

УДК 621.314

**Я. В. Щербак**, д-р техн. наук,  
**Ю. О. Семененко**

### КОМБІНОВАНИЙ АКТИВНИЙ ФІЛЬТР ПОСЛІДОВНОГО ТИПУ ІЗ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ЗА НАПРУГОЮ НАВАНТАЖЕННЯ

**Анотація.** У статті проведено аналіз динамічних процесів комбінованого активного фільтра послідовного типу із зворотним зв'язком за напругою навантаження, що застосовується для покращення якості електричної енергії на виході тягової підстанції постійного струму. Досліджені процеси в комбінованому фільтрі запропонованої схеми вказують на доцільність його застосування в якості фільтруючого засобу в системах тягового електропостачання постійного струму.

**Ключові слова:** комбінований активний фільтр, пульсуюча складова, електрична енергія, передавальна функція, тягова підстанція

**J. Shcherbak**, ScD.,  
**Y. Semenenko**

### COMBINED ACTIVE FILTERS SERIES TYPE FEEDBACK LOAD VOLTAGE

**Abstract.** The article analyzes the dynamic processes of combined active filter series type of feedback voltage load, which is used to improve the quality of electrical energy output DC traction substation. Investigation of the process in a combined filter proposed scheme point to the feasibility of its use as a filter aid in traction power supply systems of direct current.

**Keywords:** combined active filter, pulsation components, electrical energy, transfer function, traction substation

**Я. В. Щербак**, д-р техн. наук,  
**Ю.А. Семененко**

### КОМБИНИРОВАННЫЙ АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ТИПА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО НАПРЯЖЕНИЮ НАГРУЗКИ

**Аннотация.** В статье проведен анализ динамических процессов комбинированного активного фильтра последовательного типа с обратной связью по напряжению нагрузки, который применяется для улучшения качества электрической энергии на выходе тяговой подстанции постоянного тока. Исследованные процессы в комбинированном фильтре предложенной схемы указывают на целесообразность его применения в качестве фильтрующего средства в системах тягового электроснабжения постоянного тока.

**Ключевые слова:** комбинированный активный фильтр, пульсационная составляющая, электрическая энергия, передаточная функция, тяговая подстанция

#### Вступ

Вихідна напруга випрямляючих установок тягових підстанцій постійного струму характеризується наявністю постійної та пульсуючої складової з гармоніками в широкому діапазоні частот [1]. Ці гармонічні складові викликають додаткові втрати електричної енергії в тяговій мережі, погіршують електромагнітну сумісність тягової мережі з електричним рухомим складом, а також є джерелом заважаючи перешкод, здатних викликати нестабільну роботу пристроїв залізничної сигналізації, централізації, блокування, автоматики, телемеханіки та зв'язку, рейкових кіл. Дана проблема суттєво ускладнюється впровадженням електричного рухомого складу з імпульсними перетворювачами. Це все ставить задачу по зниженню змінної складової випрямленої напруги на тягових підстанціях постійного струму до необхідного рівня.

**Метою роботи** є проведення аналізу характеристик комбінованого активного фільтра послідовного типу із зворотним зв'язком за напругою навантаження, що застосовується на виході тягової підстанції постійного струму для покращення показників якості електричної енергії.

#### Основна частина дослідження

Підвищення ступеню фільтрації пульсацій напруги на виході випрямляючої установки досягається застосуванням комбінованих систем, які представляють собою з'єднання за певною схемою пасивного та активного фільтрів [2].

В роботі [3] авторами проведено дослідження комбінованого фільтра з активним фільтром послідовного типу неперервної дії. Основою такого активного фільтра є підсилювач, що формує напругу компенсації змінної складової вихідної напруги тягової підстанції постійного струму. В роботах [4 – 10] була досліджена і проаналізована електромагнітна сумісність комбінованого активного фільтра послідовного типу імпульсної дії із суміжними електроустановками тягової мережі постійного струму, де основним елементом силового кола активного фільтра є інвертор.

