

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. Бекетова

СЕМЕНЕНКО ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.331:621.311.1

**СТАБІЛІЗУЮЧІ СИЛОВІ АКТИВНІ ФІЛЬТРИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту МОН України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Щербак Яків Васильович,
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
завідувач кафедри електричного транспорту
МОН України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сиченко Віктор Григорович,
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
завідувач кафедри інтелектуальних
систем електропостачання МОН України

кандидат технічних наук
Божко Володимир Вячеславович,
Харківське відділення філії проектно-вишукувального
інституту залізничного транспорту
ПАТ «Українська залізниця», начальник
науково-дослідного відділу «Інфраструктура
залізниць та електрична тяга» КМ України

Захист відбудеться « 27 » грудня 2017 р. о 11.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.089.02 в Харківському національному університеті міського господарства імені О. М. Бекетова МОН України, за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова МОН України за вище наведеною адресою.

Автореферат розісланий « 27 » 11 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.089.02
к.т.н., доцент



В. М. Поліщук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Система тягового електропостачання постійного струму створює заважаючий електромагнітний вплив на пристрої залізничного зв'язку, автоматики, засоби сигналізації, централізації та автоблокування. Такий негативний вплив викликають гармоніки напруги і струму тягової мережі, які генерує перетворювальний агрегат тягової підстанції. Несиметрія трифазної напруги живлення перетворювального агрегату значно впливає на гармонічний склад вихідної напруги тягової підстанції, призводячи до виникнення низькочастотних неканонічних гармонік. Крім цього на навантажених ділянках і особливо на ділянках швидкісного руху з міжпідстанційними зонами великої довжини за рахунок значних втрат в мережі не вдається підтримувати напругу живлення електричного рухомого складу в межах допустимого значення.

Для забезпечення живлення тягової мережі на більшості підстанцій постійного струму застосовуються шестипульсні схеми випрямлячів, які характеризуються відносно низькими коефіцієнтом потужності та жорсткістю зовнішньої характеристики. Тому відбувається їх заміна на дванадцятипульсні випрямлячі, однак це не вирішує усіх проблем по підвищенню ефективності системи тягового електропостачання постійного струму.

Вивченню питань, пов'язаних з якістю електричної енергії тягової мережі, присвячені роботи Гончарова Ю. П., Панасенка М. В., Гриба О. Г., Жежеленка І. В., Трейваса М. Д., Сиченка В. Г., Рябенського В. М., Щербака Я. В., Бадера М. П., Марікіна А. Н.

При невеликих тягових навантаженнях проблема підвищення ефективності системи тягового електропостачання постійного струму може бути вирішена подавленням низькочастотних гармонік у вихідній напрузі підстанції застосуванням систем активної фільтрації. На ділянках з високою інтенсивністю та при швидкісному рухові електропоїздів необхідні рішення по перетворювальному агрегату, що дозволяють підтримувати напругу в тяговій мережі на необхідному рівні застосуванням стабілізації або автоматичного регулювання вихідної напруги підстанцій. Таким чином, пошук шляхів вирішення проблеми підвищення ефективності системи тягового електропостачання постійного струму методами активної фільтрації та стабілізації є актуальним завданням, що й визначило напрям дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» УкрДУЗТ МОН України з урахуванням концепції розвитку транспортно-залізничного комплексу України на середньотерміновій період до 2020 року (Наказ Державної адміністрації залізничного транспорту № 764 від 05.11.2001 р.), в рамках «Програми енергозбереження на залізничному транспорті України в 2007 році» (затверджена 16.02.2007 № ЦЗТ – 12/112), а також відповідно до НДР МОН України «Покращення якості електричної енергії в контактній мережі постійного струму» (№ ДР 0114U005597) та «Перевірка електромагнітної сумісності тягової підстанції з контактною мережею» (№ ДР 0115U004788), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності системи тягового електропостачання постійного струму застосуванням компенсації гармонік випрямленої напруги в широкому діапазоні частот і стабілізації напруги на виході тягової підстанції за допомогою комбінованого активного фільтра та активного фільтра-стабілізатора послідовного типу.

Для досягнення поставленої мети по підвищенню ефективності системи тягового електропостачання необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати існуючі методи компенсації гармонік та стабілізації вихідної напруги на тягових підстанціях постійного струму;

- отримати аналітичне співвідношення для вибору постійної часу згладжувачого LC -фільтра по заданій величині еквівалентної заважаючої напруги некерованого випрямляча тягової підстанції;

- дослідити структури комбінованих активних фільтрів послідовного типу, в тому числі з селективними ланками в колах зворотного зв'язку, застосування яких у випрямній установці тягової підстанції дозволяє підвищити ступінь компенсації гармонік вихідної напруги в широкому діапазоні частот;

- дослідити електромагнітні процеси в перетворювальному агрегаті з активним фільтром-стабілізатором з двобічною широтно-імпульсною модуляцією на базі ємнісного накопичувача енергії, який забезпечує компенсацію гармонік випрямленої напруги в широкому діапазоні частот та її стабілізацію;

- отримати імпульсну модель перетворювача активного фільтра-стабілізатора з двобічною широтно-імпульсною модуляцією на базі ємнісного накопичувача енергії і виконати синтез регулятора його вихідної напруги;

- провести експериментальні дослідження електромагнітних процесів в комбінованих активних фільтрах з селективними ланками в колах зворотного зв'язку, а також у перетворювальному агрегаті тягової підстанції з активним фільтром-стабілізатором з двобічною широтно-імпульсною модуляцією.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси в перетворювальному агрегаті тягової підстанції постійного струму.

Предмет дослідження – активні фільтри послідовного типу перетворювального агрегату тягової підстанції постійного струму.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань використовувалися наступні методи: класичної теорії електричних ланок і методи гармонійного аналізу при дослідженні електромагнітних процесів в перетворювальному агрегаті, працюючому в симетричному та несиметричних режимах; теорія автоматичного регулювання; метод сигнальних графів; математичний апарат Z -перетворень для дослідження динамічних процесів у замкнутій системі автоматичного регулювання активного фільтра-стабілізатора і дослідження ефекту подавлення гармонік; теорія узагальнених функцій для побудови імпульсної моделі активного фільтра-стабілізатора з двобічною ШІМ; метод параметричного формування процесу кінцевої тривалості; імітаційне моделювання для дослідження ефективності роботи комбінованих активних фільтрів послідовного типу та активних фільтрів-стабілізаторів в середовищі MATLAB.

Наукова новизна одержаних результатів:

- отримало подальшого розвитку аналітичне співвідношення для вибору постійної часу згладжувального LC -фільтра за критерієм граничного значення

величини еквівалентної заважаючої напруги некерованого випрямляча тягової підстанції постійного струму;

– вперше запропонований комбінований активний фільтр послідовного типу з селективними ланками, що дозволяє підвищити ступінь подавлення низькочастотних неканонічних гармонік вихідної напруги перетворювального агрегату тягової підстанції постійного струму;

– вперше запропонований активний фільтр-стабілізатор послідовного типу на базі ємнісного накопичувача, який при застосуванні в складі перетворювального агрегату забезпечує подавлення пульсацій та стабілізацію вихідної напруги тягової підстанції постійного струму;

– отримала подальший розвиток імпульсна модель, призначена для дослідження динамічних процесів в замкнутих структурах, що містять активний фільтр-стабілізатор з двобічною широтно-імпульсною модуляцією;

– вперше встановлені аналітичні співвідношення для визначення параметрів передавальної функції регулятора напруги, які забезпечують реалізацію процесу кінцевої тривалості в системі автоматичного регулювання перетворювача активного фільтра-стабілізатора з двобічною широтно-імпульсною модуляцією;

– отримали подальшого розвитку аналітичні співвідношення для визначення факторів пульсацій одноконтурних систем автоматичного регулювання з двобічною широтно-імпульсною модуляцією, що дозволяють враховувати особливості передачі пульсаційної складової вихідної напруги активного фільтра-стабілізатора.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційної роботи рекомендуються для практичного використання при модернізації та розробці нових перетворювальних агрегатів з метою підвищення якості електричної енергії на виході тягових підстанцій. Результати роботи впроваджено в службі електропостачання філії «ПЗ» ПАТ «Укрзалізниця» (м. Харків) та Харківській дистанції електропостачання «ЕЧ-2» (м. Харків). Теоретичні положення дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі кафедри «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» УкрДУЗТ при викладанні курсів «Електромагнітна сумісність», «Електропостачання залізниць і метрополітенів», «Тягові та трансформаторні підстанції», дипломному проектуванні студентів спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», а також в Інституті перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів УкрДУЗТ при підготовці фахівців районів контактних мереж (ЕЧК).

