

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Кафедра _____ Електрорухомий склад залізниць _____
(повна назва)

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

Гетьман Г.К.
(підпис) (ПІБ)

20 ____ р. ____ « ____ »

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань _____ 14 Електрична інженерія _____
(шифр) (назва)

Спеціальність _____ 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка _____
(код) (повна назва)

Спеціалізація _____ Електричний транспорт _____
(повна назва)

Тема «Підвищення коефіцієнта потужності електропоїздів змінного струму в режимі рекуперації»

Theme Increasing the power factor of AC electric trains in the recovery mode train

Керівник дипломної роботи _____ проф. _____ Саблін О.І.
(посада) (підпис) (ПІБ)

Нормоконтролер _____ проф. _____ Саблін О.І.
(посада) (підпис) (ПІБ)

Студент групи _____ ЕТ1826 _____ Шарафан М.О.
(група) (підпис) (ПІБ)

Student _____ Sharafan Maxim _____
(Family name)

Дніпро
2020

Вступ

Актуальність теми. В даний час у 90% експлуатованого парку моторвагонного рухомого складу (МВРС) змінного струму, до складу якого входять електропоїзди змінного струму з колекторними тяговими електродвигунами (ТЕД) серій ЕР9^{В/і}, ЕПЛ9Т, та російського виробництва ЕД9Т, ЕД9М, зберігається проблема високих витрат електроенергії, зважаючи на низький коефіцієнт потужності (K_m), який в режимі тяги не перевищує 0,86, а такий як енерго і ресурсозберігаючий режим – рекуперативне гальмування взагалі відсутнє, з огляду на те, що на перетворювачах в електропоїздах застосовується морально застаріла некерована діодна база.

Експлуатований парк МВРС змінного струму російського виробництва, що складається з електропоїздів змінного струму серії ЕД9Е і ЕПЗД, дозволяє здійснювати рекуперативне гальмування, а також плавне регулювання напруги живлення, що подається на колекторні ТЕД за рахунок застосування тиристорних випрямно-інверторних перетворювачів (ВІП) і випрямних установок збудження (ВУВ). Однак за основу цих перетворювачів було прийнято технічне рішення аналогічно дослідної моторвагонної секції електропоїзда ЕР7, переобладнання якої було проведено ще в 1967 р. Коефіцієнт потужності даних електропоїздів в режимі рекуперативного гальмування в максимальному його прояві становить не більше 0,71, що доводить неефективне використання електричної енергії з тягової мережі.

Як показує піввікова практика, електрорухомий склад (ЕРС) однофазного змінного струму, виконаний на базі силових тиристорів з їх алгоритмами управління, має багато недоліків, основними з них є: високі витрати електроенергії на тягу; тиристорна база перетворювачів та алгоритми їх управління є морально застарілими (напівкеровані); значні втрати активної електроенергії в системі тягового електропостачання; завантаження тягової мережі реактивної енергії, що знижує пропускну здатність тягового ділянки та ін.

Все це підкреслює проблему енергозбереження при роботі електропоїздів у приміському сполученні. Крім того, нераціональне споживання електричної енергії закладено в завищені вартості тарифів на проїзд, що в свою чергу позначається на зниженні конкурентоспроможності МВРС перед іншими видами транспорту.

Метою роботи є підвищення коефіцієнта потужності моторвагонного рухомого складу змінного струму в режимі рекуперативного гальмування на основі вдосконалення випрямно-інверторних перетворювачів, випрямних установок збудження і способів їх управління.

Завдання роботи:

- виконати аналіз вітчизняних і зарубіжних силових схем моторвагонного рухомого складу змінного струму і способи їх управління, визначити їх переваги і недоліки;
- розробити способи управління ВІП, ВУВ на базі IGBT-транзисторів і їх схемотехнічні рішення, що може дозволити підвищити коефіцієнт потужності МВРС змінного струму в режимі рекуперативного гальмування.

Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні способу управління ВІП моторного вагона на базі IGBT-транзисторів, що забезпечує симетрію змінного струму щодо напруги мережі та підвищує коефіцієнт потужності електропоїзда в режимі рекуперативного гальмування.

Практичне значення роботи полягає у можливості досліджувати електромагнітні процеси роботи моторного вагона електропоїзда зі штатними тиристорними і пропонованими транзисторними ВІП, ВУВ в режимі рекуперативного гальмування і способи їх управління.

1 ОГЛЯД СИЛОВИХ СХЕМ СУЧАСНОГО МОТОРВАГОННОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ЗМІННОГО СТРУМУ

Одними з найпоширеніших систем тягового електропостачання електрифікованих залізниць на сьогодні є системи постійного струму з напругою 3 кВ, змінного однофазного струму частоти 50 Гц з напругою 25 кВ та змінного однофазного струму зниженої частоти 16 $\frac{2}{3}$ Гц з напругою 15 кВ.

На сьогоднішній день в Україні електрифікація залізниць здійснюється переважно за системою змінного струму напругою 25 кВ, при цьому скорочуючи електрифікацію на постійному струмі 3 кВ, з огляду на однозначність переваг даного виду системи тягового енергопостачання, а саме капіталовкладення на електрифікацію тягових ділянок змінному струмом на 15-18% нижче, ніж при постійному, при однакових обсягах вантажних перевезень вони вимагають на 15-20% менше локомотивів і локомотивних бригад, висока напруга в контактній мережі, дозволяє істотно збільшити відстань між тяговими підстанціями (40-60 км) і зменшити переріз контактного проводу в 2-3 рази, що говорить про істотну економію міді (більше двох тон на кілометр), в даній системі енергопостачання використовуються більш прості тягові підстанції, на яких встановлюється тільки трансформаторне обладнання [1, 2, 6].

На сучасному вітчизняному МВРС змінного струму обладнання для перетворення напруги живлення для потреб тягових двигунів знаходиться в підвагонному просторі електропоїзду, і є одним з найважливіших елементів в ланцюжку енергосистеми «контактна мережа – тяговий трансформатор – випрямно-інверторний перетворювач – тяговий електродвигун» є ВІП. ВІП здійснює перетворення однофазного змінного струму частотою 50 Гц в постійний і плавне регулювання напруги живлення, що подається на ТЕД в режимі тяги. В режимі рекуперативного гальмування ВІП перетворює постійний струм в змінний частотою 50 Гц і плавно регулює проти-ЕРС інвертора. Від його характеристик залежать енергетичні показники електропоїзда в режимах тяги і рекуперативного гальмування, а також ресурс роботи і надійність електронного та електричного обладнання МВРС.

Історія розвитку перетворювачів МВПС змінного струму бере початок з 50-х років минулого століття, яка безпосередньо залежить від науково-технічного прогресу в області розробок силових напівпровідникових приладів (СНП). Поява нових типів СНП відкривала перед інженерами нові можливості і принципи управління перетворювачами, але в той же час створювала певні проблеми і завдання в енергоефективності та надійності МВРС.

1.1 Силові схеми МВРС змінного струму з колекторними тяговими електродвигунами

До першого покоління тягового приводу МВПС відноситься привід, до складу якого входить ВУ на базі ртутних вентилів-ігнітронів. При появі кремнієвих силових напівпровідникових приладів, ігнітронні ВУ стали витіснятися напівпровідниковими на базі кремнієвих діодів (рис. 1.1).

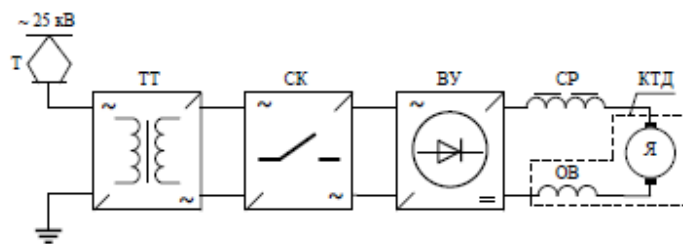


Рисунок 1.1 – Тяговий привід моторвагонного рухомого складу з випрямною установкою на базі діодів: Т – струмоприймач; ТТ – тяговий трансформатор; СК – силовий контролер; ВУ – випрямна установка; СР – згладжуючий реактор; КТД – колекторний тяговий двигун (Я – якірня обмотка, ОВ – обмотка збудження)

Для захисту від перенапруг при комутації кремнієвих СНП, паралельно їм підключали снабберні кола, що складаються з послідовно з'єднаних резисторів і конденсаторів. Рівномірний розподіл зворотної напруги в плечах ВУ, в непровідний напівперіод, забезпечувалося за допомогою паралельного, щодо вентилів, підключення резисторів.

Таблиця 1.1 – Технічні параметри кремнієвого діода ВЛ200

Номінальна напруга, В	Повторювана зворотна імпульсна напруга, В	Струм тривалого режиму, А	Спосіб охолодження
1600	1200	200	Природне, повітряне

За кордоном також активно проводилися роботи з проектування і випуску електропоїздів змінного струму з ВУ на базі діодів. У 1968 р. у США випущений електропоїзд «Метролайнер» [13]. Тяговий трансформатор цього електропоїзда має три вторинні обмотки, які через ВУ живлять колекторні тягові двигуни (КТД). Одна з вторинної обмотки трансформатора доповнена системою фазового регулювання напруги, в якій використані ігнітрони типу GEGL-8420. ВУ складається з трьох мостів, з'єднаних послідовно, на базі кремнієвих діодів GE4JA90P, рис. 1.2.

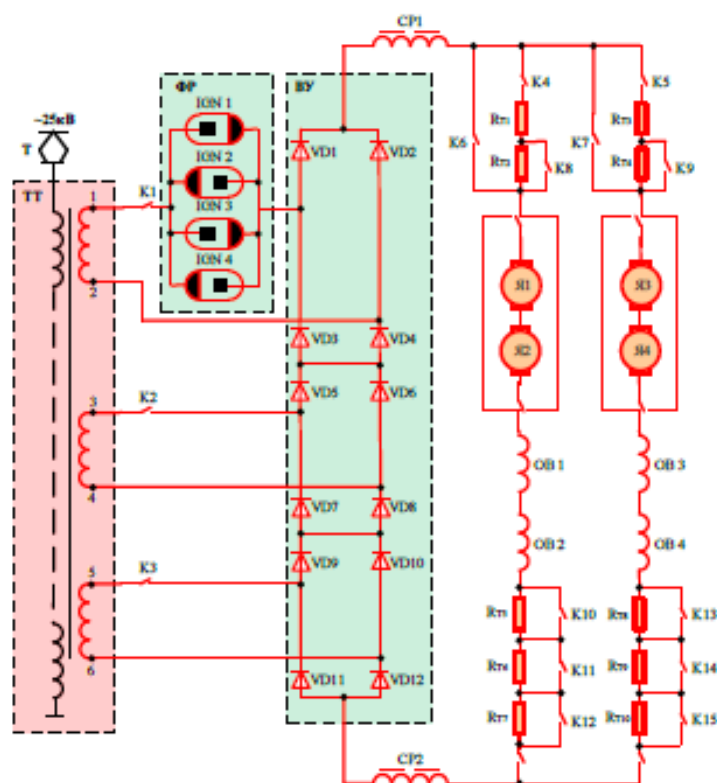


Рисунок 1.2 – Принципова схема американського електропоїзда "Метролайнер" з випрямною установкою на базі діодів: Т – струмоприймач; ТТ – тяговий трансформатор; ФР – фазовий регулятор; ВУ – випрямна

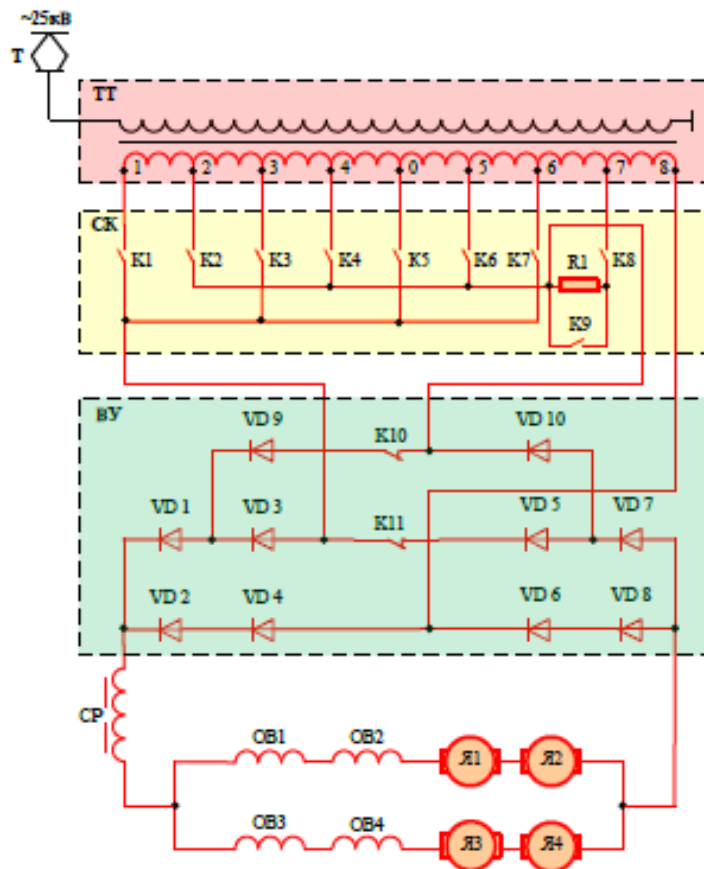
установка; СР1-СР2-згладжує реактор; Я1-Я4-обмотка якірна ТЕД; ОВ1-ОВ4-обмотка збудження Тед

Однак силові кремнієві вентилі, в той час, відрізнялися високою чутливістю до перенапруг. Як тільки зворотна напруга, що припадає на вентиль, перевищувало певну величину, то напівпровідниковий прилад виходив з ладу. Аналіз пошкоджень показує, що причиною відмов вентилів було або перекриття по поверхні переходу, або тепловий пробій.

Через високу чутливість до перенапруг доводиться послідовно включати велику кількість діодів, забезпечуючи подвійний і більший запас. Крім того, для рівномірного розподілу зворотного напруги і для гасіння комутаційних напруг вони шунтуються опорами $R_{ш}$ і елементами RC . Для виявлення несправних вентилів на моторних вагонах є спеціальний захист. Все це призводить до ускладнення і подорожчання ВУ і не завжди забезпечує достатню надійність. Крім того, кремнієва діодна база ВУ не дозволяла забезпечувати плавне регулювання напруги живлення, що подається на ТЕД в режимі тяги, а також здійснювати рекуперативного гальмування.

Удосконалення кремнієвих вентилів проходило за кількома напрямками. З одного боку, це підвищення їх класу, в наслідок чого збільшується струмове навантаження, а з іншого - вдосконалення технології і вишукування найбільш доцільної структури кремнію для виготовлення переходів.

Через три роки здійснено випуск електропоїзда серії ЕР9П з новими, кремнієвими діодами з лавинним пробоем ВЛ200-12-0,68, що володіють пропускною здатністю струму по всій поверхні переходу при пробіі замикаючого шару зворотним напругою, в слідстві чого вентиль після пробією зберігає працездатний стан, за рахунок інтенсивного розсіювання енергії, рис. 1.3.



Малюнок 1.3 - Принципова схема електропоїзда серії EP9П з випрямною установкою на базі кремнієвих діодів і вентильним переходом: Т - струмоприймач; ТТ - тяговий трансформатор; СК - силовий контролер; ВУ - випрямна установка; СР - згладжуючий реактор; Я1-Я4 - обмотка якірня ТЕД; ОВ1-ОВ4 - обмотка збудження ТЕД

Висока надійність ВУ з лавинними вентилями, виключає можливість використання контурів RC , $R_{ш}$, опорів зв'язку і пристроїв захисту, що реагують на пробій вентиля, що тягне за собою менші експлуатаційні витрати на утримання ВУ.

Одним з останніх МВРС з ВУ на базі діодів є електропоїзд серії ЕД9М російського виробництва [11]. На даному електропоїзді встановлена нова система регулювання струму в режимі реостатного гальмування. Суть системи полягає в тому, що якірні обмотки ТЕД з'єднуються в два контури, що містять гальмівні резистори, перемикання яких відбувалося за допомогою гальмівного контролера. Регулювання струму в обмотках збудження ТЕД в режимі

гальмування здійснювалося через напівкерований тиристорний міст, який отримує живлення від секції обмотки тягового трансформатора, рис. 1.4.

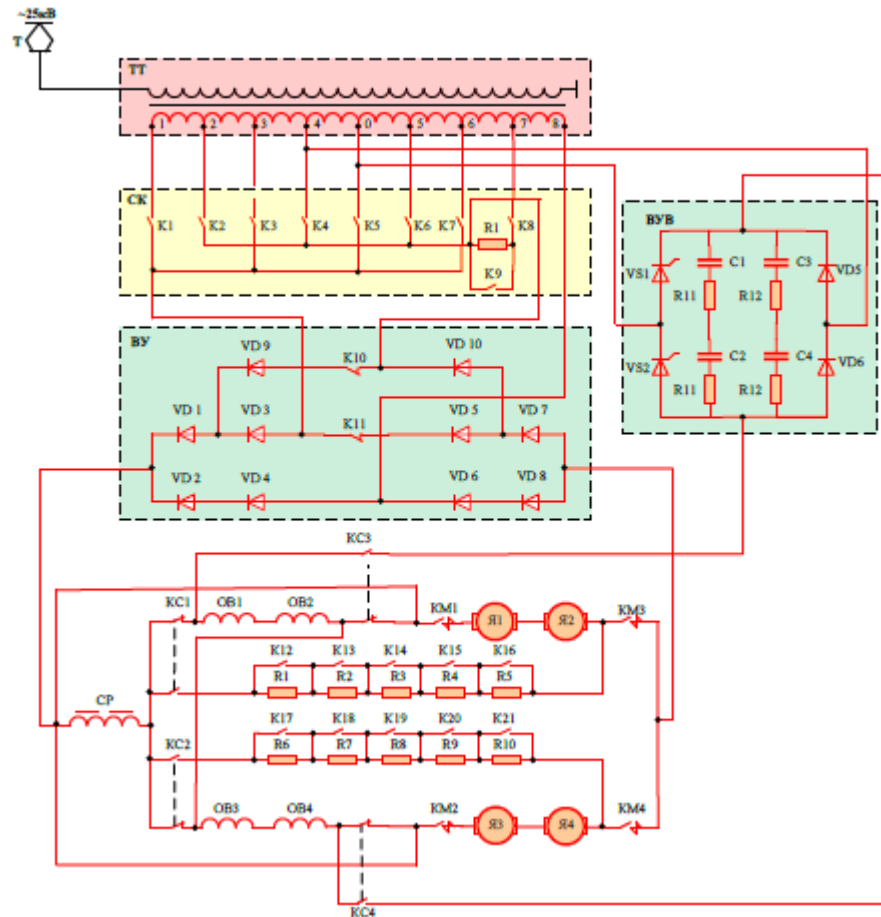


Рисунок 1.4 – Принципова схема електропоїзда серії ЕД9М з випрямною установкою збудження: Т – струмоприймач; ТТ – тяговий трансформатор; СК – силовий контролер; ВУ – випрямна установка; СР – згладжуючий реактор; Я1-Я4 – обмотка якірна ТЕД; ОВ1-ОВ4 – обмотка збудження ТЕД; ВУВ – випрямна установка збудження

Переваги електропоїзда з реостатним гальмуванням полягає в полегшенні праці машиністів завдяки автоматизації процесу гальмування, підвищення безпеки руху за рахунок другого виду гальма, зниження витрати гальмівних колодок і значне зменшення забруднення верхньої будови колії чавунним пилом від гальмівних колодок.

