

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Ягуп Катерина Валеріївна

УДК 621.314.632

**ПОДАВЛЕННЯ НЕКАНОНІЧНИХ ГАРМОНІК
ВХІДНИХ СТРУМІВ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ**

Спеціальність 05.22.09 –Електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі систем електричної тяги Української державної академії залізничного транспорту, Міністерство транспорту України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Щербак Яків Васильович,
Українська державна академія залізничного
транспорту, завідувач кафедри систем
електричної тяги

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гончаров Юрій Петрович,
Національний технічний університет
„Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри промислової та біомедичної
електроніки;

кандидат технічних наук, доцент
Муха Андрій Миколайович,
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
доцент кафедри автоматизованого електроприводу

Захист відбудеться «12» березня 2008 р. о 14.30 год. на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 64.050.15

у Національному технічному університеті „Харківський політехнічний інститут” за
адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці

Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”.
за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

Автореферат розісланий «11» лютого 2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Любарський Б. Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Системи електропостачання залізничного транспорту є потужними споживачами електричної енергії мережі змінного струму. Для забезпечення живлення електричного рухомого складу, що працює на постійному струмі, застосовуються потужні 6- та 12-пульсні схеми випрямлячів тягових підстанцій. Особливість роботи випрямлячів полягає в тому, що вони генерують вищі гармоніки у живильній мережі. При симетричному режимі роботи випрямляючої установки в мережу генеруються канонічні гармоніки, частоти яких визначаються пульсністю випрямляча. Реальні випрямляючі установки тягових підстанцій працюють в несиметричних режимах, які можуть виникати внаслідок порушення симетрії живильних напруг, несиметрії трансформаторів, несиметрії діодних блоків. Наявність хоча б однієї із вказаних причин несиметрії призводить до доповнення гармонічних складів вхідних струмів і вихідної напруги випрямляча неканонічними гармоніками, амплітуди яких можуть досягати значних величин. Наявність неканонічних гармонік у вхідних струмах випрямляючої установки тягової підстанції погіршує її електромагнітну сумісність з живильною мережею, погіршує якість споживаємої електричної енергії, викликає підмагнічування осердь трансформаторів, а також може викликати резонансні явища в електричних системах на частотах неканонічних гармонік, що може приводити до аварійних ситуацій. Тому проблема подавлення неканонічних гармонік у вхідних струмах тягової підстанції виглядає актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Науково-дослідницька робота за темою дисертації проводилася на кафедрі систем електричної тяги УкрДАЗТ в рамках „Галузевої програми енергозбереження та впровадження альтернативних видів палива на транспорті на 2006-2010 роки” (затверджена наказом міністерства транспорту та зв'язку України 09.02.2006 р. №114); „Програми енергозбереження на залізничному транспорті на 1996 – 2010 роки” (рішення НТС Укрзалізниці від 24.06.96, протокол №5); „Програми енергозбереження на залізничному транспорті України в 2007 році” (затверджена 16.02.2007 року №ЦЗТ-12/112).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є пошук шляхів подавлення неканонічних гармонік вхідних струмів випрямляючої установки із вольтододатним перетворювачем в тяговій підстанції засобами автоматичного регулювання.

Для досягнення поставленої мети було потрібно вирішити задачі:

- дослідження електромагнітних процесів, визначення енергетичних показників та гармонійного складу вхідного струму випрямляючої установки із вольтододатним випрямлячем;
- визначення впливу несиметрії напруг живильної мережі на гармонійний склад вхідних струмів випрямляючої установки із вольтододатним перетворювачем;
- розробки динамічної моделі системи „тиристорний випрямляч – мережа”;
- розробки замкнутої системи подавлення неканонічних гармонік вхідного струму шляхом знаходження параметрів системи керування вольтододатної установки;
- визначення ефективності регулювання неканонічних гармонік у замкнутій системі.

Об'єкт дослідження - електромагнітні процеси, що визначають генерацію неканонічних гармонік випрямляючою установкою тягової підстанції в живильну мережу.

Предмет дослідження - випрямляюча установка тягової підстанції із системою подавлення неканонічних гармонік.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач використовувались методи: класичної теорії електричних кіл та методи гармонійного аналізу при дослідженні електромагнітних процесів у випрямляючій установці із вольтододатним перетворювачем, що працює у симетричному та несиметричних режимах; теорія автоматичного регулювання, математичний апарат Z-перетворювань при дослідженні динамічної системи „тиристорний випрямляч - мережа”; А-стійкі методи чисельного розв'язання систем диференціальних рівнянь, симплекс-метод Нелдера - Міда при проведенні досліджень на комп'ютерних моделях.

Наукова новизна одержаних результатів:

–розкрито механізм генерації гармонік струму в живильну мережу випрямляючою установкою із вольтододатним випрямлячем;

–вперше дано відображення процесу генерації гармонік вхідного струму випрямляючої установки із вольтододатним перетворювачем в симетричному та несиметричному режимах на комплексну площину;

–одержано аналітичні вирази, що дозволяють оцінити вплив кута керування вольтододатного перетворювача на коефіцієнт потужності, коефіцієнт спотворення та коефіцієнт зсуву випрямляючої установки тягової підстанції;

–одержано аналітичні вирази, що визначають зв'язок між коефіцієнтом несиметрії, фазою зворотної послідовності, фазними та лінійними напругами несиметричної живильної мережі;

–показано, що під дією несиметрії живильної мережі гармонійний склад вхідного струму випрямляючої установки тягової підстанції доповнюється неканонічними гармоніками; одержано аналітичні вирази для розрахунків амплітуд неканонічних гармонік;

–одержало подальший розвиток застосування еквівалентного несиметрії гармонійного діяння для визначення неканонічних гармонік вхідного струму випрямляючої установки;

–вперше запропоновано структури замкнених систем подавлення неканонічних гармонік вхідних струмів випрямляючої установки із вольтододатним перетворювачем;

–вперше, використовуючи імпульсну модель системи „тиристорний випрямляч – мережа”, виконано аналіз процесів подавлення неканонічних гармонік вхідних струмів випрямляючої установки тягової підстанції;

–вперше проведено оптимізацію параметрів керування вольтододатною установкою для досягнення мінімального сумарного значення неканонічних гармонік вхідних струмів тягової підстанції;

–доведено за допомогою комп'ютерних моделей ефективність запропонованих методів подавлення неканонічних гармонік вхідних струмів тягової підстанції.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційної роботи рекомендуються для практичного використання при модернізації та розро-

бці нових випрямлячів тягових підстанцій з метою підвищення їх енергетичних показників, а також підвищенню якості електричної енергії в мережі.