Для аналізу динамічних властивостей комбінованого активного фільтра послідовного типу розглянемо його структурну схему, яка наведена на рис. 1.

В запропонованій схемі фільтра компенсація пульсуючої складової  $U_n(p)$  здійснюється внесенням в коло пасивної ланки напруги, яка компенсує  $U_k(p)$ , що формується каналом зворотного зв'язку системи автоматичного регулювання.

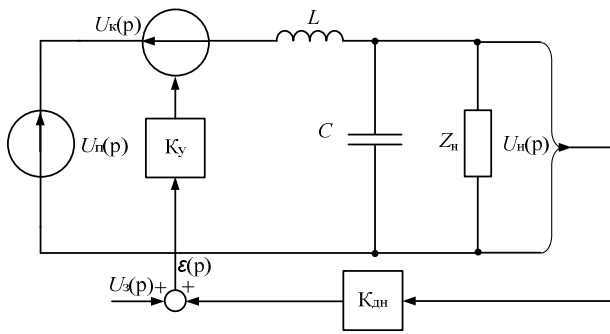


Рис. 1. Структурна схема комбінованого активного фільтра послідовного типу зі зворотним зв'язком за напругою навантаження  $U_n(p)$

Згідно зі структурною схемою (рис. 1) комбінованого активного фільтра напруга на навантаженні з урахуванням активної та пасивної складової фільтра визначається наступним рівнянням

$$U_n(p) = [U_n(p) - U_k(p)] \cdot H(p), \quad (1)$$

де  $U_n(p)$  – пульсуюча складова напруги на навантаженні;  $U_z(p)$  – напруга завдання;  $K_y$  – коефіцієнт передачі підсилюючого елемента, що формує напругу, яка компенсує;  $K_{дн}$  – коефіцієнт передачі датчика напруги.

При цьому для спрощення виконання аналізу характеристик комбінованого активного фільтра послідовного типу прийняті наступні допущення:

- активний опір реактора  $R_L = 0$ ;
- реактор має лінійну характеристику;
- вхідний опір перетворювача  $R_{VD} = 0$ .

Передавальна функція комбінованого фільтра буде мати наступний вид:

$$H(p) = \frac{Z_{вих}(p)}{Z_{вх}(p)}, \quad (2)$$

де  $Z_{вих}(p)$  – вихідний опір комбінованого фільтра, який визначається як:

$$Z_{вих}(p) = \frac{Z_n}{Cp \cdot \left( Z_n + \frac{1}{Cp} \right)} = \frac{Z_n}{Z_n Cp + 1}, \quad (3)$$

$Z_{вх}(p)$  – вхідний опір комбінованого фільтра, який визначається за наступною формулою:

$$Z_{вх}(p) = Lp + \frac{Z_n(p)}{Z_n Cp + 1} = \frac{Z_n L Cp^2 + Lp + Z_n(p)}{Z_n Cp + 1}. \quad (4)$$

Підставивши (3) та (4) в (2), отримаємо:

$$H(p) = \frac{Z_n}{Z_n L Cp^2 + Lp + Z_n(p)} = \frac{1}{L Cp^2 + \frac{L}{Z_n(p)} p + 1}. \quad (5)$$

Опір навантаження  $Z_n(p)$  має комплексний характер. Стосовно тягових підстанцій він є активно-індуктивним зі змінними активною та індуктивною складовими.

З урахуванням (5) вираз (1) приймає вигляд:

$$U_n(p) = [U_n(p) - U_k(p)] \cdot \frac{1}{T_\phi^2 p^2 + 2\xi T_\phi p + 1}, \quad (6)$$

де  $T_\phi^2 = LC$ ;  $2\xi T_\phi = \frac{L}{Z_n(p)}$ ;  $\xi = \frac{1}{2 \cdot Z_n(p)} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$ .

