

Ю. О. СЕМЕНЕНКО, аспірант, УкрДУЗТ, Харків

### КОМБІНОВАНИЙ АКТИВНИЙ ФІЛЬТР ПОСЛІДОВНОГО ТИПУ З ІМПУЛЬСНОЮ СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ ПРИ ФОРМУВАННІ ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ ЗА СТРУМОМ НАВАНТАЖЕННЯ

**Вступ.** Відомо, що вихідна напруга випрямної установки тягової підстанції постійного струму характеризується наявністю постійної та пульсуючої складової з гармоніками в широкому діапазоні частот. Дані гармонійні складові викликають додаткові втрати електричної енергії в тяговій мережі, погіршують електромагнітну сумісність системи тягового електропостачання з електричним рухомим складом, а також являються джерелом небезпечних та заважаючих перешкод, здатних викликати нестабільну роботу пристроїв залізничної сигналізації, централізації, автоблокування, автоматики, телемеханіки, високочастотного зв'язку та рейкових кіл [1,2]. Ця проблема суттєво ускладнюється впровадженням електричного рухомого складу з імпульсними перетворювачами та широким застосуванням модернізованих старих або введенням в експлуатацію нових магістралей з високошвидкісним рухом поїздів з асинхронним приводом. Спотворення напруги в тяговій мережі можуть бути настільки великими, що в інверторному режимі перетворювачів можуть виникнути збої комутації ключів, а робота електронної системи керування може стати нестійкою, внаслідок чого можуть відбуватися короткі замикання та інші аварійні ситуації. Особливістю негативного впливу гармонік напруги і струму в тяговій мережі є те, що вони можуть підсилити вплив інших видів електромагнітних завад, тому дана стаття присвячена вирішенню завдання по зниженню величини пульсуючої складової напруги у вихідній напрузі тягової підстанції постійного струму.

**Постановка задачі.** Досвід експлуатації систем електропостачання електричного транспорту показує, що застосування пасивних детермінованих методів фільтрації має ряд суттєвих недоліків [3]. Це вимагає пошуку більш ефективних підходів до вирішення даної проблеми шляхом активних методів фільтрації змінної складової випрямленої напруги тягової підстанції постійного струму.

**Матеріали досліджень.** Застосування комбінованих систем фільтрації, які представляють собою з'єднання за певною схемою пасивного та активного фільтрів [4-10], суттєво підвищують ступінь фільтрації пульсацій напруги на виході випрямної установки тягової підстанції. В роботі [4] приведені результати дослідження динамічних характеристик комбінованого фільтра з активною ланкою послідовного типу неперервної дії, який встановлений на виході тягової підстанції постійного струму. Пасивна ланка його призначена для зниження амплітуд канонічних гармонійних складових вихідної напруги, а для ефективнішого придушення канонічних і неканонічних гармонійних складових використовується активна ланка фільтра. Основою такого активного фільтра є підсилювач, що формує напругу компенсації змінної складової вихідної напруги тягової підстанції постійного струму. Для підвищення коефіцієнта корисної дії системи активної фільтрації пропонується використати імпульсний спосіб формування напруги компенсації змінної складової шляхом застосування інвертора напруги на IGBT, що працює з підвищеною частотою широтно-імпульсної модуляції порядку 20 кГц. Завдяки цьому досягається висока якість формування гармонік напруги компенсації в широкому діапазоні частот. Схема комбінованого активного фільтра послідовного типу імпульсної дії, що пропонується для зниження величини пульсацій змінної складової у вихідній напрузі тягової підстанції постійного струму, представлена на рис. 1.