Результати роботи впроваджено в Управлінні електрифікації та енергозабезпечення Укрзалізниці (м. Київ), НДІ ПО „ХЕМЗ” (м. Харків), МК „Енергозбереження” (м. Харків).

Теоретичні положення, викладені в дисертаційній роботі використовуються в УкрДАЗТ при викладанні курсів „Електромагнітна сумісність”, „Інформаційні технології”, „Основи моделювання електромеханічних систем”, „Методи розрахунків перетворювальних пристроїв”, дипломному проектуванні студентів спеціальності „Електричний транспорт”.

Особистий внесок здобувача полягає, у тому, що всі положення дисертації отримано здобувачем самостійно. Серед них: дослідження електромагнітних процесів у випрямляючій установці з вольтододатковим випрямлячем; дослідження впливу несиметрії мережі на вхідні струми випрямляча тягової підстанції; дослідження динамічних властивостей системи „тиристорний випрямляч – мережа”; проведення оптимізації параметрів керування вольтододатною установкою для досягнення мінімального сумарного значення неканонічних гармонік вхідних струмів тягової підстанції; дослідження ефекту компенсації неканонічних гармонік вхідних струмів тягової підстанції; розробка комп’ютерних моделей випрямлячів тягової підстанції із системою подавлення неканонічних гармонік; перевірка одержаних розрахункових співвідношень на цифрових моделях.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічних та науково-практичних конференціях: „Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації”, (м. Кременчук, 2005, 2007 рр.); „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України, (м. Харків, 2005 р.); „Силова електроніка і енергоефективність”, (м. Алушта, 2006, 2007 рр.); „Найновітніші технології та енергоефективність в світлотехніці та електроенергетиці”, (м. Харків, 2007 р.); „Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті”, (м. Дніпропетровськ, 2007 р.)

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковано в 15 наукових працях, з яких 14 - у фахових виданнях ВАК України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п’яти розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел. Повний об’єм дисертації 203 сторінки, з них 33 ілюстрацій по тексту, 34 ілюстрації на 29 сторінках, 4 таблиці по тексту, 2 таблиці на 2 сторінках, 6 додатків на 15 сторінках, 112 найменувань використаних джерел на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У першому розділі проведено аналіз основних показників якості електричної енергії у відповідності до ГОСТ 13109-97 з точки зору впливу на них тягових підстанцій. Відзначено, що серед показників якості, на які в значній мірі впливають

споживачі електричної енергії, ϵ коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги, коефіцієнт несиметрії напруги, коефіцієнт потужності.

Визначено методи поліпшення електромагнітної сумісності випрямляючої установки тягової підстанції з живильною мережею. Встановлено, що поліпшення електромагнітної сумісності тягової підстанції постійного струму з живильною мережею може бути досягнуто наступними методами: застосуванням силових схем випрямляючих установок із підвищеною еквівалентною пульсністю; зменшенням величини реактивної потужності та її змін, що спричиняються різкими змінами навантаження; використанням фільтрокомпенсуючих пристроїв; поліпшенням гармонійного складу за допомогою силових фільтрів; зменшенням у вхідному струмі неканонічних гармонік, а саме застосуванням замкнутих структур регулювання.

При застосуванні багатопульсних схем в більшості випадків використовують 12-пульсні випрямлячі, що базуються на двох однакових 6-пульсних випрямлячах при з'єднанні обмоток трансформатора у „зірку” та „трикутник”. При практичній реалізації такої схеми виникає ряд труднощів, серед яких можна виділити, несиметрію живильної мережі та відхилення коефіцієнтів трансформації, що спричиняє генерацію неканонічних гармонік та порушує умови компенсації гармонік із номерами $k=5, 7, 17, 19, \dots$

Для зменшення несинусоїдальності напруги мережі застосовують мережні фільтри та фільтрокомпенсуючі пристрої, що складаються з повздовжніх та поперечних елементів. Такі фільтри мають ряд недоліків: низьку добротність, вони не можуть змінювати резонансну частоту, і можуть в перехідних процесах стати причиною виникнення резонансних явищ, мають великі масу та габарити.

Більш ефективним є застосування активних фільтрів. Вони дозволяють одержати повну компенсацію реактивної потужності та сформувати струм живильної мережі синусоїдальної форми. Однак застосування активних фільтрів викликає додаткові втрати в системі, що знижує коефіцієнт корисної дії.

Розглянуто відомі структурні схеми замкнутих систем регулювання неканонічних гармонік вихідної напруги випрямляча. Відзначено, що застосування замкнутих систем подавлення неканонічних гармонік є достатньо ефективним засобом підвищення якості електричної енергії. Показано основні напрямки досліджень процесів компенсації неканонічних гармонік у вихідному колі перетворювача: перший напрямок базується на методі параметричного регулювання, в основу другого закладена симетруюча дія від'ємного зворотного зв'язку. Обґрунтована перспективність подальшого дослідження та вдосконалення замкнутих структур регулювання.

Розділ завершується постановкою задач дослідження.

У другому розділі досліджено електромагнітні процеси у випрямляючій установці тягової підстанції з вольтододатним тиристорним перетворювачем (рис. 1), які визначають генерацію гармонік в живильну мережу. При аналізі електромагнітних процесів розглядалися базові схеми діодного та тиристорного випрямлячів з пульсністю $m=6$. Одержані результати поширюються і на схеми випрямлячів з більшою пульсністю.

