

Д. Ю. ЛЕБЕДЬ, М. Й. БУРБЕЛО

АНАЛІЗ ПОМИЛОК УНІФІКОВАНОГО РЕГУЛЯТОРА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Ця стаття присвячена аналізу помилок уніфікованого регулятора якості електроенергії. У контексті зростаючої важливості надійного та якісного електропостачання, регулятори якості електроенергії стають ключовими пристроями для забезпечення стабільності мереж та задоволення потреб побутових споживачів. В роботі пропонується комплексний підхід до аналізу помилок уніфікованого регулятора якості електроенергії, основним призначенням якого є компенсація впливу швидкозмінних навантажень на якість електроенергії. При цьому аналізуються показники загального гармонічного спотворення якості електроенергії, а також враховуються фактори, такі як величина і тривалість навантажень. Значна частина статті присвячена дослідженню джерел помилок в уніфікованому регуляторі якості електроенергії. Виконується порівняння паралельно-послідовної та послідовно-паралельної топології уніфікованого регулятора якості електроенергії. Проаналізовано вплив алгоритму керування уніфікованого регулятора якості електроенергії на формування помилок кожної топології. Використовуючи засоби комп'ютерного моделювання Matlab/Simulink, у статті запропоновано структуру кількісного визначення помилок, яка дозволяє точно оцінювати помилки на різних етапах роботи уніфікованого регулятора якості електроенергії. Ця структура охоплює перетворення напруги та потужності в ряд Фур'є для комплексної оцінки величин помилок. Для підтвердження ефективності запропонованого аналізу помилок і стратегій компенсації, у статті представлено графіки результатів моделювання в часовій та частотній області. Описано помилки генерації активної, реактивної потужності та помилки заданого значення напруги. Ці висновки підкреслюють здатність уніфікованого регулятора якості електроенергії підвищувати якість електроенергії, незважаючи на похибки вимірювань. Основні результати включають аналіз відхилень показників якості напруги, встановлення зв'язку між помилками компенсації і недоліками у функціонуванні системи, а також розробку рекомендацій щодо поліпшення ефективності компенсаційних пристроїв.

Ключові слова: уніфікований регулятор якості електроенергії, загальне гармонічне спотворення, середнє квадратичне значення, активний фільтр, ряд Фур'є.

D. LEBED, M. BURBELO

ANALYSIS OF UNIFIED POWER QUALITY CONDITIONER ERRORS

This article is devoted to error analysis of the unified power quality regulator. In the context of the growing importance of reliable and high-quality power supply, power quality regulators are becoming key devices to ensure the stability of networks and meet the needs of domestic consumers. The paper proposes a comprehensive approach to error analysis of the unified power quality conditioner, the main purpose of which is to compensate for the impact of rapidly changing loads on power quality. At the same time, indicators of general harmonic distortion of the quality of electricity are analyzed, and factors such as the magnitude and duration of loads are also taken into account. A large part of the article is devoted to the study of the sources of errors in unified power quality conditioner. A comparison of the parallel-serial and series-parallel topologies of unified power quality conditioner is performed. The influence of the unified power quality conditioner control algorithm on the formation of errors of each topology is analyzed. Using Matlab/Simulink computer simulation tools, the article proposes a framework for error quantification, which allows accurate estimation of errors at various stages of unified power quality conditioner operation. This framework covers the Fourier series transformation of voltage and power for comprehensive estimation of error magnitudes. To confirm the effectiveness of the proposed error analysis and compensation strategies, the article presents graphs of simulation results in the time and frequency domains. Active and reactive power generation errors and voltage setpoint errors are described. These findings emphasize the ability of unified power quality conditioner to improve the quality of electricity, despite measurement errors. The main results include the analysis of deviations of voltage quality indicators, the establishment of a connection between compensation errors and deficiencies in the functioning of the system, as well as the development of recommendations for improving the efficiency of compensation devices.

Keywords: unified power quality conditioner (UPQC), total harmonic distortion (THD), root mean square (RMS), active filter, Fourier series.

Вступ. В останні роки зростаючий попит на надійне та якісне електропостачання привернув значну увагу до питань, пов'язаних з якістю електроенергії. Збільшення частки неконвенційних навантажень стало серйозною проблемою, що призводить до коливань напруги, гармонічних спотворень та інших проблем з якістю електроенергії. Щоб вирішити ці проблеми та забезпечити стабільне та ефективне постачання електроенергії, дослідники та інженери зосередилися на розробці пристроїв підвищення якості електроенергії [1–3].

Аналіз останніх досліджень. Одним з таких пристроїв, що набув значного поширення, є уніфікований регулятор якості електроенергії (УРЯЕ). УРЯЕ – це складний пристрій кондиціонування електроенергії, який працює в режимі послідовної та паралельної компенсації, що дозволяє одночасно зменшувати спотворення напруги та струму. Він призначений для зменшення різноманітних перешкод

якості електроенергії, таких як провали, коливання та несинусоїдність напруги [4–6].

Результати цього дослідження не тільки сприятимуть розумінню роботи УРЯЕ, але й надають цінну інформацію для інженерів енергосистем і комунальних компаній щодо можливості підвищення якості електроенергії в умовах швидкої зміни навантажень. Зрештою, наше дослідження спрямоване на сприяння прогресу в компенсації якості електроенергії та сприяння розвитку більш ефективних і стійких систем розподілу електроенергії [7, 8].

