

ANALYSIS OF THE LEVEL OF HIGHER HARMONICS IN THE SUGAR SUPPLY SYSTEM

V. Shesterenko, I. Izvolenskiy, O. Mashchenko

National University of Food Technologies

Key words:

Power supply system

Non-sinusoidal

Higher harmonics

Energy efficiency

Article history:

Received 16.07.2020

Received in revised form

30.07.2020

Accepted 13.08.2020

Corresponding author:

I. Izvolenskiy

E-mail:

energetyc@ukr.net

ABSTRACT

The article considers ways to increase the efficiency of power supply systems of sugar factories. The main aspects of the analysis of the phenomenon of distortion of the shape of voltage and current curves are given.

It was noted that the structural restructuring of energy, the creation of the energy market, the implementation of energy-saving technologies have formed new relationships between the staff of power plants, power grids and consumers. The set permissible level of distortion in the network distorts the voltage. Non-sinusoidal modes adversely affect the operation of power electrical equipment, relay protection systems, automation and communication. Reducing the levels of higher harmonics in electrical networks is part of the overall task of improving the quality of electrical energy and reducing the impact of loads that distort the sinusoidal shape of the current and voltage curves. The influence of thyristor converters on the shape of the voltage curve was analyzed. The study provides an opportunity to determine the allowable parameters of the power supply system of the enterprise, where current and frequency converters are used.

The results of studies of thyristor converters operating in the electric drive system show the high efficiency of these devices. At the same time, thyristor converters generate a whole range of higher harmonics into the company's power supply system, which creates problems for other consumers. Therefore, power of the transducers at the enterprise must be limited to optimal level and determined by the level of higher harmonics generated by thyristor devices.

Systems for minimizing the level of higher harmonics are characterized by a hierarchical structure and high complexity. The criterion of optimality is the minimum of electricity losses, so mathematical models are proposed for the analysis of the level of higher harmonics in sugar factories. A study of power supply systems of plants in the Kyiv region was provided and recommendations for reducing the level of non-sinusoidal voltage were given.

АНАЛІЗ РІВНЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЦУКРОВИХ ЗАВОДІВ

В. Є. Шестеренко, І. Є. Ізволєнський, О. А. Машенко
Національний університет харчових технологій

У статті розглянуто шляхи підвищення ефективності систем електропостачання цукрових заводів. Наведено основні аспекти аналізу явища спотворення форми кривих напруги та струму.

Зазначено, що структурна перебудова енергетики, створення енергетичного ринку, втілення енергозберігаючих технологій сформували нові взаємини між персоналом електростанцій, електричних мереж і споживачами. Встановлений допустимий рівень спотворень у мережі спотворює напругу. Несинусоїдні режими несприятливо позначаються на роботі силового електрообладнання, систем релейного захисту, автоматики та зв'язку. Зниження рівнів вищих гармонік в електричних мережах є частиною загального завдання поліпшення якості електричної енергії і зменшення впливу навантажень, що спотворюють синусоїдну форму кривих струму і напруги. Проаналізовано вплив тиристорних перетворювачів на форму кривої напруги. Дослідження надає можливість визначити допустимі параметри системи електропостачання підприємства, де застосовуються перетворювачі струму та частоти.

Результати дослідження тиристорних перетворювачів, що працюють у системі електроприводу, показують високу ефективність цих пристроїв. Водночас тиристорні перетворювачі генерують у систему електропостачання підприємства цілу гаму вищих гармонік, які створюють проблеми для інших споживачів. Тому потужність перетворювачів на підприємстві необхідно обмежувати до оптимальної і визначати її рівнем вищих гармонік, що генеруються тиристорними пристроями.

Системам мінімізації рівня вищих гармонік притаманна ієрархічна структура та висока складність. При цьому критерієм оптимальності є мінімум втрат електроенергії, тому запропоновано математичні моделі для аналізу рівня вищих гармонік на цукрових заводах. Проведено дослідження систем електропостачання заводів в Київській області і надано рекомендації щодо зниження рівня несинусоїдності напруги.