Таблиця 1.3 – Моделі випрямних установок на базі кремнієвих діодах застосовувані на вітчизняному моторвагонному рухомому складі

Серія електроп оїзду	Модель ВУ	Використовувані діоди ВУ	Кількість діодів ВУ, шт	Додаткові зміни в конструкції ВУ
ЕР9П	ВУТ-800	ВКД-200-4; ВК-200-4	216	-
ЕР9П	УВП-1	ВКД-200-6	144	Виключені струмові дільники; паралельне з'єднання ланцюжків вентилів через резистори
ЕР9П	ВУТ-800 (модернізація)	ВЛ-200-12	84	Відсутність резисторів зв'язку, а також пристрою, що реагує на пробій вентилів
ЕР9Е	УПВ-3	ВКЛД-200-8Б	84	-
ЕР9Е-565 (дослідний)	УПВ-5А	ВЛ7-320-12	60	Міст з розщепленими кінцями двох плечей для забезпечення без струмової комутації на перехідних щаблях
ЕД9М	В-ОПЕД 400-1,65к-У1	ДЛ153-1250	16	-

Однак тяговий привід другого покоління з ВУ на базі діодів показав наступні недоліки: низька величина коефіцієнта потужності моторвагона в режимі тяги – 0,86, що говорить про значне споживання реактивної потужності з мережі; відсутність ресурсозберігаючого режиму – рекуперативного гальмування, ступінчасте регулювання напруги; наявність габаритного силового контролера; для забезпечення плавного регулювання напруги живлення на тягових двигунах. При роботі МВРС необхідна значна кількість робочих позицій, що характеризується збільшеною кількістю виводів тягового трансформатора, внаслідок чого це призводить до збільшених масогабаритних показників, витраті міді, вартості та ін.

1.2 Силові схеми МВРС змінного струму з випрямно-інверторними перетворювачами на базі силових тиристорів

Третє покоління тягового приводу ґрунтується на появі СНП – тиристорів, рис. 1.5. Силові тиристори здійснюють випрямлення змінного струму в постійний, плавне регулювання випрямленої напруги, а також інвертування постійного струму в змінний, що дає можливість МВРС застосовувати ресурсозберігаючий режим – рекуперативне гальмування [8, 12].

Перші спроби створення електропоїзда змінного струму з безконтактним регулюванням випрямленої напруги і застосуванням рекуперативного гальмування були зроблені в 1967 р. Для цього був переобладнаний електровагон №2 двовагонної дослідної секції серії ЕР7.

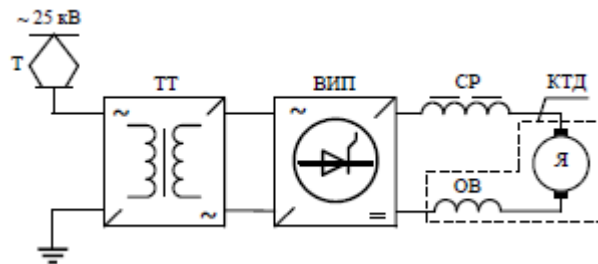


Рисунок 1.5 – Тяговий привід МВПС з випрямно-інверторним перетворювачем на базі тиристорів: Т – струмоприймач; ВИП – випрямно-інверторний перетворювач; ТТ – тяговий трансформатор; СР – згладжує реактор; КТД – колекторний тяговий двигун (Я – якірна обмотка, ОВ – обмотка збудження)

На рис. 1.6 показана принципова схема електропоїзда ЕР7 на базі силових тиристорів, в якій використовується вторинна обмотка тягового трансформатора (ТТ) з чотирма виводами, розділена на малі 1-2, 2-3 і велику 3-4 секції. Тиристори VS1-VS10 приєднані до виводів вторинної обмотки, таким чином, щоб між будь-якими двома виводами міг бути утворений керований випрямний міст. Число послідовно включених тиристорів вибрано відповідно до напруги секцій трансформатора. Дільники струму в гілках не передбачені. Пульсація випрямленого струму знижувалася за допомогою

згладжує реактора СР. Двигуни 1-4 з'єднувалися по два послідовно в дві паралельні гілки.

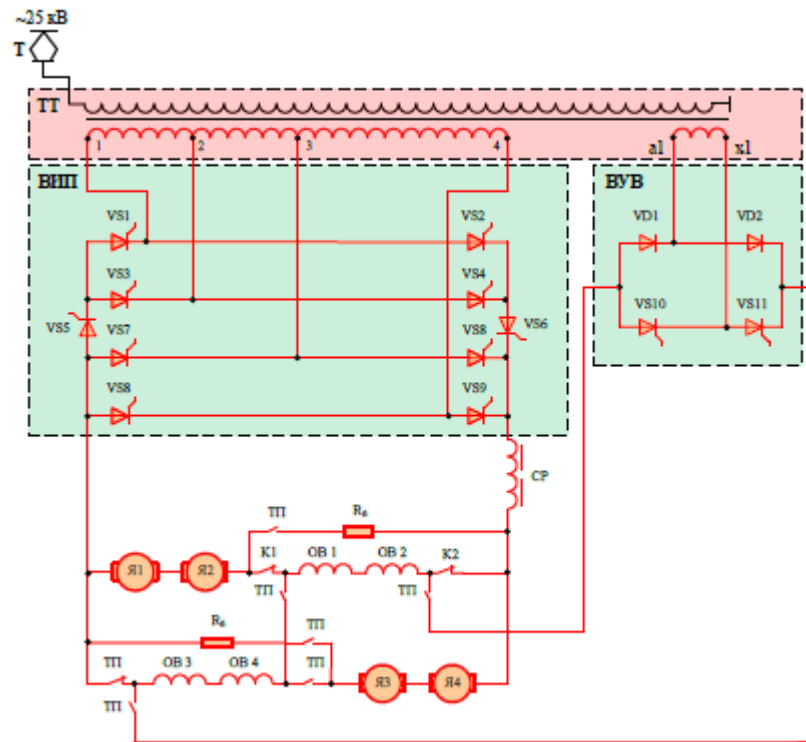


Рисунок 1.6 – Принципова схема дослідного електропоїзда EP7 з випрямно-інверторним перетворювачем на базі силових тиристорів: Т - струмоприймач; ТТ - тяговий трансформатор; ВПП – випрямно-інверторний перетворювач; ВУВ – випрямна установка збудження; СР – згладжує реактор; Я1-Я4 – обмотка якірня ТЕД; ОВ1-ОВ4 – обмотка збудження ТЕД

Силовая схема секції має наступні характерні особливості: при трьох секціях і чотирьох виводах вторинної обмотки забезпечується чотири ступені регулювання з різними коефіцієнтами трансформації, за рахунок такої особливості конструкція трансформатора стає простіше; перехід з одної ступені на іншу відбувався за допомогою електронної системи, що забезпечувало швидкий перехід без падіння струму і сили тяги, тим самим забезпечувалося плавне регулювання випрямленої напруги.

Перехід в рекуперативний режим відбувався за допомогою гальмівних перемикачів ТП, обмотка збудження з'єднувалася послідовно і підключалася до випрямної установки збудження (ВУВ), що стосується якірної обмотки то

послідовно їй підключався блок баластних резисторів (ББР) R_b для вирівнювання струму в якірних обмотках тягових електродвигунів.

Автоматичний плавний пуск і гальмування секцій відбувається за допомогою спеціального статичного пристрою, що змінює фазу керуючих імпульсів і здійснює безконтактний перехід з одних секцій трансформатора на інші в залежності від величини випрямленого струму силового ланцюга.

У тяговому режимі регулювання починається з виводів секції трансформатора 2-3 відповідною зміною фази керуючих імпульсів, що подаються на тиристори, приєднані до виводів цієї секції трансформатора. Після закінчення регулювання на виводах секції трансформатора 2-3 починається регулювання на виводах секції 1-2, забезпечуючи другу ступінь регулювання. При цьому випрямлена напруга визначається сумою напруги виводів 2-3 і 1-2 секцій трансформатора. Потім починається регулювання на третій ступені, яка визначається напругою 2-3 і 3-4 секцій трансформатора. Четверта ступінь утворюється напругою всіх трьох секцій. Далі передбачено три ступені ослаблення поля двигунів до 25%.

У інверторному режимі регулювання починається з максимальної напруги вторинної обмотки і відбувається в зворотному порядку. На високих швидкостях гальмівний струм регулюється плавною зміною напруги випрямною установкою збудження, а на середніх і низьких швидкостях – переходом на більш низькі зони і регулювання кута відмикання тиристорів на кожній зоні. В кінці першої зони передбачений режим гальмування противключення для забезпечення повної зупинки секції. У цьому режимі силовий перетворювач працює в якості випрямляча на коло якорів тягових двигунів і баластних опорів, а по обмотках збудження двигунів протікає струм збудника, напрямом якого відповідає обертанню якорів проти напрямку руху секції. Перехід з режиму рекуперації в режим противключення відбувається шляхом зміни фази вимикання тиристорів, що дає можливість плавного переходу.

Сигнал заданого рівня від контролера машиніста в тяговому режимі надходить на задаючий пристрій, потім в блок порівняння, порівнюється з сигналом, що надходить від датчика силового струму. Різниця сигналів подається на фазозсувний пристрій, де відбувається відповідна зміна фази керуючих імпульсів, що надходять від генератора імпульсів і електронного перемикача зон регулювання. Імпульси управління синхронізуються з мережею живлення за допомогою синхронізуючого пристрою. Після фазозсувного пристрою і перемикача зон керуючі імпульси надходять на підсилювач імпульсів і далі на керуючі електроди тиристорів плечей ВП. При зміні фази тиристорів змінюється струм в силовому ланцюзі і датчик струму видає безперервно сигнали на блок синхронізації.

Далі процес регулювання повторюється. При закінченні регулювання на будь-якій зоні електронний перемикач зон миттєво перемикається на іншу зону і процес підтримки пускового струму триває, що забезпечує задану силу тяги електропоїзда.

У гальмівному режимі процес регулювання проводиться аналогічно. Крім регулювання ВП, здійснюється і зміна кута відмикання тиристорів ВУВ. ВУВ отримує керуючі імпульси від свого генератора через фазозсувний пристрій і підсилювач ВУВ. Автоматична підтримка сталості кута запасу в інверторному режимі здійснюється за допомогою вимірювача кута комутації, що впливає на фазозсувний пристрій.

Регулювання напруги відбувається плавно на всіх чотирьох зонах. Рекуперативне гальмування секції електропоїзда забезпечується плавно до повної зупинки. Переходи зі ступені на ступень, так само, як і в тяговому режимі, проходить протягом частини напівперіоду напруги без помітних поштовхів гальмівного зусилля.

При чотирьохзонному фазовому регулюванні коефіцієнт потужності змінюється в залежності від відносної випрямленої напруги в режимі рекуперативного гальмування в межах від 0,52 до 0,89 при кутах запасу від 0° ел. град. до 30° ел. град., рис. 1.7, а.

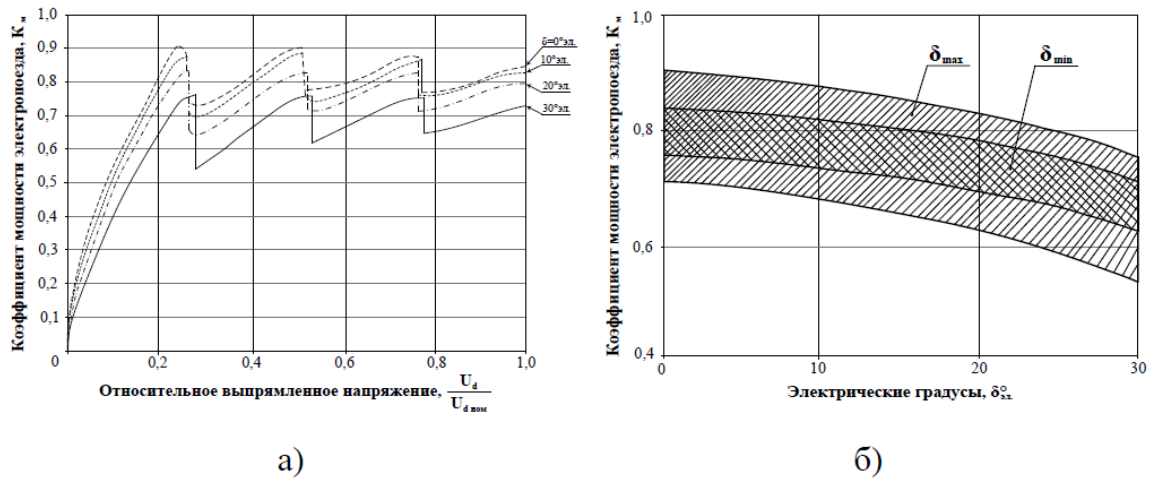
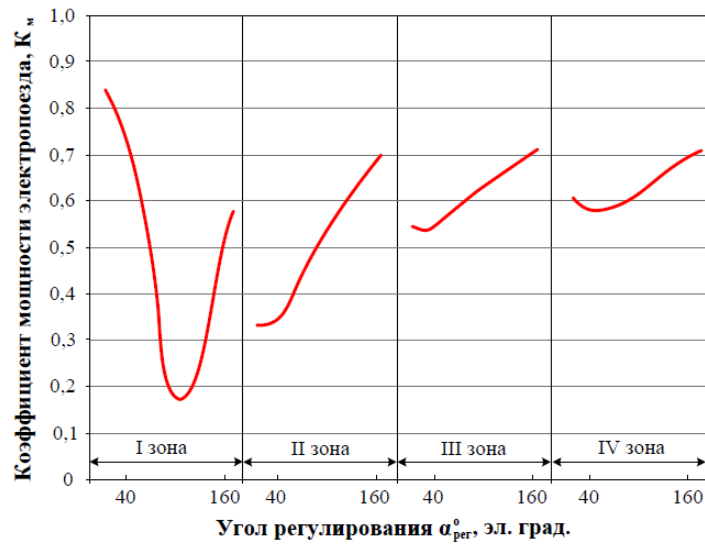


Рисунок 1.7 – Залежності коефіцієнта потужності інвертора в режимі рекуперативного гальмування: а) від відносного випрямленої напруги при різних кутах регулювання; б) від різних кутів запасу

Зі збільшенням кута запасу коефіцієнт потужності знижується, рис. 1.7, б при підвищенні його від нуля до 10 ел. град. Коефіцієнт потужності зменшується всього на 1-3%, а при збільшенні з 20 до 30 ел. град, зниження становить вже 6-8%.

Експериментальні криві коефіцієнта потужності в гальмівному режимі від кута регулювання показують, що максимальних його значень отримати не вдається через наявність «мертвих зон» кутів регулювання, в яких не відбувається збільшення випрямленої напруги, рис. 1.8. У першій зоні зростання коефіцієнта потужності при малих кутах регулювання пояснюється переходом в режим противключення. "Мертві зони" кута регулювання в умовах експерименту становили 40 ел. град. [8, 12].

В цей же час на залізниці Швеції були поставлені електропоїзди змінного струму Х1 з ВУ на базі тиристорів типу ТУД-300 (номінальні параметри: струм – 285 а, напруга 1300 В). ВУ була розділена на три послідовно з'єднаних напівкерованих моста. Один випрямний міст розділений, для запобігання утворення кругового вогню та ТД. Для захисту тиристорів від коротких замикань застосовуються швидкодіючі запобіжники, рисунок 1.9.



Малюнок 1.8 - Експериментальні криві коефіцієнта потужності по зонах електропоїзда змінного струму ЕР7 на базі силових тиристорів в режимі рекуперативного гальмування в залежності від кута регулювання

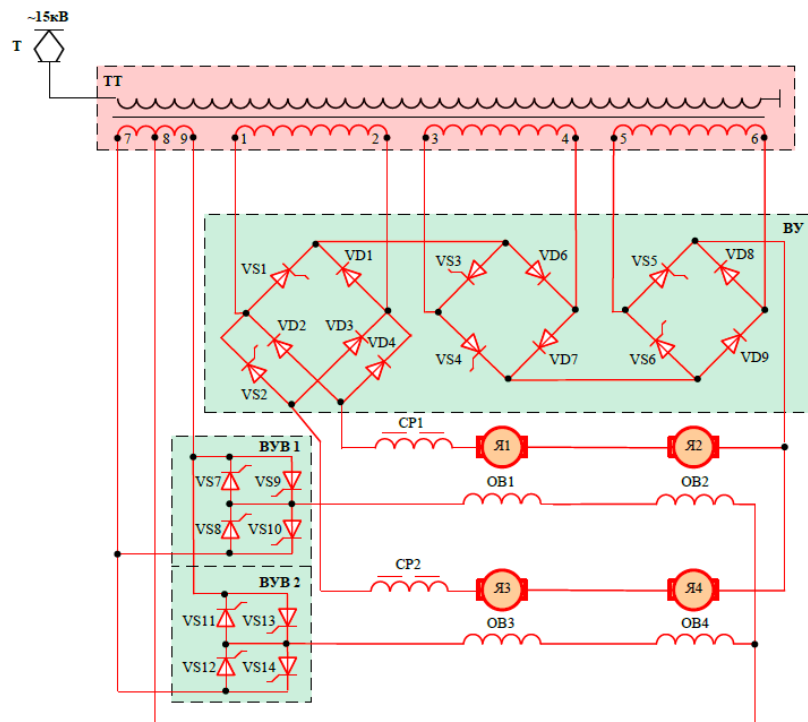


Рисунок 1.9 – Принципова схема шведського електропоїзда Х1 з випрямно-інверторним перетворювачем на базі тиристорів: Т – струмоприймач; ТТ – тяговий трансформатор; ВУ – випрямна установка; ВУВ1-ВУВ2 – випрямна установка збудження; СР1-СР2 – згладжуючий реактор; Я1-Я4 – обмотка якірної ТЕД; ОВ1-ОВ4 – обмотка збудження ТЕД

Через більше п'ятнадцяти років Радянський Союз продовжив розробку МВРС з ВІП на базі тиристорів, створено дослідний електропоїзд змінного струму ЕР29.

Головною особливістю електропоїзда було застосування імпульсно-фазового регулювання напруги на ТЕД як в режимі тяги, так і електричного гальмування. Дана система перетворення була розроблена інженерами з метою зниження спотворюючого впливу на форму напруги в контактній мережі і зменшення реактивної потужності за рахунок штучної комутації тиристорів в кінці кожного напівперіоду, рис. 1.10. Однак система імпульсно-фазового регулювання на електропоїзді працювала нестійко.

