

УДК 621.314

doi:10.20998/2413-4295.2018.26.42

КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ

Є. В. ВЕРБИЦЬКИЙ*, Р. М. ПРИБУДЬКО, Д. О. ЗІНЧЕНКО, М. О. МАЦЮК

кафедра промислової електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА

*email: verbitskiy@bigmir.net

АНОТАЦІЯ У статті аналізуються причини низької ефективності компенсаторів реактивної потужності у перехідних процесах. Розраховуються орієнтовні значення коефіцієнту потужності при заданому графіку споживання енергії ємнісним, індуктивним та змішаним навантаженням при використанні звичайного компенсатора. Запропоновано використання додаткового компенсатора, що усуває високочастотні спотворення струму мережі після основного компенсатора. Оцінено підвищення коефіцієнту потужності при використанні заданого підходу. Проаналізовано збільшення встановленої потужності додаткового компенсатора від похибки прогнозування першої гармоніки струму.

Ключові слова: компенсатор реактивної потужності; коефіцієнт потужності; перехідні процеси.

REACTIVE POWER COMPENSATOR IN TRANSIENT MODES

I. VERBYTSKYI, R. PRYBUDKO, D.O. ZINCHENKO, M.O. MATSYUK

Department of Industrial Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT Compensation of reactive power is one of the ways of increasing the electrical grid efficiency, theoretical foundations of which were developed at the beginning of the last century. The development of effective control algorithms for reactive power compensation continues today. As usual, algorithms of reactive power compensation have inertia of at least one period of network voltage. Therefore, they cannot be used in transient mode because of the grid current non-stationarity. The problem of reactive power compensation in power grids with variable load is analyzed. The transient modes behavior depends of the load types are analyzed. An inefficient implementation of existing methods of reactive power compensation for this case is shown. The method of analysis of the transmitting energy between the source and the load during the transition process based on the theory of instantaneous power is proposed. The low efficiency of classical reactive power compensators is shown. In parallel with the main reactive power compensator, it is proposed to use an auxiliary one, which eliminates distortion of the grid current based on its predicting. It is shown that the use of the additional compensator allows reaching power factor value closed to one with a non-significant increase in the total installed capacity of the compensation system. The additional compensator is compensated only high-frequency current distortion, whereas low-frequency subharmonics created by features of load power consumption are presence in the grid current. Therefore a total power factor of the grid current is less than one. An increase in the installed capacity of the additional compensator from the prediction error of the first harmonic of current is analyzed.

Keywords: reactive power compensator; power factor; transient modes.

Вступ

Компенсація реактивної потужності є важливою складовою підвищення ефективності роботи електричних мереж [1-3]. Через збільшення кількості різномісних навантажень, під'єднаних до мережі та їх динамічний режим роботи, погіршується процес компенсації реактивної потужності, оскільки більшість компенсаторів призначені для компенсації реактивної потужності в усталених режимах [4, 5].

Характер перехідного процесу навантаження суттєво залежить від порядку ланцюга n . Типові форми перехідних процесів для $n = 0, 1, 2$ наведено на рис. 1. При значеннях $n > 2$, характер перехідних процесів є аналогічним з перехідним процесом при $n = 1$ чи $n = 2$, або є їх комбінацією.

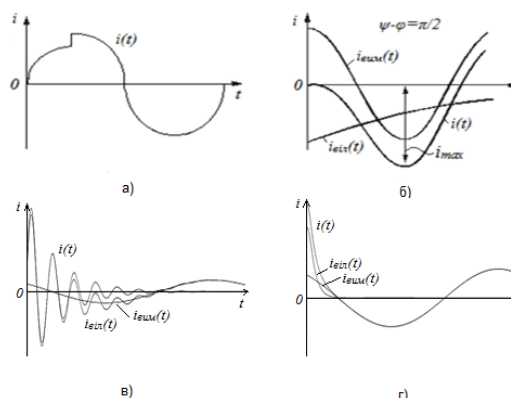


Рис. 1 – Типові форми перехідних процесів при нульовому (а), першому (б) і другому порядку (випадок комплексно-спряжених полюсів (б), випадок простих полюсів (г) ланцюга

Для покращення електромагнітної сумісності з мережею під час перехідного процесу вільна та

реактивна складові струму повинні бути компенсовані, для чого необхідно використовувати спеціалізовані компенсатори реактивної потужності з прогнозним керуванням.