Напруга, яка компенсує,  $U_k(p)$  формується замкнутою структурою автоматичного регулювання, для якої справедлива наступна система рівнянь:

$$\begin{cases} U_k(p) = \varepsilon(p) \cdot K_y \\ \varepsilon(p) = U_z(p) + U_n(p) \cdot K_{дн} \end{cases} \quad (7)$$

В результаті розв'язання цієї системи рівнянь отримаємо:

$$U_k(p) = [U_z(p) + U_n(p) \cdot K_{дн}] \cdot K_y. \quad (8)$$

Після підстановки (8) в (6) та проведення деяких перетворень отримаємо вираз для визначення напруги на навантаженні:

$$\begin{aligned} U_n(p) &= [U_n(p) - [U_z(p) + U_n(p) \cdot K_{дн}] \cdot K_y] \cdot H(p) = \\ &= [U_n(p) - U_z(p) \cdot K_y] \cdot H(p) - U_n(p) \cdot K_{дн} \cdot K_y \cdot H(p) = \\ &= \frac{[U_n(p) - U_z(p) \cdot K_y] \cdot H(p)}{1 + K_{дн} \cdot K_y \cdot H(p)} = \\ &= \frac{U_n(p) - U_z(p) \cdot K_y}{T_\phi^2 p^2 + 2\xi T_\phi p + 1} \cdot \frac{1}{\left[ 1 + \frac{K_{дн} \cdot K_y}{T_\phi^2 p^2 + 2\xi T_\phi p + 1} \right]} = \\ &= \frac{U_n(p) - U_z(p) \cdot K_y}{T_\phi^2 p^2 + 2\xi T_\phi p + 1 + K_{дн} \cdot K_y} = \\ &= \frac{U_n(p) - U_z(p) \cdot K_y}{(1 + K_{дн} \cdot K_y) \left[ \frac{T_\phi^2}{1 + K_{дн} \cdot K_y} + 2\xi \frac{T_\phi}{1 + K_{дн} \cdot K_y} p + 1 \right]} \end{aligned} \quad (9)$$

де  $K_{дн} \cdot K_y = K_o$  – контурний коефіцієнт передачі.

Із рівняння (9) можна зробити наступні висновки:

- збільшення контурного коефіцієнта передачі  $K_o$  зменшує пульсуючу складову на навантаженні;
- збільшення контурного коефіцієнта  $K_o$  призводить до зменшення сталої часу фільтра та коефіцієнту демпфування, в результаті чого зростає коливальність комбінованого фільтра.

Все вище перераховане дозволяє нам зробити висновок щодо погіршення динаміки фільтра.

$$\xi' = \frac{1}{2 \cdot Z_n(p) \cdot (1 + K_o)} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (10)$$

Стала часу комбінованого фільтра має наступний

вираз:  $T_{\phi,к} = \frac{T_\phi}{\sqrt{1 + K_{дн} \cdot K_y}}$ .

Опір навантаження в операторній та комплексній формах

$$Z_n(p) = L_n \cdot p + R_n, \quad Z_n(j\omega) = R_n + j\omega L_n.$$

Повний опір навантаження в скалярній формі

$$Z_n = \sqrt{R_n^2 + \omega^2 L_n^2}.$$

Із рівняння (9) отримаємо передавальну функцію коливальної ланки згладжуючого фільтра (рис. 1)

$$H(p) = \frac{1}{(1 + K_o) \cdot (T_o^2 p^2 + 2\xi_o T_o p + 1)}, \quad (11)$$

де  $T_o = \frac{T_\phi}{\sqrt{1 + K_o}}$  – еквівалентна стала часу;

$\xi_o = \frac{\xi}{1 + K_o}$  – еквівалентний коефіцієнт демпфування.

