

Р.В. Власенко, О.В. Бялобржеський

ОБМЕЖЕННЯ СТРУМУ ТРИФАЗНОГО СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРА В УМОВАХ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ ТА КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Мета. Метою роботи є розробка методики обмеження до гранично допустимого рівня струму трифазного силового активного фільтра (САФ) в умовах перевантаження або короткого замикання та системи для реалізації методики. *Методика.* Для проведення досліджень використовувались положення pq -теорії миттєвої потужності, метод теорії автоматичного управління в системах з релейними регуляторами, методи моделювання в середовищі візуального програмування. *Результати.* Як режим перевантаження так і аварійний режим короткого замикання, з використанням запропонованого рішення, не призводять до суттєвих змін рівня напруги на накопичуючому конденсаторі, відповідно підтримуючи стабільність роботи силової частини силового активного фільтра. *Наукова новизна.* При тимчасових перевантаженнях за струмом та коротких замикань у вузлі мережі до якого приєднують силовий активний фільтр, обмеження його струму виконують шляхом масштабування діючого струму до рівня припустимого за умов нормальної роботи напівпровідникових елементів пристрою, що дозволяє в зазначених режимах реалізовувати основний алгоритм роботи. *Практичне значення.* Запропоноване рішення може бути використаним як засіб захисту силової частини пристрою у разі перевантаження, що, у разі виникнення аварійних ситуацій, та їх усунення забезпечить автоматичне поновлення нормального режиму пристрою. Бібл. 11, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: силовий активний фільтр, pq -теорія миттєвої потужності, релейне регулювання струму, діюче значення струму, зона гістерезису.

Цель. Целью работы является разработка методики ограничения до предельно допустимого уровня тока трехфазного силового активного фильтра (САФ) в условиях перегрузки или короткого замыкания и системы для реализации методики. *Методика.* Для проведения исследований использовались положения pq -теории мгновенной мощности, метод теории автоматического управления в системах с релейными регуляторами, методы моделирования в среде визуального программирования. *Результаты.* Как режим перегрузки, так и аварийный режим короткого замыкания, с использованием предлагаемого решения, не приводят к существенным изменениям уровня напряжения на накопительном конденсаторе, соответственно поддерживая стабильность работы силовой части силового активного фильтра. *Научная новизна.* При временных перегрузках по току и коротких замыканий в узле сети, к которому присоединяют силовой активный фильтр, ограничения его тока выполняют путем масштабирования действующего тока до уровня допустимого в условиях нормальной работы полупроводниковых элементов устройства, позволяет в указанных режимах реализовывать основной алгоритм работы. *Практическое значение.* Предложенное решение может быть использовано как средство защиты силовой части устройства в случае перегрузки, или в случае возникновения аварийных ситуаций, а их устранение обеспечит автоматическое обновление нормального режима устройства. Библ. 11, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: силовой активный фильтр, pq -теория мгновенной мощности, релейное регулирование тока, действительное значение тока, зона гистерезиса.

Вступ. В промисловості широко застосовуються перетворювачі частоти, тиристорні перетворювачі, інвертори, випрямлячі призначені для керування потоком енергії електромеханічних та електротехнічних пристроїв. Ці перетворювачі за принципом дії їхньої силової частини значно впливають на якість електричної енергії. Тим самим негативно впливають на самі електромеханічні та електротехнічні пристрої, електричні машини і апарати. Компенсація, виникаючої при роботі таких перетворювачів, реактивної потужності та фільтрація вищих гармонік струму, генерованих зазначеними вище пристроями, є на теперішній час актуальною задачею. Використання фільтрів гармонік та компенсуючих конденсаторних батарей у випадку керованих перетворювачів не призводить до отримання бажаного результату із забезпечення якості електричної енергії [1].

Інновацією в питанні компенсації реактивної потужності та фільтрації вищих гармонік струму є застосування активних компенсуючих пристроїв – силових активних фільтрів (САФ) [2, 3]. САФ мають можливість, завдяки закладеному алгоритму, виконувати компенсацію реактивної потужності і фільтрацію вищих гармонік струму. Струм САФ формується на

основі алгоритмів активної фільтрації, що базуються на одній з теорій потужності: теорії повної потужності Фрізе [4], pq -теорії миттєвої потужності [5], pqr -теорії миттєвої потужності [6] та інших. Це залежить від режиму нейтралі вузла мережі до якого приєднують САФ, що в свою чергу впливає на структуру його силової частини.

