

**МІНІСТЕРСТВО АГРАРНОЇ ПОЛІТИКИ ТА ПРОДОВОЛЬСТВА
УКРАЇНИ**

**Харківський національний технічний університет сільського господарства
імені Петра Василенка**

ІВАКІНА КАТЕРИНА ЯКІВНА

УДК 621.314.632

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТЯГОВОЇ
ПІДСТАНЦІЇ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В ЗАМКНУТИХ
СТРУКТУРАХ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Харківському національному університеті міського господарства імені О. М. Бекетова Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Ягуп Валерій Григорович**, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, професор кафедри електропостачання міст.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Гриб Олег Герасимович**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автоматизації енергосистем;

кандидат технічних наук **Бовдуй Ігор Валентинович**, Інститут технічних проблем магнетизму НАН України, науковий співробітник відділу проблем управління магнітним полем.

Захист відбудеться «__» _____ 2014 р. о ____ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.832.01 в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Артема, 44.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Артема, 44.

Автореферат розісланий «__» _____ 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.Д. Черенков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час електропостачання електричного залізничного транспорту України здійснюється 209 стаціонарними і п'ятьма пересувними підстанціями постійного струму. З терміном експлуатації, що перевищує 30 років, працюють 171 стаціонарна і одна пересувна підстанції. В складі обладнання тягових підстанцій працює 325 шестипульсних, 88 дванадцятипульсних некерованих випрямлячів і 44 тиристорних інвертори, ведених мережею. Термін служби випрямних установок обмежується старінням силових напівпровідникових приладів і становить 15 років. Більше 50 % випрямних установок типу УВКЕ, ПВЕ-3, ПКВД, ПВКЕ-2 відпрацювали свій термін і підлягають модернізації або заміні. Планами модернізації на 2010-2015р.р. передбачено перехід від шестипульсних схем випрямлення до дванадцятипульсних. Застосування дванадцятипульсної схеми дозволяє підвищити жорсткість зовнішньої характеристики випрямної установки, дещо поліпшити гармонічний склад вихідної напруги і підвищити коефіцієнт потужності до 0,96 - 0,97. В той же час некеровані дванадцятипульсні схеми випрямлення так само, як і шестипульсні, не вирішують задач: стабілізації вихідної напруги тягової підстанції, що особливо актуально при швидкісному русі; компенсації впливу на гармонічний склад вихідної напруги несиметрії живильної мережі; зменшення потужності фільтруючого обладнання. На думку експертів різних країн у галузі електропостачання залізниць, електрифікованих на постійному струмі, останніми роками проблема якості електричної енергії на виході тягової підстанції стає все більш актуальною, зокрема через впровадження: перспективних типів рухомого складу з імпульсними перетворювачами або частотно - регульованими асинхронними тяговими електричними машинами; мікропроцесорних систем в пристроях зв'язку, автоматики, керування та захисту; ділянок залізниць з підвищеними швидкостями руху. Це свідчить про перспективність даного напрямку досліджень. Вивченню питань, пов'язаних з якістю вхідної і вихідної напруг випрямних установок, присвячені роботи Бадера М.П., Гончарова Ю.П., Гриба О. Г., Жежеленко І. В., Кузнецова В.Г., Марікіна А.Н., Новського В.О., Рябенського В.М., Трейваса М.Д., Шидловського А.К., Щербака Я. В.

У той же час слід відзначити те, що на разі недостатньо вирішено питання оптимізації небезпечних впливів системи електропостачання на пристрої зв'язку, залізничної автоматики, телемеханіки, сигналізації, централізації і блокування, а також на інші суміжні електроустановки. Причиною таких впливів виступають гармоніки вихідної напруги випрямної установки тягової підстанції. Введення до складу випрямної установки керованого перетворювача з високими динамічними характеристиками дає можливість підвищення якості електроенергії на виході тягової підстанції засобами управління. Таким чином, підвищення якості електричної енергії на виході тягової підстанції з застосуванням спеціальних замкнутих систем автоматичного регулювання є актуальним завданням, що і визначило напрям дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи пов'язана із „Галузевою програмою енергозбереження на 2010 -2015 роки” (затверджена міністром транспорту та зв'язку України

09.02.2006р. № 114), „Програмою енергозбереження на залізничному транспорті України в 2007 році” (затверджена 16.07.2007 року №ЦЗТ- 12/112), науково-дослідною роботою „Енергоефективність і надійність систем передачі і споживання електричної енергії ” (ДР № 01111/010507).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертації є підвищення якості електричної енергії на виході тягової підстанції постійного струму за рахунок стабілізації випрямленої напруги і компенсації гармонік випрямленої напруги в широкому діапазоні частот за допомогою замкнутих систем автоматичного регулювання.

Для досягнення зазначеної мети поставлено такі задачі:

- проаналізувати існуючі методи регулювання і фільтрації гармонік випрямленої напруги тягової підстанції постійного струму;
- синтезувати замкнуту структуру автоматичного регулювання вихідної напруги і амплітуд гармонік із застосуванням вольтододатного перетворювача і методів активної фільтрації;
- виконати аналіз гармонічного складу вихідної напруги вольтододатного перетворювача з широтно – імпульсною модуляцією;
- дослідити статичні і динамічні характеристики вольтододатного перетворювача на базі випрямляча з широтно – імпульсною модуляцією;
- встановити зв'язок між частотою широтно – імпульсної модуляції і сталою часу згладжуючого фільтра для одержання необхідної величини коефіцієнта фільтрації;
- дослідити ефект подавлення гармонік випрямної установки контуром регулювання вихідної напруги;
- дослідити ефект подавлення низькочастотних гармонік системою випрямна установка – вольтододатний перетворювач з широтно – імпульсною модуляцією другого роду.

Об'єктом дослідження є процес підвищення якості електричної енергії на виході тягової підстанції постійного струму.

Предмет дослідження – замкнуті структури автоматичного регулювання випрямленої напруги і гармонік перетворювача з широтно – імпульсною модуляцією другого роду.

Методи дослідження. Класична теорія електричних кіл і методи гармонічного аналізу при дослідженні електромагнітних процесів у випрямній установці з вольтододатним перетворювачем, що працює в симетричному і несиметричному режимах, теорія автоматичного регулювання, математичний апарат Z-перетворення, теорія узагальнених функцій, метод параметричного формування процесу кінцевої тривалості, імітаційне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що:

- одержано подальший розвиток аналізу електромагнітних процесів випрямляча з широтно – імпульсною модуляцією, що дозволяє розкрити механізм особливостей формування гармонічного складу вихідної напруги;
- вперше одержано статичні характеристики і динамічну модель вольтододатного перетворювача, побудованого на базі випрямляча з широтно - імпульс-

ною модуляцією другого роду, які, на відмінність від відомих, відрізняються урахуванням дії пульсаційної складової вихідної напруги випрямляча;

- вперше досліджено ефект компенсації низькочастотних гармонік в оптимізованій за швидкодією замкнутій структурі автоматичного регулювання випрямної установки, яка має у своєму складі вольтододатний перетворювач з широтно – імпульсною модуляцією, що викликаються несиметрією живильної мережі, власною несиметрією випрямляча, а також биттям частот;

- одержала подальший розвиток замкнута структура з селективним зворотнім зв'язком і активною фільтрацією для регулювання субгармонік;

- одержала подальший розвиток структура активного фільтра, яка відрізняється від відомої наявністю адаптивного зворотного зв'язку по контурному коефіцієнту підсилення.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що теоретичні і експериментальні дослідження формують науково – технічну базу для створення нових систем випрямної установки для підвищення якості електричної енергії на виході тягових підстанцій залізничного і міського електричного транспорту. Результати дисертаційної роботи рекомендуються для практичного використання при модернізації та розробці нових випрямлячів та фільтруючого обладнання тягових підстанцій.

Практична цінність підтверджена актами про впровадження результатів дисертаційної роботи в Службі електропостачання Південної залізниці (м. Харків), ДП „НДІ ХЕМЗ” (м. Харків). Теоретичні положення, одержані в дисертаційній роботі, використовуються в Харківському національному університеті міського господарства ім. О.М. Бекетова при вивченні дисципліни „Енергетична електроніка”.

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: дослідження електромагнітних процесів у системі „некерований випрямляч - вольтододатний випрямляч з широтно – імпульсною модуляцією другого роду”; дослідження статичних і динамічних характеристик системи „некерований випрямляч - вольтододатний випрямляч з широтно – імпульсною модуляцією другого роду”; синтез системи регулювання напруги випрямної установки для досягнення максимально можливої швидкодії і подавлення низькочастотних гармонік вихідної напруги тягової підстанції; дослідження ефекту компенсації низькочастотних гармонік вихідної напруги тягової підстанції в замкнутій структурі; розробка комп'ютерних моделей випрямної установки тягової підстанції з вольтододатним перетворювачем і її систем автоматичного регулювання; перевірка одержаних розрахункових співвідношень за допомогою імітаційних моделей.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на таких конференціях: Міжнародна науково – технічна інтернет - конференція „Новітні технології в електроенергетиці”, (м. Харків, 2009 р.); Міжнародна науково – технічна інтернет - конференція „Новітні технології в електроенергетиці”, (м. Харків, 2010 р.); Семінар Національної академії наук України „Проблеми перетворення елект-

ричної енергії в системах електричного транспорту ”, (м. Харків, УкрДАЗТ, 2010 р.); Всеукраїнська науково – технічна конференція студентів і аспірантів „Інформаційна техніка, електромеханіка та електротехніка ”, (м. Луганськ, 2011р.); Всеукраїнська науково – технічна конференція викладачів, аспірантів і студентів , (м. Донецьк, „ДВУЗ” ДонНТУ, 2012р.); IV міжнародна науково – технічна конференція „Новітні технології в електроенергетиці ”, (м. Харків, 2012р.); II Міжнародна науково – технічна конференція „Оптимальне керування електроустановками ”, (м. Вінниця, 2013р.).

Публікації. За результатами досліджень, виконаних в дисертації, опубліковано 16 друкованих праць, із них 10 опубліковано в спеціалізованих виданнях, що включені до переліку ВАК, із яких 4 в наукометричних виданнях і 1 патент на винахід, 6 опубліковані в тезах доповідей і матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку літератури, 1 додатку. Загальний обсяг дисертації становить 207 сторінок, з них: 69 рисунків по тексту; 10 рисунків на окремих сторінках; список використаних літературних джерел з 126 найменувань на 14 сторінках; 1 додатка на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано мету і задачі досліджень, визначено об’єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз показників якості електричної енергії на виході тягової підстанції постійного струму і відзначено, що для залізничної тягової підстанції основним з них за гармонічним складом є величина еквівалентної заважаючої напруги.

