

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ**

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.005>**ЗАСТОСУВАННЯ ГІБРИДНИХ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ  
ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ  
В ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

**Д.О. Малахатка**, канд. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [d.malakhatka@gmail.com](mailto:d.malakhatka@gmail.com)

*Розглянуто аспекти застосування гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів для створення на їх основі локальних ділянок електропостачання, які використовують параметричні фільтри струмів нульової послідовності для створення штучної нейтралі в низьковольтній мережі з метою забезпечення комплексного дотримання показників якості напруги в місці підключення відповідальних електроприймачів. Створено імітаційну модель трифазної чотирипровідної мережі з локальними ділянками електропостачання, яка дає змогу оцінити показники якості напруги в разі підключення до неї нелінійних та несиметричних навантажень. Результати імітаційного моделювання підтвердили ефективність побудови локальних систем електропостачання на основі використання зазначених перетворювачів відповідно до норм діючих міжнародних стандартів з електромагнітної сумісності в місці підключення групи відповідальних електроприймачів. Бібл. 8, рис. 5.*

**Ключові слова:** електромагнітна сумісність, якість напруги, гібридний фільтрокомпенсуючий перетворювач, локальна система електропостачання, відповідальний електроприймач.

**Вступ.** Проблема забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) і нормованих показників якості напруги (ЯН) за гармоніками, несиметрією напруг та коливанням рівня напруги в сучасних розподільних мережах на сьогодні залишається актуальною. У зазначених мережах є велика кількість електроприймачів, що використовують однофазне приєднання до низьковольтної мережі та не повинні координувати добовий графік роботи між собою, внаслідок чого в таких мережах можуть виникати значні коливання в часі струмів навантаження за різними фазами, що спричиняє погіршення показників якості напруги електропостачання. Споживачі електроенергії в таких мережах широко використовують сучасне електронне обладнання, у тому числі частотні напівпровідникові перетворювачі для живлення електродвигунів змінного струму. Вони мають у своєму складі випрямлячі, форма споживаного струму яких суттєво відрізняється від синусоїди, внаслідок чого спотворюється форма напруги електропостачання, а показники якості електроенергії (ЯЕ) за гармоніками погіршуються [1]. Найбільш чутливі до дотримання показників якості напруги та електробезпеки електроприймачі, наприклад, устаткування лікарень потребують ефективних засобів забезпечення ЯЕ. Одним із підходів її забезпечення є підключення електроприймачів до локальних ділянок електропостачання (ЛДЕП) з відокремленням від основної мережі контуром для протікання струмів нульової послідовності основної та вищих частот, що дає змогу значно поліпшити якість електричної енергії та надійність електропостачання споживачів різного призначення.

Такі локальні системи електропостачання (ЛСЕП) забезпечують споживання електроенергії групою електроприймачів за допомогою електричних мереж низької напруги без зміни рівня напруги джерела електроенергії, від якого прокладаються фідери до житлових будинків і дрібних підприємств у межах населеного пункту, наприклад, до віддалених котеджних селищ, ремонтних і сільськогосподарських об'єктів та ін., зокрема, при використанні відновлюваних джерел енергії [2].

**Викладення основного матеріалу.** Створення ЛСЕП з високою якістю напруги може бути здійснене шляхом їх побудови на базі гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів (ГФКП), які виконані на основі використання фільтра струмів нульової послідовності (ФСНП) та напівпровідникових компенсуючих перетворювачів.

Трифазну чотирипровідну мережу, до якої підключено групу нелінійних навантажень, та побудовану на основі ГФКП локальну систему електропостачання, що містить у своєму складі групу відповідальних електроприймачів, наведено на рис. 1. ГФКП поєднує в собі функціональні можливості регульованого фільтросиметруючого пристрою (РФСП) на базі автотрансформатора зі з'єднанням обмоток у зигзаг та активного паралельного силового фільтра. РФСП дає змогу створити штучну нульову точку ( $0_2$ ) та здійснює ефективну фільтрацію непарних вищих гармонік, які кратні трьом, і параметричне усунення несиметрії та коливань напруги навантаження, зокрема нелінійного. За допомогою трифазного комутатора ступенів регулювання напруги (ключі К1-К12) РФСП забезпечує трирівневе симетричне регулювання рівнів напруги навантаження, тобто режими «вольтовіднімання», «номінал» та «вольтододавання». Додаткову компенсацію вищих гармонік струму в системі здійснює активний паралельний силовий фільтр (VT3-VT8) з «розщепленим конденсатором» (C1-C2) [3-6].