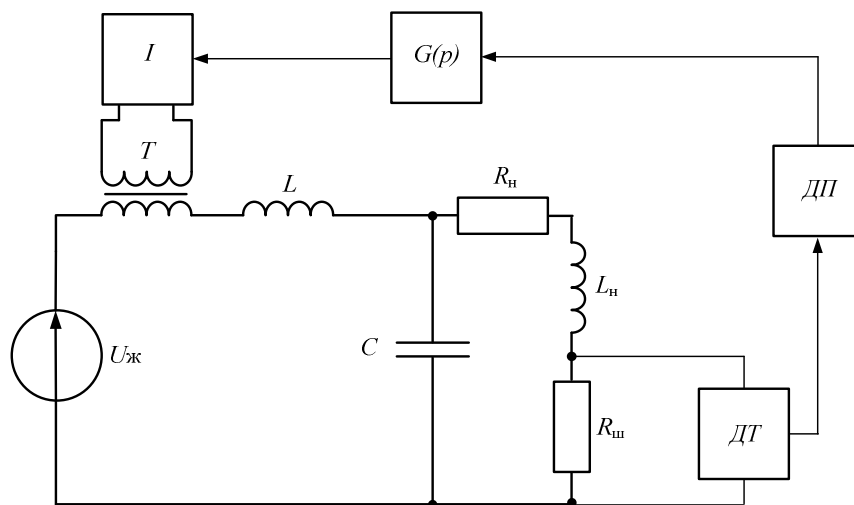


Рис. 1 Структурна схема комбінованого активного фільтра з імпульсною системою керування

Запропонований фільтр (рис. 1), як і схема комбінованого фільтра з активною ланкою неперервної дії [4], має пасивну та активну ланки. Пасивна ланка фільтра складається з дроселя  $L$  та конденсатора  $C$ , що утворюють  $\Gamma$  – подібний аперіодичний  $LC$  – фільтр. Активна ланка складається з інвертора  $I$ , трансформатора  $T$  та системи керування. Для контролю струму навантаження, в тому числі й пульсуючої складової, використовується вимірювальний шунт  $R_{ш}$ , до якого підключений датчик струму  $ДТ$ . Із вихідного сигналу датчика струму датчиком пульсацій  $ДП$  виділяється змінна складова, яка несе інформацію про пульсації струму в активно-індуктивному навантаженні. Вихідний сигнал з датчика пульсацій передається до корегуючої ланки  $G(p)$ , на виході якої отримуємо сигнал компенсації. Далі цей сигнал підсилюється інвертором  $I$  та через трансформатор  $T$ , який потрібен для гальванічної розв'язки системи керування від силової частини схеми, напруга компенсації подається в протифазу з пульсуючою напругою, що діє на навантаженні.

Для аналізу динамічних властивостей комбінованого активного фільтра послідовного типу при формуванні зворотного зв'язку за струмом навантаження розглянемо його еквівалентну схему, яка наведена на рис. 2.

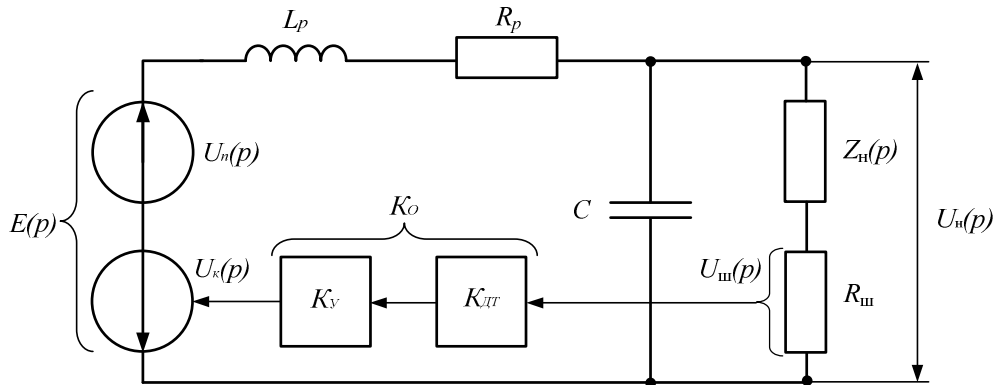


Рис. 2 Еквівалентна схема комбінованого активного фільтра послідовного типу при формуванні зворотного зв'язку за струмом навантаження

В запропонованій схемі фільтра компенсація пульсуючої складової  $U_n(p)$  здійснюється внесенням в коло пасивної ланки напруги компенсації  $U_k(p)$ , що формується системою автоматичного регулювання. Система автоматичного регулювання зворотного зв'язку за струмом навантаження отримує сигнал напруги шунта  $U_{ш}(p)$ , який послідовно поєднаний з навантаженням  $Z_n(p)$ , що має комплексний характер. При цьому для спрощення аналізу активного фільтра послідовного типу тут і надалі активним опором реактора  $R_p$  можна знехтувати. Відповідно до схеми фільтра (рис. 2) пульсуюча складова напруги на навантаженні  $U_n(p)$  з урахуванням активної та пасивної ланок фільтра визначається наступним виразом:

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

де  $E(p)$  – електрорушійна сила;  $H(p) = \frac{1}{LCp^2 + \frac{Lp}{Z_n(p)} + 1}$  – передавальна функція пасивної ланки фільтра;

$U_n(p)$  – пульсуюча складова вихідної напруги тягової підстанції;  $U_k(p)$  – напруга компенсації;  $K_y$  – коефіцієнт передачі підсилюючого елемента, що формує напругу компенсації (в даному виконанні схеми це інвертор);  $K_{ДТ}$  – коефіцієнт передачі датчика струму.