Ключові слова: система електропостачання, несинусоїдність, вищі гармоніки, енергоефективність.

Постановка проблеми: Останнім часом енергетики все частіше стикаються з проблемою виходу з ладу без видимої, здавалося б, на те причини, електричного й електронного устаткування. Так, відбувається перегрівання роторів і швидкий знос підшипників електродвигунів і генераторів, аварії електроприводів, вибухи конденсаторів, регулярний вихід з ладу мікропроцесорної техніки, підгорання нульових проводів, прискорене старіння ізоляції і корозія елементів заземлень.

Економічні збитки, що виникають у результаті впливу вищих гармонік, обумовлені, здебільшого, погіршенням енергетичних показників, зниженням надійності функціонування електричних мереж і скороченням терміну служби електрообладнання. Проблема вищих гармонік — найбільш важлива частина проблеми електромагнітної сумісності електрообладнання через збільшення потужності електроприймачів, що спотворюють синусоїду, та поширення електричних систем автоматичного керування технологічними процесами, які чутливі до форми синусоїди напруги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій авторів [2; 8—11] показав, що основними типами спотворень в електричних мережах є:

- вищі гармоніки, частота яких кратна основній частоті;
- інтергармоніки — гармоніки, частота яких некрата основній частоті.

При визначенні загального рівня спотворення від кількох приймачів з навантаженнями, що викликає спотворення, сумуються випадкові вектори, а з огляду на те, що режими роботи приймачів у різних вузлах мережі незалежні один від одного, фазові кути й амплітуди гармонік можливо вважати випадковими незалежними величинами, які розподіляються за нормальним законом. Дозволений індивідуальний вклад i -го споживача у напругу n -ої гармоніки в точці загального підключення визначається за співвідношенням, де P_i — обумовлена максимальна потужність i -го споживача; $P_{\text{пр}}$ — пропускна потужність мережі. У разі відсутності характеристики використовується значення потужності короткого замикання у вузлі. У результаті нормується максимальне відношення потужності приймача електроенергії до потужності короткого замикання в точці загального підключення. Якщо індивідуальний внесок є вищим за допустимий, то необхідний більш детальний розгляд можливості підключення споживача електроенергії, що повинен характеризуватися відношеннями рівнів сприятливості до спотворень і стійкості до спотворень та до рівня електричної сумісності.

Метою статті є дослідження впливу споживачів електроенергії на рівень спотворення напруги.

Викладення основних результатів дослідження. Відхилення форми кривої струму та напруги від синусоїди розглядають за допомогою гармонічних складових за математичною теорією, створеною Фур'є (1768... 1830). Термін «гармоніка» використовується в акустиці для позначення коливань струни з частотою, кратною основній частоті коливання. В цьому випадку ряд Фур'є набуває такого вигляду:

$$U(t) = U_0 + U_1 \sin(t + \psi_1) + U_2 \sin(2t + \psi_2) + \\ + U_3 \sin(3t + \psi_3) + \dots + U_v \sin(vt + \psi_v),$$

де U_1 — амплітуда першої гармоніки напруги; U_v — амплітуда вищої гармоніки напруги; ψ_1 — початкова фаза першої гармоніки; ψ_v — початкова фаза вищої гармоніки.

Несинусоїдність напруги характеризується значенням коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги — відношення дійсного значення суми гармонічних складових змінної напруги до дійсного значення змінної напруги:

$$K_{\text{нсс}} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^N U_v^2}}{U_{\text{ном}}},$$

де N — порядок останньої із гармонічних складових напруги, що враховуються; v — порядок гармонічної складової напруги; U_v — діюче значення v -ї гармонічної складової напруги, В. При визначенні цього показника можна не враховувати гармонічні складові порядку $v > 40$.

