

УДК 621.311.

Ю.С. Олійник

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## АНАЛІЗ МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ ВИЩИХ ГАРМОНІЙНИХ СКЛАДОВИХ

*Розглянуто причини виникнення вищих гармонійних складових і їх наслідки на роботу електрообладнання. Проблема вищих гармонік обумовлена, в першу чергу, прогресом в області силової перетворювальної техніки військових об'єктів, який привів до більш широкого впровадження у промислове електропостачання потужних вентильних перетворювачів, електродугових сталеплавильних печей, зварювальні апарати, які характеризуються в процесі своєї експлуатації появою вольт-амперних характеристик. Розглянуто різні методики розрахунку вищих гармонік в електричних мережах, які засновані на рішенні диференціальних рівнянь, теорії ланцюгів, велику увагу приділено аналізу методики розрахунку несинусоїдальних режимів роботи розподільних мереж енергосистеми, розглянуто основні допущення, прийняті при використанні даного алгоритму, та етапи розрахунку з даної методики. Зроблені висновки про те, які саме завдання дозволяє вирішувати розглянута методика.*

**Ключові слова:** вищі гармонійні складові, якість електричної енергії, нелінійність споживачів.

### Вступ

**Постановка проблеми і аналіз публікацій.** Всі країни на певному етапі концентрації комп'ютерної техніки стикаються з нею і вимушені кардинально міняти технічні регламенти експлуатації, норми проектування, розробляти відповідну базу стандартів. У випадках, коли потужність нелінійних електроспоживачів військових об'єктів не перевищує 10—15 %, будь-яких особливостей в експлуатації системи електропостачання, як правило, не виникає. При перевищенні вказаної межі слід чекати появи різних проблем в експлуатації і наслідків, причини яких не є очевидними. У будівлях, що мають долю нелінійного навантаження понад 25%, окремі проблеми можуть виявитися відразу [5 – 7].

Проблема вищих гармонік обумовлена, в першу чергу, прогресом в галузі силової перетворювальної техніки військових об'єктів, яка призвела до більш широкого втілення у промислове електропостачання потужних вентильних перетворювачів, електродугових сталеплавильних печей, зварювальних пристроїв та інших пристроїв, які мають в процесі своєї роботи нелінійні вольт-амперні характеристики. Аналізом та пошуком різноманітних шляхів розв'язання цієї проблеми займаються спеціалісти з електропостачання військових об'єктів як в Україні, так і за її межами. Питання, що тісно пов'язані з підвищенням якості, а саме зі зниженням рівня вищих гармонік, наразі є дуже актуальними [1 – 6].

Виходячи з цього, все частіше різні організації проводять дослідження стану електропостачання споруд, де в свою чергу розташовується багата кількість комп'ютерної техніки, робота яких є джерелом вищих гармонік. Постійний зріст кількості використання комп'ютерної техніки у різних галузях є підставою для поглибленого та серйозного вивчення цієї проблеми.

Якщо звернути свою увагу на наслідки гармонійних складових, то їх можна дуже стисло охарактеризувати таким чином: погіршується робота обладнання, внаслідок чого скорочується термін його роботи; якщо говорити про систему електропостачання, то виникають додаткові втрати у трансформаторах; можливий перегрів та, як наслідок цього, руйнування кабельної лінії; погіршення показників якості електроенергії, а саме спотворення синусоїдальності напруги, що живить обладнання (вищі гармонійні складові в струмах нелінійних електроспоживачів призводять до негативних, а інколи і катастрофічних наслідків); спотворення синусоїдальності живлячої напруги (наслідком характеру струму, споживаного імпульсним навантаженням, є деформація синусоїди напруги, навантаження, що діє на затисках), синусоїда напруги стає «плоскою», оскільки у момент імпульсу струму збільшується падіння напруги на внутрішньому опорі мережі:

$$U_{\text{нагрузки}}(t) = U_{\text{сети}}(t) - i(t) \cdot Z_{\text{сети}},$$

де  $U_{\text{нагрузки}}(t)$  – деформована синусоїда напруги на затисках навантаження;  $U_{\text{сети}}(t)$  – синусоїдальна напруга живлячої мережі;  $i(t)$  – імпульсний струм навантаження;  $Z_{\text{сети}}$  – повний опір мережі зі сторони затисків навантаження.

