

## ЗНИЖЕННЯ РІВНІВ ГАРМОНІЧНИХ СПОТВОРЕНЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ДЖЕРЕЛАМИ ІНТЕРГАРМОНІК

### Вступ

Однією з найважливіших проблем сучасної електроенергетики є проблема електромагнітної сумісності, складовою частиною якої є несинусоїдні режими. Несинусоїдні режими обумовлюють наявність у кривих струмів і напруг різних гармонічних складових – вищих гармонік (ВГ), субгармонік і інтергармонік (ІГ).

При наявності в електричній мережі джерел ІГ виникає питання зниження їх рівнів, поряд зі зниженням рівнів ВГ. Вплив ІГ на роботу споживачів електроенергії аналогічний впливу ВГ. Тому й підхід до мінімізації ІГ представляється таким же, як і до мінімізації ВГ.

При зниженні рівнів ВГ одночасно, як правило, вирішується питання компенсації реактивної потужності. Таке завдання вирішується за допомогою силових резонансних фільтрів, інакше званих фільтрокомпенсуючими пристроями (ФКП). Використання ФКП є розповсюдженим способом мінімізації ВГ [1, 2].

До недоліків резонансних ФКП необхідно віднести наступне. По-перше, значна встановлена потужність і необхідність використання, як правило, декількох ФКП, що настроюються на різні гармоніки для досягнення припустимого рівня несинусоїдності. По-друге, амплітудно-частотні характеристики вхідного опору мережі живлення впливають на якість фільтрації за допомогою ФКП. По-третє, при складному характері амплітудного спектра струмів і напруг застосування резонансних ФКП може виявитися неефективним, особливо у випадках наявності гармонічних складових нижчого порядку, ніж настройка ФКП.

Таким чином, необхідно вирішити питання коректного вибору ФКП для мінімізації ІГ, з огляду на особливості їхнього застосування. При цьому доцільно розглянути застосування демпфувальних фільтрів, що дозволяють розширити смугу пропускання, а також складних фільтрів. Розглядаючи питання мінімізації ІГ, необхідно враховувати, що завдання мінімізації ІГ (так само як і ВГ) полягають у забезпеченні необхідного рівня несинусоїдності напруги, а не в повній їхній компенсації [3, 4].

### Типи фільтрів і області їхнього застосування

Традиційні резонансні ФКП – фільтри першого порядку з послідовно включеними ємністю й індуктивністю – мають обмежене застосування при мінімізації ІГ. Це пов'язане з тим, що резонансні ФКП є вузькосмуговими, тому при досить «густому» спектрі ІГ може знадобитися установка декількох ФКП, настроєних на різні частоти.

На рис. 1 наведена схема резонансного фільтра.

Повний опір резонансного фільтра визначається виразом

$$Z(j\nu) = R + j\left(\nu\omega L - \frac{1}{\nu\omega C}\right). \quad (1)$$

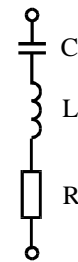


Рис. 1. Схема резонансного фільтра

Фільтри характеризуються такою величиною, як добротність, що визначає компенсаційну здатність фільтра. Добротність контуру резонансного фільтра  $q$  визначається рівностями

$$q = \frac{\nu_p X_L}{R} = \frac{R}{\nu_p X_C}, \quad (2)$$

де  $\nu_p$  – частота настроювання фільтра;  $X_L$  і  $X_C$  – опори реактора й конденсатора фільтра;  $R$  – сумарний активний опір кола фільтра.

Для випадку «густого» спектра ІГ доцільне застосування демпфувальних фільтрів. Демпфувальний фільтр складається з конденсатора й реактора, паралельно якому підключено активний опір (рис. 2) [5, 6].

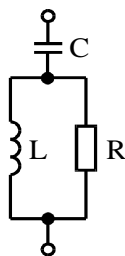


Рис. 2. Схема демпфувального фільтра

Повний опір демпфувального фільтра визначається виразом

$$Z(j\nu) = \frac{R\nu^2\omega^2L^2}{R^2 + \nu^2\omega^2L^2} + j \left( \frac{R^2\nu\omega L}{R^2 + \nu^2\omega^2L^2} - \frac{1}{\nu\omega C} \right). \quad (3)$$

Добротність демпфувального фільтра визначається добротністю паралельного ланцюга  $RL$  на частоті настроювання фільтра:

$$q = \frac{R}{\nu_p X_L}. \quad (4)$$

При необхідності мінімізації декількох гармонічних складових доцільно використовувати дворезонансні фільтри, які складаються із двох конденсаторів і двох реакторів, включених паралельно (рис. 3).

