

УДК 621.314

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2024.4\(497\).17](https://doi.org/10.15589/znп2024.4(497).17)**IMPROVING THE VOLTAGE QUALITY OF A CONSTANT VOLTAGE
(CURRENT) SOURCE WITH INTERMEDIATE FREQUENCY CONVERSION****ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ НАПРУГИ ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ
(СТРУМУ) З ПРОМІЖНИМ ПЕРЕТВОРЕННЯМ ЧАСТОТИ****Volodymyr M. Ryabenkiy¹**

opttron2@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5441-3140

Larysa V. Solobuto¹

larisa.solobuto@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4084-6006

Mykola T. Fisun²

ntfis@chmnu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-8026-8861

В. М. Рябенський¹,

д-р техн. наук, професор

Л. В. Солобута¹,

канд. техн. наук, доцент

М. Т. Фісун²,

д-р техн. наук, професор

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*²*Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv*¹*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*²*Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв*

Abstract. *Purpose of the article.* Development of a theoretical justification for the stable operation of a circuit solution for improving the voltage quality of a constant voltage (current) source with intermediate frequency conversion, which allows reducing the ripple of the three largest harmonics. Development of a rectifier circuit, the smoothing filters of which allow obtaining a significant reduction in ripple. Additional devices should not significantly increase the power of the entire device. *Method.* During the study, methods were used to calculate the rectified voltage and calculate the amplitude of harmonics, calculate the dimensions of the filters, calculate the required number of inverters, calculate the power of additional inverters. An economic justification of the proposed method was performed: the power of additional inverters does not significantly increase the total power of the device; the device can be used with a load of any power, since the current does not depend on the load. *Results.* A method for smoothing the ripple of the rectified voltage using inverters present on the three highest harmonics was developed. The power of the auxiliary inverter is a third of the power of the smoothing filter. LC circuits are created, the output current of which does not depend on the load, which allows the use of loads of any power. It has been proven that it is sufficient to install inverters only on three fundamental harmonics, which significantly reduces the ripple coefficient. The dimensions of the filters have been reduced by half. *Scientific novelty.* A comprehensive method of rectifying alternating voltage with frequency converters for three fundamental harmonics has been proposed. The schematic solution allows you to obtain a rectifier with additional inverters, but without significantly increasing the total power of the device. *Practical importance.* The proposed method allows you to obtain high-quality voltage on a load of any power. The power of auxiliary devices does not significantly increase the power of the entire device. The ripple coefficient of the rectifier is significantly reduced due to the use of inverters on the three largest harmonics.

Key words: inverter; harmonic; direct current; frequency converter, filter; pulsations; load.

Анотація. *Мета статті.* Розробка теоретичного обґрунтування стійкої роботи схемного рішення для підвищення якості напруги джерела постійної напруги (струму) з проміжним перетворюванням частоти, що дозволяє зменшити пульсації трьох найбільших гармонік. Розробка схеми випрямляча, згладжувальні фільтри якого дозволяють отримати значне зменшення пульсації. Додаткові пристрої не повинні значно збільшувати потужність всього пристрою. *Методика.* Під час виконання дослідження використовувались методи розрахунку випрямленої напруги та розрахунок амплітуди гармонік, розрахунки габаритів фільтрів, розрахунки необхідної кількості інверторів, розрахунки потужності додаткових інверторів. Виконано економічне обґрунтування запропонованого метода: потужність додаткових інверторів не дає значного підвищення загальної потужності пристрою; пристрій можна використовувати з навантаженням будь-якої потужності, оскільки струм не зале-

жить від навантаження. *Результати.* Розроблено метод згладжування пульсацій випрямленої напруги за допомогою інверторів, що присутні на трьох вищих гармоніках. Потужність допоміжного інвертора складає третину потужності складуючого фільтра. Створюються LC-кола, на виході яких струм не залежить від навантаження, що дозволяє використовувати навантаження будь-якої потужності. Доведено, що інвертори достатньо встановлювати тільки на три основні гармоніки, це дає значне зменшення коефіцієнту пульсації. Габарити фільтрів зменшені в два рази. *Наукова новизна.* Запропоновано комплексний метод випрямлення змінної напруги з перетворювачами частоти для трьох основних гармонік. Схемне рішення дозволяє отримати випрямляч з додатковими інверторами, але без значного підвищення загальної потужності пристрою. *Практична значимість.* Запропонований метод дозволяє отримувати якісну напругу на навантаженні будь-якої потужності. Потужність допоміжних пристроїв не дає значного підвищення потужності всього пристрою. Коефіцієнт пульсацій випрямляча значно зменшується, завдяки використанню інверторів на трьох найбільших гармоніках.

Ключові слова: інвертор; гармоніка; постійний струм; перетворювач частоти, фільтр, пульсації; навантаження.