Вихідна напруга U_{dl} випрямляючої установки з вольтододатним тиристорним перетворювачем визначається двома складовими

$$U_{di} = U_D \pm U_{dS}, \quad (1)$$

де U_D - вихідна напруга діодного випрямляча VD ; U_{dS} - вихідна напруга вольто-додатного перетворювача VS .

Показано, що вплив випрямляючої установки на живильну мережу в повній мірі можна виразити через такі приведені параметри: відношення повної потужності випрямляча до повної потужності короткого замикання, відносну напругу короткого замикання випрямляча та відносний струм навантаження.

Показано, що гармонійний склад фазного струму випрямляючої установки з вольтододатним перетворювачем визначається як

$$\dot{A}_k = \frac{2}{k\pi} \cdot \frac{I_d}{I_{di}} [1 - (-1)^k \sin(k \frac{\pi}{3}) (1 + k_I e^{-jk\alpha_o} \frac{2\sqrt{3}}{3} \cos(k \frac{\pi}{6}) \cos\alpha_o)], \quad (2)$$

де \dot{A}_k - модуль k -ої гармоніки, I_d - вхідний струм тягової під-станції; I_{di} - номінальне значення вхідного струму тягової підстанції; α_o - кут керування вольтододатним перетворювачем; $k_I = \frac{U_{2S}}{U_{2D}}$

З формули (2) витікає, що гармонійний склад вхідного струму тягової підстанції формується некерованою та керованою частинами випрямляючої установки. Результуюче значення k -ої гармоніки вхідного струму визначається двома складовими

$$\dot{A}_{k\Sigma} = \dot{A}_{kD} + \dot{A}_{kS}. \quad (3)$$

Перша складова являє собою вектор k -ої гармоніки струму, що формується діодним випрямлячем:

$$\dot{A}_{kD} = \frac{2}{k\pi} \cdot \frac{I_d}{I_{di}} [1 - (-1)^k] \sin(k \frac{\pi}{3}). \quad (4)$$

Модуль вектора \dot{A}_{kD} k -ої гармоніки визначається струмом навантаження випрямляючої установки.

$$\dot{A}_{kS} = k_I \frac{4\sqrt{3}}{3k\pi} \cdot \frac{I_d}{I_{di}} [1 - (-1)^k] \cdot \sin(k \frac{\pi}{3}) \cdot \cos(k \frac{\pi}{6}) \cdot \cos\alpha_o e^{-jk\alpha_o}. \quad (5)$$

Модуль вектора \dot{A}_{kS} залежить від коефіцієнта k_I , кута керування α_o та номера гармоніки. Фазова орієнтація даного вектора визначається кутом керування α_o . Показано, що процес формування результуючого вектора $\dot{A}_{k\Sigma}$ гармоніки вхідного струму має наглядну інтерпретацію на комплексній площині (рис. 2).

При постійних величинах коефіцієнта k_1 і струму навантаження I_d вектор A_{kS} , під дією зміни кута керування α_o змінює свій модуль і фазовий зсув відносно вектора A_{kD} . При зміні кута керування в діапазоні $0 \leq \alpha_o \leq \pi$ вектор A_{kS} опи-сue відносно дійсної осі комплексної площини коло. Діаметр кола дорівнює

$$D = k_1 \frac{4\sqrt{3}}{3k\pi} \frac{I_d}{I_{di}} [1 - (-1)^k] \sin(k \frac{\pi}{3}) \cos(k \frac{\pi}{6}). \quad (6)$$

Для побудови результуючого вектора $A_{k\Sigma}$ вектор A_{kS} добудовують в кінці вектора A_{kD} як це показано на рис. 2

За допомогою векторних діаграм на комплексній площині розкрито механізм генерації випрямляючою установкою із вольтододатним перетворювачем гармонік у живильну мережу. Встановлено, що в даній випрямляючій установці здійснюється часткова компенсація гармонік вхідного струму з номерами $k = 6n \pm 1$, де $n = 1, 2, 3 \dots$. Ступінь компенсації є раціональною функцією кута керування α_o вольтододатного перетворювача. Встановлення цього факту відкриває можливість регулювання амплітуд гармонік вхідного струму випрямляючої установки у спеціальній замкнутій структурі автоматичного регулювання.

Показано, що запровадження у склад випрямляча вольтододатного перетворювача підвищує коефіцієнт потужності установки. Одержано аналітичний вираз коефіцієнта потужності

$$K_{\check{D}} = K_{\check{N}} K_{\check{C}} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{(1+k_1 \cos \alpha_o) \sqrt{(1+k_1 \cos \alpha_o)^2 + k_1^2 \sin^2 \alpha_o}}{\sqrt{\frac{2}{3}(1+2k_1 \cos \alpha_o + k_1^2)[k_1(k_1 + \sqrt{3}) + 1]}} \quad (7)$$

де $K_{\check{D}}$, $K_{\check{N}}$, $K_{\check{C}}$ - відповідно коефіцієнти потужності, спотворення та зсуву.

Наведені на рис. 3 залежності свідчать про те, що зміна кута керування в діапазоні $\alpha_o = 1-26^\circ$ змінює величини $K_{\check{D}}$, $K_{\check{N}}$, $K_{\check{C}}$ до значень, що характерні для діодного випрямляча пульсності $m=6$.

У третьому розділі наведено результати дослідження впливу несиметрії живильної мережі на гармонійні склади вхідних струмів випрямляючої установки. Одержано аналітичні залежності, які встановлюють зв'язок величин лінійних та фазних напруг живильної мережі від коефіцієнта несиметрії ϵ та фазового зсуву зворотної послідовності ψ_2 .

Дослідження впливу несиметрії живильної мережі на гармонійний склад споживаємого випрямляючою установкою струму виконано розкладом в ряд Фур'є інформаційної складової

$$\Delta I_n(\theta) = I_{ni}(\theta) - I_{ni}(\theta), \quad (8)$$

де $I_{ni}(\theta)$ - струм в несиметричному режимі; $I_{ni}(\theta)$ - струм в симетричному режимі.