Якщо передбачити, що опір мережі відносно затисків кожного окремого електроспоживача дорівнює нулю, то спотворення синусоїдальності напруги не існувало б. У реальності мережа для будь-якого електроспоживача є якимсь опором. Несинусоїдальні струми, протікаючи по цьому опорі, викликають падіння напруги на нім. В результаті, на затисках нелінійного електроспоживача, а також на затисках всіх останніх електроспоживачів, включених паралельно йому, з'являється несинусоїдальна напруга, зазвичай — «плоска» синусоїда [1, 6].

«Плоска» синусоїда, впливаючи на імпульсне джерело живлення, знижує рівень випрямленої напруги; збільшує тепловиділення в елементах імпульсного джерела живлення; знижує стійкість до короткочасних провалів напруги.

*Зниження рівня випрямленої напруги.* Деформація синусоїди живлячої напруги призводить до зниження значення амплітуди вхідної напруги, в слідство це знижується напруга на конденсаторі

**Метою статті** є дослідження існуючих методик розрахунку вищих гармонійних складових в системі електропостачання в точці приєднання споживачів до розподільчих мереж енергосистеми, а також виявлення їх переваг та недоліків.

## Основний матеріал

Необхідно визначити особливий підхід до експлуатації систем електропостачання різноманітних споруд, побудов, оскільки багато організацій, що використовують комп'ютерну техніку, розташовуються в офісних будівлях, які в свою чергу не розраховані на швидкий зріст нелінійного навантаження. Системи електропостачання є дуже складною системою, яка містить у своєму складі багату кількість елементів, які тісно та нерозривно пов'язані між собою [2].

В даний час відомі два основних підходу до розрахунку вищих гармонік в електричних мережах. Один з них оснований на розв'язанні системи диференціальних рівнянь, яка дає характеристики електромагнітні процеси у вентиляльних перетворювачах. На основі цього рішення визначають криві струму та наруг. В даний час теорія ланцюгів містить велику кількість аналітичних та неаналітичних методів розрахунку ланцюгів з вентиляльними перетворювачами. Розроблено велику кількість методів чисельного розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь, а саме методи Тейлора, Ейлера, Рунге та Адамса.

Інший підхід при розрахунку вищих гармонік струму і напруги в ланцюгах, які містять керуємі випрямлювачі передбачає, що вентиляльні перетворювачі заміщаються джерелами струму або ЕДС вищих гармонік. Цей підхід дозволяє розрахувати спектральний склад струмів і напруг до послідовного та незалежного розрахунку їх діючих значень [1–4].

Дуже цікавим та актуальним є методика розрахунку несинусоїдальних режимів роботи розподільчих мереж енергосистем авторів Дерендяєвої Л. В., Локтіної А. С., Сбоева В. С. [6]. Вони зазначають, що розрахунки режимів сучасних електричних мереж і систем, які відрізняються складною конфігурацією та містять у своєму складі велику кількість елементів різного призначення, можливі лише при використанні ПЕОМ. Тому реалізація будь-яких алгоритмів, які розроблені для визначення тих або інших параметрів режиму системи, здійснюється методами обчислювальної математики. У відповідності з цими методами виконується розрахунок кожної конкретної задачі, яка може бути представлена відповідної системи рівнянь.

При розробці такої методики авторами було зроблено такі допущення: СЕП є симетричною та нелінійною, тобто всі фази мережі мають однакові параметри; опори елементів для струмів вищих гармонійних складових прямої та зворотної послідовності приймаються однаковими; джерела гармонійних складових представляються як трифазні симетричні навантаження, які генерують в мережу струми вищих гармонік. Для того, щоб здійснити розрахунки за даною методикою необхідно мати такі вихідні дані: однолінійну схему електропостачання розподільчої мережі 10-110 кВ; характеристику елементів електричної мережі, які необхідні для розрахунку параметрів їх схем заміщення; характеристику параметрів джерел вищих гармонік та режими їх роботи [6].

Розрахунок несинусоїдальних режимів за даною методикою складається з таких етапів.