ВСТУП

Всі електронні пристрої споживають постійну напругу, тому процес перетворення змінної напруги та струму в постійну напругу і струм використовується досить часто, отже перетворення повинно бути достатньої якості та економічним.

В умовах значного підвищення вартості електроенергії, підвищення коефіцієнта ефективності перетворення стає суттєвою складовою при виборі того чи іншого рішення.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Задача розробки складається з вибору схемного рішення та теоретичного обґрунтування стійкої роботи схеми за умови забезпечення високої якості напруги джерела постійної напруги (струму) з проміжним перетворюванням частоти.

АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ

При випрямленні змінної напруги на виході випрямляча присутня пульсуюча напруга, що складається з постійної та змінної складової. Якість такої напруги оцінюється коефіцієнтом пульсації, що визначається середнім значенням випрямленої напруги та амплітудою основної (найбільшої) гармоніки.

Оскільки змінна складова містить гармоніки різних частот, на навантаженні присутній змінний струм, що негативно впливає на електронні пристрої.

Таким чином виникає необхідність зменшити пульсації найбільш оптимальним способом, а також, схемне рішення повинно бути ефективним з економічної точки зору.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для зменшення пульсацій вихідної напруги дослідниками [1, с. 4037] була запропонована стратегія управління, що дозволяє зменшити загальне гармонічне спотворення (THD) вихідної напруги інвертора. Фізична інтерпретація стратегії полягає в підключенні к виходу шунтуючих резонансних фільтрів на частотах гармонік таким чином, щоб складові гармонічного струму не проходили через інвертор. В результаті напруга THD підтримується на низькому

рівні навіть при підключенні нелінійного навантаження. Отримано достатню умову, що гарантує стабільність системи.

При наявності декількох випрямляючих модулів, структура керування, що заснована на методі *droop*, забезпечує автономну роботу кожного випрямляючого модуля. Модулі підключаються паралельно. Запропонована стратегія керування дозволяє отримати високу продуктивність і якість регулювання [2, с. 726].

Для захисту інформації використовуються регульовані фільтри із змінними параметрами в складі системи перетворення електроенергії для живлення мікропроцесорної системи. Мікропроцесорна система підключається до вторинного напівпровідникового джерела живлення через регульований фільтр з маскуванням струму споживання [3, с. 101].

Якщо система дуже чутлива до змін навантаження, то коливання напруги на шині може викликати перекид фаз, але при додаванні накопичувача енергії до статичного синхронного компенсатора (StatCom) можна компенсувати зміну потужності. В роботі [4, с. 66] представлено декілька схем компенсації.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Для забезпечення надійної роботи споживачів енергії постійного струму використовуються різноманітні схеми перетворення, але більшість схем або не забезпечують потрібну якість випрямленого струму або є складними в проектуванні та обслуговуванні, або не призначені для потужного навантаження.

Тому розробка та впровадження схемних рішень, що забезпечують підвищення якості напруги джерела постійної напруги (струму) для навантажень різної потужності – є важливим завданням для дослідження.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є розробка теоретичного обґрунтування стійкої роботи схемного рішення для підвищення якості напруги джерела постійної напруги (струму) з проміжним перетворюванням частоти. Це дозволяє зменшити пульсації трьох найбільших гармонік.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи дослідження – аналіз та обґрунтування можливостей використання інвертора та обґрунтування схеми для зменшення пульсацій випрямленої напруги.

Об'єкт дослідження – випрямляч змінної напруги (струму).

Предмет дослідження – процес випрямлення змінної напруги зі зменшенням низькочастотних гармонік.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

В схему випрямляча змінної напруги встановлюється додатковий інвертор з потрібною частотою комутації (рис. 1). До виходу m -фазного випрямляча ІЕП-1, паралельно навантаженню підключається допоміжний однофазний ІЕП-2, де ІЕП – індуктивно-ємнісний перетворювач. Потужність цього перетворювача невелика – вона дорівнює потужності пульсації струму ІЕП-1. Допоміжний ІЕП-2 отримує живлення від перетворювача частоти (ПЧ) або від інвертора, в залежності від конкретних умов. Частота однофазної напруги така, як і частота пульсацій на виході випрямляча, а саме:

$$f_{\text{пч}} = 2m f_c.$$

Схема ІЕП-2 та налагодження її елементів обирається таким чином, щоб забезпечити необхідний зсув і рівень змінного однофазного струму по відношенню до пульсуючого випрямленого струму ІЕП-1. В цьому випадку можна отримати майже повне усунення пульсацій в сумарному струмі навантаження, а за допомогою зворотного зв'язку по струму, можна додатково підвищити якість стабілізації та фільтрації струму.