Переходячи з операторної до комплексної форми запису, підставляємо  $p=j\omega$  у вираз (11) і отримуємо рівняння для частотних характеристик комбінованого фільтра.

$$H(j\omega) = \frac{1}{(1 + K_o) \cdot (1 - T_o^2 \omega^2 + 2j\omega \xi_o T_o)}. \quad (12)$$

Тоді амплітудна частотна характеристика комбінованого активного фільтра послідовного типу із зворотним зв'язком за напругою навантаження визначається за такою формулою:

$$K(\omega) = \frac{1}{(1 + K_o) \cdot \sqrt{(1 - T_o^2 \omega^2)^2 + 4\omega^2 \xi_o^2 T_o^2}}. \quad (13)$$

За виразом (13) будемо амплітудну частотну характеристику комбінованого фільтра запропонованої схеми (рис. 1)

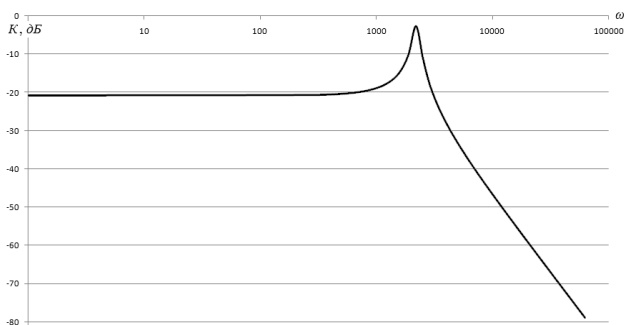


Рис. 2. Амплітудна частотна характеристика комбінованого фільтра

На рис. 2 приведено графік амплітудної частотної характеристики, що розрахована з урахуванням рекомендованих в «Інструкція з технічного обслуговування та ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення та секціонування електрифікованих залізниць» ЦЕ-0024 параметрів згладжуючого фільтра тягової підстанції постійного струму:  $L = 4,5 \cdot 10^{-3}$  Гн,  $C = 300 \cdot 10^{-6}$  Ф. Індуктивність навантаження та її активний опір при розрахунку були прийняті такими:  $L_H = 1 \cdot 10^{-3}$  Гн,  $R_H = 10$  Ом. Контурний коефіцієнт передачі прийнято  $K_o = 10$ . Для розрахунку еквівалентного коефіцієнту демпфування  $\xi_o$  попередньо визначаємо  $\xi$  за наступною формулою:

$$\xi = \frac{1}{2|Z_n|} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (14)$$

Аналіз залежності (рис. 2) показав що, для визначення амплітудної частотної характеристики комбінованого активного фільтра системи автоматичного регулювання при формуванні зворотного зв'язку за напругою навантаження, частотні властивості активного фільтра послідовного типу суттєво залежить від величини навантаження. Аналіз замкнутої структури активного фільтра полягає в корекції методом частотних характеристик заданої системи, яка забезпечує необхідні частотні властивості та критерії якості системи автоматичного регулювання.

## Висновки

Проведений аналіз динамічних характеристик комбінованого активного фільтра при формуванні зворотного зв'язку за напругою навантаження показав, що його застосування доцільно для покращення якості електричної енергії на виході тягової підстанції постійного струму, що досягається за рахунок компенсації гармонік напруги та струму контактної мережі в широкому діапазоні частот. Таким чином досягається необхідний рівень електромагнітної сумісності із суміжними електроустановками, а також зменшується вплив тягового струму на рейкові кола в системах тягового електропостачання постійного струму без значного ускладнення та подорожчання систем фільтрації тягової підстанції.