Аналіз основних методів підвищення якості електричної енергії на виході тягової підстанції постійного струму показав, що перспективним є застосування на тягових підстанціях випрямлячів з керуванням вольтододатком, який включено в замкнуту систему автоматичного регулювання. Розглянуто можливість застосування широкосмугових силових активних фільтрів для компенсації гармонік випрямленої напруги в широкому діапазоні частот. На підставі проведеного аналізу сформульовано задачі досліджень та напрямки їх розв’язання.

У **другому розділі** розглянуто електромагнітні процеси, регульовальну характеристику і гармонічний склад вихідної напруги випрямної установки з вольтододатним перетворювачем (рис.1). Основний потік потужності в контактну мережу формується некерованим випрямлячем НВ.

Вольтододатний перетворювач ВП являє собою трифазний мостовий випрямляч регулювання вихідної напруги якого для розширення смуги пропускання здійснюється послідовністю широтно - модульованих імпульсів, які формуються системою керування СК. Нормалізація величини змінної складової вихідної напруги $U_{км}$ здійснюється силовим комбінованим фільтром, що складається із пасивного $ПФ$ та активного $АФ$ фільтрів. Стабілізація вихідної напруги і нормалізація амплітуд гармонік виконуються контурами автоматичного регулювання з регуляторами $РН$ та $РГ$.

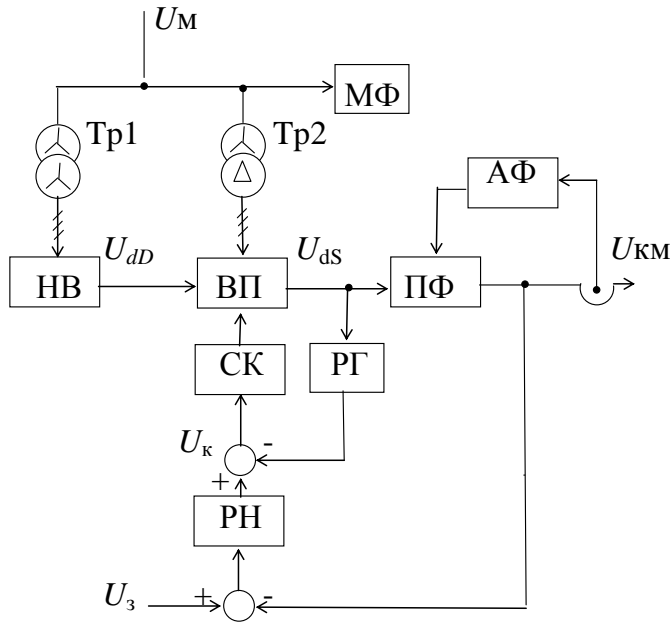


Рис.1. Структура випрамної установки

Вершини імпульсів модулюються вихідною напругою випрамляча в некерованому режимі. Зв'язок між періодами дискретності випрамляча T_1 і ШІМ T_2 ви-

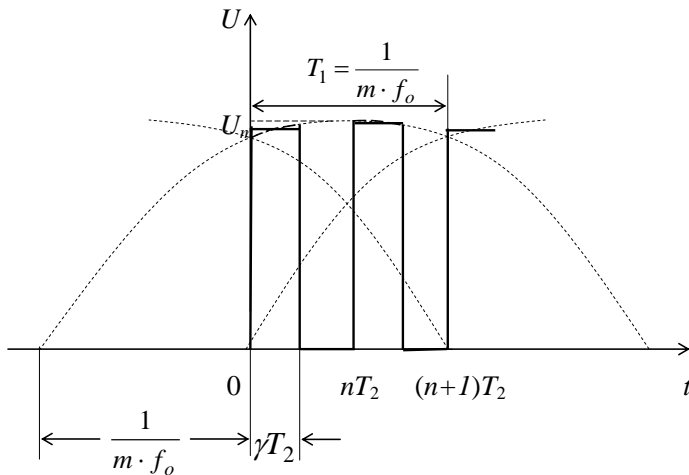


Рис.2 Вихідна напруга випрамляча з ШІМ

од випрамляча. Це надає можливість переходу від амплітудно – імпульсної модуляції першого роду (АІМ-1) до амплітудно – імпульсної модуляції другого роду (АІМ-2). Такий перехід дозволяє при розгляді динамічних характеристик застосовувати відомий математичний апарат опису імпульсних систем. Перехід від АІМ-1 до АІМ -2 характеризується заміною реальної імпульсної послідовності вихідної напруги вольтододатного перетворювача на послідовність прямокутних імпульсів (рис.2).

В цьому випадку вираз для регульовальної характеристики вольтододатного перетворювача, який записано у відносних одиницях, набуває вигляду

Величина вихідної напруги вольтододатного перетворювача вибирається із умови забезпечення компенсації відхилень вихідної напруги $U_{кМ}$ від устанавленого значення під дією змін величини навантаження $U_{ds} = K_1 \cdot U_{dD}$. Мережний фільтр МФ виконує подавлення вищих гармонічних складових вхідного струму.

Вихідна напруга випрамляча з широтно – імпульсною модуляцією (ШІМ) являє собою послідовність імпульсів (рис.2) тривалістю $t_u = \gamma \cdot T_2$.

визначається як

$$T_2 = \frac{T_1}{K_o}, \quad \text{де } K_o = 1, 2, 3, \dots$$

В роботі показано, що регульовальна характеристика випрамляча з ШІМ не залежить від співвідношень тривалості тактових інтервалів T_1 і T_2 , є лінійною і є раціональною функцією від регульованого параметра ШІМ γ .

В реальних системах період ШІМ в K_o разів менший за пері-

$$\bar{U}d_{\gamma Tu} = \frac{\gamma \cdot \pi}{K_o \cdot m \cdot \sin \frac{\pi}{m}} \sum_{n=1}^{K_o} \sin \frac{\pi}{K_o \cdot m} [2(1 - n + K_o) + \gamma]. \quad (1)$$

Аналіз виразів (1) і результатів виконаних розрахунків вказує на те, що регульовальна характеристика вольтододатного перетворювача з ШІМ з достатньо високою точністю може бути описана аналітичною залежністю

$$U_{dT1} = \gamma \cdot K_1 \cdot U_{dD}. \quad (2)$$

Показано, що максимальної величини похибка апроксимації досягає при $K_o=2$ і не перевищує 2 %. При цьому слід зазначити, що робочими є частоти ШІМ при $K_o>2$. Для реальної величини $K_o=6$ максимальна величина відносної похибки не перевищує 0,2 %.

Установлено, що застосування у вольтододатному перетворювачі ШІМ змінює природу генерації гармонік у вихідному колі випрямної установки тягової підстанції. При симетрії напруг живильної мережі і строгій реалізації величини коефіцієнта K_o у вихідному колі генеруються канонічні гармоніки некерованого випрямляча НВ і вольтододатного перетворювача ВП з відповідними частотами: $f_k = kmf_o$, $f_q = qmK_o f_o$ (3) де k і q - номери гармонік НВ та ВП.

При несиметрії напруг живильної мережі вихідна напруга випрямної установки доповнюється неканонічними гармоніками з частотами $f_v = 2vf_o$. Величини неканонічних гармонік визначаються коефіцієнтом несиметрії і змінюються у функції регульованого параметра ШІМ γ .

Відхилення K_o від установленної величини викликає генерацію у вихідну напругу випрямної установки низькочастотних субгармонік, частоти яких $\Delta\omega = qm\omega_o\Delta K_o$ (4) можуть збігатися з робочими частотами залізничної автоматики.

Необхідний ступінь фільтрації наведених гармонік на тягових підстанціях залізничного транспорту визначається величиною заважаючої напруги, яка визначає допустимий вплив випрямної установки на залізничну автоматику. Показано, що з урахуванням гармонічного складу вихідної напруги випрямної установки з вольтододатним перетворювачем керованим ШІМ, заважаюча напруга визначається як

$$U_{MH} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (U_k \rho_k)^2 + \sum_{q=1}^{\infty} (U_q \rho_q)^2 + \sum_{v=1}^{\infty} (U_v \rho_v)^2 + \sum_{b=1}^{\infty} (U_{\Delta} \rho_{\Delta})^2}, \quad (5)$$

де U - діюче значення напруги відповідної гармоніки, ρ – коефіцієнт акустичної дії (коефіцієнт приведення відповідної гармоніки до частоти 800 Гц).

У структурі випрямної установки тягової підстанції (рис.1) на фільтр ПФ покладена фільтрація гармонік від ШІМ вольтододатного перетворювача. Канонічні і неканонічні гармоніки НВ і ВП та низькочастотні субгармоніки піддаються регулюванню в замкнутих структурах. Враховуючи це, одержано вираз для розрахунку сталої часу LC – фільтра

$$T_{\phi} = \frac{1}{\omega_{q=1}} \sqrt{\frac{K_1 \cdot U_{dD}}{\pi \cdot U_{mn}}} \rho_{q=1} - 1. \quad (6)$$

Результати досліджень енергетичних властивостей випрямної установки з вольтододатним перетворювачем керованим за допомогою ШІМ вказують на те, що коефіцієнт потужності K_M визначається коефіцієнтом спотворень

$$K_M = \frac{\sqrt{2}(\sqrt{3} + \gamma K_1)}{\pi \sqrt{\frac{2}{3} \left(1 + \gamma \frac{K_1^2}{3} + \gamma K_1\right)}} \quad (7)$$

У таблиці 1 наведені результати розрахунків коефіцієнта потужності для $K_1=0,2$. У нижньому рядку таблиці подано значення коефіцієнта потужності, які експериментально одержані на моделі випрямної установки тягової підстанції.

Таблиця 1

γ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
K_M	0,9549	0,9558	0,9568	0,9578	0,9589	0,960	0,9614	0,9627	0,9641	0,9655	0,967
$K_{Mэ}$		0,9579	0,9563	0,9579	0,9595	0,9635	0,9535	0,9658	0,9691	0,9717	0,9748

Із наведеного видно слабку залежність коефіцієнта потужності від зміни регулюємого параметра ШІМ, що дозволяє одержати більш високі енергетичні показники випрямної установки тягової підстанції в порівнянні з фазовим керуванням.

У третьому розділі розглянуті статичні та динамічні характеристики випрямної установки з вольтододатним перетворювачем, керованим ШІМ, як елемента системи автоматичного регулювання.