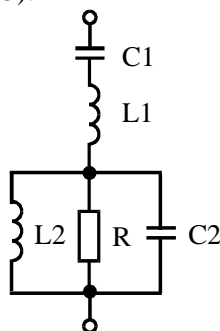


Рис. 3. Схема дворезонансного фільтра

Повний опір дворезонансного фільтра визначається виразом

$$Z(j\nu) = \frac{RL^2}{C^2 \left[ \frac{L^2}{C^2} + \left( \nu\omega LR - \frac{R}{\nu\omega C} \right)^2 \right]} + j \left[ \nu\omega L - \frac{1}{\nu\omega C} - \frac{RL}{C} \cdot \frac{\nu\omega LR - \frac{R}{\nu\omega C}}{\frac{L^2}{C^2} + \left( \nu\omega LR - \frac{R}{\nu\omega C} \right)^2} \right]. \quad (5)$$

Дворезонансний фільтр має послідовні резонанси на двох частотах, на яких він ефективно усуває відповідні гармонічні струми. Крім того, фільтр утворює паралельне резонансне коло, налаштоване на бажану частоту між двома іншими.

Добротність дворезонансних фільтрів визначається як добротність паралельних  $L2$  і  $R$  елементів при середній частоті  $\nu_{cp}$

$$q = \frac{R}{\nu_{cp} X_{L2}}, \quad (6)$$

де  $\nu_{cp}$  – частота налаштування паралельного резонансного кола, яка приблизно визначається як середнє геометричне двох частот

$$\nu_{cp} = \sqrt{\nu_{p1}\nu_{p2}}, \quad (7)$$

де  $\nu_{p1}$  й  $\nu_{p2}$  – дві частоти налаштування дворезонансного фільтра.

Якщо є потреба в мінімізації  $\Pi$  з відносними частотами, які менші частоти основної гармоніки, представляється доцільним використовувати складні фільтри. На рис. 4 наведена схема одного з таких фільтрів – фільтра  $C$ -типу.

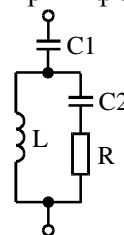


Рис. 4. Схема фільтра  $C$ -типу

Повний опір фільтра визначається виразом

$$Z(j\nu) = \frac{\nu^2\omega^2L^2R}{R^2 + \left( \nu\omega L - \frac{1}{\nu\omega C_2} \right)^2} + j \left[ \frac{\nu\omega LR^2 + \frac{L}{\nu\omega C_2}}{R^2 + \left( \nu\omega L - \frac{1}{\nu\omega C_2} \right)^2} - \frac{1}{\nu\omega C_1} \right]. \quad (8)$$

Фільтр має дві резонансні частоти, одна з яких відповідає послідовному резонансу, інша – паралельному. Параметри фільтра повинні бути обрані таким чином, щоб послідовний резонанс мав місце на частоті гармоніки, що підлягає компенсації (або близької до неї); паралельний резонанс – на частоті основної гармоніки. Фільтр  $C$ -типу є варіацією демпфувального фільтра, і його добротність визначається виразом (4).

## Мінімізація гармонійних спотворень

Розглянемо мінімізацію дискретного спектра ІГ і ВГ за допомогою програмного пакета Matlab. На рис. 5 наведена осцилограма напруги, а на рис. 6 відповідний їй гармонійний спектр до установки фільтра. При цьому коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги  $K_U$ , розрахований з урахуванням інтергармонік, становить 8,29 %, що перевищує припустиме значення 5 %.

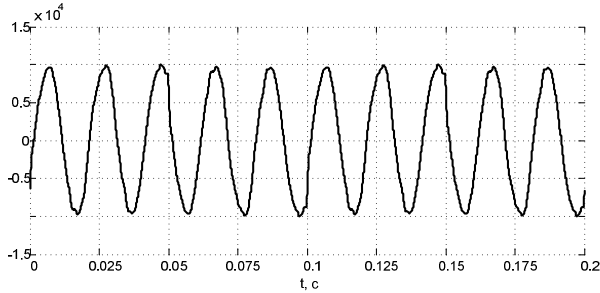


Рис. 5. Осцилограма напруги до встановлення фільтра

Тому що згідно рис. 6 найбільшу амплітуду має 3-я гармоніка, розглянемо встановлення фільтра, налаштованого на частоту цієї гармоніки. При цьому становить інтерес розглянути два види фільтрів: звичайний резонансний (позначимо його  $LC$ -фільтр) і демпфувальний фільтр (позначимо його  $RLC$ -фільтр), а також вплив потужності й добротності фільтра на його компенсувальну здатність.

