

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**БОЖКО Володимир Вячеславович**

УДК 621. 331: 621. 314. 632.

**СТАБІЛІЗУЮЧІ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІ АГРЕГАТИ  
ВОЛЬТОДОДАТКОВОГО ТИПУ ПІДВИЩЕНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЛЯ  
ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ  
ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному підприємстві «Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України» (Харківська філія), м. Харків. Міністерства транспорту і зв'язку України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Хворост Микола Васильович,**  
Харківська національна академія міського господарства, декан заочного факультету

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Щербак Яків Васильович,**  
Українська державна академія залізничного транспорту, завідувачий кафедри «Системи електричної тяги»

кандидат технічних наук, доцент  
**Тугай Дмитро Васильович,**  
Харківська національна академія міського господарства, доцент кафедри «Загальна та теоретична електротехніка»

Захист відбудеться 20 квітня 2011 р. о 12<sup>30</sup> 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 ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий « 17 » березня 2011 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Любарський Б.Г.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Останнім часом на електрифікованих залізницях постійного струму впроваджуються сучасні технічні засоби тягового електропостачання на базі керованих перетворювачів. І тут, як найбільш проста, дешева та надійна схема, зарекомендувала себе дванадцятипульсна схема з фазовим регулюванням. Однак до головних недоліків тиристорних перетворювачів, що виконані за даною схемою випрямлення відноситься порівняно високий рівень спотворення живлячої напруги, достатньо велика складова реактивної потужності, що споживається, а також підвищений вміст гармонічних складових у випрямленій напрузі при її регулюванні. Сучасні дванадцятипульсні випрямлячі недостатньо повно вирішують задачі стосовно регулювання рівня напруги на тягових шинах підстанції з метою стабілізації її на струмоприймачах електрорухомого складу, швидкодіючого безконтактного захисту при коротких замиканнях у тяговій мережі, доведення якості електроенергії в живлячій і тяговій мережах до рівня Євростандартів, зменшення установленної потужності вихідних фільтрів і т.п.

Перспективним є компромісний варіант перетворювального агрегату вольтододааткового типу для підвищення ефективності перетворювачів тягових підстанцій постійного струму напруги 3,3 кВ, при якому на новій напівпровідниковій елементній базі виконується широтно-регульований вольтододаатковий перетворювач з діапазоном регулювання порядку  $\pm 20\%$  і відповідною встановленою потужністю, а основна частина потужності постачається традиційним перетворювачем на діодах або одноопераційних тиристорах. Така система забезпечує не тільки підвищення якості електроенергії, що споживається та стабілізацію напруги на шинах тягових підстанцій але й вирішує задачі стабілізації напруги на струмоприймачах електрорухомого складу; фільтрацію низькочастотних неканонічних і канонічних вихідних гармонік з метою зменшення установленної потужності або повної відмови від використання громіздких дроселів фільтрів та резонансних контурів; швидкодіючий захист при коротких замиканнях у тяговій мережі при реалізації бездугового відключення комутаційних апаратів. Таким чином подальше підвищення ефективності перетворювальних агрегатів вольтододааткового типу для тягових підстанцій постійного струму залізниць України є актуальною темою, яка визначила напрямок дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася у Державному підприємстві «Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України» (Харківська філія) у відповідності до планів науково-дослідних робіт за завданням „Укрзалізниці”, за темами: „Розробка технічних вимог до перетворювальних агрегатів на базі дванадцятипульсних напівкеруваних випрямлячів з реверсивним вольтододаатком для тягових підстанцій постійного струму із стабілізованою напругою і безконтактним захистом при коротких замиканнях у тяговій мережі” (ДР № 0210U006360); „Розроблення технічної документації на дослідний зразок дванадцятипульсового перетворювального агрегату з

реверсним вольтододатком і безконтактним захистом від короткого замикання для тягових підстанцій постійного струму” (ДР № 0210U006359); „Розробка структури та технічних вимог до системи підсилення електроживлення контактної мережі постійного струму в міжпідстанційних зонах електрифікованих залізниць України” (ДР № 0210U006361); „Дослідження технічного стану пристроїв тягового електропостачання та техніко-економічне обґрунтування можливих варіантів проведення модернізації при організації швидкісного руху на Кримському напрямку” (ДР № 0210U006362). Де здобувач був виконавцем окремих розділів та етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Мета полягає у підвищенні ефективності стабілізуючих перетворювальних агрегатів тягових підстанцій постійного струму напруги 3,3 кВ, що складаються з фазорегульованих випрямлячів та реверсивних широтно-регульованих вольтододаткових перетворювачів на двоквADRантних двоопераційних ключах знакозмінної напруги з вузлом короткочасного струмообмеження.

Для досягнення цієї мети поставлені наступні задачі дослідження:

- провести аналіз існуючих систем тягового електропостачання постійного струму напруги 3,3 кВ та зробити висновки що до їх вдосконалення;
- вдосконалити силову схему стабілізуючого перетворювального агрегату для тягового електропостачання постійного струму напруги 3,3 кВ;
- розробити спосіб керування реверсивним вольтододатковим перетворювачем на двоквADRантних двоопераційних ключах знакозмінної напруги, що забезпечує активну фільтрацію вхідних та вихідних гармонік напруги при збереженні високих енергетичних та масогабаритних показників;
- запропонувати ефективну схему вузла короткочасного струмообмеження та швидкодіючу систему безконтактного захисту при коротких замиканнях у тяговій мережі для реалізації бездугового відключення комутаційних апаратів та забезпечення м'яких пускових процесів;
- створити аналітичну та імітаційну моделі реверсивного вольтододаткового перетворювача на двоквADRантних двоопераційних ключах знакозмінної напруги, що приєднується до випрямляча тягової підстанції, та розробити методику синтезу регуляторів вихідних параметрів системи;
- шляхом імітаційного моделювання провести комплекс експериментів для перевірки працездатності запропонованих способів керування вольтододатковим перетворювачем з вузлом короткочасного струмообмеження.

*Об'єкт дослідження* – процес перетворення енергії в тяговій підстанції постійного струму з реверсивним широтно-регульованим вольтододатковим перетворювачем на двоквADRантних двоопераційних ключах знакозмінної напруги.

*Предмет дослідження* – бездросельний регульований перетворювальний агрегат з реверсивним широтно-регульованим вольтододатковим перетворювачем на двоквADRантних двоопераційних ключах знакозмінної напруги та вузлом короткочасного струмообмеження.

*Методи дослідження.* При вирішенні поставлених задач використовувалися методи: теорія електричних ланцюгів, метод гармонійного аналізу, метод еквівалентних опорів при синтезі системи автоматичного регулювання та розробці аналітичної моделі перетворювача з регуляторами вихідних параметрів; імітаційне моделювання для дослідження способів керування вольтододатковим перетворювачем.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше з позиції сучасних розробок реалізовані підходи по підвищенню ефективності стабілізуючих перетворювальних агрегатів тягових підстанцій, що побудовані на основі послідовного з'єднання реверсивного широтно-регульованого вольтододаткового перетворювача з вузлом короткочасного струмообмеження та фазорегульованим основним випрямлячем, шляхом реалізації позитивних властивостей в частині забезпечення:

- \* заданого рівня напруги на струмоприймачах електрорухомого складу при коефіцієнті потужності трифазної мережі живлення не нижчому за 0,98;
- \* подавлення гармонічних складових (канонічного і неканонічного порядку) випрямленої напруги, включаючи дванадцятку гармоніку при зменшенні в рази маси фільтрового устаткування;
- \* обмеження аварійних струмів перетворювальних агрегатів на рівні  $1,2 \div 1,3$  від допустимого робочого струму в номінальному режимі при коротких замиканнях на боці тягової мережі;
- \* безконтактного захисту та покращення якості регулювання вихідної напруги перетворювальних агрегатів при перехідних процесах;

- розвинуто спосіб керування реверсивним широтно-регульованим вольтододатковим перетворювачем, який реалізує функцію активної фільтрації на тягових підстанціях постійного струму, що базується на виділенні інтервалів з максимальними струмами завдання в одній з фаз, на яких одна з двох трифазних груп ключів зовсім не комутує, що дозволяє знизити в рази частоту перемикання ключів по відношенню до частоти широтно імпульсної модуляції;

- вперше розроблено швидкодіючу систему безконтактного захисту силового устаткування тягової підстанції постійного струму при коротких замиканнях у тяговій мережі, яка завдяки використанню паралельного вузла короткочасного струмообмеження, що підключається і відключається до вольтододаткового перетворювача, дозволяє не тільки обмежувати величину аварійного струму на рівні  $1,2 \div 1,3$  від допустимого робочого струму в номінальному режимі, але у сукупності із використанням регулювання основного дванадцятипульсного випрямляча реалізувати майже бездугове відключення комутаційних апаратів та забезпечити м'якість пускових процесів (патент України на корисну модель №51917);

- вперше створені аналітична та імітаційна моделі роботи реверсивного вольтододаткового перетворювача на двоквADRантних двоопераційних ключах знакозмінної напруги;

- на основі аналітичної моделі розроблена методика синтезу регуляторів вихідних параметрів, що дозволяє максимізувати коефіцієнти подавлення

окремих гармонік та отримати перехідні процеси у вольтододатковому перетворювачі, які наближаються до аперіодичних.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати дисертації рекомендуються для практичного використання при проектуванні нових тягових підстанцій постійного струму напруги 3,3 кВ та модернізації обладнання тягових підстанцій, що експлуатуються, для забезпечення безперервного пропуску поїздів з встановленими ваговими нормами, швидкостями, інтервалами між ними з дотриманням розмірів руху, що вимагається.