Одержано вираз для статичного коефіцієнта передачі випрямляча з ШІМ

$$K_{\epsilon}(nT_2) = \frac{\pi}{K_o \cdot m \cdot \sin \frac{\pi}{m}} \cdot \sum_{n=1}^{K_o} \sin \left[\frac{2\pi}{m} \left(1 + \frac{n-1}{K_o} \right) + \bar{U}_y(t) \frac{\pi}{K_o m} \right]. \quad (8)$$

З (8) слідує, що миттєве значення коефіцієнта передачі змінюється на кожному тактовому інтервалі ШІМ.

Характер змін коефіцієнта передачі визначається законом зміни пульсаційної складової вихідної напруги випрямляча в некерованому режимі. При цьому спостерігається слабкий зв'язок коефіцієнта передачі від змін регулюємого параметра ШІМ γ . З цього виходить, що випрямляч з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги як елемент системи автоматичного регулювання являє собою структуру із змінними параметрами.

Визначення динамічних характеристик випрямляча з ШІМ виконано наданням малих приростів ΔU_y сигналу керування U_y (рис.3). Прирости вихідної напруги Δe_{ϵ} під дією ΔU_y в замкнутій структурі визначаються трансцендентним рівнянням відносно сигналу керування

$$\Delta e_{\epsilon}[\Delta U_y(\theta_i)] = e_{\epsilon}(U_y + \Delta U_y) - e_{\epsilon}(U_y). \quad (9)$$

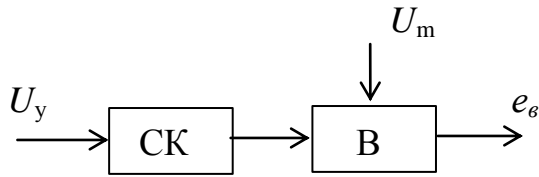


Рис.3 Узагальнена схема випрямляча з ШІМ

застосуванням теорії узагальнених функцій

$$\Delta e_B(\theta_{\gamma i}) = \Delta U_y(\theta_{\gamma i}) \omega T_2 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=0}^{k_0} K_i F_i \delta(\theta - \theta_{\gamma i}), \quad (10)$$

де $K_i = \frac{U_m}{U_o} \sin(\theta_{\gamma i} + \frac{\pi}{m})$ - коефіцієнт передачі ШІМ на i - му тактовому інте-

рвалі; T_2 - період дискретності ШІМ; F_i – фактор пульсацій.

Із (10) слідує, що для малих значень $\Delta U_y(\theta_{\gamma i})$ випрямляч з ШІМ являє собою амплітудно - імпульсний модулятор другого роду. Динамічний зв'язок між приростами керуючого діяння ΔU_y і вихідною Е.Р.С. Δe_g має змінний характер на кожному інтервалі дискретності ШІМ, що викликано змінами K_i і F_i під дією пульсаційної складової вихідної напруги випрямляча. Дану властивість необхідно враховувати при точному описі динамічних процесів замкнутої структури в якій реалізується гранична швидкодія. Виразу (10) відповідає наведена на рис.4 імпульсна модель, яка складається з ідеального імпульсного елемента з періодом квантування T_2 і приведеної неперервної частини, яка несе інформацію про статичний K_i і динамічний F_i коефіцієнт передачі.

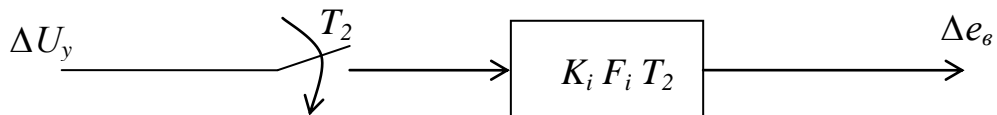


Рис.4. Імпульсна модель випрямляча з ШІМ

Із застосуванням методу суперпозиції і модифікованого z – перетворення одержано вираз для фактора пульсацій для системи з приведеною неперервною частиною у вигляді узагальненої аперіодичної ланки

$$F_j^{-1} = 1 + \sum_{n=1}^{K_0} K_g(nT_2) \cdot K_i \frac{T_2}{T_i} \cdot \frac{e^{(n-1)\frac{T_2}{T_i}} (e^{-\gamma\frac{T_2}{T_i}} - e^{-\frac{T_2}{T_i}})}{1 - e^{-\frac{T_2}{T_i}}}, \quad (11)$$

де: $K_g(nT_2)$, K_i - статичні коефіцієнти передачі випрямляча та аперіодичної ланки на n - му інтервалі дискретності ШІМ; T_i – стала часу.

Показано, що в загальному випадку регулювання вихідної координати випрямляча з ШІМ приведена неперервна частина являє собою суму передавальних функцій елементарних ланок або складається із k паралельних каналів зворотнього зв'язку. В цьому випадку фактор пульсацій визначається як

$$F_3^{-1} = 1 + \sum_{j=1}^k (F_j^{-1} - 1). \quad (12)$$

У четвертому розділі наведені результати досліджень динамічних процесів, які протікають в системі автоматичного регулювання випрямної установки з вольтододатним перетворювачем, керованим ШІМ, при регулюванні вихідної напруги і нормалізації її гармонійного складу відповідно до існуючих вимог. В результаті досліджень одержані структури, аналітичні співвідношення та рекомендації щодо вибору настроюваних параметрів, що забезпечують перехідні процеси кінцевої тривалості з одночасним зменшенням амплітуд низькочастотних субгармонік.

Згідно з параметричним методом формування процесу кінцевої тривалості та застосуванням імпульсної моделі (рис.4), синтезовано структурну схему і передавальну функцію регулятора системи автоматичного регулювання вихідної напруги вольтододатного перетворювача зі згладжуючим LC – фільтром на виході (рис. 5). В даній структурі внутрішній контур, який у своєму складі має динамічну ланку

$$H(p) = \frac{T_2 p}{T_\phi^2 p^2 + 2\xi T_\phi p + 1}, \quad (13)$$

слугує для динамічного демпфування LC – фільтра за струмом конденсатора i_c .

Стала часу T_2 визначається величиною ємності конденсатора фільтра та опором шунта, що виміряє струм i_c , а T_ϕ – формулою (6).

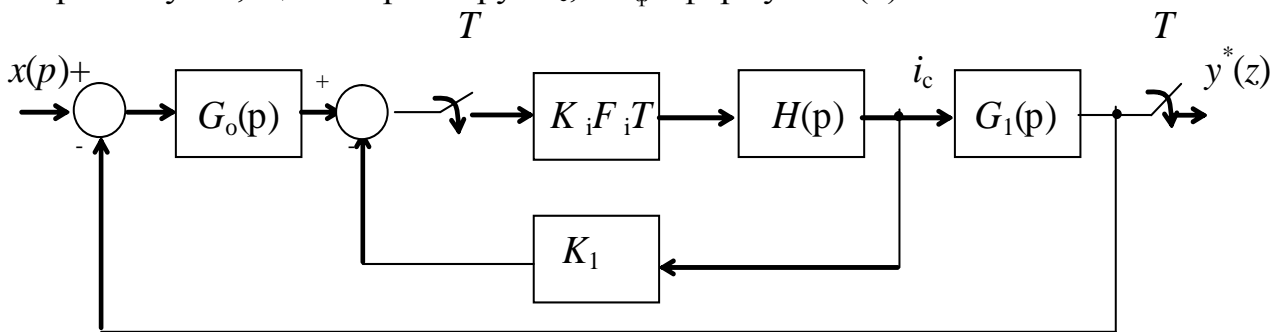


Рис.5 Структурна схема двоконтурної системи регулювання

Зовнішній контур, що складається з динамічних ланок $G_o(p) = (T_3 p + 1)/T_4 p$, $G_1(p) = (T_\phi p + 1)/T_2 p$, (14) слугує для стабілізації вихідної напруги. Зв'язок між вхідним і вихідним сигналами наведеної системи, які записані у формі z – перетворення, визначається виразом

$$y^*(z) = \frac{z^{-1} X G_o^*(z) K_o T H G_1^*(z)}{1 + z^{-1} K_o T H G_1 W G_o^*(z,1)}, \quad (15)$$

де $K_o = F_i K_i$, $H G_1^*(z) = Z\{H(p) G_1(p)\}$, $X G_o^*(z) = Z\{x(p) G_o(p)\}$, $W(p) = 1 + \frac{K_1}{G_o(p) G_1(p)}$.

Умови процесу кінцевої тривалості визначаються такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned}
T_3 &= T_4 \left(\frac{T_\phi^2}{K_i F_i \cdot T \cdot T_2} - K_1 \right); & T_4 &= K_i F_i T \left[1 + K_2 \cdot e^{-\xi \frac{T}{T_\phi}} \right]; \\
K_1 &= \frac{T_\phi}{T} \left\{ \frac{T_\phi}{K_i F_i T_2} + \frac{T}{T_4 \sin a \frac{T}{T_\phi}} \left[\left(\frac{T_2}{T_\phi} - 2\xi \right) \sin a \frac{T}{T_\phi} - \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - e^{-\xi \frac{T}{T_\phi}} \left(a + K_2 \cdot \left(a \cos a \frac{T}{T_\phi} + \xi \cdot \sin a \frac{T}{T_\phi} \right) \right) \right] \right\}; & (16) \\
K_2 &= e^{-\xi \frac{T}{T_\phi}} - 2 \cos a \frac{T}{T_\phi}; & a &= \sqrt{1 - \xi^2}.
\end{aligned}$$

Перехідний процес в системі регулювання, розрахований за (15) з урахуванням (16) для: $x(t)=1(t)$, $K_o=8$, $T_\phi=0,000318$ С, $K_i=60$, $R_n=1$ Ом, опору шунта $R_{ш}=75 \cdot 10^{-4}$ Ом, визначається як

$$y(t)=z^{-1}0,094+z^{-2}0,924+z^{-3}0,946+z^{-4}0,946+z^{-5}0,946+\dots+z^{-n}0,946. \quad (17)$$

З виразу (17) слідує, що перехідний процес закінчується за число тактових, інтервалів ШІМ, яке дорівнює порядку характеристичного рівняння системи, що відповідає процесу кінцевої тривалості.

Показано, що на однозначність перехідних процесів впливає фактор пульсацій і коефіцієнт демпфування ξ . Зміни ξ , що викликаються змінами величини навантаження, найбільш суттєво впливають на коефіцієнт передачі пропорційної частини $K_1 = \frac{T_3}{T_4}$ ПІ-регулятора. Для одержання однозначності перехідних

процесів запропоновано адаптивний ПІ-регулятор, параметричне регулювання K_1 в якому здійснюється у функції струму навантаження I_n тягової підстанції.