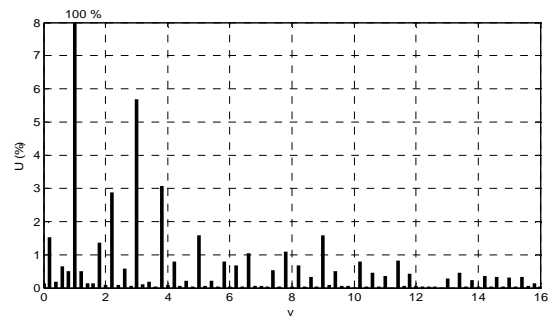


Рис. 6. Амплітудний спектр напруги до встановлення фільтра

У табл. 1 наведені результати розрахунку коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги при різних значеннях потужності  $Q_\phi$  і добротності  $q$  різного виду фільтрів 3-ї гармоніки.

Аналіз даних табл. 1 дозволяє зробити ряд висновків:

- при досить «густому» амплітудному спектрі за рахунок наявності інтергармонік більш ефективним є демпфувальний фільтр;
- при високій добротності ( $q \geq 100$ ) звичайний резонансний і демпфувальний фільтри, мають однакову компенсувальну здатність;
- найкращою компенсувальною здатністю, володіють фільтри з добротністю, що перебуває в діапазоні  $8 \leq q \leq 50$ .

Таблиця 1

**Значення коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги при різних значеннях потужності й добротності  $LC$ - і  $RLC$ -фільтрів 3-ї гармоніки**

$Q_\phi$ , вар	Тип фільтра	Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги $K_U$ , %, при добротностях фільтра							
		$q = 2$	$q = 4$	$q = 6$	$q = 8$	$q = 10$	$q = 50$	$q = 100$	$q = 200$
46000	$LC$	5,64	5,13	4,98	4,93	4,91	4,93	4,95	4,95
	$RLC$	5,41	5,00	4,90	4,87	4,87	4,92	4,94	4,95
45000	$LC$	5,67	5,16	5,01	4,96	4,94	4,96	4,97	4,98
	$RLC$	5,44	5,03	4,93	4,90	4,89	4,95	4,96	4,98
44000	$LC$	5,70	5,19	5,04	4,99	4,97	4,98	4,99	5,00
	$RLC$	5,48	5,07	4,96	4,93	4,92	4,97	4,99	5,00

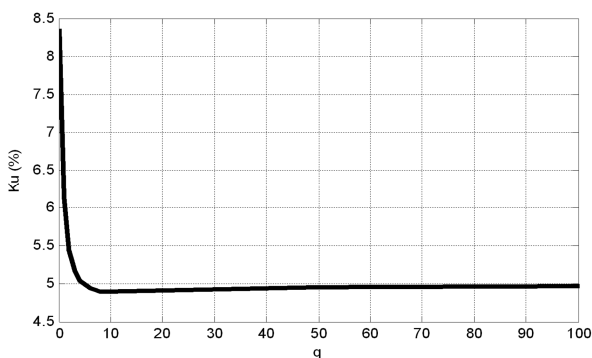


Рис. 7. Графік залежності коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги від добротності демпфувального фільтра

На рис. 7 наведений графік залежності коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги від добротності демпфувального фільтра при потужності фільтра  $Q_\phi = 45$  Мвар.

На рис. 8 наведений амплітудний спектр напруги після установки демпфувального фільтра 3-ї гармоніки потужністю  $Q_\phi = 45$  Мвар і добротністю  $q = 10$ .

На рис. 9 і 10 наведені амплітудні спектри струмів джерела і навантаження відповідно. При цьому коефіцієнт нелінійних спотворень – Total harmonic distortion (THD) – по струму становить:  $THD_{I\_source} = 15,25$  %;  $THD_{I\_load} = 4,40$  %.