Аналіз помилок компенсації навантажень, що швидко змінюються, за допомогою компенсуючих пристроїв, таких як УРЯЕ, можна виконати шляхом порівняння вимірних сигналів напруги до і після компенсації. Це порівняння можна зробити за допомогою різних показників помилок, таких як середнє квадратичне напруга, струм та загальне

© Д. Ю. Лебедь, М. Й. Бурбело, 2023

гармонічне спотворення напруги, що визначені міжнародними стандартами [9, 10].

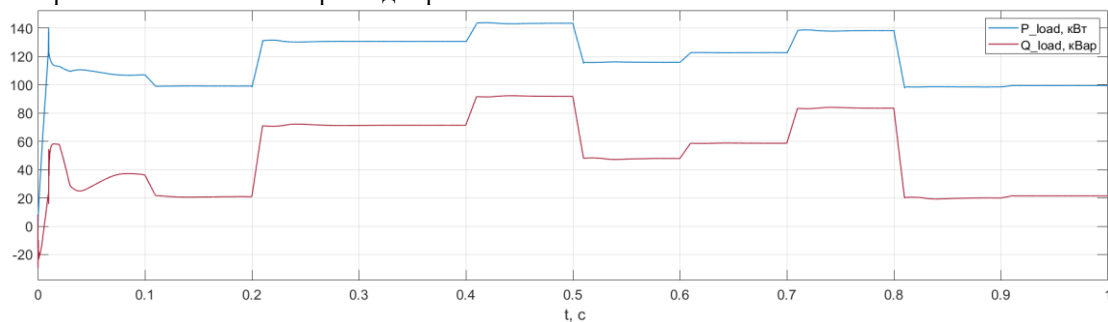
Метою роботи є всебічний аналіз помилок, які можуть виникнути під час компенсації швидкозмінних навантажень при роботі УРЯЕ. Шляхом математичного моделювання ми прагнемо визначити джерела помилок компенсації та оцінити їхній вплив на загальну ефективність УРЯЕ. Розуміючи ці помилки, ми прагнемо зрозуміти, як покращити стратегію компенсації та підвищити ефективність УРЯЕ за різних сценаріїв динамічного навантаження.

Виклад основного матеріалу. Для аналізу помилки компенсації впливу швидкозмінних навантажень використана змодельована в середовищі Simulink пакету прикладних програм Matlab електрична мережа з нелінійним швидкозмінним навантаженням, вплив якого на якість електроенергії компенсується за допомогою УРЯЕ. УРЯЕ представлений у вигляді паралельного та послідовного активних фільтрів. В залежності від виконання УРЯЕ ці фільтри можуть бути з'єднані за паралельно-послідовною (1) та послідовно-паралельною (2) схемами, в яких паралельний компенсатор вмикається або зі сторони джерела або зі

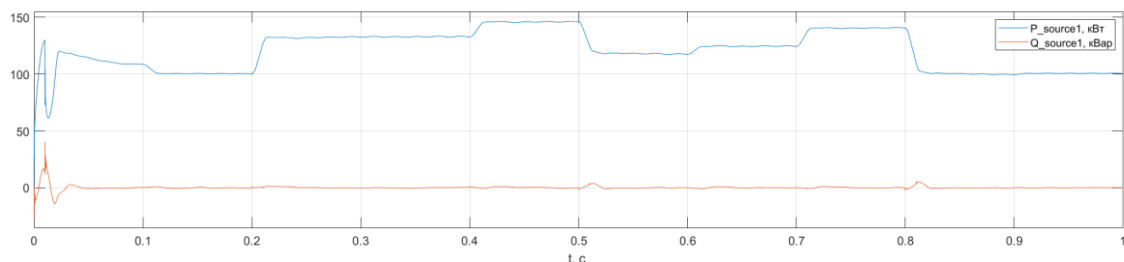
сторони навантаження. На рисунках дані схеми з'єднання позначені цифрами 1 для паралельно-послідовної та 2 для послідовно-паралельної топологій. Схема керування послідовним та паралельним фільтром класична, за винятком кола керування напругою конденсатора в паралельному фільтрі, що описана в [11, 12]. Перевага даної схеми керування полягає в покращеній роботі на верхніх частотах. В основу паралельного і послідовного фільтрів покладено тривірневий інвертор напруги на IGBT транзисторах.

Графіки активної та реактивної потужностей навантаження до $P_{load}(t)$, $Q_{load}(t)$ і після $P_{source}(t)$, $Q_{source}(t)$, компенсації для УРЯЕ з паралельно-послідовною та послідовно-паралельною схемами зображені, відповідно, на рис. 1 а, б та в.