Результати роботи використані: в ДП ДНДЦ УЗ (м. Київ) в процесі наукових розробок при модернізації та проектуванні високоефективних тягових підстанцій постійного струму, що підтверджено актом про впровадження від 26.08.2010 р.; в Головному Управлінні електрифікації та електропостачання Укрзалізниці (м. Київ) при розробці технічної документації на дослідний зразок дванадцятипульсового перетворювального агрегату з реверсним вольтододатком і безконтактним захистом від короткого замикання для тягових підстанцій постійного струму, що підтверджено актом про впровадження від 20.09.2010 р.; в КП «Київський метрополітен» (м. Київ) для підвищення енергетичних показників і якості електроенергії живлячої та тягової мереж, що підтверджено актом про впровадження від 24.09.2010 р.

**Особистий внесок здобувача** в розробку наукових результатів, що подаються до захисту: створення методу розрахунку, а також отримання розрахункових формул для системи керування вольтододатковим перетворювачем; методика синтезу регуляторів вихідних параметрів системи; аналіз зміни величин гармонічних складових у випрямленій напрузі, отримання розрахункових співвідношень та графіків; дослідження впливу несиметрії струмів живлячої мережі на вхідні струми випрямлячів; розробка комп'ютерних моделей роботи вольтододаткового перетворювача при використанні середовища Matlab.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати роботи докладалися на: XIII Міжнародній науково-практичній конференції „Інформаційні технології” (Харків, 2005р.); LXVI Міжнародній науково-практичній конференції „Проблеми и перспективы развития железнодорожного транспорта” (Дніпропетровськ, 2006р.); I Міжнародній науково-практичній конференції „Электрификация железнодорожного транспорта” Трансэлектро (Місхор, 2007р.); III та IV Міжнародній науково-практичній конференції „Електрифікація транспорту” Трансэлектро” (Місхор, 2009, 2010рр.).

**Публікації.** Основні результати досліджень опубліковані в 13 наукових працях, серед них 11 праць у наукових фахових виданнях ВАК України, 1 патент України.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, 5 додатків, списку використаних літературних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 226 сторінок: з них 68 рисунків; 21 рисунок на 16 окремих сторінках; 5 таблиць по тексту; 5 додатків на 45 сторінках; список використаних літературних джерел з 114 найменувань на 12 сторінках.

5  
**ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертації, зв'язок з науковими темами і програмами, сформульовано мету і задачі, визначено методи, об'єкт та предмет досліджень, наукову новизну і практичне значення роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих систем тягового електропостачання постійного струму. Визначені основні вимоги до системи тягового електропостачання постійного струму підвищеної ефективності. Встановлено, що перспективною є система підвищення ефективності тягових підстанцій постійного струму на базі перетворювального агрегата вольтододадового типу, при якому на новій напівпровідниковій елементній базі виконується широтно-регульований вольтододадковий перетворювач з діапазоном регулювання порядку  $\pm 20\%$  і відповідною встановленою потужністю, а основна частина потужності постачається традиційним некерованим перетворювачем на діодах або фазокерованих на одноопераційних тиристорах. На підставі аналізу сформульовано напрямки вирішення поставлених задач.

**Другий розділ** присвячено розробці схеми широтно-регульованого вольтододадового перетворювача з вузлом короткочасного струмообмеження та побудові вхідного фільтра. Спрощена силова схема системи, приведена на рис. 1.

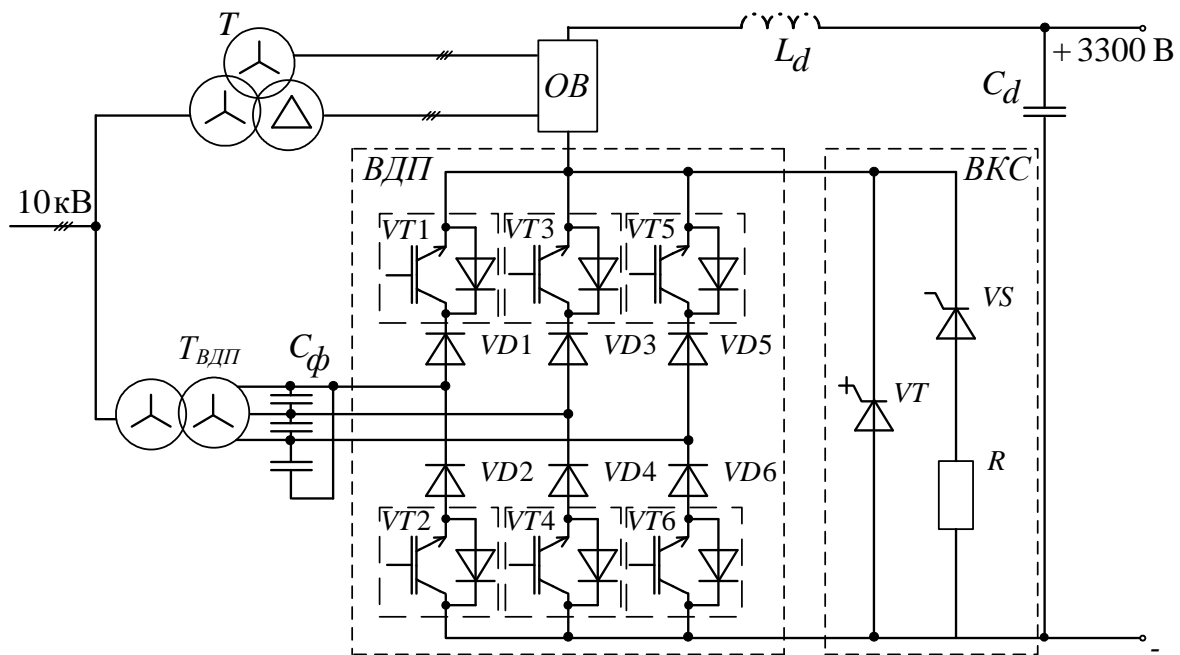


Рис. 1. Спрощена силова схема реверсивного широтно-регульованого вольтододадового перетворювача на двоквадрантних двоопераційних ключах знакозмінної напруги з вузлом короткочасного струмообмеження, що приєднані до основного дванадцятипульсного випрямляча: *OB* – основний фазокерований випрямляч; *T* – трансформатор *OB*; *L<sub>d</sub>C<sub>d</sub>* – вихідний фільтр; *T<sub>VDP</sub>* – трансформатор вольтододадового перетворювача; *ВДП* – вольтододадковий перетворювач; *C<sub>φ</sub>* – вхідний фільтр *ВДП*; *VT1-VT6* – транзистори *ВДП*; *VD1-VD6* – діоди; *ВКС* – вузол короткочасного струмообмеження, *VT* – шунтуючий керований ключ; *VS* – тиристор вузла *ВКС*; *R* – струмообмежуючий резистор.

Визначено, що вхідним фільтром ВДП може бути  $LC$ -фільтр, в якості індуктивності якого використовується індуктивність розсіювання перетворювального трансформатора. Демпфування такого фільтра з метою подавлення резонансних явищ може бути забезпечене як силовими засобами, шляхом підключення до конденсаторів вхідного фільтра ВДП демпфуючих  $RC$ -ланцюгів, так і засобами управління, шляхом використання замкненої структури управління комутатора ВДП, що реалізує за рахунок введення зворотнього зв'язку по напрузі на конденсаторах фільтра, еквівалентну провідність, яка підключається паралельно цим конденсаторам. При виконанні демпфування за допомогою силових елементів вплив неканонічних гармонік веде до зниження коефіцієнта корисної дії. При реалізації ж демпфуючої ланки за допомогою управління, роль цього фактору суттєво зменшується.