Досліджено ефект подавлення гармонік випрямної установки двоконтурною системою автоматичного регулювання вихідної напруги при її налаштуванні на умови (16). Одержано вираз для модуля коефіцієнта подавлення

$$K(\omega) = \sqrt{\frac{\left\{ \omega^4 T_2 T_4 T_\phi^2 - \omega^2 T_2 [T_4 + K_o (T_3 + T_\phi)] \right\}^2 + [\omega K_o T_2 - \omega^3 T_\phi T_2 (2\xi T_4 + K_o T_3)]^2}{[\omega^4 T_2 T_4 T_\phi^2 - \omega^2 T_2 T_4]^2 + 4\omega^6 \xi^2 T_2^2 T_4^2 T_\phi^2}}. \quad (18)$$

На рис.6 подана розрахована за (18) графічна залежність коефіцієнта подавлення у функції частот субгармонік. Аналіз одержаної залежності вказує на достатньо високу ефективність зменшення амплітуд субгармонік замкнутою структурою. Так, для субгармоніки з частотою $f=50$ Гц $K_{П}=9,435$; для гармоніки $f=100$ Гц, викликаною несиметрією живильної мережі, $K_{П}=5,225$; для основної гармоніки випрямляча $f=300$ Гц. $K_{П}=3,158$. Ефект подавлення субгармонік посилюється із зменшенням їх частот, що є особливо важливим для випрямної установки залізничної тягової підстанції.

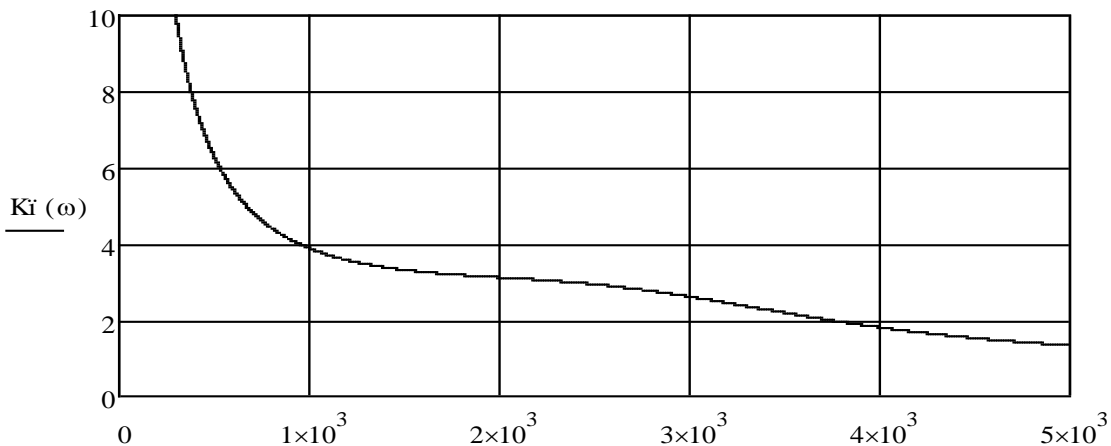


Рис.6. Залежність коефіцієнта подавлення від частоти субгармоніки

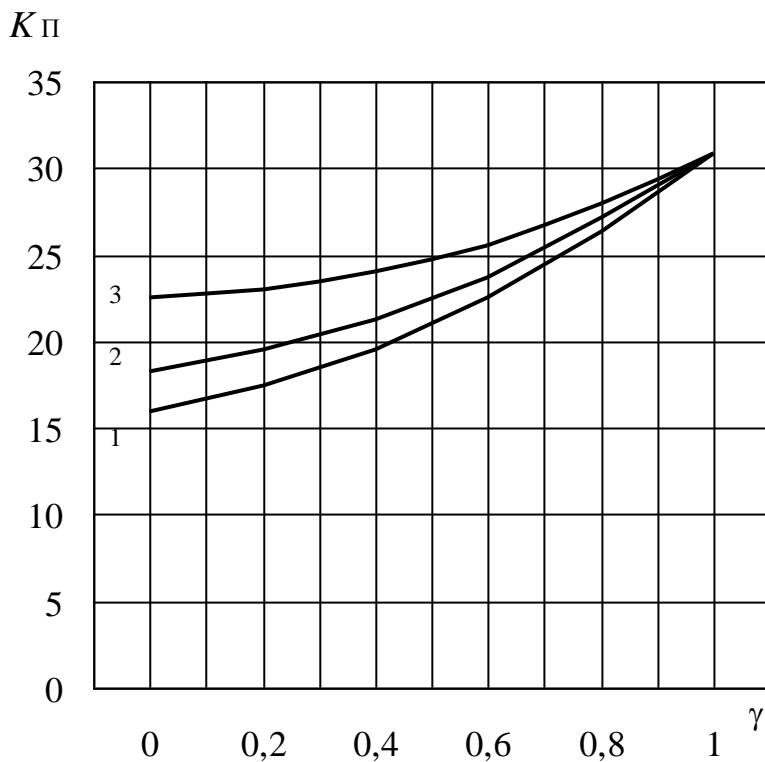


Рис.7 Залежність K_p від γ

1- $K_0=6$, 2- $K_0=8$, 3- $K_0=15$

Зі збільшенням K_0 , який визначає граничну частоту ШІМ, збільшується фактор пульсацій, що у свою чергу викликає збільшення K_n .

Показано, що для повного виконання вимог до якості електричної енергії на виході залізничної тягової підстанції достатньо ефективним є застосування адаптивного комбінованого фільтра (рис.8). Диференціуюча ланка $G(p)$ формує сигнал пропорційний змінній складовій вихідної напруги тягової підстанції, який подається на входи корегуючої ланки $G_k(p)$ і елемента виділення модуля,

Показано, що застосування у випрямлячі ШІМ дозволяє ефективно подавляти основну гармоніку випрямляча (300 Гц) (рис.7) в системі з селективним зворотнім зв'язком з динамічною ланкою

$$G(p) = \frac{T_v p}{T_v^2 p^2 + 2\xi T_v p + 1}$$

Розрахунки K_n виконані для усередненої величини коефіцієнта передачі вольтододатного перетворювача $K_i=60$.

Наведені графіки вказують на залежність коефіцієнта подавлення K_n від змін регульованого параметра ШІМ γ . Це пояснюється впливом фактора пульсацій.

вихідний сигнал якого є сигналом зворотнього зв'язку контура автопідстроювання. Застосування як регулятора $H_p(p)$ інтегруючої ланки надає системі якос-

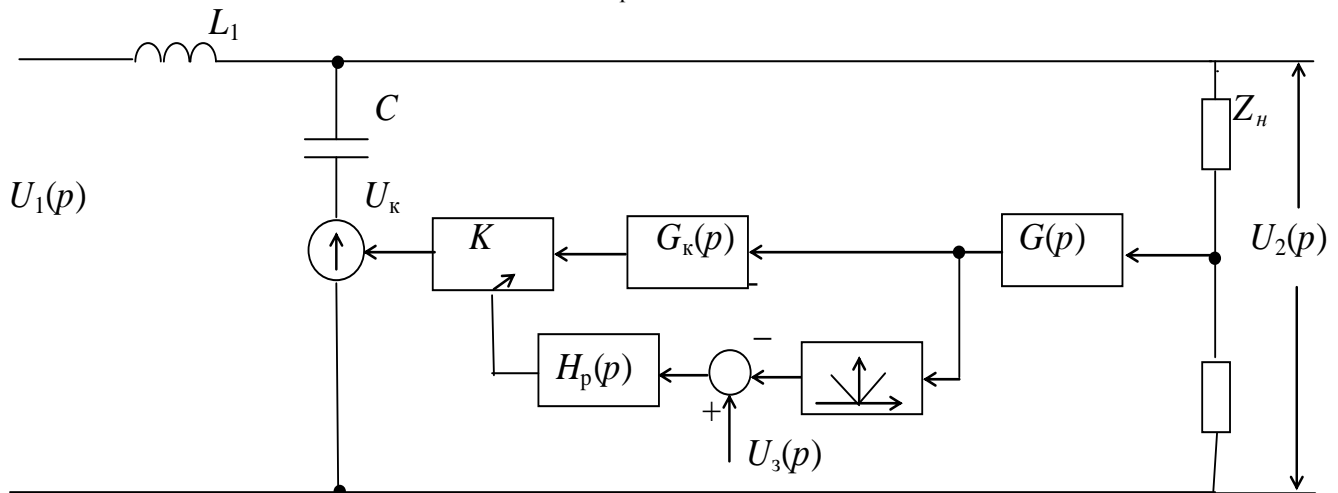


Рис. 8 Адаптивний комбінований фільтр

тей астатизму відносно $U_3(p)$. Вихідний сигнал регулятора $H_p(p)$ діє на керуючий вхід підсилювача K , що регулюється. Зміною контурного коефіцієнта передачі досягається інваріантність остаточної величини змінної складової до змін її початкової величини. Стала часу регулятора вибирається з умови стійкості системи. Синтез передавальних функцій ланок $G(p)$ та $G_k(p)$ їх параметрів виконано методом частотних характеристик.

У п'ятому розділі наведені результати досліджень електромагнітних та динамічних процесів випрямної установки з вольтододатним перетворювачем, керування якого здійснюється ШІМ. Дослідження виконані за допомогою пакета прикладних програм MATLAB & Simulink.

При побудові комп'ютерних моделей прийняті такі припущення, які не мають принципового впливу на адекватність одержаних результатів: випрямна установка живиться від мережі нескінченної потужності; навантаження на випрямну установку тягової підстанції має активно – індуктивний характер і враховує еквівалентні індуктивності та активні опори контактної мережі і тягового рухомого складу; некерований випрямляч побудовано за трифазною мостовою схемою; вольтододатний перетворювач являє собою трифазний мостовий випрямляч, побудований на ідеальних повністю керованих ключах; система керування вольтододатного перетворювача формує симетричну послідовність прямокутних імпульсів.

Імітаційна модель випрямної установки наведена на рис.9. Некерований випрямляч VD виконано за трифазною мостовою схемою. Живлення випрямляча здійснюється трифазною системою напруг UA1-UC1 через силовий трансформатор, який має схему з'єднання обмоток «зірка– зірка». Вольтододатний перетворювач Voltodobavka виконано на повністю керованих силових ключах. Живлення перетворювача здійснюється від трансформатора зі з'єднанням обмоток «зірка – трикутник». Величина вихідної напруги трансформатора визначається умовою $K_1=0,2$.