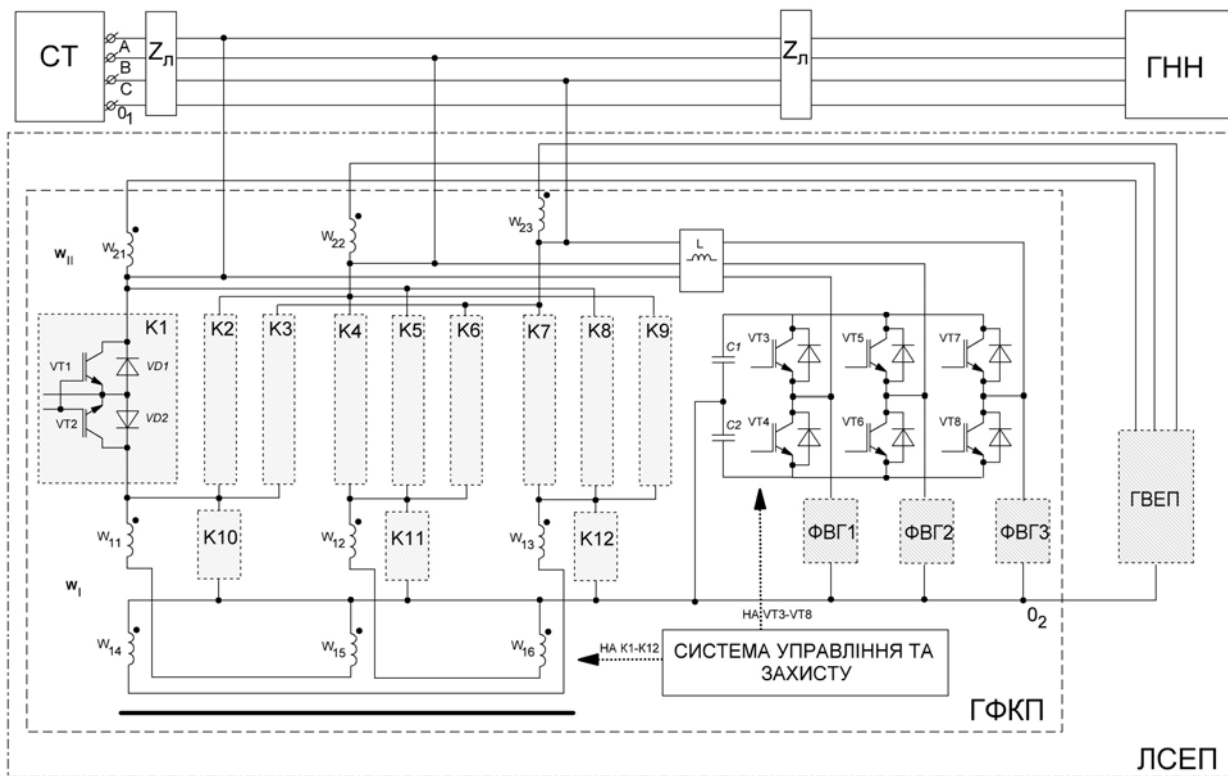


Рис. 1

Нульова точка «зірки» навантажень ГВЕП у локальній системі електропостачання підключена до штучної нульової точки ( $0_2$ ), яка в свою чергу підключена відповідно до загальної точки з'єднання конденсаторів C1-C2 активного фільтра та нульової точки РФСП.

