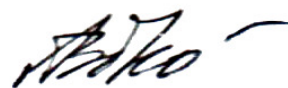


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЛОБКО АНДРІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ



УДК 621.314.58

**ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків-2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі промислової і біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Сокол Євген Іванович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
ректор

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Терещенко Тетяна Олександрівна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
професор кафедри промислової електроніки

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Бару Олександр Юрійович,
Науково-виробниче підприємство «ЕОС» – ТОВ,
технічний директор

Захист відбудеться «30» серпня 2016 р. о 16³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 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 «23» липня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Осичев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Поява перспективних потужних напівпровідникових приладів відкрила нові можливості в силовій електроніці. Разом з досягненнями в інформаційних технологіях це сприяло появі систем інтелектуальних мереж (Smart Grid). Ці системи дозволяють не тільки більш ефективно розподіляти електроенергію між споживачами, але ще й підключати до мережі генератори відновлюваної електроенергії. Впродовж останніх років ці системи мали активний розвиток, та досягли значних успіхів, про те є й досі певні питання, які потребують подальшого дослідження, в першу чергу – енергоефективність перетворювачів, які забезпечують роботу системи, їх надійності та вартості. Перспективні системи електропостачання на зразок системи FREEDM дозволяють також інтегруватись в існуючу енергосистему без її кардинальної перебудови, що досить суттєво в умовах української економіки. В цих системах зазначені проблеми вирішуються шляхом мінімізації масогабаритних показників за рахунок підвищення частоти перемикання в перетворювачах, що дозволяє знизити вартість перетворювачів, проте залишається відкритим питання поліпшення їх енергетичних показників.

Таким чином, актуальним науковим завданням є удосконалення енергетичних показників напівпровідникових енергозберігаючих перетворювачів перспективних систем електропостачання шляхом вдосконалення схемних рішень перетворювачів та систем керування ними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувалися на кафедрі промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХП» відповідно до завдань держбюджетної НДР МОН України «Розробка принципів енергоресурсозбереження в системі передачі електроенергії за рахунок зміни числа фаз, частоти та форми напруги засобами електроніки» (ДР №0112U000414), в якій здобувач був виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у створенні енергозберігаючих напівпровідникових резонансних перетворювачів з фазовим способом керування для перспективних систем електропостачання.

Для досягнення наміченої мети поставлені наступні задачі:

– розробити напівпровідниковий перетворювач для перспективних систем електропостачання на прикладі системи FREEDM з покращеними енергетичними показниками;

– розробити фазовий спосіб керування напівпровідниковими резонансними перетворювачами в системі FREEDM;

– розробити структурні схеми системи керування резонансними перетворювачами з удосконаленим фазовим способом керування;

– виконати аналіз електромагнітних процесів та оцінити енергетичні показники напівпровідникових резонансних перетворювачів з фазовим способом керування в різних режимах роботи на основі побудованих імітаційних моделей в пакеті MATLAB;

– розробити та створити фізичну модель однофазного резонансного перетворювача з фазовим способом керування та провести експериментальні

дослідження для підтвердження отриманих теоретичних результатів.

Об'єкт дослідження - процес перетворення електричної енергії в резонансних перетворювачах з фазовим способом керування.

Предмет дослідження – енергозберігаючі напівпровідникові резонансні перетворювачі для перспективних систем електропостачання, режими роботи і характеристики напівпровідникових резонансних перетворювачів з фазовим способом керування.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використовувалися: теорія електричних ланцюгів, чисельні методи рішення системи диференціальних та алгебраїчних рівнянь при аналізі електромагнітних процесів; метод гармонійного аналізу (розкладання в ряд Фур'є) для визначення величин гармонік струму мережі, а також імітаційне і фізичне моделювання. Моделювання перехідних і сталих процесів в перетворювачах проводилося з використанням програмного пакета Matlab версії R2007a (ліцензія № 335408).

Наукова новизна отриманих результатів:

– запропоновано резонансний напівпровідниковий перетворювач з фазовим способом керування для перспективних систем електропостачання з кращим к.к.д.;

– вперше обґрунтовано використання фазового способу керування оборотними резонансними перетворювачами з м'якою комутацією на основній частоті, який заснований на симетричному розладі резонансу з введенням регульованого фазового зсуву між напругою на вході силового напівпровідникового комутатора і мережею живлення змінного струму, для поліпшення умов комутації та зниження комутаційних втрат;

– запропонована лінійна динамічна модель перетворювача з резонансно-фазовим способом керування на основі якої розроблені структурні схеми систем керування резонансними перетворювачами з фазовим способом керування;

– побудовані імітаційні моделі перетворювачів з резонансно-фазовим способом керування для перспективних систем електропостачання, які покладені в основу теорії досліджень енергозберігаючих технологій;

– експериментально визначено діапазон секціонування дроселя послідовного фільтра та конденсатора компенсації реактивної потужності для підтримання режиму м'якої комутації при відхиленні напруги мережі або опору навантаження.

Практична значимість отриманих результатів для силової електроніки полягає у наступному:

- дана сукупність рекомендацій щодо визначення основних параметрів однофазних та трифазних резонансних напівпровідникових перетворювачах з фазовим способом керування;

- розроблені рекомендації для підтримання режиму м'якої комутації при відхиленні напруги живлення та опору навантаження від номінальних значень в діапазоні $\pm 10\%$ в резонансних напівпровідникових перетворювачів з фазовим способом керування;

- запропоновані заходи захисту при аварійних режимах холостого ходу та

короткого замикання навантаження в резонансних напівпровідникових перетворювачів з фазовим способом керування;

- розроблено алгоритм керування однофазним резонансним перетворювачем, який дозволяє автоматично підтримувати задану напругу на навантаженні в номінальному режимі та при відхиленні напруги живлення та/або опору навантаження від номінальних значень;

- розроблений дослідний зразок напівпровідникового перетворювача з фазовим способом керування включено до програми навчальної дисципліни «Енергозберігаючі перетворювачі» з підготовки магістрів на кафедрі промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХП»;

– розроблений резонансний напівпровідниковий перетворювач має високий к.к.д. та перспективи для використання в реальних системах електропостачання (патент України на корисну модель №97331).

Особистий внесок здобувача. Основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: систематизація даних щодо перспективних систем електропостачання, визначення основних тенденції в їх розвитку, аналіз переваг та недоліків силових напівпровідникових перетворювачів в цих системах; методика розрахунку основних параметрів однофазних та трифазних схем резонансних напівпровідникових перетворювачів з фазовим способом керування; створені комп'ютерні моделі цих перетворювачів та проведені за їх допомогою експериментальні дослідження в номінальних випрямляючому та інверторному режимах, при відхиленні напруги мережі та опору навантаження від номінальних значень, а також в аварійних режимах; розроблено алгоритм керування мікропроцесорною системою керування для реалізації фазового способу керування; розроблено та створено експериментальний зразок однофазного резонансного напівпровідникового перетворювача з фазовим способом керування і проведено за його допомогою експериментальні дослідження.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на: Міжнародних науково-технічних конференціях: «Compatibility and Power Electronics» (м. Любляна, Словенія, 2013 р.), «Інтелектуальні енергетичні системи – ESS'13» (м. Мукачево, 2013 р.), «Силовая електроніка та енергоефективність» (м. Одеса, 2014 р.); Міжнародних науково-практичних конференціях: «Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості» (смт. Воловець, 2014-2015 рр.); «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті» (с. Розлуч, 2016 р.); та на щорічних наукових семінарах Наукової Ради НАН України «Силовая і біомедична електроніка» (м. Харків).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображено у 7 наукових працях, з них 5 – у наукових фахових виданнях України (1 – у виданні, що включено до міжнародних наукометричних баз), 1 патент України на корисну модель, 1 – у матеріалах міжнародних конференцій.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел та додатків. Повний об'єм дисертації складає 186 сторінок, в ній 8 рисунків на 1 сторінці, 1 таблиця на

1 сторінці, 103 рисунка по тексту та 3 таблиці по тексту, список використаних джерел зі 108 найменувань на 13 сторінках, 7 додатків на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертаційної роботи, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, показана наукова новизна, практичне значення і реалізація результатів дисертаційних досліджень, приведені дані про їхню апробацію, публікацію і впровадження.