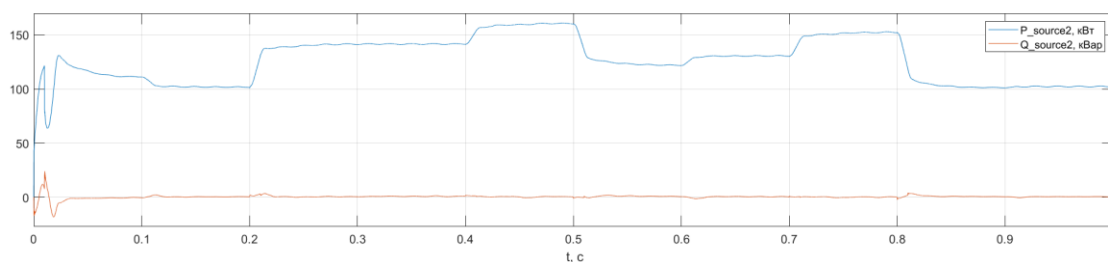
З графіків, показаних на рис. 1 а, можна оцінити величину навантаження та характер його зміни. Активне навантаження змінюється в діапазоні від 100 до 142 кВт, реактивне – від 20 до 90 кВар. Дискретність зміни навантаження складає 0,1 с. З рис. 1 б та в видно, що активне навантаження практично не змінюється, а реактивне – практично повністю скомпенсовано.



а



б



в

Рисунок 1 – Графіки зміни активної та реактивної потужності навантаження до (а) та після компенсації (б, в)

Відповідні напруги на навантаженні до $U_{load}(t)$ та після $U_{comp}(t)$ компенсації зображені на рис. 2 а, б та в. В результаті компенсації відхилень напруги (рис. 2 б) можна побачити незначні перерегулювання напруги, які виникають в результаті помилки УРЯЕ з паралельно-послідовною схемою. На рис. 2 в, можна побачити значне зниження напруги, що виникає у разі застосування УРЯЕ послідовно-паралельною схемою.

Помилки формування активної та реактивної потужності, а також напруги знаходяться за формулами:

$$\begin{aligned} E_P(t) &= P_{load}(t) - P_{source}(t); \\ E_Q(t) &= Q_{load}(t) - Q_{comp}(t); \\ E_U(t) &= U_{load}(t) - U_{ref}(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Проаналізуємо помилки для паралельно-послідовної та послідовно-паралельної схем. Графіки помилок активної (E_{P1} , E_{P2}) та реактивної (E_{Q1} , E_{Q2}) потужності і напруги (E_{U1} , E_{U2}) для обох схем УРЯЕ зображені, відповідно, на рис. 3 а, б та в.

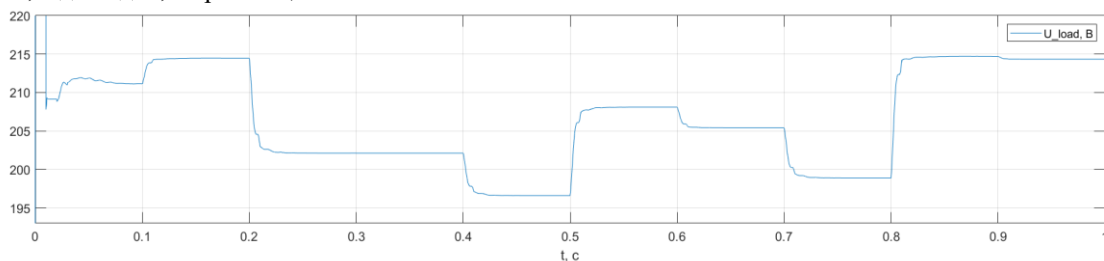
Додаткова генерація активної потужності (рис. 3 а) УРЯЕ виникає внаслідок розряду конденсатора (рис. 4). Так для послідовно-паралельної схеми УРЯЕ напруга на конденсаторі під час зміни навантаження зменшується на 200 В.

Пульсації реактивної потужності (рис. 3 б) згладжуються вихідним С-фільтром.

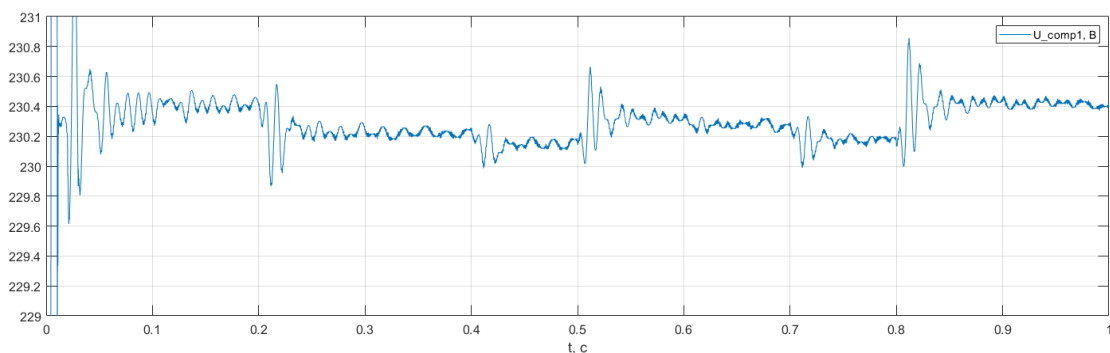
В основу аналізу гармонічних помилок роботи УРЯЕ покладено розклад періодичного сигналу помилки в ряд Фур'є:

$$\begin{aligned} E_P(\omega) &= P_{load}(\omega) - P_{source}(\omega); \\ E_Q(\omega) &= Q_{load}(\omega) - Q_{comp}(\omega); \\ E_U(\omega) &= U_{load}(\omega) - U_{ref}(\omega). \end{aligned} \quad (2)$$