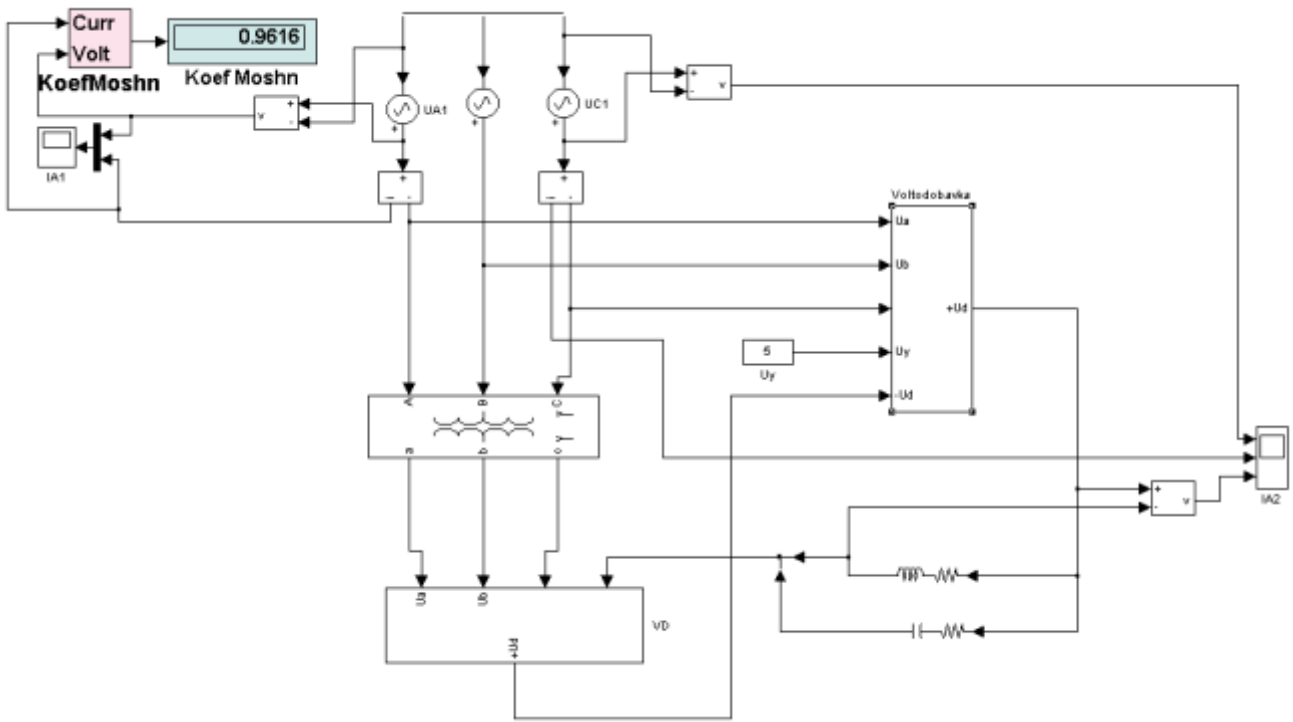


Рис.9 Модель силової частини випрямної установки з вольтододатним перетворювачем

На рис.10 наведені напруги і струм випрямної установки з вольтододатним перетворювачем: а)- вхідна напруга; б)- вхідний струм; с)- вихідна напруга.

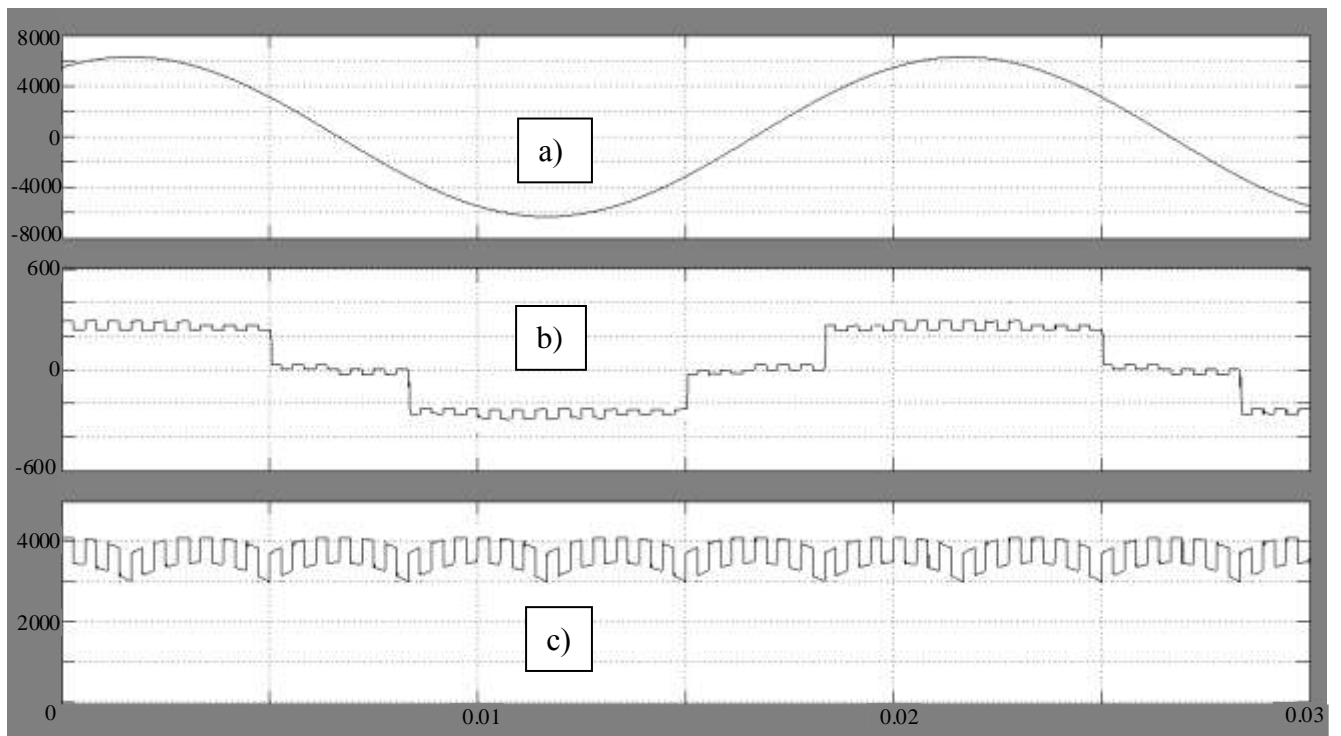


Рис.10 Напруги і струм випрямної установки з вольтододатним перетворювачем

Аналіз наведених діаграм підтверджує висновок про те, що коефіцієнт зсуву дорівнює одиниці, а коефіцієнт потужності визначається коефіцієнтом спотворень. Одержані на даній моделі значення коефіцієнта потужності наведені в табл.1. Виміри коефіцієнта потужності виконувались блоком КоefMoshn. В табл.2 наведені результати експериментального визначення статичного коефіцієнта передачі вольтододатного перетворювача. В середньому рядку таблиці наведені розрахункові значення.

Таблиця 2

γ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$U_{дГ1}$	0	0,098345	0,197792	0,298067	0,398895	0,5	0,601105	0,701933	0,802208	0,901655	1
$U_{дГ2}$	0	0,106	0,202	0,299	0,399	0,499	0,599	0,7	0,8	0,9	1

На рис.11 наведені осцилограми вхідних напруги і струму випрямної установки з мережевим фільтром. Резонансна частота LC - ланок фільтра лежить близько до частоти п'ятої гармоніки випрямляча. Із рис.11 слідує, що застосування мереженого фільтра підвищує коефіцієнт потужності до величини $K_M=0,9958$, що відповідає сучасним вимогам.

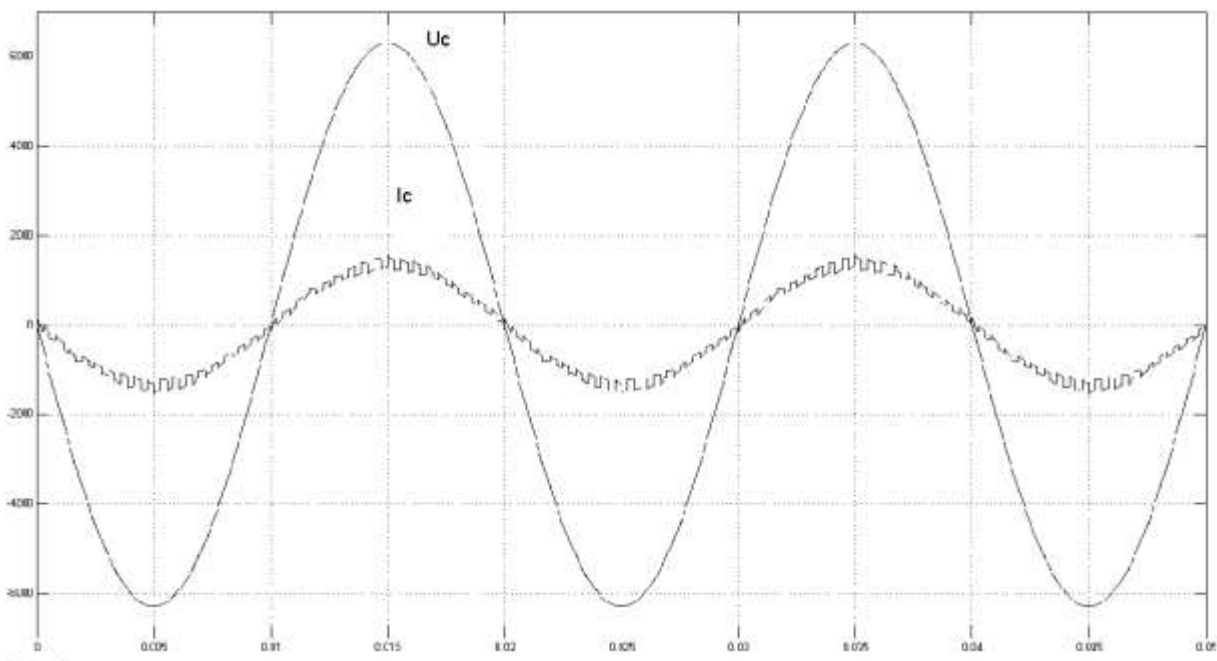


Рис.11. Мережні напруга і струм випрямної установки з мережним фільтром

На рис.12 наведена модель замкнутої системи автоматичного регулювання вихідної напруги випрямної установки, а на рис.13 - осцилограми перехідних процесів. Некерований випрямляч і вольтододатний перетворювач, подано у вигляді субблока VU. Пропорційно – інтегральний регулятор і коло навантаження подані динамічними ланками $G(p)$, $H(p)$, $G_1(p)$. Контур демпфування згладжуючого LC – фільтра складається з пропорційної ланки з коефіцієнтом передачі K_2 . Параметри всіх перерахованих ланок вибрані у відповідності