Перший розділ присвячений аналізу структури перспективної системи електропостачання FREEDM та напівпровідникового перетворювача, що отримав назву напівпровідникового трансформатора (SST). SST підключається до розподільної мережі середнього рівня напруги змінного струму, та підтримує регульовані розподільні шини 120 В змінного струму і 400 В постійного струму. Система FREEDM - це енергосистема, що базується на силовій електроніці, цифрових комунікаціях з високою пропускнуою здатністю та розподіленому керуванні та докорінно відрізняється від сьогоденної мережі, бо замінює електромагнітні пристрої, такі як 50/60 Гц трансформатори на SST. Чотирьох-квadrантне керування потоком потужності через SST дозволяє отримати plug-and-play інтерфейс для розподілених генераторів та підключення накопичувачів і навантажень до мережі без негативного впливу на прилеглих користувачів.

Основним способом поліпшення ефективності SST у системі FREEDM є використання нових потужних напівпровідникових приладів з кращими енергетичними показниками та підвищення частоти комутації для зменшення масогабаритних показників реактивних елементів. Проте, у схемі SST щонайменше подвійне перетворення енергії напівпровідниковими комутаторами, а при формуванні рівня АС 120/240 В додається ще одне; в поєднанні з прийнятим способом керування (високочастотна ШІМ) ця послідовна структура не сприяє отриманню високого к.к.д. і збільшує встановлену потужність силових напівпровідникових ключів.

Зазначені недоліки можуть бути усунені за рахунок заміни однофазного вхідного ШІМ випрямляча модуля SST системи FREEDM більш ефективним перетворювачем. Отже, доцільним завданням є розробка напівпровідникових перетворювачів та способів керування ними для застосування в перспективних системах електропостачання.

Другий розділ присвячений розробці напівпровідникового перетворювача для перспективної системи електропостачання FREEDM, який дозволяє забезпечити таку ж функціональність як у існуючого в цій системі перетворювача з кращими енергетичними показниками.

Комутаційні втрати ключів значно зростають при підвищенні частоти комутації. Для зменшення цих втрат потрібно зменшувати кількість перемикачів. Використання схем резонансних перетворювачів, які містять послідовний резонансний LC-фільтр на боці змінного струму дозволяє виконати м'яку комутацію у нулях струму на частоті його основної гармоніки.

М'яка комутація дозволяє суттєво зменшити динамічні втрати в силових напівпровідникових перетворювачах.

Обґрунтовані перспективи використання запропоновано фазового способу керування оборотними резонансними перетворювачами з м'якою комутацією на основній частоті 50 Гц, який заснований на симетричному розстроєнні резонансу з введенням регульованого фазового зсуву між напругами на вході силового напівпровідникового комутатора і мережі живлення змінного струму.

Визначено, що діапазон значень вихідного струму при якому можлива м'яка комутація залежить від параметрів перетворювача і є досить вузьким. Розширення цього діапазону можливе шляхом вдосконалення схем м'якої комутації та принципів керування перетворювачами.

Запропонований резонансний перетворювач має модифікований резонансний послідовний фільтр, який разом з використанням запропонованого фазового способу керування дозволяє отримати можливість регулювати струм або напругу на навантаженні. Базова схема перетворювача наведена на рис. 1. Перетворювач призначений для обміну енергією між мережею живлення і навантаженням з розподіленими традиційними або відновлюваними генераторами електроенергії. При передачі енергії з мережі змінної напруги в навантаження на постійній напрузі перетворювач діє як випрямляч, а при зворотному напрямку потоку енергії, тобто від розподілених генераторів в мережу - як інвертор напруги. Ключі комутатора керуються таким чином, щоб сформувати на вході комутатора змінну напругу прямокутної форми з частотою мережі f (основною частотою). У першому (базисному) наближенні вхідний фільтр налаштований на резонанс на основній частоті

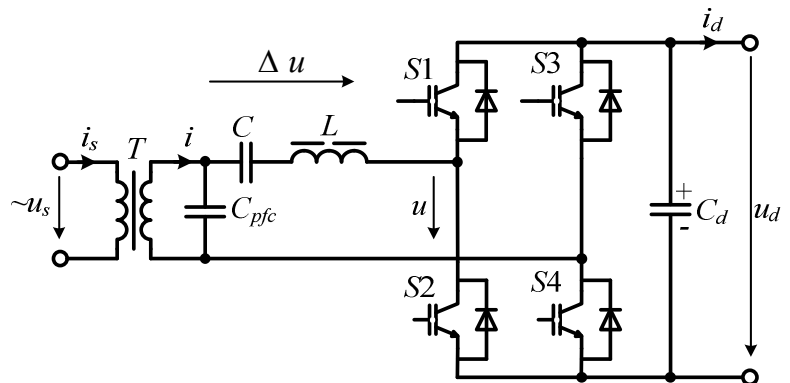


Рисунок 1 – Базова силова схема перетворювача:

- u_s - напруга мережі живлення;
- T - трансформатор; LC - вхідний послідовний резонансний фільтр; C_{pfc} - конденсатор компенсації реактивної потужності;
- $S1-S4$ - силові ключі; C_d - вихідний фільтр

$$\omega L_{\sigma} = \frac{1}{\omega C_{\sigma}} = X = X^* R_N, \quad (1)$$

де $\omega = 2\pi f$; L_{σ} і C_{σ} - базисні значення індуктивності і ємності; X^* - відносний реактивний опір контуру в базовому режимі; R_N - опір номінального навантаження на вході комутатора, який визначається як відношення перших гармонік номінального напруги і струму $R_N = U_m / I_m$. При цьому амплітудне значення U_m першої гармоніки вхідної напруги пов'язане з вихідною напругою u_d і потужністю перетворювача P_H формулами:

$$U_m = \frac{4}{\pi} u_d, \quad P_u = \frac{1}{2} U_m I_m. \quad (2)$$

В базисному режимі роботи існує жорсткий зв'язок між вхідною і вихідною напругою, що унеможливорює регулювання струму або напруги навантаження. При фазовому керуванні використано розстроєння резонансу. При одночасному збільшенні індуктивності і ємності індуктивний опір переважає над ємнісним і їх різниця ΔX має порядок 0.1-0.2 від X , тобто результуючий опір LC фільтра є індуктивним:

$$L = (1 + \delta)L_0, \quad C = (1 + \delta)C_0, \quad (3)$$

$$\Delta X = \left| \omega L - \frac{1}{\omega C} \right|, \quad (4)$$

де δ - глибина розстроєння резонансу по відношенню до базисних значень.

При одночасному зменшенні індуктивності і ємності ємнісний опір переважає над індуктивним, тоді аналогічно (3):

$$L = (1 - \delta)L_0, \quad C = (1 - \delta)C_0. \quad (5)$$

Діаграми рис. 2 пояснюють принцип фазового керування. Вектори позначені символами діючих значень перших гармонік напруг і струмів.

Системою керування комутатора можна повернути вектор U щодо U_s' на заданий кут керування α . При індуктивному результуючому опорі LC - фільтра вектор струму I_s' відстає від вектора напруги ΔU на кут $\pi/2$ (відповідно при ємнісному – випереджає). Тоді в випрямному режимі при малому куті керування α він приблизно збігається по фазі з вектором напруги U_s' , забезпечуючи в ідеалі споживання з мережі чисто активної потужності. При зміні знака кута керування напрямок потоку потужності змінюється на протилежний. Таким чином, фазове керування по даному принципу забезпечує двосторонній регульований обмін енергією між мережею і навантаженням з розподіленими генераторами електроенергії без генерації реактивної потужності в мережі.

