

БУРКОВСЬКИЙ ЯРОСЛАВ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0003-0633-1911>e-mail: yaroslav0590@gmail.com**ЗІНЬКОВСЬКИЙ ЮРІЙ**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0003-4234-3549>e-mail: yuzin@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖЕВОГО КОРЕКТОРА КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ (PFC) З ВИКОРИСТАННЯМ НАПІВПРОВІДНИКІВ З ШИРОКОЮ ЗАБОРОНЕНОЮ ЗОНОЮ

В роботі наведено результати дослідження та комп'ютерного моделювання мережевого коректора коефіцієнта потужності (PFC, Power Factor Corrector), де в якості основного ключа та випрямляючого діода були використані елементи, які виконані на основі напівпровідників з широкою забороненою зоною — карбїду кремнію (SiC) та нітриду галію (GaN). Дане технічне рішення дозволило значно зменшити статичні та динамічні втрати в силових елементах підвищити робочу частоту коректора, зменшити масо-габаритні показники та загальне тепловиділення. В ході роботи було проаналізовані останні дослідження в області створення мережевих коректорів коефіцієнта потужності.

В процесі дослідження була запропонована нова методика моделювання PFC на основі напівпровідників з широкою забороненою зоною у середовищі схематехнічного SPICE-симулятора LTSpice XVII, були отримані графіки струмів та напруг, а також результати основних втрат та робочих температур в силових елементах коректора. Крім того, було отримано спектр вхідного струму коректора а також проаналізовано його відповідність стандарту IEEE 519-2022. По результатам комп'ютерного моделювання було створено фізичний прототип, який потребує проведення додаткових досліджень.

Ключові слова: коректор коефіцієнту потужності, PFC, нітрид галію, GaN карбід кремнію, SiC, SPICE, LTSpice XVII.

BURKOVSKIY YAROSLAV, ZINKOVSKIY YURIY

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

A SIMULATION ANALYSIS OF WIDE BANDGAP SEMICONDUCTOR - BASED POWER FACTOR CORRECTOR (PFC)

This paper details the progressive findings from comprehensive research and computer-based simulations centered on enhancing grid power factor correctors (PFCs). The study particularly focuses on the integration of semiconductors constructed from a wide band-gap materials, namely silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN). The utilization of these sophisticated materials is a game-changer in the performance of modern power converters. They play a significant role in substantially reducing the static and dynamic energy losses.

Additionally, these improvements lead to an increase in the frequency at which the corrector operates. This enhancement is not just about efficiency; it also contributes to the practical aspects of the device. There is a noteworthy reduction in the PFC's size and weight, making the units more compact and manageable. One of the standout benefits is the decreased heat generation, which is crucial in maintaining the longevity and reliability of the device.

A comprehensive review and analysis of modern studies focusing on power factor correction technology were undertaken, forming the foundation for the research. Subsequently, a novel simulation methodology for PFCs was introduced, executed within the LTSpice XVII schematic SPICE simulator environment. The simulation yielded data visualized through current and voltage graphs and component temperatures, highlighting main power losses within the PFC's components. Furthermore, the research produced the input current spectrum of the corrector, verifying its adherence to the stringent IEEE 519-2022 global standard.

One of the key outcomes of these computer-based simulations was the creation of a physical prototype. This real-world model serves as a bridge between theoretical strategies and practical solutions, providing a basis for additional experimentation.

Keywords: Power Factor Corrector (PFC), Gallium Nitride (GaN), Silicon Carbide (SiC), SPICE simulation, LTSpice XVII, Wide Band-gap Semiconductors.

Постановка проблеми

Розробка компактних та високоефективних пристроїв для перетворення енергії набуває вирішального значення в контексті сучасної електроніки, особливо з урахуванням неперервного посилення критеріїв, які пред'являються до систем подібного роду та електромереж загалом [1]. Серед ключових вимог, які актуалізують цю потребу, є строгі обмеження, пов'язані із спотворенням форми вхідного струму та коефіцієнтом потужності навантаження (PF). Ці аспекти детально висвітлені в міжнародному стандарті IEEE 519-2022 [2].

Проблема полягає в тому, що висока кількість гармонік у вхідному струмі може призвести до значного зниження коефіцієнта потужності, підвищених втрат енергії та серйозних спотворень напруги в електричній мережі. У відповідь на це, одним із перспективних рішень, яке набирає популярність, є застосування активних коректорів коефіцієнта потужності. Особливий інтерес представляють системи, що базуються на топології boost-конвертера.