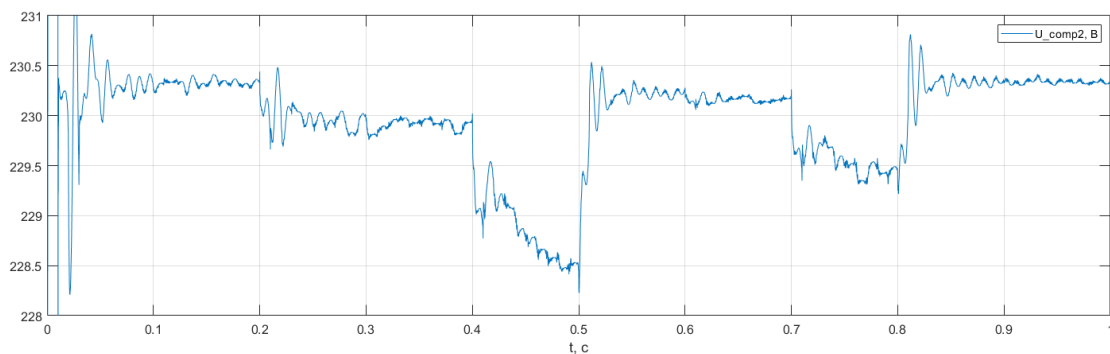
Для періодичного сигналу помилки активної та реактивної потужності та середньоквадратичної напруги з усередненням на інтервалі часу $T/2$ характерними є 2, 6 та 12 гармоніки.



а

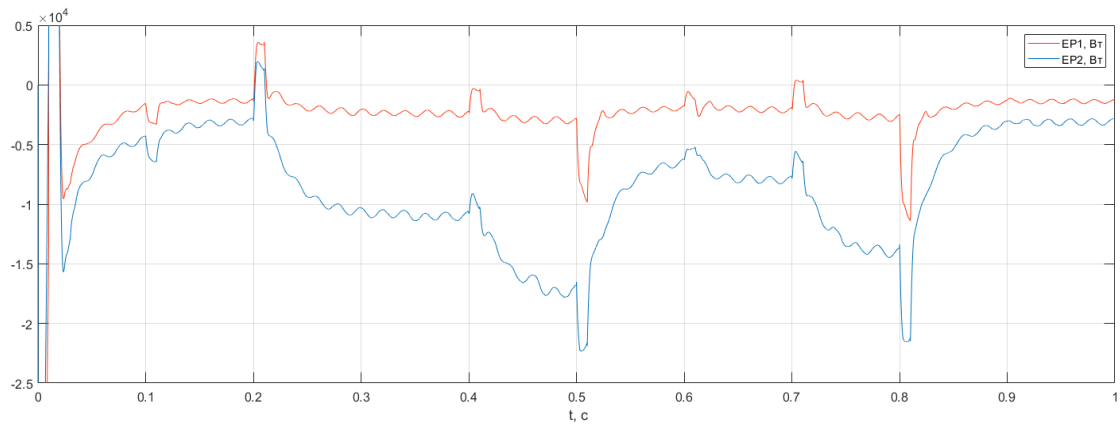


б

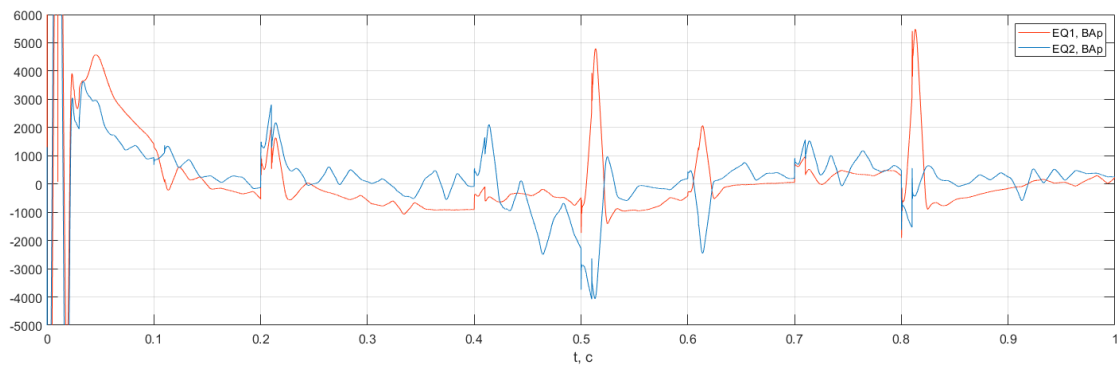


в

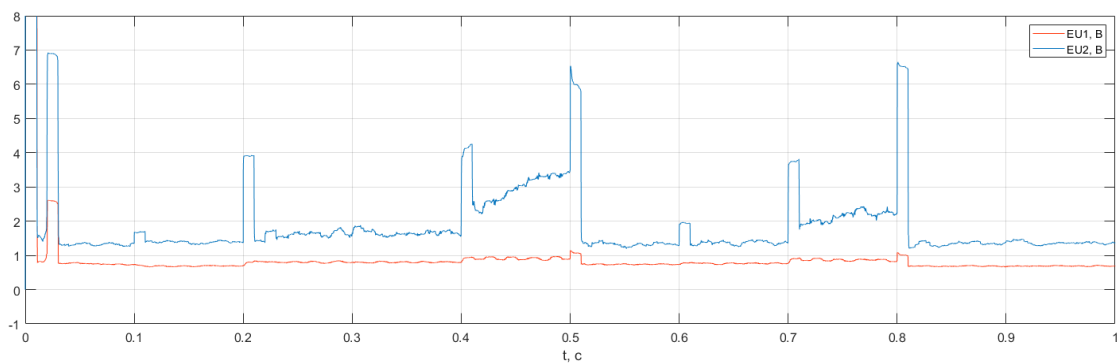
Рисунок 2 – Графіки зміни напруги на навантаженні до (а) та після (б, в) компенсації