У статтях [6, 7] запропоновано загальні підходи для компенсації потужності в перехідних режимах на основі прогнозного керування. Доцільність використання розроблених теоретичних засад проаналізовано у статті [8], де показано, що при динамічному навантаженні використання додаткового компенсатора із прогнозним алгоритмом керування дозволяє додатково підвищити коефіцієнт потужності мінімум на 2%. При цьому потужність додаткового компенсатора буде меншою на порядок, ніж основного.

Мета роботи

У статті проаналізовано ефективність використання додаткового компенсатора із прогнозним керуванням при різних типах навантажень, оцінено його масогабаритні показники, та оцінено чутливість вихідної потужності від точності прогнозування струму мережі.

Оцінка ефективності використання звичайних компенсаторів під час перехідних режимів

Оцінимо ефективність компенсації реактивної потужності в перехідних режимах звичайними компенсаторами. Для цього розглянемо як змінюється коефіцієнт потужності χ для перехідних процесів різного типу, який розраховується за формулою:

$$\chi = \frac{U_{(1)} I_{(1)}}{UI} \cos(\varphi_{(1)}), \quad (1)$$

де $I_{(1)}$, $U_{(1)}$ – діюче значення першої гармоніки струму і напруги мережі відповідно; I , U – діюче значення струму і напруги мережі відповідно; $\varphi_{(1)}$ – зсув фаз між першими гармоніками напруги і струму мережі.

Досліджувана модель складається з компенсатора, нелінійного навантаження і мережі. Як навантаження використовувався діодний міст з вихідним ємнісним фільтром, до якого під'єднано навантаження. Навантаженням виступає регульоване джерело струму, за допомогою якого задається характер перехідного процесу. Створена модель в Matlab Simulink показана на рис. 2.

Характер перехідного процесу задавався трикутною формою струму з максимальним I_{max} і мінімальним I_{min} значенням струму та з періодом перехідного процесу в навантаження T_H , що дорівнює десяти періодам напруги мережі T_M , $T_H = 10 T_M$, рис.3.

Оскільки період перехідного процесу T_H більше ніж період напруги мережі, то у вхідному струмі можуть бути субгармоніки. Тому при розрахунку коефіцієнту потужності спектр струму необхідно розраховувати відносно періоду

перехідного процесу T_H , тому коефіцієнт потужності у даному випадку розраховується за такою формулою:

$$\chi = \frac{U_{(m)} I_{(m)}}{UI} \cos(\varphi_{(m)}), \quad (2)$$

де m – номер гармоніки струму, що відповідає частоті напруги мережі.

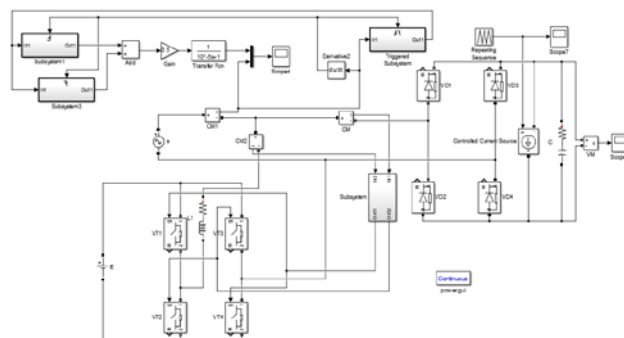


Рис.2 – Модель досліджування компенсатора

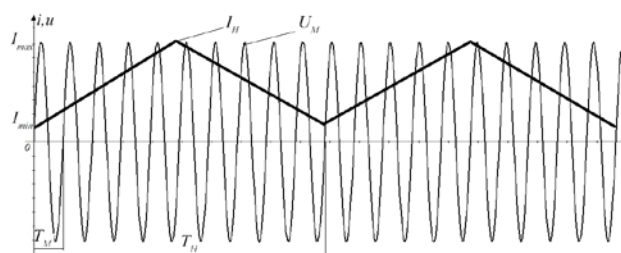


Рис. 3 – Часова діаграма перехідного процесу

У табл. 1 наведено значення коефіцієнту потужності χ залежно від параметрів перехідного процесу, який розраховується за формулою:

Таблиця 1 – Залежність коефіцієнта потужності від величини пульсацій струму навантаження після основного компенсатора

I_{min} , A	I_{max} , A	χ		
		C	L	LC
1	1	0.9953	0.9946	0.9964
1	2	0.9574	0.9928	0.9783
1	3	0.9178	0.9859	0.9555
1	4	0.8928	0.9689	0.9381
1	5	0.8759	0.9553	0.9251
1	6	0.8640	0.9210	0.9153

Для випадку постійного навантаження без перехідного процесу, коефіцієнт потужності дорівнює $\chi = 0.9953$, що відповідає діючим стандартам щодо якості електроспоживання. Зі зростанням величини пульсації коефіцієнт потужності зменшується, оскільки струм мережі, за умови використання основного компенсатора містить спотворення, що проілюстровано на рис. 4 для випадку ємнісного навантаження.

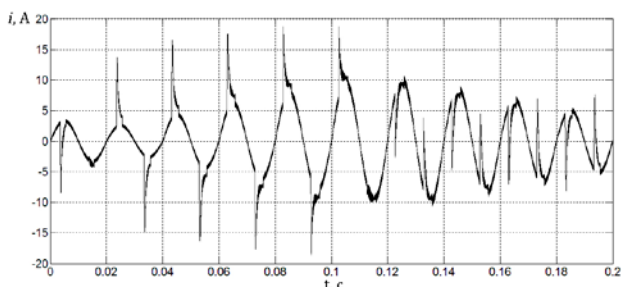


Рис. 4 – Часова діаграма струму мережі під час перехідного процесу після основного компенсатора

Як видно з рис. 4, струм мережі має форму струму, близьку до синусоїдальної, однак на деяких часових інтервалах спостерігаються спотворення що засвідчує необхідність використання ефективніших алгоритмів компенсації для перехідних режимів.

Принцип компенсації реактивної потужності в перехідних режимах

Для компенсації спотворень струму мережі, зображених на рис. 4 необхідно застосувати принципово нові засади компенсації реактивної потужності, розроблені в [9, 10] з використанням прогностичного керування [11-13]. При цьому слід враховувати, що струм мережі після основного компенсатора містить спотворення двох типів:

- височастотні, які утворені основним компенсатором;
- низькочастотні, що зумовлюються характером навантаження.

При використанні додаткового компенсатора доцільно усувати лише височастотні складові струму, які створюють великі пікові навантаження і мають імпульсний характер. При цьому потужність додаткового компенсатора є значно меншою, ніж основного. Для усунення низькочастотних спотворень потрібна значна більша потужність, разом з тим низькочастотні гармоніки струму мають значно менший вплив на параметри якості напруги мережі [14, 15].

За умови використання такого принципу роботи додаткового компенсатора, форма струму мережі покращиться, що показано на рис. 5, у порівнянні зі струмом, зображеним на рис. 4. При цьому у табл. 2 наведено значення коефіцієнту потужності струму мережі та його максимальне досяжне значення.

Як видно з рис. 5 струм мережі має значно менші височастотні спотворення, однак містить низькочастотну модуляцію, спричинену формою споживаного струму, зображеного на рис. 3.

Як видно з даних, наведених у табл. 2, отримані значення коефіцієнту потужності менші від максимально можливих не більше ніж на 0.5 %, що пояснюється наявністю височастотної пульсації, створюваної компенсатором.

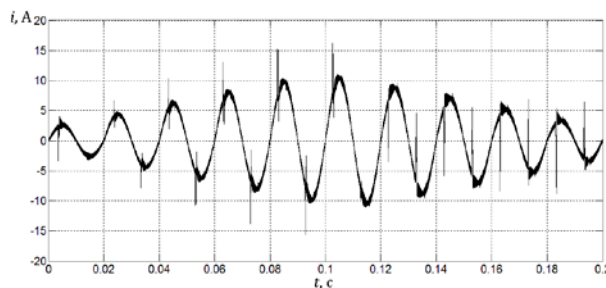


Рис. 5 – Часова діаграма струму мережі під час перехідного процесу після додаткового компенсатора