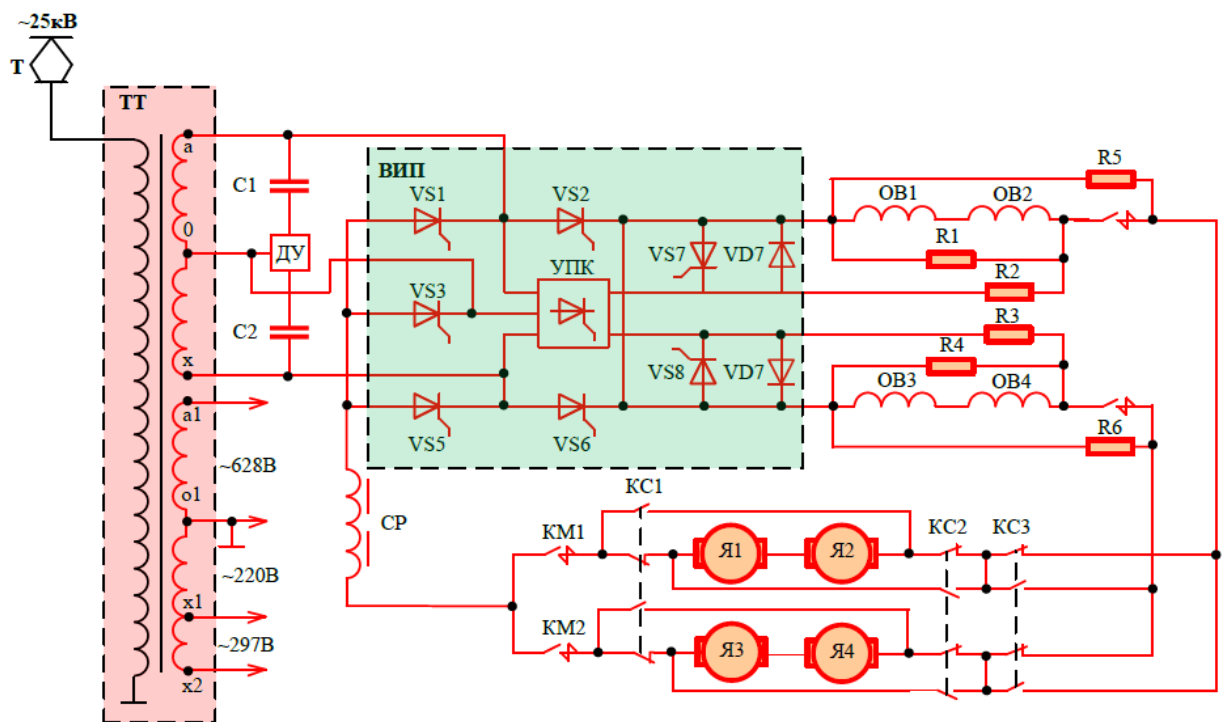


Рисунок 1.10 - Принципова схема дослідного електропоїзда ЕР29 з випрямно-інверторним перетворювачем на базі тиристорів при імпульсно-фазовому регулюванні напруги: Т – струмоприймач; ВІП - випрямно-інверторний перетворювач; ТТ – тяговий трансформатор; СР – згладжуючий реактор; УПК – вузол примусової комутації; ДУ – демпферний пристрій; Я1-Я4 – обмотка якірна ТЕД; OB1-OB4 – обмотка збудження ТЕД

Система імпульсного регулювання застосовується як засіб управління комутаційними процесами струму в перетворювачі електропоїзда, при цьому покращуючи форму струму рекуперації. Крім того, при використанні системи РИФ забезпечується електрична стійкість рекуперативного гальмування без блоків баластних резисторів в ланцюзі тягових двигунів, виключаючи втрати електричної енергії, збільшуючи коефіцієнт корисної дії електропоїзда і спрощуючи конструювання підвагонного простору електропоїзда за рахунок вивільнення габаритів, зайнятих стабілізуючими резисторами.

Низька напруга в контактній мережі і мале навантаження електропоїзда, обладнаного системою РИФ, позначалися на зниженні коефіцієнта потужності МВРС, при цьому значно поступаючи в коефіцієнті потужності електропоїздам зі звичайним чотиризонним регулюванням в діапазоні низьких напруг.

У слідстві чого в депо Фастів Південно-Західної залізниці інженерами була проведена заміна даної системи, на звичайні ВІП на базі тиристорів з компенсаторами реактивної потужності (КРМ), рис. 1.11. Модернізована схема розроблялася на підставі результатів випробувань секції електровоза серії ВЛ85 [10].

ВІП електропоїзда був виконаний на базі тиристорів типу Т453-800-36, що має дві зони плавного регулювання напруги, а також систему примусового повітряного охолодження на випарних теплових трубках. В якості захисту тиристорів перетворювача від комутаційних викидів виступали паралельно підключені лавинні діоди моделі ДЛ123-350-12. Швидкість наростання напруги на тиристорах обмежувалася RC -ланцюжками. Загальне число тиристорів в ВІП - 28, діодів - 2.

За допомогою фазового управління плечей ВІП VS11-VS14 здійснювалося плавне ослаблення збудження тягових двигунів в режимі рекуперативного гальмування.

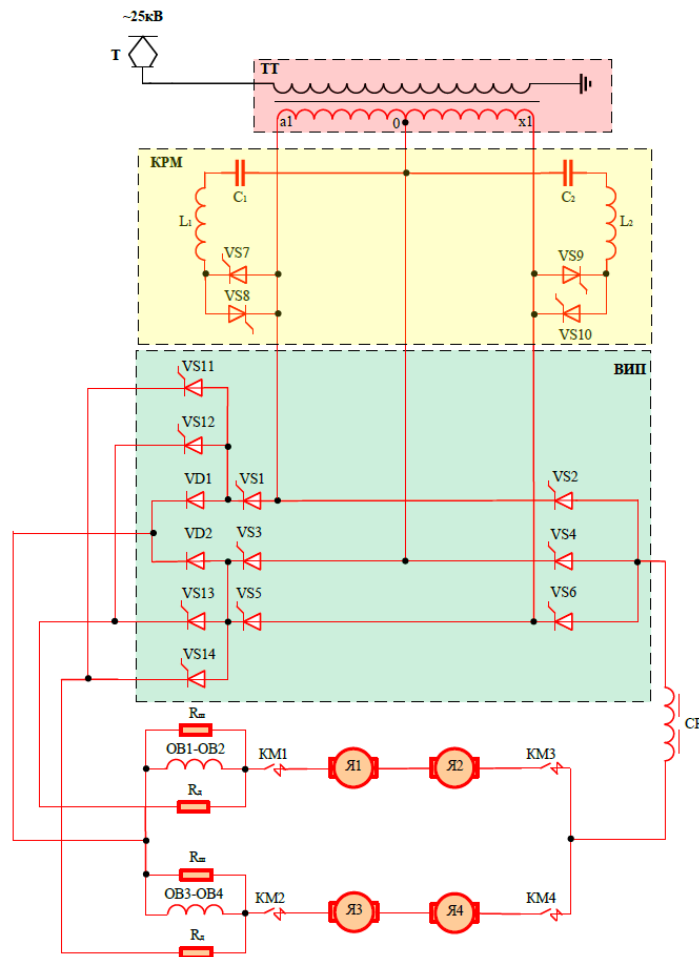


Рисунок 1.11 - Принципова схема дослідного електропоїзда EP29 з випрямно-інверторним перетворювачем на базі силових тиристорів при зонно-фазовому регулюванні напруги: Т - струмоприймач; ВИП - випрямно-інверторний перетворювач; ТТ - тяговий трансформатор; СР - згладжуючий реактор; Я1-Я4 - обмотка якірна ТЕД; ОВ1-ОВ4 - обмотка збудження ТЕД

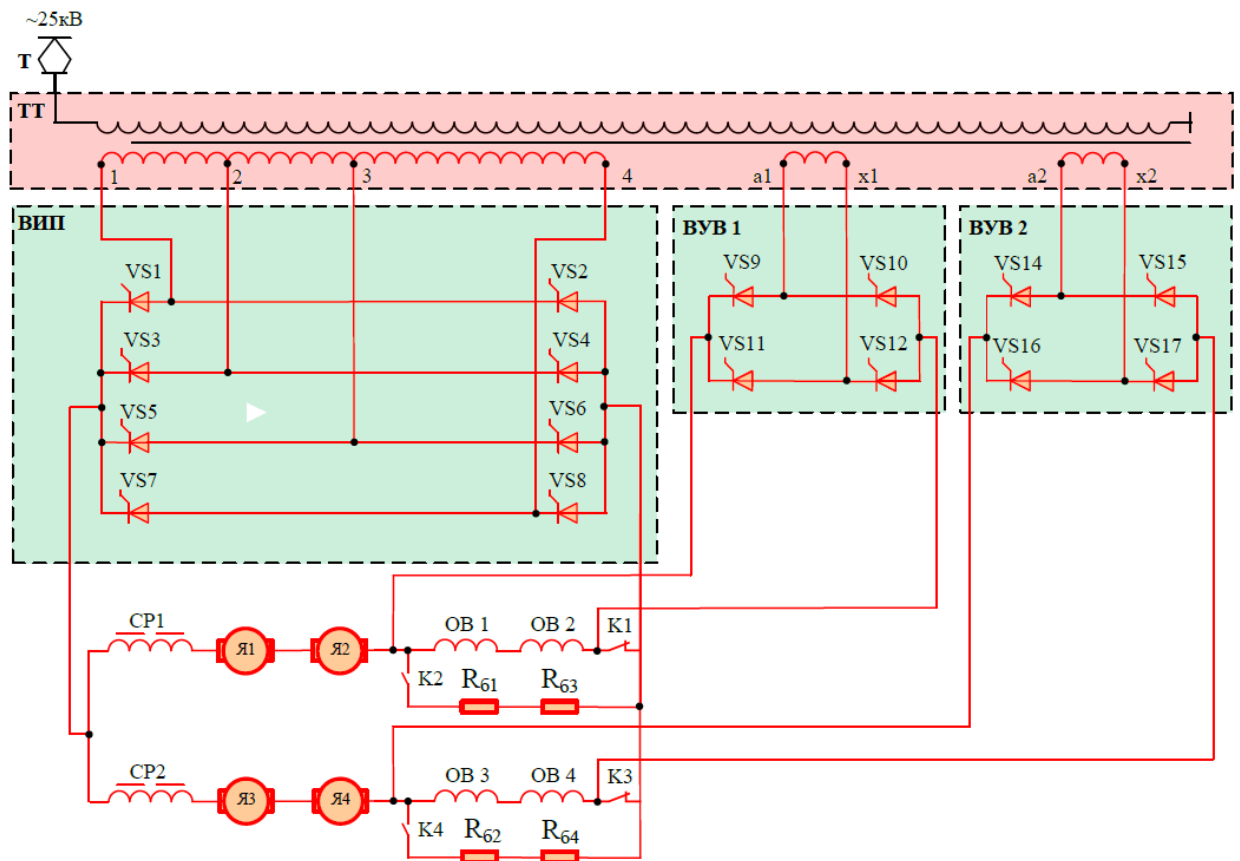
Перетворювач працював спільно з триступеневим пасивним нерегульованим КРМ, що складається з послідовного резонансного LC-ланцюга, що підключається паралельно низьковольтної обмотці тягового трансформатора в період пуску і рекуперативного гальмування з двох зустрічно-паралельно з'єднаних тиристорів, рис. 1.11. Схеми управління тиристорами здійснюють відключення КРМ при аварійних режимах роботи електропоїзда і його включення в моменти рівності напруги на конденсаторі КРМ з миттєвими значеннями напруги вторинної обмотки тягового трансформатора.

У 1991 р. дослідний електропоїзд ЕР29 був запущений в експлуатаційну діяльність на ділянці приміського сполучення міста Києва. В ході дослідної експлуатації були тричі зафіксовані несправності в ланцюгах КРМ, в результаті чого з вересня 1991 р. вони були відключені і надалі дослідний поїзд працював без КРМ.

Середній коефіцієнт потужності з КРМ в режимі тяги становив 0,93-0,94, в режимі рекуперативного гальмування 0,79-0,8, (без КРМ 0,72-0,76 і 0,44-0,50 відповідно; для діодного перетворювача електропоїзда ЕР9Е в режимі тяги – 0,80-0,81). Повернення електроенергії в мережу при рекуперації складало 30,7% від витрати електроенергії на тягу електропоїзда.

Однак, при відсутності на електропоїзді ЕР29 пристрою КРМ істотно знижується ефективність застосування рекуперації. Робота нерегульованого КРМ була ефективною лише у вузькому діапазоні струмових навантажень, з огляду на те, що при малих струмах навантаження електропоїзда відбувалася перекомпенсація реактивної потужності обумовлювано постійною величиною ємнісного струму, що протікає через КРМ.

В даний час випущено всього кілька десятків електропоїздів російського виробництва серії ЕПЗД і ЕД9Е з силовим електрообладнанням, що дозволяє здійснювати МВРС рекуперативне гальмування. Силові ланцюги моторного вагона електропоїзда включають в себе тиристорні ВІП і ВУВ, а також мікропроцесорну систему управління (МПСУ), яка забезпечує плавне безконтактне регулювання напруги в режимах тяги і рекуперативне гальмування, малюнок 1.12.



Малюнок 1.12 - Принципова схема електропоїзда серії ЕПЗД (ЕД9Е) з випрямно-інверторним перетворювачем на базі силових тиристорів ВІП-1000-У1: Т - струмоприймач; ВІП - випрямно-інверторний перетворювач; ТТ – тяговий трансформатор; ВУВ – випрямна установка збудження; СР – згладжуючий реактор; Я1-Я4 - обмотка якірна ТЕД; ОВ1-ОВ4 - обмотка збудження ТЕД

Однак за основу цих перетворювачів було прийнято технічне рішення аналогічно дослідної моторвагонної секції електропоїзда ЕР7 на базі силових тиристорів, переобладнання якої було проведено ще в 1967 р. Коефіцієнти потужності даних електропоїздів в режимах тяги і рекуперативного гальмування в максимальних їх проявах складають не більше 0,84 і 0,71 відповідно, що говорить про збереження неприпустимих, в даний час, втрат електричної енергії на тягу МВРС і високому споживанні реактивної енергії з мережі, що в свою чергу знижує пропускну здатність тягової ділянки

залізничної мережі. Крім того, дане схемотехнічне рішення донині використовується також і на радянських електровозах починаючи з серії ВЛ80Р, ВЛ85, та російських 2(3)ЕС5К і 4ЕС5К (Єрмак) і т.д..

Як показує піввікова практика електрорухомий склад однофазного змінного струму, виконаний на базі силових тиристорів з їх алгоритмами управління, має багато недоліків, основними з них є: високі витрати електроенергії на тягу; тиристорна база перетворювачів та алгоритми їх управління є морально застарілими (напівкеровані); значні втрати активної електроенергії в системі тягового електропостачання; завантаження тягової мережі реактивної енергії, що знижує пропускну здатність тягової ділянки і багато ін.

1.3 Силові схеми МВРС змінного струму з асинхронними тяговими електродвигунами

У якості тягового двигуна, як в нашій країні, так і за кордоном, застосовуються колекторні машини постійного або пульсуючого струму. Такі електродвигуни володіють добрими пусковими і регульовальними властивостями, а також можливістю отримання частоти обертання більше 3000 об/хв. У той же час вони мають і недоліки, такі як: низька надійність колекторно-щіткового вузла; підвищена витрата кольорового металу і підвищені витрати на технічне обслуговування в умовах експлуатації і ремонту, більші габарити.

Усунення вищевказаних недоліків можливі при переході на безколекторні асинхронні тягові двигуни (АТД), рис. 1.13.

У 1996 р. з'явився дослідний електропоїзд ЕНЗ з асинхронним тяговим приводом, рис. 1.14. На моторному вагоні ЕНЗ АД з'єднувалися паралельно і живилися від тиристорного перетворювача. Перетворювач складався з ВІП і автономного інвертора напруги (АІН) [8, 12].

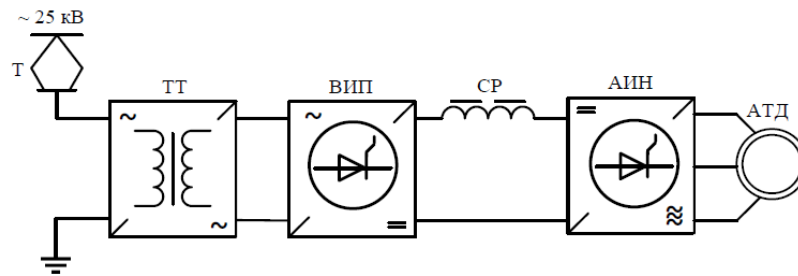


Рисунок 1.13 - Тяговий привід електропоїзда з випрямно-інверторним перетворювачем і автономним інверторів напруги на базі тиристорів (четверте покоління, 1967 р.): Т-тяговий трансформатор; ВИП-випрямно-інверторний перетворювач; СР - згладжує реактор; АІТ-автономний інвертор струму; АТД-асинхронний тяговий двигун

Роботи з проектування МВРС змінного струму з асинхронним тяговим приводом і рекуперативним гальмуванням були закінчені в 1998 р., за результатами випробувань був побудований дослідний п'ятивагонний електропоїзд. Однак фінансування проекту на завершальному етапі раптово припинилося, унаслідок виниклої економічної кризи в Росії. Випробування електропоїзда ЕНЗ залишилися незавершеними, а асинхронний привід на МВРС так і не був запущений серійно в експлуатацію.

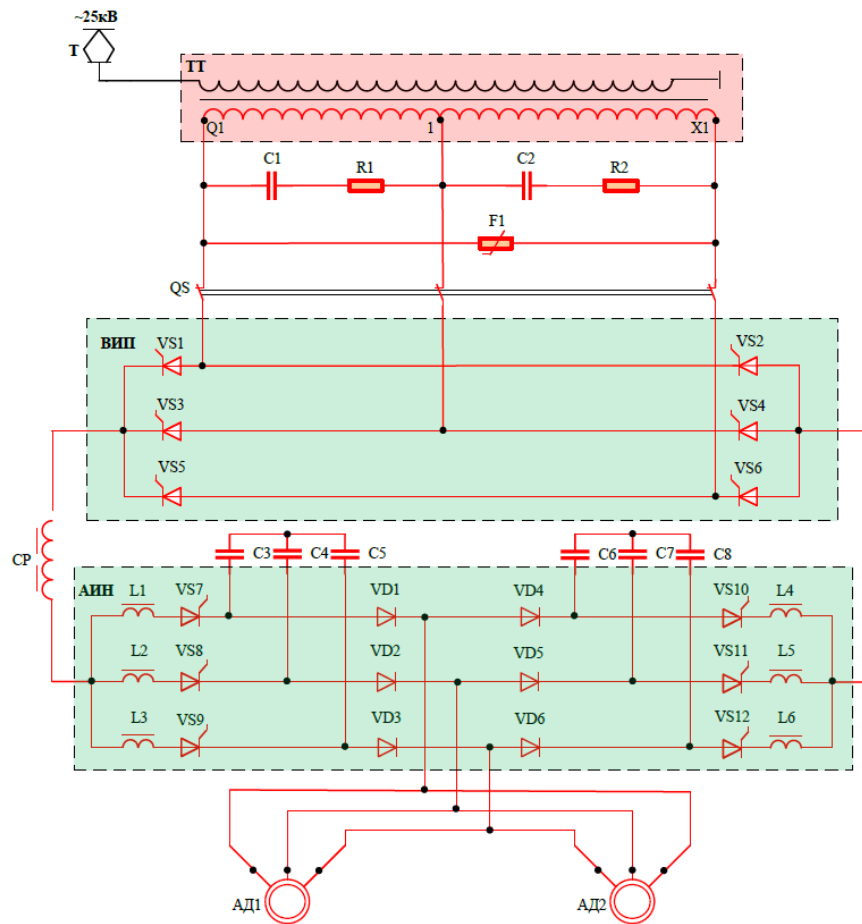
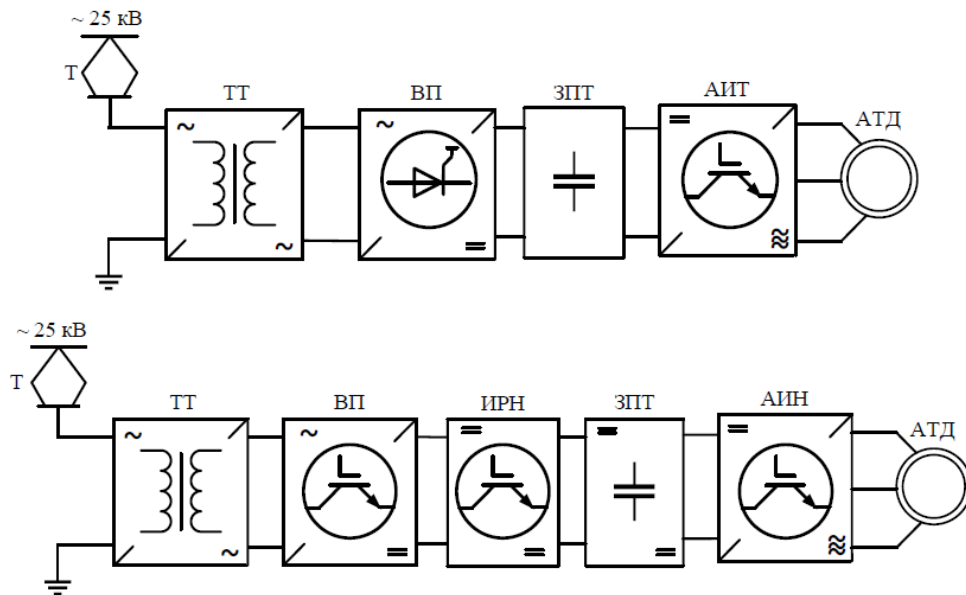


Рисунок 1.14 - Принципова схема дослідного електропоїзда ЕНЗ: Т-струмоприймач; ТТ - тяговий трансформатор; ВІП - випрямно-інверторний перетворювач; АІН - автономний інвертор напруги; СР - згладжуючий реактор; АД - асинхронний двигун

П'яте покоління тягового приводу на основі АД з'явилося з моменту появи вхідних перетворювачів на базі запираємих тиристорів, що спільно працюють з автономними інверторами напруги на базі біполярних транзисторів з ізолюваним затвором (БТІЗ) (англ. IGBT, Insulated Gate Bipolar Transistor). IGBT-транзистор – це трьохелектродний силовий електронний прилад, який використовується, в основному, як потужний електронний ключ в джерелах живлення, інверторах і системах управління електричними приводами, рис. 1.15.