Показано, яким чином встановлено, що під дією несиметрії живильної мережі вхідний струм випрямляючої установки доповнюється неканонічними гармоніками. Так, для діодного випрямляча при з'єднанні обмоток трансформатора за схемою „зірка-зірка” амплітуда ν -ої неканонічної гармоніки визначається з виразу

$$\bar{c}_{\nu Y} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{I_d}{I_{di}} \sum_{n=1}^m \Delta\theta_n e^{-j\nu \frac{2\pi}{m}(n-1)}, \quad (9)$$

де $\Delta\theta_n$ - кутова тривалість інформаційної складової, що характеризує дію несиметрії.

Показано, якщо на комплексній площині побудувати правильну m -проміневу зірку, прирівнявши центральні кути між сусідніми променями

$$\varphi_{\check{D}} = -\nu \frac{2\pi}{m}(n-1), \quad (10)$$

а на кожному із променів побудувати вектор з довжиною

$$a_{\nu} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{I_d}{I_{di}} \cdot \Delta\theta_n, \quad (11)$$

то геометрична сума m векторів буде вектором ν -ї неканонічної гармоніки, як це показано на рис. 4. для $\nu = 2$.

Комплексна амплітуда ν -ї неканонічної гармоніки визначається за формулою

$$\bar{c}_{\nu \Delta} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{I_d}{I_{di}} \cos\alpha_o e^{-j\nu\alpha_o} \left[\sum_{n=1}^{m-l} \Delta\alpha_n e^{-j\nu \frac{2\pi}{m}(n-1)} + 2 \sum_{l=1}^{m-n} \Delta\alpha_l e^{-j\nu \frac{2\pi}{m}(l-1)} \right], \quad (12)$$

де n - номери тактових інтервалів, на яких амплітуда інформаційної складової дорівнює $U_i = \frac{\sqrt{3}}{3} I_d$; l - номери тактових інтервалів на яких амплітуда інформаційної складової дорівнює $U_i = 2 \frac{\sqrt{3}}{3} I_d$; $\Delta\alpha_n$, $\Delta\alpha_l$ - кутові тривалості інформаційної складової на відповідних тактових інтервалах.

Показано, що при гармонійному вхідному діянні на вольтоподатний перетворювач, що еквівалентний дії несиметрії живильної мережі, природи кутів керування визначаються за аналітичним виразом

$$\Delta\alpha_n = \frac{2\bar{U}_{\acute{o}m} \sin \nu \left[\alpha_o + \frac{2\pi}{m}(n-1) - \varphi_{\check{D}} \right]}{\sin \alpha_o - 2\bar{U}_{\acute{o}m} \nu \cos \nu \left[\alpha_o + \frac{2\pi}{m}(n-1) - \varphi_{\check{D}} \right]}, \quad (13)$$

де $\bar{U}_{\acute{o}m}$ - амплітуда гармонійного діяння; $\varphi_{\acute{D}}$ - фаза гармонійного діяння.

Під дією вхідного гармонійного діяння у вхідному струмі перетворювача генеруються неканонічні гармоніки. Модуль вектора ν -ї неканонічної гармоніки визначається амплітудою вхідного діяння $\bar{U}_{\acute{o}m}$

$$\rho_{\nu} = \text{Mod} \left\{ \sum_{i=1}^{m-1} \Delta\alpha_i e^{-j\nu \frac{2\pi}{m}(n-1)} + 2 \sum_{l=1}^{m-i} \Delta\alpha_l e^{-j\nu \frac{2\pi}{m}(l-1)} \right\}. \quad (14)$$

Орієнтація вектора ν -ої гармоніки на комплексній площині визначається порядком розподілу приростів вхідного струму перетворювача, що визначається наступною системою рівнянь

$$\begin{aligned} \Delta S_a &= -2\Delta\alpha_1 I_d - \Delta\alpha_2 I_d + \Delta\alpha_3 I_d + 2\Delta\alpha_4 I_d + \Delta\alpha_5 I_d - \Delta\alpha_6 I_d; \\ \Delta S_b &= \Delta\alpha_1 I_d - \Delta\alpha_2 I_d - 2\Delta\alpha_3 I_d - \Delta\alpha_4 I_d + \Delta\alpha_5 I_d + 2\Delta\alpha_6 I_d; \\ \Delta S_c &= \Delta\alpha_1 I_d + 2\Delta\alpha_2 I_d + \Delta\alpha_3 I_d - \Delta\alpha_4 I_d - 2\Delta\alpha_5 I_d - \Delta\alpha_6 I_d; \end{aligned} \quad (15)$$

При розв'язанні системи рівнянь (15) для різних значень параметрів α_o , ν , φ_{π} та \bar{U}_{yn} встановлено, що зміна фазового зсуву $\varphi_{\acute{D}}$ вхідного гармонійного діяння викликає перерозподіл амплітуд гармонік з одночасною зміною їх фазового зсуву по фазам живильної мережі. Аналітично доведено, що вхідне гармонійне діяння із частотою 100 Гц не збуджує у вхідному струмі парних гармонік.

У четвертому розділі розглядається подавлення неканонічних гармонік вхідних струмів при включенні випрямляючої установки із вольтододатним керованим випрямлячем у замкнуту структуру (рис. 5). Одержано основні аналітичні співвідношення для синтезу такої структури. Узагальнений принцип роботи такої системи полягає у наступному. Датчик струму (ДС) вимірює струм живильної мережі і подає одержаний сигнал на оптимізатор (О), що виділяє задані неканонічні гармоніки вхідних струмів та виробляє керуюче діяння, яке підсумовується до сигналу керування. Результат підсумовування подається на вхід системи імпульсно-фазового керування (СІФК).