Система FREEDM дозволяє підключати як навантаження, так і генератори традиційної чи відновлюваної електроенергії. У цьому випадку необхідно підтримувати на стороні постійної напруги задану напругу 400 В. Якщо навантаження є накопичувач електричної енергії, то доцільно регулювати на стороні

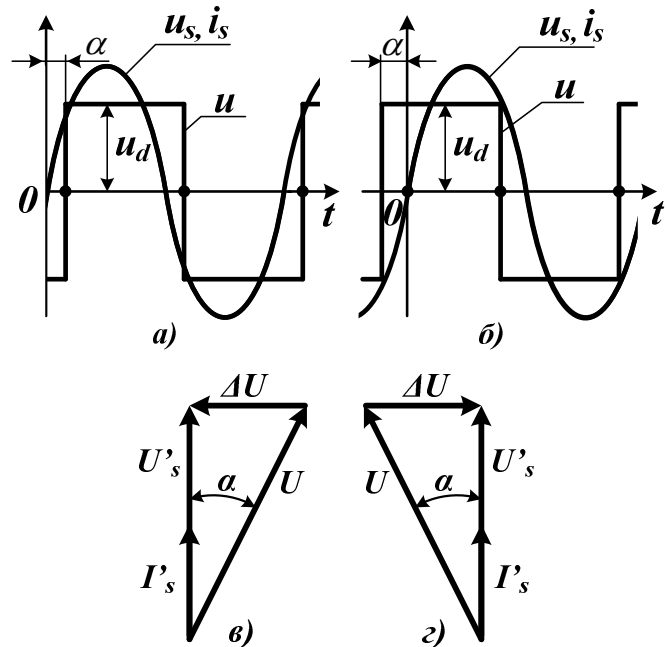


Рисунок 2 – Діаграми струмів та напруг (а, б) та векторні діаграми (в, г), які пояснюють принцип фазового керування при характері опору розстроєного резонансного контуру: (а, в) - індуктивному, (б, г) - ємнісному

постійної напруги не напругу, а струм накопичувача. У вихідне коло датчика струму введено дискретний фіксатор, що працює з основною частотою $f = \omega / (2\pi)$ та виділяє нульову гармоніку вихідного струму i_d . На рис. 3,а показана лінеаризована еквівалентна схема замкнутої системи регулювання при заміні LC -фільтра пропорційною ланкою. Аналогічно регулятору струму в вихідний ланцюг датчика напруги також введено дискретний фіксатор, що виділяє нульову гармоніку вихідної напруги u_d . На рис. 3,б показана лінеаризована еквівалентна схема замкнутої системи регулювання напруги.

Узгодження рівнів напруги і підтримання малого комутованого струму має вирішуватись з урахуванням можливого відхилення напруги в розподільній мережі змінного струму в межах $\pm 10\%$. При відхиленні напруги мережі змінюються реактивний і пов'язаний з ним комутований струми. Показано, що для повного усунення комутованого струму досить регулювати відносну амплітуду реактивного струму першої гармоніки в межах приблизно до 50% . Для цього потрібно регулювати відносну амплітуду поздовжньої складової напруги на LC -фільтрі ΔU_m^* в межах приблизно від 15% до 20% . Створити поздовжню складову напруги можна перемиканням секцій вторинної обмотки узгоджувального трансформатора за допомогою одно операційних тиристорів або симісторів, або регулюванням напруги u_d шляхом введення додаткового перетворювача в вихідний ланцюг.

В системі FREEDM передбачається підключення перетворювальної системи до однієї фази мережі живлення, що тягне за собою необхідність вирівнювання навантажень в кожній з фаз. Трифазна система живлення позбавлена цього недоліку. При аналізі гармонійного складу первинного струму в дисертаційній роботі виявлено, що струм для шестипульсної та дванадцятипульсної трифазних схем резонансного напівпровідникового перетворювача з фазовим способом керування є задовільним, коефіцієнт гармонік для обох схем не перевищує 5% . Для однофазної схеми коефіцієнт гармонік складає 12% , необхідно доповнити пасивний LC -фільтр резонансного перетворювача активним фільтром.

Показано, що режим комутації в нулі струму основної частоти забезпечується регулятором вихідної напруги шляхом підтримання різниці між амплітудою фазної напруги в мережі живлення і на вході силового комутатора

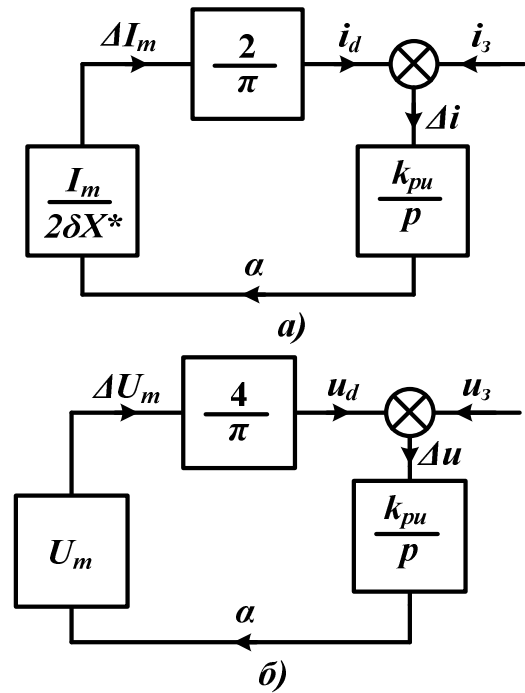


Рисунок 3 – Лінеаризовані еквівалентні схеми систем регулювання струму (а) та регулювання напруги (б)

порядку 15-25%. Зазначено, що споживання реактивної потужності з мережі є недоліком, тому для її компенсації потрібно не пропустити струм вищих гармонік через джерело живлення, тому в мережі доцільна установка конденсаторів паралельно вторинній обмотці узгоджуючого трансформатора. Реактивна потужність додаткового конденсатора C_{pfc} має бути близько 50% від переданої активної.

Також показано, що при низькій основній частоті оптимальні питомі енергетичні показники дроселя послідовного фільтра досягаються при потужності порядку одиниць МВт, при цьому можна отримати к.к.д., що перевищує 99%, при витраті активних матеріалів порядку одиниць кг/кВт.

Третій розділ присвячений комп'ютерному моделюванню однофазного резонансного перетворювача з фазовим способом керування (рис. 4), а також трифазних шестипульсної та дванадцятипульсної схем, режимів при відхиленні напруги мережі живлення в максимально допустимих межах, режимів роботи при відхиленні опору навантаження від номінального значення, інверторного режиму, режиму при підключенні генератора електроенергії постійного струму, а також аварійних режимів холостого ходу та короткого замикання.

Надана методика розрахунку основних параметрів однофазних та трифазних схем резонансного перетворювача з фазовим способом керування, яка допомогла створити комп'ютерні моделі та виконати моделювання сталих режимів роботи, результати яких підтвердили зроблені теоретичні висновки.

Проведений аналіз результатів комп'ютерного моделювання показав, що для застосування в якості погоджуючого перетворювача в системі FREEDM може використовуватись однофазна двух-модульна схема резонансного

перетворювача з фазовим способом керування за умови виконання додаткового активного фільтра на вході перетворювача. Трифазні шестипульсна та дванадцятипульсна схеми дозволяють забезпечити задовільний гармонійний склад струму мережі без додаткових засобів, а також забезпечити рівномірну загрузку фаз мережі живлення, проте мають в порівнянні з однофазною схемою більш складну будову та систему керування.