а



б



в

Рисунок 3 – Графіки зміни помилок компенсації активної (а) і реактивної (б) потужності та напруги (в)

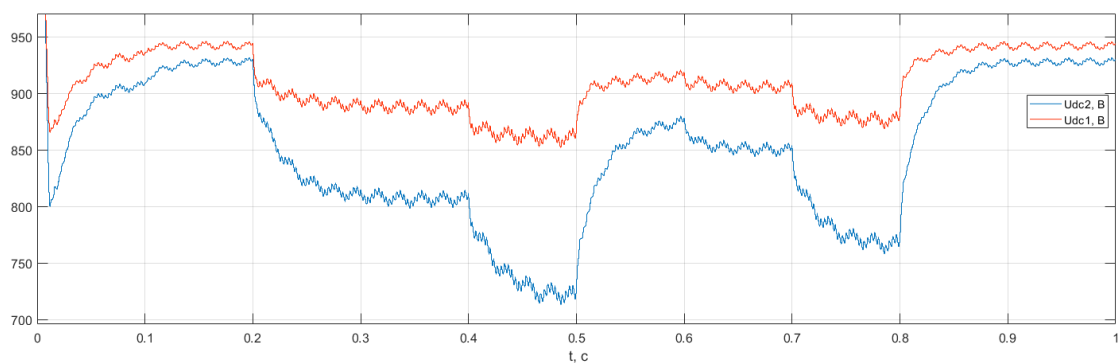


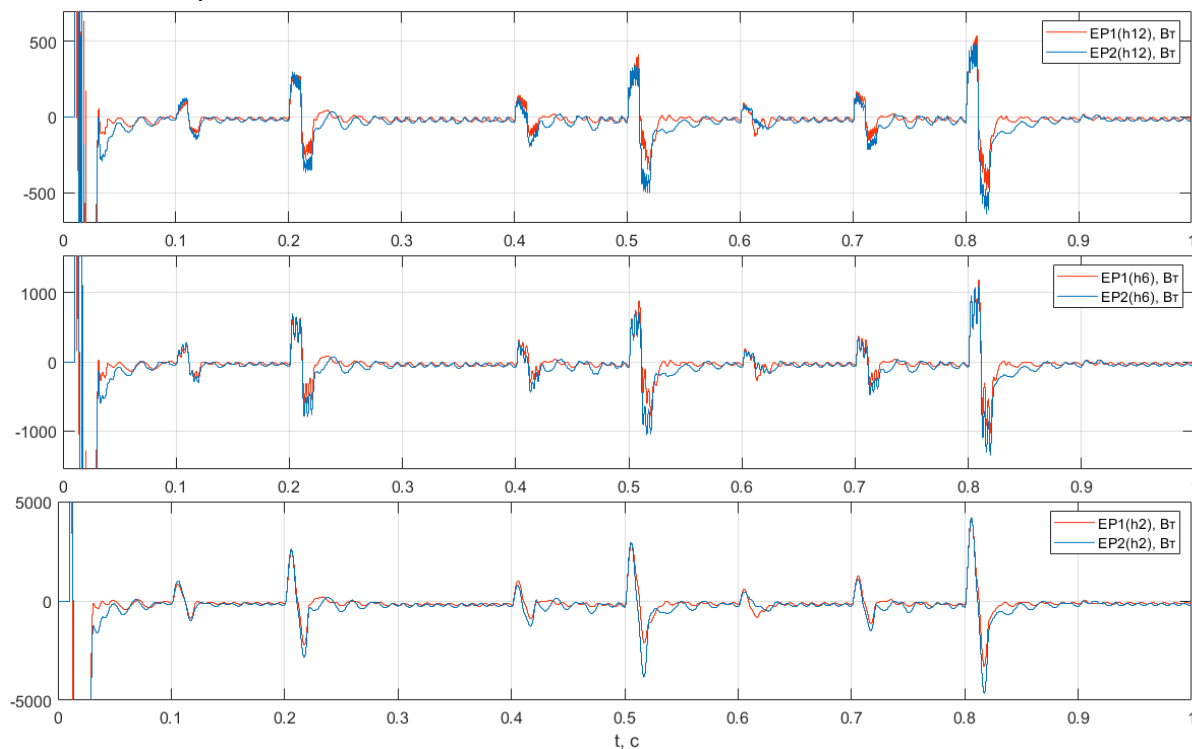
Рисунок 4 – Графіки зміни напруги на конденсаторі

На рис. 5 а та б зображено графіки 2, 6 та 12 гармонічних складових помилок, відповідно, активної та реактивної потужності.