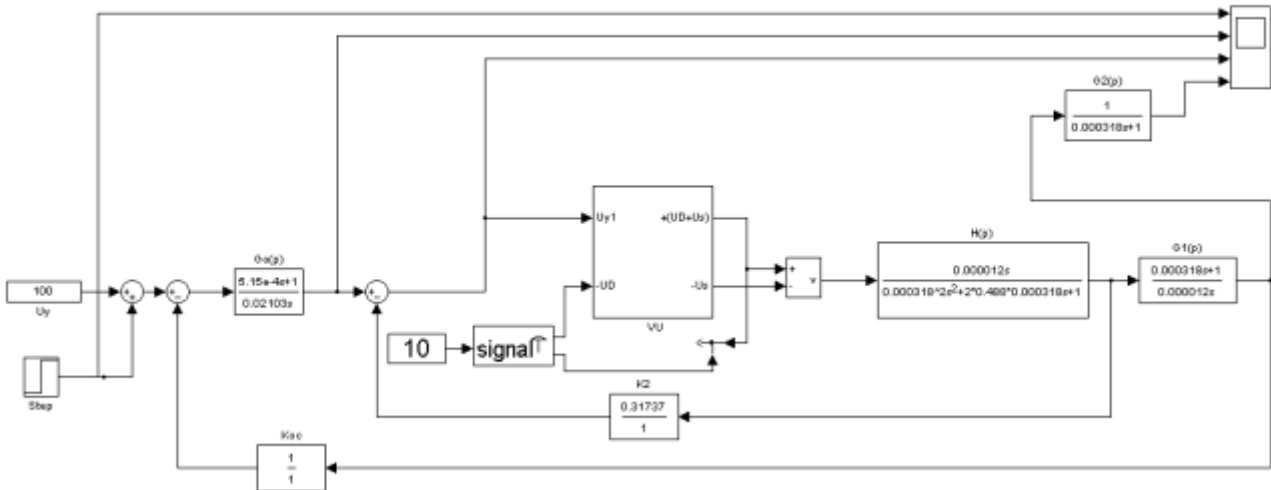


Рис.12 Модель замкнутої системи регулювання напруги випрямної установки

до теоретичних досліджень. Блоками U_y і Step формуються сигнал завдання і східчастий його приріст.

На рис.13 наведені такі сигнали: а)- з формований блоком Step стрибок си-

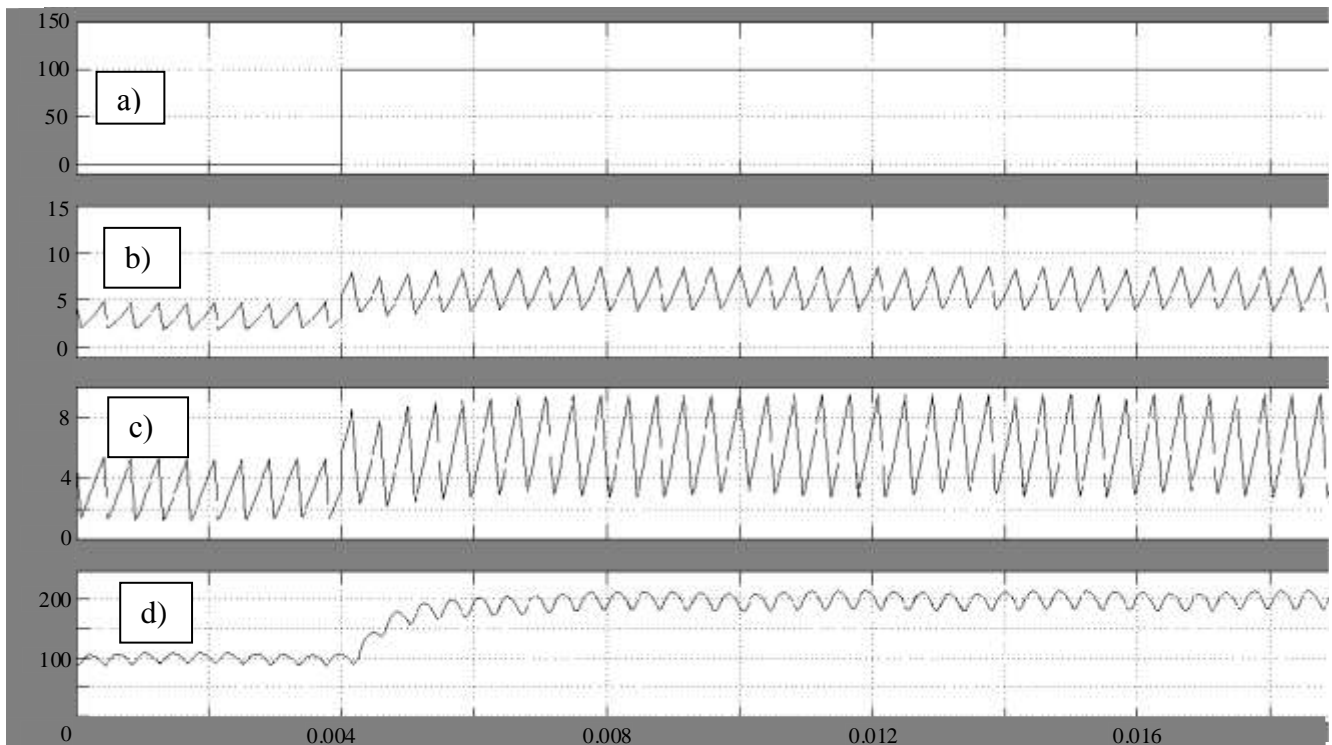


Рис.13 Перехідні процеси в системі автоматичного регулювання

напругу завдання; b)- вихідний сигнал ПІ - регулятора напруги $G(p)$; c) - сигнал на вході системи керування вольтодобатного перетворювача; d)- перехідний процес вихідної напруги випрямної установки.

Осцилограми підтверджують теоретичний висновок про те, що перехідний

процес в системі регулювання закінчується за три тактових інтервали ШІМ і досягається достатньо високий ступінь подавлення гармоніки 300 Гц.

На рис.14 наведена модель комбінованого фільтра. Експериментальні дослі-

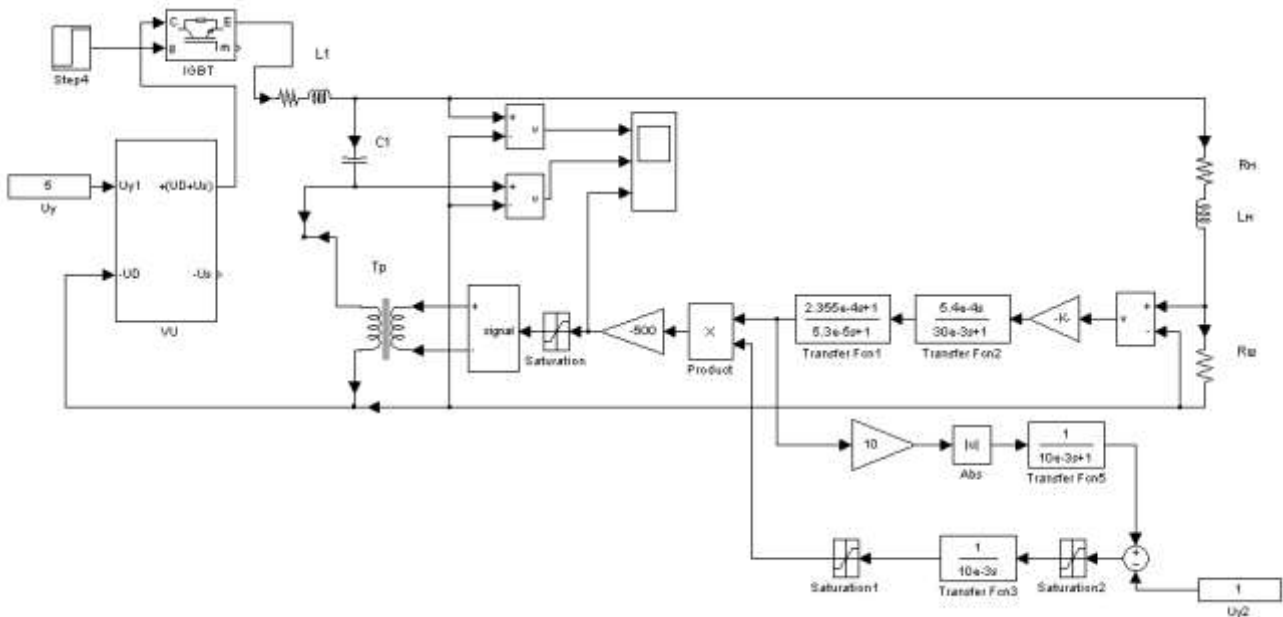


Рис. 14 Модель комбінованого фільтра

дження процесу регулювання змінної складової вихідної напруги випрямної установки тягової підстанції виконано шляхом її осцилографування без активного фільтра (рис.15) і з увімкненим активним фільтром (рис.16). З рис.15 слі-