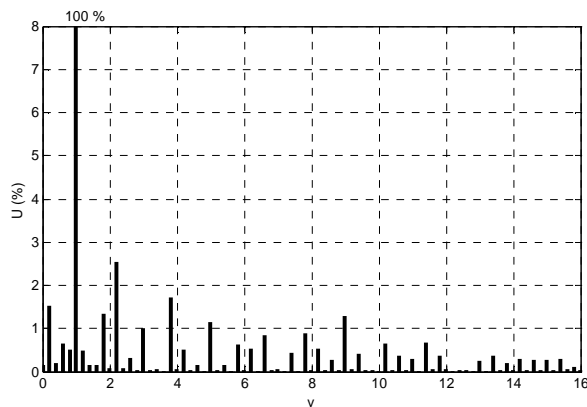


Рис. 8. Амплітудний спектр напруги після встановлення демпфувального фільтра 3-ї гармоніки

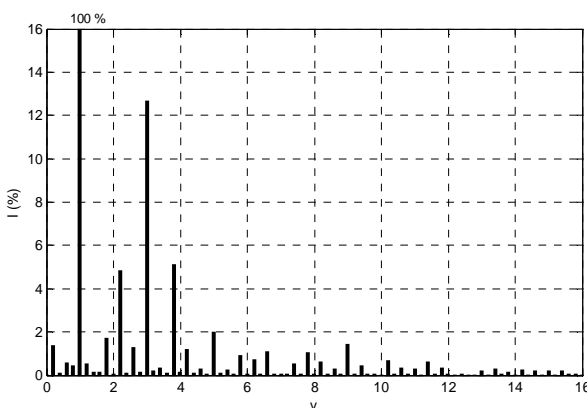


Рис. 9. Амплітудний спектр струму джерела

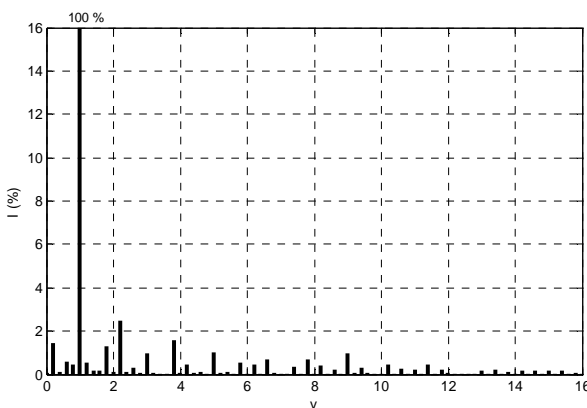


Рис. 10. Амплітудний спектр струму навантаження

Як наступний приклад розглянемо мінімізацію гармонійних спотворень для випадку, коли напруга на навантаженні відповідає осцилограмі, що наведена на рис. 11. Відповідний амплітудний спектр представлений на рис. 12. При цьому коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги  $K_U$  становить 8,31 %.

Згідно рис. 12 найбільші амплітуди мають дві гармонійні складові: вища гармоніка з відносною частотою  $\nu = 9$  і інтергармоніка з відносною частотою  $\nu = 7,8$ .

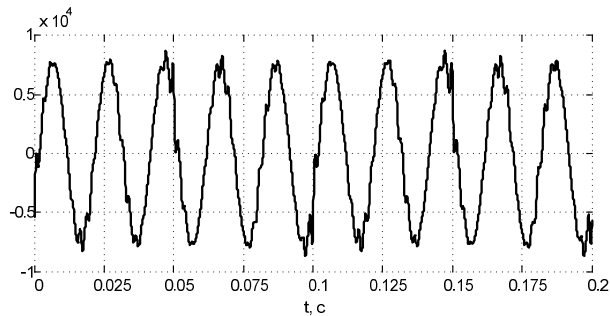


Рис. 11. Осцилограма напруги до встановлення фільтра

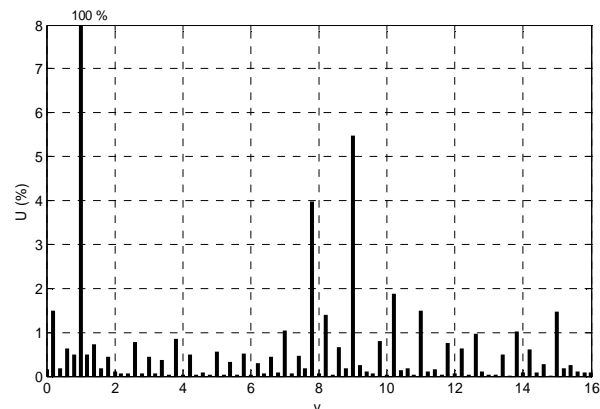


Рис. 12. Амплітудний спектр напруги до встановлення фільтра

Розглянемо три варіанти мінімізації гармонійних спотворень:

1) традиційне рішення – встановлення резонансного фільтра з настроюванням на частоту вищої гармоніки ( $\nu = 9$ );

2) встановлення двох резонансних фільтрів, що настроєні на частоти вищої гармоніки ( $\nu = 9$ ) і інтергармоніки ( $\nu = 7,8$ );

3) встановлення одного фільтра, що має дві частоти настроювання.