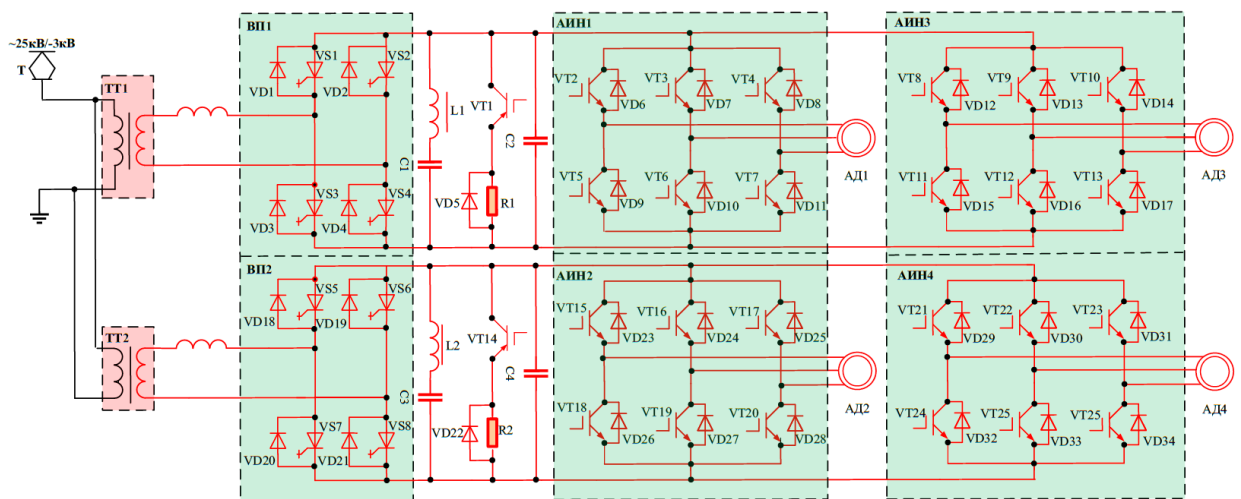


Т - тяговий трансформатор; ВП - вхідний перетворювач; імпульсний регулятор напруги; ЗПТ - Ланка постійного струму; АИТ - автономний інвертор струму; АТД - асинхронний тяговий двигун

Рисунок 1.15 - Тяговий привід електропоїзда на базі силових тиристорів що замикаються і IGBT-транзисторів (п'яте покоління)

БТІЗ має наступні переваги: здатність до керованого замикання; низький рівень керуючої потужності від польових транзисторів з ізольованим затвором; низькі втрати в проведеному стані при високих значеннях струмів і напруг і ін.

РАО ВСМ РЖД випустила дослідний високошвидкісний електропоїзд ЕС250 «Сокіл-250» подвійного живлення, рис. 1.16. Для електропоїзда "Сокіл" був розроблений тяговий перетворювач з вбудованою діагностикою на два роди струму (25 кВ, 50 Гц і 3 кВ постійного струму). Вхідний перетворювач (в режимі змінного струму – чотирикватратний перетворювач, в режимі постійного струму – імпульсний переривник) виконаний на IGCT - тиристорах 4500 В, 4000 А. Інвертори виконані на IGBT-транзисторах 3,3 кВ, 1200 А. Для перетворювача розроблена високоефективна рідинна система охолодження, яка дозволяє реалізовувати на цій елементній базі потужність до 2700 кВт.



Т - струмоприймач; ТТ1-ТТ2 - тягові трансформатори; ВІП1-ВІП2 - випрямно-інверторні перетворювачі; АІН1- АІН4 - автономні інвертори напруги; АД1-АД4 - асинхронні двигуни

Рисунок 1.16 - Принципова схема дослідного високошвидкісного електропоїзда ЕС250

Інвертори виконані на IGBT-транзисторах фірми НІТАСНІ. Перетворювачі 4QS виконані на повністю керованих IGCT-тиристорах фірми АВВ. У зв'язку з використанням в перетворювачах 4QS IGCT-тиристорів, частота широтної імпульсної модуляції (ШІМ) прийнята порівняно низькою. Зокрема, при виконанні проектних робіт вона була прийнята рівною 450 Гц. У процесі випробувань частота ШІМ була збільшена до 900 Гц.

В ході контрольних випробувань електропоїзда було встановлено, що в одному і тому ж графіку руху питома витрата електроенергії на тягу електропоїздом ЕС250 «Соколом» на 14,5% менше, ніж електропоїздом ЕР200, а плавність ходу істотно покращилася.

Введення електропоїзда в режим рекуперативного гальмування здійснювався шляхом перемикавання полярності ланки постійного струму, а на керовані випрямлячі подавалися керуючі імпульси в кінці кожних напівперіодів напруги живлення. Статична стійкість рекуперативного гальмування забезпечувалася за допомогою зміни закону управління частотою інвертора, що полягає в підтримці постійної ЕРС ТЕД в режимі генератора з

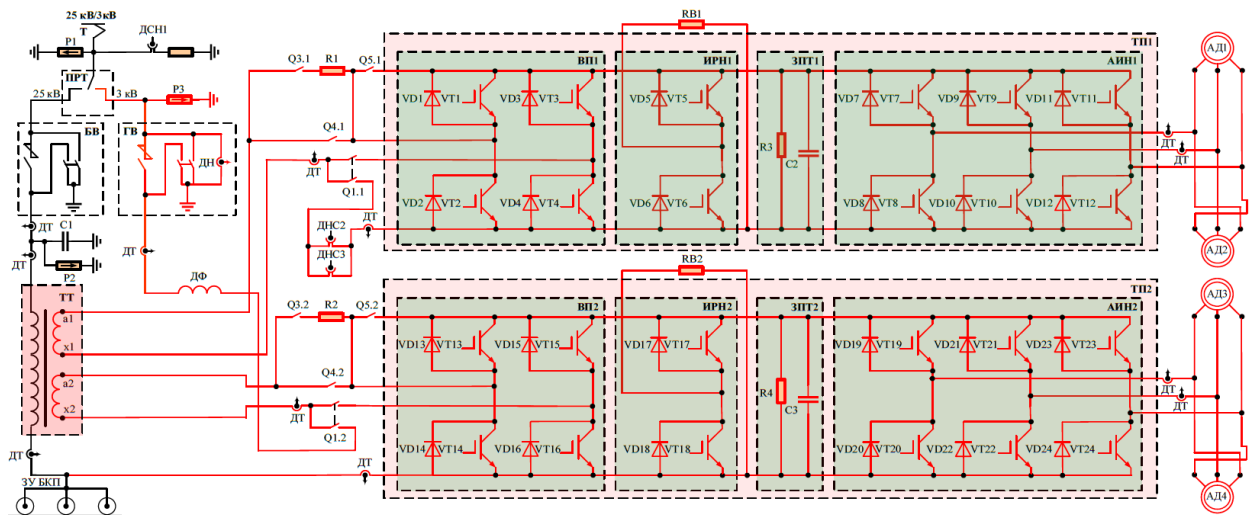
ростом струму гальмування. Разом з тим проведені приймальні та контрольні випробування електропоїзда «Сокіл» виявили суттєві невідповідності технічним вимогам ряду систем і обладнання. Однак враховуючи результати контрольних випробувань, незадовільний стан систем і обладнання дослідного поїзда не рекомендовано до передачі електропоїзда в експлуатацію.

Компанія Siemens спроектувала приміський двосистемний електропоїзд для російських умов експлуатації «Ластівка». При розробці нового МВРС за основу була прийнята модель п'ятивагонного електропоїзда Siemens Desiro ML.

Тяговий перетворювач електропоїзда здійснює попарне живлення чотирьох асинхронних тягових електродвигуна моторного вагона, що збільшує можливість резервування електрообладнання в разі виходу з ладу одного з перетворювача. У контейнері тягового перетворювача є два комплекти електрообладнання, до складу яких входять чотириквadrантні перетворювачі (4QS), імпульсні Регулятори напруги і автономні інвертори напруги, в сукупності утворюючи широтно-імпульсний перетворювач (ШИП).

Кожен 4QS-регулятор підключений до своєї обмотки тягового трансформатора. Виходи чотириквadrантних регуляторів розімкнуті, кожен з них живить свій проміжний контур. З шинами проміжного контуру з'єднані наступні вузли:

- імпульсний регулятор напруги з гальмівним резистором (щоб мати можливість погасити енергію електричного гальмування в разі неможливості передати її в контактну мережу);
- конденсатор проміжного контуру, в якості проміжного накопичувача для згладжування пульсації напруги проміжного контуру;
- автономний інвертор напруги, рис. 1.17.



Т - струмоприймач; ТТ - тяговий трансформатор; БВ - швидкодіючий вимикач; ГВ - головний вимикач; ДФ - дросель фільтра; ВП1-ВП2 - вхідний перетворювач; ІРН1-ІРН2 - імпульсний регулятор напруги; АІН1-АІН2 - автономний інвертор напруги; ТП1-ТП2 - тяговий перетворювач; АД1-АД4 - асинхронний двигун

Рисунок 1.17 - Принципова схема електропоїзда серії ЕС1П «Ластівка»

Всі напівпровідникові тягові перетворювачі зібрані на фазових модулях, основою яких є IGBT-транзистори SIBAS ST-3000w1 (по два послідовно з'єднаних транзистора в кожному), що мають рідинне охолодження. Фазові модулі розраховані на напругу 3000 В кожен. Фазовий модуль складається з одного або декількох відгалужень напівмостів. Кожне відгалуження напівмосту в свою чергу включає певну кількість модулів біполярних транзисторів з ізолюваним затвором (IGBT).

Недоліки ШІП обумовлені імпульсним характером струмів і напруг напівпровідників тягового перетворювача, що говорить про:

- високу вимогу до динамічних параметрів напівпровідників;
- значні рівні високочастотних спотворюючих впливів, виникнення яких пов'язане з великими швидкостями зміни струмів і напруг напівпровідників;
- на виході ШІП спостерігається широкосмуговий спектр перетворених напруг і струмів та ін.

2 МОДЕЛЬ СИЛОВИХ КІЛ МОТОРНОГО ВАГОНА ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ЗМІННОГО СТРУМУ В РЕЖИМІ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

Математичне моделювання може розглядатися як новий метод пізнання, конструювання, проектування, що поєднує в собі багато достоїнств як теорії, так і експерименту і дозволяє значно заощадити час і кошти на розробку реального макетного зразка, або лабораторного стенду, необхідного для підтвердження результатів аналітичного дослідження.

Пакет Matlab, на сьогоднішній день займає лідируючу позицію в області спеціалізованого програмного забезпечення, що дозволяє моделювати динамічні системи. В інтерактивному середовищі Simulink, є можливість використовувати вже готові бібліотеки блоків для моделювання електросилових, механічних і гідравлічних систем, а також застосовувати розвинений модельно-орієнтований підхід при розробці систем управління, засобів цифрового зв'язку і пристроїв реального часу. В ході моделювання за допомогою спеціальних пристроїв спостереження, що входять до складу бібліотеки Simulink є можливість стежити за процесами, що відбуваються в системі.

Електропоїзд змінного струму, як об'єкт математичного моделювання, являє собою складну комплексну систему, що складається з декількох підсистем, що здійснюють взаємодію між собою. Силова електрична частина електропоїзда з контактною мережею і його система управління є однією з таких підсистем. В якості прототипу приймається силова, електрична частина моторного вагона електропоїзда, що складається з тягового трансформатора, ВПІ, двох ВУВ, шести згладжують реакторів, чотирьох блоків баластних резисторів, чотирьох ТЕД, датчика кута комутації і датчика стеження за напругою секції вторинної обмотки тягового трансформатора. Алгоритм роботи моделі відповідає алгоритмам роботи блоку управління ВПІ і ВУВ електропоїзда в режимі рекуперативного гальмування.

Структурна схема математичної моделі підсистеми «електропоїзд» в режимі рекуперативного гальмування при використанні штатних і пропонованих ВІП, ВУВ. Схема включає в себе:

- тяговий трансформатор ОДЦЕ-2000 / 25Б-У1, підключений до контактної мережі змінного струму промислової частоти 50Гц і напругою 25 кВ;
- блок вимірювання значень параметрів, що включає в себе датчики кута комутації і датчики стеження за напругою секції вторинної обмотки ТТ;
- ВІП-1000-У1 забезпечує живлення чотирьох ТЕД типу 1дт.003.11.У1;
- ВУВ (блок тиристорів БТ.02.У2), що здійснює випрямлення і плавне регулювання струму обмоток збудження ТЕД в режимі рекуперативного гальмування;
- згладжуючий реактор типу РСС 280-0, 017-У1, призначений для згладжування пульсацій випрямленого струму;
- блоки баластних резисторів типу 1бсе.092.У1 і 1бр.002.13.У1 необхідних для вирівнювання струмів тягових двигунів в режимі рекуперативного гальмування;
- блок управління з алгоритмом роботи, який відповідає алгоритму роботи реального блоку управління електропоїзда в режимі рекуперативного гальмування.

2.1 Математична модель тягового трансформатора моторного вагона

На електропоїздах змінного струму встановлюється однофазний тяговий трансформатор типу ОДЦЕ-2000 / 25Б-У1, схема обмоток якого представлена на рис. 2.1.

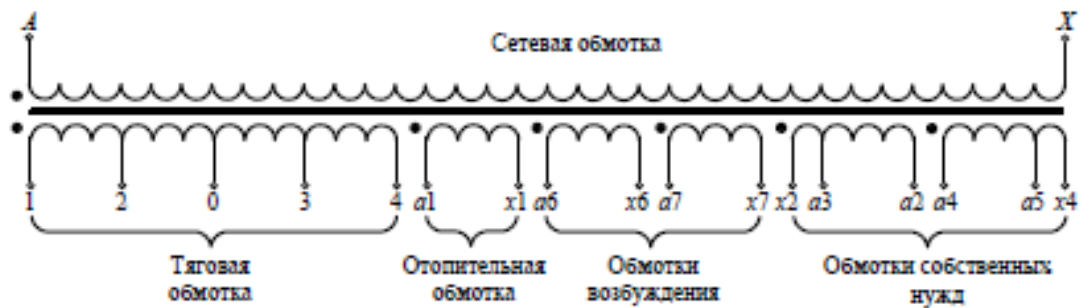


Рисунок 2.1 – Схема обмоток трансформатора ОДЦЭ-2000/25Б-У1

При створенні математичної моделі тягового трансформатора необхідно представити його у вигляді схеми заміщення, що представляє собою багатообмоточну систему з магнітними зв'язками, рис. 2.2. При моделюванні в діапазоні розглянутих частот розподіленими ємностями обмоток нехтуємо. Розподілені параметри індуктивностей обмоток приймаємо зосередженими і постійними для кожного моменту часу процесу роботи тягового трансформатора.

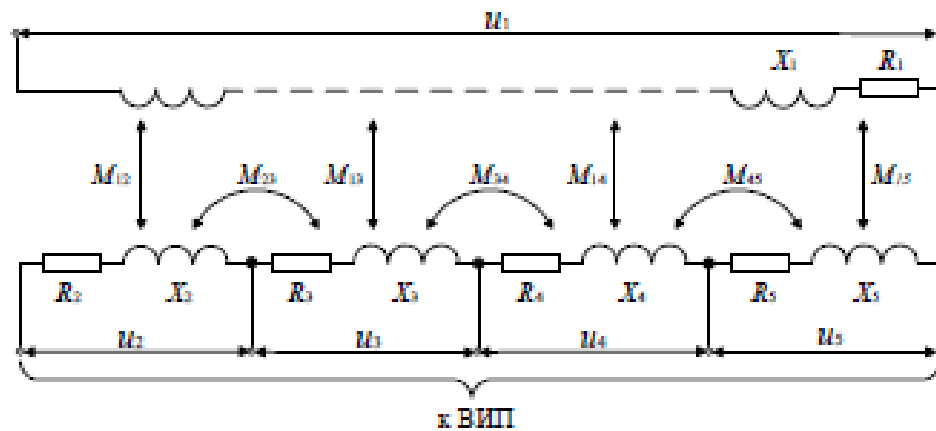


Рисунок 2.2 – Схема заміщення багатообмоточного тягового трансформатора ОДЦЭ-2000/25Б-У1

Під час роботи тягового трансформатора електромагнітні процеси що протікають для рис. 2.1 описуємо системою диференціальних рівнянь виду

$$\begin{cases} u_1 = i_1 r_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ u_2 = i_2 r_2 + L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} + w_2 \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ u_3 = i_3 r_3 + L_{3\sigma} \frac{di_3}{dt} + w_3 \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ u_4 = i_4 r_4 + L_{4\sigma} \frac{di_4}{dt} + w_4 \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ u_5 = i_5 r_5 + L_{5\sigma} \frac{di_5}{dt} + w_5 \frac{d\Phi_0}{dt}, \end{cases} \quad (2.1)$$

де u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 – напруги первинної та відповідних вторинних обмоток тягового трансформатора;

i_1, i_2, i_3, i_4, i_5 – струми первинної та відповідних вторинних обмоток тягового трансформатора;

r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 – активні опору первинної і відповідних вторинних обмоток тягового трансформатора;

w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 – число витків первинної і відповідних вторинних обмоток тягового трансформатора;

Φ_0 – основний магнітний потік в магнітопроводі тягового трансформатора.

Зусиллями магніторушійної сили (МРС) первинної і вторинних обмоток тягового трансформатора створюється в його сталевому сердечнику основний магнітний потік. Отже, для тягового трансформатора, відповідно до закону Ома для магнітних ланцюгів, основний магнітний потік Φ визначимо за рівнянням

$$\Phi_0 = \frac{i_1 w_1 + i_2 w_2 + i_3 w_3 + i_4 w_4 + i_5 w_5}{R_\mu} = \lambda_\mu (i_1 w_1 + i_2 w_2 + i_3 w_3 + i_4 w_4 + i_5 w_5), \quad (2.2)$$

де R_μ – магнітний опір трансформатора;

λ_μ – магнітна провідність осердя трансформатора.

Модель тягового трансформатора реалізуємо за допомогою блоку Multi - Winding Transformer з бібліотеки Simulink. Блок Multi-Winding Transformer, призначений для моделювання однофазного багатообмоточного трансформатора з різним числом первинних і вторинних обмоток, рис. 2.3.