Таблиця 2 – Залежність коефіцієнта потужності від величини пульсації струму навантаження після додаткового компенсатора

$I_{min},$ A	$I_{max},$ A	χ					
		C		L		LC	
		макс.	комп.	макс.	комп.	макс.	комп.
1	1	1.0	0.9946	1.0	0.9880	1.0	0.9944
1	2	0.9977	0.9928	0.9827	0.9758	0.9831	0.9797
1	3	0.9903	0.9859	0.9622	0.9576	0.9633	0.9604
1	4	0.9765	0.9689	0.9470	0.9343	0.9483	0.9457
1	5	0.9649	0.9553	0.9357	0.9328	0.9374	0.9339
1	6	0.9326	0.9210	0.9272	0.9248	0.9292	0.9253

При проектуванні додаткового компенсатора також слід враховувати точність прогнозування амплітуди першої гармоніки, оскільки похибка прогнозування δ збільшує значення встановленої потужності компенсатора. На рис. 6 показана відносна потужність компенсатора ΔP , відносно мінімальної P_{min} , яка досягається при точному прогнозі

$$\Delta P = \frac{P_{\delta}}{P_{min}}, \quad (3)$$

де P_{δ} – поточна потужність компенсатора при заданій похибці прогнозування δ .

Як видно з рис. 6 встановлена потужність перетворювача зростає приблизно по квадратичній залежності відносно похибки δ . При цьому найбільша чутливість до похибки спостерігається при індуктивному навантаженні.

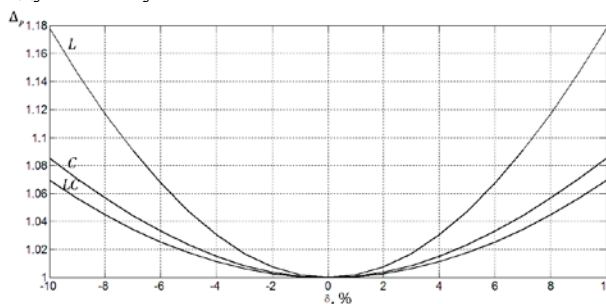


Рис. 6 – Відносна потужність компенсатора ΔP , відносно мінімальної P_{min}

Отже, для зменшення встановленої потужності додаткового компенсатора необхідно забезпечити ефективні алгоритми прогнозу струму мережі.

Висновки

На основі наведених розрахунків можна зробити такі висновки:

- при використанні додаткового компенсатора доцільно компенсувати високочастотні спотворення струму мережі;

- встановлення додаткового компенсатора дозволяє підвищити коефіцієнт потужності на 1-5 %;

- похибка прогнозу струму мережі призводить до квадратичного зростання встановленої потужності компенсатора.

Список літератури

1. **Bezhenar, V.** Multilevel inverter as var-compensator / **V. Bezhenar, D. Mykolaets, V. Mykytyuk, T. Tereshchenko** // *Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference.* – 2013. – P. 370-372. – doi: 10.1109/ELNANO.2013.6552076.
2. **Artemenko, M. Y.** Combined control system with direct current formation for three-phase four-wire network shunt active power filter / **M. Y. Artemenko, L. M. Batrak, A. A. Taher** // *IEEE 34th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO).* – 2014. – doi: 10.1109/ELNANO.2014.6873442.
3. **Davari, P.** A Multipulse Pattern Modulation Scheme for Harmonic Mitigation in Three-Phase Multimotor Drives / **P. Davari, Y. Yang, F. Zare, F. Blaabjerg** // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics.* – 2016. – vol. 4, no. 1. – pp. 174-185. – doi: 10.1109/JESTPE.2015.2461018.
4. **Watanabe, E. H.** Instantaneous p-q power Theory for compensating nonsinusoidal systems / **E. H. Watanabe, H. Akagi, M. Aredes** // *In Nonsinusoidal Currents and Compensation.* – 2008. – P. 1-10. – doi: 10.1109/ISNCC.2008.4627480.
5. **Czarnecki, Leszek S.** Instantaneous Reactive Power p-q Theory and Power Properties of Three-Phase Systems / **Leszek S. Czarnecki** // *IEEE Transactions on Power Delivery.* – 2006. – Vol. 21, № 1. – P. 362-367. – doi: 10.1109/TPWRD.2005.852348.
6. **Zhuikov, V.** Features of compensation of a reactive power at the transient mode / **V. Zhuikov, I. Verbytskyi, O. Bondarenko** // *Electric Power Networks (EPNet).* – 2016. – P. 1-4. – doi: 10.1109/EPNET.2016.7999362.
7. **Zhuikov, V. Y.** Особливості компенсації миттєвої реактивної потужності в лінійних ланцюгах у перехідному режимі при вмиканні навантаження / **V. Y. Zhuikov, I. V. Verbytskyi, O. F. Bondarenko** // *Електроніка та зв'язок.* – 2017. – № 22 (4). – С. 30-37. – doi: 10.20535/2312-1807.2017.22.4.105271.
8. **Zhuikov, V. J.** Reactive power compensation approach with dynamic mode of load current / **V. J. Zhuikov, I. V. Verbytskyi, A. G. Kyselova** // *Технічна електродинаміка.* – 2018. – № 4. – С. 47-52. – doi: 10.15407/techned2018.04.047.
9. **Жежеленко, И. В.** Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / **И. В. Жежеленко,**