Досліджено динамічні властивості системи „тиристорний випрямляч-мережа”. Показано, що тиристорний випрямляч по відношенню до вхідного струму являє собою амплітудно-імпульсний модулятор, коефіцієнт передачі якого залежить від виду опорного сигналу і опору навантаження. Прорости струмів описуються виразами:

$$\begin{aligned}\Delta I_a(\theta) &= \Delta U_{\dot{o}}(\theta_n) \cdot K_{TBI} \cdot T \cdot F \sum_{n=0}^{\infty} \delta(\theta - \theta_{na}); \\ \Delta I_b(\theta) &= \Delta U_{\dot{o}}(\theta_n) \cdot K_{TBI} \cdot T \cdot F \sum_{n=0}^{\infty} \delta(\theta - \theta_{nb}); \\ \Delta I_c(\theta) &= \Delta U_{\dot{o}}(\theta_n) \cdot K_{TBI} \cdot T \cdot F \sum_{n=0}^{\infty} \delta(\theta - \theta_{nc}),\end{aligned}\tag{16}$$

де K_{TBI} - статичний коефіцієнт передачі тиристорного випрямляча по вхідному струму; T - період дискретності; F - фактор пульсації; $\theta_{na}, \theta_{nb}, \theta_{nc}$ - кутові координати n -го тактового інтервалу фаз a, b, c .

При включенні тиристорного випрямляча в замкнуту систему автоматичного регулювання гармонік вхідного струму його імпульсна модель, що визначається системою рівнянь (16), доповнюється передавальною функцією $W(p)$ приведеної неперервної частини (рис. 6).

Запропоновано замкнуті системи автоматичного регулювання амплітуд неканонічних гармонік, в основу побудови яких покладено властивість тиристорного випрямляча генерувати в живильну мережу гармоніки під впливом гармонійного діяння. Розглядаючи тиристорний випрямляч, як керований генератор, розв'язана задача пошуку параметрів компенсуючого вхідного діяння для подавлення неканонічних гармонік.

Оптимізація параметрів компенсуючого діяння на систему керування вольтододачним перетворювачем виконувалась по методу Гауса-Зейделя та симплекс-методу Нелдера-Міда. Оптимізуєчими параметрами, в залежності від обраного способу подавлення гармонік, можуть бути фаза та амплітуда гармонійного діяння або тривалості приростів кутів керування. На рис. 7. наведено початкову траєкторію пошуку параметрів гармонійного діяння при застосуванні симплекс-методу Нелдера-Міда, що демонструє ефективність роботи такого методу оптимізації. Рис. 7 демонструє зниження сумарної величини 3-ої гармоніки у 10 разів за 9 кроків.

Досліджено динамічні властивості систем подавлення з гармонійним компенсуючим діянням U_k . Дана система є системою екстремального регулювання з оптимізатором шагового типу. Показано, що узагальнена імпульсна модель такої системи (рис. 8) має три канали передачі інформації при зміні параметрів (фази і амплітуди) компенсуючого діяння. Базуючись на тому, що динамічні процеси, які протікають в кожному із паралельних каналів, є ідентичними, а також виконавши лінеаризацію регулівних підсилювача та фазообертача, одержано лінеаризовану одноконтурну модель системи подавлення неканонічних гармонік (рис. 8).

Виділення ν -ї гармоніки здійснюється селективною ланкою

$$G(p) = \frac{T_o p}{T_o^2 p^2 + 2\xi T_o p + 1},\tag{17}$$

де ξ - коефіцієнт демпфірування, T_o - стала часу, p - оператор Лапласа.

Вихідний сигнал ланки $G(p)$ перетворюється елементом виділення модуля з коефіцієнтом передачі $K_{\check{E}} = \frac{2}{\pi}$ і згладжується ланкою

$$H(p) = \frac{1}{T_3 p + 1} \quad (18)$$

Періоди квантування імпульсних елементів

$$T_1 = \frac{1}{m \cdot f_o}, \quad T_2 = \frac{n}{\nu \cdot f_o} \quad (19)$$

де $n = 1, 2, 3, \dots$, f_o – період живильної мережі, ν – номер гармоніки.

Ефективність регулювання неканонічної гармоніки оцінюється коефіцієнтом подавлення, який визначається відношенням її амплітуд при розімкнутому та замкнутому колі зворотного зв'язку.

Для наведеної структури коефіцієнт подавлення записаний у формі Z-перетворення

$$K_{\check{D}}^*(z) \approx K_o \cdot T_1 [HG^*(z_1) - HG^*(z_2) \frac{z_1^{-n} - z_1^{-n}}{z_1 - 1}], \quad (20)$$

де $K_o = K_{\check{E}} \cdot K_{\phi} \cdot K_I \cdot K_{TBI}$.

Для неканонічної гармоніки $\nu=3$ вираз для модуля коефіцієнта подавлення має вигляд

$$K_{\check{D}} /_{\nu=3} = \frac{K_o T_1 T_o}{T_o^2 + T_3^2 - 2\xi T_o T_3} \cdot \left\{ \frac{\frac{1}{a} \left(\frac{T_3}{T_o} - \xi \right) \cdot \sin(a\pi) - \cos(a\pi) - e^{\xi\pi}}{2(\operatorname{ch}(\xi\pi) + \cos(a\pi))} + \right. \\ \left. + \frac{1}{1 + e^{-\frac{T_1}{T_3}}} - \frac{1}{2} \left[\frac{(-1)^n e^{\xi n\pi} \cos(an\pi) + \frac{1}{a} \left(\frac{T_3}{T_o} - \xi \right) \cdot \sin(an\pi)}{(-1)^n (e^{\xi n\pi} - \cos(an\pi) + e^{-\xi n\pi})} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{2}{(-1)^n - e^{-\frac{T_1}{T_3}}} \right] \cdot [1 - (-1)^n] \right\} \quad (21)$$

Результати розрахунків коефіцієнта подавлення по (21) представлені на рис. 9 та рис. 10.

В даному розділі також розглянуто динамічні характеристики функціональних вузлів системи подавлення неканонічних гармонік, що дозволило створити лінеарізовану модель системи подавлення.

