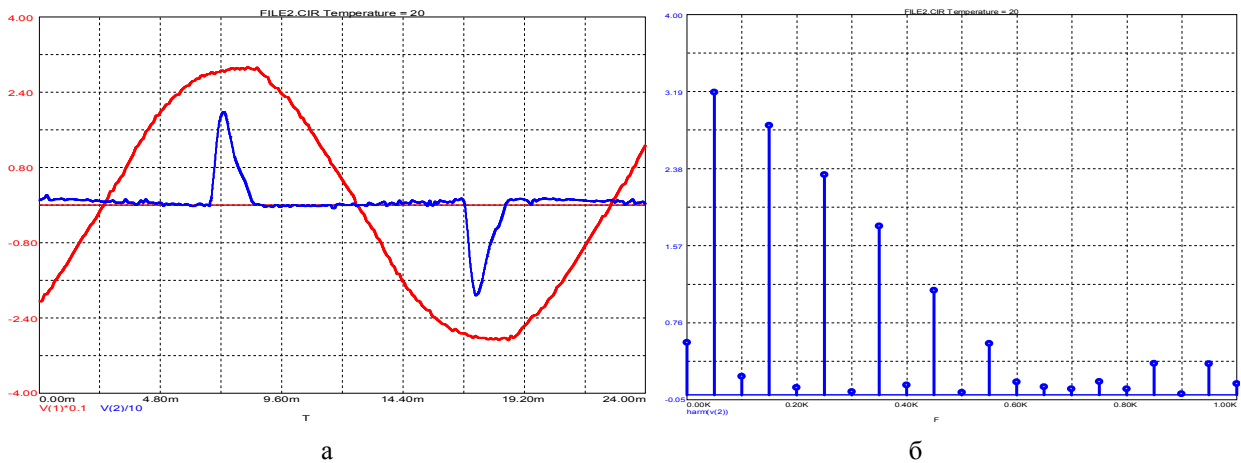


Рис. 1. Вплив нелінійних джерел живлення на якість електричної енергії: а – напруга, що живить, та споживаний струм; б – спектральний склад струму

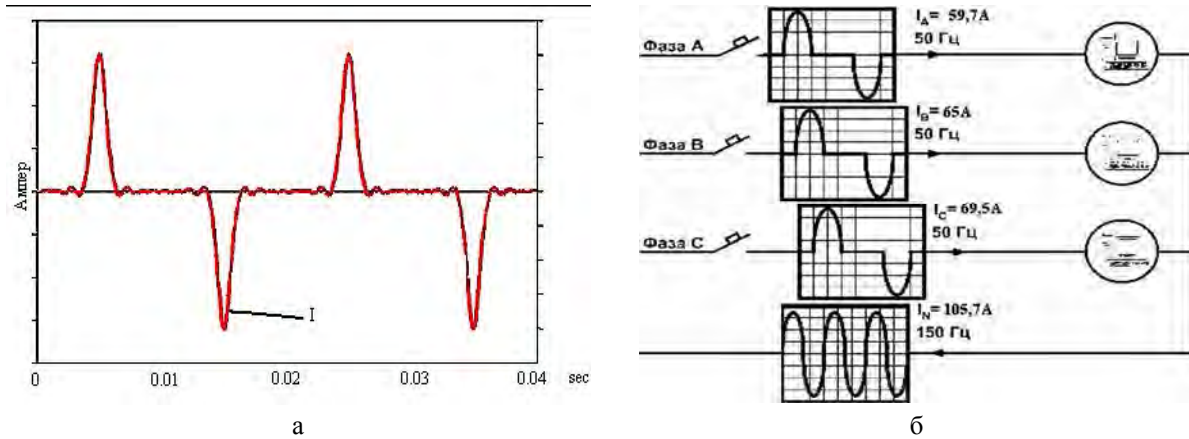


Рис. 2. Вплив вищих гармонік на величину струму в нульовому робочому провіднику: а – струм однофазного споживача; б – спектральний склад струму