Такий тип перетворювача відрізняється здатністю забезпечувати синусоїдальну форму струму вхідного сигналу, що споживається з електромережі, водночас підтримуючи стабільну постійну вихідну

напругу для подальшого безперебійного живлення інших модулів системи. Це не тільки сприяє оптимізації коефіцієнту потужності та ефективності системи загалом, але й суттєво знижує потенційні ризики, пов'язані з електромагнітними завадами та нестабільністю роботи електрообладнання.

В контексті цих викликів, широкозонні напівпровідники, такі як нітрид галію та карбід кремнію, відкривають нові можливості для покращення ефективності систем корекції коефіцієнта потужності. Основні переваги цих матеріалів полягають у високій електропровідності, низькому тепловому опорі, зменшенні статичних та динамічних втрат та високій температурній стабільності, що робить їх ідеальними для використання в сучасних високочастотних перетворювачах.

Застосування GaN та SiC у PFC може значно підвищити ефективність перетворення енергії, зокрема завдяки зниженню теплових втрат, що, в свою чергу, сприяє зменшенню розмірів та ваги перетворювачів та їх охолоджувальних систем. Крім того, широкозонні напівпровідники мають вищу швидкість перемикання, що дозволяє значно знизити загальну вартість систем (за рахунок використання пасивних елементів менших номіналів), одночасно знижуючи гармонічні спотворення та поліпшуючи коефіцієнт потужності.

Метою даної роботи є аналіз застосування широкозонних напівпровідників у коректорах коефіцієнту потужності, створення методики комп'ютерного моделювання такого коректора а також оцінка статичних та динамічних втрат в силових елементах.

Аналіз останніх джерел

Аналізуючи сучасні дослідження у сфері застосування широкозонних напівпровідників у коректорах коефіцієнту потужності, можна спостерігати активне зростання інтересу дослідників до цієї актуальної теми.

У дослідженні [3] Gaeid та ін. (2022) провели глибоке дослідження щодо можливостей застосування GaN транзисторів у безмостових totem-pole PFC великої потужності. Використання GaN транзисторів у комбінації з цифровою системою керування дозволило значно підвищити ефективність перетворювача. Це стало можливим завдяки нульовим втратам на зворотне відновлення та зниженню статичних та динамічних втратах у GaN транзисторах. Експериментальні результати підтвердили максимальну ефективність 98,9% під час роботи на навантаження 2,4 кВт і 98,6% під час роботи на повне навантаження (3 кВт). Мінімальні повні гармонічні спотворення (THD) вхідного струму склали 2,78% при номінальному струмі (13 А). Тест проводився під час перетворення 230 В змінної вхідної напруги у 400 В постійної, стабілізованої вихідної напруги.

У публікації [4] Song і Li (2023) опублікували схоже дослідження, порівнюючи роботу коректорів коефіцієнту потужності у двох основних режимах — режимі безперервної провідності (CCM) і режимі критичної провідності (CRM). Їх результати свідчать про перевагу роботи у режимі CRM, який, демонструє вищу ефективність, хоч і нижчий PF. Ці висновки особливо цінні для систем живлення датацентрів, де додаткове тепловиділення та енергоспоживання призводить до значного зростання вартості утримання.

Розширюючи реалізації можливих топологій PFC, у дослідженні [5] Deng і Ma (2022) представили новий чотирирівневий гібридний totem-pole PFC. Ця топологія дозволяє зменшити напругу на транзисторах та вхідну індуктивність. Ця рішення стало можливим саме завдяки використанню GaN транзисторів, що дозволило збільшити ККД, але підвищило складність керування таким перетворювачем.

В результаті аналізу останніх джерел можна прийти до висновку щодо актуальності поставленої мети роботи, так як спостерігається значний інтерес щодо аналізу можливостей широкозонних напівпровідників у коректорах коефіцієнту потужності, одночасно зі зростанням міжнародних вимог щодо якості струму в мережі та зниженням допустимих рівнів електромагнітних завад.

Виклад основного матеріалу

На Рис.1 представлено базову схему випрямляча на основі діодного моста (D1-D4), сгладжуючого конденсатора (C1) і навантаження (R1 = 300 Ом). Подібне рішення часто використовується у мережевих імпульсних джерелах живлення.