У **третьому розділі** розвинуто спосіб керування реверсивним широтно-регульованим ВДП на двоквadrантних двоопераційних ключах знакозмінної напруги (ДДКЗН) тягових підстанцій постійного струму, що базується на виділенні інтервалів з максимальними струмами завдання в одній з фаз, на яких одна з двох трифазних груп ключів зовсім не комутує, що дозволяє знизити у двічі частоту перемикання ключів по відношенню до частоти широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) рис. 2.

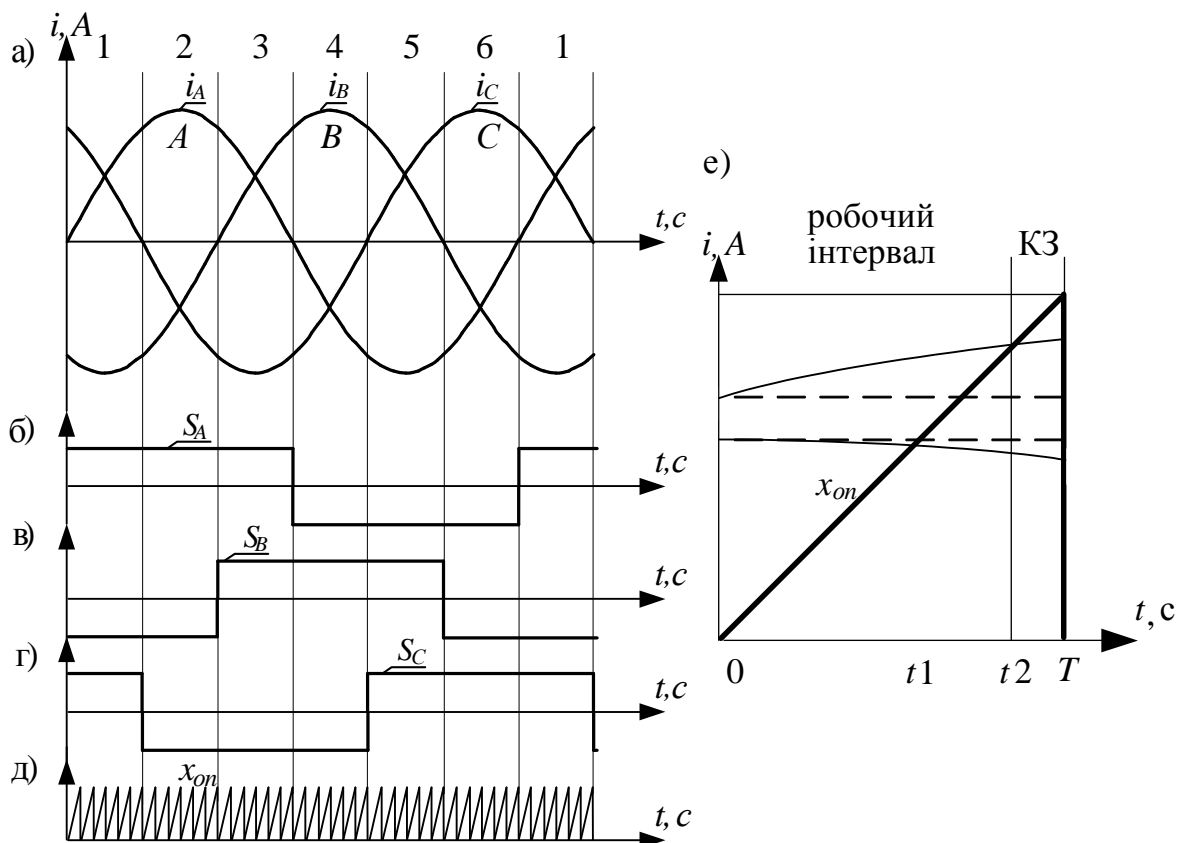


Рис. 2. Пояснення структурної системи алгоритму управління ВДП:

- а) - трифазна система струмів завдання; б - г) - функції знаку системи струмів;  
 д) – опорний сигнал при частоті ШІМ 1800 Гц; е) - визначення відносного часу на періоді ШІМ.



При цьому незалежне формування сигналу завдання по струму рис. 2. *a* дозволяє порівняно легко формувати на кожному структурному інтервалі (інтервалі пульсності) ціле число тактів ШІМ і тим самим, виключити примусові комутації ключів ВДП на границях структурних інтервалів та забезпечити половину виключень природно, чим ще в два рази знизити частоту перемикавання ключів і отримати при частоті ШІМ 1800 Гц частоту перемикавання ключів 450 Гц.

У відповідності до цієї системи керування у фазі з максимальним струмом завдання ключ замкнений на всьому структурному інтервалі, а перемикавання відбуваються тільки у іншій групі ключів. При допущенні про безкінечну частоту ШІМ, за допомогою даного алгоритма забезпечуються синусоїдальні струми у фазах, а при кінцевій частоті вони наближаються до синусоїдальних.

Комутаційні функції ключів (1 - ключ замкнений, 0 - ключ розімкнений) формуються шляхом порівняння лінійного опорного сигналу  $x_{on}$  одиничної амплітуди з керуючими сигналами (рис. 2, *ж*), які дорівнюють відносним сигналам завдання по струму. Якщо сигнали завдання формуються в замкненій системі, то збіг граничних точок тактів ШІМ і структурних інтервалів забезпечується при введенні дискретного фіксатора сигналів завдання, що діє із частотою ШІМ. При такій фіксації керуючі сигнали змінюються тільки на границях тактів ШІМ, а усередині такту постійні (пунктир на рисунку 2, *ж*).

Розроблена система регулювання ВДП складається з однофазного і трифазного каналів. Однофазний канал забезпечує регулювання вихідних параметрів ВДП і функції активного фільтра вихідної напруги перетворювача, що при частоті ШІМ 1800 Гц дозволяє реалізувати фільтрацію неканонічних гармонік системи, включаючи шосту, і канонічних, включаючи дванадцятую. Трифазний канал побудовано по принципу формування  $R_y C_y$ -ланцюга, що включено паралельно конденсатору  $C_\phi$  вхідного фільтра і служить для формування реактивної складової первинного струму ВДП з метою забезпечення близького до одиниці коефіцієнта потужності живлячої мережі, а також для корекції динамічних властивостей його вхідного фільтра.

Визначено, що враховуючи наявність вхідного LC-фільтра ВДП, який забезпечує подавлення гармонік з частотою ШІМ, коефіцієнт потужності можна довести до 0,99. При реалізації коефіцієнта потужності живлячої мережі на рівні 0,98, що відповідає вимогам Євростандартів на якість електроенергії, яка споживається, установлена потужність ВДП не збільшується по відношенню до потужності ВДП, що забезпечує тільки функцію стабілізації напруги.

Розроблено лінійну модель з імпульсним джерелом напруги в ланцюзі силового фільтра, що дозволило застосувати при синтезі регуляторів метод еквівалентних опорів та врахувати усі обмеження на величини коефіцієнтів підсилення. Основою моделі являється модель ВДП, що заміщено простим понижуючим широтно-імпульсним перетворювачем. На рис. 3 наведена лінійна імпульсна модель перетворювача разом з регулятором вихідних параметрів за умови відсутності окремого дроселя у вихідному фільтрі.