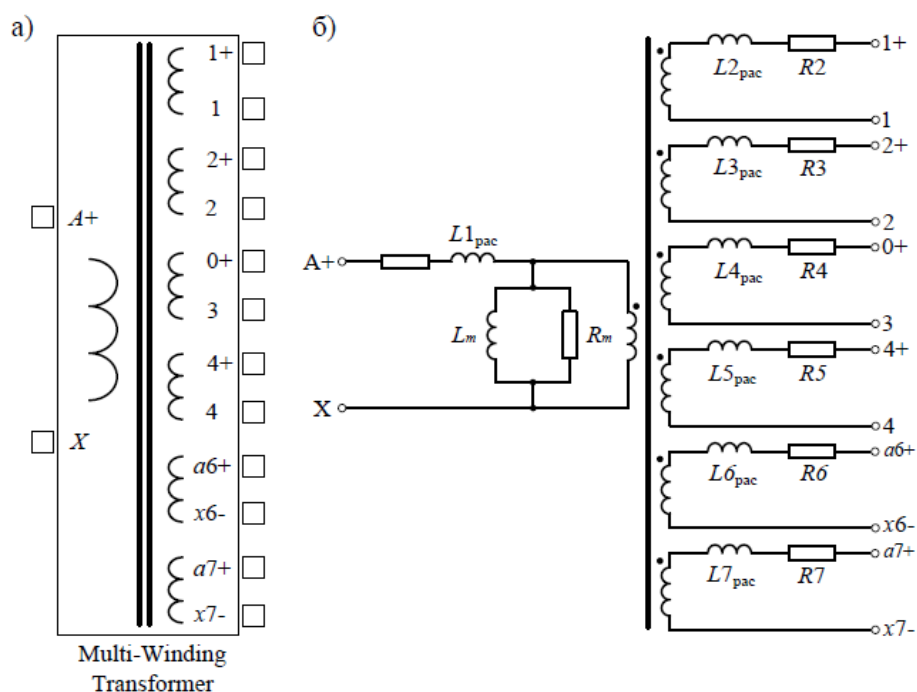


Рисунок 2.3 – Багатообмоточний трансформатор в бібліотеці Simulink

а) піктограма трансформатора; б) схема моделі трансформатора

У модельованому блоці враховуються наступні параметри:
характеристика насичення сердечника трансформатора;

L_σ – індуктивність розсіювання мережевої і вторинної обмотки; гістерезисна характеристика;

$R_{обм}$ – опір мережевої і вторинної обмотки.

При цьому дані параметри задаються у відносних величинах. Визначення відносних параметрів здійснюється виходячи технічних характеристик тягового трансформатора ОДЦЕ-2000 / 256-У1, табл. 2.1.

Блок схема моделі трансформатора електропоїзда, розроблена в редакторі Simulink, зображена на рис. 2.4.

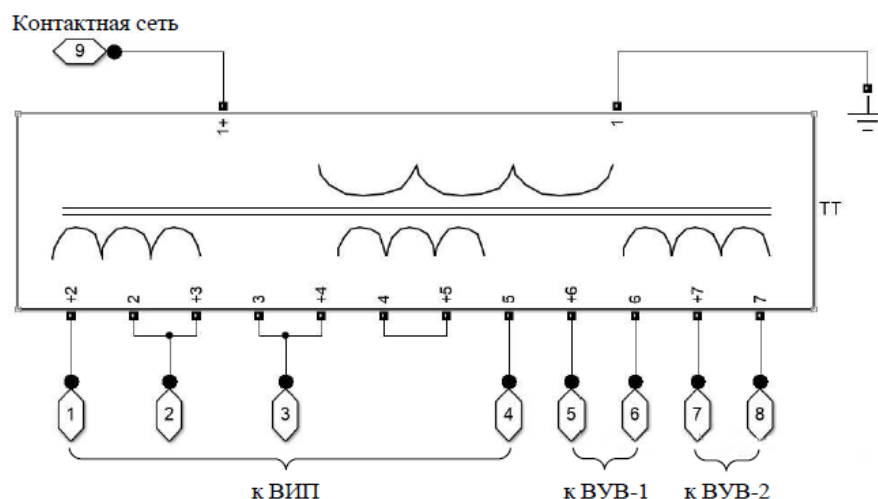


Рисунок 2.4-Блок-схема тягового трансформатора ОДЦЕ-2000 / 25Б-У1 електропоїзда у редакторі Simulink

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики тягового трансформатора електропоїзда ОДЦЕ-2000 / 25Б-У1

Параметр трансформатора		Величина параметра
Частота мережі живлення, Гц		50
Номінальна потужність мережевої обмотки, кВ · А		1652
Номінальна напруга мережевої обмотки, кВ		25
Номінальний струм мережевої обмотки, А		66,1
Струм холостого ходу при напрузі 25 кВ, %		1,0
Номінальна потужність тягових обмоток, кВ · а		1320
Номінальна напруга тягових обмоток, В	1 – 2	500
	1 – 0	1100
	1 – 3	1650
	1 – 4	2200
Номінальний струм тягових обмоток, А		600
Номінальна потужність обмотки збудження, кВ · а		2x16
Номінальна напруга обмотки збудження	а ₆ – х ₆ ; а ₇ – х ₇	122
Номінальний струм обмотки збудження, А		133,3

Для визначення індуктивності розсіювання тягового трансформатора скористаємося експериментальним способом з досліду короткого замикання з використанням паспортних даних (U_k %), а також відомих параметрів трансформатора – номінального напруги (U_n) і струму (I_n) за формулою

$$L_{\sigma} = \frac{U_k \% \cdot U_n}{I_n \cdot \omega \cdot 100}. \quad (2.2)$$

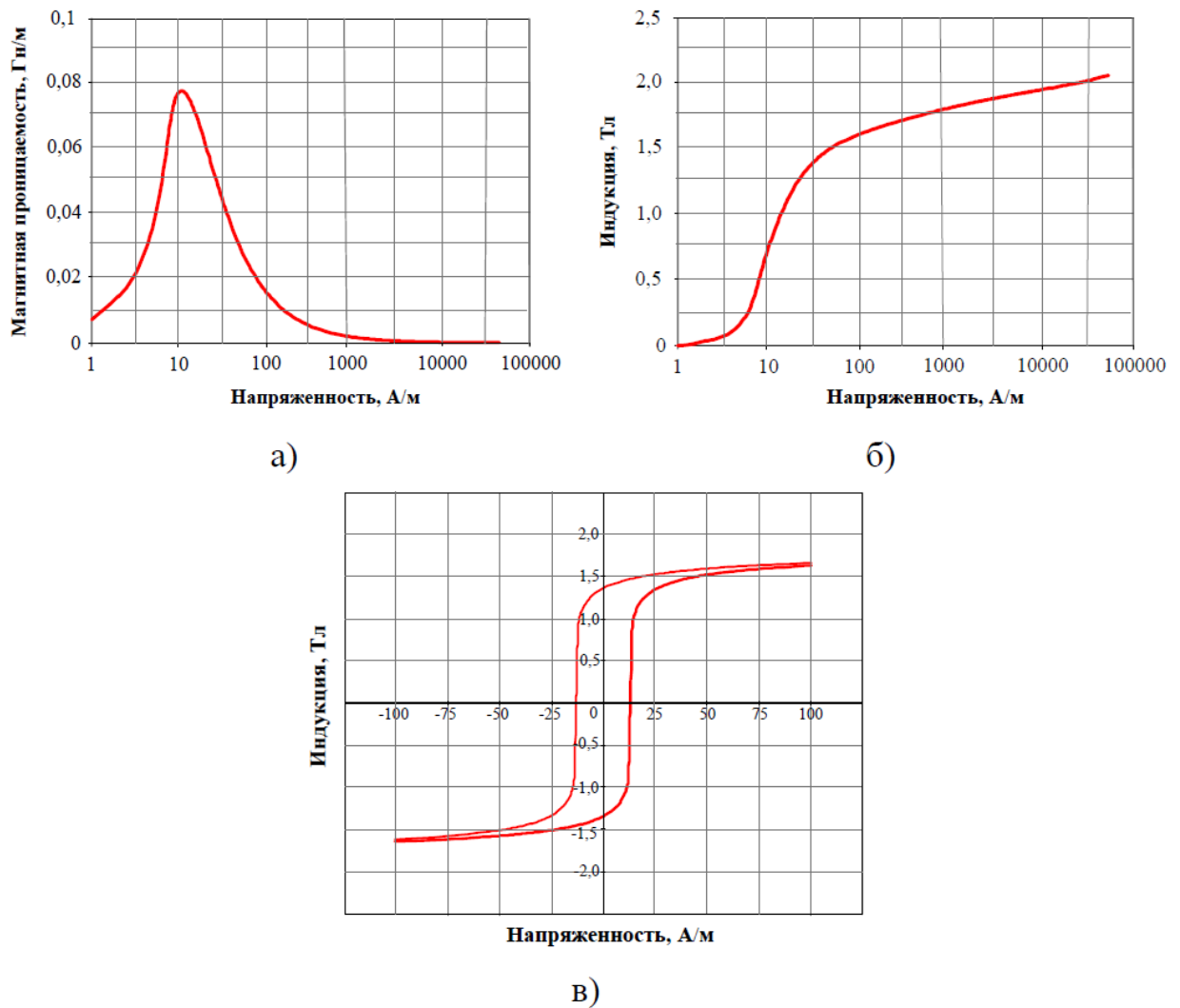


Рисунок 2.5 – Магнітні характеристики електротехнічної сталі 3404 осердя тягового трансформатора: а) залежність магнітної проникності від індукції; б) крива намагнічування; в) петля статичного гістерезису

Математична модель тягового трансформатора доповнена магнітними характеристиками осердя з електротехнічної сталі 3404, рис. 2.5, що дає можливість отримати максимальне наближення протікаючих електромагнітних процесів в ньому, щодо процесів, що протікають в реальному тяговому трансформаторі електропоїзда.

Адекватність математичної моделі тягового трансформатора можна довести, здійснивши досліди холостого ходу і короткого замикання, рис. 2.6.

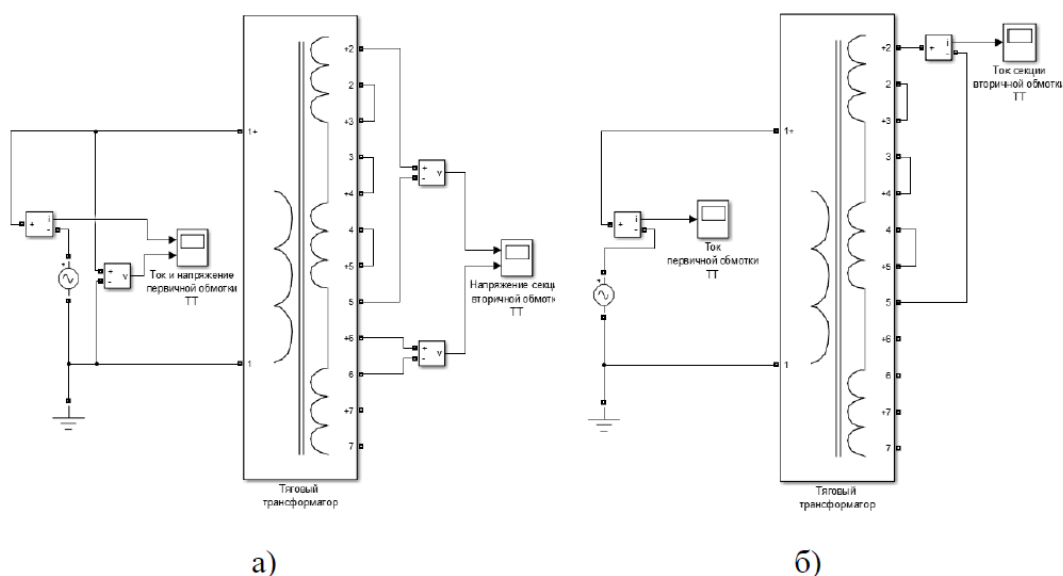


Рисунок 2.6 – Модель тягового трансформатора в редакторі Simulink при дослідіах: а) холостого ходу; б) короткого замикання

На рис. 2.7-2.9 показані діаграми електромагнітних процесів, отримані в дослідіах холостого ходу і досвіду короткого замикання. За отриманими результатами досвіду холостого ходу і короткого замикання можна стверджувати про адекватність отриманої математичної моделі. Розроблена математична модель тягового трансформатора, дозволить отримати електромагнітні процеси, близькі до реальних, що протікають в тяговому приводі електропоїзда змінного струму в режимі рекуперативного гальмування.

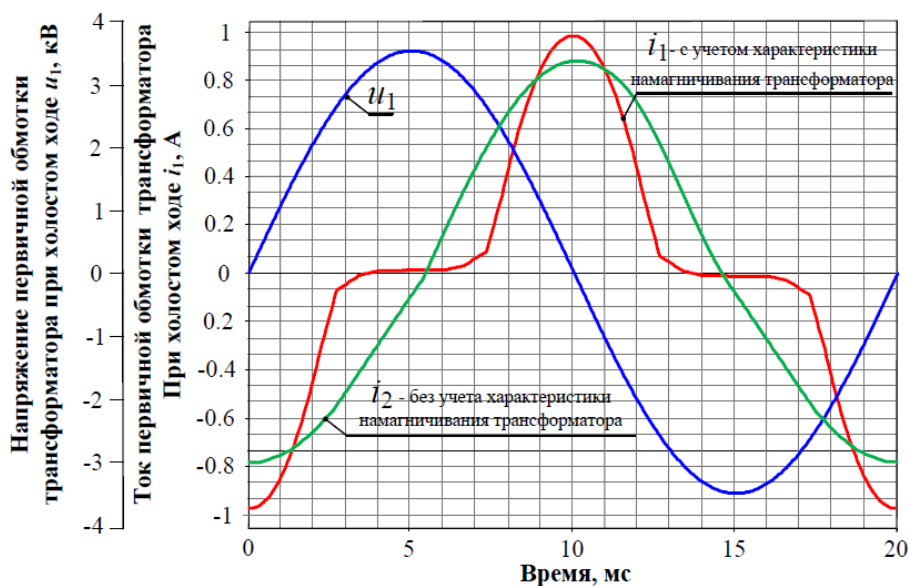


Рисунок 2.7 - Напряга u_1 і струм первинної обмотки тягового трансформатора з урахуванням характеристики намагнічування i_1 і без i_2 в досліді холостого ходу

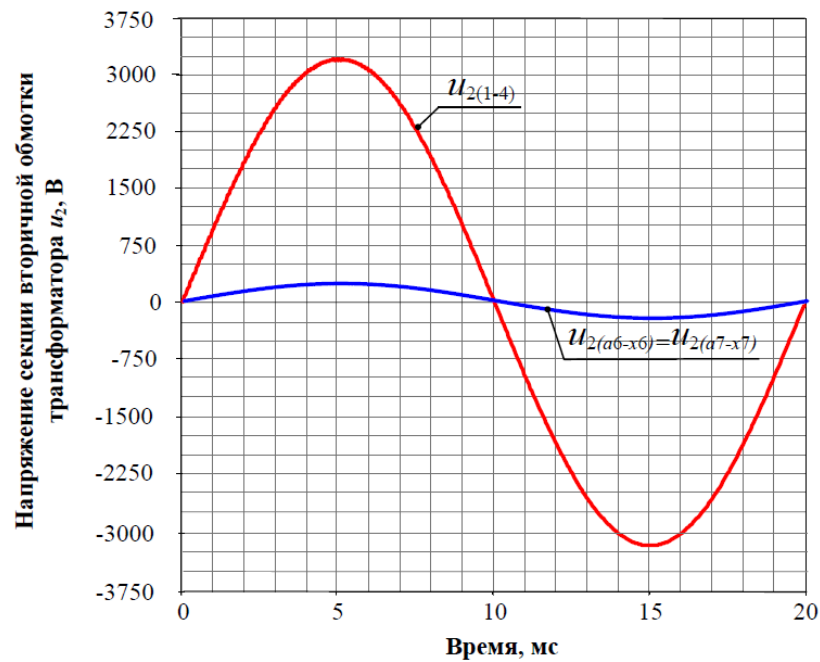


Рисунок 2.8 - Напряга секцій вторинної тягової обмотки трансформатора в досліді холостого ходу

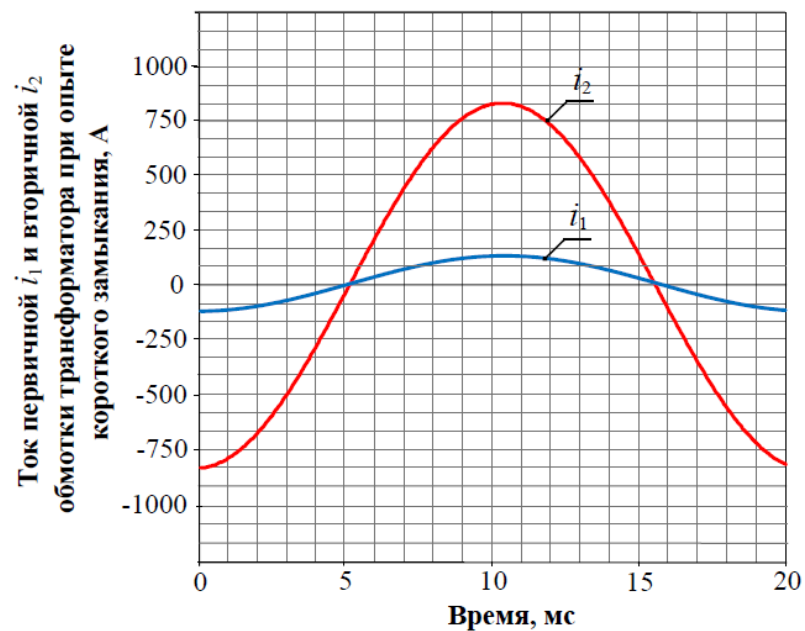


Рисунок 2.9 - Струм первинної і вторинної обмоток тягового трансформатора при досліді короткого замикання

2.2 Математична модель штатного ВІП моторного вагона в режимі рекуперативного гальмування

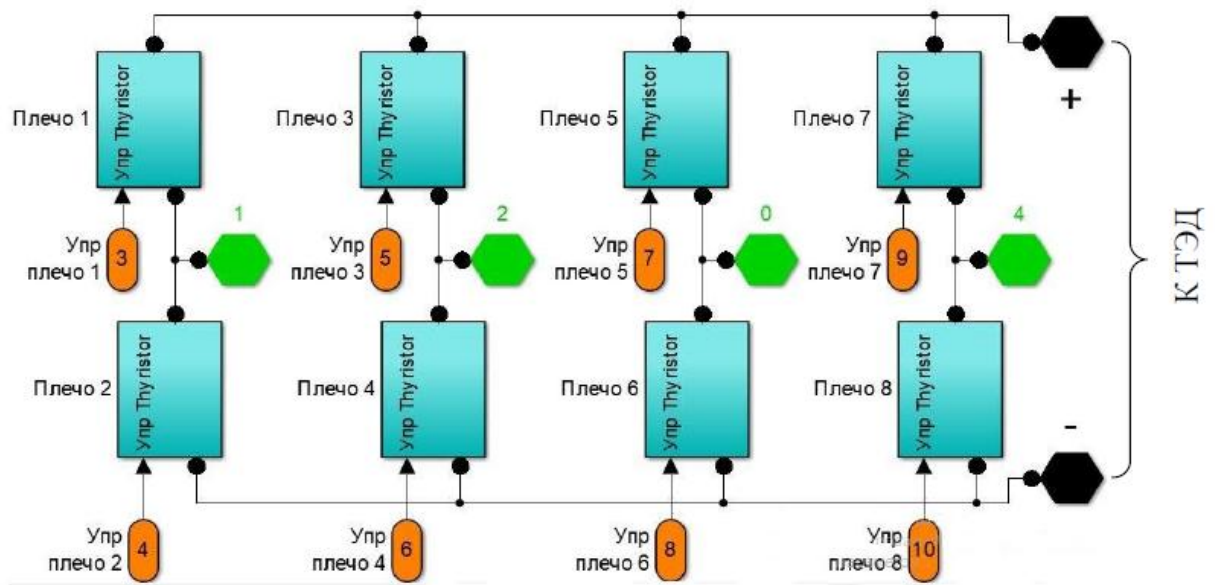
ВІП забезпечує плавне чотиризонне регулювання напруги живлення ТЕД електропоїзда. Виходячи аналізу роботи перетворювача електропоїзда, можна стверджувати, що на всіх зонах регулювання, крім першої, перетворювач можна розглядати як двозонний, а при переходах з зони на зону необхідно змінювати тільки параметри секцій вторинної обмотки і номера плечей, що підключаються до виводів цих секцій.