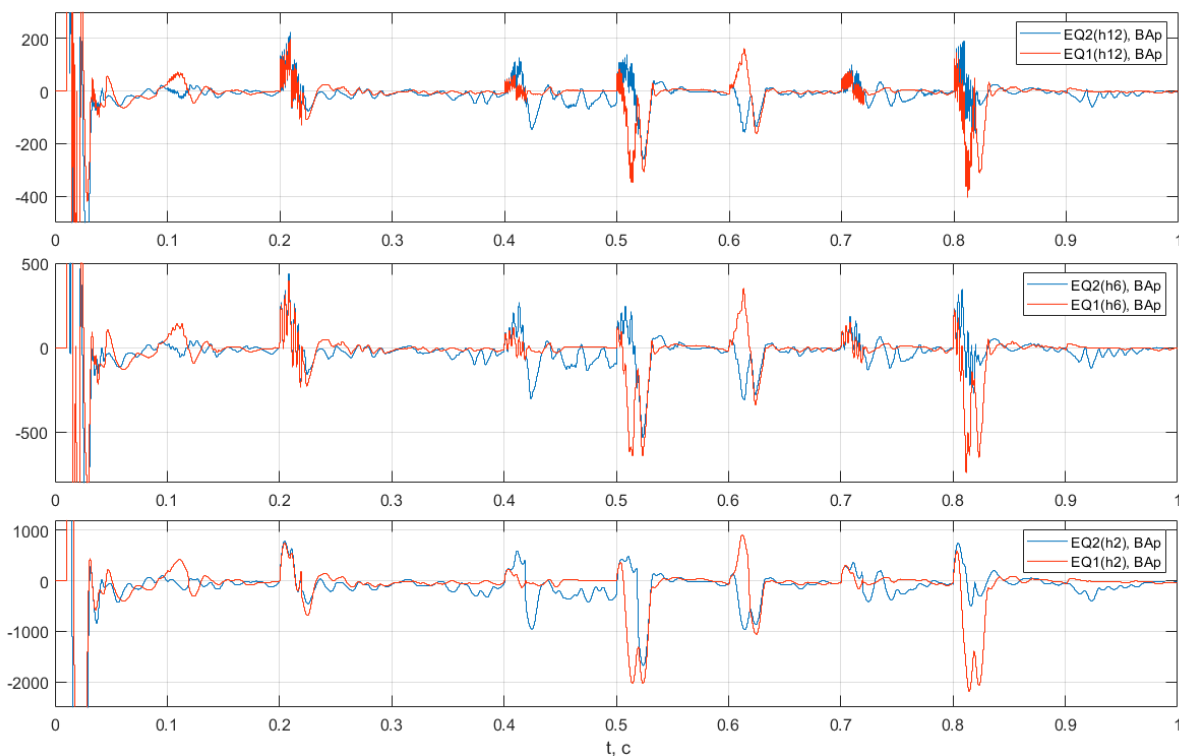
Помилка для 2 гармоніки зумовлена несиметрією навантажень під час перехідного процесу. Наростання амплітуди помилки по активній потужності призведе до сповільнення реакції системи на виявлення

швидкозмінного навантаження та неповної компенсації реактивної потужності.

Для 6 і 12 гармонік характерне формування компенсаційного сигналу гармонік, що залежить від рівня загального гармонічного спотворення сигналу напруги.



а



б

Рисунок 5 – Графіки 2, 6 та 12 гармонічних складових помилок активної (а) та реактивної (б) потужності

Значні перерегулювання для послідовно-паралельної (2) схеми УРЯЕ, показують його нижчу ефективність для компенсації вищих гармонік струму та напруги.

Складові 2, 6 та 12 гармонік напруги помилки формування заданого значення напруги $U_{ref}(t)$ представлені на рис. 6.

Значні пульсації, що виникають під час перехідного процесу на 2, 6 та 12 гармоніках, для паралельно-послідовної схеми УРЯЕ, вказують на ефективну компенсацію коливань напруги таким УРЯЕ (рис. 3 в) в усіх режимах зміни навантаження.

Рекомендації для зменшення помилок. В процесі аналізу залежності помилок УРЯЕ, виявлено:

1. помилка по потужності $E_P(t)$ не піддається регулюванню. Вона зменшується лише зі зменшенням навантаження. Для послідовно-паралельної (2) схеми УРЯЕ характерне значне зменшення цієї помилки за малих навантажень. При цьому підвищується ефективність компенсації гармонік;

2. помилка по реактивній потужності $E_Q(t)$ залежить від значення згладжувального конденсатора C , що встановлений на вході паралельного конденсатора.

3. помилка по напрузі $E_U(t)$ залежить від потужності УРЯЕ та може незначно змінюватися зі зміною індуктивності L , що встановлена на вході паралельного конденсатора. Однак незначна зміна цієї індуктивності може значно вплинути на стійкість всієї системи.

Для паралельно-послідовної схеми УРЯЕ характерна необхідність встановлення L фільтра зі сторони послідовного конденсатора, що призводить до покращення компенсації вищих гармонік напруги. Для послідовно-паралельної схеми УРЯЕ це має протилежний ефект.

Висновки. У даній роботі було проведено аналіз помилок компенсації швидкозмінних навантажень і їх впливу на якість електроенергії. Виконано математичне моделювання, щоб виявити і оцінити помилки компенсації, що виникають під час роботи компенсаційних пристроїв, та їхній вплив на систему електропостачання.