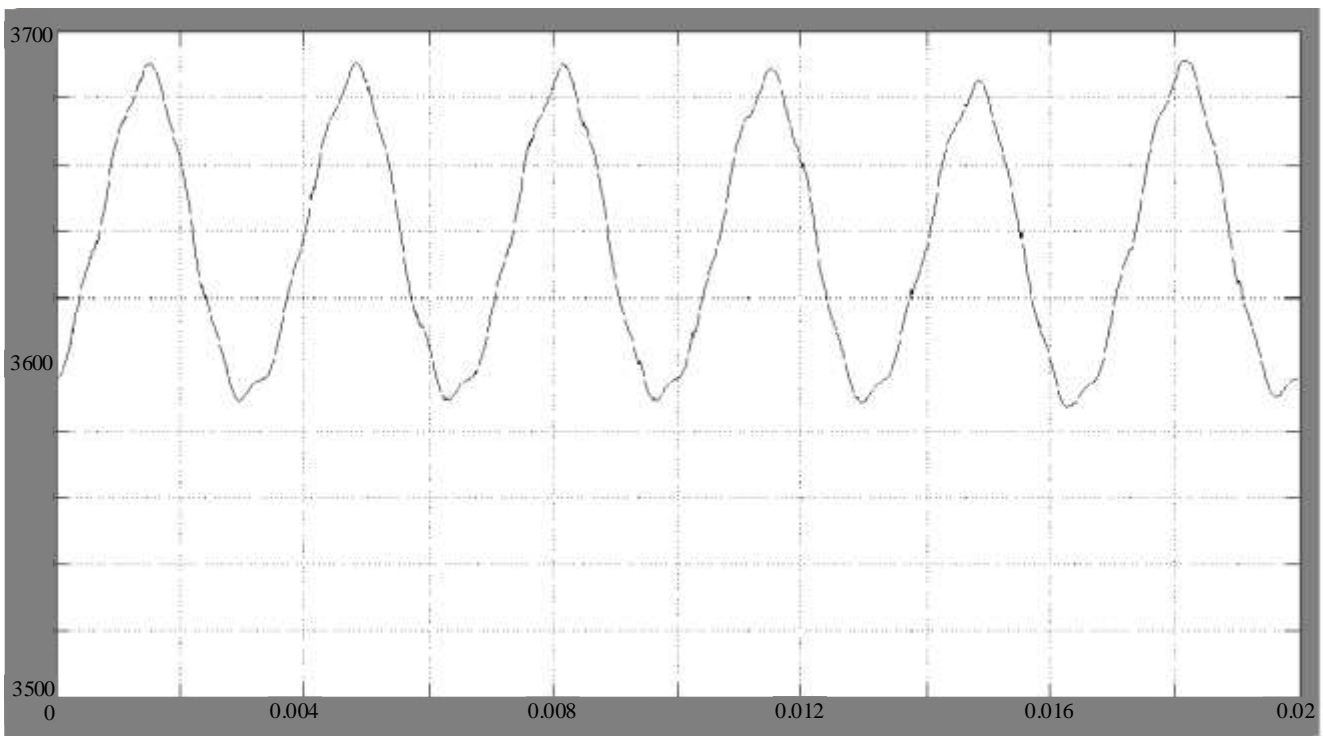


Рис.15 Пульсація напруги на виході пасивного фільтра

дує, що пульсація вихідної напруги в основному визначається змінною складовою випрямляча. Повний розмах пульсації досягає 100 В. Змінна складова, що

формується ШІМ, достатньо ефективно фільтрується пасивним LC -фільтром. На рис.16 показано: а)- пульсація вихідної напруги; б) і с) – сигнали на вході і

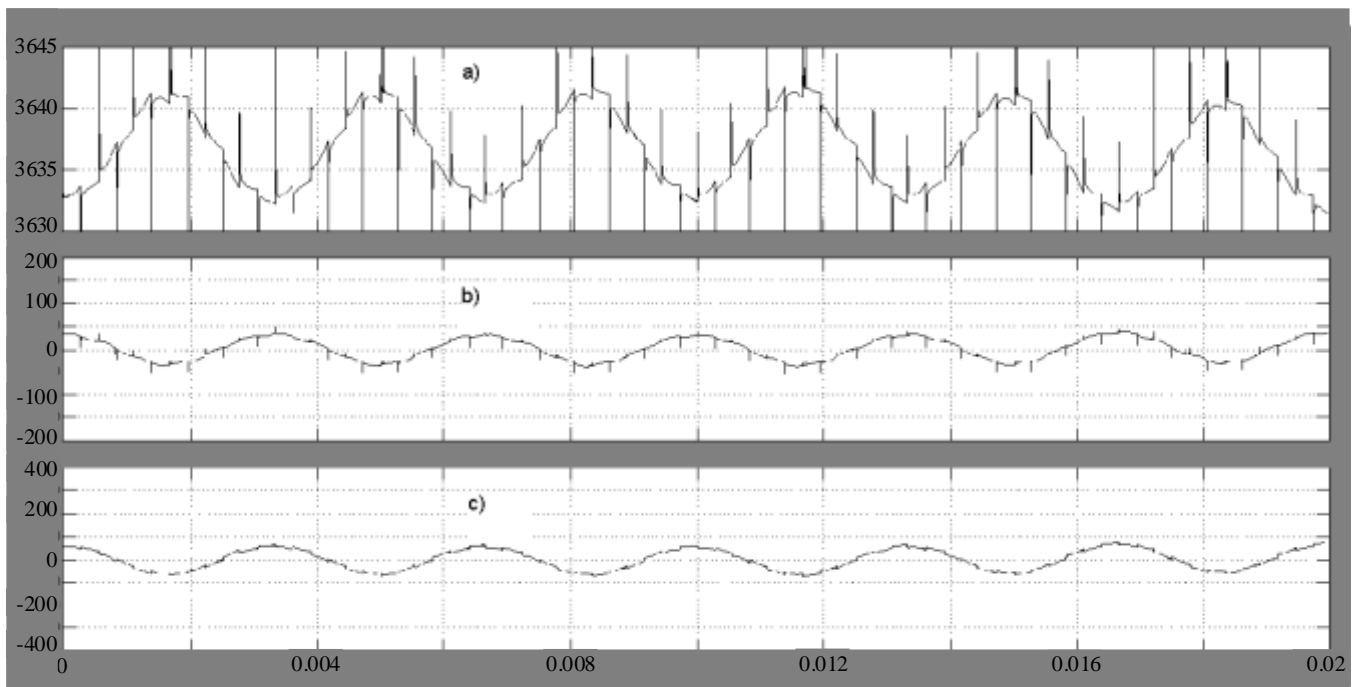


Рис.16. Епюри напруг випрямної установки з активним фільтром

виході узгоджувального трансформатора. Із наведених осцилограм слідує, що включення до складу випрямної установки активного фільтра забезпечує високу ефективність подавлення змінної складової вихідної напруги випрямляючої установки ($K_{\text{п}} > 10$).

Із наведених таблиці і осцилограм слідує, що результати експериментальних досліджень з достатньо високою точністю підтверджують коректність розроблених моделей і результати теоретичних досліджень.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних і експериментальних досліджень розв'язується науково - технічна задача підвищення якості електричної енергії на виході тягової підстанції постійного струму. Підвищення якості досягається застосуванням замкнутих систем автоматичного регулювання вихідних координат випрямної установки на базі випрямляча з широтно – імпульсною модуляцією.

За результатами проведених теоретичних і експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки.

1. Виконано огляд існуючих методів підвищення якості електричної енергії на виході тягової підстанції, який показує необхідність застосування активних методів компенсації гармонік випрямленої напруги, у якості яких доцільно застосування замкнутих систем автоматичного регулювання.

2. Запропонована структура регулювання вихідних координат випрямної установки з вольтододатним перетворювачем дозволяє з високим ступенем

ефективності розв'язати задачу стабілізації вихідної напруги і нормалізації її гармонічного складу. Вперше показано, що перехід від фазового керування вольтододатним перетворювачем до широтно – імпульсного, крім поліпшення динамічних характеристик, дозволяє підвищити коефіцієнт потужності випрямної установки.

3. Показано, що вихідна напруга вольтододатного перетворювача з широтно – імпульсною модуляцією містить гармонічні складові, частоти яких визначаються пульсністю випрямляча, несиметрією живильної мережі, широтно - імпульсною модуляцією і биттям між гармоніками. Одержані аналітичні залежності з застосуванням комплексної площини дозволяють аналізувати процес формування гармонічного складу вихідної напруги вольтододатного перетворювача і сформулювати вимоги до системи автоматичного регулювання їх амплітуд.

4. Із використанням теорії узагальнених функцій вперше одержана імпульсна модель вольтододатного перетворювача з широтно – імпульсною модуляцією яка дозволяє виконати аналіз і синтез замкнутих систем автоматичного регулювання. Показано, що випрямляч з широтно – імпульсною модуляцією являє собою структуру зі змінними параметрами. Викликано це впливом пульсаційної складової випрямляча на статичний коефіцієнт передачі і фактор пульсацій на кожному інтервалі широтно – імпульсної модуляції. Оптимізовані параметри регулятора системи автоматичного регулювання вихідної напруги випрямної установки для реалізації граничної швидкодії.

5. Показано, що при визначенні параметрів згладжуючого фільтра випрямної установки необхідно враховувати величину заважаючої напруги. Одержано вираз для розрахунку сталої часу згладжуючого фільтра, що враховує величину заважаючої напруги.

6. Вперше показано, що реалізація процесу кінцевої тривалості дозволяє крім стабілізації вихідної напруги випрямної установки з вольтододатним перетворювачем, який керується за допомогою широтно – імпульсної модуляції, здійснювати подавлення: основної гармоніки випрямляча; низькочастотних гармонік, які викликаються несиметрією живильної мережі і власною несиметрією випрямної установки; гармонік, що виникають в результаті биття. Одержані величини коефіцієнта подавлення: $f=50\text{Гц}$, $K_{\text{п}}=9,435$; $f=50\text{Гц}$, $f=100\text{Гц}$, $K_{\text{п}}=5,225$; $f=300\text{Гц}$, $K_{\text{п}}=3,158$.

7. Вперше показана ефективність регулювання амплітуди основної гармоніки випрямної установки в замкнутій структурі з селективним зворотнім зв'язком. Одержано величину коефіцієнта подавлення гармоніки $f=300\text{Гц}$, що складає $K_{\text{п}}=10,26$.

8. Запропоновано комбінований згладжуючий фільтр з адаптивним зворотнім зв'язком по контуру коефіцієнта підсилення, який забезпечує інваріантність амплітуди змінної складової вихідної напруги тягової підстанції до змін параметрів живильної мережі і навантаження. Коефіцієнт фільтрації змінної складової, що визначається основною гармонікою змінної складової, $K_{\text{ф}} > 10$.

Дана розробка захищена патентом України № 94338, МПК Н02М 1/14 (2006.01).