В представленій схемі (рис. 2) процес компенсації активним фільтром послідовного типу змінної складової вихідної напруги на навантаженні буде еквівалентним внесенню джерела електрорушійної сили в коло дроселя пасивного  $LC$  – фільтра. Компенсуючий сигнал визначається властивостями кола зворотного зв'язку та визначається за наступною формулою:

$$U_k(p) = U_{ш}(p) \cdot K_y \cdot K_{ДТ} = U_{ш}(p) \cdot K_o. \quad (2)$$

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

Далі потрібно визначити частотні властивості комбінованого активного фільтра послідовного типу. Тому для цього розглянемо схему заміщення (рис. 3) шляхом перетворення запропонованої еквівалентної схеми фільтра (рис. 2) відносно вхідного сигналу електрорушійної сили  $E(p)$ , прийнявши за вихідний сигнал напругу на шунті  $U_{ш}(p)$ .

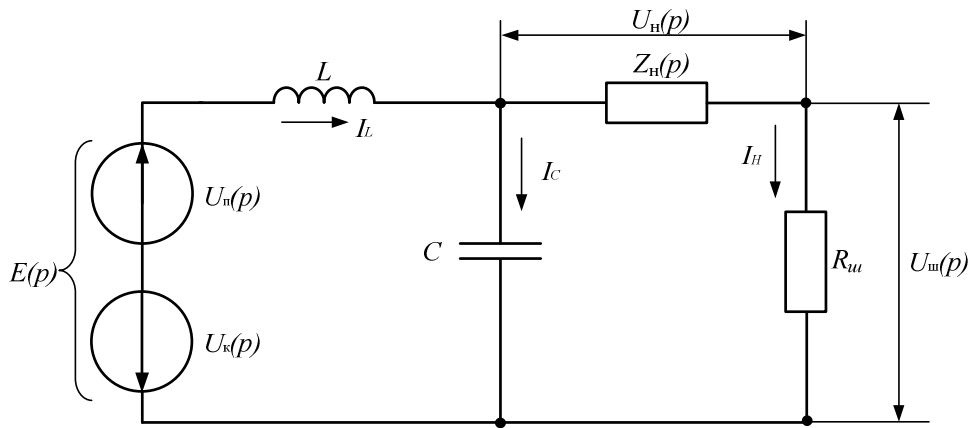


Рис. 3 Схема заміщення комбінованого активного фільтра послідовного типу

Зв'язок між сигналом електрорушійної сили  $E(p)$  та напруги шунта  $U_w(p)$  отримемо, використовуючи сигнальний граф, який зображений на рис. 4.

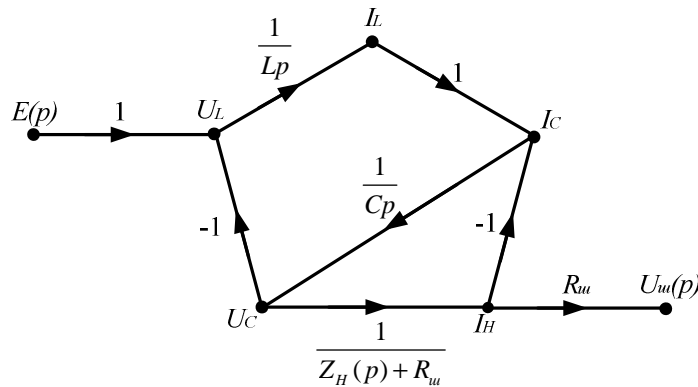


Рис. 4 Сигнальний граф, який відповідає еквівалентній схемі зображеній на рис. 2

Визначник сигнального графу рівний:

$$\Delta = 1 - (L_1 + L_2), \quad (3)$$

де  $L_i$  – передача  $i$ -того контуру;

$$L_1 = -\frac{1}{LCp^2}; \quad (4)$$

$$L_2 = -\frac{1}{Cp[Z_H(p) + R_u]}. \quad (5)$$

Таким чином, після підстановки (4) та (5) в (3) та проведення деяких перетворень, отримаємо вираз для визначника сигнального графу:

$$\Delta = 1 + \frac{1}{LCp^2} + \frac{1}{Cp[Z_H(p) + R_u]} = \frac{LCp^2[Z_H(p) + R_u] + Z_H(p) + R_u + Lp}{LCp^2[Z_H(p) + R_u]}. \quad (6)$$

Шлях передачі сигнального графу:

$$P = \frac{R_u}{CLp^2 \cdot [Z_H(p) + R_u]}. \quad (7)$$

Передавальна функція схеми заміщення комбінованого активного фільтра (рис. 3):

$$H(p) = \frac{R_u CLp^2 [Z_H(p) + R_u]}{CLp^2 [Z_H(p) + R_u] \{ CLp^2 [Z_H(p) + R_u] + Z_H(p) + R_u + Lp \}} = \frac{R_u}{\left[ CLp^2 + \frac{L}{Z_H(p) + R_u} p + 1 \right] [Z_H(p) + R_u]}. \quad (8)$$

Відповідно з виразів (1) та (2) отримаємо передавальну функцію запропонованого активного фільтра:

$$H(p) = \frac{U_u}{E(p)} = \frac{U_u}{U_n(p) - U_k(p)}, \quad (9)$$

де напруга шунта буде рівною  $U_u(p) = H(p) \cdot U_n(p) - H(p) \cdot U_k(p) = H(p) \cdot U_n(p) - U_u(p) \cdot K_o$ .

Визначаємо коефіцієнт  $K_u$ , що залежить від комплексного опору навантаження  $Z_n(p)$  та опору шунта  $R_u$ :

$$K_u = \frac{R_u}{Z_n(p) + R_u} \approx \frac{R_u}{Z_n(p)}. \quad (10)$$

Опір навантаження в операторній та комплексних формах:

$$Z_n(p) = L_n \cdot p + R_n; \quad Z_n(j\omega) = R_n + j\omega L_n. \quad (11)$$

Повний опір навантаження в скалярній формі:

$$Z_n = \sqrt{R_n^2 + \omega^2 L_n^2}. \quad (12)$$

Так як  $U_u(p)(1 + K_o) = H(p) \cdot U_n(p)$ , виходячи з цього визначаємо залежність передавальної функції як відношення напруги шунта  $U_u(p)$  до пульсуючої складової вихідної напруги  $U_n(p)$  тягової підстанції постійного струму:

$$W(p) = \frac{U_u(p)}{U_n(p)} = \frac{H(p)}{1 + K_o} = \frac{K_u}{1 + K_o} \cdot \frac{1}{LCp^2 + \frac{L}{Z_n(p) + R_u} p + 1}. \quad (13)$$

Для переходу з операторної в комплексну форму запису підставляємо  $p = j\omega$  у вираз (13) та отримуємо рівняння для частотних характеристик комбінованого активного фільтра:

$$W(j\omega) = \frac{K_u}{(1 + K_o) \cdot (1 - \omega^2 LC + j\omega \frac{L}{Z_n + R_u})}. \quad (14)$$

Далі отримуємо рівняння для побудови амплітудно-частотної характеристики комбінованого активного фільтра послідовного типу при формуванні зворотного зв'язку за струмом навантаження:

$$K(\omega) = \frac{K_u}{(1 + K_o) \cdot \sqrt{(1 - \omega^2 LC)^2 + \frac{\omega^2 L^2}{(Z_n + R_u)^2}}}. \quad (15)$$

За виразом (15) будемо амплітудно-частотні характеристики комбінованого активного фільтра запропонованої схеми (рис.2).

