

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГІБРИДНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В УМОВАХ ТРИПРОВІДНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

У роботі проведено дослідження роботи гібридного компенсатора реактивної потужності в умовах трипровідної електричної мережі. До розгляду прийнята така структура компенсатора, до складу якої входить активна та пасивна частини, що з'єднані послідовно. Підключення пристрою до навантаження – паралельне. Розглянуто основні підходи до керування гібридним компенсатором реактивної потужності. Проведено математичне моделювання роботи гібридної системи у трипровідній електричній мережі у режимі компенсації реактивної потужності та у режимі забезпечення синусоїдності кривої струму мережі. Перевірено працездатність розробленої моделі в умовах несиметрії та несинусоїдності напруги живлення.

**Ключові слова:** активний фільтр, якість електроенергії, коефіцієнт спотворень синусоїдності, вищі гармоніки, компенсація, реактивна потужність, автономний інвертор напруги, батарея конденсаторів.

**O.S. Savenko. Hybrid VAR compensator operating study under conditions of a three-wire network.** The approaches to the control of the hybrid VAR compensator are considered. A hybrid VAR compensator is a passive and active compensator connected in series. The passive part is represented by a thyristor-switched capacitor bank. The power part of the active part is implemented on the basis of an autonomous voltage inverter, connected through a voltage transformer in series with a passive part. Most of the reactive power is compensated by means of the compensator's passive part. The hybrid compensator combines the advantages of passive (low price, reliability) and active compensators (possibility of smooth control of reactive power, operation in networks with non-sinusoidal currents). This configuration allows to significantly reduce the rated power of the active part, while maintaining the possibility of smooth control of the reactive power. Mathematical modeling of the hybrid system operation in a three-wire network is carried out. Two operating modes are checked: the reactive power compensation mode and the mode of providing the sinusoidal waveform of the network current. The first mode provides fundamental reactive power compensation only (the compensator current is sinusoidal, therefore, provides «insulation» of capacitor bank from higher harmonics) and the second mode provides limitedly non-active power compensation, including distortion power (overvoltages and exceeding the permissible currents of the capacitor bank are not allowed). When choosing a control strategy, the network configuration and the real requirements of power consumers for power quality indicators are taken into account. The efficiency of the proposed model under conditions of non-sinusoidal load current and unbalance of the main's voltage is provided.

**Key words:** active power filter, power quality, total harmonic distortion, higher harmonics, compensation, reactive power, autonomous voltage inverter, capacitor bank.

**Постановка проблеми.** Одним із поширених рішень проблеми компенсації реактивної потужності (РМ) є використання пасивних фільтро-компенсуючих пристроїв, а саме батарей конденсаторів (БК), що підключаються паралельно до навантажень. Оптимальними умовами роботи, за яких забезпечується стабільність та довговічність роботи конденсаторів, є робота в умовах

\* канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-8108-2575, [savenko.olja@gmail.com](mailto:savenko.olja@gmail.com)

синусоїдної форми кривої вхідної напруги. Однак реальні електричні мережі насичені струмами вищих гармонік, що викликано постійним збільшенням кількості нелінійних споживачів, вхідний струм яких має несинусоїдний характер [1]. Це призводить до спотворення форми кривої напруги живлення. При підключенні БК до джерела несинусоїдної напруги збільшується ймовірність виникнення резонансних перенапруг, а наявність складових неосновної частоти у спектрі струму може призвести до перегріву батарей за рахунок перевищення максимально допустимого струму. Все це суттєво позначається на термінах служби БК [2], що призводить до зниження ефективності роботи та погіршення техніко-економічних показників системи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Використання нерегульованих БК є доцільним у тих випадках, коли зміна параметрів навантаження заздалегідь визначена. В електричних мережах з випадковим характером навантажень використання БК, ємність яких фіксована або змінюється за заздалегідь встановленим алгоритмом, призводить до режимів пере- або недокомпенсації. У таких випадках раціонально використовувати активні компенсатори РМ, а саме статичні компенсатори реактивної потужності (СТАТКОМ) або активні фільтри (АФ). Їх застосування дозволить регулювати величину споживаної/генерованої РМ в режимі реального часу. Але використання СТАТКОМів чи АФ не завжди є економічно обґрунтованим. Викликає інтерес використання гібридних систем, які є поєднанням БК і АФ, з'єднаних або послідовно, або паралельно.

