

МОДЕЛЮВАННЯ ГАРМОНІЧНИХ РЕЖИМІВ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

© Варецький Ю.О., Наконечний Т.І., 2005

З впровадженням в експлуатацію потужних нелінійних навантажень перевіреною інженерною практикою є попередній аналіз впливу цих навантажень на промислові системи електропостачання шляхом моделювання гармонічних явищ на стадії проектування. Розглянуто особливості моделювання змінних гармонік, що дає змогу розпізнати потенційно шкідливі резонанси чи інші негативні прояви гармонік в електричній мережі.

When large harmonic producing loads are commissioned it is proved engineering practice to analyze the impact on the industrial power supply system by performing harmonic phenomena modeling at the design stage. The paper describes simulation features of time-varying harmonics, that can identify any potentially harmful resonances or other undesirable harmonic events in the electrical network.

Постановка проблеми. Останнім часом вищі гармоніки в електричних мережах привертають до себе все більшу увагу. Це пов'язано з тим, що пристрої силової електроніки охоплюють значну частину типових промислових, комунальних та побутових навантажень. З іншого боку, значна частка споживачів у таких мережах містить чутливі до спотворень напруги малопотужні електронні регулятори. Якщо ж у системі електропостачання застосовують конденсатори для покращання коефіцієнта потужності, то без належного розгляду її частотних характеристик проблема гармонік може бути згубною і для силового обладнання: конденсаторів, трансформаторів чи двигунів. Вказані причини посилюють вимоги до контролю якості електроенергії в електричних мережах і аналізу проектів розвитку систем електроспоживання з цього погляду.

Гармоніки є вигідною для аналізу формою математичного відображення неперервного спотворення форми напруги чи струму. Згідно з теорією Фур'є будь-яку періодичну функцію можна подати як суму ряду кратних до основної частоти синусоїд. Синусоїду основної частоти називають основною гармонікою, а синусоїди всіх інших гармонік – вищими гармоніками (в термінології МЕК просто гармоніками). Якщо ж спотворення форми кривої повторюються з некратними до основної частотами, то їх характеризують таким поняттям, як інтергармоніки. Зрозуміло, що користуючись підходом Фур'є до аналізу одного періоду такого сигналу, у ньому неможливо виявити вміст інтергармонік. Це можна здійснити тільки спектральним аналізом декількох періодів цього сигналу.

Аналіз останніх досліджень. Чинні стандарти більшості країн [1–3] встановлюють усталені допустимі значення показників несинусоїдності напруги чи допустимих рівнів емісії гармонік струму у мережах певного класу в так званій “точці спільного приєднання” [3]. Проте польові дослідження ясно вказують, що характер спотворення струмів і напруг у системах електропостачання змінюється з часом разом зі змінами конфігурації електричної мережі, величини і режиму навантаження. Здебільшого ці зміни мають випадковий характер. Враховуючи цей факт, деякі національні стандарти якості, наприклад [1], встановлюють дві норми показників: нормально допустимі (для основної тривалості визначеного часу спостереження) і граничнодопустимі (для короткотривалих більших відхилень). Але такий підхід потребує окреслення певних числових значень показників несинусоїдності протягом визначеного часу спостереження. Для опису цих закономірностей застосовують статистичні характеристики.

Крім того, потрібно зауважити, що експериментальний аналіз несинусоїдності змінних режимів пов'язаний з низкою проблем вимірювання гармонік [4].

В [5, 6] описано особливості гармонічних режимів в системах електропостачання різних типів змінних нелінійних навантажень, а також проблеми, пов'язані з компенсацією реактивної потужності у цих випадках. Ці дослідження торкаються конкретних випадків і вказують на актуальність проблеми.

Завдання дослідження. Пропонована робота розглядає моделювання гармонічних режимів систем електропостачання змінних навантажень. Опрацьована авторами модель уможливіє швидко оцінювати режими системи і вплив можливих засобів їх нормалізації.

Опис моделі. Переважна більшість досліджень частотних властивостей систем електропостачання нелінійних споживачів може бути здійснена на основі однолінійної розрахункової схеми [7]. У такій розрахунковій схемі систему електропостачання, як правило, моделюють еквівалентним реактансом короткого замикання. В цих умовах достатнім є допускати, що реактанс системи буде кратно зростати з порядком гармоніки і співвідношення X/R системи буде постійним для всіх частот. У деяких випадках є можливість виміряти і окреслити частотну характеристику системи електропостачання у вигляді частотної залежності вхідного імпедансу, яка надалі може бути використана в гармонічному аналізі як точніший її розрахунковий еквівалент.