Особистий внесок здобувача полягає, у тому, що всі положення дисертації отримано здобувачем особисто. Серед них: аналіз електромагнітної сумісності існуючих схем перетворювальних агрегатів з тяговою мережею; аналіз існуючих способів і технічних засобів для поліпшення електромагнітної сумісності тягової підстанції постійного струму з контактною мережею; співвідношення для визначення постійної часу згладжувального LC -фільтра по заданій величині заважаючої напруги на виході перетворювального агрегату тягової підстанції постійного струму з некерованим випрямлячем; дослідження ефекту подавлення канонічних і неканонічних гармонік напруги тягової мережі з допомогою комбінованого активного фільтра послідовного типу з селективними ланками; дослідження статичних і динамічних характеристик активного фільтра-

стабілізатора; синтез передавальної функції регулятора напруги для запропонованої системи автоматичного регулювання вихідної напруги активного фільтра-стабілізатора; перевірка адекватності отриманих у дисертаційній роботі розрахункових співвідношень на комп'ютерних моделях в середовищі MATLAB.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічних та науково-практичних конференціях: «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 2014-2016 рр.), «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості» (сmt. Воловець, Закарпатської обл., 2015 р.), «Електротехнічні та комп'ютерні системи» (м. Одеса, 2015 р.), «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (м. Харків, 2015 р.), «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (м. Харків, 2015 р., м. Чорноморськ, Одеської обл., 2016 р.), а також на Семінарах Національної академії наук України «Напівпровідникові та мікропроцесорні пристрої в електроенергетичних системах» (м. Харків, УкрДАЗТ, 2012 р.) та «Проблеми перетворення електричної енергії в системах електричного транспорту» (м. Харків, УкрДУЗТ, 2013-2016 рр.).

Публікації. Основні положення дисертації викладено в 22 публікаціях, у тому числі в 6 статтях у виданнях, що внесені до міжнародних науково-метричних баз даних, в 6 статтях у фахових наукових виданнях України, у 8 матеріалах і тезах наукових конференцій, в 1 патенті на винахід № 114146, і в 1 патенті на корисну модель № 107897.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку джерел інформації зі 129 найменувань і додатків. Загальний обсяг роботи – 207 сторінок, у тому числі: 156 сторінок основного тексту, 74 рисунки і 3 таблиці, додатки на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, викладено методи дослідження та наукову новизну, практичне значення результатів дисертації і наведено відомості про апробацію роботи.

У першому розділі проведено аналіз основних вимог до якості електричної енергії в системі тягового електропостачання постійного струму у відповідності до ГОСТ 13109-97 з точки зору їх впливу на електричний рухомий склад та суміжні електроустановки. Відзначено, що серед основних показників якості, які суттєво впливають на споживачів електроенергії, є відхилення напруги їх живлення, коефіцієнт пульсацій напруги та еквівалентна заважаюча напруга.

При застосуванні багатопульсних схем випрямлячів у більшості випадків експлуатуються шестипульсні перетворювальні агрегати, виконані за трифазною мостовою схемою або схемою «дві зворотні зірки зі зрівняльним реактором». При цьому на залізницях України відбувається перехід до дванадцятипульсних схем випрямлячів при модернізації застарілого обладнання на існуючих тягових підстанціях та будівництві нових. Підвищення пульсності приводить до збільшення жорсткості зовнішньої характеристики випрямного агрегату, що важливо для забезпечення якісного живлення ЕРС. Внаслідок впливу власної несиметрії випрямляча та напруги живлення у вихідній напрузі тягової

підстанції виникають неканонічні гармоніки, що не залежать від пульсності випрямляча, а є функцією номеру гармоніки та коефіцієнта несиметрії.

Для зменшення пульсацій випрямленої напруги на тягових підстанціях постійного струму застосовують пасивні фільтри, що складаються з аперіодичного LC -фільтра та режекторних ланок, налаштованих на частоти неканонічних та канонічних гармонік напруги: 100, 200, 300 Гц та ін. Такі фільтри не забезпечують необхідну якість електричної енергії та мають ряд недоліків: низька добротність знижує фільтруючі властивості, вони можуть в перехідних процесах стати причиною виникнення резонансних явищ і мають великі масу та габарити. Більш ефективним є застосування комбінованих активних фільтрів (КАФ), принцип дії яких заснований на внесенні у вихідний ланцюг випрямляча електрорушійної сили компенсації, що дозволяє більш ефективно подавляти низькочастотні гармонійні складові напруги на навантаженні.

На ділянках з високою інтенсивністю руху, щоб підтримувати напругу живлення електричного рухомого складу в межах допустимого значення, необхідно застосовувати стабілізацію або автоматичне регулювання вихідної напруги підстанцій. Показано основні напрямки досліджень активних методів компенсації неканонічних гармонік і стабілізації вихідної напруги тягових підстанцій, обґрунтована перспективність подальшого дослідження КАФ послідовного типу та активного фільтра-стабілізатора з ємнісним накопичувачем енергії.

Розділ завершується постановкою задач дослідження.

У другому розділі запропонований вираз (1), який дозволяє обчислювати значення постійної часу T_ϕ пасивного LC -фільтра тягової підстанції з некерованим випрямлячем за заданою величиною еквівалентної заважаючої напруги U_M :

$$T_\phi = \frac{1}{2\pi m f_c} \sqrt{\rho_{k=1} \frac{2U_{d0}}{(m^2 - 1)U_M} - 1}, \quad (1)$$

де $\rho_{k=1}$ – коефіцієнт психофотометричного впливу для першої гармоніки напруги.

Приведено результати дослідження електромагнітних процесів у КАФ послідовного типу, який забезпечує ефективну компенсацію змінної складової вихідної напруги перетворювального агрегату тягової підстанції. Пасивна ланка КАФ призначена для зниження амплітуд високочастотних гармонійних складових вихідної напруги, а для ефективного подавлення низькочастотних гармонік використовується активна ланка фільтра.

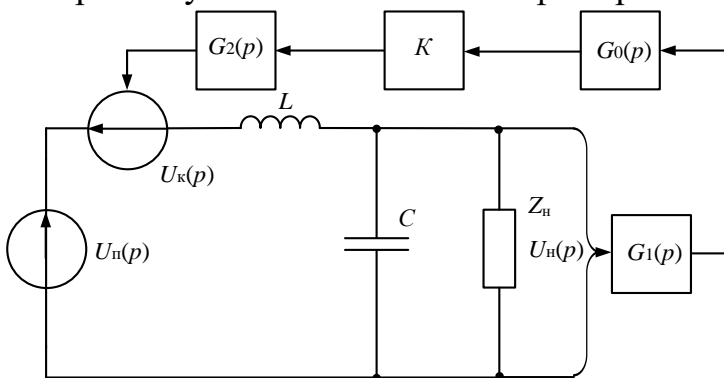


Рисунок 1 – Еквівалентна схема КАФ із зворотним зв'язком за напругою

Еквівалентна схема КАФ послідовного типу із зворотним зв'язком за напругою наведена на рис.1. Компенсація низькочастотних гармонік випрямленої напруги здійснюється внесенням в ланцюг послідовно з джерелом пульсацій $U_n(p)$ напруги компенсації $U_k(p)$, яка формується каналом зворотного зв'язку активної частини КАФ. При дослідженні

динамічних процесів у КАФ із зворотним зв'язком по напрузі навантаження встановлено, що для якісного формування ланцюгом зворотного зв'язку компенсуючого сигналу потрібна коригувальна ланка, передавальна функція якої забезпечує трапецієподібну форму ЛАХ системи і має наступний вид:

$$G_0(p) = \frac{T_1 p + 1}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}. \quad (2)$$

Для побудови ЛАЧХ КАФ послідовного типу зі зворотним зв'язком за напругою навантаження коефіцієнт передачі визначається за формулою:

$$K(\omega) = 20 \lg \sqrt{\frac{(\omega^2 A_1)^2 + (\omega A_2)^2}{[\omega^4 A_7 - \omega^2(A_1 + A_6) + 1]^2 + [\omega^5 A_6 - \omega^3 A_8 + \omega(A_2 + A_7)]^2}}, \quad (3)$$

де $A_1 = K_1 K_y T_1^2$; $A_2 = K_1 K_y T_1$; $A_3 = T_\phi^2 T_2 T_3$; $A_4 = 2T_\phi T_2 \left(\xi T_3 + T_\phi T_3 + \frac{T_\phi}{2} \right)$;

$A_5 = T_\phi T_2 \left(\frac{T_3}{T_\phi} + 4\xi T_3 + \frac{T_\phi T_3}{T_2} + 2T_\phi + 2 \right)$; $A_6 = T_2(2T_3 + 2\xi T_\phi + 1) + 2\xi T_\phi T_3 + T_\phi^2$;

$A_7 = T_3 + 2T_2 + 2\xi T_\phi$.