Гібридний компенсатор реактивної потужності (ГКРП) представляє собою послідовно включену БК зі ступінчастим регулюванням і АФ. Застосування АФ дозволяє забезпечити плавне регулювання РП між ступенями БК. Силова частина АФ реалізована на базі автономного інвертора напруги [3], що включений через вольтододавальний трансформатор послідовно з БК (рис. 1). АФ дозволяє скоригувати величину реактивної потужності БК та дає можливість ізолювати БК від вищих гармонік напруги мережі, виконуючи роль вузькосмугового фільтра, налаштованого на частоту основної гармоніки.

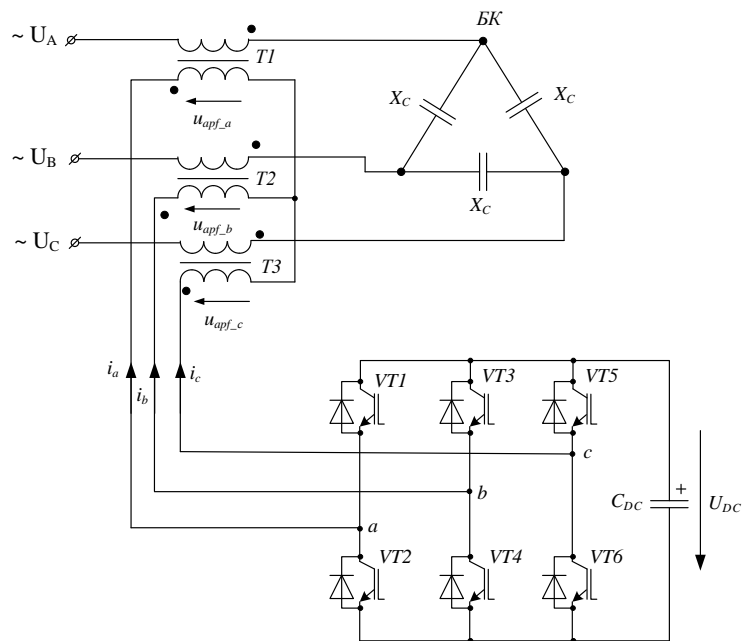


Рис. 1 – Схема силової частини ГКРП

ГКРП поєднує переваги пасивних (мала ціна, надійність) та активних компенсаторів (можливість плавного регулювання РП, робота в мережах з несинусоїдними струмами). Відмінною особливістю гібридних систем є те, що потужність АФ значно менша, ніж потужність всього компенсатора в цілому.

Можна виділити дві основні стратегії управління роботою гібридного компенсатора: 1) пристрій працює тільки в режимі компенсації реактивної потужності, струм компенсатора має синусоїдний характер, при цьому забезпечується «ізоляція» БК від вищих гармонік; 2) крім

компенсації реактивної складової виконується компенсація неактивних складових повної потужності навантаження. При виборі першого підходу до управління компенсатором використання ГКРП дозволяє плавно регулювати величину реактивної складової струму, що споживається/генерується навантаженням, при цьому спектр струму мережі буде містити всі вищі гармоніки струму навантаження. Другий підхід дає можливість мінімізувати рівень вищих гармонійних складових у спектрі струму мережі. При виборі стратегії управління береться до уваги конфігурація мережі та реальні вимоги електроприймачів до показників якості електроенергії.

Авторами [4-7] запропоновано топологію і систему управління ГКРП, проте у конфігурації фільтра використані нерегульовані БК встановленої потужності, що збільшує потужність активної частини, отже, погіршує техніко-економічні показники системи. У роботах [5-7] розглянуті системи управління компенсатором, які не передбачають роботу пристрою в умовах несиметрії напруги живлення, які можуть бути викликані нерівномірним розподілом навантажень по фазах, підключенням однофазних приймачів і неповнофазним режимом роботи елементів мережі.

**Мета роботи** – створення математичної моделі гібридного компенсатора реактивної потужності та перевірка її працездатності в умовах несинусоїдності та несиметрії напруги живлення в трипровідних електричних мережах; дослідження роботи компенсатора у двох режимах: компенсації реактивної потужності та компенсації неактивних складових повної потужності навантаження.

**Виклад основного матеріалу.** Для перевірки працездатності зазначених підходів до управління компенсатором виконано математичне моделювання. Як приклад було розглянуто роботу ГКРП у трипровідній електричній мережі.