Усі конденсаторні батареї в системі електропостачання повинні враховуватися в моделі. Це відноситься і до потужних батарей, які під'єднують до збірних шин, а також до конденсаторів, які під'єднано до індивідуальних двигунів і груп електроприймачів. Конденсатори в комбінації з індуктивністю системи визначають резонансні частоти системи.

Трансформатори моделюють еквівалентними поздовжніми параметрами, визначеними з паспортних даних. Здебільшого співвідношення X/R приймають постійним зі зміною частоти.

Імпеданси кабелів у межах промислових систем електропостачання, як правило, не мають істотного впливу на результати гармонічного аналізу. Кабелі дещо згладжують гостроту частотної характеристики в околі резонансних частот. Аналіз системи без моделювання кабелів є найгіршим випадком. Тому переважно немає практичного інтересу ретельно враховувати точні довжини і марки усіх кабелів в системі.

Двигуни наближено моделюють реактансом розсіювання, якщо не доступна його дійсна частотна залежність імпедансу. Потужні двигуни повинні моделюватися індивідуально, тоді як менш потужні двигуни можуть подаватися як один еквівалентний імпеданс. Двигуни впливають на збільшення частоти паралельного резонансу системи, оскільки реактанс двигуна ввімкнено паралельно до реактансу системи.

Нелінійні навантаження моделюються як джерела струмів гармонік (одне для кожної характерної частоти). Для оцінки несинусоїдного режиму у досліджуваній системі потрібно мати значення струмів гармонік у спектрі кожного типу нелінійного навантаження.

Інші навантаження в системі повинні моделюватися еквівалентними імпедансами, які залежно від величини і співвідношення між резистансом і реактансом можуть дещо підвищувати природну резонансну частоту системи і знижувати пік резонансу.

Аналіз гармонічних режимів в електричних мережах передбачає здійснення подальших досліджень.

Розрахунок спотворень струмів і напруг. Комп'ютерні моделі повинні забезпечувати можливість розрахунку показників повних та індивідуальних гармонічних спотворень напруг і струмів для кожної системи шин чи вузла системи електропостачання. Високі значення показників спотворень в певній частині системи можуть вказати на резонанс. Аналіз індивідуального гармонічного спотворення може допомогти передбачити резонансні частоти перед впровадженням системи в експлуатацію. Отримані результати порівнюють з нормами, окресленими в стандартах.

Аналіз частотної характеристики системи. Частотною характеристикою системи називають залежність її вхідного імпедансу від частоти щодо джерела гармонік у табличній чи графічній формі. Така залежність дає змогу швидко візуально оцінити резонансні частоти системи. Піки частотної характеристики вказують на частоти паралельних, а западини – послідовних резонансів.

В результаті паралельного резонансу збільшуються струми однієї або кількох гармонік, якщо вони знаходяться в околі власної частоти системи. Так само і послідовний резонанс може викликати збільшення напруги гармоніки. Висота піка частотної характеристики є імпедансом системи на резонансній частоті. Аналізуючи частотну характеристику, можна оцінити очікуване підсилення струмів гармонік, що знаходяться близько до резонансної частоти.

Вплив на лінії зв'язку (“телефонні завади”). У деяких випадках необхідно оцінити очікуваний рівень впливу спотворень струму на лінії зв'язку в зоні експлуатації системи електропостачання. Як правило, “телефонні завади” не є проблемою там, де застосовано відповідні монтажні правила для паралельних силових і телефонних кабелів. Найбільш загальним шляхом оцінки “телефонних завад” є визначення так званого “ $I \times T$ добутку”, який дає змогу здійснити загальну оцінку впливу гармонік на лінії зв'язку, і згідно зі стандартом [3] визначається за виразом

$$I \times T = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{49} (I_h \times T_h)^2}}{I_1}, \quad (1)$$

де T_h – коефіцієнт впливу h -ї гармоніки струму I_h ; I_1 – перша гармоніка струму. Значення коефіцієнта T_h залежить від частоти гармоніки, оскільки одні гармоніки мають більший “телефонний вплив”, ніж інші. Вимоги стандарту [3] залежно від значення співвідношення (1) дають можливість оцінити тільки ймовірність виникнення завад.