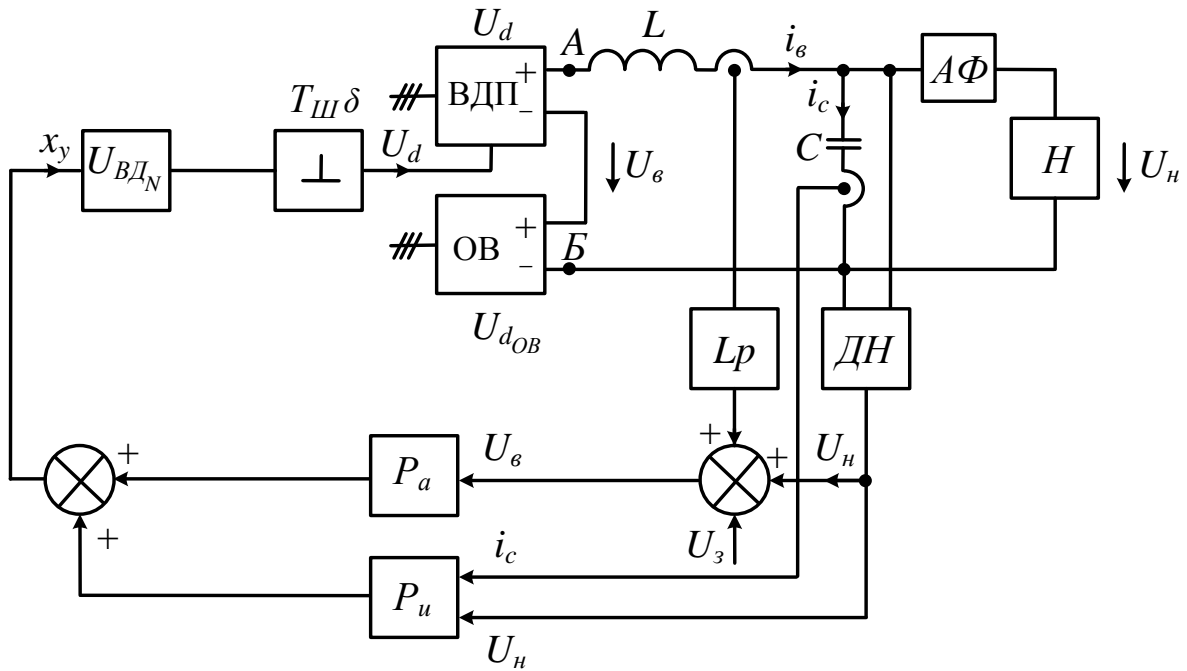


Рис. 3. Лінійна імпульсна модель з регулятором вихідних параметрів:  $U_d$  – кероване джерело напруги;  $U_{d_{OB}}$  – джерело напруги, що враховує ОБ;  $АФ$  – малопотужний послідовний активний фільтр;  $LC$  – вихідний фільтр у якому роль дроселя виконує індуктивність трансформатора ОБ;  $L_p$  – передавальна функція, що забезпечує вимірювання напруги проміж точками  $АВ$ ;  $U_{ВДН}$  – номінальна вихідна напруга ВДП;  $T_{ШД}$  – періодична дельта функція з імпульсами на періоді ШМ;  $x_y$  – управляючий сигнал;  $U_3$  – сигнал завдання;  $U_e$  – сумарна напруга, що створюється ОБ і ВДП;  $i_c$  – струм конденсатора;  $P_a$  – регулятор активного фільтра з паралельним з'єднанням вузькосмугових фільтрів;  $P_u$  – регулятор вихідної напруги;  $ДН$  – датчик напруги;  $H$  – навантаження;  $U_n$  – напруга навантаження.

Кероване джерело напруги  $U_d$  враховує дію ВДП на вихідний електричний ланцюг, який складається з вихідного  $LC$ -фільтра та еквівалентного навантаження  $H$ . Джерело напруги  $U_{d_{OB}}$  враховує дію основного випрямляча. Для приєднання регулятора вихідної напруги  $P_u$  використовується датчик напруги навантаження  $ДН$ , а для управління широтно-імпульсним перетворювачем з резонансним вихідним фільтром типовим рішенням є пропорційно-інтегро-диференціальний (ПІД) регулятор. Регулятор активного фільтра складається з набору вузькосмугових фільтрів, що налаштовано на окремі гармоніки.

При синтезі регуляторів в каналі активної фільтрації отримано співвідношення для коефіцієнтів підсилення їх ланцюгів

$$K_D + K_{D_s} + K_{II} \frac{T_{Ш}}{2} \leq \frac{2LC}{T_{Ш}}, \quad (1)$$

де  $K_D$  – коефіцієнт підсилення  $D$ -ланки регулятора;  $K_{D_3}$  – коефіцієнт, що враховує активний фільтр ВДП;  $K_{II}$  – коефіцієнт підсилення  $II$ -ланки регулятора;  $T_{III}$  – період ШІМ.

З використанням запропонованої методики синтезу регуляторів вихідних параметрів системи отримано максимум інтегрального коефіцієнту подавлення гармонійних складових вихідної напруги

$$K_{D_3} = k_{III} \frac{\omega_c LC}{Q} \sum_{k=2,4,6,12\dots} k K_k = 1,44 \cdot 10^{-4}, \quad (2)$$

де  $k_{III}$  – коефіцієнт підсилення комутатора;  $k$  – номер гармоніки;  $Q$  – добротність фільтру;  $K_k$  – коефіцієнт підсилення послідовної пропорційної ланки на частоті  $k$ -ї гармоніки.

При синтезі регулятора вихідної напруги отримано коефіцієнт підсилення  $I$ -ланки

$$K_I \leq K_D \omega_\partial^2, \quad (3)$$

де  $\omega_\partial = \sqrt{\frac{1+K_{II}}{LC}}$  – частота резонансних автоколивань.

Проведений аналіз дозволив зробити висновок, що можна виключити з вихідного фільтра традиційні резонансні кола та дросель фільтра, а в якості індуктивності фільтра при цьому достатньо використовувати власну індуктивність двох послідовних фаз живлячого трансформатора основного випрямляча. Традиційні функції дроселя, що полягають в обмеженні часу наростання струму при короткому замиканні (КЗ), приймає на себе ВКС.

Розроблена схема ВКС паралельного типу приведена на рис. 1. В робочому режимі ВКС не працює, баластний резистор  $R$  є відключеним тиристором  $VS$ . Тиристор  $VS$  вмикається тільки в аварійних і перехідних режимах.

Відомо, що при раптовому КЗ в тяговій мережі в схемі можуть виникати великі ударні струми, які змушують збільшувати як величину індуктивності дроселя  $L_d$  вихідного  $LC$ -фільтра перетворювача, так і запас по робочій індукції в осерді дроселя по відношенню до індукції насичення. Щоб не допустити протікання великих ударних струмів використовується ВКС.

Керування схемою в режимі КЗ реалізовано таким чином, що вона діє як релейний обмежувач струму. Для цього задано два пороги: робочий  $i_p$ , що не перевищує поріг аварійного струмообмеження  $i_{da}$ , а також гистерезис аварійного порога  $\Delta i_a$ , який приймаємо на рівні  $\Delta i_a = i_{da} - i_p$ . Якщо аварійний струм не досягає робочого  $i_p$ , то обмеження струму починає виконувати система керування тяговим перетворювачем. У випадку досягнення аварійним струмом порога аварійного струмообмеження, аварійний струм переводиться на

ВКС і він починає спадати через те, що в його коло введено обмежуючий резистор  $R$  на якому установлюється напруга  $U_R = R \cdot i_{da}$ . Коли струм знизиться нижче величини  $i_{da} - \Delta i$ , вмикається ключ  $VT$  і струм  $i_d$  починає знову зростати і т.п. Діаграми струму  $i_d$  і напруги на резисторі  $R$  наведені на рис. 4, а, б.

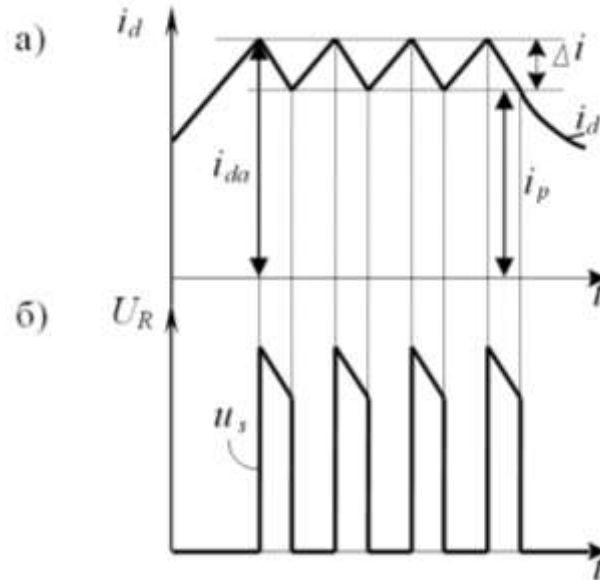


Рис. 4. Діаграма аварійного струму  $i_d$  (а) і напруги (б) на баластовому резисторі  $R$ .

Встановлено, що мінімальна необхідна маса активної частини баластового резистора при тривалості часу аварійного струмообмеження 0,1 сек, складає

$$m = \frac{K_T U_{dK} i_{da} t_K}{C_T \tau_{II}} \approx 20 \text{ кг} \quad (4)$$

де  $K_T = 0,24 \cdot 10^{-3}$  ккал/Дж;  $U_{dK}$  – напруга, що діє в зовнішньому ланцюгу при КЗ;  $t_K$  – час роботи ВКС;  $C_T = 0,1$  ккал/(кг·град) – питома теплоємність матеріалу резистора;  $\tau_{II} = 100^\circ \text{C}$  – допустимий перегрів.