У п'ятому розділі наведено результати експериментальних досліджень замкнених систем подавлення неканонічних гармонік вхідних струмів випрямляючої установки тягової підстанції на комп'ютерних моделях. Робота моделей керується спеціально створеною програмою, що оптимізує значення вхідного діяння (гармонійного діяння або тривалості приростів кутів керування) таким чином, щоб максимально знизити амплітуди неканонічних гармонік. Така оптимізація здійснюється симплекс-методом Нелдера-Міда, при цьому у моделях, де подавлення гармонік здійснюється компенсуючим гармонійним діянням із частотою 100 Гц, варіюються два параметри фаза та амплітуда гармонійного діяння. У моделях, де подавлення здійснюється окремими каналами керування варіюються шість параметрів – тривалості приростів кутів керування кожних з тиристорів. Для реалізації моделі, де діяння здійснюється пошуком тривалостей приростів кутів керування, було змодельовано спеціальну систему керування із застосуванням релейних елементів. В комп'ютерних моделях виділення заданої гармоніки здійснюється за допомогою спеціального аналізатора гармонік Fourier або селективних ланок.

Розроблені моделі передбачають вимірювання коефіцієнтів потужності та несинусоїдальності за допомогою спеціально створеного блоку вимірювання коефіцієнта потужності випрямляча. Експерименти проводилися при несиметричному режимі роботи живильної мережі, де коефіцієнт несиметрії дорівнював 0.03, а фаза зворотної послідовності 30 градусів.

Проведені експерименти показали, що при подавленні неканонічних гармонік $\nu = 3$ гармонійним діянням спостерігається поліпшення коефіцієнту спотворення, що свідчить про поліпшення гармонійного складу вхідних струмів випрямляючої установки, що наведені на рис. 11. Амплітуди гармоніки $\nu = 3$ зменшуються у 28 разів. При подавленні неканонічної гармоніки $\nu = 3$ вхідного струму тягової підстанції корекцією тривалостей приростів кутів керування спостерігається зменшення амплітуди гармоніки $\nu = 3$ у 110 разів, але при цьому спостерігається перерозподіл інших гармонійних складових, що може стати причиною збільшення амплітуд парних гармонік (рис. 12). Тому при такому способі подавлення рекомендується застосовувати комбінований критерій, де одночасно подавляються 2 та 3 неканонічні гармоніки (рис. 13). В результаті застосування комбінованого критерію амплітуди гармоніки $\nu = 3$ зменшуються у 25 разів.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на підставі теоретичних та експериментальних досліджень вирішується науково-технічна задача поліпшення електромагнітної сумісності постійного струму із живильною мережею. Підвищення електромагнітної сумісності досягається покращенням гармонійного складу вхідних струмів випрямляючої установки, а саме, подавленням неканонічних гармонік, що виникають під дією несиметрії живильної мережі.

По результатам досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Приведений огляд основних методів поліпшення електромагнітної сумісності випрямляючої установки тягової підстанції із живильною мережею показує, що подавлення неканонічних гармонік живильної мережі дозволяє практично повністю реалізувати переваги багатопульсних випрямляючих схем тягових підстанцій постійного струму.

2. Одержано аналітичні залежності коефіцієнтів потужності, спотворення та зсуву від кута керування вольтододатним перетворювачем. Показано, що введення у склад випрямляючої установки тягової підстанції вольтододатного перетворювача поліпшує гармонійний склад вхідного струму за рахунок часткової компенсації гармонік $k=5, 7, 17, 19, \dots$ та підвищує коефіцієнт потужності. Показано, що застосування комплексної площини дозволяє розкрити механізм генерації випрямляючою установкою тягової підстанції гармонік струму у живильну мережу.

3. Одержано аналітичні вирази, що визначають залежність фазних та лінійних напруг несиметричної живильної мережі від коефіцієнта несиметрії та фази зворотної послідовності. Показано, що під дією несиметрії живильної мережі гармонійний склад вхідного струму випрямляючої установки доповнюється неканонічними гармоніками. Амплітуди цих гармонік залежать від величини коефіцієнта несиметрії і струму навантаження випрямляючої установки. Одержані аналітичні вирази із застосуванням комплексної площини дозволяють наглядно оцінити величини неканонічних гармонік по заданим значенням несиметрії.

4. Дано обґрунтування застосуванню гармонійного діяння для компенсації неканонічних гармонік, показано, що частоти, збуджуваних у вхідному струмі гармонік залежать від частоти вхідного гармонійного діяння. Зміна амплітуди і фази вхідного гармонійного діяння викликає перерозподіл амплітуд гармонік випрямляючої установки з одночасною зміною їх фазових зсувів по фазам живильної мережі.

5. Показано, що для малих значень приростів керуючого діяння тиристорний випрямляч представляє собою по відношенню до проростів вхідних струмів амплітудно-імпульсний модулятор з коефіцієнтом, що залежить від виду опорного сигналу.

6. Одержана імпульсна модель „тиристорний випрямляч – мережа” дозволяє дослідити динамічні процеси в замкнутій структурі. Показано, що при аналізі замкнутої структури подавлення неканонічних гармонік вхідного струму необхідно враховувати дискретність випрямляючої установки.

7. Дано обґрунтування застосуванню запропонованої структури замкнутих систем подавлення неканонічних гармонік вхідних струмів випрямляючої установки.

8. Проведено оптимізацію параметрів керування вольтододатною установкою для досягнення мінімального сумарного значення неканонічних гармонік вхідних струмів тягової підстанції. Показано, що розроблені екстремальні системи регулювання дозволяють ефективно подавляти неканонічні гармоніки.

9. Розроблено комп'ютерні моделі, що підтверджують достовірність теоретичних положень щодо ефективності подавлення неканонічних гармонік вхідних струмів тягової підстанції постійного струму у замкнутій структурі. Проведені експерименти показали, що сумарна величина неканонічних гармонік може зменшуватися у 28 разів при вхідному гармонійному діянні, у 110 разів при

варіюванні тривалостей приростів кутів керування і у 25 разів при застосуванні комбінованого критерію.

10. Запропоновані системи подавлення неканонічних гармонік рекомендується застосовувати при розробці та модернізації випрямляючих установок тягових підстанцій постійного струму. Результати дисертаційної роботи впроваджено в Управлінні електрифікації та енергозабезпечення Укрзалізниці, в НДІ ПО „ХЕМЗ”, на МК „Енергозбереження”, теоретичні положення використовуються в УкрДАЗТ при викладанні курсів „Електромагнітна сумісність”, „Інформаційні технології”, „Основи моделювання електромеханічних систем”, „Методи розрахунків перетворювальних пристроїв” та дипломному проектуванні студентів спеціальності „Електричний транспорт”, що підтверджено відповідними актами впровадження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Щербак Я. В., Ягуп Е. В. Компьютерная модель для исследования сетевого тока тяговой подстанции. // Наукові праці ДонНТУ. Електротехніка і енергетика. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – Вип. 79. – С. 213 – 316.