## Список використаної літератури

- Heydt G.T., and Liu Y., (2006), "Second Harmonic Components in Power System Voltages and Currents", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, January 2006, pp. 521 – 523.
- Щербак Я. В. Активна фільтрація вихідної напруги тягової підстанції постійного струму / Я. В. Щербак., Ю. О. Семененко // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – Харків : – 2011. – № 127. – С. 146 – 151.
- Щербак Я. В. Аналіз динамічних характеристик комбінованого фільтра тягової підстанції / Я. В. Щербак, Ю. О. Семененко // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – Харків : – 2013. – №142. – С. 137 – 143.
- Семененко Ю. О. Дослідження роботи силового активного фільтра послідовного типу / Ю. О. Семененко // Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: матеріали 76-ї міжнародної науково-технічної конференції 15 – 17 квітня 2014 р. – Харків : – 2014. – № 143, 244 с.
- Семененко Ю. О. Дослідження роботи комбінованого активного фільтра послідовного типу з імпульсною системою керування / Ю. О. Семененко // Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: матеріали 77-ї міжнародної науково-технічної конференції 21 – 23 квітня 2015. Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту – Харків : – 2015. – № 151. – Т.І. – 87 с.
- Johan Lundquist, (2001), On Harmonic Distortion in Power Systems, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Technical report no 371L, Göteborg, Sweden, 147 p.
- Luo A., Shuai Z., Shen J. [et. al.], (2009), Design Considerations for Maintaining DC Side Voltage of Hybrid Active Power Filter with Injection Circuit, *Power Electronics, IEEE Transactions*, Vol. 24, pp. 75 – 84.
- Dán A., Kisvölcsy J., and Varjú Gy., (1986), Filtering of Harmonics Generated by Thyristor Controlled AC Traction Systems, *In Proc. II. International Conference on Harmonics in Power Systems*, pp. 404 – 413, Winnipeg, 6-7 October, 1986.
- Ludbork Allan Harmonic Filtered for Notch Reduction, *IEEE IAS 21-th Annu. Denver*, pp. 1043 – 1047.

10. Stephen M. Williams, and Richard G. Hoff, (1988), Discrete Controlled Harmonic and Reactive power Compensator, *IEEE IAS 23-th Annu Mact. Pittsburgh (Pennsylvania), Oct. 1988*, pp. 881 – 887.

Отримано 27.05.2015

#### References

1. Heydt G.T., and Liu Y., (2006), Second Harmonic Components in Power System Voltages and Currents, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, January 2006, pp. 521 – 523 (In English), Url: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1375136&sortType%3Dasc\\_p\\_Sequence%26filter%3DAND%28p\\_Publication\\_Number%3A61%29%26pageNumber%3D82%26rowsPerPage%3D50](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1375136&sortType%3Dasc_p_Sequence%26filter%3DAND%28p_Publication_Number%3A61%29%26pageNumber%3D82%26rowsPerPage%3D50).

2. Shcherbak J.V., and Semenenko Y.A. Aktivna fil'tratsiya vikhidnoi napruzi tyagovoi pidstantsii postiinogo strumu [The Active Filter Output Voltage DC Traction Substation], (2011), *Coll. Science. Works Ukr. State. Acad. Boxcars. Transp*, Kharkov, Ukraine, No. 127, pp. 146 – 151 (In Ukrainian), Url: [http://www.nbu.gov.ua/old\\_jrn/natural/Znpudazt/2011\\_127/n127-146.pdf](http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/natural/Znpudazt/2011_127/n127-146.pdf).

3. Shcherbak Y.V., and Semenenko Y.A. Analiz dinamichnikh kharakteristik kombinovanogo fil'tra tyagovoi pidstantsii [Analysis of Dynamic Characteristics of Traction Substation Combined Filter], (2011), *Coll. Science. Works Ukr. State. Acad. Boxcars. Transp*, Kharkov, Ukraine, No. 142, pp. 137 – 143 (In Ukrainian), Url: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Znpudazt\\_2013\\_142\\_24.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Znpudazt_2013_142_24.pdf).

4. Semenenko Yu.O. Doslidzhennya roboti silovogo aktivnogo fil'tra poslidovnogo tipu. Rozvitok naukovoї ta innovatsiinoї diyal'nosti na transporti: materiali 76-ї mizhnarodnoї naukovo-tekhnicnoї konferentsii [Study of the Power Active Filter Type], (2014), *Development of Consistent Research and Innovation in Transport Materials 76 th International Scientific Conference, 15- 17 kvitnya 2014 r. Coll. Science. Works Ukr. State. Acad. Boxcars. Transp*, Kharkov, Ukraine, No. 142, 244 p. [In Ukrainian], Url: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Znpudazt\\_2014\\_143\\_36.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Znpudazt_2014_143_36.pdf).