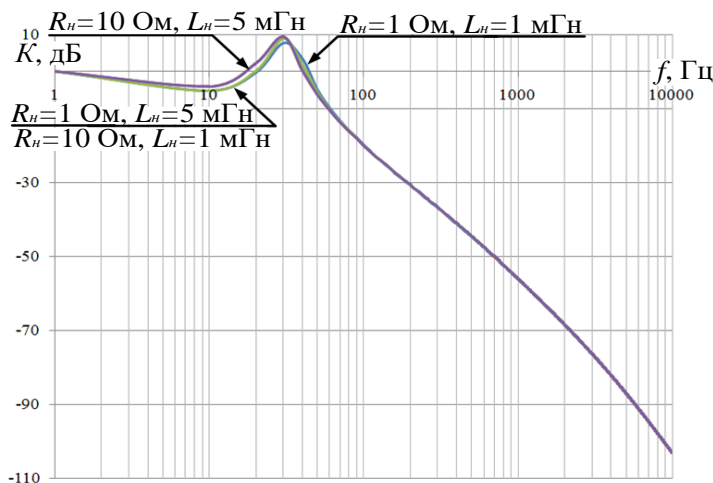


Рисунок 2 – ЛАЧХ КАФ послідовного типу зі зворотним зв'язком за напругою

Аналіз ЛАЧХ передавальної функції (рис. 2) КАФ при формуванні зворотного зв'язку за напругою навантаження показав, що його частотні властивості істотно залежать від величини навантаження. Використання послідовних активних структур замість паралельних надає вищі компенсаторні властивості, однак вимагає ускладнення конструкції розділового трансформатора.

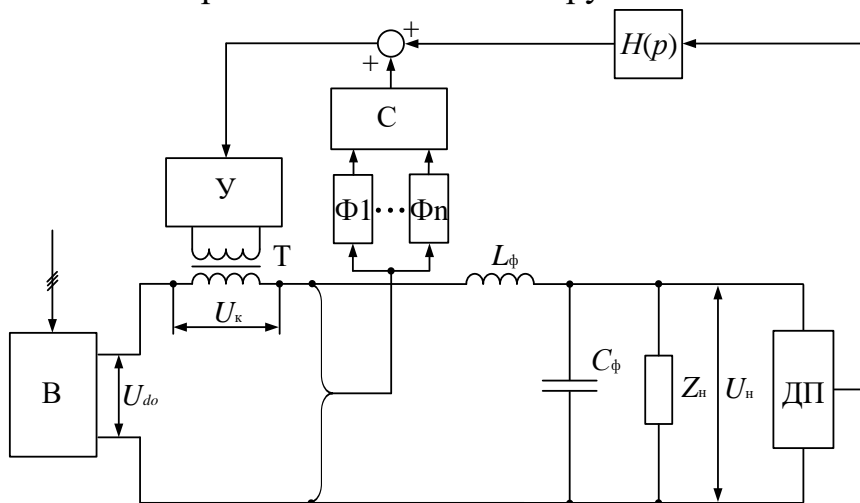


Рисунок 3 – Узагальнена структурна схема КАФ з селективними ланками

Запропонована також структура КАФ послідовного типу з селективними ланками (рис. 3), що являє собою дві паралельно працюючих частини. Перша – датчик пульсацій ДП та коригуюча ланка $H(p)$, друга – селективні ланки $(\Phi 1-\Phi n)$, налаштовані на канонічні та неканонічні гармоніки випрямленої напруги.

Коефіцієнт подавлення $K_{\text{под}}$ від частоти розрахований за рівнянням:

$$K_{\text{под}} = \sqrt{\frac{(\omega^4 C_3 - \omega^6 C_1 - \omega^2 C_5)^2 + (\omega^5 C_2 - \omega^3 C_4 + \omega C_6)^2}{(\omega^4 B_1 - \omega^2 B_3 + 1)^2 + (\omega B_4 - \omega^3 B_2)^2}}, \quad (4)$$

де $B_1 = T_0^2 T_2 T_4$; $B_2 = 2\xi T_0 T_2 T_4 + T_0^2 T_2 + T_0^2 T_4$; $B_3 = T_2 T_4 + 2\xi T_0 T_2 + 2\xi T_0 T_4 + T_0^2$;
 $B_4 = T_2 + T_4 + 2\xi T_0$; $C_1 = T_\phi^2 B_1$; $C_2 = T_\phi^2 B_2 + 2\xi T_\phi B_1 + K_y B_5$;
 $C_3 = T_\phi^2 B_3 + 2\xi T_\phi B_2 + B_1 + K_y B_6$; $C_4 = T_\phi^2 B_4 + 2\xi T_\phi B_3 + B_2 + K_y B_7$;
 $C_5 = T_\phi^2 + 2\xi T_\phi B_4 + B_3 + K_y B_8$; $C_6 = 2\xi T_\phi + B_4 + K_y B_9$.

Графік залежності коефіцієнта подавлення КАФ з селективними ланками від частоти наведено на рис. 4 при різних значеннях опору навантаження. Встановлено, що застосування селективних ланок у ланцюзі зворотного зв'язку КАФ послідовного типу, налаштованих на неканонічні гармоніки, дозволяє істотно підвищити ступінь подавлення низькочастотних неканонічних гармонік вихідної напруги перетворювального агрегату тягової підстанції постійного струму. Для підвищення коефіцієнта корисної дії системи активної фільтрації замість безперервного можна використовувати імпульсний спосіб формування напруги компенсації змінної складової шляхом застосування інвертора напруги на швидкодіючих ключах на *IGBT* або *MOSFET* у якості підсилювача.

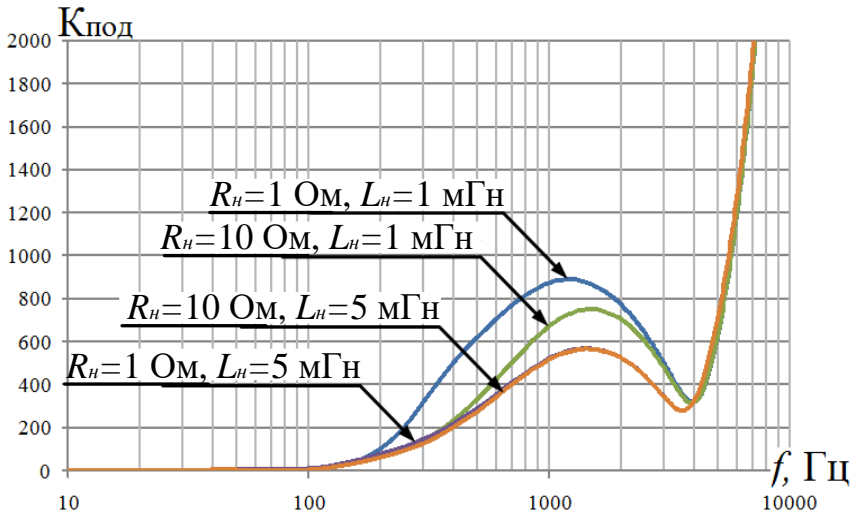


Рисунок 4 – Залежності коефіцієнта подавлення КАФ з селективними ланками від частоти

Завдяки використанню підвищеної частоти ШІМ в інверторі можна забезпечити високу якість формування гармонік напруги компенсації в широкому діапазоні частот, як і при використанні лінійного підсилювача. Щоб підвищити якість напруги компенсації, крім підвищення частоти необхідно

застосувати однополярну ШІМ, яка простіше за все може бути реалізована в однофазному мостовому інверторі напруги. Схема ланцюгів протікання струму інвертора містить $L_p C_p$ – резонансний фільтр, який встановлений на виході інвертора разом з послідовним індуктивним фільтром L_n для подавлення гармоніки напруги компенсації з частотою ШІМ і недопущення потрапляння високочастотних пульсацій у силову частину ВУ тягової підстанції.

Маса та розміри розділового трансформатора T визначаються струмом і напругою вторинної обмотки, бо струм цієї обмотки у багато разів вище струму первинної обмотки. Розрахована мінімально необхідна напруга живлення інвертора активної ланки комбінованого фільтра послідовного типу складає

488 В, що дозволяє застосувати двоквADRантні керовані ключі зі знакозмінних струмом на основі *MOSFET* і частоту ШІМ інвертора 50 кГц.

У третьому розділі показано, що для підвищення ефективності роботи системи тягового електропостачання постійного струму доцільно застосувати активний фільтр-стабілізатор (АФС) на базі ємнісного накопичувача енергії у перетворювальному агрегаті тягової підстанції, схема якого наведена на рис. 5.