Оцінюючи величини реактивної потужності автори керувалися стандартом IEEE 1459-2010. Існує кілька підходів до оцінки величини реактивної потужності в несинусоїдних умовах, що обумовлено відсутністю суворої методологічної бази для її розрахунку, і кожен підхід має свою сферу застосування [8]. Однак саме стандарт IEEE 1459-2010 використовується при розрахунку параметрів якості електроенергії та потужності у приладах обліку та контролю [9].

Відповідно до стандарту розрахунок реактивної потужності проводиться лише для частоти першої гармоніки  $f_1$ :

$$Q = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1, \quad (1)$$

де  $U_1$  та  $I_1$  – перша гармонійна складова напруги та струму відповідно;  $\varphi_1$  – зсув фаз між  $U_1$  та  $I_1$ .

При розробці математичної моделі пристрою при роботі в трипровідній мережі використано метод симетричних складових, що дозволяє застосовувати розроблену модель в умовах несиметричної напруги мережі. Пасивна частина компенсатора представлена трифазною БК із внутрішньою схемою з'єднання «трикутник», для спрощення розрахунку в процесі математичного моделювання був виконаний перехід до еквівалентної «зірки» (рис. 2).

Після виділення прямої послідовності струму навантаження  $I_{ps}$  та напруги мережі  $U_{ps}$  на основній частоті отримуємо вираз для розрахунку реактивної компоненти прямої послідовності струму навантаження:

$$I_q = \frac{\text{Im}(U_{pq} \cdot \overline{I_{pq}})}{|U_{pq}|}. \quad (2)$$

Ємність БК у кожній фазі для внутрішньої схеми з'єднання «трикутник»:

$$X_c = \frac{3 \cdot |U_{pq}|}{I_q}. \quad (3)$$

Вибір встановленої ємності ступеня здійснюється згідно з [10]. Падіння напруження на БК:

$$U_{CB\_pq} = I_q \cdot \exp(j \cdot (\arg(U_{pq}) + 90^\circ)) \cdot (-j \cdot X_c / 3).$$

Величина ЕРС активного фільтра, яка вводиться для досягнення необхідного рівня реактивної потужності:

$$E_{AF\_pq} = U_{pq} - U_{CB\_pq}.$$

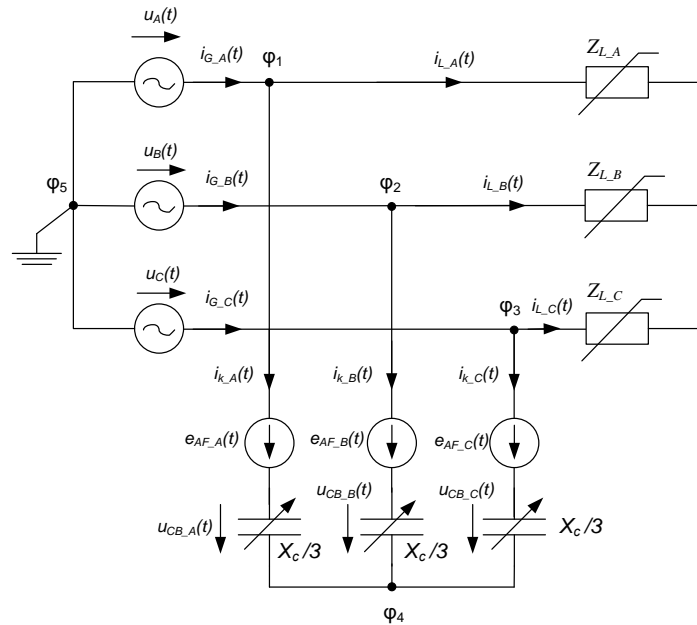


Рис. 2 – Схема заміщення ГКРП при підключенні у трипровідній мережі

При розрахунку параметрів фільтра для схеми заміщення зворотної послідовності в першу чергу виконується виділення зворотної послідовності струму навантаження  $I_{ns}$  та напруги мережі  $U_{ns}$ . Зворотна послідовність напруги на БК:

$$U_{CB\_nq} = -I_{ns} \cdot (-j \cdot X_C / 3),$$

а ЕРС активного фільтра:

$$E_{AF\_nq} = U_{nq} - U_{CB\_nq}.$$

Перейдемо від розрахованих  $U_{CB}$  та  $E_{AF}$  прямої та зворотної послідовностей до фазних значень:

$$\begin{aligned} U_{CB\_A} &= U_{CB\_pq} + U_{CB\_nq}; & U_{CB\_B} &= \alpha^2 \cdot U_{CB\_pq} + \alpha \cdot U_{CB\_nq}; \\ U_{CB\_C} &= \alpha \cdot U_{CB\_pq} + \alpha^2 \cdot U_{CB\_nq}, \\ E_{AF\_A} &= E_{AF\_pq} + E_{AF\_nq}; & E_{AF\_B} &= \alpha^2 \cdot E_{AF\_pq} + \alpha \cdot E_{AF\_nq}; \\ E_{AF\_C} &= \alpha \cdot E_{AF\_pq} + \alpha^2 \cdot E_{AF\_nq}, \end{aligned}$$

де  $\alpha$  – оператор трифазної системи.

Розрахуємо фазні струми компенсатора за методом вузлових потенціалів, при цьому потенціал вузла 5  $\varphi_5$  приймемо рівним нулю (вузли пронумеровані на рис. 2), а величини потенціалів інших вузлів розрахуємо:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= E_{I\_A}; & \varphi_2 &= E_{I\_B}; & \varphi_3 &= E_{I\_C}, \\ \varphi_4 &= \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 - \frac{E_{AF\_A} + E_{AF\_B} + E_{AF\_C}}{-j \cdot X_C / 3}}{3 / (-j \cdot X_C / 3)}. \end{aligned}$$

Фазні струми, що протікають через компенсатор:

$$\begin{aligned} I_{k\_A} &= \frac{\varphi_1 - \varphi_4 - E_{AF\_A}}{-j \cdot X_C / 3}; & I_{k\_B} &= \frac{\varphi_2 - \varphi_4 - E_{AF\_B}}{-j \cdot X_C / 3}; \\ I_{k\_C} &= \frac{\varphi_3 - \varphi_4 - E_{AF\_C}}{-j \cdot X_C / 3}. \end{aligned}$$

У ході виконання моделювання роботи запропонованої системи в якості вихідних даних були використані трифазна напруга мережі і струм навантаження, форми яких представлені на

рис. 3. Коефіцієнт спотворень синусоїдності кривої напруги  $THD_U$  становить 3%, кривої струму –  $THD_I = 57\%$ .

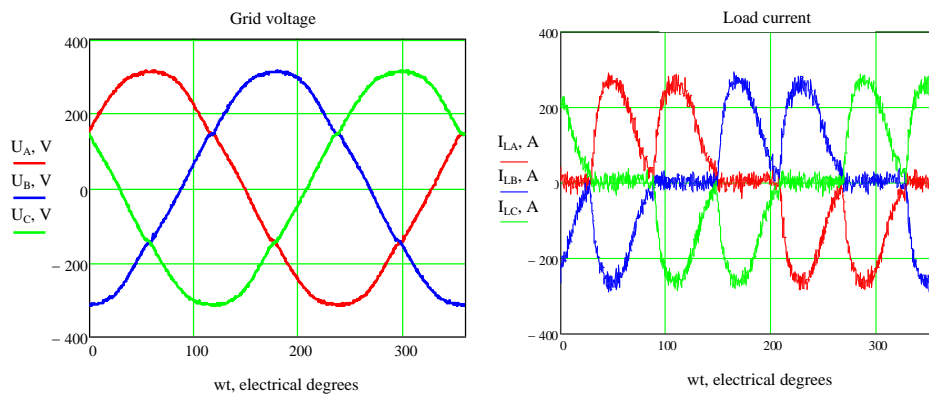


Рис. 3 – Форми кривих напруги мережі та струму навантаження

Електрична мережа розглянута як система нескінченної потужності. Активна потужність компенсатора  $P$  прийнята рівною 200 Вт. У таблиці представлені величини ємностей  $C$  ступенів БК.

Таблиця

Ємності ступенів батареї конденсаторів

Номер ступеня	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C$ , мкФ	150	183	223	273	333	406	496	605	738	900

*Компенсація реактивної потужності.*

У разі роботи пристрою в режимі компенсатора реактивної потужності струм мережі не містить реактивну компоненту, зсув фаз між струмом і напругою мережі дорівнює нулю, проте спектр мережного струму містить всі вищі гармоніки струму навантаження (рис. 4). Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої струму мережі під час роботи у цьому режимі становить 90%.