Аналіз попередніх досліджень. Струм САФ формується на підставі струму навантаження та напруги мережі відповідно до існуючих методів визначення компонент потужності або струму [4-6].

У вузлах системи електроспоживання виникають режими зумовлені перевантаженнями технологічних механізмів. Це можливо, як за технологічним процесом, так і у разі нештатних чи аварійних ситуацій. Критичним випадком перевантаження вузла електричної мережі є виникнення короткого замикання на поточній, або суміжній ділянці. Зважаючи на алгоритм роботи, за умов виникнення аварійних ситуацій чи перевантаження система керування САФ буде намагатися формувати струм, який ймовірно перевищуватиме розрахунковий струм силової частини. Безумовно на етапі проектування промислового зразка

в силову частину САФ будуть введені елементи захисту, але задачу захисту можливо вирішити й іншим шляхом.

Елементи силової частини САФ вибираються виходячи з розрахункового режиму: частота комутації, робочий (номінальний) струм і робоча (номінальна) напруга, напруга накопичуючого конденсатора в колі знакопостійної напруги [7, 8].

Таким чином, постає задача обмеження заданого струму САФ в частині алгоритму активної фільтрації при наступних умовах:

1) в умовах перевантаження САФ – при струмі навантаження, діюче значення якого перевищує гранично-припустимий рівень, на який розрахована силова частина САФ;

2) в умовах короткого замикання кола навантаження САФ на поточній чи суміжній ділянках системи електропостачання на період достатній для спрацювання протиаварійної автоматики.

Метою роботи є розробка методики обмеження до гранично допустимого рівня струму трифазного силового активного фільтру в умовах перевантаження або короткого замикання та системи для реалізації методики.

Основний матеріал. САФ забезпечує формування заданого струму i_{apf}^* , який в ході роботи пристрою порівнюється з актуальним струмом САФ (струм отриманий з датчиків), регулювання вихідного параметру за відхиленням. За принципом релейного регулювання похибка струму, а точніше її знак, є ознакою для формування імпульсів керування транзисторами верхнього чи нижнього плеча перетворювача [11].

Виконання обмеження шляхом застосування відповідної ланки обмеження призведе до зміни форми струму, відповідно це призведе до порушення процедури формування струму і, як наслідок принципу компенсації. Таким чином, у якості раціонального рішення запропоновано ідею масштабування струму до величини, що не перебільшуватиме припустиме діюче значення струму напівпровідникових вентилів силової частини I_{max} .

На основі викладеного, пропонується наступна методика обмеження струму САФ:

1. Задають значення максимального струму I_{max} зумовлене властивостями вентилів перетворювача САФ.

2. Визначають діюче значення заданого струму САФ i_{apf}^* за період основної гармоніки ($T = 0,02$ с):

$$I_{RMS} = \|i_{apf}^*\| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (i_{apf}^*)^2 dt} . \quad (1)$$

3. Визначають співвідношення визначеного діючого значення струму до заданого максимального.

$$k = \frac{I_{max}}{I_{RMS}} . \quad (2)$$

4. У разі, якщо діюче значення струму САФ нижче максимального, виконувати обмеження не потрібно, тобто параметр масштабування повинен дорівнювати одиниці. У разі якщо діюче значення струму САФ

вище максимального, необхідно виконувати обмеження на величину перевищення, таким чином коефіцієнт масштабування:

$$K = \begin{cases} 1, & \text{for } k \geq 1 \\ k, & \text{for } k < 1 \end{cases} . \quad (3)$$

Такі умови можливо виконати з використанням блоку обмеження.

5. Поточне задане значення струму САФ масштабують:

$$i_{apf}^{**} = K \cdot i_{apf}^* . \quad (4)$$

Для реалізації розробленої методики пропонується блок схема підсистеми обмеження струму силового активного фільтру, що наведена на рис. 1.