Визначено, що встановлена потужність елементів ВКС є невеликою через те, що він вступає в дію короткочасно.

Доведено, що в режимі випрямлення напруги достатнім є 20% діапазон регулювання ВДП. В інверторному режимі діапазон регулювання необхідно збільшувати на 7÷10%, а основний перетворювач при цьому повинен виконуватися з фазовим керуванням на одноопераційних тиристорах. В силовій схемі має використовуватися безконтактний перемикач режимів роботи. Також запропоновано використання індуктивних безобмоточних снаберів ввімкнення і вимкнення з насичуючимся осердям для зменшення зворотніх (крізних) струмів (струмового перевантаження) напівпровідникових приладів, що дозволяє одержати прийнятні комутаційні втрати в ключах ВДП при частоті ШІМ 1800 Гц, яка є достатньою для реалізації основних функцій ВДП.

Четвертий розділ присвячено розробці комп'ютерних моделей і проведенню експериментальних досліджень режимів роботи стабілізуючого перетворювального агрегату вольтододааткового типу підвищеної ефективності з вузлом короточасного струмообмеження для тягового електропостачання постійного струму.

Отримані коефіцієнти подавлення  $K_{П}$  було перевірено на комп'ютерній імітаційній моделі. Результати співставлення отриманих значень коефіцієнтів подавлення, приведено на рис. 5.

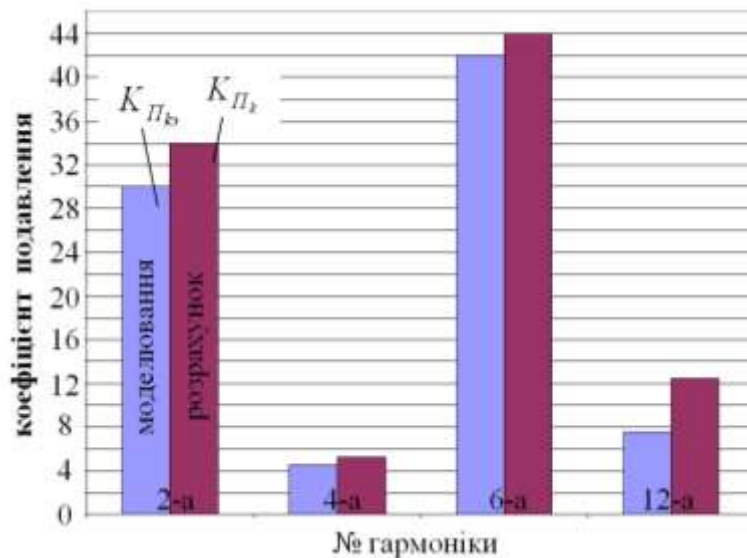


Рис. 5 Діаграма зіставлення коефіцієнтів подавлення для  $k$ -ї гармоніки.

За результатами співставлення коефіцієнтів подавлення, що отримано на імітаційній моделі  $K_{ПБ}$  з розрахунковими значеннями  $K_{Пк}$  визначено, що похибка має порядок 10% за винятком високочастотної 12-ї гармоніки, де фактичний коефіцієнт подавлення в 1,6 разів вищий за розрахунковий, що можна пояснити зміною коефіцієнта підсилення широтно-імпульсного модулятора під впливом пульсаційної складової сигналу зворотнього зв'язку. Величини коефіцієнтів подавлення в сталому режимі практично не залежать від струму навантаження  $i_d$ , що перевірялося до значень струму навантаження порядку 1% від номінального.

При проведенні цифрових експериментальних досліджень щодо якості подавлення гармонічних складових вихідної напруги, приймалися наступні додаткові умови:

- створювалася несиметрія напруги живлячої мережі (ЖМ) з коефіцієнтом несиметрії 2%, який є максимально допустимим відповідно міждержавного стандарту ГОСТ 13109-97, що дає в основному випрямлячі напругу другої гармоніки з амплітудою близькою до 60 В;
- створювалася 20%-ва різниця вторинних напруг (зірки і трикутника) перетворювального трансформатора  $T$  основного випрямляча, що дає напругу шостої гармоніки з амплітудою, близькою до 40 В.
- зменшувалась індуктивність вихідного  $L_d$  фільтра з  $4,6 \cdot 10^{-3}$  Гн до  $0,5 \cdot 10^{-3}$  Гн,

що відповідає повній відсутності окремого дроселя у фільтрі.

Отримані графіки залежності рівня напруги  $k$ -ї гармоніки у вихідній напрузі від коефіцієнта навантаження наведено на рис. 6.

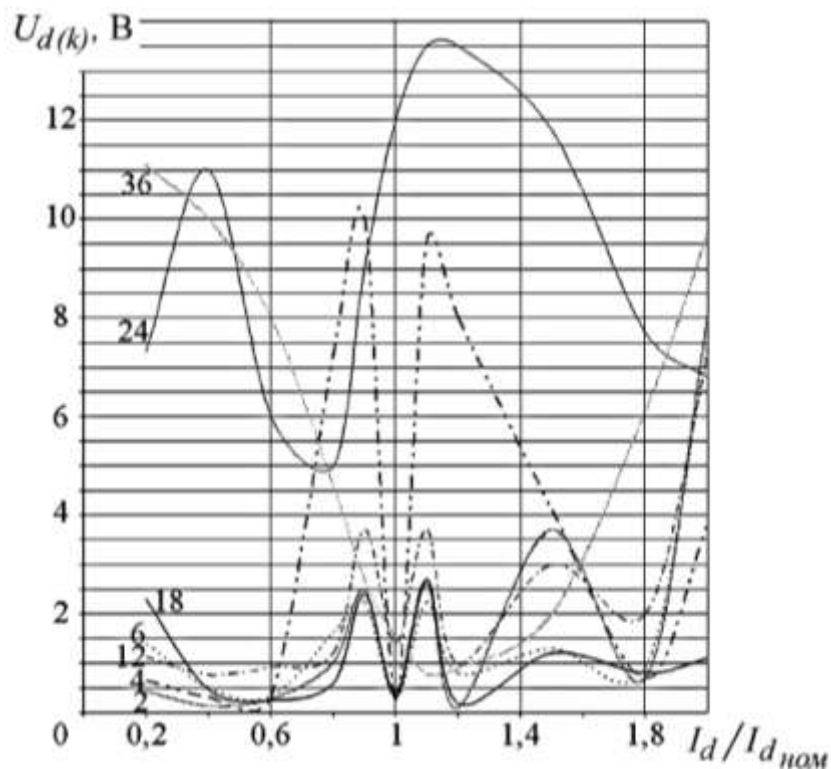


Рис. 6. Графіки залежності рівня напруги  $k$ -ї гармоніки від коефіцієнта навантаження.

В результаті цифрових експериментальних досліджень було виявлено, що при роботі ВДП в якості активного фільтра реалізовано подавлення неканонічних гармонік включаючи шосту, і канонічної дванадцятої, але також з'являються більш високі гармоніки та гармоніки з частотою ШІМ, для подавлення яких необхідно встановлювати малопотужний активний фільтр, щоб система вкладалася в норми по психофотометричній напрузі на рівні не вищому за 4 В. При роботі ВДП на ДДКЗН в сукупності з малопотужним активним фільтром отримано допустимий рівень психофотометричної напруги рис. 7.

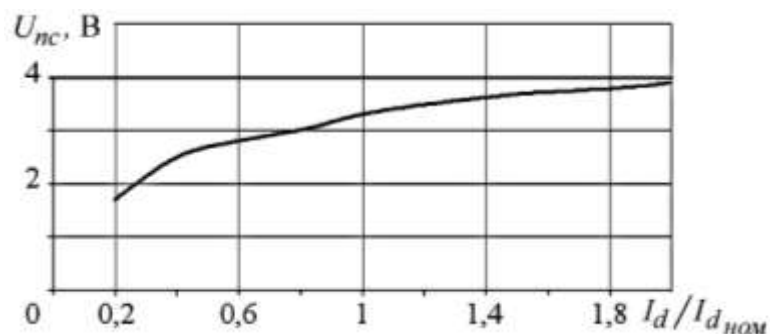


Рис. 7. Графік залежності психофотометричної напруги від коефіцієнта навантаження.

Графік стабілізованої вихідної напруги в режимі активної фільтрації, при номінальному навантаженні в сталому режимі приведено на рис. 8.