Здобувачем розроблено математичну модель для дослідження мережного струму тягової підстанції.

2. Щербак Я. В., Ягуп Е. В. Компьютерный анализ квазиустановившихся режимов в повышающем преобразователе постоянного напряжения. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2004. – №4, 5. – С. 50 – 53.

Здобувачем проведено аналіз електромагнітних процесів в перетворювачі постійної напруги.

3. Сендерович Г. А., Ягуп В. Г., Ягуп Е. В. Математическая модель для исследования несимметричных режимов в трехфазной сети. // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2005. – №57. – С. 86 – 93.

Здобувачем розроблено математичну модель для дослідження електромагнітних процесів в трьохфазній мережі при наявності несиметрії.

4. Ягуп Е. В. Моделирование электромагнитных процессов выпрямляча тягової підстанції засобами MATLAB. // Вісник Харківського державного національного університету сільського господарства „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. – Харків: ХНТУСГ. – 2005. – Вип. 37, Т 1. – С. 86 - 91.

5. Щербак Я. В., Ягуп Е. В. Подавление гармоник входного тока управляемого выпрямителя в замкнутой структуре. // Технічна електродинаміка. Силова електроніка та енергоефективність. – 2006. – Ч. 4. – С. 61 – 64.

Здобувачем запропоновано метод покращення гармонійного складу вхідних струмів випрямляча тягової підстанції у замкнутій структурі, а також розроблено відповідну математичну модель.

6. Ягуп Е. В., Щербак Я. В. Подавление высших гармоник первичных токов выпрямителя методом поканальной коррекции управляющих импульсов. // Електромашинобудування та електрообладнання. Проблеми автоматизованого електропривода. – Одеса: Техніка. – 2006. – Вип. 66. – С. 298 – 301.

Здобувачем рекомендовано засіб зменшення рівня гармонік шляхом варіювання комбінації тривалостей приростів кутів керування, а також розроблено відповідну комп'ютерну модель.

7. Ягуп К. В. Алгоритм формування топологічної матриці для моделі перетворювача тягової підстанції. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2006. – № 1. – С. 36 – 42.

8. Ягуп Е. В. Подавление высших гармоник сетевых токов выпрямителя с использованием комбинированного критерия при поисковой оптимизации // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – №5/2. – С. 141 – 143.

9. Ягуп Е. В. Подавлення неканонічних гармонік мережних струмів тягового випрямляча за допомогою резонансних фільтрів.// Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки. – 2006. – Ч. 5. – С. 91 – 93.

10. Щербак Я. В., Ягуп Е. В. Подавление гармоник сетевых токов тяговой подстанции с помощью вольтодобавочного управляемого выпрямителя. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – №6. – С. 78 – 80.

Здобувачем розроблено модель для дослідження електромагнітних процесів для тягового випрямляча, у склад якого введено вольтододатну установку, а також запропоновано систему керування окремими каналами вольтододатної установки.

11. Щербак Я. В., Ягуп Е. В. Исследование коэффициента мощности выпрямителя при подавлении неканонических гармоник сетевого тока. // Світлотехніка та електроенергетика. – 2007. – №1. – С. 97 – 100.

Здобувачем встановлено аналітичні вирази для знаходження коефіцієнта потужності, зсуву та спотворення для випрямлячів із вольтододатною установкою та побудовано залежності цих показників від кута керування вольтододатним випрямлячем.

12. Щербак Я. В., Ягуп К. В. Визначення лінійних та фазних напруг трифазної мережі за допомогою коефіцієнта несиметрії. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – №1. – С. 57 – 61.

Здобувачем запропоновано методику отримання системи рівнянь для визначення фазних напруг через коефіцієнт несиметрії та фази зворотної послідовності, а також розроблено комп'ютерні програми для їх розв'язку.

13. Щербак Я. В., Ягуп Е. В., Панченко В. В. Динамические свойства системы «тиристорный выпрямитель – сеть». // Технічна електродинаміка. Силова електроніка та енергоефективність. – 2007. – Ч. 4. – С. 97 – 100.

Здобувачем досліджено імпульсну модель системи „тиристорний випрямляч – мережа”.

14. Ягуп Е. В. Коэффициент мощности тягового выпрямителя с вольтодобавочным выпрямителем. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 4/2007 (45), ч. 2. – С. 42 – 44.

15. Щербак Я. В., Ягуп Е. В. Улучшение электромагнитной совместимости тяговой подстанции постоянного тока.// Тезиси I міжнародної науково-практичної конференції «Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті», 24–26 травня 2007 р. – Дніпропетровськ, 2007. – Т. 1. – С. 51 – 52.

Здобувачем запропоновано спосіб поліпшення гармонійного складу вхідних струмів тягової підстанції за допомогою спеціальної замкнутої структури автоматичного регулювання.

АНОТАЦІЯ

Ягуп К. В. Подавлення неканонічних гармонік вхідних струмів тягової підстанції. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – Електротранспорт. Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2007.

Дисертаційна робота присвячена покращенню електромагнітної сумісності живильної мережі із випрямляючою установкою тягової підстанції шляхом поліпшення гармонійного складу вхідних струмів. В реальних умовах живильна мережа працює в несиметричних режимах, що призводить до появи неканонічних гармонік у фазах мережі. В роботі вперше розглядається можливість подавлення заданих неканонічних гармонік вхідних струмів тягової підстанції із використанням вольтододатної установки, що підключається послідовно із тяговим випрямлячем.

Подавлення неканонічних гармонік здійснюється регулюванням параметрів компенсуючого діяння на систему керування вольтододатного перетворювача. Параметрами компенсуючого діяння можуть бути амплітуда і фаза гармонійного сигналу або тривалості приростів кутів керування тиристорами. Для оптимізації параметрів керуючого діяння доцільно використовувати симплекс метод Нелдера-Міда.