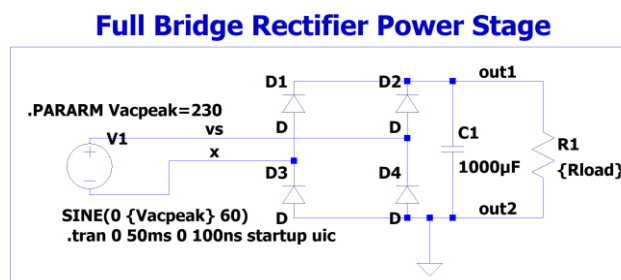


Рис. 1. Базова схема випрямляча

Якщо проаналізувати вхідний струм такого випрямляча (Рис. 2), можна помітити значне відхилення від синусоїдальної форми сигналу. Струм споживання з мережі досягає пікових значень в 19 А при середньквадратичному значенні струму навантаження 0.75 А. Розрахунковий PF в даному випадку склав 0.31, що значно менше допустимого діапазону 0.8-1.

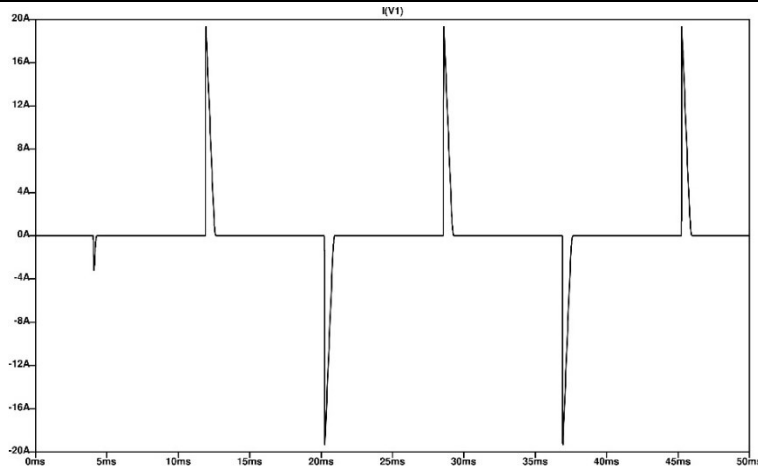


Рис. 2. Вхідний струм випрямляча

На Рис. 3 зображено запропоновану модель PFC у середовищі LTSpice XVII. Розглянемо більш детально її складові та принцип дії.