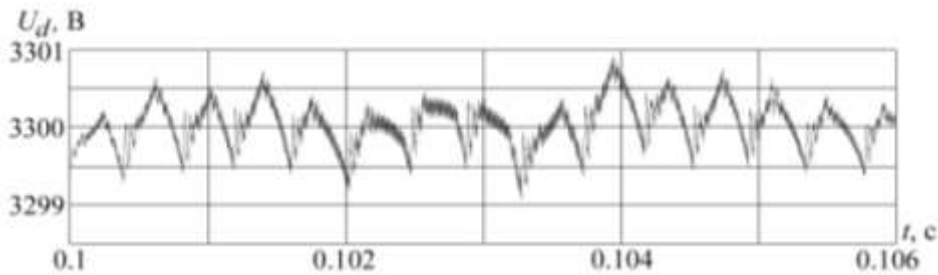


Рис. 8 Вихідна напруга системи в сталому режимі.

Подавлення неканонічних гармонік відбувається за рахунок скорочення діапазону регулювання вихідної напруги, що при одночасній дії обох видів несиметрії не перевищує  $\pm 10\%$ , а це є достатнім для компенсації відхилень напруги в тяговій мережі.

ШІМ дозволяє забезпечити регулювання вихідної напруги  $U_{ВД}$  ВДП не тільки без споживання реактивної потужності, але й створити невеликий випереджуючий реактивний струм, що пропорційний струму навантаження  $i_d$ , з метою компенсації споживання реактивної потужності в основному перетворювачі. З графіку рис. 9 (2) видно, що при відносному реактивному струмі  $I_p^* = 0$  коефіцієнт потужності підвищується до рівня 0,985 за рахунок дії конденсатора вхідного фільтра, а при  $I_p^* = 0,5$ , забезпечується коефіцієнт потужності живлячої мережі на рівні 0,995 рис. 9 (1), що на  $2\div 3\%$  більше за коефіцієнт потужності керованого дванадцятипульсного випрямляча рис. 9 (4) та на  $1,5\div 2,5\%$  ніж у керованого випрямляча з фазокерованим ВДП рис. 9 (3).

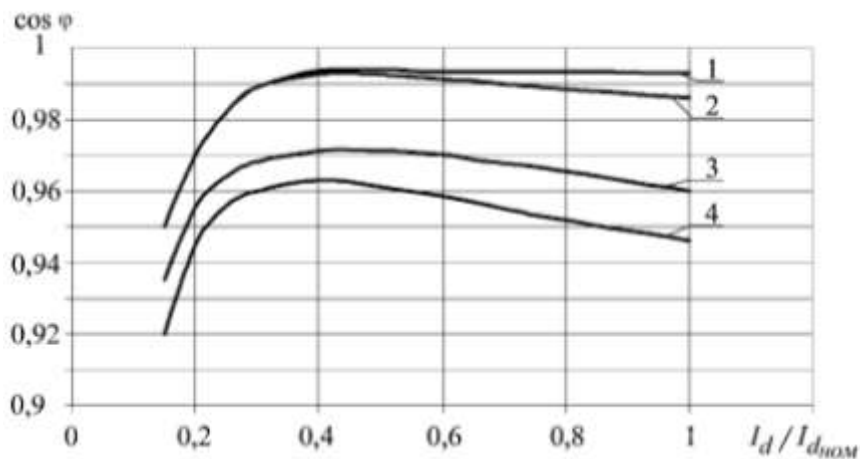


Рис. 9. Залежність коефіцієнтів потужності від коефіцієнта навантаження:

- 1) широтно-регульований ВДП з дванадцятипульсним напівкерованим випрямлячем при завданні відносного реактивного струму  $I_p^* = 0,5$ ;
- 2) широтно-регульований ВДП з дванадцятипульсним напівкерованим випрямлячем при завданні відносного реактивного струму  $I_p^* = 0$ ;
- 3) фазокерований ВДП з дванадцятипульсним напівкерованим випрямлячем;
- 4) дванадцятипульсний напівкерований випрямляч.

На рис. 10 і 11 наведені діаграми перехідних процесів при пуску тягового перетворювача на подвійне навантаження при відсутності аварійного струмообмеження і на коротке замикання в тяговій мережі.

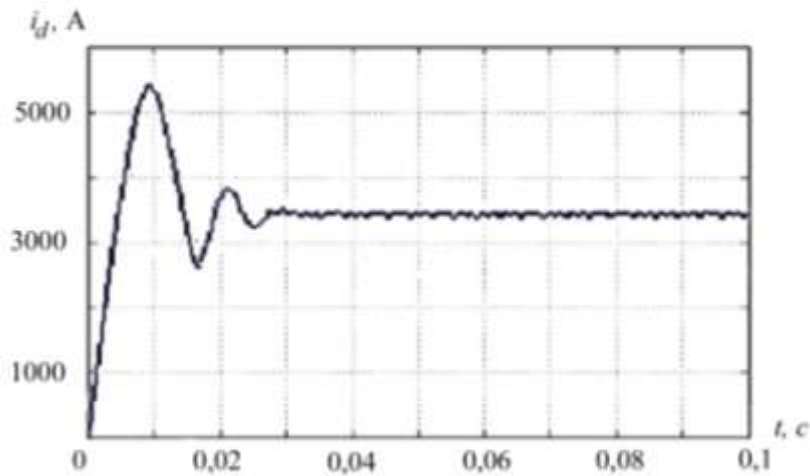


Рис. 10. Перехідний процес при пуску тягового перетворювача на подвійне навантаження при відсутності аварійного струмообмеження.

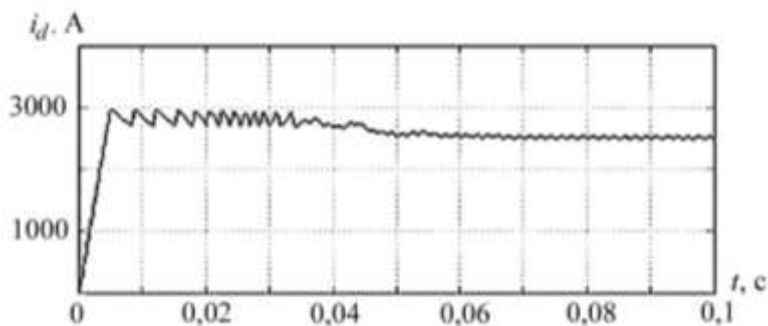


Рис. 11. Перехідний процес при пуску перетворювача на коротке замикання в тяговій мережі і порозі аварійного струмообмеження 2900 А, а робочого струмообмеження 2500 А.

При короткому замиканні у тяговій мережі і аналогічних режимах, використання релейного режиму роботи вузла струмообмеження дозволяє реалізувати швидкодіюче обмеження струму КЗ на рівні  $1,2 \div 1,3$  від допустимого робочого струму в номінальному режимі для недопущення великих ударних струмів, що можуть виникнути в системі. Подальша спільна робота ВДП з ВКС і форсованим зниженням напруги основним фазокерованим випрямлячем на тягових шинах підстанції до нуля, забезпечить бездугове відключення комутаційних апаратів.

У додатках наведено технічне завдання на проектування дванадцятипульсного перетворювального агрегату з реверсним вольтододачком і безконтактним захистом від короткого замикання для тягових підстанцій постійного струму; передбачувана економічна ефективність від впровадження ВДП; акт про впровадженні результатів дисертаційної роботи в Державному підприємстві «Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту



України»; акт про впровадженні результатів дисертаційної роботи в Головному управлінні електрифікації і енергопостачання Укрзалізниці; акт про впровадженні результатів дисертаційної роботи в КП «Київ метрополітен».

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертації отримані теоретичні та експериментальні дані щодо вирішення науково-практичної задачі по створенню бездросельних стабілізуючих перетворювальних агрегатів з реверсивним широтно-регульованим вольтододатковим перетворювачем на двоквADRANTНИХ двоопераційних ключах знаКОЗМІННОЇ наПРУГИ за рахунок введення в схему вузла короткочасного струмообмеження та надання фільтруючих властивостей вольтододатковому перетворювачу.

1. Проведений аналіз існуючих систем показав, що підвищити якість електроенергії та забезпечити стабілізацію напруги на струмоприймачах ЕРС на розрахунковому рівні 3 кВ можна досягти шляхом раціональної побудови силової частини системи тягового електропостачання при використанні оптимальних законів комутації напівпровідникових приладів, а також при реалізації іншого підходу до системи фільтрації та захисту.

2. На базі поєднання вузла короткочасного струмообмеження з реверсивним широтно-регульованим вольтододатковим перетворювачем, що реалізує функцію активної фільтрації, які послідовно приєднуються до фазорегульованого випрямляча тягової підстанції, вдосконалено силову схему стабілізуючого перетворювального агрегата для тягового електропостачання постійного струму напруги 3,3 кВ.