Друга величина — коефіцієнт гармонічної складової, — величина, що дорівнює відношенню діючого значення v -ї гармонічної складової напруги до діючого значення напруги основної частоти:

$$K_{U(v)} = 100 \frac{U_v}{U_1}.$$

Допустимі значення коефіцієнта несинусоїдності наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Допустимі значення коефіцієнта несинусоїдності, %

В електричних мережах напругою до	Нормальне	Гранично допустиме
1 кВ	8	12
6... 20 кВ	5	8
35 кВ	4	6

Вищі гармоніки негативно діють на всі види електрообладнання, навіть на значній відстані від місця генерації гармонік.

У регульованому електроприводі на цукрових заводах широко застосовуються тиристорні перетворювачі. Тиристори як напівпровідникові прилади були запатентовані в 1956 році. Значний коефіцієнт підсилення за потужністю, незначні власні втрати, невеликі габаритні розміри, висока надійність надають можливість створити на основі тиристорів потужні перетворювачі струму й частоти з високими техніко-економічними показниками.

Перетворювач виду струму — керований випрямляч, напруга на виході якого змінюється в широких межах. Це дає змогу регулювати частоту обертання якоря двигуна постійного струму плавно і в широкому діапазоні.

Випрямлення струму має зв'язок з послідовним перемиканням струму (без розриву) з однієї фази на іншу. Ідеальний варіант, коли перемикання струму відбувається в момент увімкнення наступного тиристора (вентиля). Практично ж струм у вентилі, що відкривається, встановлюється не відразу, а впродовж якогось часу, якому відповідає кут γ . У цей час ще зберігається струм у попередньому вентилі, тому виникає міжфазне коротке замикання, що супроводжується короткочасним зниженням напруги. Кількість комутаційних спотворень напруги залежить від кількості фаз перетворювача.

Вищі гармоніки негативно діють на електрообладнання всіх видів, навіть на значній відстані від місця генерації гармонік. Вони створюють додатковий шум у телефонному зв'язку, призводять до помилкових спрацювань відповідальної

апаратури. Проблема вищих гармонік — це основна частина проблеми електромагнітної сумісності електрообладнання у зв'язку із збільшенням потужності тиристорних перетворювачів і широким застосуванням електронних систем автоматичного керування, які чутливі до форми синусоїди напруги [1; 6].

Процес плавного регулювання струму, напруги здійснюється внаслідок варіювання моменту ввімкнення тиристора, що відбувається за допомогою імпульсного сигналу, тривалість якого має бути більшою за термін ввімкнення тиристора. У разі індуктивного навантаження сигнал керування треба підтримувати, доки струм у тиристорі не досягне значення струму утримання. У разі ємнісного навантаження можливі короточасні імпульси струму через тиристори, що можуть вивести його з ладу, тому динамічні параметри тиристора, швидкість наростання струму di/dt та напруги du/dt можуть бути недостатніми для надійної роботи схеми [1—3].

Основна причина несинусоїдності струму перетворювачів — комутація вентилів без розриву струмів, що призводять до періодичних міжфазних коротких замкнень (КЗ) в мережі живлення. Комутаційні КЗ відрізняються від аварійних тільки короткочасністю, тобто вони тривають, доки струм фази, що виходить з роботи, не спаде до нуля. В кривій напруги з'являються комутаційні спотворення, форма, величина та кількість яких залежить від схеми випрямлення, кількості фаз випрямлення, потужності перетворювача, параметрів мережі живлення, кута регулювання перетворювача. Вказані спотворення мають періодичний характер, що дає змогу застосувати гармонічний аналіз (рис. 1).