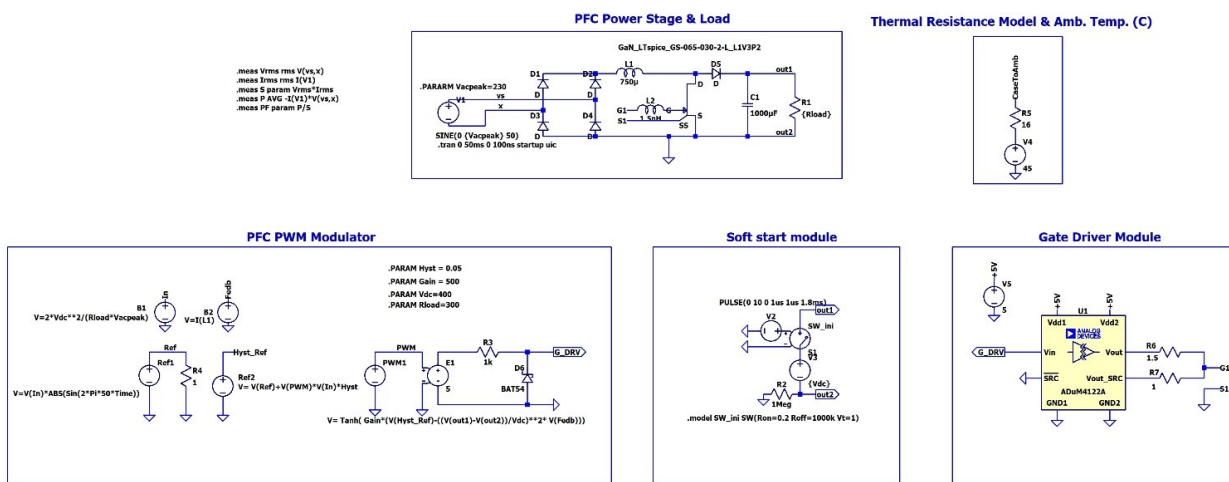


Рис. 3. Запропонована модель PFC

GaN транзистор GS-065-030 керується ШИМ-контролером (PFC PWM modulator), який генерує ШИМ-сигнал таким чином, що транзистор включений при струмі в дроселі L1 нижче заданого опорного значення і вимкнений при перевищенні опорного значення струму (з урахуванням гістерезису). Завдяки роботі в ключовому режимі, забезпечується висока ефективність роботи, оскільки транзистор чергує два стани з низькими втратами (повністю увімкнено — лише втрати провідності; повністю вимкнено – нульовий струм через транзистор). Опорний сигнал у вигляді випрямленої синусоїди забезпечується джерелом напруги Ref1. Ref2 додає або віднімає компонент гістерезису 0,05 (5%). Джерело PWM1 порівнює цю модифіковану еталонну хвилю з фактичним рівнем струму в індукторі Boost і генерує сигнал перемикання ШИМ. Джерело напруги E1 підвищує вихідну напругу від джерела PWM1 з 1 В до 5 В. Коректний запуск симуляції забезпечує модуль плавного старту (Soft start module). Даний модуль забезпечує попередній заряд вихідної ємності до напруги 400В, після чого він відключається від PFC і не впливає на подальше моделювання. Драйвер ADuM4122A забезпечує необхідний струм і рівні напруги для управління GaN транзистором (Gate Driver Module). Джерело V4 та резистор R5 забезпечують температурне моделювання GaN транзистора (Thermal Resistance Model & Amb. Temp (C)). В даному випадку моделювання проводиться при температурі 45 °C та температурним опором case-to-ambient 16 °C /W (припускається встановлення на друковану плату с радіатором, описаним в [6]). В якості навантаження виступає резистор R1 з опором 300 Ом. Як основний діод boost-перетворювача був використаний C6D10065A на основі широкозонного напівпровідника — карбіду кремнію. Данні діоди не мають втрат зворотнього відновлення, що дозволяє підвищити ефективність PFC.

Отримані графічні результати моделювання PFC наведені на рис. 4, а результати розрахунку втрат — в таблиці 1.

На Рис. 4 (а) зображено результати моделювання струму та напруги на вході PFC. Можна побачити що вони мають синусоїдальну форму, а також не мають фазового зсуву відносно одне одного. Розрахунковий PF при цьому склав 0.99, що свідчить про коректну роботу моделі PFC. Напруга на виході коректора при цьому складає 400 В ± 4В (Рис. 4 (б)).

Для розрахунку ККД були використані результати моделювання втрат у основних силових

елементах перетворювача, а саме вхідному діодному мосту D1-D4, індукторі L1, діоді перетворювача C6D10065A, GaN транзисторі GS-065-030 та конденсаторі C1. Результати були зведені у таблицю 1.

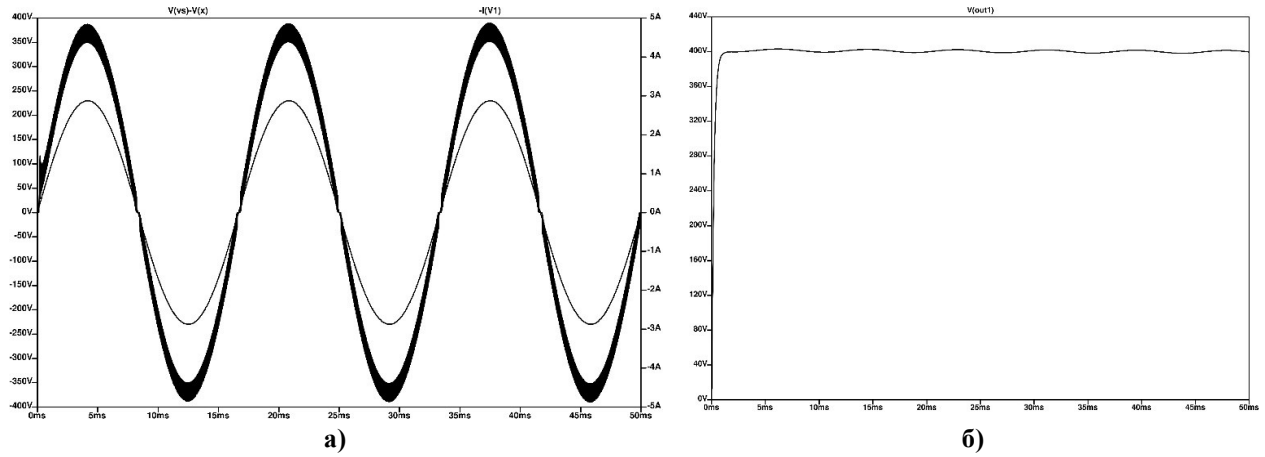


Рис. 4. Результати моделювання PFC: а) – напруга та струм на вході; б) – напруга на виході