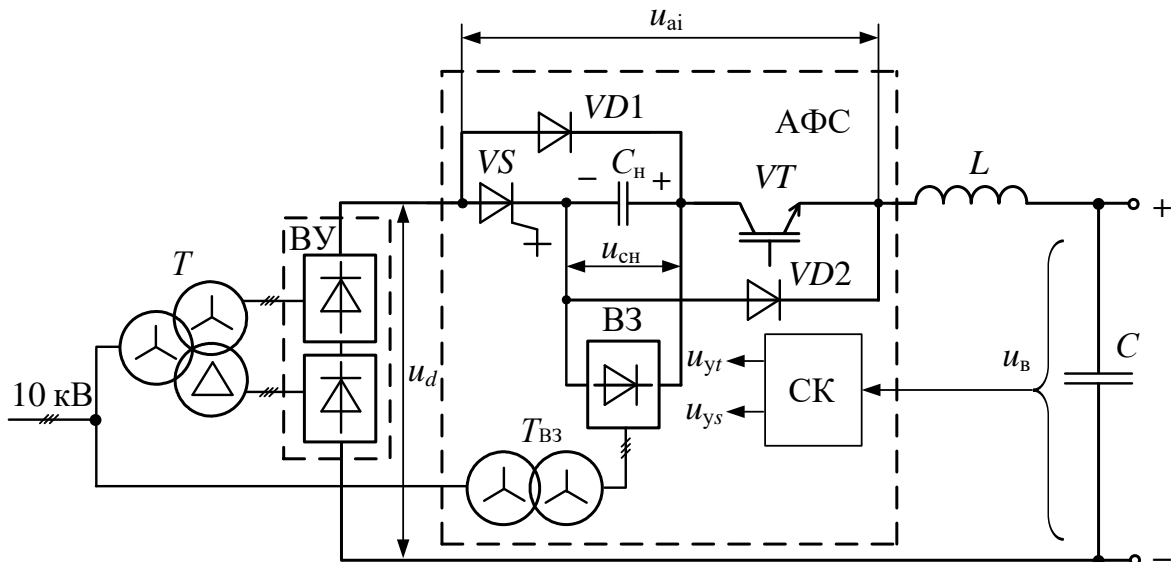


Рисунок 5 – Структурна схема активного фільтра-стабілізатора

При цьому, як показують результати досліджень, кількість силових ключів, втрати енергії в них і вартість АФС будуть значно нижче, ніж у вольтододавочних перетворювачів такої ж потужності на базі трифазних випрямлячів з ШІМ, які пропонуються іншими авторами. Силовий комутатор АФС включений послідовно з основною випрямною установкою (ВУ) тягової підстанції, яка представляє собою некерований дванадцятипульсовий випрямляч. Система керування (СК) з іншими елементами схеми утворює замкнену систему автоматичного регулювання, яка реалізує активну фільтрацію та стабілізацію вихідної напруги u_B перетворювального агрегату тягової підстанції. Силова схема АФС, як і схеми безтрансформаторних активних фільтрів послідовного типу, побудована на базі ємнісного накопичувача енергії C_H (рис. 5), який включений у діагональ однофазного мостового комутатора. Відмінність даної схеми полягає в тому, що для активних фільтрів послідовного типу використовується заряд накопичувача тільки струмом навантаження від основного джерела напруги, а в схемі АФС для заряду C_H передбачений трифазний мостовий випрямляч заряду ВЗ. Його потужність становить приблизно 10-12 % потужності основної ВУ і такий додатковий випрямляч дозволяє АФС за рахунок енергії ємнісного накопичувача забезпечувати більш якісну активну фільтрацію та стабілізацію вихідної напруги перетворювального агрегату тягової підстанції.

Перетворювач АФС з напруги ємнісного накопичувача формує вихідну імпульсну напругу u_{ai} . LC-фільтром з вихідної напруги АФС u_{ai} виділяється сукупність усереднених на періоді ШІМ значень – гладка складова, яка показана штриховою лінією та позначена u_{ar} на діаграмі напруг (рис. 6).

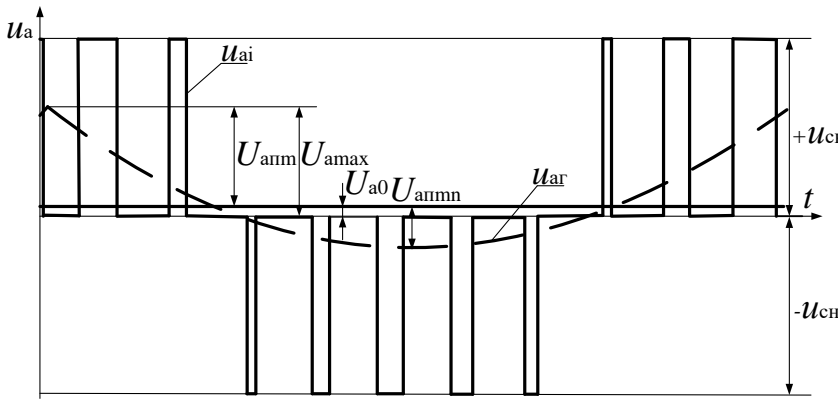


Рисунок 6 – Діаграма вихідної напруги АФС

Перетворювач АФС при $U_{a0} < U_{ампн}$ формує напругу u_{ai} змінної полярності як інвертор напруги, а при $U_{a0} \geq U_{ампн}$ він працює як широтно-імпульсний перетворювач з вихідною однополярною імпульсною напругою. Амплітуда напруги $u_{ар}$ визначається рівнянням:

$$U_{a \max} = \Delta U_{d0} + \Delta U_{d\gamma} + \sum_{k=m}^{\infty} U_{dk \max} + \sum_{v=2}^{\infty} U_{dv \max}, \quad (5)$$

де ΔU_{d0} – зниження постійної складової випрямленої напруги, викликане зниженням напруги живлення ВУ; $\Delta U_{d\gamma}$ – зниження випрямленої напруги, обумовлене наявністю кута комутації діодів основної ВУ; $U_{dk \max}$, $U_{dv \max}$ – амплітуди канонічних та неканонічних гармонік випрямленої напруги.

Встановлено, що в режимі симетрії трифазної напруги живлення регульовальна характеристика перетворювача напруги АФС з двобічною ШІМ представляє пропорційну залежність відносної тривалості вихідного імпульсу ШІМ від напруги керування, а його статичний коефіцієнт передачі постійний.

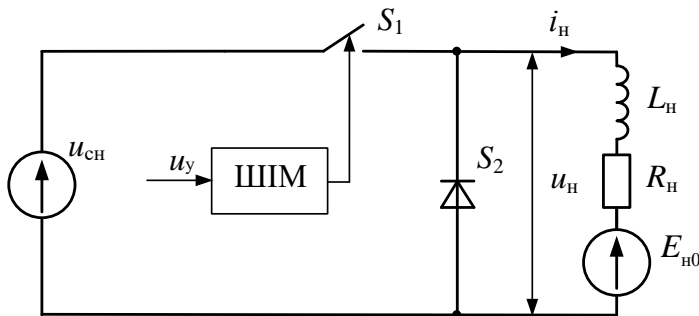


Рисунок 7 – Еквівалентна схема перетворювача напруги АФС з ШІМ

Для аналізу динамічних характеристик запропоновано імпульсну модель (рис. 7) перетворювача АФС з двобічною ШІМ в режимі безперервного струму для одного інтервалу дискретності ШІМ. На діаграмах напруг у перетворювачі АФС (рис. 8) використовуються позначення: $u_{сн}$ – напруга ємнісного

накопичувача енергії; $U_{сн0}$ – постійна складова напруги ємнісного накопичувача $u_{сн}$; $U_{снпн}$ – амплітуда пульсацій напруги ємнісного накопичувача; θ_c – період дискретності пульсацій напруги ємнісного накопичувача; $\theta_{ш}$ – період дискретності ШІМ перетворювача АФС; $c = \theta_c / \theta_{ш}$ – співвідношення періодів дискретності; $i = 1, 2, 3, \dots c$ – порядковий номер періоду дискретності ШІМ; $\theta_{\gamma_i} = \gamma_i \theta_{ш}$ – тривалість вихідного імпульсу ШІМ; $\Delta \theta_{\gamma_{in}}$ та $\Delta \theta_{\gamma_{ik}}$ – приріст тривалості вихідного імпульсу ШІМ; u_{in} та u_{ik} – послідовності імпульсів, що містять інформацію про приріст вихідного імпульсу напруги активного фільтра-стабілізатора.

В результаті аналізу встановлено, що перетворювач напруги активного фільтра стабілізатора з двобічною ШІМ для малих значень прирощення сигналу керування являє собою амплітудно-імпульсний модулятор другого роду, у

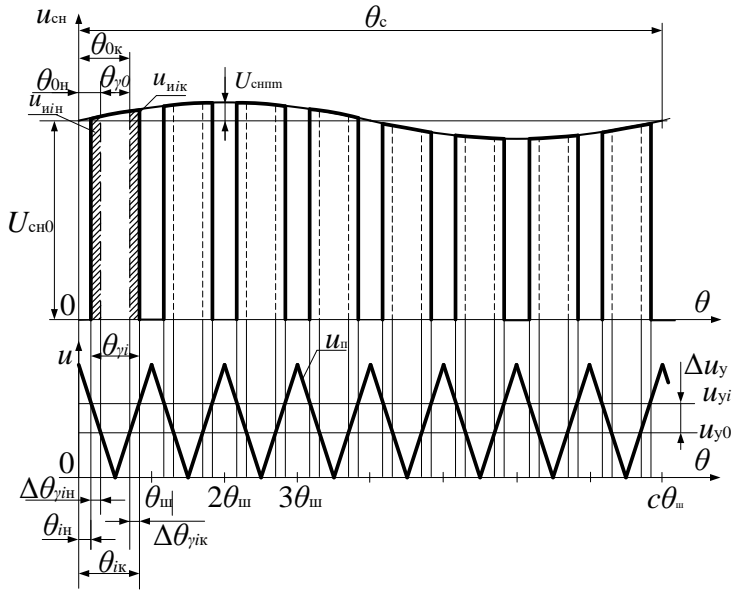


Рисунок 8 – Діаграми напруг у перетворювачі АФС з двобічною ШІМ у динамічному режимі