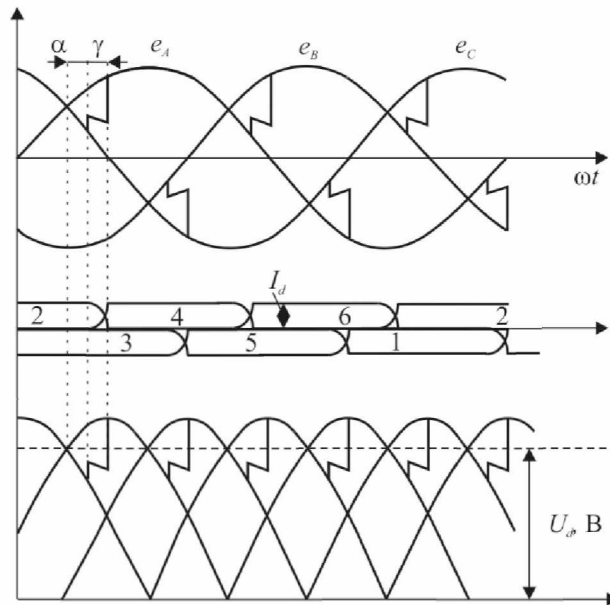


Рис. 1. Напруги та струми при роботі перетворювача струму:
 α — кут регулювання; γ — кут комутації

Порядок вищих гармонік визначається за формулою:

$$v = mk \pm 1,$$

де m — число фаз випрямлення; $k = 0, 1, 2, 3, 4$ — послідовний ряд натуральних чисел. Згідно з цією формулою для шестифазної схеми випрямлення в кривій напруги є вищі гармоніки, що називаються канонічними: $v = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25$ тощо.

Крім цих гармонік, виявлені «анормальні», парні та непарні. Поява таких гармонік пояснюється порушенням симетрії моментів відкриття окремих вентилів перетворювача внаслідок неякісного фазування їх по всіх каналах, а також унаслідок живлення пристроїв фазного управління несинусоїдальною, несиметричною та з коливаннями амплітуди напругою.

Вираз для періодичної функції струму перетворювача можна подати у вигляді:

$$I_v = \sqrt{(A_v)^2 + (B_v)^2},$$

де I_v — амплітуда струму гармоніки; A_v, B_v — коефіцієнти ряду Фур'є.

Загальний вираз для коефіцієнтів ряду Фур'є вищих гармонік матиме такий вигляд:

$$A_v = \frac{2\sqrt{3} U_M}{v \pi X_a} \sin \frac{v \pi}{3} \left[\frac{1}{v+1} \sin(v+1) \frac{\gamma}{2} \cdot \sin(v+1) \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) - \frac{1}{v-1} \sin(v-1) \frac{\gamma}{2} \cdot \sin(v-1) \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \right],$$

$$B_v = \frac{2\sqrt{3} U_M}{v \pi X_a} \sin \frac{v \pi}{3} \left[-\frac{1}{v+1} \sin(v+1) \frac{\gamma}{2} \cdot \sin(v+1) \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) + \frac{1}{v-1} \sin(v-1) \frac{\gamma}{2} \cdot \sin(v-1) \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \right],$$

де U_M — амплітуда кривої напруги мережі живлення; X_a — індуктивний опір контура комутації.

Значення струмів вищих гармонік залежить від навантаження перетворювачів енергії, індуктивності електричної мережі в точці приєднання перетворювача, кута керування та кута комутації.

Початкові фази вищих гармонік визначаються за формулою:

$$\varphi_v = \arctg \left(\frac{B_v}{A_v} \right).$$

Коефіцієнт потужності перетворювача залежить від кутів α керування та комутації γ :

$$\cos(\alpha + \gamma/2) \approx \cos \varphi = P_{\text{пр}} / S_{\text{пр}},$$

де $P_{\text{пр}}$ — активна потужність перетворювача на стороні змінного струму.

Для приблизної оцінки можливості підключення вентильних перетворювачів у певній точці мережі, виходячи з допустимого значення коефіцієнта несинусоїдності ($K_{\text{НС}}=8\%$), розроблені математичні моделі, на основі яких побудовані номограми [1].