- Ю. Л. Саенко.** – Москва: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
10. **Жежеленко, И. В.** Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / **И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко, В. В. Нестерович.** – Москва: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
 11. **Camacho, Eduardo F.** Model Predictive control. / **Eduardo F. Camacho, Carlos Bordons Alba** // *Elsiver.* – 2013. – 405 p.
 12. **Maciejowski, Jan Marian.** Predictive control: with constraints / **Jan Marian Maciejowski** // *Pearson Education.* – 2002. – 331 p.
 13. **Qin, S. Joe.** A survey of industrial model predictive control technology / **S. Joe Qin, Thomas A. Badgwell** // *Control Engineering Practice.* – 2003. – Vol. 11, Iss. 7. – P. 733-764. – doi: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7.
 14. **Keebler, Philip F.** Meshing power quality and electromagnetic compatibility for tomorrow's smart grid / **Philip F. Keebler** // *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine.* – 2012. – Vol. 1, Iss. 2. – P. 100-103. – doi: 10.1109/MEMC.2012.6244982.
 15. **Dhia, Sonia Ben.** Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits: Techniques for low emission and susceptibility / **Sonia Ben Dhia, Mohamed Ramdani, Etienne Sicard** // *Springer Science & Business Media.* – 2006. – 473 p.

Bibliography (transliterated)

1. **Bezhenar, V., Mykolaets, D., Mykytyuk, V., Tereshchenko, T.** Multilevel inverter as var-compensator. *Electronics and Nanotechnology (ELNANO), IEEE XXXIII International Scientific Conference,* 2013, 370-372, doi: 10.1109/ELNANO.2013.6552076.
2. **Artemenko, M. Y., Batrak, L. M., Taher A. A.** Combined control system with direct current formation for three-phase four-wire network shunt active power filter. *IEEE 34th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO),* 2014, doi: 10.1109/ELNANO.2014.6873442.
3. **Davari, P., Yang, Y., Zare, F., Blaabjerg, F.** A Multipulse Pattern Modulation Scheme for Harmonic Mitigation in Three-Phase Multimotor Drives. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,* 2016, 4, 1, 174-185, doi: 10.1109/JESTPE.2015.2461018.
4. **Watanabe, E. H., Akagi, H., Aredes, M.** Instantaneous p-q power Theory for compensating nonsinusoidal systems. *In Nonsinusoidal Currents and Compensation,* 2008, 1-10, doi: 10.1109/ISNCC.2008.4627480
5. **Czarnecki, Leszek S.** Instantaneous Reactive Power p-q Theory and Power Properties of Three-Phase Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery,* 2006, 21, 1, 362-367, doi: 10.1109/TPWRD.2005.852348.
6. **Zhuikov, V., Verbytskyi, I., Bondarenko, O.** Features of compensation of a reactive power at the transient mode. *Electric Power Networks (EPNet),* 2016, 1-4, doi: 10.1109/EPNET.2016.7999362.
7. **Zhuikov, V. Y., Verbytskyi, I. V., Bondarenko, O. F.** Features of compensation of an instantaneous reactive power in linear circuits at the transient mode and switched on load [Osoblyvosti kompensatsiyi mytsevoyi reaktivnoyi potuzhnosti v liniynyh lantsyugah u perehidnomu rezhymy pry vmykanni navantazheniya] *Electronika ta zvyazok,* 2017, 22 (4), 30-37, doi: 10.20535/2312-1807.2017.22.4.105271.