Таблиця 1

Втрати в основних компонентах перетворювача

Компонент	Втрати по результатам моделювання, Вт
Діодний міст D1-D4	4.7 Вт
Індуктор L1	0.8 Вт
Діод перетворювача C6D10065A	2.8 Вт
Транзистор GS-065-030	2.6 Вт
Конденсатор C1	0.4 Вт
Всього втрат:	11.3 Вт

Розрахуємо орієнтовний ККД перетворювача, використавши формулу (1):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \cdot 100\% \tag{1}$$

де η – ККД перетворювача, P_{out} – вихідна потужність, P_{loss} – загальні втрати.

У даному випадку при номінальному навантаженні 530 Вт, розрахунковий ККД склав 98%.

Розрахуємо температуру кристалу GaN транзистора при змодельованому тепловиділенні, скориставшись формулою (2):

$$T_j = T_a + P_{tot} \cdot (\theta_{ca} + \theta_{jc}) \tag{2}$$

де T_j – температура кристалу, T_a – температура навколишньої середовища, P_{tot} – загальні втрати у транзисторі, θ_{ca} – тепловий опір між корпусом транзистора та навколишньою середовищем, θ_{jc} – тепловий опір між кристалом та корпусом транзистора.

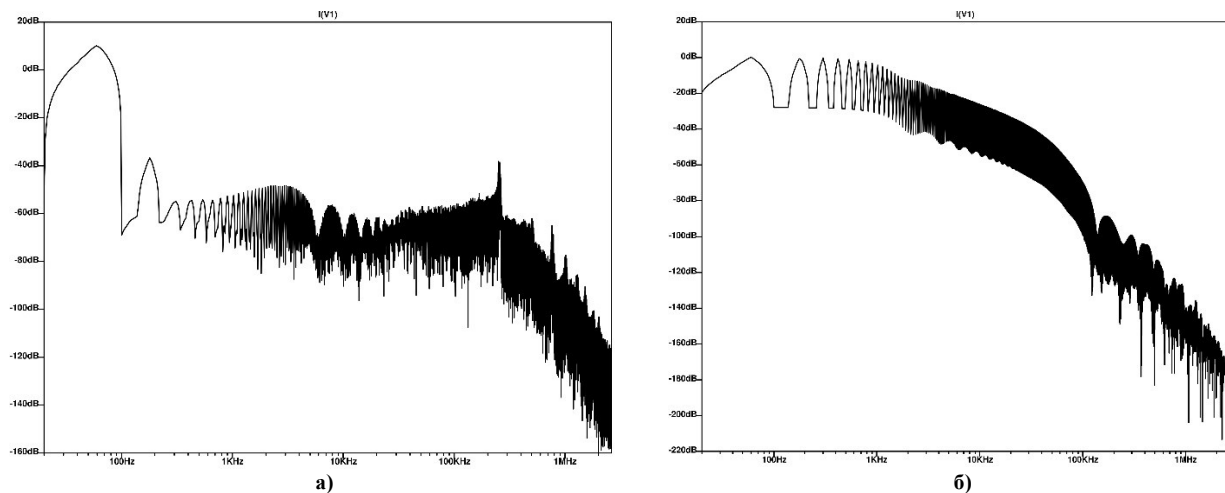


Рис. 4. Результати моделювання спектрів струму споживання з мережі: а) PFC; б) – базовий випрямляч

При температурі навколишньої середовища 45 °C і тепловиділенні 2.6 Вт, тепловому опору між кристалом та корпусом транзистора 0.5 °C/Вт та 16 °C/Вт теплового опору між корпусом транзистора та

навколишньою середою, розрахункова температура кристалу складала $88\text{ }^{\circ}\text{C}$, що значно нижче максимально допустимої температури в $150\text{ }^{\circ}\text{C}$

При порівнянні спектрів струму споживання з мережі Рис. 6 (а), (б) у PFC (Рис. 3) та базового випрямляча (Рис. 2) можна побачити значне (40 Дб та більше) зниження рівня завад, викликаних спотвореннями вхідного струму споживання, що відповідає вимогам стандарту IEEE 519-2022. Усі значення розраховані відносно рівня струму 1 А.

За результатами моделювання було створено прототип PFC з використанням напівпровідників з широкою забороненою зоною (карбід кремнію та нітрид галію) (Рис. 6). На даному етапі отриманий прототип потребує додаткового експериментального дослідження, результати якого плануються до публікації у наступних роботах.