3. Розвинуто спосіб керування реверсивним широтно-регульованим вольтододатковим перетворювачем на двоквADRANTНИХ двоопераційних ключах знаКОЗМІННОЇ наПРУГИ з вузлом короткочасного струмообмеження тягових підстанцій постійного струму, що базується на виділенні інтервалів з максимальними струмами завдання в одній з фаз, на яких одна з двох трифазних груп ключів зовсім не комутує, що дозволяє знизити в два рази частоту перемикання ключів по відношенню до частоти ШІМ. При цьому незалежне формування сигналу завдання по струму дозволяє порівняно легко формувати на кожному структурному інтервалі (інтервалі пульсності) ціле число тактів ШІМ і тим самим, виключити примусові комутації ключів ВДП на границях структурних інтервалів.

4. Розроблено швидкодіючу систему безконтактного захисту силового устаткування тягової підстанції постійного струму при коротких замиканнях у тяговій мережі, яка завдяки використанню паралельного вузла короткочасного струмообмеження, що підключається і відключається до вольтододаткового перетворювача, дозволяє не тільки обмежувати величину аварійного струму на рівні  $1,2 \div 1,3$  від допустимого робочого струму в номінальному режимі, але у сукупності із використанням регулювання основного дванадцятипульсного

випрямляча реалізувати бездугове відключення комутаційних апаратів та забезпечити м'якість пускових процесів.

5. Визначено, що функція аварійного струмообмеження потребує підвищення робочої напруги ключів ВДП, але кратність цього підвищення є невеликою, за рахунок наступних двох факторів:

- напруга на виході ВДП при знаходженні його в стані холостого ходу розподіляється в кожній фазі комутатора між двома виключеними ключами;
- ключі ВДП знаходяться під високою напругою, обумовленою напругою на резисторі вузла струмообмеження, лише короткочасно і вони захищені від перенапруг з боку контактної і живлячої мереж фільтрами, що і дозволяє знижувати запас по напрузі щодо керованих напівпровідникових приладів.

6. Створено аналітичну модель реверсивного ВДП на двоквadrантних двоопераційних ключах знакозмінної напруги, на основі якої розроблена методика синтезу регуляторів вихідних параметрів, що дозволяє максимізувати коефіцієнти подавлення окремих гармонік та отримати перехідні процеси у вольтододатковому перетворювачі, які наближаються до аперіодичних.

7. З використанням запропонованої методики синтезу регуляторів вихідних параметрів системи отримано максимум інтегрального коефіцієнту подавлення гармонійних складових вихідної напруги. Встановлено, що при використанні ВДП на двооквadrантних двоопераційних ключах знакозмінної напруги в якості активного фільтра можливо застосування найпростішого вихідного фільтра, що складається тільки з конденсатора. При цьому усувається як традиційні резонансні контури, так і окремо встановлений послідовний дросель. Функцію останнього здійснює індуктивність розсіювання двох фаз живлячого трансформатора. Визначені параметри регулятора активного фільтра, а також встановлено, що достатнім є 20% діапазон регулювання вихідної напруги.

8. Створено імітаційні моделі реверсивного широтно-регульованого вольтододаткового перетворювача на двоквadrантних двоопераційних ключах знакозмінної напруги з вузлом короткочасного струмообмеження, що приєднується до дванадцятипульсного випрямляча, на яких проведено цифрові експериментальні дослідження, які підтверджують, що він являється ефективним засобом з точки зору забезпечення заданого рівня напруги на струмоприймачах при коефіцієнті потужності трифазної мережі живлення близькому до одиниці, а також реалізує подавлення гармонічних складових (канонічного і неканонічного порядку) випрямленої напруги, включаючи дванадцятку гармоніку при зменшенні в рази маси фільтрового устаткування та забезпечує обмеження аварійних струмів перетворювальних агрегатів на рівні 1,2÷1,3 від допустимого робочого струму в номінальному режимі при коротких замиканнях на боці тягової мережі.

9. Результати дисертаційної роботи впроваджено в Державному підприємстві «Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України»; главку «Електрифікації та електропостачання» Укрзалізниці; комунальному підприємстві «Київ Метрополітен».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Божко В. В. Система керування перетворювальними агрегатами тягових підстанцій з повздовжньою високовольтною лінією постійного струму / М. В. Хворост, В. В. Замаруєв, В. В. Божко, В. Е. Бондаренко // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків : НТУ „ХПІ”, 2005.– №36.– С. 141–146.

*Здобувачем отримано розрахункові формули для системи керування вольтододатковим перетворювачем.*

2. Божко В. В. Силові схеми перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій метрополітена з повздовженою лінією живлення / М. В. Хворост, В. В. Божко // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків : НТУ „ХПІ”, 2005.– №1.– С. 106–109.

*Здобувачем запропонований варіант усунення надлишкової реактивної потужності.*

3. Божко В. В. Вхідний фільтр двоопераційного вольтододатка дванадцятипульсового випрямляча тягових перетворювальних агрегатів метрополітена / М. В. Хворост, В. В. Божко, М. О. Капустян // Технічна електродинаміка. – К. : Інститут електродинаміки НАН України, 2006.– тем. вип. Ч. 2. – С. 23–26.

*Здобувачем отримано формули та співвідношення для розрахунку фільтра вольтододаткового перетворювача.*

4. Божко В. В. Демпфований вхідний фільтр вольтододатка на двоопераційних тиристорах дванадцятипульсних випрямлячів тягових перетворювальних агрегатів метрополітена / М. В. Хворост, В. В. Божко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2006.– №3.– С. 41–45.

*Здобувачем отримано розрахункові формули та співвідношення при виборі демпфуючої ланки вольтододаткового перетворювача.*

5. Божко В. В. Параметри вольтододаткового вхідного фільтра, демпфованого по управлінню дванадцятипульсного випрямляча – стабілізатора напруги / М. В. Хворост, В. В. Божко // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків : НТУ „ХПІ”, 2006.– №42.– С. 41–20.

*Здобувачем досліджено впливи несиметрії струмів живлячої мережі на вхідні струми випрямлячів.*

6. Божко В. В. Обратимый преобразователь вольтодобавочного типа для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог / Н. В. Панасенко, В. В. Божко, Ю. П. Гончаров, А. В. Ересько, В. В. Замаруєв, В. В. Ивахно, А. В. Васькевич // Залізничний транспорт України. – К. – 2007.– № 4. – С. 76–80.

*Здобувачем запропонована система короткочасного струмообмеження.*

7. Божко В. В. Полупроводниковый преобразователь с вольтодобавкой в качестве активного фильтра / Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко, В. В. Божко, В. В. Замаруєв, В. В. Ивахно, Р. И. Любич, Ю. В. Чурсина // Технічна

електродинаміка. – К. : Інститут електродинаміки НАН України, 2007.– тем. вип. Ч. 2. – С. 112–117.

*Здобувачем розроблена система керування вольтододатковим перетворювачем, розроблена комп'ютерна модель та зроблено обробку результатів цифрового моделювання.*

8. Божко В. В. Перетворювач з вольтододатком на повністю керованих напівпровідникових приладах для тягових підстанцій постійного струму / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Божко, М. В. Хворост, О. В. Єресько, В. В. Замаруєв, В. В. Ивахно, Р. І. Любич // Електротехніка і Електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2007.– №2.– С. 4–11.

*Здобувачем запропоновано алгоритм керування вольтододатковим перетворювачем.*

9. Божко В. В. Тяговий випрямляч з реверсивним вольтододатком на двохопераційних напівпровідникових приладах / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Божко // Технічна електродинаміка. – К. : Інститут електродинаміки НАН України, 2008.– №. 2. – С. 16–21.

*Здобувачем розвинуто алгоритм керування вольтододатковим перетворювачем і сформульовані висновки.*

10. Божко В. В. Энергоэффективный преобразовательный агрегат с функциями фильтрации гармоник выходного напряжения тяговой подстанции системы электроснабжения постоянного тока напряжения 3 кВ / В. М. Самсонкин, М. В. Панасенко, Ю. П. Гончаров, В. В. Божко, О. В. Єресько, В. В. Замаруєв, Р. І. Любич, В. Г. Сиченко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2008.– вип. 20. – С. 66–72.

*Здобувачем запропонована комбінована система активної фільтрації і проведено аналіз зміни величин гармонічних складових у випрямленій нарузі.*

11. Божко В. В. Аномальные и переходные режимы преобразователя вольтодобавочного типа для тяговых подстанций постоянного тока / Ю. П. Гончаров, В. В. Замаруєв, В. В. Ивахно, Н. В. Панасенко, В. В. Божко, П. Д. Андрієнко, И. И. Лагута // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2009.– вип. 27. – С. 61–66.