5. Semenenko Y.A. Doslidzhennya roboti kombinovanogo aktivnogo fil'tra poslidovnogo tipu z impul'snoyu sistemoyu keruvannya. Rozvitok naukovoї ta innovatsiinoї diyal'nosti na transporti: materiali 77-ї mizhnarodnoї naukovo-tekhnicnoї konferentsii 21-23 kvitnya 2015. Zbirnik naukovikh prats' Ukraїns'koї derzhavnoi akademii zaliznichnogo transportu [The Study of the Combined Active Serial-type Filter with Impulse Control System Development of Scientific], (2015), *Innovation in Transport Materials 77 th International Scientific Conference 21-23 kvitnya 2015, Coll. Science. works Ukr. State. Acad. Boxcars. Transp.*, Kharkov, Ukraine, No. 151, Vol.1, 87 p. [In Ukrainian], Url: [http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbu/cgiirbis\\_64.exe?Z21IID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=juu\\_all&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P](http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?Z21IID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=juu_all&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P)

02=0&S21P03=PREF=&S21COLORTERMS=0&S21STR=Znpudazt.

7. Johan Lundquist, (2001), On Harmonic Distortion in Power Systems, Department of Electric Power Engineering, *Chalmers University of Technology, Technical report no 371L, Göteborg, Sweden*, 147 p. (In English), URL: <http://webfiles.portal.chalmers.se/et/Lic/LundquistJohanLic.pdf>.

7. Luo A., Shuai Z., and Shen J., (2006), Design Considerations for Maintaining DC Side Voltage of Hybrid Active Power Filter with Injection Circuit, *Power Electronics, IEEE Transactions*, Vol. 24, pp. 75 – 84 (In English), url: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4752786&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F63%2F4783510%2F04752786.pdf%3Farnumber%3D4752786>.

8. Dán A., J. Kisvölcsy, and G. Varjú, (1986) Filtering of Harmonics Generated by Thyristor Controlled AC Traction Systems, *In Proc. II. International Conference on Harmonics in Power Systems*, Winnipeg, 6-7 October 1986, – pp. 404 – 413 (In English), URL: [http://www.researchgate.net/publication/224190907\\_The\\_application\\_of\\_the\\_double\\_domain\\_simulation\\_with\\_PWM\\_controlled\\_locomotives](http://www.researchgate.net/publication/224190907_The_application_of_the_double_domain_simulation_with_PWM_controlled_locomotives).

9. Ludbork Allan, (1993), Harmonic Filtered for Notch Reduction, *IEEE IAS 21-th Annu. Denver*, pp. 1043 – 1047 (In English), URL: <http://www.nhp.com.au/Products/Products-and-Services/power-quality/filters/harmonic-filters>.

10. Williams S.M., and Hoff R.G., (1988), Discrete Controlled Harmonic and Reactive Power Compensator, *IEEE IAS 23-th Annu Mact. Pittsburgh (Pennsylvania), Oct. 1988*, pp. 881 – 887 (In English), Url: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.124.9114&rep=rep1&type=pdf>



Щербак  
Яків Васильович, д.т.н., проф., зав. каф автоматизованих систем електричного транспорту Українського державного ун-ту залізничного транспорту.  
м. Харків, майдан Фейербаха, 7, тел. +380962208996.  
E-mail: sherbak47@mail.ru



Семененко  
Юрій Олександрович, аспірант каф. автоматизованих систем електричного транспорту Українського державного ун-ту залізничного транспорту.  
м. Харків, майдан Фейербаха, 7, тел. +380955194872.  
E-mail: slider2012@i.ua