Рис. 6. Реалізований прототип PFC

Висновки

В процесі дослідження була запропонована нова методика моделювання PFC на основі широкозонних напівпровідників у середовищі схемотехнічного SPICE-симулятора LTSpice XVII. В ході роботи було підтверджено працездатність запропонованої моделі в умовах аналізу коректорів коефіцієнта потужності з використанням напівпровідників з широкою забороненою зоною. Були отримані графіки струмів та напруг, а також проведено розрахунок основних втрат в силових елементах коректора вихідною потужністю 530 Вт. Крім того, було отримано спектр вхідного струму коректора і базового випрямляча та підтверджено значне (40 Дб та більше) зниження рівня завад, викликаних спотвореннями вхідного струму споживання при застосуванні PFC. За результатами моделювання орієнтовний ККД склав 98%, а загальні втрати не перевищили 12 Вт. Розрахункова температура кристалу GaN транзистора складала $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температурі навколишньої середовища $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, тепловиділенні 2.6 Вт, сумарному тепловому опору $16.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Цей показник значно нижче максимально допустимої температури в $150\text{ }^{\circ}\text{C}$

По результатам комп'ютерного моделювання було створено фізичний прототип коректора, який потребує проведення додаткових досліджень, результати яких плануються до публікації у наступних роботах.

Література

1. Лежнюк П. Використання активних споживачів для балансування електроенергії в електричній мережі / П. Лежнюк, О. Козачук, О. Галузінський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2023. – № 3 (321). – С. 214–221.
2. IEEE 519-2022. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. Replaces IEEE 519-2014; effective from 2022-08-05. Official edition. Piscataway, NJ: IEEE, 2022. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/519/10677/>.
3. Digitally Controlled Bridgeless Totem-Pole Power Factor Corrector / K. Gaeid et al. Tikrit Journal of Engineering Sciences. 2022. Vol. 29, no. 3. P. 91–101. URL: <https://doi.org/10.25130/tjes.29.3.10.4>.
4. Song C., Li H. Evaluation of Efficiency and Power Factor in 3-kW GaN-Based CCM/CRM Totem-Pole PFC Converters for Data Center Application. 2023 11th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2023 - ECCE Asia), Jeju Island, Korea, Republic of, 22–25 May 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.23919/icpe2023-ecceasia54778.2023.10213469>.
5. Deng H., Ma H. A New Four-level Hybrid-Clamped Multilevel GaN Totem-Pole PFC. 2022 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), Guangzhou, Guangdong, China, 4–7 November 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/peac56338.2022.9959733>.
6. FK 283. Kühlkörper, Gehäuse und Steckverbinder vom Hersteller – Wie Aluminiumgehäuse und Steckverbindungen. URL: <http://bit.ly/FK283-fischerelektronik>

References

1. Lezhniuk P. Vykorystannia aktyvnykh spozhyvachiv dlia balansuvannia elektroenerhii v elektrychnii merezhi / P. Lezhniuk, O. Kozachuk, O. Haluzynskiy // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical

sciences. – 2023. – № 3 (321). – S. 214–221

2. IEEE 519-2022. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. Replaces IEEE 519-2014; effective from 2022-08-05. Official edition. Piscataway, NJ: IEEE, 2022. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/519/10677/>.

3. Digitally Controlled Bridgeless Totem-Pole Power Factor Corrector / K. Gaeid et al. Tikrit Journal of Engineering Sciences. 2022. Vol. 29, no. 3. P. 91–101. URL: <https://doi.org/10.25130/tjes.29.3.10.4>.

4. Song C., Li H. Evaluation of Efficiency and Power Factor in 3-kW GaN-Based CCM/CRM Totem-Pole PFC Converters for Data Center Application. 2023 11th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2023 - ECCE Asia), Jeju Island, Korea, Republic of, 22–25 May 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.23919/icpe2023-ecceasia54778.2023.10213469>.

5. Deng H., Ma H. A New Four-level Hybrid-Clamped Multilevel GaN Totem-Pole PFC. 2022 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), Guangzhou, Guangdong, China, 4–7 November 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/peac56338.2022.9959733>.

6. FK 283. Kühlkörper, Gehäuse und Steckverbinder vom Hersteller – Wie Aluminiumgehäuse und Steckverbindungen. URL: <http://bit.ly/FK283-fischerelektronik>