якому передача інформації здійснюється двома каналами. Кожен з каналів містить статичний і динамічний коефіцієнти передачі, обумовлені видом сигналу розгортки та пульсуючої складової вихідної напруги перетворювача активного фільтра-стабілізатора. Динамічний зв'язок між приростами вхідної Δu_y та вихідної Δu_n величини напруги щодо стану системи при новому значенні сигналу керування u_{yi} має наступний вигляд:

$$\Delta u_n = \Delta u_y(\theta_{in}) \theta_{in} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^c K_{nin} F_{in} \delta(\theta_{\gamma i} - \theta_{in}) + \Delta u_y(\theta_{ik}) \theta_{in} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^c K_{nik} F_{ik} \delta(\theta_{\gamma i} - \theta_{ik}), \quad (6)$$

$$\text{де } K_{nin} = \frac{d\theta_{in}}{du_n(\theta_{in})} \left[U_{cn0} + \sum_{v=2}^{\infty} U_{cnvm} \sin(v\theta_{in} + \varphi_v) + \sum_{k=m}^{\infty} U_{cnkm} \sin(k\theta_{in} + \varphi_k) \right]; \quad (7)$$

$$K_{nik} = \frac{d\theta_{ik}}{du_n(\theta_{ik})} \left[U_{cn0} + \sum_{v=2}^{\infty} U_{cnvm} \sin(v\theta_{ik} + \varphi_v) + \sum_{k=m}^{\infty} U_{cnkm} \sin(k\theta_{ik} + \varphi_k) \right].$$

У відповідності з рівнянням (6) побудована імпульсна модель перетворювача напруги активного фільтра-стабілізатора з двобічною ШІМ (рис. 9).

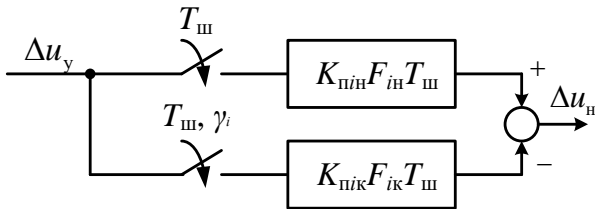


Рисунок 9 – Імпульсна модель перетворювача АФС з двобічною ШІМ

Виконано синтез оптимальної передавальної функції приведеної неперервної частини замкнутої системи, що дозволяє отримати фізично реалізований процес кінцевої тривалості:

$$H(p) = \frac{T_2^2 (p - p_3) \cdot (p - p_4)}{T_1 T_\phi^2 p (p - p_1) \cdot (p - p_2)}, \quad (8)$$

де p_3 та p_4 – нулі передавальної функції, які мають зв'язок з полюсами p_1, p_2 .

Визначена передавальна функція ПІД-регулятора:

$$G(p) = \frac{T_2^2 p^2 + 2\mu T_2 p + 1}{T_1 p}, \quad (9)$$

де T_1, T_2 – постійні часу передавальної функції регулятора;
 μ – коефіцієнт демпфування.

Для визначення постійних часу та коефіцієнта демпфування передавальної функції регулятора (9) було використане модифіковане Z-перетворення.

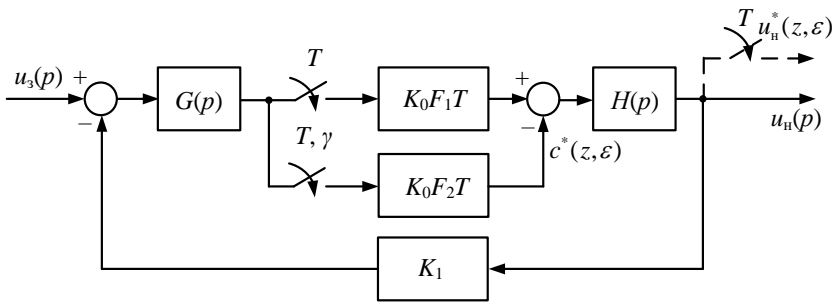


Рисунок 10 – Структурна схема автоматичного регулювання вихідної напруги перетворювача активного фільтра-стабілізатора

Структурна схема системи автоматичного регулювання вихідної напруги перетворювача АФС наведена на рис. 10. В результаті отримано умови процесу кінцевої тривалості:

$$T_1 = K_0 K_1 T F_1. \quad (10)$$

$$T_2^2 = T_\phi^2 \left(1 + K_0 K_1 F_2 \frac{T}{T_1} \right). \quad (11)$$

$$\mu = a(T_2^2 - T_\phi^2) T_\phi \frac{\frac{F_1}{F_2} - 1 + e^{a\gamma T} \left(\frac{T_2^2}{T_\phi^2} + 1 \right) \left[\cos \gamma \beta T + \frac{\xi}{a} \cdot \frac{T_2^2 + T_\phi^2}{T_2^2 - T_\phi^2} \sin \gamma \beta T \right]}{2T_2(T_2^2 + T_\phi^2) \cdot \sin \gamma \beta T} \left(1 + K_0 K_1 F_2 \frac{T}{T_1} \right). \quad (12)$$

Для перевірки отриманих параметрів передавальної функції регулятора напруги, виконано розрахунок і побудову перехідного процесу в системі при ступінчатому вхідному впливі.

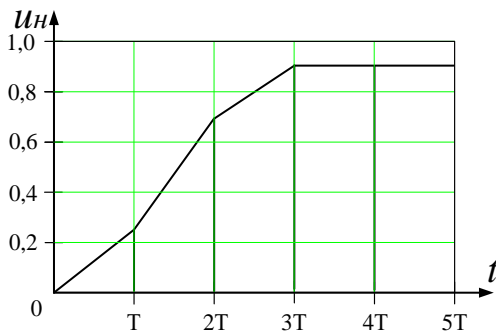


Рисунок 11 – Перехідний процес у замкнутій структурі

Отримано вираз для перехідного процесу:

$$u_n(t) = 0.23 \cdot z^{-1} + 0.68 \cdot z^{-2} + 0.88 \cdot z^{-3} + 0.88 \cdot z^{-4} + \dots + 0.88 \cdot z^{-n}. \quad (13)$$

На рис. 11 представлена залежність $u_n(t)$ перехідного процесу, побудована за рівнянням (13). Як впливає з рис. 11, перехідний процес закінчується за три тактових інтервали дискретності, що відповідає порядку характеристичного рівняння.

Проаналізовано та отримано вирази для визначення факторів пульсацій:

$$F_1^{-1} = 1 - \frac{K_n T}{2T_1} \left(1 - b_1 \left(\frac{\left(1 - e^{-\frac{\xi \gamma T}{T_\phi}} \right) e^{-\frac{\xi T}{T_\phi}}}{1 - e^{-\frac{\xi T}{T_\phi}}} \right) + b_2 \left(\frac{\left(1 - e^{-\frac{\xi \gamma T}{T_\phi}} \right) e^{-\frac{\xi T}{T_\phi}}}{1 - e^{-\frac{\xi T}{T_\phi}}} \right) \right). \quad (14)$$

$$F_2^{-1} = 1 + \frac{K_n T}{2T_1} \left(-b_1 \frac{e^{-\frac{\xi \gamma T}{T_\phi}} - e^{-\frac{\xi T}{T_\phi}}}{1 - e^{-\frac{\xi T}{T_\phi}}} + b_2 \frac{e^{-\frac{\xi \gamma T}{T_\phi}} - e^{-\frac{\xi T}{T_\phi}}}{1 - e^{-\frac{\xi T}{T_\phi}}} \right). \quad (15)$$

На рис. 12 (а, б, в) наведені результати розрахунку факторів пульсацій для різних значень регульованого параметра γ заважаючих частот гармонійних складових та коефіцієнтів демпфування згладжуючого LC-фільтра ξ .

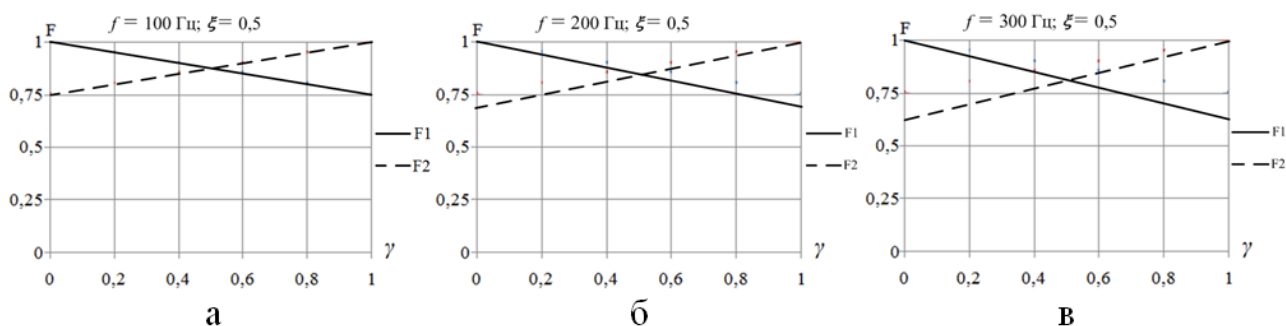


Рисунок 12 – Фактори пульсацій для різних частот гармонік

З отриманих залежностей (рис. 12, а, б, в) випливає, що в системі з двобічною широтно-імпульсною модуляцією спостерігається ефект самокомпенсації дії факторів пульсацій.