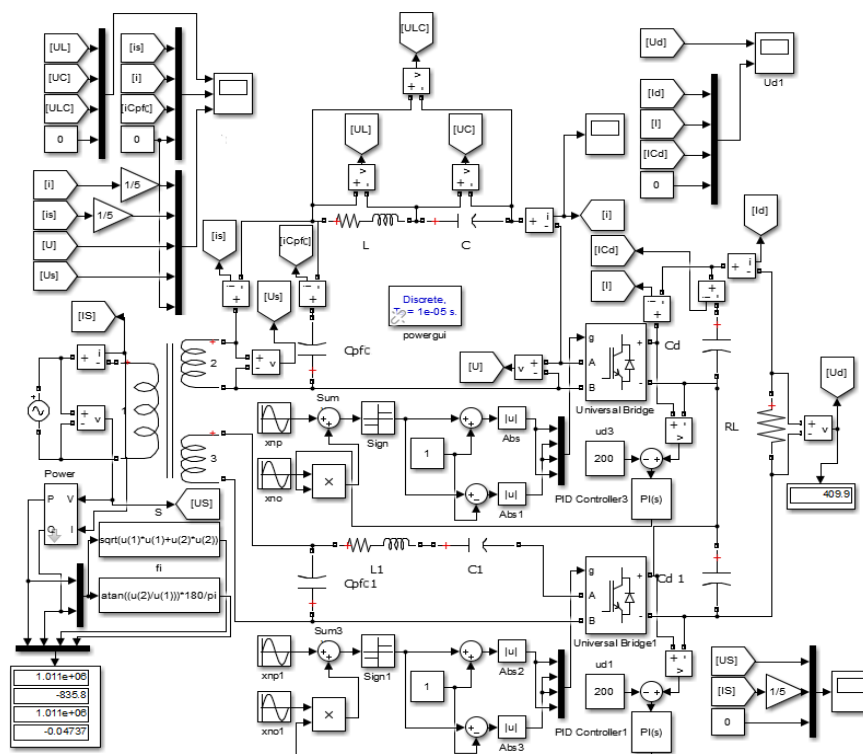


Рисунок 4 – Matlab модель однофазного двух-модульного резонансного перетворювача з фазовим способом керування

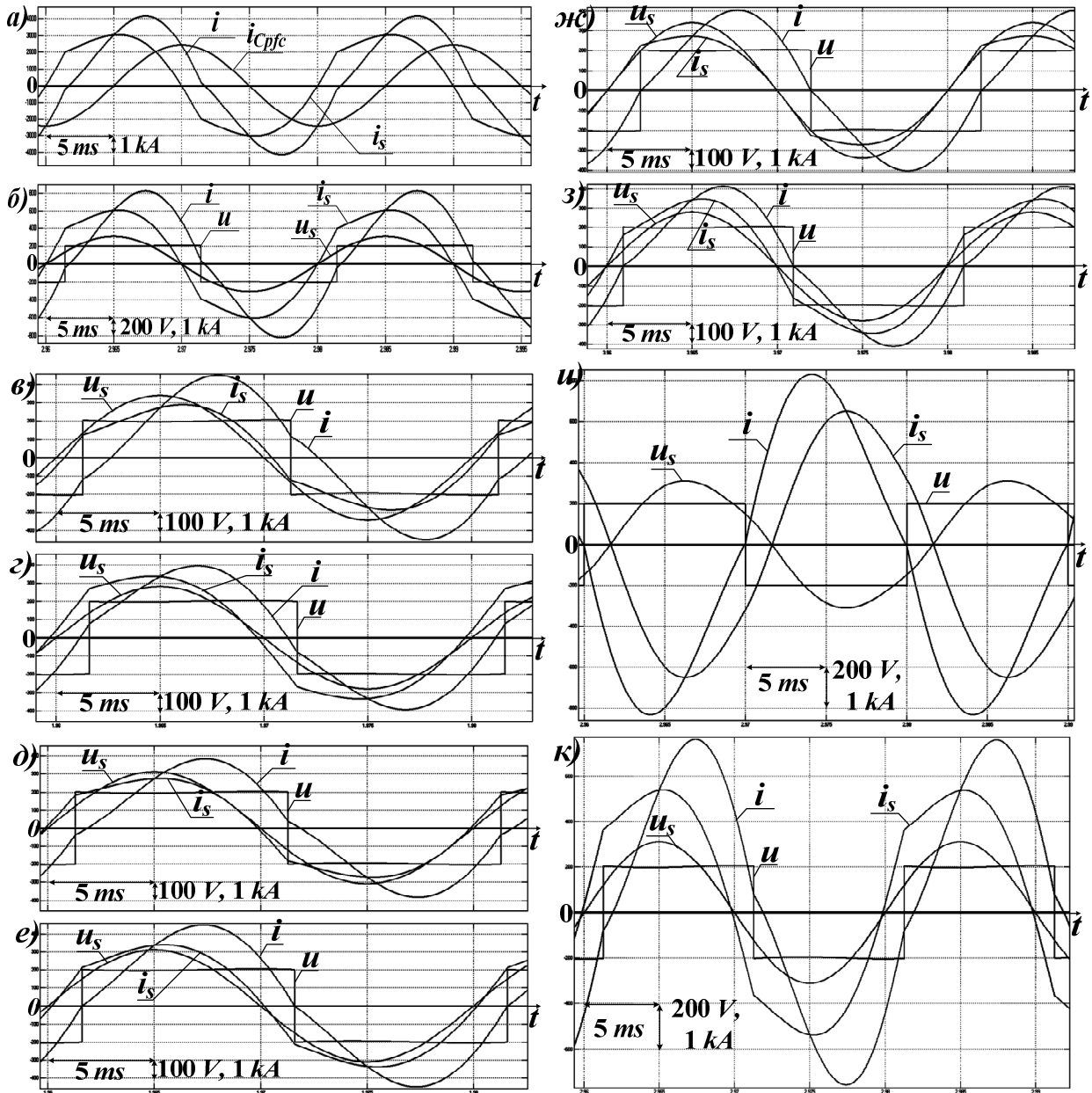


Рисунок 5 – Осцилограми однофазного двух-модульного резонансного перетворювача з фазовим способом керування в номінальному режимі (а, б), при відхиленні напруги мережі на +10% (в), та -10% (г) від номінальної, при відхиленні опору навантаження на +10% (д), та -10% (е) від номінального, при відхиленні напруги мережі на +10% (ж), та -10% (з) від номінальної та використанні секціонування дроселя послідовного фільтра та ємності конденсатора компенсації реактивної потужності, в інверторному режимі (у), при підключенні до лінії постійної напруги генератора струму (к): u_s - напруга мережі, u - напруги перед комутатором, i_s - струм мережі, i - струм послідовного фільтра, i_{Cpfc} - струм конденсатора компенсації реактивної потужності

На рис. 5, а, б показані осцилограми однофазного двух-модульного резонансного перетворювача з фазовим способом керування, отримані за допомогою Matlab-моделювання.

Проведено моделювання режимів роботи при відхиленні напруги живлення та опору навантаження від номінальних значень в діапазоні $\pm 10\%$ (рис. 5, в-е), яке показало, що система фазового керування забезпечує в цих режимах задану напругу на навантаженні, проте втрачається налаштування на режим м'якої комутації. Для усунення цього негативного явища доцільно використання секціонування дроселя послідовного фільтра та ємності конденсатора компенсації реактивної потужності, яке дозволить шляхом підключення секцій забезпечити регулювання індуктивності дроселя в діапазоні від -11.6% до $+14\%$, та ємності конденсатора від -22% до $+5\%$ від номінальних значень (рис. 5, ж, з).

Комп'ютерне моделювання підтвердило перспективи використання запропонованого однофазного двух-модульного резонансного перетворювача з фазовим способом керування для роботи в інверторному режимі (рис. 5, и). Аналіз впливу підключення генераторів струму зі сторони лінії постійної напруги на характеристики роботи перетворювача, показав, що ТНД струму мережі погіршився до 10% проти 8.9% у номінальному режимі (рис. 5, к). Генератор струму приєднано паралельно навантаженню, а його струм обрано на рівні 10% від номінального струму навантаження.

Особливу увагу в дисертаційній роботі приділено розробленню заходів захисту при аварійних режимах холостого ходу та короткого замикання навантаження. Заходи полягають в використанні тиристорів замість зворотних діодів в ключах комутатора, послідовного підключення симістора з конденсатором компенсації реактивної потужності, паралельного підключення симістора з конденсатором послідовного фільтра та системи захисного вимкнення. Проведене імітаційне моделювання підтвердило, що запропоновані міри дозволяють уникнути появи негативних явищ як для мережі живлення, так і для навантажень.

Традиційні схеми мережевих випрямлячів створюють досить серйозні проблеми під час пуску, коли відбувається первинний заряд фільтрового конденсатора на виході, а також при короткому замиканні на вихідних зажимах. У розглянутих схемах резонансного перетворювача з фазовим способом керування завдання струмообмеження при зазначених процесах значно полегшується завдяки наявності в колі змінного струму послідовного дроселя з досить великою індуктивністю. Для розстроєння резонансу в послідовному LC фільтрі в перевантажних режимах запропоновано використання паралельно конденсатору баласту додаткового перетворювача регулятора напруги.