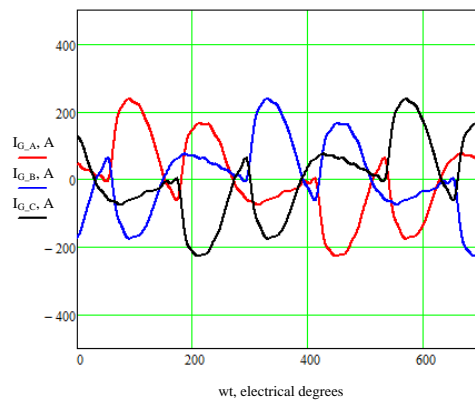


Рис. 4 – Результати математичного моделювання: струм мережі

Струм компенсатора, напруга на БК та ЕРС АФ носять синусоїдний характер, їх спектр включає лише першу гармоніку (рис. 5).

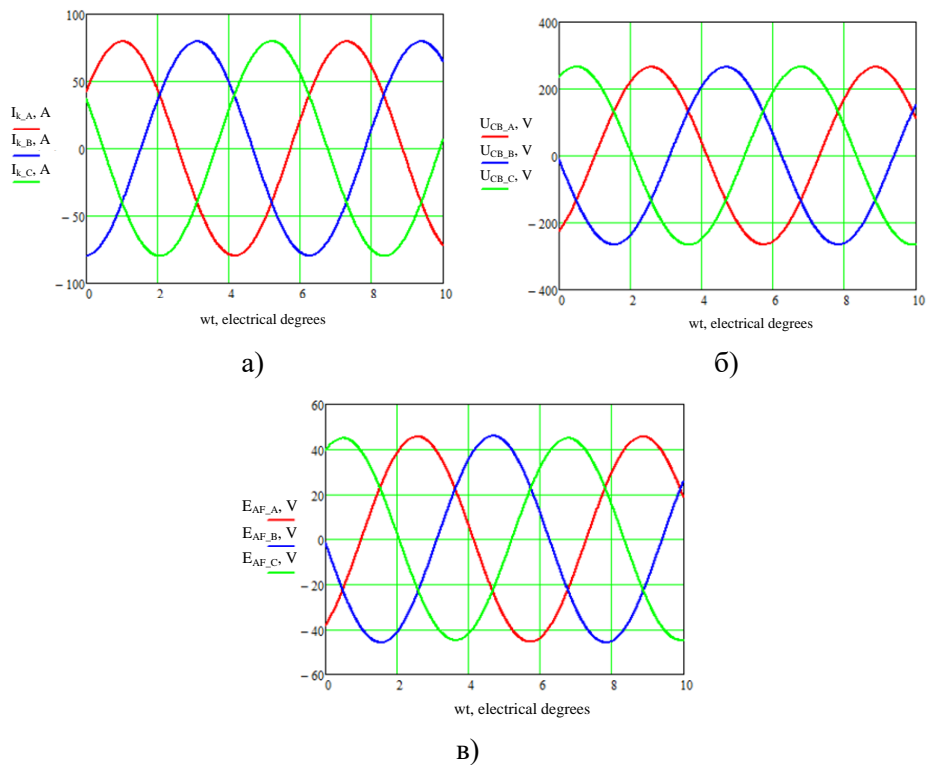


Рис. 5 – Результати математичного моделювання при виборі першої стратегії керування: а) – фазні струми, що протікають через компенсатор, б) – напруга на БК, в) – ЕРС активного фільтра

Таким чином, забезпечується компенсація реактивної потужності та «ізоляція» БК від вищих гармонік напруги.

*Компенсація реактивної потужності та фільтрація вищих гармонік.*

При роботі пристрою в зазначеному режимі струм компенсатора міститиме всі гармонійні складові нефундаментальної частоти, які включає спектр струму навантаження. У цьому випадку струм мережі має синусоїдний характер (рис. 6).