При цьому в першому й другому випадках, виходячи з виводу, зробленого в попередньому прикладі, будемо використовувати демпфувальні фільтри.

У табл. 2 наведені результати розрахунку коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги при різних значеннях потужності  $Q_\phi$  і добротності  $q$  розглянутих видів фільтрів.

Аналіз даних табл. 2 показує, що в розглянутому випадку найбільш ефективним і економічно вигідним (за рахунок меншої потужності й застосування одного пристрою) виявляється дворезонансний фільтр.

На рис. 13 наведений графік залежності коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги від добротності дворезонансного фільтра при потужності  $Q_\phi = 4,2$  Мвар. Із графіка випливає, що найкращою компенсальною здатністю, володіють фільтри з добротністю більше 15...30.

На рис. 14 наведений амплітудний спектр напруги після встановлення дворезонансного фільтра, налаштованого на частоти інтергармоніки ( $\nu = 7,8$ ) і вищої гармоніки ( $\nu = 9$ ) потужністю  $Q_{\phi} = 4,2$  Мвар і добротністю  $q = 50$ .

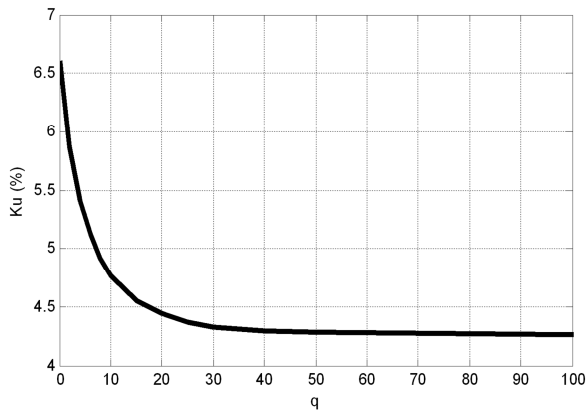


Рис. 13. Графік залежності коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги від добротності дворезонансного фільтра

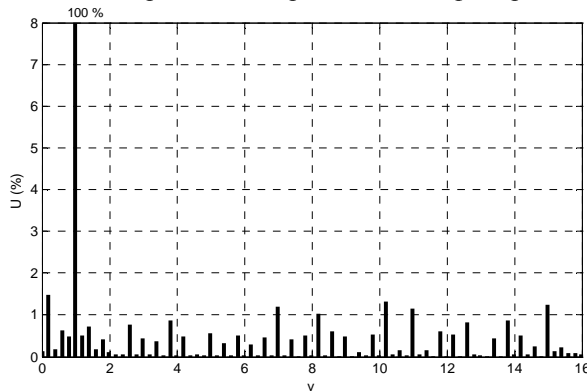


Рис. 14. Амплітудний спектр напруги після встановлення дворезонансного фільтра

На рис. 15 і 16 наведені амплітудні спектри струмів джерела і навантаження відповідно. При цьому коефіцієнт нелінійних спотворень по струму становить:  $\text{THD}_{L_{\text{source}}} = 13,97\%$ ;  $\text{THD}_{L_{\text{load}}} = 3,38\%$ .