В роботі вперше одержано імпульсну модель „тиристорний випрямляч – мережа”, що дає можливість дослідити динамічні процеси в замкнутій структурі. Було показано доцільність та ефективність застосування замкнутої структури для подавлення неканонічних гармонік.

В дисертаційній роботі розроблено комп'ютерну модель, що реалізує замкнуту структуру подавлення неканонічних гармонік і перевіряє адекватність основних теоретичних висновків викладених у дисертаційній роботі. Проведені комп'ютерні експерименти підтвердили високу ефективність подавлення заданих неканонічних гармонік та показали покращення коефіцієнту спотворення.

Ключові слова: випрямляюча установка тягової підстанції, вольтододатний перетворювач, електромагнітна сумісність, неканонічні гармоніки, замкнута система регулювання, несиметрія, система керування.

АННОТАЦИЯ

Ягуп Е. В. Подавление неканонических гармоник входных токов тяговой подстанции. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – Электротранспорт. Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2007.

Диссертационная работа посвящена улучшению электромагнитной совместимости питающей сети с выпрямителем тяговой подстанции путем улучшения гармонического состава входных токов тяговой подстанции. В реальных

условиях питающие сети работают в несимметричных режимах, что приводит к появлению неканонических гармоник в фазах сети. В работе впервые рассматривается возможность подавления заданных неканонических гармоник с использованием вольтодобавочной установки, которая подключается последовательно с тяговым выпрямителем. Вольтодобавочная установка представляет собой управляемый выпрямитель, с относительной установочной мощностью 15 – 20 % от мощности основного выпрямителя.

В работе показано, что введение в состав выпрямительной установки вольтодобавочного преобразователя улучшает ее энергетические показатели: коэффициент мощности, коэффициент сдвига и коэффициент искажения. Впервые на комплексной плоскости раскрыт механизм генерации выпрямительной установкой гармоник тока.

Показано, что под действием несимметрии питающей сети гармонический состав сетевого тока дополняется неканоническими гармониками. Раскрыта взаимосвязь коэффициента несимметрии и фазы обратной последовательности с линейными и фазными напряжениями.

Теоретически обосновано применение гармонического воздействия с постоянной частотой 100 Гц для компенсации неканонических гармоник. Впервые получена импульсная модель «тиристорный выпрямитель – сеть», позволяющая исследовать динамические процессы в замкнутой структуре. Дано математическое обоснование применения замкнутой структуры для подавления неканонических гармоник входных токов выпрямительной установки. Показано, что разработанные системы регулирования эффективно подавляют неканонические гармоники. Для поиска минимального суммарного значения неканонических гармоник выпрямительной установки была проведена оптимизация входных параметров управления вольтодобавочной установкой.

Разработанные компьютерные модели подтвердили достоверность полученных теоретических результатов. В моделях для оптимизации параметров входного воздействия использовался симплекс-метод Нелдера-Мида. При подавлении неканонических гармоник входных токов гармоническим воздействием оптимизируются фаза и амплитуда гармонического воздействия, при подавлении неканонических гармоник методом поканальной коррекции оптимизируются значения длительностей приращений углов управления. Разработанные компьютерные модели предусматривают возможность измерения коэффициента искажения. Проведенные компьютерные эксперименты показали высокую эффективность подавления неканонических гармоник входных токов тяговой подстанции и улучшение коэффициента искажения при таком подавлении. Так при подавлении третьей неканонической гармоники гармоническим воздействием ее суммарная амплитуда уменьшилась в 28 раз, при использовании метода поканальной коррекции в 110 раз, при использовании комбинированного критерия – в 25 раз.

Ключевые слова: выпрямительная установка тяговой подстанции, вольтодобавочный преобразователь, электромагнитная совместимость, неканонические гармоники, замкнутая система регулирования, несимметрия, система управления.

SUMMARY

Yagup K. V. Suppression of uncanonical harmonics in input currents of traction substation. – The Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of Cand. Tech. Sci. in a speciality 05.22.09 – Electric Transport. The Ukrainian State Academy of Railway Transport, Kharkov, 2007.

The dissertation is devoted to enhancement of electromagnetic compatibility of supply line and traction substation rectifier by means of improvement of harmonic spectrum of input currents of traction substation. Supply nets operate with some asymmetry under real conditions. Possibility of suppression of prescribed uncanonical harmonics of input currents in traction substation by means of booster set connected in series with traction rectifier is considered.

Suppression of prescribed uncanonical harmonics is carried out with effect on pulse-position control system of booster set, that is selection of combination of input parameters of control system which forms minimum magnitude of harmonics. For the input parameters can be taken amplitude and phase of harmonic action or time of corrective increments of control angles. For calculations of parameters of corrective action is effectual to use Nelder-Mead simplex method.

The impulse model “thyristor rectifier – network”, which enables to research dynamic processes in closed-loop structures, has been first assayed. Expedience and effectuality of closed-loop system application have been indicated.

Computer model, which implements closed-loop system for uncanonical harmonic suppression and tests for goodness of fit the major theoretical deductions, has been worked out. The carried out virtual experiments vindicates the high efficiency of suppression of uncanonical harmonics and demonstrated distortion factor improvement.

Key words: traction substation rectifier, booster set, electromagnetic compatibility, uncanonical harmonics, closed-loop control system, asymmetry, control system.

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
Кандидата технічних наук

Подавлення неканонічних гармонік вхідних
струмів тягової підстанції

Ягуп Катерина Валеріївна

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск д. т. н., проф.. Щербак Я. В.

Підписано до друку 7 лютого 2008 р.
Формат паперу 60×84 1/26. Папір офсетний.
Умовн. –друк. арк. 0,9. Обл. – вид. арк. 1,1
Замовлення №75. Тираж 100 прим.

Видавництво УкрДАЗТ, свідоцтво ДК № 2874 від 12.06.2007 р.
Друкарня УкрДАЗТ
61050, м. Харків – 50, пл. Фейербаха, 7