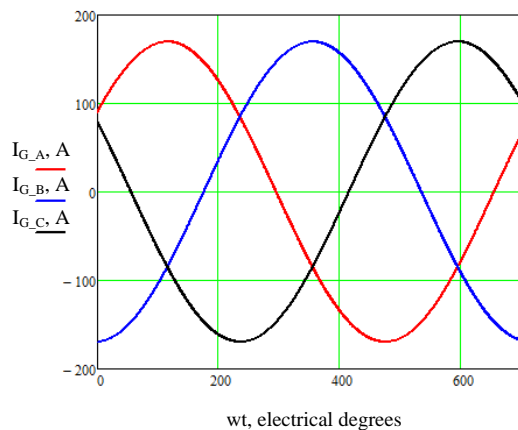


Рис. 6 – Результати математичного моделювання: струм мережі

Форми кривих струму компенсатора, напруги на БК та ЕРС АФ представлені на рис. 7.

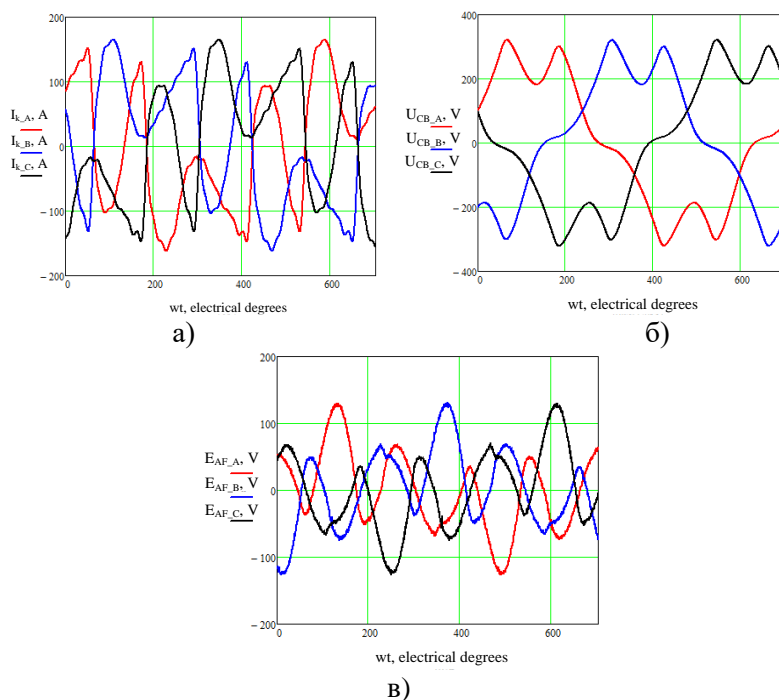


Рис. 7 – Результати математичного моделювання при виборі другої стратегії керування: а) – фазні струми, що протікають через компенсатор, б) – напруга на БК, в) – ЕРС активного фільтра

Розглянутий варіант роботи ГКРП забезпечує плавне регулювання реактивною потужністю компенсатора в умовах несиметричної трифазної мережі та синусоїдність кривої мережевого струму.

### Висновки

Використання гібридної системи компенсації реактивної потужності дозволяє не тільки забезпечити плавне керування величиною РП і знизити потужність активної частини компенсатора, але і «ізолювати» пасивну частину пристрою від гармонійних вищих складових мережевої напруги. Доведено доцільність використання пристрою в трипровідних електричних мережах. Підтверджено ефективність роботи пристрою в умовах несинусоїдності і несиметрії напруги живлення.

### Перелік використаних джерел:

1. Characteristics of modern nonlinear loads and their influence on systems with distributed generation / D. Shmilovitz, J. Duan, D. Czarkowski, Z. Zabar, S. Lee // International Journal of Energy Technology and Policy. – 2007. – Vol. 5, iss. 2. – Pp. 219-240. – Mode of access: <https://doi.org/10.1504/IJETP.2007.013033>.
2. Cavallini A. Probabilistic investigation of the life behavior of power capacitors operating under distorted supply voltage / A. Cavallini, G. Mazzanti, G.C. Montanari // Lifetime Data Analysis. – 1997. – Vol. 3. – Pp. 47-61. – Mode of access: <https://doi.org/10.1023/a:1009616218251>.
3. Поднебенна С.К. Підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» в електричних мережах 0,4 кВ : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Поднебенна Світлана Костянтинівна. – Донецьк, 2013. – 199 с.
4. Adaptive Notch Filter Applied to Hybrid Active Var Compensator under Nonsinusoidal and Unbalanced Conditions / S.C. Ferreira [et al.] // 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. – 2013. – Pp. 2264-2269. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2013.6646989>.
5. A Hybrid Active Var Compensator (HAVarC) / C.H. da Silva, R.R. Pereira, L.E. Borges da Silva, G.L. Torres, R.B. Gonzatti // Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP 2010. – 2010. – Pp. 1-5. – Mode of access:

- <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2010.5625341>.
6. Herman L. Hybrid Active Filter for Power Factor Correction and Harmonics Elimination in Industrial Networks / L. Herman, I. Papič // 2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference. – 2011. – Pp. 302-308. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/EPEC.2011.6070216>.
  7. Control strategies applied to an hybrid reactive power compensator to single and three phase systems / S.C. Ferreira, R.B. Gonzatti, C.H. da Silva, L.E. B. da Silva, G.L. Torres // Brazilian Power Electronics Conference. – 2013. – Pp. 1219-1225. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/COBEP.2013.6785271>.
  8. Balci M.E. A power resolution for nonsinusoidal and unbalanced systems – Part I: Literature overview and motivation / M.E. Balci, M.H. Hocaoglu // 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). – 2011. – Pp. 168-173.
  9. IEEE Std 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. – 2010. – 40 p.
  10. Гибридный компенсатор реактивной мощности с плавным регулированием / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, С.К. Поднебенная, О.С. Савенко // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя, 2014. – Вип. 2. – С. 13-19.

## References:

1. Shmilovitz D., Duan J., Czarkowski D., Zabar Z., Lee S. Characteristics of modern nonlinear loads and their influence on systems with distributed generation. *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2007, vol. 5, iss. 2, pp. 219-240. doi: **10.1504/IJETP.2007.013033**.
2. Cavallini A., Mazzanti G., Montanari G.C. Probabilistic investigation of the life behavior of power capacitors operating under distorted supply voltage. *Lifetime Data Analysis*, 1997, vol. 3, pp. 47-61. doi: **10.1023/a:1009616218251**.
3. Podnebnennaya S.K. *Pidvishchennia energoefektivnosti elektrotekhnichnogo kompleksu «neliniine navantazhennia – silovii aktivnii fil'tr» v elektrichnikh merezhakh 0,4 kV*. Diss. kand. techn. nauk [Improving the energy efficiency of the electrical complex «nonlinear load - power active filter» in electrical networks 0.4 kV. Cand. tech. sci. diss.]. Donetsk, 2013. 199 p. (Ukr.)
4. Ferreira S.C., Gonzatti R.B., Silva C.H., Silva L.E.B., Lambert-Torres G. Adaptive Notch Filter Applied to Hybrid Active Var Compensator under Nonsinusoidal and Unbalanced Conditions. 2013 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2013, pp. 2264-2269. doi: **10.1109/ECCE.2013.6646989**.
5. Da Silva C.H., Pereira R.R., da Silva L.E.B., Torres G.L., Gonzatti R.B. A Hybrid Active Var Compensator (HVarC). *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP 2010*, 2010, pp. 1-5. doi: **10.1109/ICHQP.2010.5625341**.
6. Herman L., Papič I. Hybrid Active Filter for Power Factor Correction and Harmonics Elimination in Industrial Networks, *2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference*, 2011, pp. 302-308. doi: **10.1109/EPEC.2011.6070216**.
7. Ferreira S.C., Gonzatti R.B., da Silva C.H., da Silva L.E. B., Torres G.L. Control strategies applied to an hybrid reactive power compensator to single and three phase systems. *Brazilian Power Electronics Conference*, 2013, pp.1219-1225. doi: **10.1109/COBEP.2013.6785271**.
8. Balci M.E., Hocaoglu M.H. A power resolution for nonsinusoidal and unbalanced systems – Part I: Literature overview and motivation. *7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2011, pp. 168-173.
9. IEEE Std 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, 2010. 40 p.
10. Burlaka V.V., Gulakov S.V., Podnebnennaya S.K., Savenko O.S. Gibrnidnyi kompensator reaktivnoi moshchnosti s plavnym regulirovaniem [Reactive power compensator with smooth control]. *El-ektrotekhnika ta elektroenergetika – Electrical Engineering and Power Engineering*, 2014, pp. 13-19. (Rus.)

Рецензент: В.В. Прус

д-р техн. наук, проф., КрНУ ім. Михайла Остроградського

Стаття надійшла 15.07.2022