За результатами аналізу було встановлено, що помилки компенсації швидкозмінних навантажень можуть призводити до відхилень в якості напруги, порушення стабільності системи електропостачання та зниження ефективності обладнання. Виявлено, що тривалість та величина навантаження впливає на якість роботи послідовно-паралельної топології УРЯЕ. Для паралельно-послідовної топології УРЯЕ наявний незначний запас по потужності.

Виявлено, що паралельно-послідовна топологія працює гармонійно зі швидкозмінним навантаженням. На відміну від послідовно-паралельної топології, в якій зміна параметрів системи керування погіршить роботу УРЯЕ.

Список літератури

1. Fujita H., Akagi H. The unified power quality conditioner: the integration of series- and shunt-active filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1998. Vol. 13, no. 2. P. 315–322. DOI: <https://doi.org/10.1109/63.662847>.
2. Khadkikar V., Agarwal P., Chandra A., Barry A., Nguyen T. A simple new control technique for unified power quality conditioner (UPQC). *2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Lake Placid, NY, USA, 12–15 September 2004. P. 289–293. DOI: <https://doi.org/10.1109/ichqp.2004.1409369>.
3. Khadkikar V., Chandra A., Barry A. O., Nguyen T. D. Power quality enhancement utilising single-phase unified power quality conditioner: digital signal processor-based experimental validation. *IET Power Electronics*. 2011. Vol. 4, no. 3. P. 323–331. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2010.0031>.

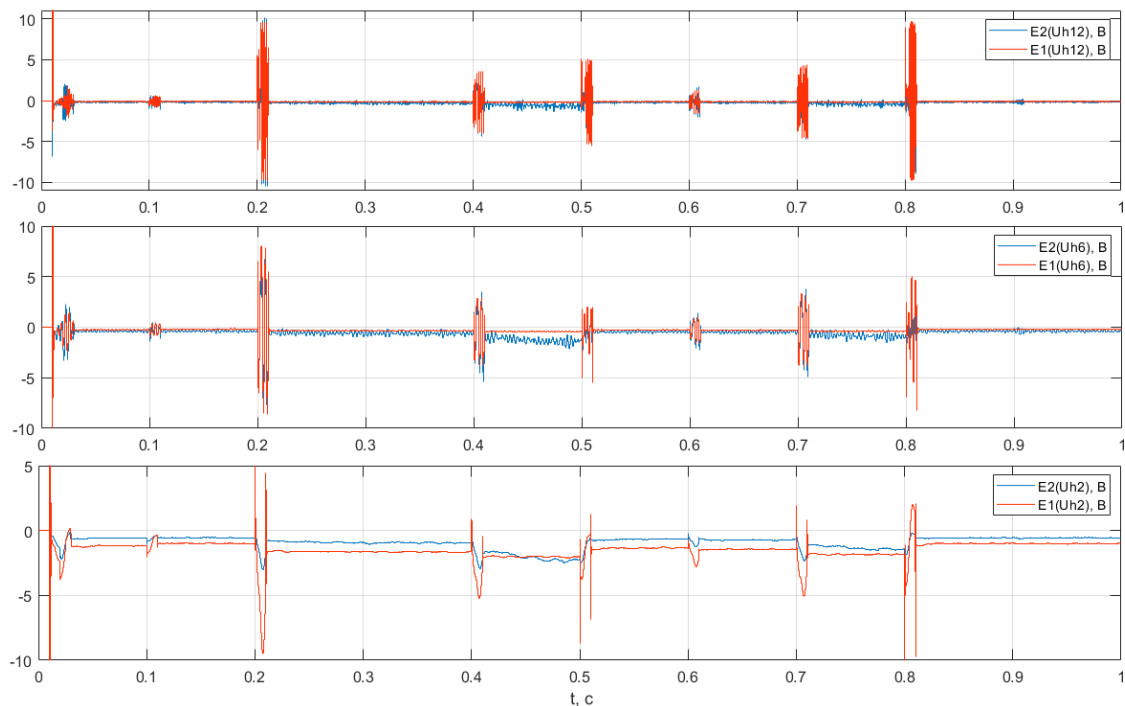


Рисунок 6 – Графіки 2, 6 та 12 гармонічних складових помилки формування заданого значення напруги