Схема заміщення тиристорного ВІП для режиму рекуперативного гальмування на 4-й зоні регулювання напруги з типовим алгоритмом управління представлена на рис. 2.10. Штриховою лінією показані контури комутації перетворювача.

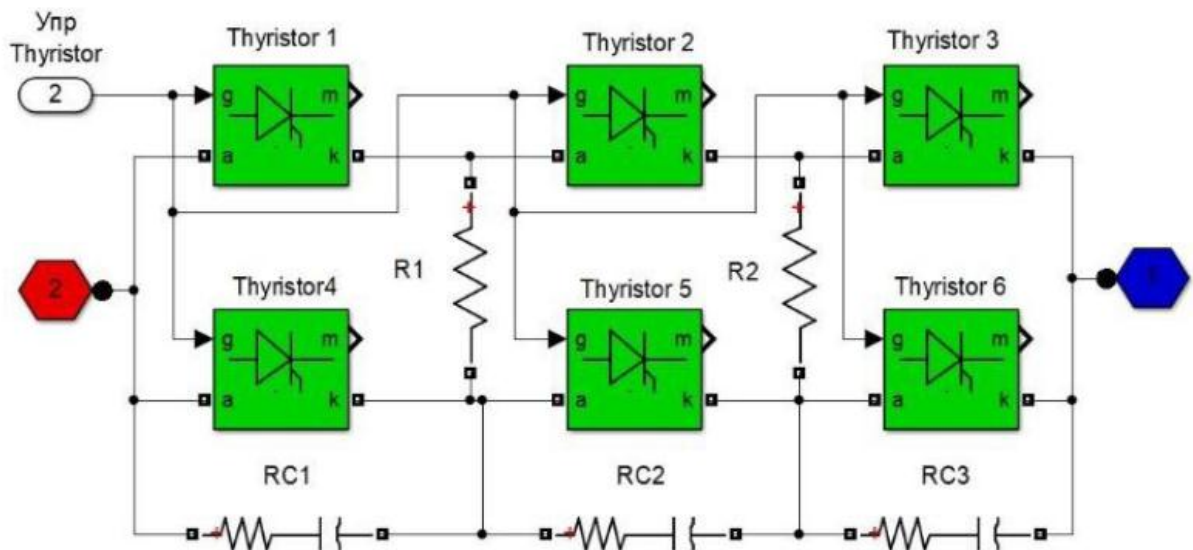
Для аналізу процесів і розрахунку миттєвих значень струмів і напруг розглянемо два інтервали часу процесу основної комутації, що настають по черзі (послідовно) один за одним:

- а) інтервал комутації у великому контурі, коли струм комутації i_{k1} замикається по ланцюгу: плече VS7, секції 4 – 3, 3 – 0, 0 – 2 і 2-1, плече VS1;
- б) інтервал комутації в малому контурі, коли струм комутації i_{k2} замикається по ланцюгу: плече VS8, секції 4 – 3, 3 – 0 і 2 – 0, плече VS4.

Блок-схема ВПІ на базі тиристорів і його плече, виконана в редакторі Simulink, представлені на рис. 2.11 і 2.12, відповідно.



Малюнок 2.11-Блок-схема ВПІ в редакторі Simulink



Малюнок 2.12-Блок-схема плеча ВПІ в редакторі Simulink

У пакеті Matlab тиристори моделюються з урахуванням безлічі факторів існуючих приладів. Схема моделі тиристора в редакторі Simulink показана на малюнку 2.13, що складається з послідовно підключених резистора $R_{оп}$, індуктивності $L_{оп}$, джерела постійної напруги U_f , ключа SW і демпфуючої RC -кола.

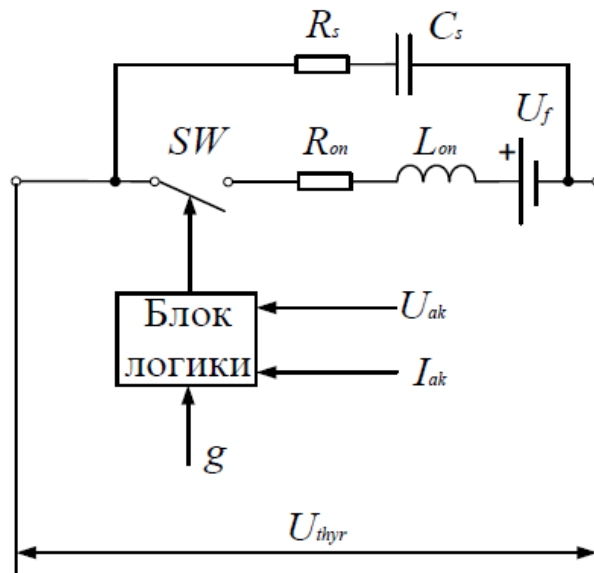


Рисунок 2.13 - Схема моделі тиристора в бібліотеці Simulink

В якості прототипу тиристорів в моделі використовувалися прилади марки Т853-800-28В ТР. Блок логіки управляє роботою ключа. Відкриття тиристора відбувається при подачі позитивної напруги ($U_{ak} - U_f$) і наявності сигналу на керуючому електроді (g). Тривалість керуючого сигналу повинна бути такою, щоб при включенні анодний струм тиристора був більше струму утримання, в іншому випадку включення не буде. Для відключення тиристора потрібно зменшити струм I_{ak} до нуля при нульовому керуючому імпульсі, до того ж тривалість програми негативної напруги повинна перевищувати час відключення тиристора. У моделі враховується нелінійність вольт-амперної характеристики. Всі ці параметри тиристора дозволяють отримати процеси, що проходять в перетворювачі, дуже близькі до реальних.

2.3 Розробка математичної моделі пропонованого ВІП моторного вагона в режимі рекуперативного гальмування

Модель пропонованого ВІП включає в себе діодно-транзисторні плечі і додаткове дев'яте розрядне плече, включене паралельно ланцюга тягових електродвигунів електропоїзда. Схема заміщення пропонованого ВІП в режимі рекуперативного гальмування представлена на малюнку 2.14. Контури комутації показані штриховими лініями.

Для аналізу процесів і розрахунку миттєвих значень струмів і напруг розглянемо два інтервали часу процесу основної комутації, наступних по черзі (послідовно) один за одним:

- інтервал комутації у великому контурі, коли струм комутації i_{k1} замикається по ланцюгу: плече VD2-VT2, секції 1 – 2, 2 – 0, 0 – 3, 3 – 4, плече VT9;
- комутації в малому контурі, коли струм комутації i_{k2} замикається по ланцюгу: плече VD4-VT4, Секція 1-2, плече VT2-VD2

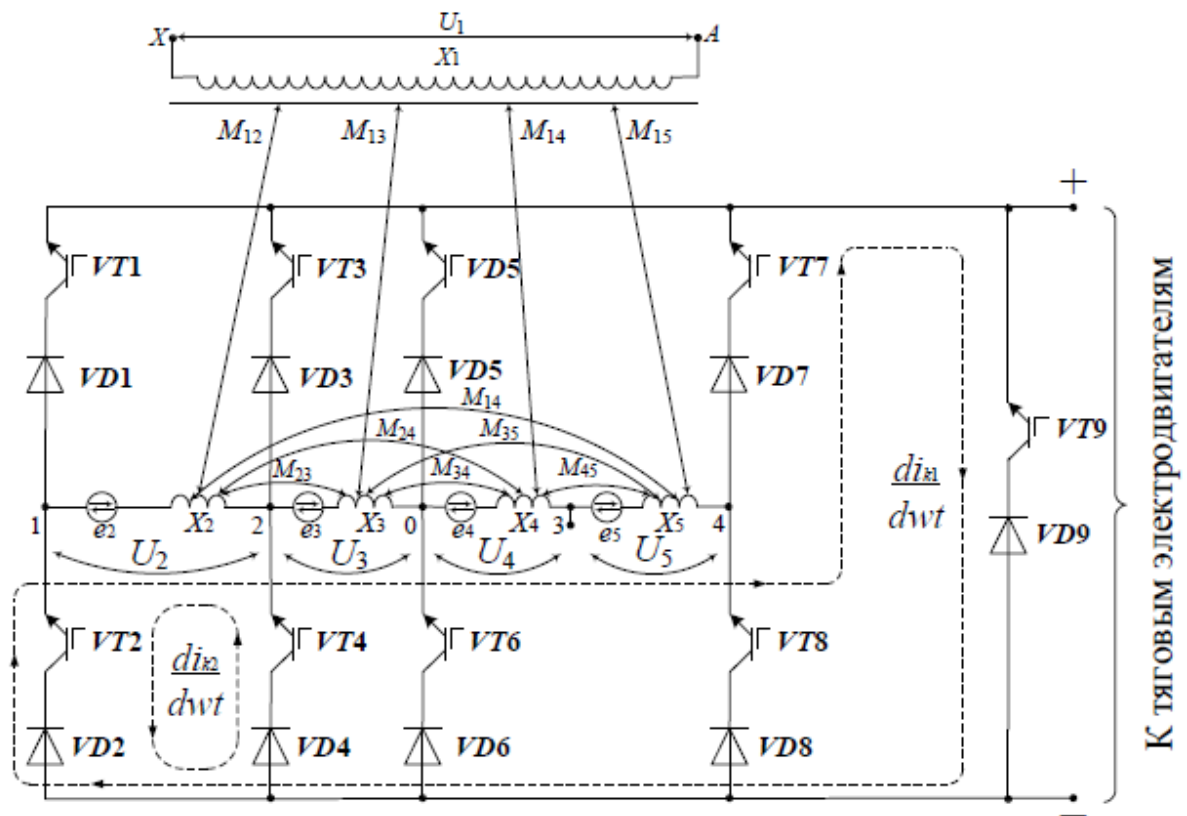


Рисунок 2.14 - Схема заміщення транзисторного ВІП в режимі рекуперативного гальмування

Блок схема ВІП на базі IGBT-транзисторів і його плеча, виконана в редакторі Simulink, представлена на рис. 2.15 і 2.16, відповідно.

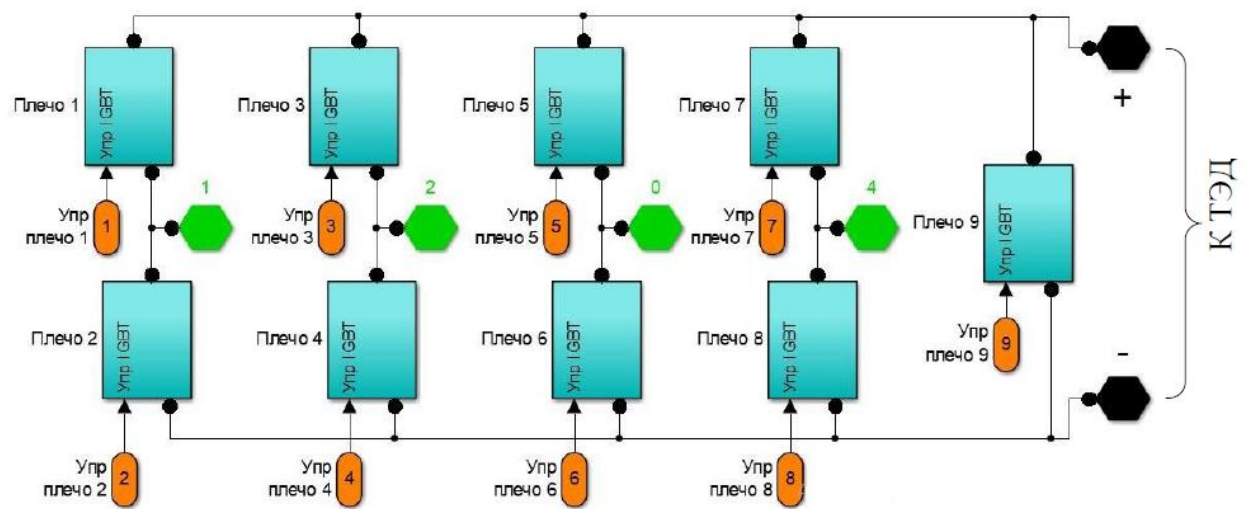


Рисунок 2.15 - Блок-схема пропонованого ВПІ в редакторі Simulink

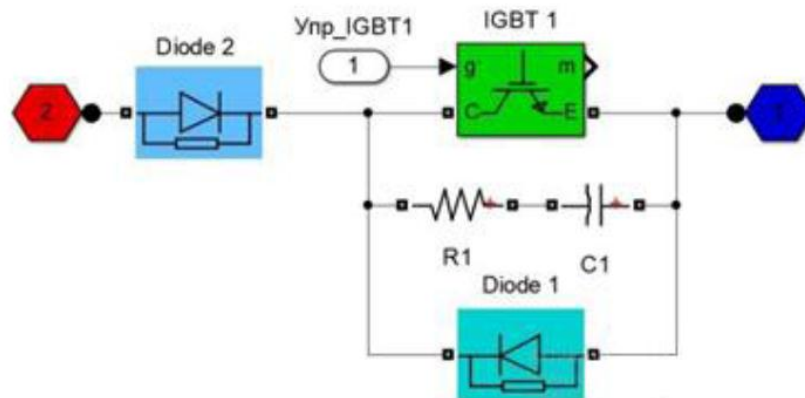


Рисунок 2.16 - Блок-схема плеча ВПІ в редакторі Simulink

У пропонованому ВПІ, використовується модель IGBT-транзистора з ізолюваним затвором і діода. В якості прототипів в моделі використовувалися IGBT-транзистори марки CM1000HG-130 XA, і діоди марки Д 453-1250.

У пакеті Matlab модель діода складається з послідовно включених резистора $R_{оп}$ індуктивності $L_{оп}$, джерела постійної напруги U_f , ключа SF , рис. 2.17, а. Блок логіки управляє роботою ключа. При позитивній напрузі на діоді ($U_{ак} - U_f$) відбувається замикання ключа і через прилад починає протікати струм. Розмикання ключа (вимикання діода) виконується при зниженні струму $I_{ак}$, що протікає через діод, до нуля.

Модель IGBT-транзистора складається з послідовно включених резистора $R_{оп}$, індуктивності $L_{оп}$, джерела постійної напруги V_f і ключа SW , рис.

2.17, б. Блок логіки відповідає за роботу ключа. Запуск приладу відбувається тоді, коли напруга колектор-емітер позитивна і більше, ніж U_f і на затвор транзистора поданий позитивний сигнал ($g > 0$). Відключення пристрою відбувається, коли зменшується сигнал на затворі до нуля ($g = 0$). При негативній напрузі колектор-емітер транзистор знаходиться у вимкненому стані.

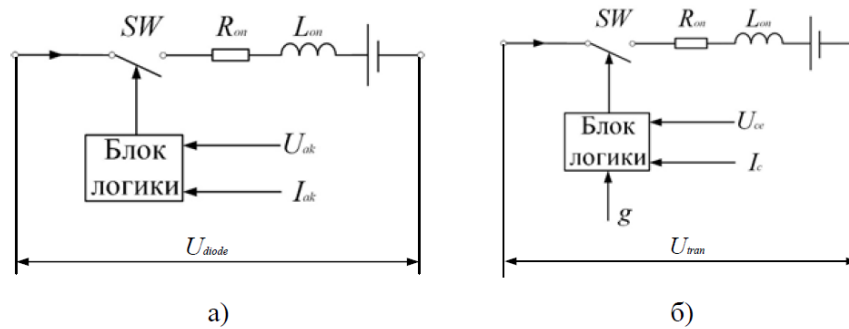


Рисунок 2.17-схеми моделей в бібліотеці Simulink: а) діода; б) IGBT-транзистора

2.4 Математична модель штатної ВУВ моторного вагона

Під час режиму рекуперативного гальмування електропоїзда обмотки збудження ТЕД перемикаються на незалежне живлення від напівкерованої ВУВ. ВУВ являє собою тиристорний міст, плечі якого працюють по черзі в відповідний напівперіод, внаслідок чого по обмотках збудження ТЕД протікає струм, випрямлений по двухпівперіодній схемі випрямлення. Схема заміщення штатної ВУВ під час комутації представлена на рис. 2.18.

Електромагнітні перехідні процеси в ланцюзі типового ВУВ під час комутації струму вентилів описуються рівняннями (2.4)-(2.5)

$$\frac{di_B}{dt} = \frac{r_{\text{мст}} (i_{\text{мст}} + i_K + i_B) - 2r_B i_B}{2L_B}, \quad (2.4)$$

$$\frac{di_K}{dt} = \frac{e_2 - i_K \cdot r_2}{L_2 - M_{12}}. \quad (2.5)$$

Блок-схема штатного ВУВ, виконана в редакторі Simulink, представлена на рис. 2.19.

2.5 Розробка математичної моделі, пропонованої ВУВ моторного вагона

У пропонованій ВУВ замість тиристорного моста встановлений діодний, необхідний для випрямлення напруги, а в загальне коло ВУВ встановлений IGBT-транзистор, що регулює напругу на обмотках збудження ТЕД в обидва напівперіоди. Схема заміщення, пропонованого ВУВ, для одного з напівперіодів напруги мережі, при роботі транзистора VT1 (інтервал 6 – 7), представлена на рис. 2.20, а. для цього інтервалу отримана система рівнянь, що описує зміну випрямленого струму в ланцюзі ВУВ

$$\begin{cases} \frac{di_{k2}}{dt} = \frac{e_2 - i_{\text{пш}} r_{\text{пш}} - i_{\text{вув}} r_2 - \Delta U_{(VD1+VT1+VD4)}}{L_2 - M_{12}}; \\ \frac{di_{\text{в}}}{dt} = \frac{2i_{\text{в}} r_{\text{в}} - i_{\text{пш}} r_{\text{пш}}}{2L_{\text{в}}}; \\ i_{\text{вув}} - i_{\text{в}} - i_{\text{пш}} = 0. \end{cases} \quad (2.6)$$

Для іншого напівперіоду напруги мережі система рівнянь буде аналогічна. На малюнку 2.20, б, представлена схема заміщення пропонованої ВУВ при розряді електромагнітної енергії через діодне плече, а зміна випрямленого струму описується системою рівнянь

$$\begin{cases} \frac{di_{\text{в}}}{dt} = \frac{2i_{\text{в}} r_{\text{в}} - \Delta U_{(VD5)}}{2L_{\text{в}}}; \\ \frac{di_{\text{в}}}{dt} = \frac{2i_{\text{в}} r_{\text{в}} + i_{\text{пш}} r_{\text{пш}}}{2L_{\text{в}}}; \\ i_{\text{в}} - i_{\text{D}} - i_{\text{пш}} = 0. \end{cases} \quad (2.7)$$

Величина ΔU є падінням напруги на діодах VD1-VD5 і транзистор VT1. Зважаючи на високу швидкість комутації IGBT-транзистора прийнято, що процес комутації протікає миттєво і не впливає на випрямлений струм ВУВ. На малюнку 2.21 наведена блок-схема пропонованої ВУВ, виконана в редакторі Simulink.