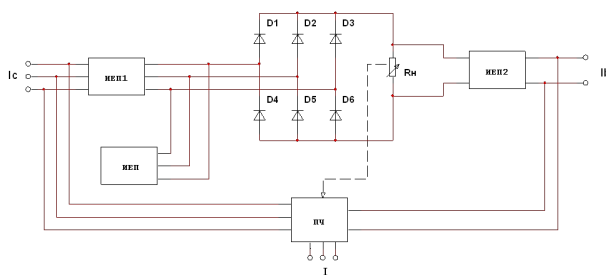


Рис. 1. Випрямляч змінної напруги з перетворювачем

Послідовне з'єднання двох джерел напруги з частотами f_0 і $3f$ або паралельне з'єднання двох джерел струму дає криву випрямленого параметра, вигляд якого відповідає рис. 2.

Середнє значення випрямленої напруги:

$$U_d = \frac{\sqrt{2}E}{\pi} \int_0^\pi (\sin \omega t + \mu \sin 3\omega t) d\omega t = \frac{2\sqrt{2}E}{\pi} \left(1 + \frac{\mu}{3}\right).$$

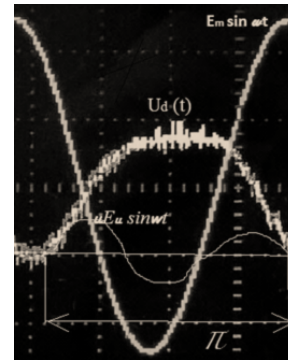


Рис. 2. Напруга при встановленні додаткового інвертора

Середньоквадратичне значення шумів квантування визначається за формулою:

$$\sigma = \sqrt{D},$$

де D – дисперсія шумів квантування.

Величина D знаходиться за формулою:

$$D = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi E_m (\sin \omega t + \mu \sin 3\omega t) - U_d I^2 d\omega t = \frac{(\sqrt{2}E)^2}{\pi} \int_0^\pi (\sin \omega t + \mu \sin 3\omega t)^2 d\omega t - \frac{2\sqrt{2}U_d E}{\pi} \int_0^\pi (\sin \omega t + \mu \sin 3\omega t) d\omega t + \frac{U_d^2}{\pi} \int_0^\pi d\omega t = \frac{2E^2}{\pi} \int_0^\pi (\sin^2 \omega t + 2\mu \sin \omega t + \sin 3\omega t + \mu^2 \sin^2 3\omega t) d\omega + \frac{8E^2}{\pi^2} \left(1 + \frac{\mu}{3}\right) \times \left(\cos \omega t + \frac{\mu}{3} \cos 3\omega t\right) + \frac{8E^2}{\pi^2} \left(1 + \frac{\mu}{3}\right)^2$$

Після подальших перетворень отримуємо:

$$D = \frac{2E^2}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} (1 + \mu^2) \right] - \frac{8E^2}{\pi} \left(1 + \frac{\mu}{3}\right)^2$$

Для розрахунку фільтрів необхідно знайти кореляційну функцію, потім спектральну щільність.

$$R(\tau) = \cos \omega_0 \tau_m E^2 \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \left(1 + \frac{\mu}{3}\right) \right] + \cos 3\omega_0 \tau_m E^2 \left[\mu^2 - \frac{8}{\pi^2} \left(1 + \frac{\mu}{3}\right) \frac{\mu}{3} \right]$$

Знаходимо спектральну щільність, яка відповідає кореляційній функції $R(\tau)$.

$$\delta(\omega) = 2E^2 \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \left(1 + \frac{\mu}{3}\right) \right] \int_0^\infty \cos \omega_0 \tau_m \cos \omega \tau d\tau + 2E^2 \left[\mu^2 - \frac{8}{\pi^2} \left(1 + \frac{\mu}{3}\right) \frac{\mu}{3} \right] \int_0^\infty \cos 3\omega_0 \tau_m \cos \omega \tau d\tau = E^2 \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \left(1 + \frac{\mu}{3}\right) \right] \delta(\omega - 2\omega_0) + E^2 \left[\mu^2 - \frac{8\mu}{3\pi^2} \left(1 + \frac{\mu}{3}\right) \right] \delta(\omega - 6\omega_0)$$

Дисперсія випрямленої напруги після фільтрів визначається за формулою:

$$D_\Phi = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \delta(\omega) |W_\Phi(j\omega)|^3 \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \delta(\omega) |W_\Phi(j\omega)|^2$$

Для Г-подібного фільтру:

$$W_\Phi = \frac{1}{LC\omega^2 + j\omega \frac{L}{R} + 1},$$

де L – індуктивність фільтру, C – ємність фільтру, R – опір фільтру.

Для визначення ступеню зниження габаритів фільтра знаходимо D_Φ при $\mu = 0$.

$$D_{\Phi 0} = \frac{E^2}{(4\omega^2 L_0 C_0)}$$

Виконуючи розрахунки, отримуємо при $E=1$, що габарити фільтрів зменшуються в два рази.