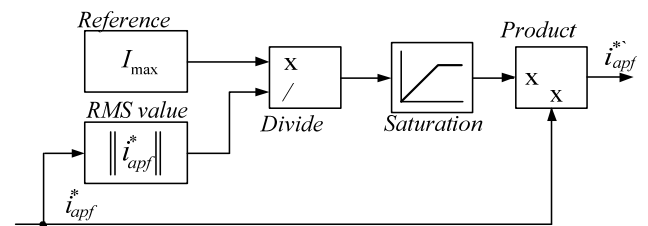


Рис. 1. Блок-схема підсистеми обмеження струму САФ

Запропонована блок-схема (рис. 1) реалізована в підсистемі формування струму (*pq-theory power control*), системи керування САФ у складі електроенергетичного комплексу, модель якого (рис. 2) побудовано в графічному середовищі імітаційного моделювання та розкрито в роботі [9]. Для визначення струму компенсації САФ обрано *pq*-теорію миттєвої потужності [4], а в якості методу імпульсного управління транзисторами перетворювача – метод релейного регулювання струму (PPC) [11], блок (*Relay current control*) (рис. 2).

Нелінійне навантаження представлено трифазним тиристорним перетворювачем (*Thyristor converter*) з активно-індуктивним навантаженням (*RL-load*) з параметрами $R_{ld} = 0,666$ Ом і $L_{ld} = 0,0386$ Гн, що при куті керування 45° в тиристорному перетворювачі відповідає розрахунковій потужності $P_{ld} = 66$ кВт, $Q_{ld} = 135$ кВАр. За параметрами навантаження з урахуванням припустимого відхилення напруги розраховано та введено в схему трифазне джерело електричної енергії [10] (*Three-phase source*) з наступними параметрами: діюче значення міжфазної напруги $U_s = 380$ В, частота $f_s = 50$ Гц, активний і реактивний опори відповідно $R_s = 0,1$ Ом та $L_s = 1,3 \cdot 10^{-5}$ Гн.

Елементи силової частини трифазного САФ розраховані за методикою [7]: індуктивність реактора $L = 0,0054$ Гн; напруга конденсатора $U_{dc} = 2000$ В; ємність конденсатора $C = 20 \cdot 10^{-3}$ Ф [9]. Значення зона гістерезису (струмової трубки) в методі PPC дорівнює $NB = 10$, що відповідає 5 % від номінального струму навантаження [11].

Проведено дослідження роботи моделі в режимі перевищення максимального робочого струму в разі перевантаження (рис. 3, 4) та в режимі аварійного короткого замикання (рис. 5, 6) з використанням блоку *Three-Phase Fault* (рис. 2).