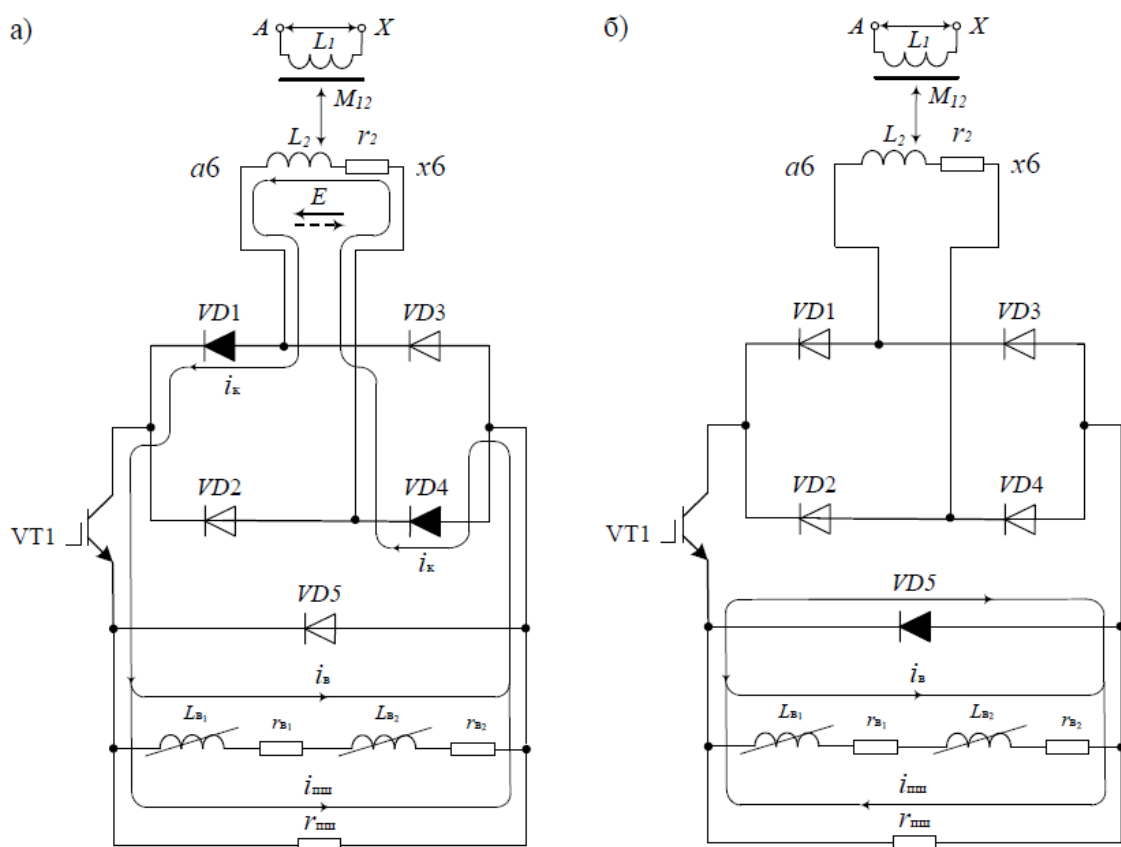


Рисунок 2.20 - Схема заміщення пропонованої ВУВ електропоїзда: а) при роботі транзистора VT1: б) при розряді електромагнітної енергії через діодне плече VD5

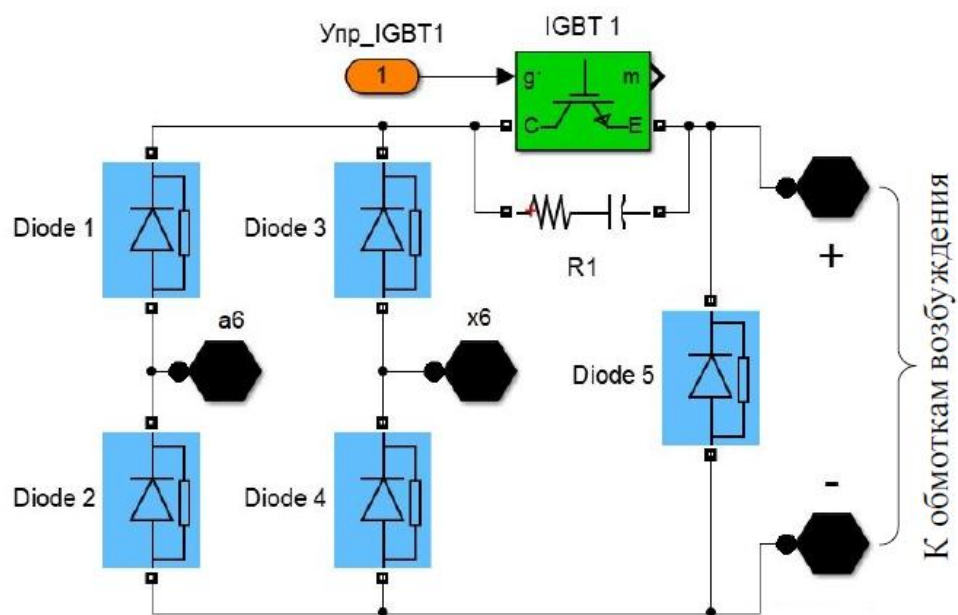


Рисунок 2.21 - Блок-схема пропонованої ВУВ в редакторі Simulink

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В СИЛОВИХ КОЛАХ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ ПРИ РОБОТІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ В РЕЖИМІ РЕКУПЕРАЦІЇ

У режимі рекуперативного гальмування, електрична енергія що виробляється колекторними ТЕД електропоїзда віддається назад в контактну мережу, частина з якої споживається моторними вагонами на власні потреби. Для того щоб перейти з режиму тяги в рекуперацію, необхідно перевести тягові двигуни в генераторний режим роботи. Для цього збирають схему незалежного збудження двигунів. Обмотки збудження ТЕД підключають до ВУВ. Інвертування постійного струму в змінний з частотою 50 Гц і його регулювання проводиться за допомогою ВІП. При цьому підвищення напруги до необхідного рівня 25 кВ здійснюють багатообмотковим тяговим трансформатором. моторного вагона.

Особливість електромагнітних процесів, що відбуваються при інвертуванні струму сильно впливає на енергетичні показники та енергоефективність електропоїзда. У цьому розділі розглядаються електромагнітні процеси пропонованих схемотехнічних рішень ВІП і ВУВ, на базі IGBT-транзисторів і їх способів управління.

Штатні ВІП (ВІП-1000-У1) і ВУВ (ПТ.02.У2) виконані у вигляді мостових схем з зонно-фазовим регулюванням напруги живлення шляхом зміни інтервалів включення тиристорів. На рис. 3.1, показана спрощена електрична принципова схема силових ланцюгів моторного вагона електропоїзда серії ЕПЗД зі штатними ВІП і ВУВ, що включає в себе: Т – струмоприймач; ТТ – тяговий трансформатор; ВІП – випрямно-інверторний перетворювач; ВУВ1-ВУВ2 – випрямна установка збудження; СР1-СР2 – згладжуючий реактор; Я1-Я4 – обмотка якоря; ОВ1-ОВ4 – обмотка збудження; R1-R2 – резистор постійного шунтування; R9(10)-R29(30) – баластні резистори; А2-А9 і А2 – А10 – блоки діодів (для запобігання появи контурних струмів при вході в режим рекуперативного гальмування на високих швидкостях); МПСУ- мікропроцесорна система управління тяговим приводом електропоїзда.

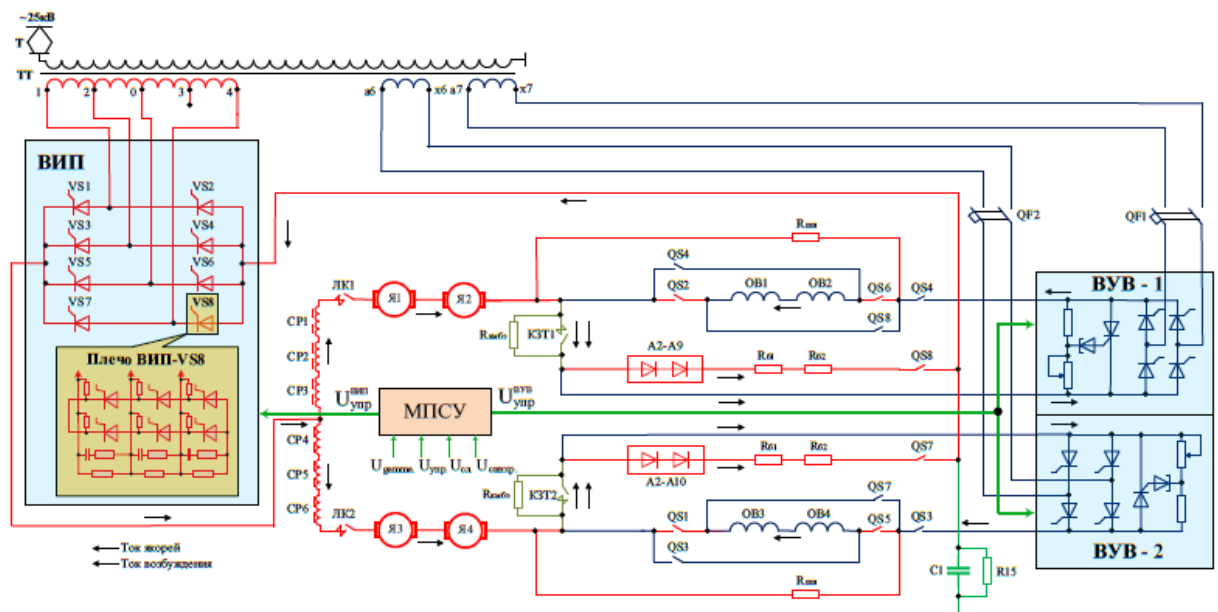


Рисунок 3.1 - Спрощена електрична принципова схема силових ланцюгів моторного вагона електропоїзда зі штатними ВІП і ВУВ в режимі рекуперативного гальмування

ВІП-1000-У1 здійснює чотирьохзонне регулювання випрямленої напруги, що подається на ТЕД електропоїзда, при підключенні до трисекційного тягового трансформатора ОДЦЕ-2000/256 - У1. Кожне плече ВІП, на прикладі VS8, має дві паралельні гілки, до складу яких входять 3 послідовно з'єднаних тиристора таблеткового виконання марки Т853-800-28в, захищених демпфуючими ланцюгами (VS5-VS6 містять по 2 послідовно з'єднаних тиристора) [120].

Блоки ВУВ призначені для випрямлення і плавного регулювання струму в обмотках збудження ТЕД в режимі рекуперативного гальмування. ВУВ являє собою тиристорний міст, що складається з силових чотирьох тиристорів штирьового виконання марки Т171-320-10, захищених демпфуючими ланцюгами.

Крім того, в конструкції ВУВ передбачений додатковий тиристор, що забезпечує прискорене зниження струму збудження і розмагнічування тягових двигунів у випадках спрацьовування захисту.

3.1 Дослідження електромагнітних процесів при роботі пропонованого ВІП електропоїзда на базі IGBT-транзисторів на прикладі четвертої зони регулювання в режимі рекуперативного гальмування

Для дослідження електромагнітних процесів, що виникають в плечах пропонованого ВІП під час їх роботи на четвертій зоні регулювання, необхідно перший і другий напівперіоди випрямленої напруги розбити на часові інтервали $0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - \pi$ та $\pi - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 - 2\pi$ відповідно до рис. 2.2.

Для спрощення запису падіння напруги на плечах пропонованого ВІП напишемо вираз для еквівалентного падіння напруги, яке визначається за формулою

$$\Delta U_{nз} = \Delta U_{VD} \cdot N + \Delta U_{VT} \cdot N,$$

де n – номер плеча;

ΔU_{VD} – падіння напруги на діоді плеча;

ΔU_{VT} – падіння напруги на транзисторі плеча;

N – кількість послідовно включених елементів в гілки плеча.

Схема заміщення ВІП на базі IGBT-транзисторів показана на рис. 3.3. На інтервалі 1-2, рис. 3.2, в момент часу 1 на транзистори плечей VT3 і VT8 подаються керуючі сигнали β' β_w відповідно, після чого в період мережевої комутації γ відбувається передача навантаження з транзистора плеча VT9 на плечі 3 і 8. На даному інтервалі утворюються два контури протікання струму:

– вторинна обмотка 2-4, плече V3 (VT3; VD3), плече V9 (VT9; VD9), плече V8 (VT8; VD8);

$$\text{– плече } V9 (VT9; VD9) \left\langle \begin{matrix} CP1, \Gamma 1, \Gamma 2, R_{\delta} \\ CP2, \Gamma 3, \Gamma 4, R_{\delta} \end{matrix} \right\rangle.$$

Миттєва схема заміщення, відповідна часовому інтервалу 1-2, представлена на рис. 3.4, а.

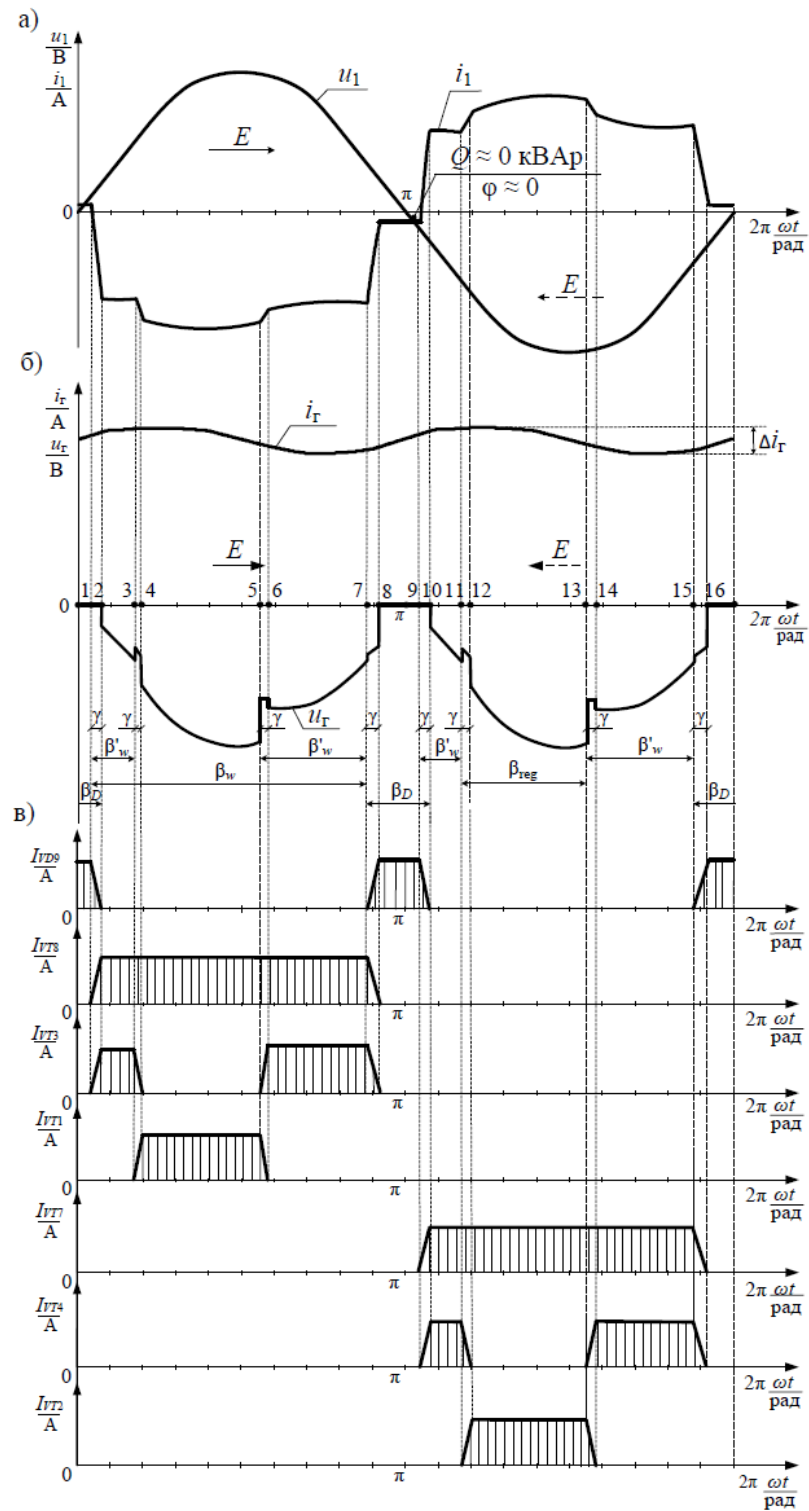


Рисунок 3.2 – Діаграми електромагнітних процесів пропонованого ВПП на 4-ій зоні регулювання в режимі рекуперативного гальмування: а) діаграми напруги і струму в первинній обмотці тягового трансформатора; б) діаграми випрямленої напруги і струму ВПП; в) діаграми струмів плечей ВПП: u_1 – напруга мережі; i_1 – струм мережі; u_γ – напруга ВПП; i_γ – струм ВПП; I_{VTn} – струм в n -му плечі ВПП

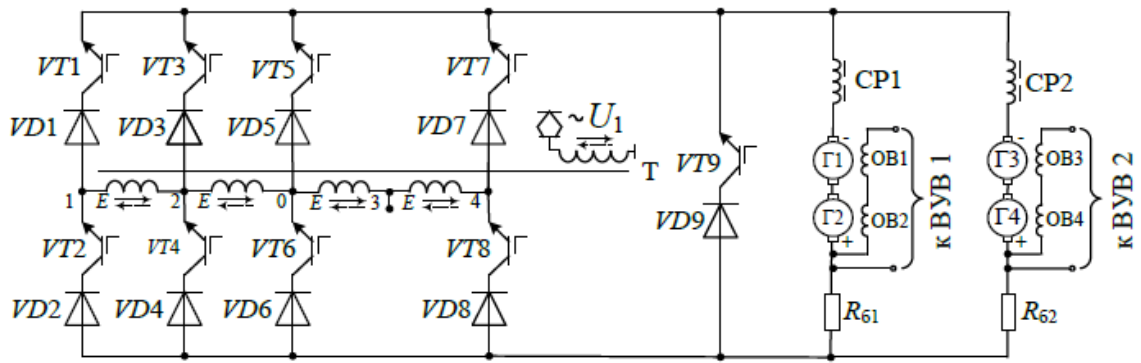


Рисунок 3.3 – Схема заміщення, пропонованого ВІП електропоїзда

Для часового інтервалу 2-3 отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{di_b}{dt} = \frac{E_{2-4} - \Delta U_{3\text{э}} + \Delta U_{9\text{э}} - \Delta U_{8\text{э}}}{L_{2-4}}; \\ \frac{di_r}{dt} = \frac{E_r - \Delta U_r - \Delta U_{9\text{э}}}{L_{r3}}; \\ i_r + i_b - i'_r = 0. \end{cases}$$

На інтервалі 2-3, рис. 3.2, забезпечується напруга повної третьої зони. Контур протікання струму на даному інтервалі:

- вторинна обмотка 2 – 4, плече $V3$ ($VT3$; $VD3$) – $\left\langle \begin{matrix} \text{CP1, Г1, Г2, } R_{61} \\ \text{CP2, Г3, Г4, } R_{62} \end{matrix} \right\rangle$ – плече $V8$ ($VT8$; $VD8$).

Миттєва схема заміщення, відповідна часовому інтервалу 2-3, зображена на рис. 3.4, б

$$\frac{di_r}{dt} = \frac{E_{2-4} - \Delta U_{3\text{э}} + E_r - \Delta U_{8\text{э}} - \Delta U_r}{L_{2-4} + L_{r3}}.$$

Починаючи з моменту часу, що відповідає точці 3 на діаграмі випрямленої напруги, керуючий імпульс $\beta_{\text{рег}}$ подається на транзисторне плече $VT1$, рис. 3.2. Після чого виникає комутація струму з тривалістю γ , з плеча $VT3$ на плече $VT1$ ВІП. На даному інтервалі утворюються два контури протікання струму:

- вторинна обмотка 2 – 4, плече $V3$ ($VT3$; $VD3$) – $\left\langle \begin{matrix} CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{\delta1} \\ CP2, \Gamma3, \Gamma4, R_{\delta2} \end{matrix} \right\rangle$ –

плече $V8$ ($VT8$; $VD8$).