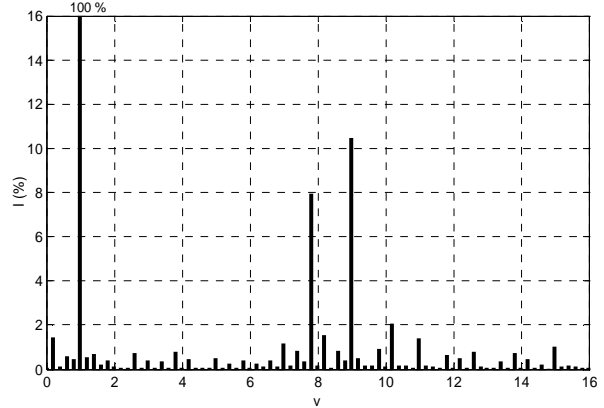


Рис. 15. Амплітудний спектр струму джерела

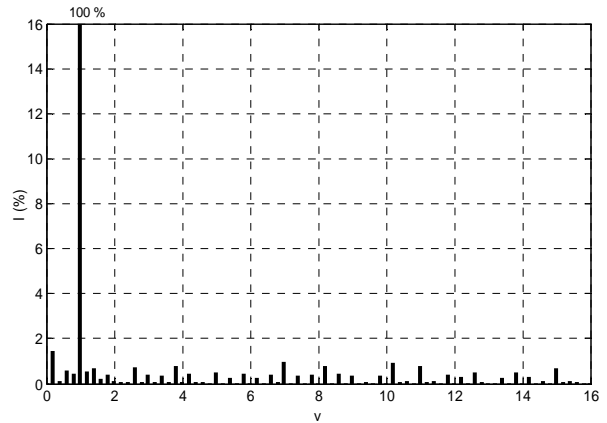


Рис. 16. Амплітудний спектр струму навантаження

Таблиця 2

**Значення коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги при різних значеннях потужності й добротності фільтрів**

$Q_{\phi}$ , вар	Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги $K_U$ , %, при добротностях фільтра:							
	$q = 2$	$q = 4$	$q = 6$	$q = 8$	$q = 10$	$q = 50$	$q = 100$	$q = 200$
Демпфувальний фільтр з настроюванням на частоту $\nu = 9$								
10000	5,94	5,07	4,83	4,76	4,74	4,91	4,96	4,99
Два демпфувальних фільтри, що настроєні на частоти $\nu = 7,8$ і $\nu = 9$								
$Q_{\phi 1} = 3200$ $Q_{\phi 2} = 3500$	6,52	5,64	5,22	4,95	4,75	4,02	3,99	3,99
Дворезонансний фільтр, що настроєний на частоти: $\nu = 7,8$ і $\nu = 9$								
4200	5,87	5,41	5,12	4,92	4,77	4,28	4,26	4,26

Аналіз двох розглянутих прикладів мінімізації дискретного гармонічного спектра, що містить інтергармоніки, дозволяє зробити наступні висновки:

– чим більше необхідна частота налаштування резонансного фільтра, тим менше його встановлена потужність (при однаковій компе-

нсувальній здатності), що пояснюється видом частотних характеристик модулів опорів фільтрів у різних зонах установки;

– при наявності в гармонійному спектрі досить близько розташованих гармонійних складових, що вносять найбільші спотворення в криві струмів (напруг), перевагу варто віддава-

ти встановленню дворезонансних фільтрів, тому що в цьому випадку потрібна найменша встановлена потужність фільтрів.

### Висновки

1. При наявності в амплітудному спектрі інтергармонік найбільш ефективними є демпфувальні фільтри.

2. Найкращою компенсувальною здатністю володіють фільтри з середньою добротністю більше 15.

3. При необхідності компенсувати декілька гармонік, перевагу варто віддавати встановленню дворезонансних фільтрів, тому що в цьому випадку потрібна найменша встановлена потужність фільтрів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 375 с.

2. Zhezhelenko, I. V. Centralized compensation of high harmonics in electrical networks [Текст] / I. V. Zhezhelenko, Y. L. Sayenko // Proc. 5<sup>th</sup> International Conference Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU'99). – Cracow (Poland), 1999. – P. 335-340.

3. Żeżelenko, I., Obniżenie poziomów interharmonicznych w sieciach elektroenergetycznych przedsiębiorstw przemysłowych [Текст] / I. Żeżelenko, J. Sajenko, T. Baranenko, B. Szewc // Przegląd Elektrotechniczny. – 2004. – № 6. – P. 632-635.

4. Жежеленко, И. В., Причины появления интергармоник, генерируемых непосредственными преобразователями частоты, и подход к их нормированию [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко // Вісник ПДТУ. – Маріуполь, 2004. – № 14. – С. 249-254.

5. Добрусин, Л. А. Широкополосные фильтрокомпенсирующие устройства для тиристорных преобразователей [Текст] / Л. А. Добрусин // Электричество. – 1985. – №4. – С. 43-47.

**Ключові слова:** інтергармоніки, електрична мережа, фільтрокомпенсуючий пристрій, частотна характеристика, добротність, амплітудний спектр.

**Ключевые слова:** интергармоники, электрическая сеть, фильтрокомпенсирующее устройство, частотная характеристика, добротность, амплитудный спектр.

**Keywords:** interharmonics, electric power network, filter-compensation device, frequency characteristic, quality factor, amplitude spectrum.