8. **Zhuikov, V. J., Verbytskyi, I. V., Kyselova, A. G.** Reactive power compensation approach with dynamic mode of load current. *Technichna elektrodynamika*, 2018, **4**, 47-52, doi: 10.15407/techned2018.04.047.
9. **Zhezhelenko, I. V., Sayenko, Y. L.** Electrical energy quality in industrial enterprises [Kachestvo elektroenergii na promyshlennyh predpriyatiyah], Moskva, Energoatomizdat, 2005, 261.
10. **Zhezhelenko, I. V., Sayenko, Y. L., Baranenko, T. K., Nesterovich, V. V.** Selected questions of non-sine modes in electrical grids of enterprises [Izbrannye voprosy nesinusoidalnyh rezhymov v elektricheskikh setyah predpriyatiy], Moskva, Energoatomizdat, 2007, 296.
11. **Camacho, Eduardo F., Alba, Carlos Bordons.** Model Predictive control. Elsevier, 2013, 405.
12. **Maciejowski, Jan Marian.** Predictive control: with constraints. Pearson Education, 2002, 331.
13. **Qin, S.Joe., Badgwell, Thomas A.** A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 2003, **11**, Iss. 7, 733-764, doi: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7.
14. **Keebler, Philip F.** Meshing power quality and electromagnetic compatibility for tomorrow's smart grid. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2012, **1**, 2, 100-103, doi: 10.1109/MEMC.2012.6244982.
15. **Dhia, Sonia Ben, Ramdani, Mohamed, Sicard, Etienne.** Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits: Techniques for low emission and susceptibility. *Springer Science & Business Media*, 2006, 473.

Відомості про авторів (About authors)

Вербицький Євген Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри промислової електроніки, факультет електроніки, Київ, Україна; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

Ievgen Verbytskyi – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Ph. D., Assoc. Prof., The department of Industrial Electronics, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

Прибудько Роман Михайлович – студент, факультет електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

Roman Prybudko – student, Faculty of Electronics of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine.

Зінченко Денис Олександрович – студент, факультет електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

Denys Zinchenko – student, Faculty of Electronics of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

Мацюк Максим Олексійович – студент, факультет електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

Maxym Matsyuk – student, Faculty of Electronics of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Вербицький, Є. В. Компенсатор реактивної потужності у перехідних режимах / **Є. В. Вербицький, Р. М. Прибудько, Д. О. Зінченко, М. О. Мацюк** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 2. – С. 121-125. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.42.

Please, cite this article as:

Verbytskyi, I., Prybudko, R., Zinchenko, D, Matsyuk, M. Reactive power compensator in transient modes. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **26** (1302), 2, 121-125, doi:10.20998/2413-4295.2018.26.42.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Вербицкий, Е. В. Компенсатор реактивной мощности в переходных режимах / **Е. В. Вербицкий, Р. М. Прибудько, Д. А. Зинченко, М. А. Мацюк** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 2. – С. 121-125. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.42.

АННОТАЦИЯ В статье анализируются причины низкой эффективности компенсаторов реактивной мощности в переходных процессах. Рассчитываются ориентировочные значения коэффициента мощности при заданном графике потребления энергии емкостной, индуктивной и смешанной нагрузкой при использовании обычного компенсатора. Предложено использование дополнительного компенсатора, который устраняет высокочастотные искажения тока сети после основного компенсатора. Дана оценка значению коэффициента мощности при использовании предложенного подхода. Проанализировано увеличение установленной мощности дополнительного компенсатора от погрешности прогноза первой гармоники тока сети.

Ключевые слова: компенсатор реактивной мощности; коэффициент мощности; переходные процессы.

Поступила (received) 05.07.2018