З метою забезпечення вимог вказаних досліджень авторами опрацьовано програму, яка уможливило здійснювати розрахунок струморозподілу, коефіцієнтів спотворення, а також індивідуальних коефіцієнтів гармонік струмів і напруг в аналізованому спектрі частот. Частотні характеристики щодо вибраних джерел гармонік є частотними функціями відповідних вхідних імпедансів системи електропостачання. В опрацьованому алгоритмі вони визначаються через діагональні елементи матриці вхідних і взаємних адмітансів [8]:

$$Y_h = \Gamma_t (\Gamma Z_h \Gamma_t)^{-1} \Gamma, \quad (2)$$

де Γ , Γ_t – пряма і транспонована матриці контурів; Z_h – матриця імпедансів заступної схеми для h -ї гармоніки.

Розподіл струмів гармонік у схемі розраховується за матрицею коефіцієнтів розподілу, яка дає змогу оцінити відносні величини струмів у вітках схеми від усіх джерел гармонік системи електропостачання:

$$C_h = (1 - Y_h Z_h) C_0, \quad (3)$$

де C_0 – матриця коефіцієнтів розподілу розімкненої схеми [8].

Гармонічні режими системи електропостачання змінних навантажень. Дослідження гармонічних режимів було виконано для показаної на рис. 1 системи електропостачання цементного заводу.

Ця система має 4 секції 6 кВ, до кожної з яких приєднано певну групу навантажень і регульовані ступенями конденсаторні батареї КБ зі встановленою потужністю (0,6+0,6+1,2) МВА. Навантаження кожної секції узагальнено за типами: асинхронні двигуни 6 кВ з індивідуальними постійно приєднаними до виводів конденсаторами КБ1–КБ4; приєднані через трансформатори 6/0,4 кВ резистивні навантаження та асинхронні двигуни 0,4 кВ; приєднані через трансформатори 6/0,4 кВ частотно-регульовані приводи 0,4 кВ. Встановлені потужності усіх типів навантажень відрізняються між собою для кожної секції шин. Крім того, режими роботи обладнання секцій шин є змінними, що тягне за собою відповідну зміну потужності регульованих конденсаторних батарей КБ. Увімкнення чи вимкнення асинхронних двигунів на шинах 6 кВ супроводжується зміною кількості приєднаних до шин 6 кВ індивідуальних конденсаторів, сумарна встановлена потужність яких еквівалентна значенням КБ1–КБ4. Перетворювачі частоти виконано з ланкою постійного

струму, який отримують від 12-пульсних випростувачів. Режими роботи випростувачів визначаються режимами роботи приєднаних до приводів механізмів.