Коефіцієнти ряду Фур'є для першої гармоніки:

$$A_1 = \sqrt{3} I_{\text{мер}} \cos(\alpha + 60^\circ);$$

$$B_1 = 2\sqrt{3} I_{\text{мер}} \cos^2\left(\frac{\alpha - 30^\circ}{2}\right);$$

$$\cos(\alpha + \gamma/2) \approx \cos\varphi = P_{\text{пр}}/S_{\text{пр}},$$

де $P_{\text{пр}}$ — активна потужність перетворювача на стороні змінного струму.
Враховуючи, що

$$\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma/2) = \frac{2 I_d X_\Sigma}{U_M},$$

де I_d — випрямлений струм; X_Σ — індуктивним опір кола комутації; U_M — амплітудне значення лінійної напруги мережі.

Вираз для кута комутації можна записати так:

$$\gamma \approx \frac{6 X_{*\Sigma}}{m \sin\varphi},$$

де $X_{*\Sigma}$ — еквівалентний індуктивний опір кола комутації, приведений до повної потужності перетворювача $S_{\text{пр}}$.

Математична модель діючого значення струму вищої гармоніки перетворювача визначається за формулою:

$$I_v = \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{P_{\text{пр}}}{\pi U^* X_{*\Sigma} v^2} \sin\varphi \sin\left(\frac{3 v X_{*\Sigma}}{m \sin\varphi}\right).$$

Аналогічно визначається математична модель діючого значення напруги вищої гармоніки в будь-якій точці мережі живлення:

$$U_v = \frac{m}{\pi v} U \frac{X_{*\text{мер}}}{X_{*\text{мер}} + X_{*\text{пр}}} \sin\varphi \sin\left(\frac{3 v X_{*\Sigma}}{m \sin\varphi}\right),$$

де $X_{*\text{мер}} = P_{\text{пр}}/P_k$ — еквівалентний опір системи, приведений до потужності перетворювача, $P_{\text{пр}}$; $X_{*\text{пр}}$ — еквівалентний індуктивний опір, кола комутації, приведений до повної потужності перетворювача.

Номограми для визначення діючого значення напруги окремих гармонік у заданій точці мережі живлення наведені в [1].

Коефіцієнти ряду Фур'є для першої гармоніки:

$$A_1 = \sqrt{3} I_{\text{мер}} \cos(\alpha + 60^\circ);$$

$$B_1 = 2\sqrt{3} I_{\text{мер}} \cos^2\left(\frac{\alpha - 30^\circ}{2}\right).$$

Струм групи перетворювачів залежить від режиму їхньої роботи, який є випадковим і підпорядковується законам статистичного розподілу, тому в мережах з перетворювачами рекомендується не обчислювати струми та напруги вищих гармонік, а визначати відразу коефіцієнт несинусоїдності напруги за ГОСТ 13109-97. Для оцінки допустимості підключення до мережі потужних навантажень, що спотворюють, і вибору фільтрів вищих гармонік необхідно знати опори мережі на частотах гармонік, що досліджуються. Частотні характеристики можуть бути визначені розрахунком чи за допомогою експериментів, зокрема

виміру струмів і напруг вищих гармонік у вузлі, що досліджується. В цьому разі необхідно вирішувати проблему фонових гармонік.

Для приблизної оцінки можливості підключення вентильних перетворювачів у певній точці мережі, виходячи з допустимого значення коефіцієнта несинусоїдності ($K_{НС}=5\%$), розроблені математичні моделі і побудовані номограми [1].