У четвертому розділі наведені результати експериментальних досліджень систем активного подавлення пульсацій та стабілізації вихідної напруги за допомогою замкнених систем автоматичного регулювання перетворювальних агрегатів тягової підстанції постійного струму. Ці дослідження виконані шляхом застосування імітаційних моделей, які реалізовані у програмному пакеті MATLAB & Simulink.

Дослідження КАФ послідовного типу були виконані в умовах різних видів навантаження (активного і активно-індуктивного) та при симетричній і несиметричній трифазній напрузі живлення перетворювального агрегату. Як приклад наведено результати моделювання КАФ з імпульсною ланкою в контурі зворотного зв'язку за напругою при активно-індуктивному навантаженні $R_H = 1$ Ом та $L_H = 10^{-3}$ Гн (рис. 13, а), а також при $R_H = 10$ Ом та $L_H = 10^{-3}$ Гн (рис. 13, б).

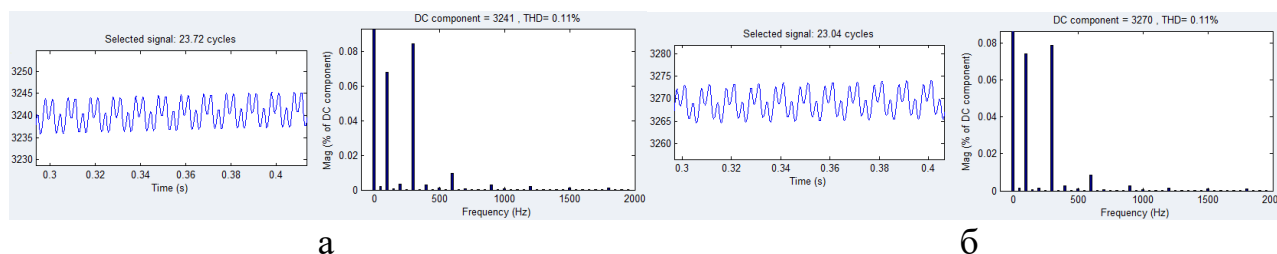


Рисунок 13 – Осцилограми та спектральний склад вихідної напруги тягової підстанції з комбінованим активним фільтром послідовного типу при активно-індуктивному навантаженні та несиметрії напруги живлення випрямляча

З діаграми спектрального складу рис. 13 видно, що зниження струму при активно-індуктивному навантаженні (при наявності несиметрії вхідної напруги випрямляча $\varepsilon = 1\%$) призводить до зростання неканонічних гармонік, відносна амплітуда неканонічної гармоніки частотою 100 Гц дорівнює 0,07%, а коефіцієнт пульсацій досягає 0,11%.

На рис. 14 представлені осцилограми та діаграми спектрального складу пульсацій вихідної напруги тягової підстанції постійного струму при роботі: пасивного фільтра (рис. 14, а), комбінованого активного фільтра послідовного типу без селективної ланки (рис. 14, б), комбінованого активного фільтра з селективною ланкою (рис. 14, в) при активно-індуктивному навантаженні $R_H = 1$ Ом та $L_H = 0,005$ Гн.

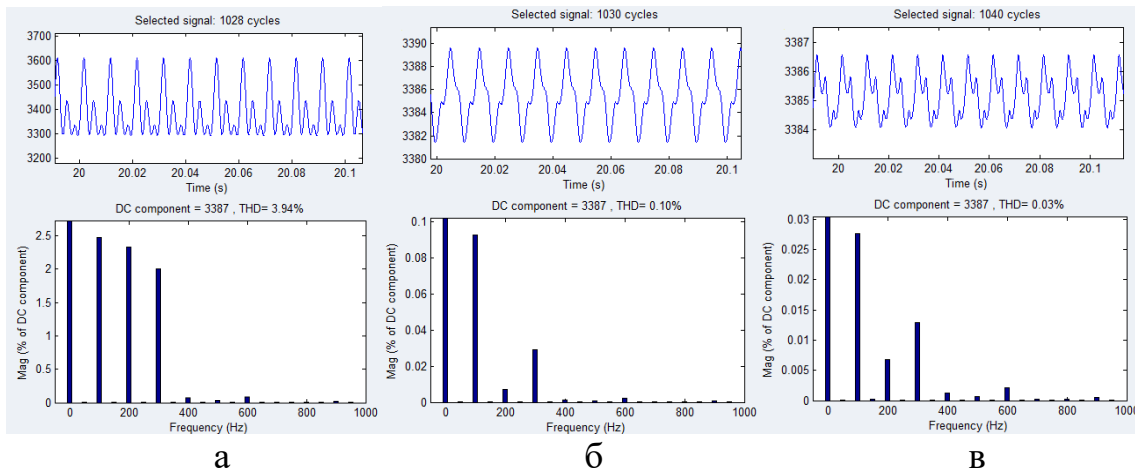


Рисунок 14 – Осцилограми та спектральний склад вихідної напруги тягової підстанції з КАФ послідовного типу з селективною ланкою

В результаті моделювання підтверджено, що наявність селективної ланки в ланцюзі зворотного зв'язку КАФ дозволяє значно знизити низькочастотні гармоніки вихідної напруги та коефіцієнт пульсацій напруги.

Таблиця 1 – Порівняльні показники при різних варіантах фільтруючих пристроїв тягової підстанції постійного струму

Фільтр	Відносне значення гармоніки, %			THD	U_M , В
	$U_{f=100}$	$U_{f=200}$	$U_{f=300}$		
ПФ	2,5	2,3	2	3,94	35,6
ПФ + АФ	0,9	0,01	0,03	0,1	2,8
ПФ + АФ з селект. ланкою	0,027	0,006	0,014	0,05	0,86

В табл. 1 наведені відносні значення гармонік змінної складової вихідної напруги перетворювального агрегату, коефіцієнт пульсацій напруги (THD) та еквівалентна заважаюча напруга U_M . Результати моделювання на імітаційній комп'ютерній моделі АФС з ємнісним накопичувачем енергії для компенсації гармонік та стабілізації вихідної напруги представлені на рис. 16.

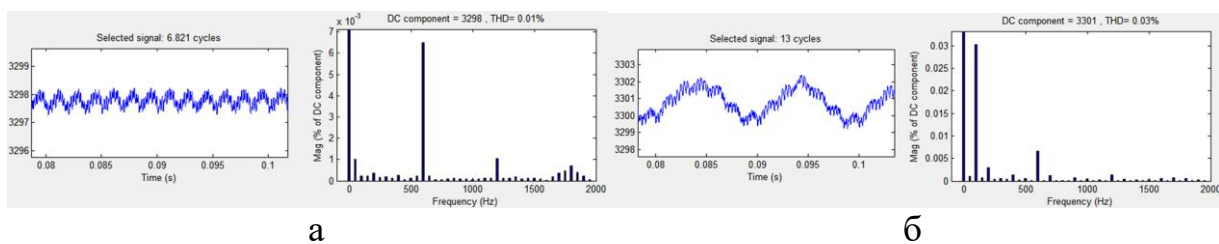


Рисунок 15 – Осцилограми вихідної напруги тягової підстанції і її спектральний склад при застосуванні активного фільтра-стабілізатора

Як видно з результатів моделювання, застосування активного фільтра-стабілізатора послідовного типу з ємнісним накопичувачем енергії в замкнутій структурі регулювання дозволяє забезпечити стабілізацію і подавлення пульсацій вихідної напруги тягової підстанції в широкому діапазоні частот. Коефіцієнт пульсацій вихідної напруги не перевищував 0,01 % при симетрії (рис. 15, а) та 0,03 % при несиметрії (рис. 15, б) трифазної напруги живлення, значення еквівалентної заважаючої напруги було меншим 1 В.

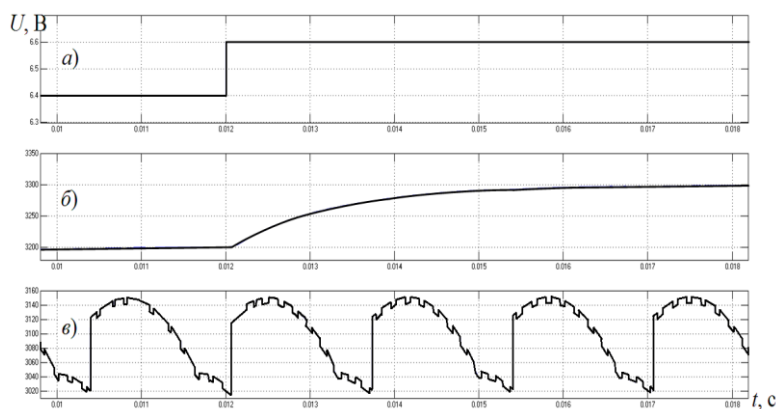


Рисунок 16 – Перехідний процес у перетворювальному агрегаті з АФС

Часові діаграми (рис. 16), які показують перебіг перехідного процесу за ступінчатого вхідного сигналу в системі автоматичного регулювання вихідної напруги активного фільтра-стабілізатора, мають наступні сигнали: а) ступінчатий сигнал завдання; б) перехідний процес вихідної напруги перетворювача; в) сигнал на виході випрямляча.