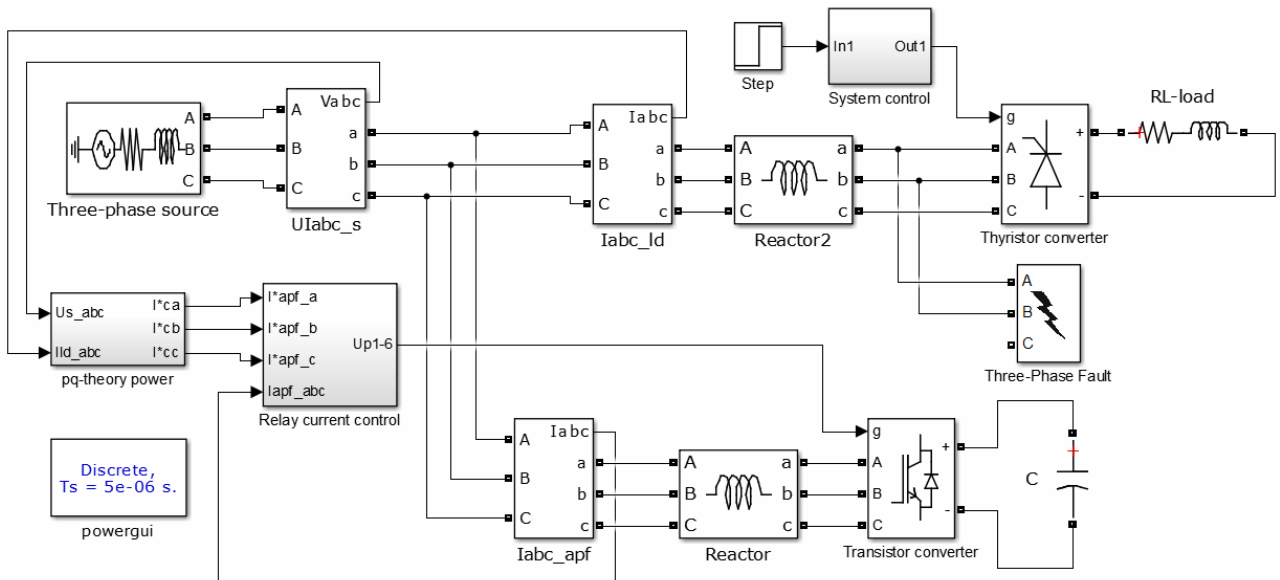


Рис. 2. Matlab Simulink модель електроенергетичної системи з трифазним САФ

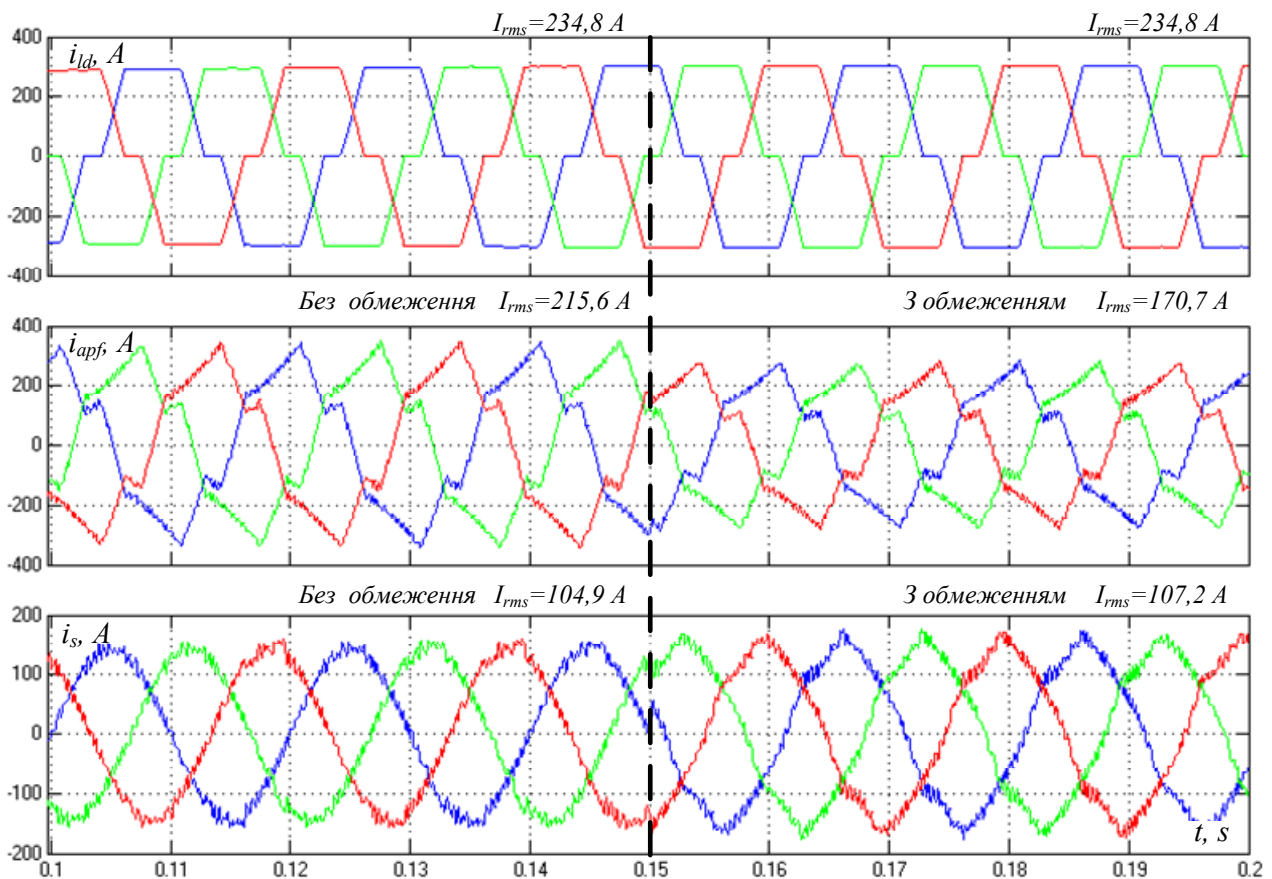


Рис. 3. Осцилограми струму навантаження i_{ld} , поточного САФ i_{apf} та мережі i_s без та з обмеженням за максимальним значенням струму

Режим перевантаження. Дослідження проведено з обмеженням по струму та без обмеження. Задане максимальне діюче значення струму встановлене на рівні $I_{max} = 170$ А. Результати моделювання із зазначеними умовами представлені на рис. 3. На інтервалі часу (0,1-0,15 с) підсистема обмеження струму не активна, наявне перевантаження перетворювача САФ робочим струмом 215,6 А, при цьому ефективність

компенсації можна оцінити за інтегральними показниками – табл. 1 (без обмеження). На інтервалі часу (0,15-0,2 с) вводиться в дію підсистема обмеження струму і діюче значення струму САФ знижується до встановленого максимального рівня, при цьому показники компенсації погіршуються – табл. 1 (з обмеженням), але пристрій забезпечує зниження реактивної потужності та коефіцієнту викривлення струму.

Таблиця 1

Зведені результати дослідження режиму перевантаження

Параметр	Без САФ	Без обмеження	З обмеженням
P , Вт	21300	21870	20630
Q , Вар	44270	-275,5	8621
I_{rms} , А	234,8	104,9	107,2
THD_I , %	13,96	6,24	7,94
I_{apf} , А	–	215,6	170,7
$THD_{I_{apf}}$, %	–	15,2	16,23

Виходячи з діаграми зміни напруги накопичуючого конденсатора (рис. 4) відхилення напруги не перевищує 1 %. При цьому зниження величини струму викликає збільшення запасу енергії конденсатора.