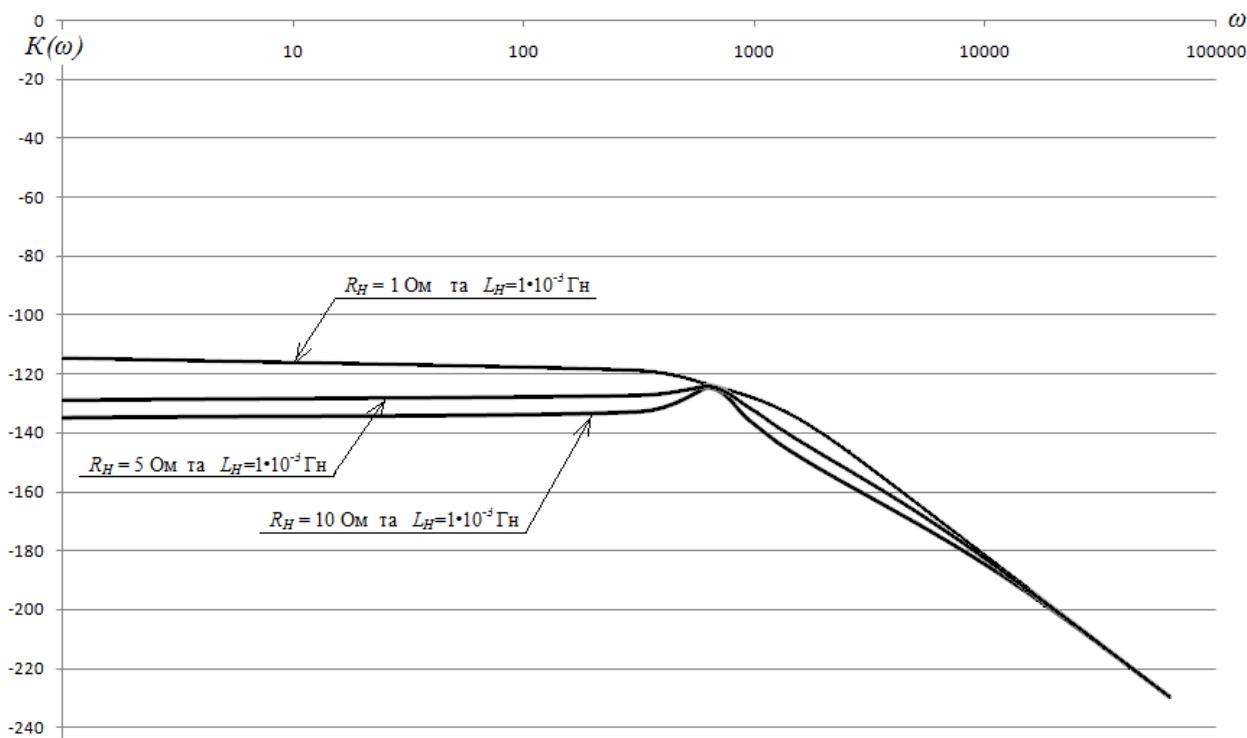


Рис. 5 Амплітудно-частотні характеристики передавальної функції запропонованого комбінованого фільтра послідовного типу при різних видах навантажень

На рис. 5 приведені графіки амплітудо-частотних характеристик, що розраховані з урахуванням рекомендованих відповідно ЦЕ-0024 «Інструкція з технічного обслуговування та ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення та секціонування електрифікованих залізниць» параметрів пасивного фільтра тягової підстанції постійного струму де  $L = 4,5 \cdot 10^{-3}$  Гн,  $C = 300 \cdot 10^{-6}$  Ф. Індуктивність навантаження була прийнята рівною  $L_H = 1 \cdot 10^{-3}$  Гн, активний опір навантаження відповідно був прийнятий рівним  $R_{H1} = 1$  Ом,  $R_{H2} = 5$  Ом,  $R_{H3} = 10$  Ом. Опір шунта був прийнятий рівним  $R_u = 2 \cdot 10^{-5}$  Ом. Контурний коефіцієнт передачі прийнятий  $K_o = 10$ . Проаналізувавши отримані залежності логарифмічно-амплітудних характеристик системи автоматичного регулювання комбінованого активного фільтра при формуванні зворотного зв'язку за струмом навантаження показав, що частотні властивості його схеми значно залежать від величини навантаження. Аналіз замкнутої структури активного фільтра заключається в корекції методом частотних характеристик заданої системи, яка забезпечує необхідні частотні властивості та критерії якості системи автоматичного регулювання. При побудові частотних характеристик комбінованого активного фільтра послідовного типу з різними видами навантажень було виявлено, що зі зменшенням струму навантаження відбувається процес покращення властивостей запропонованого фільтра з точки зору придушення гармонік.