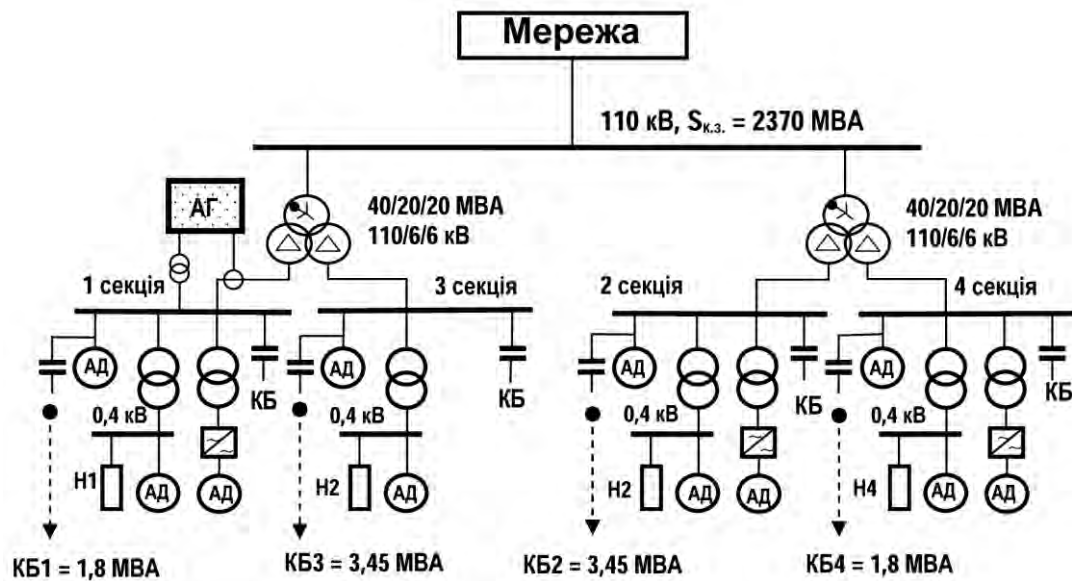


Рис. 1. Система електропостачання цементного заводу

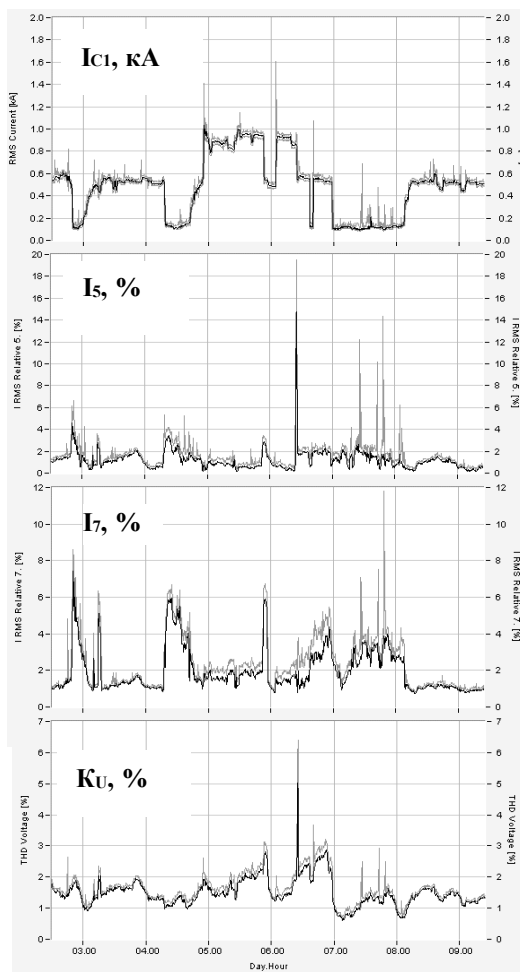


Рис. 2. Показники режиму 1 секції шин

На рис. 2 показано зареєстровані аналізатором гармонік (АГ на рис. 1) значення струму навантаження 1 секції шин I_{c1} , п'ятої I_5 і сьомої I_7 гармонік цього струму та коефіцієнта спотворення напруги K_u на цій секції протягом певного часу роботи підприємства. Подібну картину можна спостерігати і для інших секцій шин. Це вказує на те, що спотворення струмів і напруг змінюється зі зміною навантаження у системі електропостачання. Причому характер спотворення залежить від частотних властивостей системи, які визначаються режимом нелінійного навантаження, режимом асинхронних двигунів 6 кВ, режимом пристроїв компенсації реактивної потужності. Передбачаючи впровадження нових приводів у системі електропостачання, потрібно проаналізувати можливі зміни рівнів гармонік і оцінити їх допустимість згідно з нормами.

Розрахункова схема для аналізу гармонічного режиму від дії джерела гармонік на першій секції шин у досліджуваній схемі показана на рис. 3. Подібний вигляд мають заступні схеми для усіх інших секцій шин. У цій заступній схемі взято такі позначення параметрів для h -ї гармоніки:

Z_{hM11} – еквівалентний імпеданс асинхронних двигунів 6 кВ 1 секції шин;

Z_{hM1} – еквівалентний імпеданс асинхронних двигунів 0,4 кВ 1 секції шин;

Z_{hTs1} – імпеданс трансформатора 6/0,4 кВ 1 секції шин;

Z_{hC1} – еквівалентний реактанс конденсаторних батарей 1 секції шин;

Z_{hR1} – еквівалентний резистанс активного навантаження 0,4 кВ 1 секції шин;
 $Z_{hTн}$ – імпеданс обмотки НН трансформатора 110/6 кВ;
 $Z_{hTв}$ – імпеданс обмотки ВН трансформатора 110/6 кВ;
 $Z_{hс}$ – еквівалентний імпеданс мережі 110 кВ,

а для позначення параметрів інших секцій використано відповідні індекси.