Середньоквадратичне значення вищих гармонік в вихідному сигналі випрямляча визначається виразом:

$$A_B^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\pi}^0 [a(t) - A_d]^2 dt$$

Вираз для коефіцієнта пульсацій вихідного сигналу випрямляча:

$$K_{\pi} = \frac{\sqrt{A_B^2}}{A_d} = \sqrt{\frac{\pi^2}{8} \times \frac{(1 + \sum_{2k+1}^k \mu_{2k+1}^2)}{(1 + \sum_{2k+1}^k \frac{\mu_{2k+1}}{2k+1})^2}}$$

З останнього виразу можна встановити, що оптимальне значення μ_{2k+1} , визначене виходячи з мінімуму K_{π} , знаходиться за формулою:

$$\mu_{2k+1} = \frac{1}{2k+1}.$$

Оптимальне значення K_{π} прийме вигляд:

$$K_{\pi} = \sqrt{\frac{\pi^2}{8} \times \frac{1}{1 + \sum_{2k+1}^k \left(\frac{1}{2k+1}\right)^2}}$$

З формули, що була отримана, витікає, що ісходний коефіцієнт K_{π} , що дорівнює, при відсутності вищих гармонік, $K_{\pi} = 0.483$, знижується при $K=1$ до 0.332, а при $K=2$ до $K_{\pi} = 0.267$. Таким чином, спостерігається ефективне зниження коефіцієнта пульсацій вихідного параметра випрямляча.

Такий спосіб дозволяє ефективно знижувати коефіцієнт пульсацій вихідного параметра випрямлячів, в тому числі і багатофазних, з живленням як від джерел напруги, так і від джерел струму. Так, в трипульсних випрямлячах коефіцієнт пульсацій вихідного

параметра знижується в ,9 раз, а в шестипульсних – в 11,62 рази.

Завдяки цьому, знижуються встановлені потужності як сгладжувальних фільтрів, так і всього пристрою, так як потужність генераторів вищих гармонік витрачається не тільки на зменшення величини K_{π} , но і на збільшення середнього значення вихідного параметра випрямляча. Зменшення встановленої потужності сгладжувальних фільтрів дозволяє підвищити динамічні показники пристроїв при комутації навантаження.

Таким чином, при введенні 3-ї гармоніки знижується напруга та потужність силових перетворень на 11%, також знижуються параметри фільтрів при однаковій якості напруги на виході на 37,8%. При цьому потужність додаткового інвертора складає 33,3%, таким чином, це більш доцільно з економічної точки зору.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Суттю даного рішення є те, що створюються LC-кола на виході яких струм не залежить від навантаження, таким чином, можна використовувати навантаження будь-якої потужності, а встановлення інверторів тільки на гармоніки 1, 3, 5, які є найбільшими за амплітудою, дає значне зменшення коефіцієнту пульсацій.

ВИСНОВКИ

Враховуючи аналіз та обґрунтування параметрів схемного рішення, визначено, що додавання до схеми випрямляча інверторів для кожної з трьох вищих гармонік, дає можливість ефективно зменшити коефіцієнт пульсацій без значного підвищення загальної потужності пристрою.

Рішення є універсальним, в зв'язку з тим, що його можна використовувати в схемах з навантаженням будь-якої потужності.

REFERENCES

- [1] Qing-Chang Zhong, Frede Blaabjerg, Josep M. Guerrero, Tomas Hornik. (2012). "Improving the Voltage Quality of an Inverter via by-passing the Harmonic Current Components." Conference: Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE., pp. 4037-4041.
- [2] Guerrero J., Vasquez J., Matas J., Castilla M., and de Vicuna L., (2009). "Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 3, pp. 726-736.
- [3] Zhuykov V.Y., Tereshchenko T.O., Yamenko Y.C., Moroz A.V. (2016). Regulovani filtry dzherel zhyvlenniy. Monografiy. K. 184 s. [in Ukrainian].
- [4] Hailian Xie. (2006). Voltage Source Converters with Energy Storage Capability. Royal Institute of Technology. Stockholm. 122 p.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Qing-Chang Zhong, Frede Blaabjerg, Josep M. Guerrero, Tomas Hornik. (2012). "Improving the Voltage Quality of an Inverter via by-passing the Harmonic Current Components." Conference: Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE., pp. 4037-4041.
- [2] J. Guerrero, J. Vasquez, J. Matas, M. Castilla, and L. de Vicuna, (2009). "Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 3, pp. 726-736.
- [3] Жуїков В.Я., Терещенко Т.О., Ямненко Ю.С., Мороз А.В. (2016). Регульовані фільтри джерел живлення для захисту інформації в мікроконтролерах. Монографія. Київ. 184 с.
- [4] Hailian Xie. (2006). Voltage Source Converters with Energy Storage Capability. Royal Institute of Technology. Stockholm. 122 p.