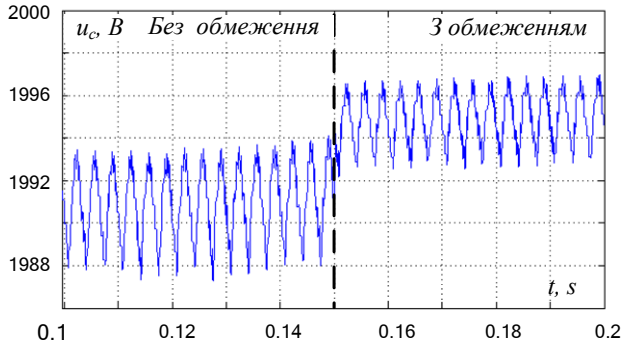
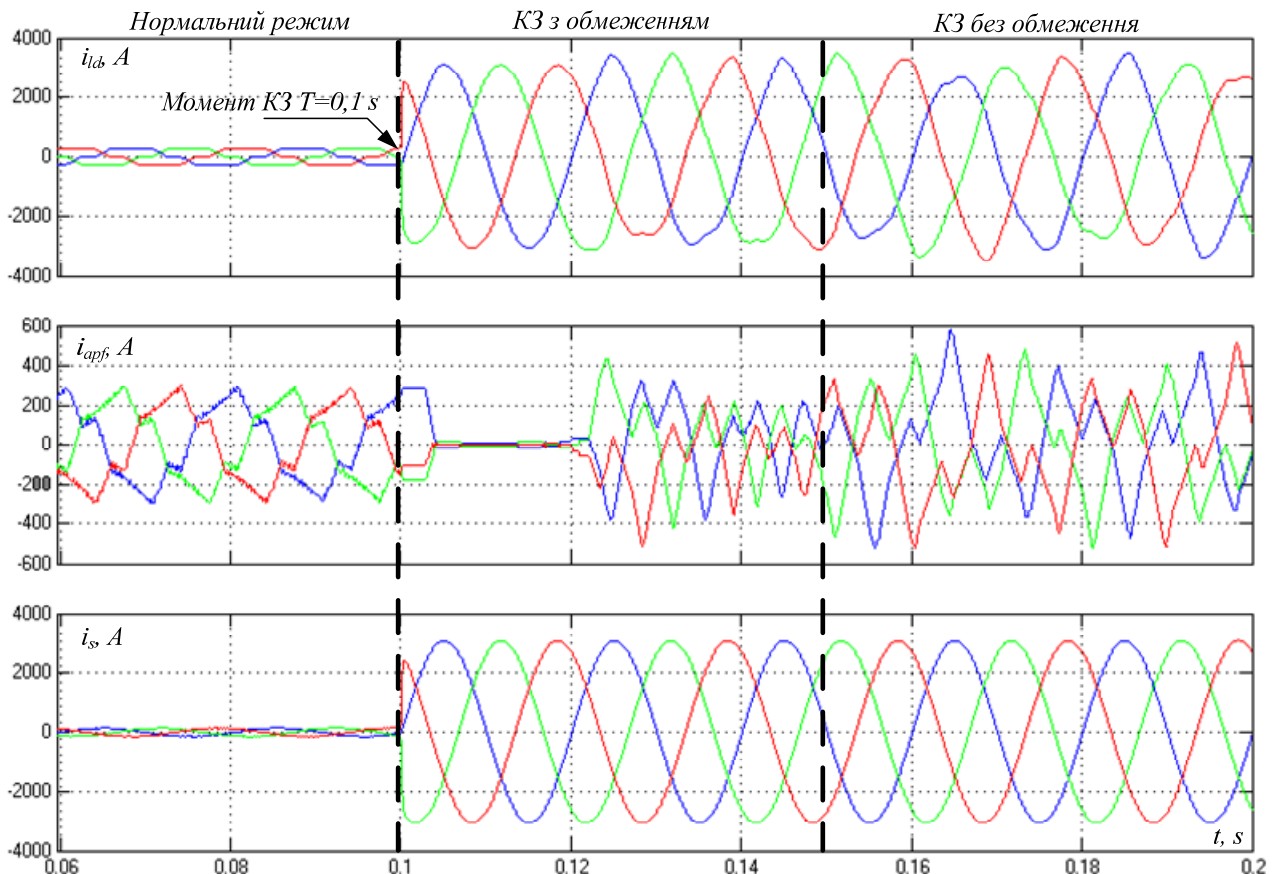


Рис. 4. Напруга на конденсаторі з обмеженням та без обмеження за максимальним значенням струму

Режим короткого замикання (КЗ). Дослідження КЗ виконано шляхом імітації міжфазного короткого замикання двох фаз на землю у вузлі навантаження. В модель системи додатково введено блок, який реалізує режим короткого замикання рис. 2 (*Three-Phase Fault*) шляхом замикання двох фаз на опір $R = 0,001$ Ом, на інтервалі часу (0,1-0,2 с).

Зважаючи на те, що коротке замикання реалізоване через омичний опір (рис. 5), на інтервалі дії короткого замикання струм зумовлений активною потужністю істотно перевищує струм зумовлений реактивною потужністю та потужністю спотворень. За умов реалізації режиму короткого замикання порушується функціонування блоку (*pq-theory power control*), у зв'язку із значним зниженням мережевої напруги. При цьому САФ продовжує забезпечувати компенсацію струму навантаження (табл. 2 без обмеження), та обмеження струму на інтервалі 0,1-0,15 с (табл. 2 з обмеженням). Додатково слід відзначити, що використання обмеження призводить до зменшення перекомпенсації реактивної потужності.

Аналіз напруги накопичуючого конденсатора під час реалізації режиму короткого замикання показує, як і в попередньому випадку незначне збільшення амплітуди пульсацій напруги, які не перевищують 3 %.

Рис. 5. Осцилограми струму навантаження i_{ld} , поточного САФ i_{apf} та мережі i_s в режимі КЗ з обмеженням та без обмеження за максимальним значенням струму

Таким чином, реалізація запропонованої методики, де обмеження до гранично допустимого рівня струму трифазного САФ в умовах перевантаження

або короткого замикання виконується шляхом масштабування величини струму САФ до рівня припустимого за умов нормальної роботи напівпровідникових

елементів, дозволяє в зазначених режимах реалізувати основний алгоритм роботи САФ, що підтверджується наведеними результатами досліджень комп'ютерної моделі системи (рис. 3-6).