1. Складається схема заміщення системи електропостачання для струмів вищих гармонік. Така схема заміщення складається для однієї фази та має нейтраль, до якої приєднуються нульові точки схем заміщення генераторів, узагальнених навантажень, батарей конденсаторів та ємнісних провідимостей ліній електропередачі напругою вище 1 кВ. Спотворені навантаження моделюються джерелами нескінченної потужності, які підключені до відповідних вузлів схеми заміщення електричної мережі підприємства. Для ЛЕП складається схема заміщення з врахуванням хвильового характеру лінії. Для трансформаторів схема заміщення складається з врахуванням комплексних коефіцієнтів трансформації. Топологія схеми заміщення характеризується за допомогою двох складових, де вказуються номер вузлів початку і кінця гілок.

2. Здійснюється розрахунок параметрів схем заміщення елементів систем електропостачання споживачів і розподільчих мереж енергосистем для струмів зворотної послідовності промислової частоти.

3. Визначається спектральний склад струмів джерел вищих гармонійних складових. У зв'язку з тим, що рівні напруги суттєво впливають на амплітудні спектри струмів перетворювачів при їх розрахунках необхідно використовувати значення фактичних напруг електричної мережі, які знайдено з режиму прямої послідовності промислової частоти.

4. Здійснюється розрахунок вищої гармонійної складової. Формується матриця провідимостей вузлів  $Y_n$ , яка перераховується у спеціальну мало заповнену матрицю коефіцієнтів обертання  $G_n$ .

5. Напруга вищих гармонійних складових у вузлах схеми заміщення і струми у гілках визначаються рf формуламб:

$$\dot{U}_n = G_n \otimes \dot{J}_n, \quad (1) \quad \dot{I}_n = Y_{BN} \cdot M_t \cdot \dot{U}_n, \quad (2)$$

де  $U_n$ ,  $J_n$  - стовпцові комплексні матриці вузлів напруги і струмів для n-ої гармоніки;  $\otimes$  - знак операції спеціального множення справа вектору струмів  $J_n$  на матрицю типу G;  $M_t$  - транспортована пер-

ша матриця інциденцій;  $Y_{BN}$  – матриця провідимостей для гілок  $n$ -ої гармоніки  $Y_{YN}$ . Оскільки на першому етапі інтеграційного процесу для ліній електропередачі значення, що задають струми, приймається рівним нулю  $I_{nn}^* = 0$ ,  $I_{kn}^* = 0$ , то значення  $\dot{U}_n$  і  $\dot{I}_n$ , що знайдено, є приблизними.

6. Використовуючи отримані значення, що уточнюються значення струмів, виконується розрахунок за формулами (1) і (2).

7. Пункти алгоритму 5 і 6 виконуються для кожної гармонік, що розглядається, до того моменту, коли для напруг у всіх вузлах не виконується умова:

$$\delta U_{ni} = (U_{ni} - U_{ni+1})/U_{ni} \leq \delta, \quad (3)$$

де  $U_{ni}$  і  $U_{ni+1}$  – значення напруг для  $n$ -ої гармоніки на  $i$  і  $i+1$  шагах;  $\delta$  – значення приросту напруги.

8. За знайденими значеннями напруги  $U_{ni}$  визначаються коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$  у вузлах, і діюче значення струму  $I_{ni}$  у гілках схеми заміщення [6].

Розрахунок несиметричних та несинусоїдальних режимів відіграє важливу роль, оскільки важливість таких розрахунків обумовлюється необхідністю забезпечити якість електричної енергії не лише в процесі її експлуатації, але й на стадії проектування.

Серед багатьох вимог, що пред'являються, до систем електропостачання, необхідно виділити ті, що характеризують вимоги до розрахунків режимів на стадії проектування. Це таке: обраний метод повинен дозволити виконати розрахунок режимів систем електропостачання будь-якої складності; повинно бути забезпечено низька вартість розрахунків режимів систем електропостачання; точність результатів розв'язання, яке необхідно для забезпечення якості електроенергії при експлуатації;

В режимі експлуатації розрахунок несинусоїдальних режимів системи електропостачання необхідний з метою вирішення таких задач:

1. Визначення та здійснення оцінки показників якості електроенергії;
2. Регулювання показників якості електричної енергії, при цьому необхідно управляти відповідним станом обладнання;
3. Визначення якості електроенергії при зміні електричної схеми та схеми живлення споживачів різних категорій.