Відзначено, що для обмеження перенапруги при пуску, обумовленого коливальним характером процесу первісного заряду конденсатора можна включити паралельно конденсатору вихідного фільтра ще один перетворювач регулятора напруги. Заміна зворотних діодів комутатора на тиристори дозволяє реалізувати швидкодіючий безконтактний захист при коротких замиканнях. При короткому замиканні цей захист діє на зняття постійного відпираючого сигналу на керуючих електродах, завдяки чому коло розривається після чергового переходу струму через нульове значення.

В режимі холостого ходу конденсатор компенсації реактивної потужності може викликати негативні явища, оскільки приєднується до мережі паралельно. Щоб уникнути цієї проблеми послідовно цьому конденсатору запропоновано встановити симістор, з якого у разі виникнення аварійного режиму знімається відпираючий сигнал.

Проведений розрахунок ефективності однофазного двух-модульного резонансного перетворювача з фазовим способом керування показав, що при налаштуванні перетворювача на режим м'якої комутації можна досягнути значення к.к.д. рівного 95.82%, що є вищим від значень отриманих в топологіях Generation-I SST та Generation-II SST в системі FREEDM.

Четвертий розділ присвячений фізичному моделюванню однофазного резонансного перетворювача та фазового способу керування. Фізичне моделювання однофазного резонансного перетворювача з фазовим способом керування з м'якою комутацією на основній частоті мережі живлення 50 Гц виконано в режимі випрямляча на прикладі низьковольтного (номінальна напруга живлення 33 В з можливістю перемикання на напругу 28 В та 38 В) та малопотужного (порядку 20 Вт) макета перетворювача. Розроблено макет однофазного резонансного перетворювача з системою керування на базі процесора NXP LPC1114, який реалізує фазовий спосіб керування за допомогою розробленого алгоритму керування однофазним резонансним перетворювачем дозволяє автоматично підтримувати задану напругу на навантаженні, або змінювати її шляхом ручного налаштування кута керування. Запропонована та реалізована в алгоритмі система аварійної синхронізації дозволила уникнути при фізичному моделюванні втрати керуючих сигналів.

Основні параметри елементів комп'ютерної моделі обрані на основі використаних в фізичній моделі. Моделювання виконувалось при такому завданні кута керування α , щоб комутація відбувалась при нульовому струмі. На рис. 6 видно, що таким кутом є приблизно 14.77 електричних градусів.

На рис. 7 приведені осцилограми напруги мережі u_s , напруги перед комутатором u та струму мережі i_s при цьому куті керування. Порівнюючи осцилограми відзначено, що дійсно характеристики отримані за допомогою комп'ютерного моделювання достатньо точно співпадають з характеристиками отриманими з фізичної моделі. Аналіз осцилограм підтверджує

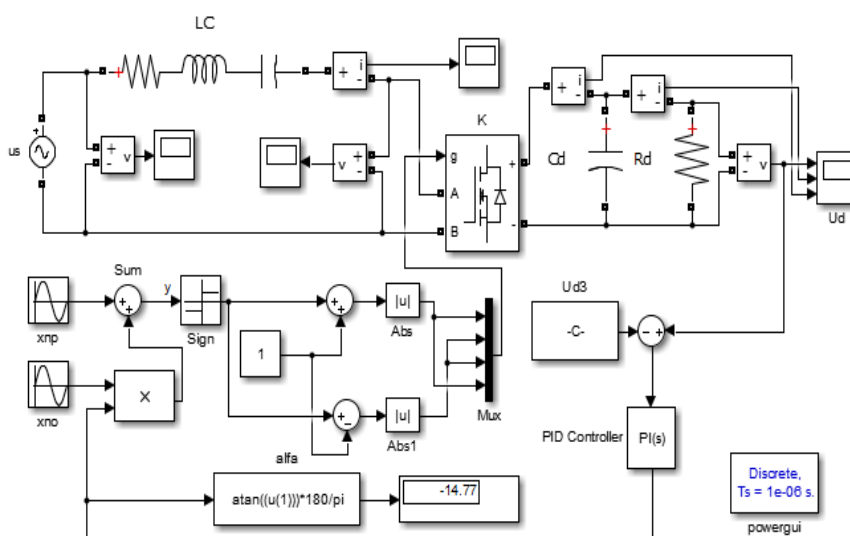


Рисунок 6 – Математична модель однофазного резонансного перетворювача в пакеті Matlab

можливість фізичної реалізації резонансного перетворювача з фазовим способом керування та його роботі з м'якою комутацією ключів. Комп'ютерне моделювання підтверджує точність розробленого алгоритму роботи мікропроцесорної системи керування.

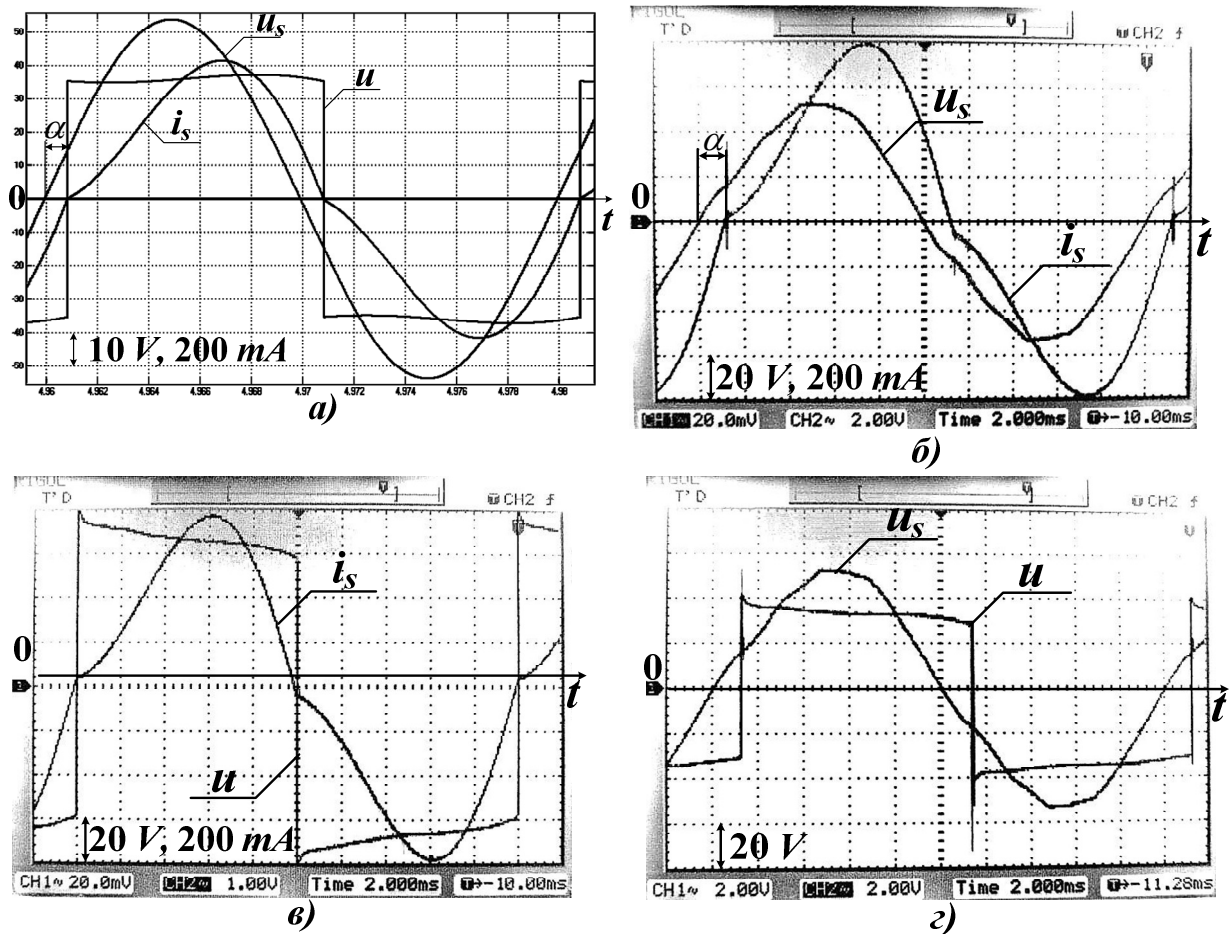


Рисунок 7 – Осцилограми струму мережі i_s , напруги мережі u_s та перед комутатором u отримані на Matlab моделі (а) та фізичній моделі (б, в, г)

При фізичному моделюванні напруга живлення змінювалась в діапазоні $\pm 15\%$ (28 В, 33 В та 38 В), тому таке саме коливання приймалось і в комп'ютерному моделюванні. Підтверджено, що фазовий спосіб керування однофазним резонансним перетворювачем дозволяє підтримувати незмінною напругу на навантаженні при коливанні напруги в мережі в діапазоні $\pm 15\%$ та опору навантаження в діапазоні $\pm 10\%$. Регулятор напруги навантаження налаштований на напругу, при якій при номінальному значенні напруги живлення відбувається м'яка комутація.