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертації**

1. Компенсация реактивной мощности трехфазного управляемого выпрямителя / В.Г. Ягуп, Е.Я. Ивакина, М.А. Литвин [и др.] // Світлотехніка та електроенергетика: міжнародний науково-технічний журнал. –Харків, 2009. – №2. – С. 44 – 49.
2. Режимы работы низкочастотного корректора коэффициента мощности / В.Г. Ягуп, Е.Я. Ивакина, М.А. Литвин [и др.] // Світлотехніка та електроенергетика: міжнародний науково-технічний журнал. – Харків, 2009. – №1. – С. 56 – 60.
3. Щербак Я.В. Улучшение электромагнитной совместимости тяговой подстанции городского электрического транспорта / Я.В.Щербак, В.Г.Ягуп, Е.Я.Ивакина // Комунальне Господарство міст: наук.-техн. зб./ Хар. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків, 2011.– С. 236-241. – (Серія: Технічні науки та архітектура; вип.97).
4. Ягуп В.Г. Энергетические характеристики тяговой подстанции постоянного тока при несимметрии питающей сети / В.Г. Ягуп, Е.Я. Ивакина // Світлотехніка та електроенергетика: міжнародний науково-технічний журнал. – Харків, 2011. – С.67-71.
5. Ягуп В.Г. Анализ частотных характеристик силового комбинированного активного фильтра тяговой подстанции / В.Г. Ягуп, Е.Я. Ивакина // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. пр./ Дон. держ. машинобуд. акад. –Краматорськ, 2012р. – №4 . – С. 109-114.
6. Івакіна К.Я. Аналіз електромагнітних процесів випрямляча з широтно-імпульсною модуляцією /К.Я.Івакіна// Вісник Вінницького політехнічного інституту. –Вінниця, 2013. –№ 6. – С. 65-67.
7. Ивакина Е.Я. Анализ динамических процессов системы автоматического регулирования напряжения преобразователя с ШИМ / Е.Я. Ивакина // Збірник наукових праць української державної академії залізничного транспорту. – Харків, 2013. – Вип. 142. – С. 151-156.
8. Щербак Я.В. Динамические характеристики выпрямителя с широтно-импульсной модуляцией / Я.В. Щербак, Е.Я. Ивакина // Технічна електродинаміка: наук.-приклад. журнал/ Ін-т електрод. НАН України. – Київ, 2014. – №3, – С. 47-51.
9. Ягуп В. Г. Анализ энергетических показателей тягового выпрямителя с широтно-импульсным регулированием. / В. Г. Ягуп, Е.Я. Ивакина, Е. В. Ягуп // Збірник наукових праць української державної академії залізничного транспорту. – Харків, 2014. – Вип. 143. – С. 169-176.
10. Пат. 94338 Україна, МПК H02M 1/14 (2006.01). Пристрій для компенсації пульсацій напруги/ Івакіна К.Я., Щербак Я.В., Слободчиков І.В.; заявник та власник Укр. держ. акад. залізн. тр –ту. – № а 2010 01641; заявл. 16.02.2010; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8.

Опубліковані праці апробаційного характеру

1. Компенсация реактивной мощности трехфазного управляемого выпрямителя: материалы междунар. научн.-техн. интернет- конф. [«Новейшие технологии в электроэнергетике»], (Харьков, март 2009р.). – Х.: ХНАМГ, 2009. – С. 81-82.

2. Режимы работы низкочастотного корректора коэффициента мощности: материалы междунар. научн.-техн. интернет -конф. [«Новейшие технологии в электроэнергетике»], (Харьков, март 2009р.). – Х.: ХНАМГ, 2009. – С. 84-86.

3. Улучшение электромагнитной совместимости тяговой подстанции городского электрического транспорта: материалы III междунар. научн.-техн. интернет - конф. [«Новейшие технологии в электроэнергетике»], (Харьков, март 2010 р.). – Х.: ХНАМГ, 2010. – С. 86-87.

4. Влияние несимметрии питающих напряжений на гармонический состав выходного напряжения тяговой подстанции с вольтодобавочным преобразователем: I всеукраїнська науково-технічна конференція викладачів, аспірантів і студентів [« Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів»], (Донецьк, 18-19 жовтня 2012 р. Збір. наукових праць). –Д.: ДонНТУ, 2012, – С. 135-136.

5. Статические и динамические характеристики выпрямительного агрегата с вольтодобавочным преобразователем: материалы IV междунар. научн.-техн. интернет- конф. [«Новейшие технологии в электроэнергетике»], (Харьков, 1-25 ноября 2012 р.). – Х.: ХНАМГ, 2012. – С. 59-60.

6. Анализ электромагнитных процессов выпрямителей с широтно-импульсной модуляцией: матеріали II міжнар. наук.-техн. конф. [«Оптимальное керування електроустановками»], (Вінниця, 22-24 жовтня 2013р.). –В.:ВНТУ, 2013. – 45 с.

Анотація

Івакіна К. Я. Підвищення якості електричної енергії тягової підстанції постійного струму в замкнутих структурах. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси і системи. Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Харків, 2014.

Дисертаційна робота присвячена покращенню якості електричної енергії тягової підстанції постійного струму шляхом застосування спеціальних замкнутих систем автоматичного регулювання для стабілізації та зменшення амплітуд гармонік вихідної напруги.

У роботі запропоновано застосування в складі випрямної установки вольтодобавочного перетворювача побудованого на базі випрямляча, управління яким для розширення смуги пропускання виконується за допомогою ШІМ. Встановлено, що застосування ШІМ підвищує енергетичні характеристики вольтодобавочного перетворювача в порівнянні з фазовим керуванням. Отримано імпульсну

модель вольтододатного перетворювача з ШІМ і аналітичні залежності, що описують його статичні та динамічні характеристики. Показано, що під дією пульсаційної складової вихідної напруги випрямляча вольтододатний перетворювач з ШІМ набуває властивості динамічної ланки зі змінними параметрами. В той же час, компенсаційна дія фактора пульсацій дозволяє описувати динамічні процеси, застосовуючи усереднені значення статичного коефіцієнта передачі і фактора пульсацій. Показана, що реалізація в замкнутій системі автоматичного регулювання вихідної напруги вольтододатного перетворювача з ШІМ умов процесу кінцевої тривалості дозволяє ефективно впливати на гармонійні складові, що лежать в її смузі пропускання. Запропонована адаптивна система активної фільтрації дозволяє отримати інваріантність величини пульсацій вихідної напруги випрямної установки до зовнішніх і внутрішніх збурень. Отримано вираз, що дозволяє визначати сталу часу LC - фільтра за необхідною величиною заважаючої напруги.

Розроблені імітаційні моделі дозволяють виконати проектування реальних підсистем випрямної установки.

Ключові слова: Випрямна установка, вольтододатний перетворювач з ШІМ, якість електричної енергії, гармонійні складові, імпульсна модель, замкнута система автоматичного регулювання, фактор пульсацій, статичний коефіцієнт передачі, процес кінцевої тривалості.

Аннотація

Ивакина Е. Я. Повышение качества электрической энергии тяговой подстанции постоянного тока в замкнутых структурах.- Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, Харьков, 2014.

Диссертационная работа посвящена улучшению качества электрической энергии тяговой подстанции постоянного тока путем применения специальных замкнутых систем автоматического регулирования для стабилизации и уменьшения амплитуд гармоник выходного напряжения.

В работе предложено применение в составе выпрямительной установки вольтодобавочного преобразователя, построенного на базе выпрямителя, управление которым для расширения полосы пропускания выполняется с помощью ШИМ. Установлено, что применение ШИМ повышает энергетические характеристики вольтодобавочного преобразователя по сравнению с фазовым управлением. Получены импульсная модель вольтодобавочного преобразователя с ШИМ и аналитические зависимости, описывающие его статические и динамические характеристики. Показано, что под действием пульсационной составляющей выходного напряжения выпрямителя вольтодобавочный преобразователь с ШИМ приобретает свойства динамического звена с переменными параметрами. В тоже время выравнивающее действие фактора пульсацій позволяет описывать динамические процессы, применяя усредненные значения

статического коэффициента передачи и фактора пульсаций. Показано, что реализация в замкнутой системе автоматического регулирования выходного напряжения вольтодобавочного преобразователя с ШИМ условий процесса конечной длительности позволяет эффективно воздействовать на гармонические составляющие, лежащие в ее полосе пропускания. Предложенная адаптивная система активной фильтрации позволяет получить инвариантность величины пульсаций выходного напряжения выпрямительной установки к внешним и внутренним возмущениям. Получено выражение, позволяющее определять постоянную времени LC - фильтра по необходимой величине мешающего напряжения.

Разработанные имитационные модели позволяют выполнить проектирование реальных подсистем выпрямительной установки.

Ключевые слова: выпрямительная установка, вольтодобавочный преобразователь с ШИМ, качество электрической энергии, гармонические составляющие, импульсная модель, замкнутая система автоматического регулирования, фактор пульсаций, статический коэффициент передачи, процесс конечной длительности.

Summary

Ivakina K. Y. Improvement of electric power quality at direct current traction substation in closed structures.- Manuscript.

The dissertation for the scientific degree of Candidate of Science (Engineering) on specialty 05.09.03 - Electrical equipment and systems. Petro Vasilenko Kharkov National technical university of agriculture. - Kharkov, 2014.

The thesis is devoted to improvement of electric power quality of DC traction substation by using selected closed automatic control systems to stabilize and reduce amplitudes of the harmonics in output voltage.

The paper proposed to use a rectifier unit composed of booster converter based on a control rectifier which performed using PWM for bandwidth extension. The established that the use of the PWM improves energy performance of booster converter compared with phase control. The pulse model of booster converter with PWM and analytical dependences describing its static and dynamic characteristics are found. It is shown that under the action of the pulsation component of the output voltage booster rectifier with PWM is a dynamic link with variable parameters. At the same time, equalizing factor fluctuations allows to describe dynamic processes applying the average values of the static gain and ripple factor. The implementation of finite duration process conditions in closed automatic control system of the booster converter with PWM can effectively influence on the harmonic components lying in its bandwidth. The proposed adaptive system of the active filtering allows to get the invariance of the output ripple voltage rectifier unit to internal and external perturbations. An expression is obtained, allowing to define the value of the time constant of the filter on the appropriate value LC - filter interfering voltage.

Simulation models developed allow to execute designing the real subsystems of rectifier unit.

Keywords: rectifier unit, booster PWM converter, power quality, harmonics, pulse model, closed control system, factor of pulsation, static transfer coefficient, finite duration process.

Відповідальний за випуск Левкін А.В.

Комп'ютерний набір та верстка
Підп. до друку 12.09.2014р.
Формат 60x84 1/16. Папір офсетн.
Умовн. арк. Наклад 100 прим.
Замовлення №
Різограф TR 1510 №80654645

Навчально – методичний відділ Харківського національного технічного
університету сільського господарства імені Петра Василенка

Адреси редакції та поліграф підприємства: 61002, м. Харків,
вул. Артема, 44, кім. 101.