Враховуючи всю актуальність цього питання в даний час, вітчизняним та зарубіжним вченим ще не вдалося розробити єдину методику розрахунку несинусоїдальних режимів системи електропостачання, яка в свою чергу, здатна оперативно та з високою точністю виконувати розрахунок вищих гармонійних складових струму і напруги [6].

Всі відомі методи не враховують такий момент, як нагрів струмоведучих частин. Використання для

розрахунку вищих гармонік методів, що враховують нагрів, дозволяє більш точно визначити втрати потужності та електроенергії в елементах мережі [1, 2].

Аналіз виконаних раніше розрахунків свідчить про те, що якщо не враховувати нагрів струмоведучих частин при несинусоїдальних режимах в процесі експлуатації системи електропостачання, то виникають великі похибки при визначенні втрат електричної енергії.

Навантажувальні втрати потужності у будь-якому елементі мережі визначаються за відомою формулою:

$$\Delta P = I^2 \cdot R, \quad (4)$$

де  $R$  – опір елемента,  $I$  – струм елемента.

В результаті, чим точніше задано величину  $R$ , тим точніше буде результат розрахунку втрат. При цьому опір провідників залежить від температури. Цю залежність можна описати такою формулою:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (q_{окр} + q_{п})), \quad (5)$$

де  $R_0$  – опір провідника при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору,  $q_{окр}$  – температура оточуючого середовища;  $q_{п}$  – перевищення температури провідника над температурою оточуючого середовища.

Опір елементів мережі за рахунок коливань температури може змінюватися приблизно на 40%. Тому на таку ж величину можуть змінюватися й втрати потужності. Зниження втрат може бути помилковим. Отже, це значить, що у розрахунках необхідно враховувати температуру [3].

Результати розрахунків несинусоїдальних режимів системи електропостачання [4] використовуються для визначення техніко-економічних показників. Це означає, що результат таких розрахунків є важливим економічним аспектом.

Несинусоїдальні режими є неекономічними. Для того, щоб оцінити економічність та допустимість цих режимів, а також вибрати заходи щодо зниження несинусоїдальності необхідно більш точно моделювати елементи мережі, навантажень та джерел живлення, а для цього в свою чергу важливо враховувати нагрів струмоведучих частин при несинусоїдальних режимах систем електропостачання в процесі експлуатації. Для оцінки допустимості несинусоїдальних режимів необхідно створити такий комплекс, який би містив в своєму складі математичні моделі елементів системи електропостачання (СЕР) та математичний апарат, який розраховує втрати потужності та енергії в мережах з нелінійним навантаженням з врахуванням нагріву струмоведучих частин. Для завершення етапу створення такого комплексу, необхідно уточнити математичні моделі елементів СЕР за допомогою виявлення показників якості електроенергії. Результатом цього буде окремий комплекс, який дозволить з більш високою точністю оцінити економічність та допустимість несинусоїдальних режимів роботи СЕР.

Нормативні акти, що регулюють роботу електроенергетичної галузі, дають можливість зробити висновки щодо основних дій, які дозволяють мінімізувати витрати, причина яких – нові ринкові правила, та в результаті знизити фінансові збитки електропостачальної організації та є ефективним прогнозуванням технологічних характеристик підприємства. Всі вони тісно пов'язані зі споживання електричної енергії. Отже, таким чином, нові параметри ринку потребують від енергопостачальної організації отримання максимально низьких помилок при прогнозуванні параметрів мереж, що обслуговуються.

При тій ситуації на ринку, що склалася наразі у вітчизняній енергетиці, досить актуальне питання здійснення системного прогнозування, концепція якого заключається в тому, що енергопостачальна організація повинна спрогнозувати розвиток тієї чи іншої ситуації (наприклад, рівень втрат електроенергії у конкретному районі), намагатися скоректувати свої дії для своєчасного реагування на зміни оточуючого середовища, зменшити збитки або збільшити можливий прибуток. Хибна система відносин на сучасному електроенергетичному ринку призводить до посилювання точності планування розходу електроенергії, яка в свою чергу примушує енергетичні компанії до використання більш ефективних методів аналізу та прогнозування параметрів режиму та технологічних характеристик [1-3].