На рис. 4 показано результати розрахунку частотних характеристик та розподілу струмів гармонік у системі електропостачання для джерела гармонік 1 секції шин. З цих частотних характеристик можна зробити висновок, що для практичної оцінки режиму можна не враховувати вплив інших секцій, оскільки похибка буде незначною (рис. 4, а).

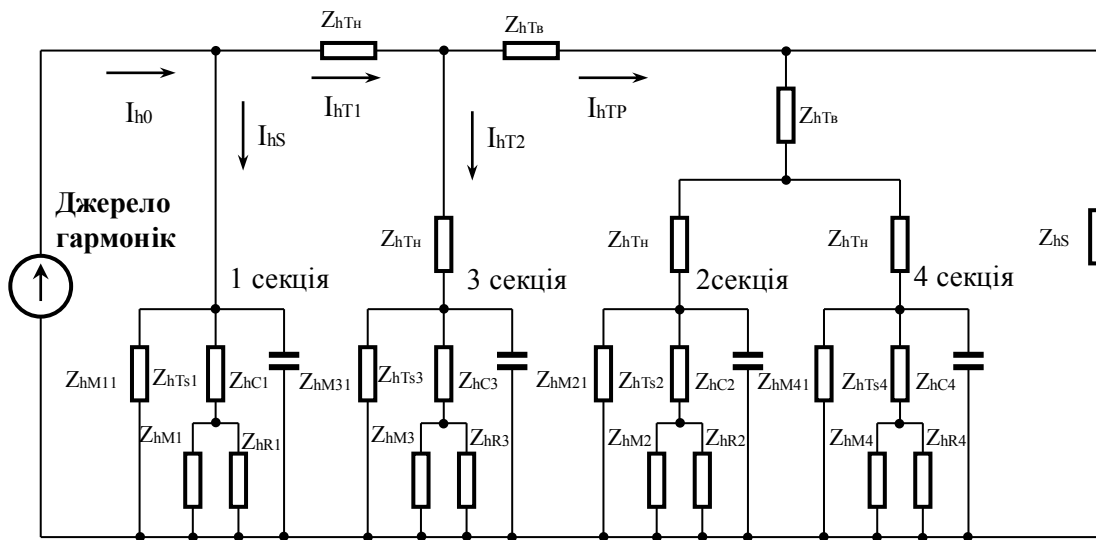


Рис. 3. Розрахункова схема системи електропостачання

У той самий час врахування двигунів 6 кВ істотно змінює характер несинусоїдності режиму. Розподіл струмів гармонік на рис. 4, б дає змогу оцінити відносне значення струму кожної гармоніки у вітках заступної схеми рис. 3, яке числово є коефіцієнтом підсилення гармоніки струму у цій вітці.

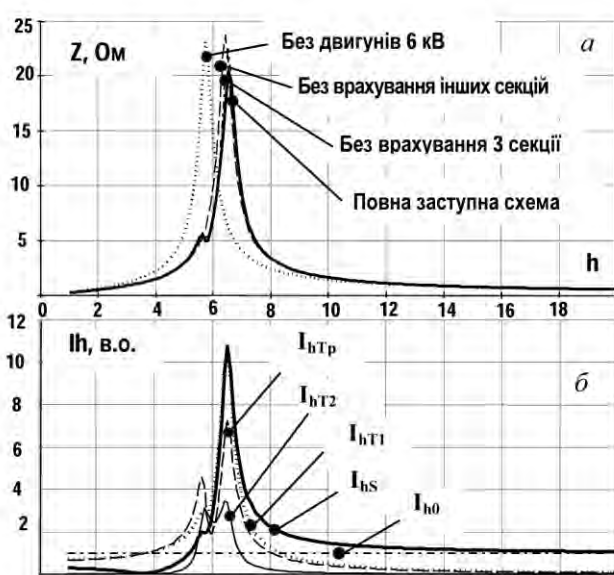


Рис. 4. Частотні характеристики (а) та розподіл струмів гармонік (б) для 1 секції шин