4. Maozhong G., Hankui L., Hanjun G., Dianguo X. Active voltage regulator based on novel synchronization method for unbalance and fluctuation compensation. *28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Sevilla, Spain, 5–8 November 2002. P. 1374–1379. DOI: <https://doi.org/10.1109/iecon.2002.1185476>.
5. Axente I., Ganesh J. N., Basu M., Conlon M. F., Gaughan K. A 12-kVA DSP-Controlled Laboratory Prototype UPQC Capable of Mitigating Unbalance in Source Voltage and Load Current. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010. Vol. 25, no. 6. P. 1471–1479. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpe.2010.2040635>.
6. Esfandiari A., Parniani M., Mokhtari H. Mitigation of electric arc furnace disturbances using the unified power quality conditioner. *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004*, Busan, South Korea, 2–6 November 2004. P. 1469–1474. DOI: <https://doi.org/10.1109/iecon.2004.1431795>.
7. Siva Kumar G., Kalyan Kumar B., Mahesh Kumar M. Optimal VA loading of UPQC during mitigation of unbalanced voltage sags with phase jumps in three-phase four-wire distribution system. *2010 International Conference on Power System Technology - (POWERCON 2010)*, Zhejiang, Zhejiang, China, 24–28 October 2010. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/powercon.2010.5666492>.
8. Elnady A., El-khattam W., Salama M. M. A. Mitigation of AC arc furnace voltage flicker using the unified power quality conditioner. *Winter Meeting of the Power Engineering Society*, New York, NY, USA, 27–31 January 2002. P. 735–739. DOI: <https://doi.org/10.1109/pesw.2002.985101>.
9. Khadkikar V., Chandra A., Barry O., Nguyen T. Application of UPQC to protect a sensitive load on a polluted distribution network. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, Que., Canada, 18–22 June 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/pes.2006.1709522>.
10. Бурбело М. Й., Гадай А. В., Степура О. В. Визначення пульсуючої потужності в несиметричних несинусоїдних режимах електричних мереж. *Технічна електродинаміка*. 2019. Т. 2019, № 1. С. 42–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.042>.
11. Бурбело М. Й., Лебедь Д. Ю., Лещенко О. Р. Оптимізація часу заряду/розряду конденсаторів активного фільтра під час коливань напруги. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 309, № 3. С. 119–124. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-309-3-119-124>.
12. Бурбело М. Й., Лебедь Д. Ю. Дослідження ефективності схеми керування напругою конденсатора уніфікованого регулятора якості електроенергії для зменшення коливань напруги. *Вісник Вінницького Політехнічного Інституту*. 2023. Т. 166, № 1. С. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-166-1-21-28>.
- Sep. 12–15, 2004. pp. 289–293, doi: <https://doi.org/10.1109/ichqp.2004.1409369>.
3. V. Khadkikar, A. Chandra, A. O. Barry, and T. D. Nguyen, “Power quality enhancement utilising single-phase unified power quality conditioner: Digital signal processor-based experimental validation”, *IET Power Electronics*, vol. 4, no. 3, pp. 323–331, 2011, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2010.0031>.
4. G. Maozhong, L. Hankui, G. Hanjun, and X. Dianguo, “Active voltage regulator based on novel synchronization method for unbalance and fluctuation compensation”, in *28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Sevilla, Spain, Nov. 5–8, 2002. pp. 1374–1379, doi: <https://doi.org/10.1109/iecon.2002.1185476>.
5. I. Axente, J. N. Ganesh, M. Basu, M. F. Conlon, and K. Gaughan, “A 12-kva dsp-controlled laboratory prototype UPQC capable of mitigating unbalance in source voltage and load current”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 6, pp. 1471–1479, Jun. 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/tpe.2010.2040635>.
6. A. Esfandiari, M. Parniani, and H. Mokhtari, “Mitigation of electric arc furnace disturbances using the unified power quality conditioner”, in *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004*, Busan, South Korea, Nov. 2–6, 2004. pp. 1469–1474, doi: <https://doi.org/10.1109/iecon.2004.1431795>.
7. G. Siva Kumar, B. Kalyan Kumar, and M. Mahesh Kumar, “Optimal VA loading of UPQC during mitigation of unbalanced voltage sags with phase jumps in three-phase four-wire distribution system”, in *2010 International Conference on Power System Technology - (POWERCON 2010)*, Zhejiang, Zhejiang, China, Oct. 24–28, 2010. pp. 1–8, doi: <https://doi.org/10.1109/powercon.2010.5666492>.
8. A. Elnady, W. El-khattam, and M. M. A. Salama, “Mitigation of AC arc furnace voltage flicker using the unified power quality conditioner”, in *Winter Meeting of the Power Engineering Society*, New York, NY, USA, Jan. 27–31, 2002. pp. 735–739, doi: <https://doi.org/10.1109/pesw.2002.985101>.
9. V. Khadkikar, A. Chandra, A. O. Barry, and T. D. Nguyen, “Application of UPQC to protect a sensitive load on a polluted distribution network”, in *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, Que., Canada, Jun. 18–22, 2006, doi: <https://doi.org/10.1109/pes.2006.1709522>.
10. M. J. Burbelo, A. V. Hadai, and O. V. Stepura, “Determination of the oscillating power in asymmetrical non-sinusoidal modes of electric networks”, *Tekhnichna Elektrodynamika*, vol. 2019, no. 1, pp. 42–49, Jan. 2019, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.042>. (in Ukrainian)
11. M. Burbelo, D. Lebed, and O. Leshchenko, “Optimization of charge / discharge time of active filter capacitors during voltage fluctuations”, *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, vol. 309, no. 3, pp. 119–124, May 2022, doi: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-309-3-119-124>. (in Ukrainian)
12. M. Y. Burbelo and D. Y. Lebed, “Investigation of the efficiency of the capacitor voltage control circuit of a unified electricity quality regulator to reduce voltage fluctuations”, *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, vol. 166, no. 1, pp. 21–28, 2023, doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-166-1-21-28>. (in Ukrainian)

Надійшла (received) 25.09.2023

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Лебедь Денис Юрійович (Denys Lebed) – аспірант кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет; м. Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9741>; e-mail: 4e15b.lebyd@gmail.com.

Бурбело Михайло Йосипович (Mykhailo Burbelo) – доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту; м. Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4510-2911>; e-mail: burbelomj@gmail.com.