Коефіцієнт несинусоїдності можна визначити за математичною моделлю:

$$K_{НС} = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{к}}} \sqrt{0,955 \frac{\sin \varphi}{P_{\text{пр}}/P_{\text{к}} + X_{*\Sigma\text{пр}}} - 0,91},$$

де $S_{\text{к}}$ — потужність КЗ в точці, де визначається КНС; $X_{*\Sigma\text{пр}}$ — опір кола перетворювача, приведений до $P_{\text{пр}}$;

Найчастіше перетворювач підключають до шин підстанції через трансформатор, а КНС необхідно визначити на шинах ТП, РП. Тоді опір $X_{*\Sigma\text{пр}}$ дорівнює опору трансформатора:

$$X_{*\text{пр}} = X_{*\text{тр}} = \frac{U_{\text{к}}\%}{100\%} \left(1 + \frac{K_{\text{р}}}{4} \right) \frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{тр}}},$$

де $P_{\text{тр}}$ — номінальна потужність трансформатора; $K_{\text{р}}$ — коефіцієнт розщеплення обмоток цього трансформатора; $U_{\text{к}}\%$ — напруга короткого замикання трансформатора.

Для двообмоткових трансформаторів $K_{\text{р}} = 0$, тоді

$$X_{*\text{пр}} = \frac{U_{\text{к}}\%}{100\%} \frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{к}}}.$$

Розглянуті вище перетворювачі є джерелом живлення двигунів постійного струму. Але ці двигуни мають суттєвий недолік. До їхньої конструкції входить колектор, який різко знижує надійність роботи всього електроприводу. Колектор вимагає обслуговування (регулярна зачистка, заміна графітових щіток), тому на виробництві застосовуються асинхронні двигуни (АД). Для того, щоб регулювати швидкість ротора АД, необхідно поставити перетворювач частоти.

Перетворювач частоти складається з двох тиристорних блоків, керованого випрямляча та інвертора. Інвертор перетворює постійний струм у змінний. На виході інвертора отримуємо імпульси. Щоб використати серійний АД, необхідно по його обмотках пропускати синусоїдальний струм. Для цього імпульси на виході інвертора модулюють, використовуючи широтно-імпульсну модуляцію (ШИМ) за законом синуса. Якщо такі імпульси подати на обмотку двигуна, що має значний індуктивний опір, по обмотці протікатиме струм близький до синусоїди. При цьому і в двигуні, і в інверторі будуть значні втрати активної потужності ΔP . Але при частотному регулюванні економія електроенергії в технологічному пристрої досягає 40%.

Суттєво знижуються динамічні навантаження. Повністю виключаються динамічні удари. При цьому термін служби трубопроводів, насосів зростає на 45%. Зменшуються пускові струми двигунів, а це особливо важливо для насосних, що мають свою підстанцію, оскільки можна зменшити потужність трансформатора. Тиристорні перетворювачі різко збільшують продуктивність праці, якість про-

дукції, але потужність цих перетворювачів обмежується характеристикою системи електропостачання, оскільки перетворювач струму — це потужне джерело вищих гармонік. При цьому гармоніки негативно впливають на роботу всіх електроприймачів, передусім самих перетворювачів. При значному рівні вищих гармонік відбувається зрив роботи в системі керування, перетворювачі виходять з ладу і для кожного підприємства необхідно виконувати розрахунок допустимої потужності тиристорних перетворювачів. Перетворювачі струму є потужними джерелами вищих гармонік. Провали на синусоїді напруги, що виникають при роботі одного перетворювача, можуть впливати на синхронізацію другого перетворювача або інших пристроїв, в яких необхідно фіксувати момент переходу синусоїди напруги через нуль. Гармоніки напруги можуть призвести або до пропуску відкриття тиристорів, або до хибного відкриття їх, що може викликати коротке замикання з важкими наслідками.

Гармонічний склад напруги на виході перетворювача частоти наведено на рис. 2, де показано залежність відносного значення напруги гармоніки від глибини модуляції.