Таблиця 2

Зведені результати дослідження режиму трифазного короткого замикання

Параметр	Без САФ	Без обмеження	З обмеженням
P , Вт	21300	4418	4671
Q , Вар	44270	-490	16,29
I_{rms} , А	234,8	2172	2171
THD_I , %	13,96	0,8	0,8
I_{apf} , А	-	317,8	161,8
$THD_{I_{apf}}$, %	-	60,9	70,6

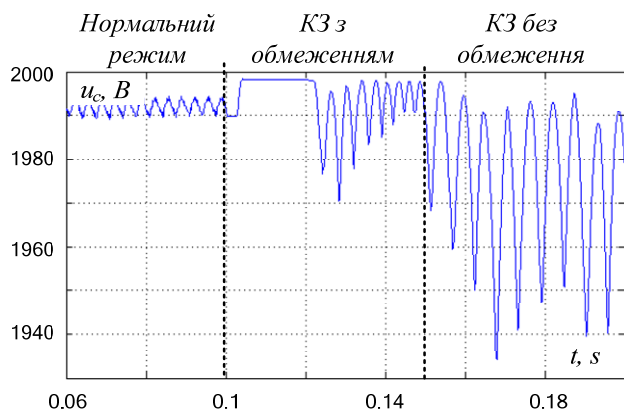


Рис. 6. Напряга на конденсаторі при сталому режимі, без обмеження за максимальним значенням та з обмеженням в режимі КЗ

Висновки.

1. Запропоновано методику обмеження до гранично допустимого рівня струму трифазного САФ та блок-схему підсистеми обмеження струму САФ, що дозволяє реалізувати основний алгоритм роботи САФ в режимах його перевантаження або короткого замикання.

2. Реалізація запропонованої методики дозволяє захистити силову частину САФ у разі аварійних режимів перевантаження та короткого замикання, та забезпечує автоматичне поновлення нормального режиму роботи САФ після усунення аварійних режимів системою протиаварійної автоматики.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жежеленко І.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях: Учеб. пособие для вузов. 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
2. Давидов О.Ю., Бялобржеський О.В. Аналіз засобів компенсації реактивної потужності в електротехнічних системах // Вісник Кременчуцького національного університету імені М. Остроградського. – 2010. – №3(62). – Частина 1. – С. 132-136.
3. Алексеев Б.А. Активные фильтры высших гармоник // ЭЛЕКТРО. Електротехніка, електроенергетика, електротехніческая промышленность. – 2007. – №3. – С. 28-32.
4. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Теория мощности Фризе и современные теории мощности // Електротехніка і електро механіка. – 2007. – №6. – С. 63-65. doi: 10.20998/2074-272X.2007.6.14.

5. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. – Wiley-IEEE Press., 2007. – 379 p. ISBN 978-0-470-10761-4.
6. Власенко Р.В., Бялобржеський О.В. Застосування силового активного фільтру при компенсації компонент струму несиметричного нелінійного навантаження в чотирипровідній мережі // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – №31. – С. 156-165.
7. Zakis J., Rankis I. Comparison of flexible systems of reactive power compensation // 5th International symposium «Topical problems in the field of electrical and power engineering». Doctoral school of energy and geotechnology. – Kuressaare, Estonia. – 14-19 January, 2008. – pp. 99-102.
8. Бялобржеський О.В., Власенко Р.В. Зв'язок електроенергетичних параметрів режиму однофазного активного фільтру з параметрами його накопичувачів // Науковий вісник НГУ. – 2015. – №4. – С. 79-84.
9. Власенко Р.В., Бялобржеський О.В. Порівняння методів компенсації неактивної потужності трифазним силовим активним фільтром з адаптивним релейним регулятором струму // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – №2. – С. 20-27.
10. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи. – Львів: Видавництво національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 488 с.
11. Dixon J.W., Tepper S., Moran L. Analysis and evaluation of different modulation techniques for active power filters // Proceedings of 1994 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – ASPEC'94. pp. 894-900. doi: 10.1109/APEC.1994.316303.