На рис. 8 представлені отримані осцилограми струму мережі, напруги мережі та перед комутатором при збільшенні і зменшенні напруги живлення на 15%. Експериментально підтверджено, що однофазний резонансний перетворювач з фазовим способом керування дозволяє отримати м'яку комутацію ключів комутатора при номінальній напрузі мережі живлення, проте, при відхиленні напруги в мережі м'яка комутація втрачається.

Подібно до аналізу впливу відхилення напруги в мережі на струм навантаження розглядаються коливання опору навантаження. Результати

комп'ютерного моделювання при збільшенні і зменшенні опору навантаження на 10% приведено на рис. 9, де проілюстровано, що вплив відхилення опору навантаження від номінального значення має значно менший вплив на налаштування режиму м'якої комутації в порівнянні з впливом відхилення напруги мережі живлення.

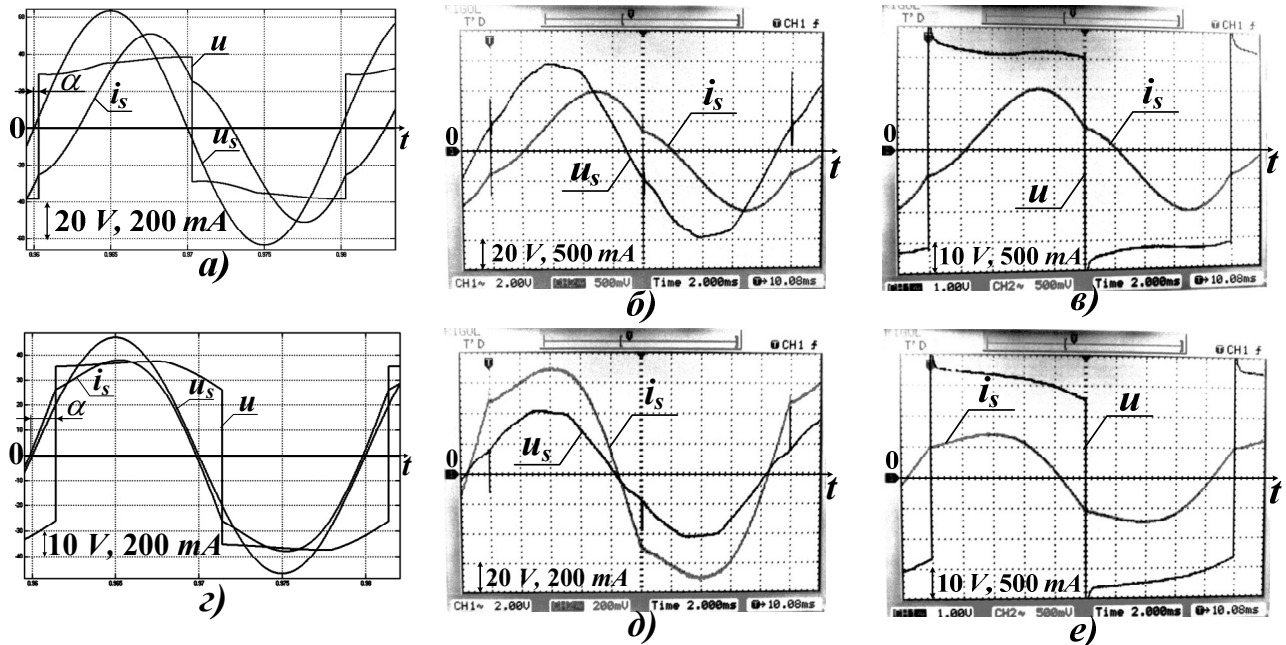


Рисунок 8 – Осцилограми струму мережі i_s , напруги мережі u_s та перед комутатором u при збільшенні напруги живлення на 15% (а, б, в) та зменшенні на 15% (г, д, е) отримані на Matlab моделі (а, г) та фізичній моделі (б, в, д, е).

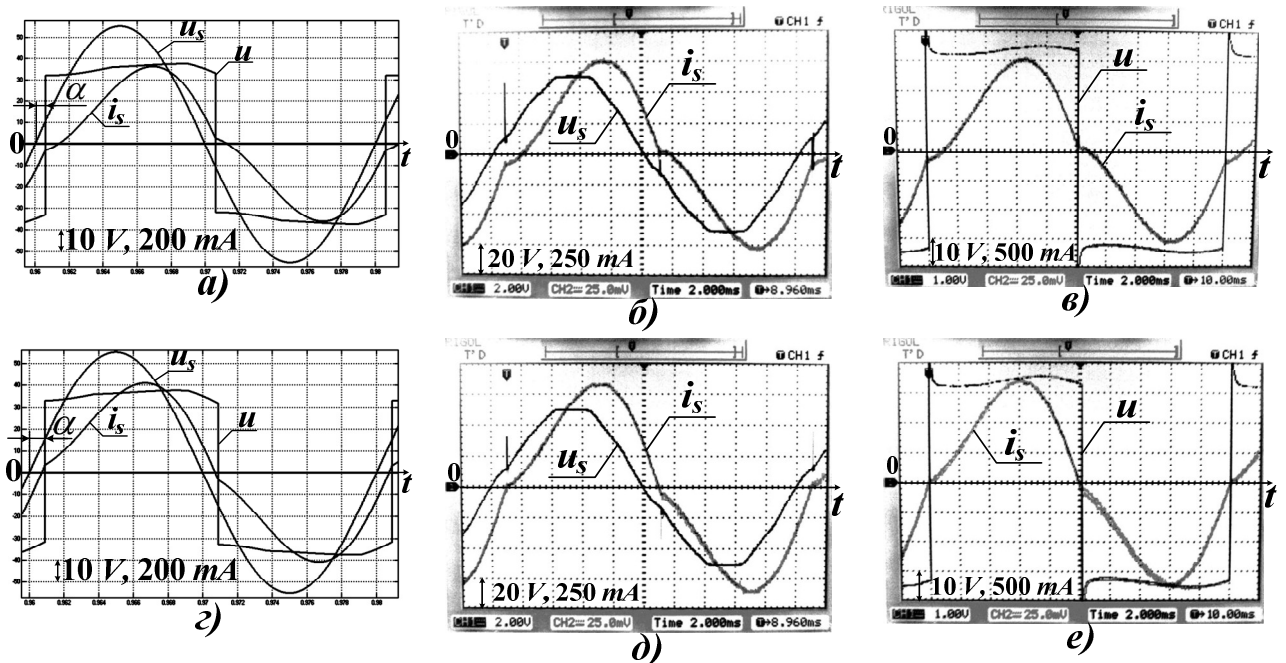


Рисунок 9 – Осцилограми струму мережі i_s , напруги мережі u_s та перед комутатором u при збільшенні опору навантаження на 10% (а, б, в) та зменшенні на 10% (г, д, е) отримані на Matlab моделі (а, г) та фізичній моделі (б, в, д, е).

У додатках наведено схему електричну принципову однофазного резонансного напівпровідникового перетворювача з фазовим способом керування, її специфікація, програма процесора LPC1114, програми для розрахунку параметрів Matlab-моделей резонансного перетворювача з фазовим способом керування, результати розрахунків параметрів однофазної двух-модульної, трифазної шестипульсної та дванадцятипульсної схем, опис основних блоків фізичної моделі однофазного резонансного перетворювача, акт впровадження в навчальний процес кафедри промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХП».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача створення енергозберігаючих напівпровідникових резонансних перетворювачів з фазовим способом керування для перспективних систем електропостачання.