– *неправильне спрацювання запобіжників та автоматичних вимикачів.* Через додаткове нагрівання елементів захисних пристроїв внаслідок поверхневого ефекту та ефекту близькості відбувається хибне спрацювання захисних апаратів. Це явище є найбільш характерним для автоматичних вимикачів, призначених для захисту ліній живлення комп'ютерної техніки;

– *прискорене старіння ізоляції проводів та кабелів.* При підвищенні робочої температури струмоведучих провідників відбувається прискорення хімічних процесів в ізоляції, внаслідок чого її старіння відбувається значно швидше;

– *додаткові втрати в силових трансформаторах.* Внаслідок поверхневого ефекту та ефекту близькості збільшується активний опір обмоток трансформатора і, як наслідок, їх додаткове нагрівання; крім того вищі гармоніки викликають появу вихрових струмів в магнітопроводі трансформатора, що також збільшує додаткові втрати потужності та його нагрів;

– *спотворення форми синусоїди живлячої напруги.* Струм, який споживається імпульсним навантаженням, викликає деформацію синусоїди напруги, що діє на зати-

скачах навантаження. Синусоїда стає «плоскою» через те, що в момент імпульсу струму збільшується падіння напруги на внутрішньому опорі мережі. Ця «плоска» синусоїда виникає на всіх елементах, що ввімкнені паралельно нелінійному навантаженню. Вказане явище викликає зниження стійкості до короточасних провалів напруг імпульсних джерел живлення у зв'язку з тим, що спотворена синусоїда не встигає повністю зарядити конденсатори, що фільтрують, і енергії, яка в них запасеться, не вистачає для підтримання нормальної роботи кіл постійного струму;

– *підвищене зношення та передчасне руйнування конденсаторів установок компенсації реактивної потужності.* Оскільки опір конденсатора зворотно пропорційний частоті, то конденсатор є елементом, який абсорбує гармоніки з усієї мережі, тобто батареї конденсаторів замикають частину струму вищих гармонік на себе; через те, що опори елементів мережі мають індуктивний характер, то при використанні нелінійних елементів збільшується імовірність появи небажаних резонансних явищ;

– *збої в роботі та вихід з ладу комп'ютерної техніки та телекомунікації.* Збої відбуваються, ко-

ли силові лінії проходять досить близько до ліній телекомунікації та комп'ютерної техніки, так як вищі гармоніки, що протікають по силовим лініям наводять завади в кабелях телекомунікації та в елементах мікропроцесорів;

– *зниження коефіцієнту потужності електроустановок споруд.* Вищі гармоніки носять реактивний характер, тому їх наявність в електричній мережі призводить до збільшення долі реактивної потужності, що в свою чергу викликає зниження коефіцієнту потужності;

– *передчасний вихід з ладу електродвигунів.* Струми нульової послідовності створюють додаткове підмагнічування сталі, що призводить до погіршення характеристик електричних машин та додаткового нагріву їх сердечників;

– *некоректний облік споживаної електроенергії.*

Всі названі явища є актуальними для будь-яких споживачів, у тому числі і військових. Беручи до уваги все вище сказане, досить гостро постає питання про правильний та точний розрахунок електричних мереж, які будуть здатні жити найрізноманітніші споживачі так, щоб вони не наносили шкоди один одному.

Оскільки всі заходи, пов'язані з боротьбою з вищими гармоніками, пов'язані зі значними капіталовкладеннями, то перш за все необхідно провести ретельний аналіз джерел вищих гармонік в системах електропостачання та особливостей їх роботи.