На рис. 1 наведено такі основні позначення: СТ – силовий трансформатор; ГНН – група нелінійних навантажень; ГВЕП – група відповідальних електроприймачів; ЛСЕП – локальна система електропостачання; ФВГ1-ФВГ3 – фільтри вищих гармонік; L – трифазний дросель зв'язку; C1-C2 – конденсаторні батареї; К1-К12 – ключі змінного струму; W1 і WII – первинна та вторинна (вольтододаткова) обмотки зазначеного автотрансформатора.

Запропоновано імітаційну модель трифазної чотирипровідної розподільної мережі з відокремленою локальною ділянкою електропостачання, яка дає змогу оцінити показники якості напруги електропостачання в місці під'єднання відповідального навантаження при підключенні до мережі нелінійних та несиметричних навантажень (рис. 2). Основні парамет-

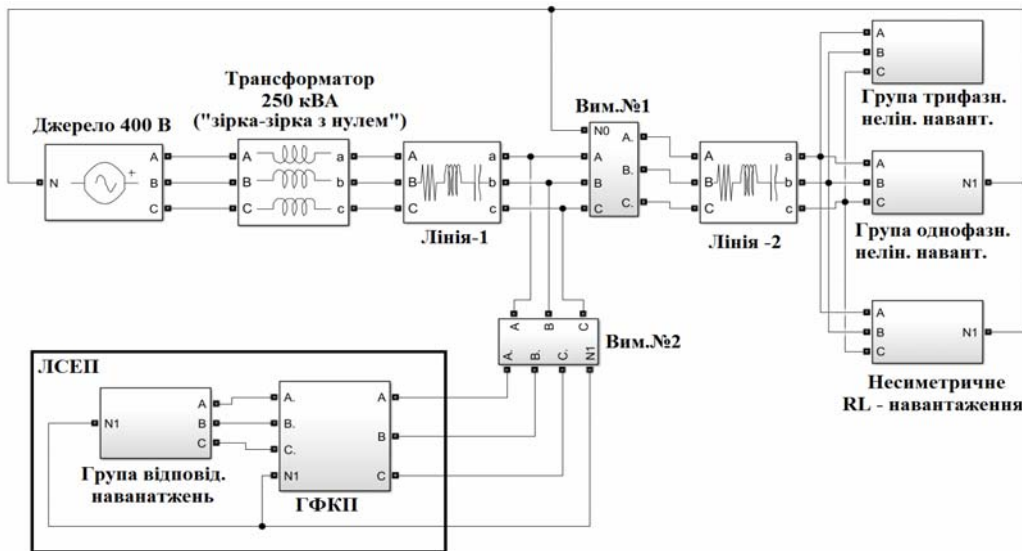


Рис. 2

ри блоків моделі трифазної чотирипровідної мережі наступні: силовий трансформатор зі з'єднанням обмоток «зірка-зірка з нулем» потужністю 250 кВА (параметри симетричних складових –  $R_{пр}=0,01$  Ом,  $L_{пр}=89 \cdot 10^{-6}$  Гн,  $R_{нул.}=0,0965$  Ом,  $L_{нул.}=748 \cdot 10^{-6}$  Гн); значення параметрів провідників «лінія 1» і «лінія 2» –  $R=0,0124$  Ом;  $L=19 \cdot 10^{-6}$  Гн; нульового проводу –  $R=0,025$  Ом;  $L=7,63 \cdot 10^{-6}$  Гн. Параметри навантаження, підключеного до основної мережі: несиметричне трифазне RL-навантаження ( $\cos\varphi=0,9$ ) потужністю 82,5 кВА; сумарна активна потужність навантаження однофазних випрямлячів  $P_{од.вип}=38,5$  кВт; сумарна активна потужність навантаження трифазних випрямлячів  $P_{тр.вип}=63$  кВт. Параметри відповідального навантаження: несиметричне трифазне RL-навантаження ( $\cos\varphi=0,9$ ) потужністю 22,5 кВА; сумарна активна потужність навантаження однофазних випрямлячів  $P_{од.вип}=14$  кВт; сумарна активна потужність навантаження трифазних випрямлячів  $P_{тр.вип}=21$  кВт.