*Здобувачем зроблено обробку результатів цифрового моделювання і формулювання висновків.*

12. Пат. 51917 Україна, МПК(2009) H02M 7/00. Перетворювальний агрегат для тягової підстанції постійного струму / Божко В. В., Панасенко М. В., Гончаров Ю. П., Сиченко В. Г.; заявники та власники патенту автори заяв. 15.01.2010; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 15.

*Здобувачем запропоновано алгоритм керування вузлом короткочасного струмообмеження.*

13. Божко В. В. Энергоэффективный перетворювальний агрегат з функціями захисту від аварійних струмів тягової підстанції системи електропостачання постійного струму напруги 3 кВ / В. В. Божко, М. В. Панасенко, В. О. Фітін / Тез.

докл. I Міжнародної. науково-практичної. конференції „Транселектро-2007”, 03–06 жовтня 2007р., Місхор. – Дніпропетровськ: ДИИТ, 2007. – С. 52.

*Здобувачем запропонована система короткочасного струмообмеження.*

## АНОТАЦІЇ

**Божко В. В. Стабілізуючі перетворювальні агрегати вольтододаткового типу підвищеної ефективності для тягового електропостачання постійного струму електрифікованих залізниць. Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.22.09. – електротранспорт. – Державне підприємство «Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України» (Харківська філія), Харків, 2010.

Дисертація присвячена розробці засобів підвищення ефективності системи тягового електропостачання постійного струму напруги 3,3 кВ на базі бездросельних перетворювальних агрегатів тягових підстанцій, що складаються з фазорегульованих випрямлячів та реверсивних широтно-регульованих вольтододаткових перетворювачів на двоквADRантних двоопераційних ключах знакозмінної напруги (ДДКЗН) з вузлом короткочасного струмообмеження.

Вперше розроблено швидкодіючу систему безконтактного захисту силового устаткування тягової підстанції при КЗ у тяговій мережі завдяки використанню паралельного вузла короткочасного струмообмеження (ВКС). Розвинуто спосіб керування реверсивним вольтододатковим перетворювачем на ДДКЗН, що дозволяє знизити в рази частоту перемикання ключів по відношенню до частоти широтно імпульсної модуляції. Створено аналітичну модель на основі якої розроблена методика синтезу регуляторів вихідних параметрів, що дозволяє максимізувати коефіцієнти подавлення окремих гармонічних складових.

Розроблено комп'ютерну модель, на якій проведено експерименти, що підтвердили ефективність подавлення гармонічних складових випрямленої напруги при зменшенні в рази маси фільтрового устаткування.

*Ключові слова:* випрямляюча установка тягової підстанції; вольтододатковий перетворювач; система керування; зворотній зв'язок; ШІМ-контролер; активна фільтрація.

**Божко В. В. Стабилизирующие преобразовательные агрегаты вольтодобавочного типа повышенной эффективности для тягового электроснабжения постоянного тока электрифицированных железных дорог. Рукопись.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09. – электротранспорт. – Государственное предприятие «Государственный научно-исследовательский центр железнодорожного транспорта Украины» (Харьковский филиал), Харьков, 2010.

Диссертация посвящена разработке средств повышения эффективности системы тягового электроснабжения постоянного тока напряжения 3,3 кВ на

базе бездроссельных преобразовательных агрегатов тяговых подстанций, которые состоят из фазорегулируемых выпрямителей и реверсивных широтно-регулируемых вольтодобавочных преобразователей на двухквadrантных двухоперационных ключах знакопеременного напряжения с узлом кратковременного токоограничения.

В работе показано, что реверсивный по напряжению ШИМ-преобразователь может обеспечить регулирование напряжения в достаточных пределах порядка  $\pm(20-30)\%$  и компенсирует при этом недостатки основного фазорегулируемого преобразователя с точки зрения фильтрации гармонических составляющих выходного напряжения.

Разработанная быстродействующая система бесконтактной защиты силового оборудования тяговой подстанции при коротких замыканиях в тяговой сети позволяет реализовать бездугове отключения коммутационных аппаратов и обеспечить мягкость пусковых процессов за счет использования параллельного узла кратковременного токоограничения, который подключается с частотой широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Определено, что функция аварийного токоограничения требует повышения рабочего напряжения ключей вольтодобавочного преобразователя (ВДП), но кратность этого повышения является небольшой, за счет того, что напряжение на выходе ВДП при нахождении его в состоянии холостого хода распределяется в каждой фазе коммутатора между двумя выключенными ключами, а также из-за того, что ключи ВДП находятся под высоким напряжением, обусловленным напряжением на резисторе узла токоограничения кратковременно и они защищены от перенапряжений со стороны контактной и питающей сетей фильтрами, что позволяет снижать запас по напряжению относительно управляемых полупроводниковых приборов.

Усовершенствован способ управления реверсивным вольтодобавочным преобразователем (ВДП) на двухквadrантных двухоперационных ключах знакопеременного напряжения (ДДКЗН). Способ управления основан на выделении интервалов с максимальными токами задания в одной из фаз, на которых одна из двух трехфазных групп ключей совсем не коммутирует, что позволяет снизить в два раза частоту переключения ключей по отношению к частоте ШИМ. Независимое формирование сигнала задания по току, позволяет сравнительно легко формировать на каждом структурном интервале целое число тактов ШИМ и тем самым исключить принудительные коммутации ключей ВДП на границах структурных интервалов. Таким образом, реализована частота принудительных выключений ключей равная  $\frac{1}{4}$  от частоты ШИМ.

Создана аналитическая модель системы основной выпрямитель с ВДП на основе которой разработана методика синтеза регуляторов выходных параметров. С использованием предложенной методики синтеза регуляторов выходных параметров системы определен максимум интегрального коэффициента подавления гармонических составляющих выходного напряжения. Установлено, что при использовании ВДП на ДДКЗН в качестве активного фильтра возможно применение простого выходного фильтра,

состоящего только из конденсатора. При этом устраняется как традиционные резонансные контуры, так и отдельно установленный последовательный дроссель. Функцию последнего осуществляет индуктивность рассеяния двух фаз питающего трансформатора.

Разработана имитационная модель системы – основной выпрямитель с ВДП и узлом кратковременного токоограничения. Путем имитационного моделирования исследованы рабочие свойства ВДП в части обеспечения: заданного уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава при коэффициенте мощности трехфазной питающей сети не ниже 0,98; подавления гармонических составляющих (канонического и неканонического порядка) выпрямленного напряжения, включая двенадцатую гармонику при уменьшении массы фильтрового оборудования; ограничения аварийных токов преобразовательных агрегатов на уровне  $1,2 \div 1,3$  от допустимого рабочего тока в номинальном режиме при коротких замыканиях на стороне тяговой сети; бесконтактной защиты и улучшения качества регулирования выходного напряжения преобразовательных агрегатов в переходных процессах.

**Bozhko V. V. Stabilizing converting unit booster type of high efficiency for the traction power supply of direct current of electrified railways. Manuscript.**

Theses for candidate's degree in technical sciences, speciality 05.22.09 – electrical transport. – State enterprise «State research center of railway transport of Ukraine» (Kharkiv branch). – Kharkiv, 2010.

The thesis is devoted to developing tools to enhance the effectiveness of the traction power supply DC voltage 3.3 kV, based on throttle free converter units of traction substations, which consist of phase regulated rectifiers and reverse pulse-controlled boost converter to two-quadrant gate-controlled keys alternating voltage to the node short current limit.

First developed high-speed system of noncontact protect power equipment of traction substation for faults in the power train through the use of a parallel node short-term current limit. Improved method of controlling boost converter to two-quadrant gate-controlled keys alternating voltage, thus reducing the switching frequency in times of keys in relation to the frequency pulse width modulation.

An analytical model based on which the technique of the output parameters controls synthesis that maximizes the rates of suppression of individual harmonic components was created.

The computer model experimentally confirmed the effectiveness of the suppression of harmonic components of the rectified voltage decreases by several times the mass of the filter equipment.

*Key words:* traction substation rectifier; booster converter, control system, feedback; PDM controller; active filtering.



Підписано до друку 14.03.2011 р. Формат 60x84/16.  
Папір офсетн. Друк – різнографічний. Умовн. друк. арк. 0,9  
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Замовлення № 415

---

Надруковано у СПДФО Миронов М.В.  
Свідоцтво № 2950452 Є044558 від 01.01.2011 р.  
61002, м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3

---