Щоб встановити дійсний вплив та рівень вищих гармонік, необхідно провести їх електричні вимірювання. Для цього необхідно використовувати спеціальні вимірювальні прилади, чутливі до спектру вищих гармонік. Ці вимірювання можуть бути проведені як за допомогою безпосереднього апаратного аналізу самого процесу, здійснюючи це шляхом використання сучасних приладів-аналізаторів або проводити обробку попередньо зробленого запису процесу. Найчастіше для таких вимірів використовують шлейфові осцилографи та пристрої магнітного запису. Слід зазначити, що для систем електропостачання, у яких велика доля споживаної потужності припадає на нелінійні споживачі, що працюють постійно, доцільно використовувати не звичайні прилади контролю параметрів електричної мережі, які розраховані для зчитування значень струмів та напруг частотою 50 Гц, а прилади, чутливі до більш широкого спектру частот. Ця рекомендація пов'язана з тим, що звичайні прилади не здатні уловлювати струми вищих гармонік, а тому будуть показувати значення менші, ніж ті, які насправді діють в мережі.

Моніторинг якості електричної енергії пов'язаний з проблемою вибору вимірювальних приладів. Встановлення стаціонарного обладнання, яке дозволяє контролювати усі показники якості електричної енергії, та пристроїв для боротьби з вищими гармоніками пов'язане зі значними капіталовкладеннями. Але в розгалуженій мережі стаціонарне обладнання

може не дати очікуваного ефекту, оскільки з його допомогою важко виявити джерело збурень. Запропоновані сучасною промисловістю портативні пристрої, хоча і можуть здійснювати всі необхідні вимірювання, але є іноземного виробництва та коштують десятки тисяч гривень, що є недоступним для військових частин. У зв'язку з цим постала проблема необхідності розробки власного портативного пристрою для вимірювання показників якості електричної енергії.

Щоб вирішити завдання проведення електричних вимірювань у будь-якій точці системи електропостачання, було проведено розробку точного, швидкодіючого, простого у застосуванні та відносно дешевого пристрою для вимірювання показників якості електричної енергії (рис. 3).

Для досягнення цієї мети пропонується необхідно використовувати сучасні мікропроцесорні пристрої, зокрема мікроконтролер сімейства AVR компанії ATMEL Atmega 8, який може бути застосований у ролі АЦП.

AVR-архітектура, на основі якої побудовані мікроконтролери сімейства AVR, поєднує потужний Гарвардський RISC-процесор (Reduced Instruction Set Computer – обчислювач з скороченим набором команд) з роздільним доступом до пам'яті програм і даних, 32 регістра загального призначення, кожен з яких може працювати, як регістр-акумулятор, і розвинену систему команд фіксованої 16-бітної довжини. Більшість команд виконуються за один машинний такт з одночасним виконанням поточної команди і вибіркою наступної команди, що забезпечує продуктивність до 1 MIPS на кожний МГц тактової частоти. До складу мікроконтролера Atmega 8 входить 10-бітний АЦП. Аналого-цифрові перетворювачі мікроконтролерів AVR працюють за принципом послідовного наближення або за методом «зважування». Завдяки цьому методу вдається досягти відносно невеликої тривалості перетворення при високій точності і невеликій складності процесу.

Для виведення інформації з мікроконтролера на ПЕОМ необхідно використовувати НІД-пристрій (Human Interface Device) – це пристрій зв'язку з користувачем. У якості ПЕОМ рекомендується використовувати ноутбук. Через НІД-пристрій мікроконтролер підключається до USB порту ноутбука і здійснює на нього передачу інформації про параметри електричного сигналу.

Для обробки та аналізу цієї інформації розробляється програма на основі програмного середовища «AVR Studio» – це потужний сучасний програмний продукт, що дозволяє проводити всі етапи розробки програм для будь-яких мікроконтролерів серії AVR. Пакет містить спеціалізований текстовий редактор для написання програм, потужний програмний відладчик. Схема вольтметра проектується за допомогою програми PonyProg, головною задачею якої є програмування логічних мікросхем. Для забезпечення наочності застосовується програма USB Осцилограф 1.0, яка створена засобами мови програмування Delphi 7.0.