Група однофазних навантажень представлена у вигляді декількох еквівалентних випрямлячів активною потужністю навантаження 3,5 кВт, симетрично приєднаних до трьох фаз мережі, а група трифазних навантажень – у вигляді певної кількості трифазних випрямлячів активною потужністю навантаження 10,5 кВт. У якості навантаження випрямлячів використовується блок джерела струму, що керується напругою. Це дає змогу отримати незмінне значення потужності нелінійного навантаження у випадку зміни напруги на вході випрямляча [1]. Кожна схема заміщення еквівалентного одно- та трифазного випрямляча містить у своєму складі пасивний коректор коефіцієнта потужності у вигляді 2,5 % дроселя змінного струму, завдяки якому рівень емісії гармонік струму знаходиться в межах, що визначені міжнародними стандартами з ЕМС [7, 8] стосовно сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень (СКГС).

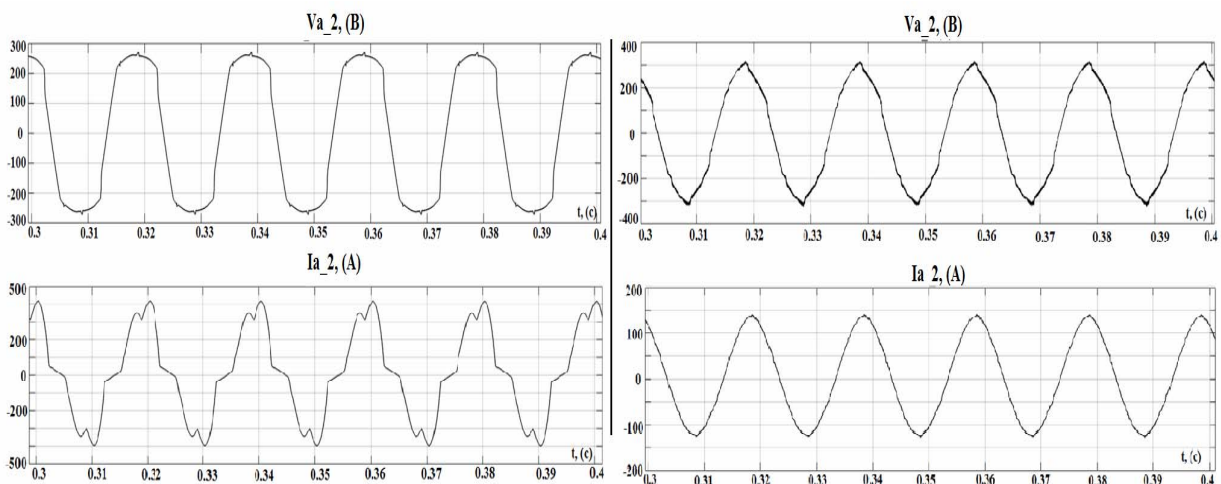


Рис. 3

На рис. 3 показано форму кривих напруг у фазі А в місці підключення відповідального навантаження (ліворуч – при безпосередньому підключенні ВН до мережі, а справа – при підключенні ВН до локальної системи електропостачання).

Гармонічний склад напруги у фазі А (Вим. № 2) у точці підключення відповідального навантаження до ЛСЕП, побудованої на основі ГФКП, показано на рис. 4.



Рис. 4

Результати імітаційного моделювання показали, що у випадку підключення ГВЕП безпосередньо до мережі СКГС за напругою становить 19,8 %, зокрема величина третьої гармоніки більш ніж у 2 рази перевищує визначену в ДСТУ EN 50160:2014 норму (не більше 5 %) та становить 16,3 %, а п'ятої гармоніки – 7,2 % (норма – 6 %) [7, 8].

Проте у випадку підключення відповідального навантаження до ЛСЕП, яку побудовано на базі гібридного фільтрокомпенсуючого перетворювача, СКГС за напругою, наприклад, у фазі А зменшується з 19,8 до 6,2 %, що нижче за встановлену в ДСТУ EN 50160:2014 норму у 8 %. Водночас величина третьої гармоніки зменшується більш ніж у 4 рази.