1. Розроблено напівпровідниковий перетворювач для перспективної системи електропостачання FREEDM, який дозволяє забезпечити таку ж функціональність, як у існуючого в цій системі перетворювача з кращим к.к.д. за рахунок зниження комутаційних втрат шляхом використання м'якої комутації на основній частоті 50 Гц. Проведений розрахунок ефективності однофазного двух-модульного резонансного перетворювача з фазовим способом керування показав, що при налаштуванні перетворювача на режим м'якої комутації можна досягнути значення к.к.д. рівного 95.82%, що є вищим від значень отриманих в топологіях Generation-I SST та Generation-II SST в системі FREEDM.

2. Запропоновано фазовий спосіб керування зворотними резонансними перетворювачами з м'якою комутацією на основній частоті 50 Гц, який заснований на симетричному розстроєний резонансу з введенням регульованого фазового зсуву між напругами на вході силового напівпровідникового комутатора і мережі живлення змінного струму. Режим комутації в нулі струму основної частоти забезпечується регулятором вихідної напруги шляхом підтримання різниці між амплітудою фазної напруги в мережі живлення і на вході силового комутатора порядку 15-25%.

3. Проведений аналіз результатів комп'ютерного моделювання показав, що для застосування в якості погоджуючого перетворювача в системі FREEDM може використовуватись однофазна двух-модульна схема резонансного перетворювача з фазовим способом керування за умови використання додаткового активного фільтра на вході перетворювача. Комп'ютерне моделювання підтвердило перспективи використання запропонованого однофазного двух-модульного резонансного перетворювача з фазовим способом керування для роботи в інверторному режимі. Аналіз впливу підключення генераторів струму зі сторони лінії постійної напруги на характеристики роботи перетворювача, показав, що THD струму мережі погіршився до 10% проти 8.9% у номінальному режимі. Розроблений трифазний резонансний напівпровідниковий перетворювач з фазовим способом керування з м'якою комутацією на основній частоті для підключення до

трифазної мережі живлення дозволяє забезпечити таку ж функціональність як у існуючого в системі FREEDM перетворювача. Гармонійний склад первинного струму шестипульсної та дванадцятипульсної трифазних схем резонансного напівпровідникового перетворювача з фазовим способом керування є задовільним, коефіцієнт гармонік для обох схем не перевищує 5%. Для однофазної схеми коефіцієнт гармонік складає 12%, необхідно доповнити пасивний LC -фільтр резонансного перетворювача активним фільтром. Трифазні шестипульсна та дванадцятипульсна схеми дозволяють забезпечити задовільний гармонійний склад струму мережі без додаткових засобів, а також забезпечити рівномірну загрузку фаз мережі живлення.

4. Виконане моделювання режимів роботи при відхиленні напруги живлення та опору навантаження від номінальних значень в діапазоні $\pm 10\%$ показало, що система фазового керування забезпечує в цих режимах задану напругу на навантаженні, проте втрачається налаштування на режим м'якої комутації. На основі фізичного моделювання підтверджено, що фазовий спосіб керування однофазним резонансним перетворювачем дозволяє підтримувати незмінною напругу на навантаженні при коливанні напруги в мережі в діапазоні $\pm 15\%$ та опору навантаження в діапазоні $\pm 10\%$. Експериментально підтверджено, що однофазний резонансний перетворювач з фазовим способом керування дозволяє отримати м'яку комутацію ключів комутатора при номінальній напрузі мережі живлення, проте, при відхиленні напруги в мережі м'яка комутація втрачається. Для усунення цього негативного явища запропоновано секціонування дроселя послідовного фільтра та ємності конденсатора компенсації реактивної потужності, яке дозволить шляхом підключення секцій забезпечити регулювання індуктивності дроселя в діапазоні від -11.6% до $+14\%$, та ємності конденсатора від -22% до $+5\%$ від номінальних значень. Запропоновані заходи захисту при аварійних режимах холостого ходу та короткого замикання навантаження, які полягають в використанні тиристорів замість зворотних діодів в ключах комутатора, послідовного підключення симістора з конденсатором компенсації реактивної потужності, паралельного підключення симістора з конденсатором послідовного фільтра та системи захисного вимкнення. Проведене моделювання підтвердило, що запропоновані міри дозволяють уникнути появи негативних явищ як для мережі живлення, так і для навантажень.

5. Розроблено макет однофазного резонансного перетворювача з системою керування на базі процесора NXP LPC1114, який реалізує фазовий спосіб керування. Запропонований алгоритм керування однофазним резонансним перетворювачем дозволяє автоматично підтримувати задану напругу на навантаженні, або змінювати її шляхом ручного налаштування кута керування. Реалізована в алгоритмі система аварійної синхронізації дозволяє уникнути при фізичному моделюванні втрати керуючих сигналів.

6. Розроблений резонансний напівпровідниковий перетворювач з фазовим способом керування запропоновано для використання в реальних системах електропостачання та запроваджений в навчальний процес на кафедрі промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХПІ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лобко А.В. Использование принципов электронных систем вторичного электропитания для широкодиапазонного безконтактного управления коммунальными электрическими объектами / Гончаров Ю.П., Ивахно В.В., Войнович Е.А. Лобко А.В., Опанасенко Е.И. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – вип. 18 (991). – С. 21-27.

Здобувачем розроблена модель розподільної електромережі з напівпровідниковим перехідним оборотним перетворювачем з резонансним баластом, що знаходиться між мережею живлення та навантаженнями і розподіленими генераторами електроенергії.

2. Лобко А.В. Применение однофазного переменного тока повышенной частоты в низковольтных распределительных сетях электроснабжения / Сокол Е.И., Гончаров Ю.П., Ивахно В.В., Замаруев В.В., Лобко А.В., Войтович Ю.С., Опанасенко Е.И. // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2013. – Спеціальний вип. – С. 128-135.

Здобувачем обґрунтовано доцільність використання резонансного баласту для поліпшення спектра вхідного струму і безконтактного захисту об'єктів комунально-побутового призначення.

3. Лобко А.В. Однофазні резонансні перетворювачі з фазовим керуванням та м'якою комутацією на підвищеній основній частоті для електричних систем з накопичувачами енергії / Сокол Є.І., Гончаров Ю.П., Замаруєв В.В., Ивахно В.В., Кривошеев С.Ю., Стисло Б.О., Лобко А.В., Бобров М.О. // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – Харків: ТОВ «Північно-східна енергетична компанія «СВЕКО». – 2014. – Т.1, №9 (128). – С.45-52.

Здобувачем розроблена методика узгодження рівнів напруги і підтримання малого комутуваного струму в однофазному резонансному перетворювачі з фазовим способом керування.

4. Лобко А.В. Трифазні резонансні перетворювачі з фазовим керуванням та м'якою комутацією на основній частоті 50 Гц для перспективних систем електропостачання / Сокол Є.І., Гончаров Ю.П., Єресько О.В., Замаруєв В.В., Ивахно В.В., Кривошеев С.Ю., Лобко А.В., Стисло Б.О., Бобровський С.В. // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – Харків: ТОВ «Північно-східна енергетична компанія «СВЕКО». – 2014. – Т.1, №9 (128). – С. 160-167.

Здобувачу належить дослідження гармонійних складових первинного струму для однофазної, трифазної шестипульсної і трифазної дванадцятипульсної схем резонансного перетворювача з фазовим способом керування.

5. Лобко А.В. Фізичне моделювання однофазного резонансного напівпровідникового перетворювача з фазовим способом керування / Лобко А.В. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – вип. 12 (1184). – С. 47-55.

6. Пат. на корисну модель 97331 Україна, МПК H02M 7/757. Резонансний напівпровідниковий перетворювач / Сокол Є.І., Гончаров Ю.П., Єресько О.В., Замаруєв В.В., Івахно В.В., Кривошеєв С.Ю., Лобко А.В., Войтович Ю.С., Стисло Б.О.; заявник та власник патенту Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № u 2014 10098; заявл. 15.09.2014; опубл. 10.03.15, Бюл. №5.