Рис. 3. Структурна схема пристрою для вимірювання показників якості електричної енергії

Delphi 7.0 дозволяє за допомогою стандартного модуля CANVAS достатньо наочно відобразити сигнал, прийнятий з пристрою.

Оскільки мікроконтролер здатний працювати з напругами до 6 В, то в даному пристрої необхідно використовувати вимірювальні трансформатори напруги. Для проведення вимірювань без розмикання електричних кіл у схемі пропонується використовувати вимірювальні кліщі.

### Висновки

Проблема вищих гармонік в системах електропостачання не унікальна для України. Усі країни на певному етапі свого технічного розвитку стикаються з нею та вимушені розробляти нову базу стандартів, норми проектування та міняти технічні регламенти експлуатації. Військові частини не є відокремленими організаціями і зазвичай при нормальних режимах функціонування живляться від державної мережі, споживаючи електроенергію на якість якої впливають споживачі електричної енергії як ті що знаходяться на території частини та належать їй так і ті, що знаходяться за її межами та їй не належать. Для того щоб здійснювати якісь заходи по боротьбі з вищим гармоніками необхідно для початку провести моніторинг та аналіз усього електрообладнання частини встановивши як джерела вищих гармонік, так і споживачів, які чутливі до їх дій.

Для цього запропоновано схему портативного пристрою для вимірювання показників якості електричної енергії на базі мікроконтролера Atmega8, який дозволить визначити наявність

вищих гармонік в електричній мережі та їх характер конкретного споживача. Що дозволить вжити організаційні та технічні заходи щодо зменшення їх впливу на мережу.

### Список літератури

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промредприятий. – 2-е изд., перераб. и доп. / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
2. Арриллага Дж. Гармоники в электрических системах: пер. с англ. / Дж. Арриллага, Д. Брэдли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990, – 320 с.
3. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: учебн. для вузов / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
4. Заболотний І.П. Конспект лекцій з курсу “Електричні системи і мережі” для студентів денної та заочної форм навчання напрямку електротехніка / І.П. Заболотний. – Донецьк: ДонНТУ, 2002. – 123 с.
5. А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя / А.В. Евстифеев. – М.: Издательский дом «Додэка- XXI», 2007. – 592 с.: ил. (Серия «Программируемые системы»).
6. Трамперт В. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR – МК.: пер. с нем. / В. Трамперт. – К.: «МК-Пресс», 2006. – 208 с
7. Harmonic Disturbances in Networks and Their Treatment // Cahier Technique Schneider Electric, no 152.
8. Fiorina J.N. Inverters and Harmonics // Cahier Technique Merlin Gerin, no 159.

Надійшла до редколегії 8.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Г.И. Лагутин, А.Н. Панченко, А.И. Гарагуля

*В процессе потребления электрической энергии происходит искажение синусоиды из-за влияния электропотребителей с импульсными источниками питания. В этой статье рассматривается проблема возникновения высших гармоник в электрических сетях и их влияние на отдельные элементы системы электроснабжения. Также вносится предложение по разработке портативного устройства для измерения показателей качества электрической энергии.*

**Ключевые слова:** высшие гармоники, системы нулевой, прямой обратной последовательности, поверхностный эффект, эффект близости, системы электроснабжения, показатели качества электрической энергии, портативное устройство для измерения показателей качества электрической энергии.

### HIGHER HARMONICS IN POWER-SUPPLY SYSTEMS

G.I. Lagutin, A.M. Panchenko, A.I. Garagulya

*In process of power consumption the sinusoidal wave distortion takes place due to the influence of the consumers with switched mode power supplies. This article deals with the problem of higher harmonics, originating in electrical networks, and their influence on separate power supply elements. The author makes a proposal for the development of a portable power quality index measurement device.*

**Keywords:** higher harmonics, zero-, positive-, negative- sequence system, surface effect, proximity effect, power-supply system, power quality index, portable power quality index measurement device.