У результаті проведеного імітаційного моделювання електричної мережі з чотирма режимами нелінійного навантаження було розраховано показники якості напруги в місці підключення відповідального навантаження до мережі («Вим. № 2») у двох випадках. Перший –

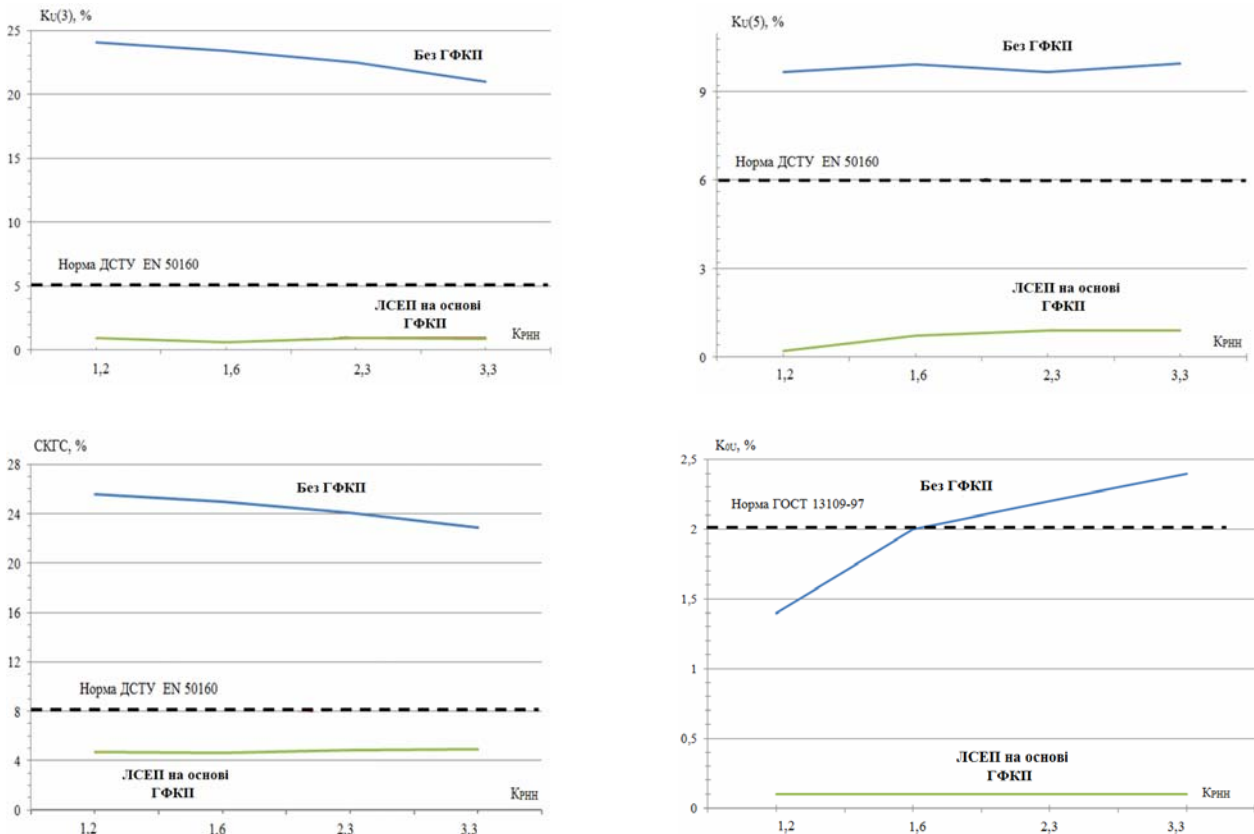


Рис. 5

при безпосередньому підключенні ВН до мережі, а другий – при підключенні ВН до локальної системи електропостачання. Отримано залежності зміни значення СКГС за напругою, третьої ( $K_U(3)$ ) та п'ятої ( $K_U(5)$ ) гармонік напруги, а також коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю ( $K_{0U}$ ) від зміни величини коефіцієнта розподілу нелінійного навантаження (рис. 5). Коефіцієнт розподілу нелінійного навантаження ( $K_{РНН}$ ) розраховується як відношення сумарної активної потужності трифазних випрямлячів ( $P_{\text{три.вип}}$ ) до сумарної активної потужності однофазних випрямлячів ( $P_{\text{од.вип}}$ ). У режимі 1 –  $P_{\text{три.вип}} = 105$  кВт,  $P_{\text{од.вип}} = 31,5$  кВт,  $K_{РНН} = 3,3$ ; у режимі 2 –  $P_{\text{три.вип}} = 94,5$  кВт,  $P_{\text{од.вип}} = 42$  кВт,  $K_{РНН} = 2,3$ ; у режимі 3 –  $P_{\text{три.вип}} = 84$  кВт,  $P_{\text{од.вип}} = 52,5$  кВт,  $K_{РНН} = 1,6$ ; у режимі 4 –  $P_{\text{три.вип}} = 73,5$  кВт,  $P_{\text{од.вип}} = 63$  кВт,  $K_{РНН} = 1,2$ .

Результати моделювання показали, що при комплексному забезпеченні ЯЕ в розподільній мережі зі значною кількістю, наприклад, електронного обладнання важливу роль має не тільки величина загальної потужності нелінійного навантаження, але й розподіл зазначеної потужності між обладнанням з однофазними та трифазними випрямлячами, що значно впливає на рівень домінуючих гармонік, а саме: третьої, п'ятої та сьомої.

**Висновки.** У результаті проведеного імітаційного моделювання та аналізу електромагнітних процесів у низьковольтній мережі з групами нелінійних навантажень у вигляді одно- та трифазних випрямлячів визначено, що при застосуванні ГФКП для створення локальної мережі для живлення відповідальних навантажень:

- значення СКГС за напругою, наприклад, у фазі А зменшується з 19,8 до 6,2 %, що суттєво нижче за встановлену в ДСТУ EN 50160:2014 норму, яка складає 8 %, та, зокрема, значення 3-ї гармоніки знижується більш ніж у 4 рази – з 16,6 до 3,5 %, а значення 5-ї гармоніки – з 7,4 до 2,7 %;
- зменшується значення коефіцієнта напруги за нульовою послідовністю з 3 до 0,8 %;