Здобувачем запропоновано та досліджено метод компенсації комутованого струму вищих гармонік.

7. Lobko A.V. Rectifiers with a combined filtration of primary current for high-frequency power systems / Sokol E.I., Goncharov Yu.P., Eresko A.V., Ivakhno V.V., Krivosheev S.Yu., Zamaruiev V.V., Lobko A.V., Voytovich Yu.S. // 8 th International Conference-Workshop [“Compatibility and Power Electronics”], (Ljubljana, 5-7 June 2013) / University of Ljubljana (Slovenia), Gdynia Maritime University (Poland) [et al]. – Ljubljana: University of Ljubljana. – 2013. – P. 316-319.

Здобувачу належить визначення параметрів випрямляча з резонансним баластом та дослідження аварійних та перехідних режимів роботи.

АНОТАЦІЇ

Лобко А.В. Енергозберігаючі напівпровідникові перетворювачі для перспективних систем електропостачання. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2016.

Дисертація присвячена розробці високоефективних та енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів для застосування в нових та перспективних системах електропостачання.

Розроблено напівпровідниковий перетворювач з фазовий способом керування для перспективної системи електропостачання FREEDM, який виконує аналогічні функції наявного в цій системі перетворювача і дозволяє отримати кращі енергетичні показники за рахунок зниження комутаційних втрат за допомогою м'якої комутації на основній частоті 50 Гц. Запропонований фазовий спосіб керування заснований на симетричному розладі резонансу і введенні регульованого фазового зсуву між напругами на вході силового напівпровідникового комутатора і мережі змінного струму.

У дисертаційній роботі запропонована методика розрахунку основних параметрів перетворювача, проаналізовано якість його роботи, за допомогою комп'ютерного моделювання досліджено однофазна і трифазні схеми перетворювача в різних режимах роботи, а також запропоновані способи захисту від аварійних режимів. Експериментальні дослідження на фізичній моделі підтвердили достовірність теоретичних результатів.

Ключові слова: випрямляч активний, напівпровідниковий перетворювач резонансний, енергетичні показники якості електроенергії, м'яка комутація, фазовий спосіб керування, математичне моделювання, фізичне моделювання.

Лобко А.В. Энергосберегающие полупроводниковые преобразователи для перспективных систем электроснабжения. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 - полупроводниковые преобразователи электроэнергии. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2016.

Диссертация посвящена разработке высокоэффективных и энергосберегающих полупроводниковых преобразователей для применения в новых и перспективных системах электроснабжения.

Разработан полупроводниковый преобразователь для перспективной системы электроснабжения FREEDM, который, выполняя аналогичные функции имеющегося в этой системе преобразователя, позволяет за счет снижения коммутационных потерь путем использования мягкой коммутации на основной частоте 50 Гц получить лучшие энергетические показатели.

В диссертационной работе предложено фазовый способ управления обратимыми резонансными преобразователями с мягкой коммутацией на основной частоте 50 Гц. Он основан на симметричной расстройке резонанса и введении регулируемого фазового сдвига между напряжениями на входе силового полупроводникового коммутатора и сети переменного тока. Показано, что коммутация в нулях тока на основной частоте обеспечивается регулятором выходного напряжения, который поддерживает разницу между амплитудой фазного напряжения в сети питания и на входе силового коммутатора порядка 15-25%.

Отмечается, что разработанный трехфазный резонансный полупроводниковый преобразователь с фазовым способом управления и мягкой коммутацией на основной частоте при подключении к трехфазной сети питания обеспечивает выполнение таких же функций как существующий в системе FREEDM преобразователь, но при этом обеспечивает равномерную загрузку фаз сети. Гармонический состав первичного тока шестипульсной и двенадцатипульсной трехфазных схем резонансного полупроводникового преобразователя с фазовым способом управления является удовлетворительным без применения дополнительных мер, коэффициент гармоник для обеих схем не превышает 5%. Для однофазной схемы коэффициент гармоник составляет 12%, поэтому необходимо дополнить пассивный LC-фильтр резонансного преобразователя активным фильтром.

С помощью компьютерного моделирования установлено, что для применения в качестве согласовывающего преобразователя в системе FREEDM может использоваться однофазная двух-модульная схема резонансного преобразователя с фазовым способом управления, но при условии использования дополнительного активного фильтра на входе преобразователя. Компьютерное моделирование подтвердило также возможность использования предложенного однофазного двух-модульного резонансного преобразователя с фазовым способом управления для работы в инверторном режиме.

Проведенный расчет эффективности однофазного двух-модульного резонансного преобразователя с фазовым способом управления показал, что при настройке преобразователя на режим мягкой коммутации можно достичь значения к.п.д. равного 95.82%, что больше значений полученных в топологиях Generation-I SST и Generation-II SST в системе FREEDM.

Экспериментально подтверждено, что однофазный резонансный преобразователь с фазовым способом управления позволяет получить мягкую коммутацию ключей коммутатора при номинальном напряжении питающей сети. Выполненное компьютерное и физическое моделирование режимов работы при отклонении напряжения питания и сопротивления нагрузки от номинальных значений в диапазоне $\pm 10\%$ показало, что система фазового управления обеспечивает в этих режимах заданное напряжение на нагрузке, однако теряется настройка на режим мягкой коммутации. Для устранения этого негативного явления предложено использование секционирования дросселя последовательного фильтра и емкости конденсатора компенсации реактивной мощности.

Предложенные меры защиты при аварийных режимах холостого хода и короткого замыкания нагрузки, заключаются в использовании тиристоров вместо обратных диодов в ключах коммутатора, последовательного подключения симистора с конденсатором компенсации реактивной мощности, параллельного подключения симистора с конденсатором последовательного фильтра и системы защитного отключения. Проведенное моделирование подтвердило эффективность предложенных мер и показало, что они позволяют избежать появления негативных явлений как для сети, так и для нагрузок.

Продемонстрировано, что разработанный алгоритм управления однофазным резонансным преобразователем позволяет автоматически поддерживать заданное напряжение на нагрузке, или менять ее путем ручной настройки угла управления. Предложенная и реализованная в алгоритме система аварийной синхронизации позволила избежать при физическом моделировании потери управляющих сигналов.

Ключевые слова: выпрямитель активный, полупроводниковый преобразователь резонансный, энергетические показатели качества электроэнергии, мягкая коммутация, фазовый способ управления, математическое моделирование, физическое моделирование.

Lobko A.V. Energy-saving semiconductor converters for perspective power systems. – The manuscript.

Dissertation on competition degree of candidate of technical sciences of speciality 05.09.12 – Semiconductor converters of electric energy. – National Technical University «Kharkov Politechnical Institute», Kharkov, 2016.

Dissertation is devoted to development of high-performance and energy-saving semiconductor converters for applications in new and perspective power systems.

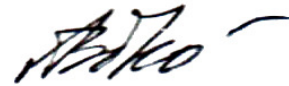
Developed semiconductor converter with phase control method for forward-looking FREEDM electrical system is presented. It is shown that that converter performs the same functions available in the converter of this system and allows to

obtain the best energy performance by reducing switching loss using soft switching at the fundamental frequency 50 Hz. It is demonstrated that the proposed phase control method is based on the symmetric detuning of the resonance and the introduction of a controlled phase shift between the voltages at the input of the power semiconductor switch and the AC mains.

In the dissertation a method of calculating the basic converter settings is proposed. The quality of his work is analyzed. With the help of computer simulations single and three phase converter circuit in different operating modes are studied. The methods of protection from emergency modes are proposed.

Experimental studies on the physical model confirmed the accuracy of the theoretical results.

Key words: active rectifier, semiconductor resonant converter, energy performance power quality, soft switching, phase control method, mathematical modeling, physical modeling.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Abdo', with a horizontal line extending to the right.

Відповідальний за випуск
к.т.н. професор кафедри промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХП»
Кривошеєв С.Ю.

Підписано до друку 19.07.2016 р. Формат 60×90/24
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний
Друк – різнограф. Ум. друк. аркушів 0,9
Наклад 100 прим. Зам. № 123456

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
Тел. 7-170-354

www.modelist.in.ua