## Висновки

Таким чином, методика, на якій було акцентовано увагу в даній статті, дозволяє розраховувати аналізувати режим вищих гармонійних складових у точці загального приєднання споживачів і розподільчих мереж енергосистем будь-якого складності, а також дозволяв вирішити наступні задачі:

1. Визначення допустимого вкладу споживачів енергосистеми до якості електричної енергії в точці загального приєднання;

2. Визначення втрат електричної енергії в мережах при протіканні за ними струмів вищих гармонійних складових [1 – 3].

## Список літератури

1. Жежеленко И.В. *Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий* / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 144 с.
2. Жежеленко И.В. *Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий* / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
3. *Гармоники в электрических системах* / Дж. Аррилага и др. – М.: Энергоатомиздат 1990. – 320 с.
4. ГОСТ 13109-97. *Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения*. – М., 1997. – 60 с.
5. Олійник Ю.С. *Аналіз спектру вищих гармонік в системі «випрямлювач - інвертор»* / Ю.С. Олійник // *Збірник наукових праць харківського університету повітряних Сил*. – Х., 2015. – Вип. 2 (43). – С. 93-99.
6. Дерендяева Л.В. *Методика расчетов высших гармонических составляющих в точке присоединения потребителей к распределительным сетям энергосистем [Электронный ресурс]* / Л.В. Дерендяева, А.С. Лохтина, В.С. Сбоева // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. – №1. – Режим доступа до статті: [www.science-education.ru/107-8449](http://www.science-education.ru/107-8449).
7. Смирнов С.С. *Высшие гармоники в сетях высокого напряжения: [монография]* / С.С. Смирнов - Новосибирск: Наука, 2010. – 327 с.
8. *Управление качеством электроэнергии* / И.И. Карташев, В.Н. Тульский и др. – М.: МЭИ, 2006. – 320 с.

Надійшла до редколегії 23.09.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.І. Канюк, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.

## АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Ю.С. Олійник

*Рассмотрены причины возникновения высших гармонических составляющих и их последствия на работу электрооборудования. Проблема высших гармоник обусловлена, в первую очередь, прогрессом в области силовой преобразовательной техники военных объектов, который привел к более широкому внедрению в промышленное электроснабжение мощных вентиляционных преобразователей, электродуговых сталеплавильных печей, сварочные аппараты, которые характеризуются в процессе своей эксплуатации появлением вольт-амперных характеристик. Рассмотрены различные методики расчета высших гармоник в электрических сетях, которые основаны на решении дифференциальных уравнений, теории цепей, большое внимание уделено анализу методики расчета несинусоидальных режимов работы распределительных сетей энергосистемы, рассмотрены основные допущения, принимаемые при использовании данного алгоритма, и этапы расчета по данной методике. Сделаны выводы о том, какие именно задачи позволяет решать рассмотренная методика.*

**Ключевые слова:** высшие гармонические составляющие, качество электрической энергии, нелинейность потребителей.

## ANALYSIS OF HIGHER HARMONIC CONSTITUENTS CALCULATION METHODS

Yu.S. Oliynik

*Reasons of origin of higher harmonic constituents and their consequence are considered to work of electrical equipment. The problem of ultraharmonics is conditioned, above all things, by progress in area of power inverter technique of military objectives, which resulted in more wide introduction in the industrial power supply of powerful valve transformers, elektrodugovykh steel-smelting stoves, welding vehicles which are characterized in the process of the exploitation appearance of volt-ampere. The different methods of calculation of ultraharmonics are considered in electric networks, which are based on the decision of differential equalizations, theory of chains, large attention is spared the analysis of method of calculation of the nonsinusoidal modes of operations of distributive networks of grid, basic assumptions, accepted at the use of this algorithm, and stages of calculation, are considered to on this method. Conclusions are done about that, which one tasks the considered method allows to decide.*

**Keywords:** higher harmonic constituents, quality of electric energy, non-linearity of users.