- забезпечується нормований рівень напруги у ЛСЕС у межах  $\pm 10$  % від її номінального значення.

*Фінансується за держбюджетною темою «Розвинути теорію та розробити заходи і технічні засоби забезпечення відповідно до міжнародних вимог електромагнітної сумісності та комплексного підвищення якості електроенергії в електричних мережах з нелінійними навантаженнями і джерелами розосередженої генерації» (шифр «Емісія-2»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 18.11.2014 р., протокол №16. Державний реєстраційний номер теми 0115U002608.*

1. Жаркін А.Ф., Палачов С.О., Шкляр Т.Б. Аналіз ефективності застосування пасивних фільтрових коригувальних пристроїв в низьковольтних електричних мережах України. *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2014. № 9 (128). С. 153–160.
2. Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Новський В.О., Малахатка Д.О. та ін. Забезпечення електромагнітної сумісності в локальних електричних мережах. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2018. Вип. 26. Т. 1. С. 174–183.
3. Малахатка Д.О. Силлові схеми гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів для трифазних систем з нелінійними та змінними навантаженнями. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 45. С. 92–101.
4. Herrera R.S., Salmeron P., Kim H. Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: Different approaches assessment and experimental results. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Jan. 2008. Vol. 55. No. 1. Pp. 184–196. DOI : <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.905959>
5. Samal S., Hota K., Barik K. Harmonics mitigation by using shunt active power filter under different load condition. *Signal Processing, Communication, Power and Embedded System*. 2016. Pp. 94–98. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCOPES.2016.7955598>
6. Tali M., Essadki A., Nasser N. Harmonic detection methods of Shunt Active Power Filter under unbalanced loads. *International Renewable and Sustainable Energy Conference*. 2016. Pp. 1017–1023. DOI: <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2016.7984003>
7. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. в Украине 01.01.2000 и действует в Украине (Межгосударственный стандарт стран СНГ). Киев: ИПК Изд-во стандартов, 1999.
8. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. Держспоживстандарт України. 2014. 27 с.