REFERENCES

1. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriiatiakh: Ucheb. posobie dlia vuzov. 3-e izd* [Indicators of quality of the electric power and their control at the industrial enterprises. Educational manual for students of higher educational institutions, 3rd ed.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 252 p. (Rus).
2. Davydov A.Y., Bialobrzeski A.V. Analysis of facilities of indemnification of reactive-power is in electrical engineering systems. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 2010, no.3(62), part 1, pp. 132-136. (Ukr).
3. Alekseev B.A. Active harmonic filters. *ELEKTRO. Electrical engineering, power industry, electrical industry*, 2007, no.3, pp. 28-32. (Rus).
4. Zhemerov G.G., Ilina O.V. Fryze power theory and modern power theories. *Electrical engineering & electromechanics*, 2007, no.6, pp. 63-65. doi: 10.20998/2074-272X.2007.6.14.
5. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Wiley-IEEE Press, April 2007. 379 p. ISBN 978-0-470-10761-4.
6. Vlasenko R.V., Bialobrzeski O.V. Using active power filter to compensate the current component of asymmetrical non-linear load in the four wire network. *Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, 2015, no.31, pp. 156-165. (Ukr).
7. Zakis J., Rankis I. Comparison of flexible systems of reactive power compensation. *5th International symposium «Topical problems in the field of electrical and power engineering»*. Doctoral school of energy and geotechnology. Kuressaare, Estonia. 14-19 January, 2008, pp. 99-102.
8. Bialobrzheskii O.V., Vlasenko R.V. Interrelation of electric-power parameters of the single-phase active power filter mode with parameters of the stores attached. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2015, no.4, pp. 79-84. (Ukr).

9. Vlasenko R.V., Bialobrzeski O.V. Comparison of inactive power compensation methods by three-phase active power filter with adaptive relay current controller. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2014, no.2, pp. 20-27. (Ukr).

10. Segeda M.S. *Elektrychni merezhi ta systemy* [Electric grids and systems]. Lviv, Lviv Polytechnic National University Publ., 2007. 488 p. (Ukr).

11. Dixon J.W., Tepper S., Moran L. Analysis and evaluation of different modulation techniques for active power filters. *Proceedings of 1994 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – ASPEC'94*. pp. 894–900. doi: 10.1109/APEC.1994.316303.

Поступила (received) 24.11.2017

Власенко Руслан Володимирович¹, асистент,
Бялобржеський Олексій Володимирович¹, к.т.н., доц.,

¹ Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського,
39600, Полтавська обл., Кременчук, вул. Першотравнева, 20,
тел/phone +380 97 1902815, +380 66 7197298,
e-mail: ruslan.vlasenko@i.ua, seemAl@kdu.edu.ua

R.V. Vlasenko¹, O.V. Bialobrzeski¹

¹ Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University,
20, Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600,
Ukraine.

Limitations of current of the three-phase active power filter in the conditions of overload and short circuit.

Purpose. The purpose of the work is to develop a method of limiting the maximum allowable level of current of a three-phase active power filter in conditions of overload or short circuit and a system for the implementation of the method. **Methodology.** For research purposes, the provisions of the pq-theory of instantaneous power, the method of the theory of automatic control in systems with relay controllers, and the methods of simulation in the visual programming environment were used. **Results.** Both the overloading mode and the short circuit emergency mode, using the proposed solution, do not lead to significant changes in the voltage level on the accumulation capacitor, thus maintaining the stability of the power part of the active power filter. **Originality.** In the case of temporary overloads of current and short circuits at the network node to which a active power filter is connected, the current's limiting is performed by scaling the current to the level allowed by normal operation of the semiconductor elements of the device, which allows the basic operating algorithm to be implemented in the specified modes. **Practical value.** The proposed solution can be used as a mean to protect the power part of the device in case of overload, which, in the event of emergencies, and their elimination will automatically restore the normal mode of the device. References 11, tables 2, figures 5.

Key words: active power filter, pq-theory of instantaneous power, relay current control, effective current value, hysteresis zone.