Аналіз отриманих часових діаграм (рис. 16) вказує на те, що перехідний процес замкнутої системи автоматичного регулювання вихідної напруги АФС закінчується за три тактових інтервали дискретності перетворювального агрегату тягової підстанції постійного струму.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на підставі теоретичних і експериментальних досліджень вирішується науково-технічна задача підвищення ефективності системи тягового електропостачання постійного струму за рахунок компенсації гармонік випрямленої напруги в широкому діапазоні частот і стабілізації напруги на виході тягової підстанції за допомогою комбінованого активного фільтра та активного фільтра-стабілізатора послідовного типу.

За результатами проведених теоретичних і експериментальних досліджень зроблені наступні висновки:

1. Проведений аналіз існуючих та перспективних методів подавлення змінної складової та стабілізації вихідної напруги тягової підстанції постійного струму показав, що вказана проблема вирішується шляхом застосування на тягових підстанціях активних методів компенсації гармонік та стабілізації вихідної напруги перетворювача за допомогою комбінованого активного фільтра та активного фільтра-стабілізатора на базі ємнісного накопичувача енергії.

2. В результаті теоретичних досліджень отримано рівняння, яке встановлює зв'язок між сталою часу згладжуючого LC -фільтра і заданою величиною еквівалентної заважаючої напруги на виході перетворювального агрегату тягової підстанції постійного струму з некерованим випрямлячем, чим досягається оптимізація енергетичних показників.

3. Показано, що комбінований активний фільтр послідовного типу має переваги у порівнянні з комбінованим активним фільтром паралельного типу, оскільки: підключення розділового трансформатора в ланцюг реактора LC -фільтра у схемі комбінованого активного фільтра послідовного типу покращує, а в ланцюг конденсатора у схемі комбінованого активного фільтра паралельного типу погіршує його фільтруючі властивості; у схемі комбінованого активного фільтра послідовного типу якісне подавлення гармоніки з частотою ШІМ реалізовано без додаткового фільтра в силовій частині перетворювача.

4. Доведено, що застосування селективних ланок у ланцюзі зворотного зв'язку комбінованого активного фільтра послідовного типу, налаштованих на неканонічні гармоніки, дозволяє істотно підвищити ступінь подавлення низькочастотних неканонічних гармонік вихідної напруги перетворювального агрегату тягової підстанції постійного струму, отримати величину еквівалентної заважаючої напруги нижче 1 В та коефіцієнт пульсацій вихідної напруги перетворювального агрегата не більше 0,05 %. При цьому доведено, що параметри розділяючого трансформатора активного фільтра послідовного типу будуть визначатися максимальними значеннями струму вторинної обмотки та амплітудою напруги компенсації.

5. Запропоновано у структурі послідовного активного фільтра з ємнісним накопичувачем енергії застосувати схему заряду від спеціального випрямляча, що дозволяє отримати можливість не тільки активної фільтрації, а й стабілізації вихідної напруги перетворювального агрегату тягової підстанції постійного струму. Показано, що застосування активного фільтра-стабілізатора в замкнутій структурі регулювання дозволяє забезпечити стабілізацію і подавлення пульсацій вихідної напруги перетворювального агрегату тягової підстанції та отримати коефіцієнт пульсацій напруги близько 0,01 % при симетрії та 0,03 % при несиметрії трифазної напруги живлення.

6. Встановлено, що перетворювач активного фільтра-стабілізатора з двобічною широтно-імпульсною модуляцією, побудований на базі ємнісного накопичувача енергії, являє собою динамічну ланку із параметрами, що змінюються в межах тактового інтервалу випрямляча заряду ємнісного накопичувача. Показано, що для малих значень прирощення сигналу керування перетворювач активного фільтра-стабілізатора з двобічною широтно-імпульсною модуляцією являє собою амплітудно-імпульсний модулятор другого роду, у якому передача інформації здійснюється двома каналами, що містять статичний та динамічний коефіцієнти передачі, які обумовлені видом опорного сигналу та пульсуючою складовою вихідної напруги.

7. Отримана імпульсна модель, яка призначена для дослідження динамічних процесів в замкнутих структурах, що містять перетворювач активного фільтра-стабілізатора з двобічною широтно-імпульсною модуляцією. Виконано синтез передавальної функції регулятора, який забезпечує одержання процесу кінцевої тривалості у системі автоматичного регулювання вихідної напруги перетворювача активного фільтра-стабілізатора. Отримано вирази для факторів пульсацій замкненої системи подавлення заважаючих гармонік в одноконтурній структурі системи автоматичного регулювання перетворювача активного фільтра-стабілізатора з двобічною широтно-імпульсною модуляцією.

8. Показано, що результати експериментальних досліджень, отриманих на основі імітаційних комп'ютерних моделей, підтверджують результати досліджень комбінованих активних фільтрів послідовного типу та перетворювача активного фільтра-стабілізатора з двобічною широтно-імпульсною модуляцією. Показано на імітаційних моделях, що перехідний процес в замкнутій структурі закінчується за число тактів дискретності роботи перетворювача активного фільтра-стабілізатора з двобічною широтно-імпульсною модуляцією, яке рівне порядку характеристичного рівняння приведеної неперервної частини системи.

9. Результати дисертаційної роботи впроваджено: в службі електропостачання філії «ПЗ» ПАТ Укрзалізниця (м. Харків), в Харківській дистанції електропостачання «ЕЧ-2» (м. Харків), також теоретичні положення дисертації використовуються в навчальному процесі кафедри «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» УкрДУЗТ при викладанні курсів «Електромагнітна сумісність», «Електропостачання залізниць і метрополітенів», «Тягові та трансформаторні підстанції», дипломному проектуванні студентів спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», а також в Інституті перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів УкрДУЗТ при підготовці фахівців ЕЧК, що підтверджено відповідними актами впровадження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних науково-метричних баз:

1. Semenenko Yu. Analysis of dynamic characteristics of the active filter-stabilizer / Ya. Shcherbak, Yu. Semenenko, O. Semenenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – №2/8(86). – P. 10-15.

2. Семененко Ю.А. Анализ работы комбинированного активного фильтра последовательного типа с селективными звеньями для тяговой подстанции постоянного тока / Я.В. Щербак, Ю.А. Семененко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – Минск, Беларусь. – 2016. – Том 59, №5. – С. 418-426.

3. Семененко Ю.О. Аналіз динамічних характеристик комбінованого фільтра тягової підстанції / Я.В. Щербак, Ю.О. Семененко // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2013. – №142. – С. 137-143.

4. Семененко Ю.О. Комбінований активний фільтр послідовного типу із зворотним зв'язком за напругою навантаження / Я.В. Щербак, Ю.О. Семененко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2015. – № 19(95). – С. 146-149.

5. Семененко Ю.О. Дослідження аварійних режимів роботи агрегатів безперебійного живлення блочно-модульних тягових підстанцій / О.Д. Супрун, Ю.О. Семененко // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2016. – №165. – С. 77-83.

6. Семененко Ю.А. Стабилизация и активная фильтрация выпрямленного напряжения в замкнутой структуре / Ю.А. Семененко // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2016. – №166. – С. 131-140.

Статті у фахових виданнях:

7. Семененко Ю.О. Активна фільтрація вихідної напруги тягової підстанції постійного струму / Я.В. Щербак, Ю.О. Семененко // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2011. – №127. – С. 146-151.

8. Семененко Ю.О. Аналіз роботи пасивних фільтрів тягової підстанції постійного струму / Я.В. Щербак, Ю.О. Семененко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків:УкрДАЗТ. – 2015. – №1(110). – С. 53-57.

9. Семененко Ю.О. Комбінований активний фільтр послідовного типу з імпульсною системою керування при формуванні зворотного зв'язку за

струмом навантаження / Ю.О. Семененко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – № 12 (1121). – С. 420-424.

10. Семененко Ю.О. Моделювання процесів роботи активного фільтра послідовного типу з імпульсною системою керування / Ю.О. Семененко // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2015. – №153. – С. 107-113.

11. Семененко Ю.О. Підвищення ефективності системи тягового електропостачання постійного струму / О.І. Семененко, Ю.О. Семененко // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2015. – №153. – С. 47-54.

12. Семененко Ю.О. Активний фільтр-стабілізатор для випрямної установки тягової підстанції / О.І. Семененко, Ю.О. Семененко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків:УкрДАЗТ. – 2016. – №4(119). – С. 29-33.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

13. 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, Україна. – Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – №143. – С. 244.

14. 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 р. – Харків, Україна. – Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – №151. – С. 88.