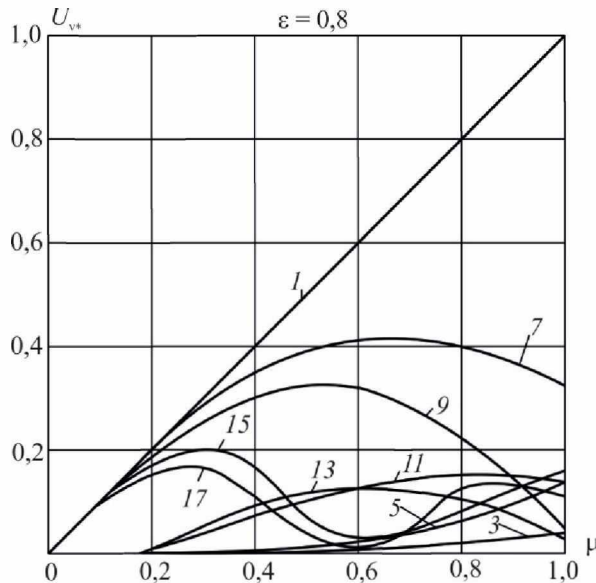


Рис. 2. Гармонічний склад напруги перетворювача з ШІМ

Висновки

Проаналізовано вплив тиристорних перетворювачів на форму кривої напруги. Дослідження надає можливість визначити допустимі параметри системи електропостачання підприємства, де застосовуються перетворювачі струму та частоти.

Результати досліджень тиристорних перетворювачів, що працюють у системі електроприводу, показують високу ефективність цих пристроїв. Водночас тиристорні перетворювачі генерують у систему електропостачання підприємства цілу гаму вищих гармонік, які створюють проблеми для інших споживачів. Тому

потужність перетворювачів на підприємстві необхідно обмежувати до оптимальної і визначати її рівнем вищих гармонік, що генеруються тиристорними пристроями.

Системам мінімізації рівня вищих гармонік притаманна ієрархічна структура та висока складність. При цьому критерієм оптимальності є мінімум втрат електроенергії. Пропонуються математичні моделі для аналізу рівня вищих гармонік на цукрових заводах.

Автори провели дослідження систем електропостачання заводів в Київській області і надали рекомендації щодо зниження рівня несинусоїдності напруги. Менеджери на деяких заводах, отримавши інформацію про розповсюдження вищих гармонік, зробили свої висновки і відключили більшість тиристорних перетворювачів від ТЕЦ цукрового заводу, підключивши їх до сільських мереж обл-енерго. При цьому рівень вищих гармонік на ТЕЦ цукрових заводів суттєво знизився, оскільки він визначався, в основному, тільки трансформаторами ТП та люмінесцентними лампами.

Література

1. Шестеренко В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Вінниця: Нова Книга, 2011. 656 с.
2. Tasic D. S., Stojanovic M. S. Modified Fuzzy Clustering Method for Energy Loss Calculations in Low Voltage Distribution Networks. *Electronics and electrical engineering*. 2006. № 2. P. 50—54.
3. Жежеленко И. В. Вышние гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
4. Электрическая энергия. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. М.: Изд-во стандартов, 1997. (Межгосударственный стандарт).
5. Методика визначення економічної ефективності витрат на наукові дослідження і розробки та їх впровадження у виробництво. Наказ Міністерства економіки та з питань європейської інтеграції та Міністерства фінансів України від 26.09.01 №218/446. URL: <http://zakon.nau.ua/doc/?uid=1022.307.0>.
6. Правила користування електричною енергією. Національна комісія з питань регулювання електроенергетики України. Постанова НКРЕ, документ z0417-96, редакція від 07.05.2010, підстава z0304-10). URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0417-96>.
7. ДСТУ 2155-93. Энергозбереження. Методи визначення економічної ефективності заходів по енергозбереженню [Текст]. [Чинний від 1995-01-01]. К.: Держспоживстандарт України, 1995. 20 с. (Національні стандарти України).
9. Arrillaga J., Neville R. W. Power System Harmonics. Hoboken, NJ, USA, Wiley-2003. 412 p.
10. Salles D. Assessing the collective harmonic impact of modern residential loads. Part I: Methodology *IEEE Trans. Power Del.* 2012. Vol. 27, no. 4. P. 1937—1946.