**Висновки з дослідження.** Проведений аналіз динамічних властивостей комбінованого активного фільтра показав, що його застосування доцільно для покращення якості електричної енергії на виході тягової підстанції та в тяговій мережі постійного струму. Це досягається за рахунок компенсації гармонійних складових напруги та струму в широкому діапазоні частот, в тому числі й неканонічних гармонійних складових, таким чином забезпечується необхідний рівень електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з електричним рухомим складом і засобами залізничної сигналізації, централізації, автоблокування та автоматики.

**Список літератури:** 1. Семененко Ю.О. Дослідження роботи силового активного фільтра послідовного типу // Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: матеріали 76-ї міжнародної науково-технічної конференції 15 – 17 квітня 2014 р. – Харків. – 36. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. №143, 2014 р. – С. 244. 2. Семененко Ю.О. Дослідження роботи комбінованого активного фільтра послідовного типу з імпульсною системою керування // Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: матеріали 77-ї міжнародної науково-технічної конференції 21 – 23 квітня 2015 р. – Харків. – 36. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. №151. – Т.1. – 2015 р. – С. 87. 3. Щербак Я.В. Аналіз роботи пасивних фільтрів тягової підстанції постійного струму / Я.В. Щербак, Ю.О. Семененко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – №1(110) – С. 53-57. 4. Щербак Я.В. Аналіз динамічних характеристик комбінованого фільтра тягової підстанції / Я.В. Щербак, Ю.О. Семененко // 36. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків. – 2013. – №142. – С. 137 – 143. 5. Johan Lundquist, On Harmonic Distortion in Power Systems, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Technical report no 371L, Göteborg, Sweden, P.147. – 2001. 6. Dán A. Filtering of harmonics generated by thyristor controlled AC traction systems/ A. Dán, J. Kisvölcsy, Gy. Varjú // In Proc. II. International Conference on Harmonics in Power Systems, pp.404-413., Winnipeg, 6-7.- October, 1986. 7. Stephen M. Williams, Richard G. Hoff. Discrete controlled harmonic and reactive power compensator // IEEE/ IAS 23-th Annu Mact. Pittsburgh (Pennsylvania). – Oct. 1988. – P. 881 – 887. 8. Ludbork Allan Harmonic filtered for notch reduction // IEEE IAS 21-th Annu. Denver. – P. 1043 – 1047. 9. G.T. Heydt, Y. Liu, “Second harmonic components in power system voltages and currents”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January 2006, pp. 521-523. 10. Luo A. Design considerations for maintaining DC side voltage of hybrid active power filter with injection circuit/ A.Luo, Z.Shuai, J.Shen [et. al.] // Power Electronics, IEEE Transactions.- 2009.-vol. 24.- P. 75-84.

**Bibliography (transliterated):** 1. Semenenko Y.A. Study of the power active filter type. Development of consistent research and innovation in transport materials 76 th International Scientific Conference, (2014), *Coll. Science. works Ukr. state. Acad. boxcars. transp.* No. 143. – Kharkov, Ukraine, p. 244. 2. Semenenko Y.A. The study of the combined active serial-type filter with impulse control system. Development of scientific and innovation in transport materials 77 th International Scientific Conference, (2015), *Coll. Science. works Ukr. state. Acad. boxcars. transp.* No. 151. – Vol.1. – Kharkov, Ukraine, p. 87. 3. Shcherbak J.V. and Semenenko Y.A. Analysis of passive filters traction substation DC, (2015), *Information management systems for rail transport.* No. №1(110) – Kharkov, Ukraine, pp. 53-57. 4. Shcherbak J.V. and Semenenko Y.A. Analysis of dynamic characteristics of traction substation combined filter, (2011), *Coll. Science. works Ukr. state. Acad. boxcars. transp.* No. 142. – Kharkov, Ukraine, pp. 137 - 143. 5. Johan Lundquist, On Harmonic Distortion in Power Systems, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Technical report no 371L, Göteborg, Sweden, P.147. – 2001. 6. 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. 7. 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. 8. Ludbork Allan, (1993), Harmonic filtered for notch reduction, *IEEE IAS 21-th Annu.* Denver. – P. 1043 – 1047. 9. 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. 10. 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.

Поступила (received) 21.08.2015