15. Семененко Ю.О. Поліпшення якості електричної енергії у мережі 10 кВ застосуванням методів активної фільтрації / О.І. Семененко, Ю.О. Семененко // Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: матеріали 77-ї міжнародної науково-технічної конференції 21 – 23 квітня 2015 р. – Харків, Україна. – Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – №151. – С. 90.

16. Семененко Ю.О. Комбінований активний фільтр послідовного типу з імпульсною системою керування для тягової підстанції постійного струму / Ю.О. Семененко // Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості : матеріали 6-ї міжнародної науково-практичної конференції 10 – 13 червня 2015 р. смт. Воловець, Воловецький р-н., Закарпатська обл. – Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості. – С. 108-109.

17. Семененко Ю.О. Замкнута структура автоматичного регулювання для захисту пристроїв СЦБ від заважаючих електромагнітних завад / Я.В. Щербак, Ю.О. Семененко // «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»: 28-а міжнародна науково-практична конференція 24 – 25 вересня 2015 р. – Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків:УкрДАЗТ. – №4(113), Додаток. – С. 54-55.

18. Семененко Ю.О. Застосування комбінованого активного фільтра послідовного типу для подавлення гармонійних складових вихідної напруги тягової підстанції постійного струму / Ю.О. Семененко // Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: матеріали 78-ї міжнародної науково-технічної конференції 26 – 28 квітня 2016 р. – Харків, Україна. – Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – №160, Додаток. – С. 49.

19. Семененко Ю.О. Випрямний агрегат тягової підстанції з вольтододавальним перетворювачем з широтно-імпульсною модуляцією на базі ємнісного накопичувача енергії / О.І. Семененко, Ю.О. Семененко // Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: матеріали 78-ї міжнародної науково-технічної конференції 26 – 28 квітня 2016 р. – Харків, Україна. – Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – №160. Додаток. – С. 49-50.

20. Семененко Ю.О. Випрямна установка тягової підстанції постійного струму з активним фільтром-стабілізатором / Ю.О. Семененко // «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»: 29-а міжнародна науково-практична конференція 27–29 вересня 2016 р. м. Чорноморськ, Одеська обл., Україна. – Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорт – Харків:УкрДАЗТ. – 2016. – №4(119), Додаток. – С. 50-51.

Патенти:

21. Патент України № 114146 Пристрій для компенсації пульсацій вихідної напруги перетворювача електричної енергії / Я.В. Щербак, Ю.О. Семененко, К.Я. Івакіна. Заявник та патентовласник Укр. держ. ун-т заліз. тра-ту. – № u 2015 12696 заявл. 22.12.2015; опубл. 25.04.2017, Бюл. № 8.

22. Патент України № 107897 Пристрій для компенсації пульсацій вихідної напруги перетворювача електричної енергії / Я.В. Щербак, Ю.О. Семененко, К.Я. Івакіна. Заявник та патентовласник Укр. держ. ун-т заліз. тра-ту. – № u 2015 12718 заявл. 23.12.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

АНОТАЦІЯ

Семененко Ю. О. Стабілізуючі силові активні фільтри для підвищення ефективності тягового електропостачання постійного струму. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова МОН України, Харків, 2017.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності тягового електропостачання постійного струму шляхом вирішення проблеми поліпшення електромагнітної сумісності системи електропостачання з суміжними електроустановками та електричним рухомим складом. Негативний електромагнітний вплив викликають канонічні та неканонічні гармоніки напруги і струму тягової мережі, які генерує перетворювальний агрегат підстанції.

На ділянках постійного струму з високою інтенсивністю руху поїздів не вдається підтримувати напругу в мережі на необхідному рівні. Пропонується забезпечити подавленням пульсацій та підтримку сталої вихідної напруги тягової підстанції застосуванням комбінованого активного фільтра та активного фільтра-стабілізатора послідовного типу.

В роботі показано, що комбінований активний фільтр послідовного типу має кращі фільтрувальні властивості у порівнянні з комбінованим активним фільтром паралельного типу. Доведено, що застосування селективних ланок у ланцюзі зворотного зв'язку активного фільтра, налаштованих на неканонічні гар-

моніки, дозволяє істотно підвищити ступінь придушення гармонік вихідної напруги тягової підстанції постійного струму.

Запропоновано у структурі послідовного активного фільтра з ємнісним накопичувачем енергії застосувати спеціальну схему заряду, що дозволяє забезпечити активну фільтрацію та стабілізацію вихідної напруги перетворювального агрегату. Результати експериментальних досліджень, отриманих на основі імітаційного моделювання, підтверджують результати теоретичних досліджень.

Ключові слова: перетворювальний агрегат, тягова підстанція, комбінований активний фільтр, активний фільтр-стабілізатор, електромагнітна сумісність, неканонічні гармоніки, система автоматичного регулювання, система керування.

АННОТАЦІЯ

Семененко Ю. А. Стабилизирующие силовые активные фильтры для повышения эффективности тягового электроснабжения постоянного тока. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. – Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова МОН Украины, Харьков, 2017.

Диссертация посвящена повышению эффективности тягового электроснабжения постоянного тока путем решения проблемы улучшения электромагнитной совместимости системы электроснабжения со смежными электроустановками и электрического подвижного состава. Негативное электромагнитное воздействие вызывают канонические и неканонические гармоники напряжения и тока тяговой сети, генерируемые преобразовательным агрегатом подстанции.

На участках контактной сети постоянного тока с высокой интенсивностью движения поездов и при скоростном движении не удастся поддерживать напряжение в сети на необходимом уровне. Предлагается обеспечить подавление пульсаций и поддержку постоянного выходного напряжения тяговой подстанции методами активной фильтрации и стабилизации применением комбинированного активного фильтра и активного фильтра-стабилизатора последовательного типа.

В работе показано, что комбинированный активный фильтр последовательного типа имеет лучшие фильтрующие свойства по сравнению с комбинированным активным фильтром параллельного типа. Доказано, что применение селективных звеньев в цепи обратной связи комбинированного активного фильтра последовательного типа, настроенных на неканонические гармоники, позволяет существенно повысить степень подавления неканонических гармоник выходного напряжения тяговой подстанции постоянного тока.

Предложено в структуре последовательного активного фильтра с емкостным накопителем энергии применить специальную схему заряду, что позволяет обеспечить активную фильтрацию и стабилизацию выходного напряжения преобразовательного агрегата тяговой подстанции. Результаты исследований указывают на практическую пригодность преобразователя активного фильтра-стабилизатора с двусторонней широтно-импульсной модуляцией для улучше-

ния электромагнитной совместимости тяговой подстанции со смежными электроустановками и повышения качества энергии питания тяговых потребителей. Результаты экспериментальных исследований, полученных на основе имитационного моделирования, подтверждают результаты теоретических исследований.

Ключевые слова: преобразовательный агрегат, тяговая подстанция, комбинированный активный фильтр, активный фильтр-стабилизатор, электромагнитная совместимость, неканонические гармоники, система автоматического регулирования, система управления.

ABSTRACT

Y. O. Semenenko. Stabilizing power active filters for increasing the efficiency of DC traction power supply. – Manuscript.

The thesis for PhD (technical sciences) degree, speciality 05.22.09 – electric transport. O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv MES of Ukraine, Kharkiv, 2017.

The dissertation is devoted to increasing the efficiency of traction DC power supply by solving the problem of improving the electromagnetic compatibility of the power supply system with adjacent electrical installations and electric stock. The negative electromagnetic influence is caused by the canonical and noncanonical harmonics of the voltage and current of the traction network, which generate the converter unit of the substation.

In the sections of the DC contact network with high intensity and high of speed railway traffic, it is not possible to maintain the voltage of train at the required level. It is proposed to provide suppression of pulsations and support of the constant output voltage of the traction substation using active filtration and stabilization methods using a combined active filter and an active filter-stabilizer of a successive type.

The paper shows that a combined active filter of a successive type has better filtering properties than a combined active filter of a parallel type. It is proved that the use of selective links in the feedback circuit of a combined active filter of a successive type tuned to non-canonical harmonics makes it possible to significantly increase the degree of suppression of noncanonical harmonics of the output voltage of a traction substation of direct current.

It is proposed to apply a special charge circuit in the structure of a series active filter with a capacitive energy storage device, which allows for active filtration and stabilization of the output voltage of the converter unit of the traction substation. The results of the studies indicate the practical suitability of the active filter-stabilizer converter with two-way pulse width modulation to improve the electromagnetic compatibility of the traction substation with adjacent electrical installations and improve the quality of power supply for traction consumers. The results of experimental studies, obtained on the basis of simulation, confirm the results of theoretical studies.

Keywords: converter unit, traction substation, combined active filter, active filter-stabilizer, electromagnetic compatibility, non-canonical harmonics, automatic control system, control system.



Підписано до друку 08.11.2017 р. Формат 60x90/16
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.
Друк – цифрований. Ум. друк. аркушів. 0,9
Наклад 110 прим. Зам. № 575739

Надруковано у ФЛ-П Черняк Л. О.
61002, м. Харків, вул. Багалія, 16
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво № 2480000000079553, від 16.05.2007 р.