УДК 621.314

## ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОГО ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Д.А. Малахатка, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03037, Украина

*Рассмотрены аспекты применения гибридных фильтрокомпенсирующих преобразователей для создания на их основе локальных участков электроснабжения, которые используют параметрические фильтры токов нулевой последовательности для создания искусственной нейтрали в низковольтной сети с целью обеспечения комплексного соблюдения показателей качества напряжения в месте подключения ответственных электроприемников. Создана имитационная модель трехфазной четырехпроводной сети с локальными участками электроснабжения, которая позволяет оценить показатели качества напряжения при подключении к ней нелинейных и несимметричных нагрузок. Результаты имитационного моделирования подтвердили эффективность построения локальных систем электроснабжения на основе использования указанных преобразователей в соответствии с нормами действующих международных стандартов по электромагнитной совместимости в месте подключения группы ответственных электроприемников. Библи. 8, рис. 5.*

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, качество напряжения, гибридный фильтрокомпенсирующий преобразователь, локальная система электроснабжения, ответственный электроприёмник.

## APPLICATION OF A HYBRID FILTER-COMPENSATING CONVERTER FOR COMPLEX ENHANCEMENT OF THE VOLTAGE QUALITY IN THE LOCAL ELECTRIC POWER SYSTEM

D.O. Malakhatka

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

*The aspects of application of hybrid filter-compensating converters for creation on their basis of local sections of power supply, which use parametric filters of currents of zero sequence for creation of artificial neutral in a low-voltage network, in order to provide complex provision of voltage quality parameters at the connection of responsible electric receivers are considered. A simulation model of a three-phase four-wire network with local power supply sites has been created, which allows to estimate the voltage quality parameters when connecting nonlinear and asymmetric loads to it. The simulation results confirmed the efficiency of creating local power systems based on the use of these converters in accordance with the standards of the current international standards for electromagnetic compatibility at the point of connection of a group of responsible electric receivers. References 8, figures 5.*

**Key words:** electromagnetic compatibility, voltage quality, hybrid filter-compensating converter, local power supply system, responsible electric receiver.

1. Zharkin A.F., Palachov S.O., Shkliar T.B. The analysis of the efficiency of the use of passive filter correction devices in the low-voltage electrical networks of Ukraine. *Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit*. 2014. No 9 (128). Pp. 153–160.
2. Shydlovskiy A.K., Zharkin A.F., Novskiy V.O., Malakhatka D.O. ta in. Providing of electromagnetic compatibility in local electrical networks. *Visnyk NTU KhPI*. 2018. No 26. Vol. 1. Pp. 174–183.
3. Malakhatka D.O. Power schemes of hybrid filter-compensating converters which used in three-phase systems with nonlinear and nonsymmetrical loads. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2016. No 45. Pp. 92–101.
4. Herrera R.S., Salmeron P., Kim H. Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: Different approaches assessment and experimental results. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Jan. 2008. Vol. 55. No 1. Pp. 184–196. DOI : <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.905959>
5. Samal S., Hota K., Barik K. Harmonics mitigation by using shunt active power filter under different load condition. *Signal Processing, Communication, Power and Embedded System*. 2016. Pp. 94–98. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCOPES.2016.7955598>
6. Tali M., Essadki A., Nasser N. Harmonic detection methods of Shunt Active Power Filter under unbalanced loads. *International Renewable and Sustainable Energy Conference*. 2016. Pp. 1017–1023. DOI: <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2016.7984003>
7. GOST 13109-97. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tehnikeskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obschego naznacheniya. Vved. v Ukraine 01.01.2000. (Mezhgosudarstvennyiy standart stran SNG). Kyiv: IPK Izd-vo standartov, 1999.
8. DSTU EN 50160:2014. Characteristics of power supply voltage in general purpose electrical networks. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. 2014.

Надійшла: 16.10.2019

Received: 16.10.2019