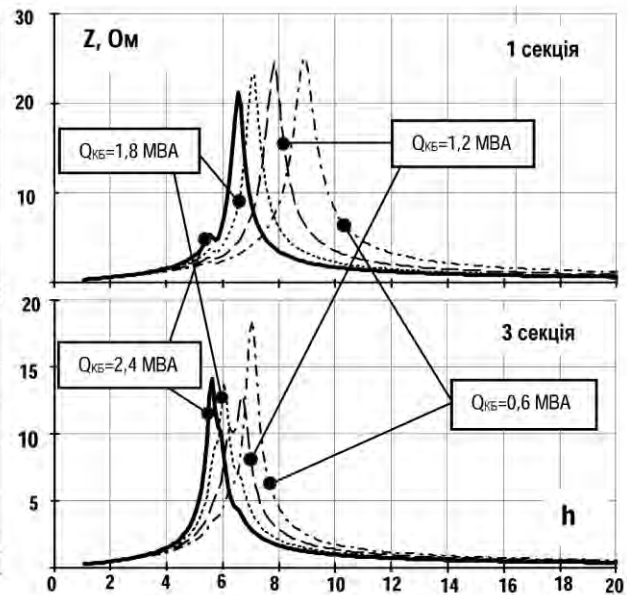


Рис. 5. Вплив регулювання КБ на частотні характеристики різних секцій шин

Наведені частотні характеристики показують, що на першій секції шин слід очікувати резонансного підсилення 7 гармоніки струму. Це викличе також погіршення загального спотворення напруги. Для порівняння на рис. 5 показано результати розрахунку впливу регулювання конденсаторних батарей КБ на характер несинусоїдності режиму в аналізованій схемі на 1 і 3 секціях шин. З цих залежностей можна зробити висновок, що резонансні частоти в цих умовах будуть змінюватися в межах 7...9 гармонік на 1 секції шин і в межах 5...7 гармонік на 3 секції шин. У таблиці показано коефіцієнти гармонічних складових напруги для основних гармонік у розрахункових режимах. Незважаючи на те, що частотно-регульовані приводи містять 12-пульсні випростувачі, 5 і 7 гармоніки струму в реальних умовах все ж мають значні величини. Тому наявні частотні властивості аналізованої системи електропостачання є несприятливими з цього погляду.

Коефіцієнти гармонічних складових напруги на 1 і 3 секціях

Секція	Номер гармоніки	Струм	Потужність конденсаторної батареї на секції, МВА				
			2,4	1,8	1,2	0,6	0
	h	A	Коефіцієнт гармоніки напруги, %				
1	5	17,5	1,6	1,3	1,1	0,9	0,8
	7	6,9	4,7	12,4	4,1	2,2	1,5
	11	22,8	0,7	0,9	1,3	2,4	10,1
	13	18,7	0,5	0,7	0,9	1,4	2,9
3	5	8,1	2,2	1,7	1,3	1,1	0,9
	7	2,5	1,5	2,2	4,0	9,9	4,5
	11	14,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9
	13	9,0	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6

Висновки. Однією з характерних особливостей електроспоживання в сучасних електричних мережах є несинусоїдність режиму. З впровадженням нових нелінійних навантажень, засобів компенсації реактивної потужності, керованих приводів невід'ємною частиною процедури проектування стає гармонічний аналіз режиму і альтернативних способів його нормалізації. Оскільки не існує єдиної стратегії для комплексного вирішення проблеми гармонік і компенсації реактивної потужності, обґрунтований компроміс повинен прийматися в кожному конкретному випадку на основі модельних досліджень.

1. ГОСТ 13109–97. *Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.* 2. EN 50160. *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, 1999.* 3. IEEE *Recommended practices and requirements for harmonic control in power systems. ANSI/IEEE Standard 519, 1992.* 4. *Harmonic working group Subcommittee of the T&D Committee. Time-varying harmonics: part 1 – characterizing measured data // IEEE Trans. on PD. – 1996. – Vol. 13, No. 3. – P. 938–944.* 5. Ellis R. G. *Harmonic Analysis of Industrial Power Systems // IEEE Trans. on IA. – 1996. – Vol. 32, No. 2. – P. 417–421.* 6. Yan Y. H. et al. *Harmonic Analysis for Industrial Customers // IEEE Trans. on IA. – 1994. – Vol. 30, No. 2. – P. 462–468.* 7. Жежеленко И.В. *Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.* 8. Перхач В.С. *Математичні задачі електроенергетики. – Львів: Вища шк., 1982. – 380 с.*