Для часового інтервалу 3-4 отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{di_r}{dt} = \frac{E_{2-4} + E_r - \Delta U_{3\Delta} - \Delta U_r - \Delta U_{8\Delta}}{L_{2-4} + L_{r3}}; \\ \frac{di_\gamma}{dt} = \frac{E_{1-2} + \Delta U_{1\Delta} - \Delta U_{3\Delta}}{L_{1-2}}; \\ i_r + i_\gamma - i'_r = 0. \end{cases}$$

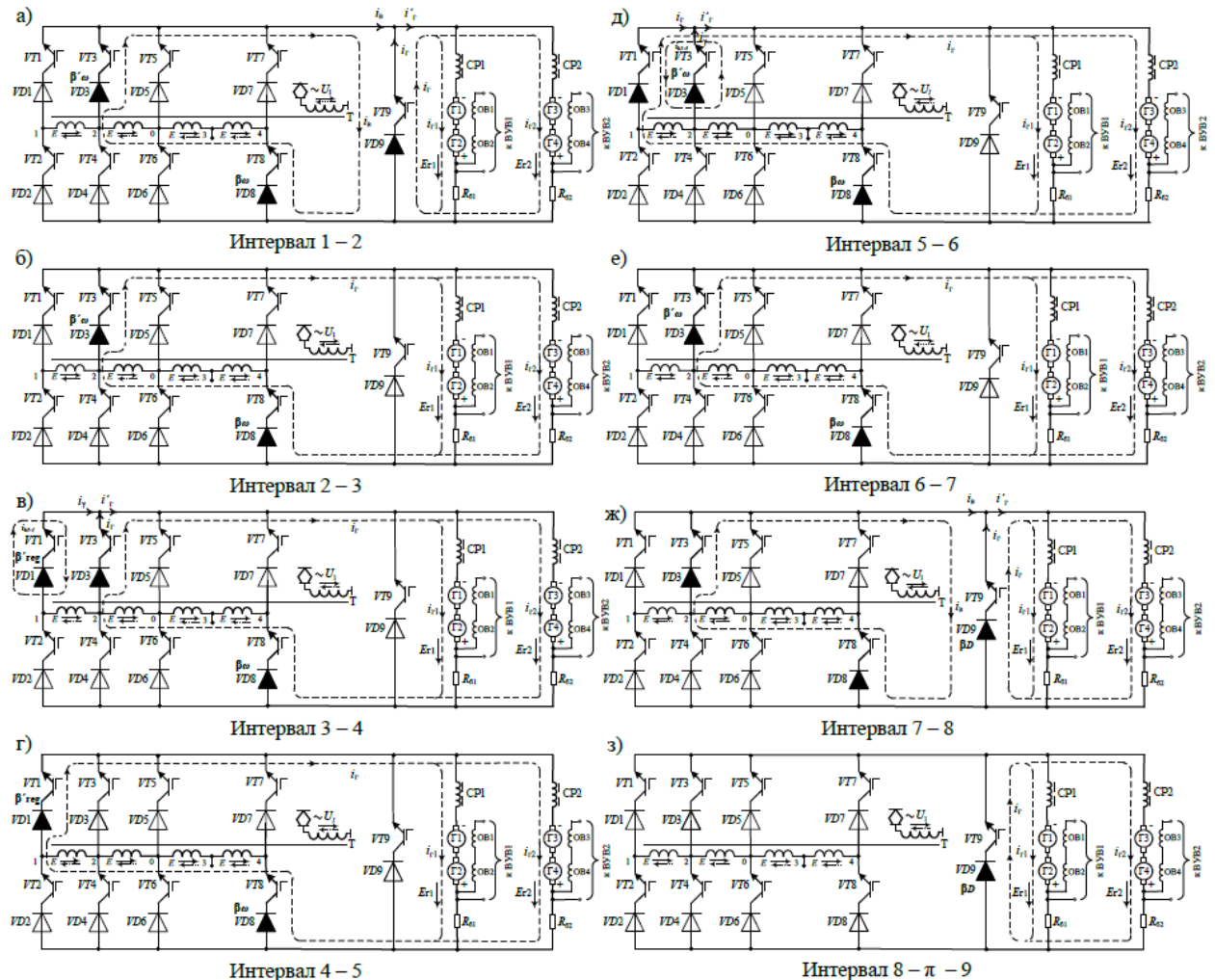


Рисунок 3.4 - Миттєві схеми заміщення, пропонованого ВП електропоїзда на четвертій зоні регулювання в режимі рекуперативного гальмування: а) інтервал 1 – 2; б) інтервал 2-3; в) інтервал 3 – 4; г) нтервал 4 – 5; д) інтервал 5 – 6; е) інтервал 6 – 7; ж) інтервал 7-8; з) інтервал 8-π-9

Після завершення комутації γ струм в інверторі буде протікати через транзисторні плечі VT1 і VT8, що відповідає часовому інтервалу 4 – 5, забезпечуючи напругу повної четвертої зони регулювання.

Подібним чином визначаються контури протікання струмів на інших інтервалах часу в відповідній зоні регулювання.

Миттєві схеми заміщення вдосконаленого ВПІ електропоїзда на четвертій зоні регулювання в режимі рекуперативного гальмування для різних інтервалів часу наведено на рис. 3.4.

Далі електромагнітні процеси пропонованого ВПІ відбуваються аналогічно, згідно з алгоритмом управління.

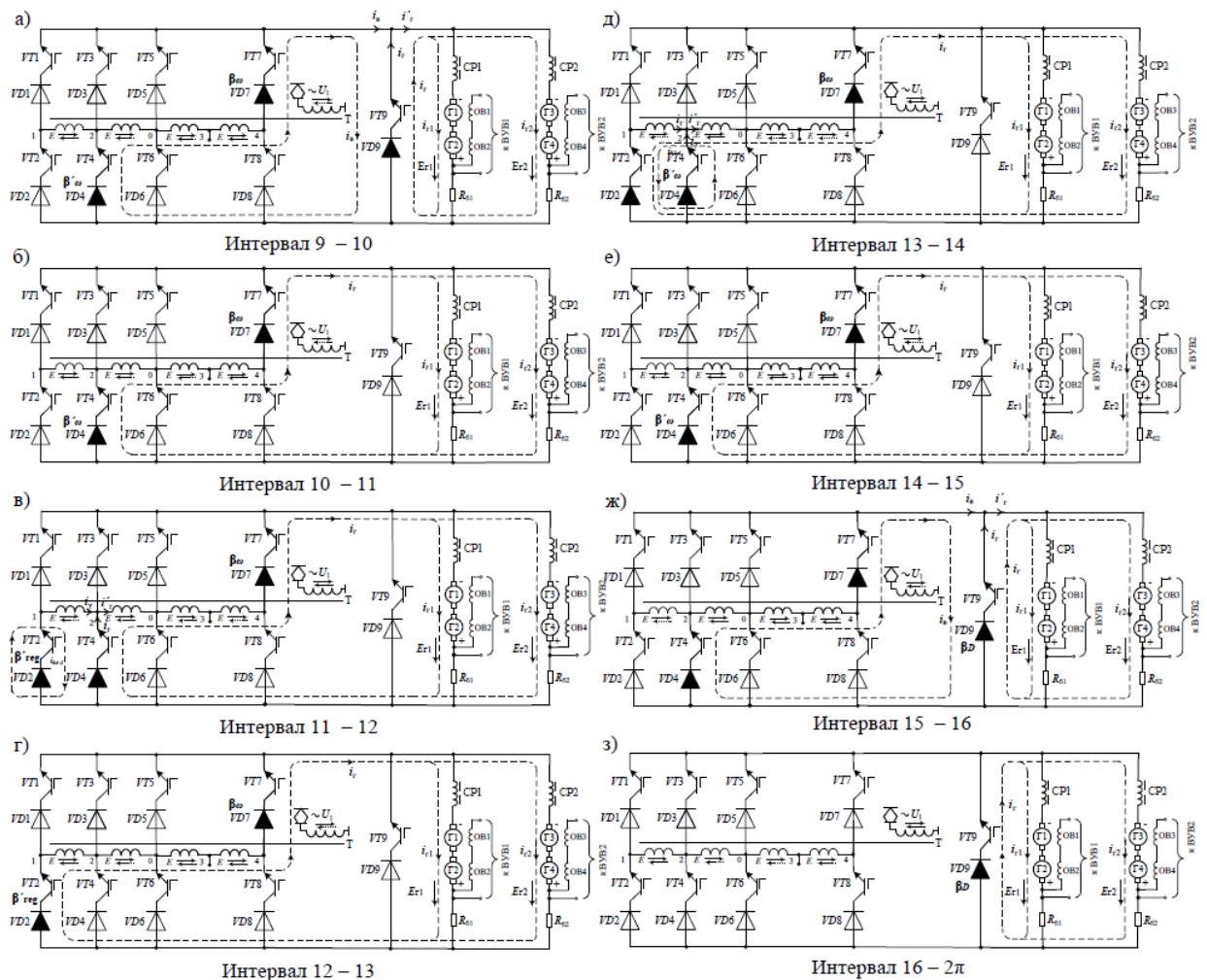


Рисунок 3.5 - Миттєві схеми заміщення, вдосконаленого ВПІ електропоїзда на четвертій зоні регулювання в режимі рекуперативного гальмування: а) інтервал 9-10; б) інтервал 10-11; в) інтервал 11-12; г) інтервал

12-13; д) інтервал 13-14; е) інтервал 14-15; ж) інтервал 15-16; з) інтервал 16 – 2π

4 ВДОСКОНАЛЕННЯ СХЕМОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ СИЛОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА І СПОСОБУ ЙОГО УПРАВЛІННЯ В РЕЖИМІ РЕКУПЕРАЦІЇ

До основних недоліків існуючого ВПІ електропоїзда слід віднести:

- комутація струмів плечей ВПІ з кутом β здійснюється в кінці напівперіоду;
- для підвищення надійності роботи інвертора в рекуперативному гальмуванні кут запасу інвертора δ прийнятий значним ≈ 25 ел. град. Це додатково призводить до значного відставання першої гармоніки струму в тяговій обмотці трансформатора щодо напруги на кут φ , що позначається на високому споживанні електропоїздом реактивної потужності і його низькому коефіцієнті потужності;
- незважаючи на одночасну подачу імпульсів управління на тиристори двох однофазних плечей ВПІ, комутація протікає по черзі в двох контурах (спочатку у великому, а потім в малому), що збільшує кут комутації струмів плечей інвертора. При цьому значно зменшується середнєвипрямлена напруга інвертора і збільшується споживання реактивної потужності електропоїздом, що знижує коефіцієнт потужності електропоїзда;
- збільшується пульсація випрямленого струму інвертора на інтервалі часу кута запасу δ в якій випрямлений струм протікає проти електрорушійної сили трансформатора, знижуючи коефіцієнт потужності електропоїзда.

До основних недоліків існуючої ВУВ відноситься:

- затримка в кожному напівперіоді вимикання тиристорів забезпечує значне відставання струму первинної обмотки тягового трансформатора щодо його напруги і характеризується значним кутом φ , що говорить про високе споживання перетворювачем реактивної потужності індуктивного характеру і низькому коефіцієнті потужності;
- при роботі випрямної установки збудження виникає тривале протікання струму у вторинній обмотці трансформатора проти напрямку електрорушійної сили трансформатора, що викликає значну пульсацію струму збудження.

4.1 Розробка схемотехнічних рішень ВІП і ВУВ електропоїзда на базі IGBT-транзисторів і способів їх управління у режимі рекуперативного гальмування

З моменту появи силових IGBT-транзисторів є можливість проектування вдосконалених ВІП і ВУВ на їх базі, причому зі збереженням масогабаритних показників. Крім того, силові повністю керовані транзистори мають багато інших переваг:

- мінімізація паразитних індуктивностей в силових ланцюгах, за рахунок чого в транзисторах знижуються сплески перенапруг і комутаційні втрати;
- висока стійкість до du / dt , завдяки чому забезпечується надійна робота транзисторів при граничних завантаженнях по струму і напрузі;
- малий час спаду струму при виключенні;
- низькі і практично не залежні від температури залишкові струми, що особливо важливо при роботі транзисторів на високих частотах;
- високі значення комутуваних струмів і напруг та ін.

Пропонується провести заміну напівкерованої тиристорної бази ВІП і ВУВ, на сучасну, повністю керовану-транзисторну.

Схема пропонованого ВІП реалізована у вигляді восьмиплечового виконання з додаванням додаткового дев'ятого розрядного плеча, а ВУВ виконаний на основі двухпівперіодного діодного мостового випрямляча, з послідовно з'єднаним транзисторним плечем, рис. 4.1. Таке схемотехнічне рішення дає можливість отримати керований діодний міст для підтримки і регулювання струмів збудження ТЕД в режимі рекуперативного гальмування. Захист ВІП і ВУВ від комутаційних перенапруг здійснюється за допомогою паралельно підключених вторинній обмотці тягового трансформатора снаберних RC-ланцюгів, підбір яких необхідно виконати.

Таке рішення можна застосовувати не тільки на нових електропоїздах, а також проводити модернізацію існуючих. При цьому ланцюг випрямленого струму моторного вагона залишається незмінним.

Особливості роботи плеча, пропонованого ВП і призначення його складових

Розглянемо плече ВП на прикладі VT8, до складу якого входять:

- IGBT-транзистор VT8 з послідовно включеним випрямним діодом VD8;
- ланцюг захисту транзистора, складається з зворотного діода VD8.1 і снабберного *RC*-ланцюга, що включає в себе послідовно з'єднані резистор R1 і конденсатор C1 і підключається до виводів колектор емітер силового IGBT-транзистора.

IGBT-транзистор VT8, необхідний для здійснення управління випрямленою напругою, виходячи із розробленого алгоритму управління, наведеного нижче. Випрямний діод VD8 призначений для випрямлення змінного струму. Крім того, він виконує функцію захисту IGBT-транзистора від подачі зворотної напруги на перехід колектор-емітер, тим самим виключаючи протікання зворотного струму по вторинній обмотці тягового трансформатора електропоїзда.

Особливості роботи, пропонованої ВУВ і призначення її складових

Пропонована ВУВ включає в себе:

- діодний двопівперіодний мостовий випрямляч VD10-VD13 необхідний для перетворення змінного струму в пульсуючий;
- IGBT-транзистор VT10, що здійснює регулювання випрямленої напруги в обмотках збудження ТЕД;
- ланцюг захисту транзистора, що складається з зворотного діода VD10.1 і снабберного *RC*-ланцюга, що включає в себе послідовно з'єднані резистор R2 і конденсатор C2 і підключається до виводів колектор-емітер силового IGBT-транзистора;
- діод VD18, призначений для підтримки струму збудження в моменти закритого стану транзистора VT10, за рахунок запасеної електромагнітної енергії в обмотках збудження ТЕД, а також для захисту від викидів напруги при комутаційних перемикаваннях.

На сьогоднішній день, випуск силових, високовольтних IGBT-транзисторів, необхідних для пропонованих ВІП і ВУВ моторного вагона, здійснюється як зарубіжними виробниками: Mitsubishi Electric, Hitachi, Toshiba, ABB, Infineon, Semikron, IXYS UK Westcode, так і вітчизняними: Перетворювач та ін.

З метою забезпечення високої надійності і безперебійної роботи плечей ВІП і ВУВ необхідно застосовувати прилади, параметри яких трохи вище, ніж номінальні струми і напруги при тривалому режимі роботи ВІП і ВУВ. Крім того, для здійснення модернізації ВІП і ВУВ, IGBT-транзистори і діоди з необхідними технічними характеристиками повинні вписуватися в габарити існуючих конструкцій перетворювачів.

Виходячи з вище перерахованих вимог, що пред'являються до СНП, був проведений аналіз IGBT-транзисторів, що випускаються і діодів різних виробників, на основі якого, були обрані напівпровідникові прилади, що задовольняють цим вимогам. Основні характеристики, обраних силових IGBT-транзисторів і діодів для ВІП і ВУВ наведені в таблицях 4.1 і 4.2.

Таблиця 4.1 - Силові IGBT-транзистори для ВІП і ВУВ електропоїзда і їх основні характеристики

Країна-виробник, завод	Вид СНП	Напруга колектор-емітер, В	Струм колектор-емітер, А	Напруга ізоляції, В
ВІП				
Японія, Mitsubishi Electric	IGBT-транзистор CM1000HG-130H	6500	1000	10200
ВУВ				
Японія, Mitsubishi Electric	IGBT-транзистор CM600HA-24A	1200	600	2500

Таблиця 4.2 – Силлові діоди для ВІП і ВУВ електропоїзда і їх основні характеристики

Країна-виробник, завод	Вид СНП	Пікова зворотна напруга, В	Прямий струм, А
ВІП			
Україна, Перетворювач	Д453-1250	6500	1250
ВУВ			
Україна, Перетворювач	Д175-500	1200	500

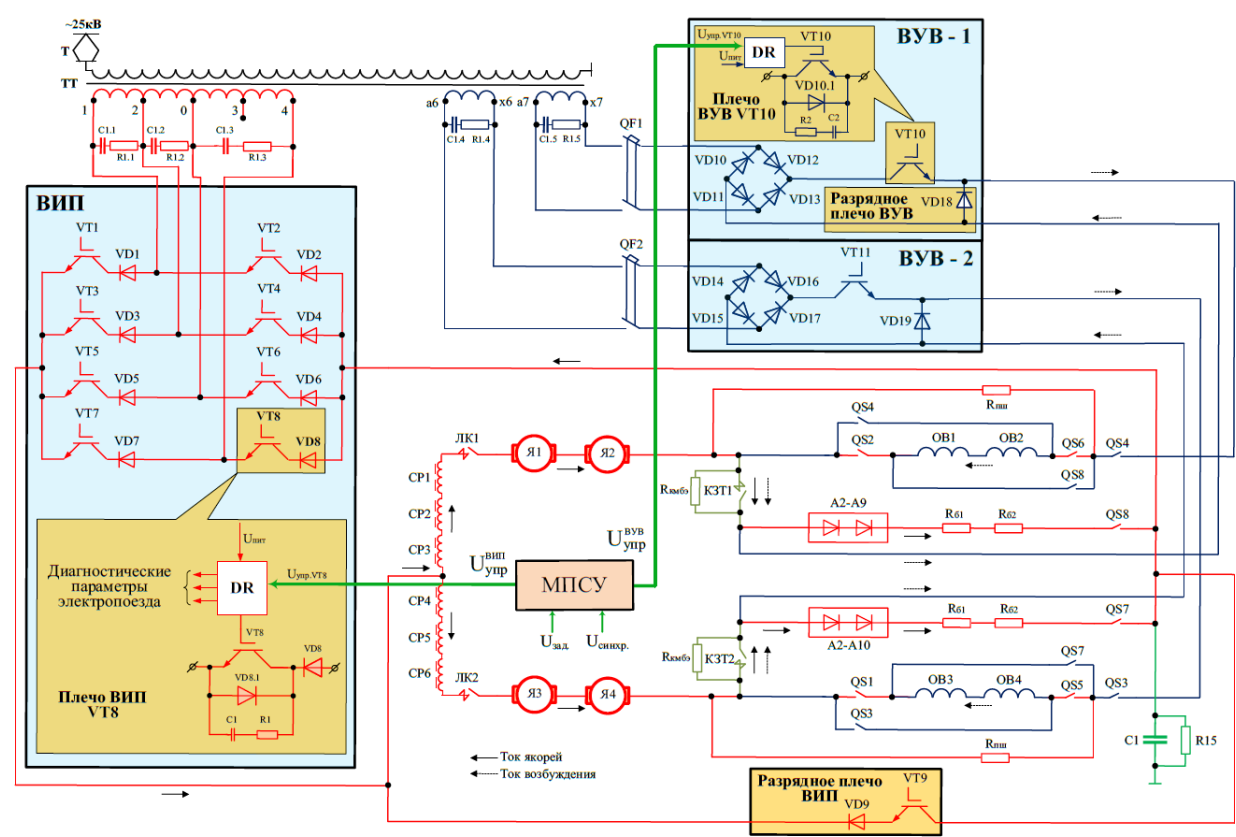


Рисунок 4.1 – Електрична принципова схема силових кіл моторного вагона електропоїзда з пропонованими ВІП і ВУВ на базі IGBT-транзисторів в режимі рекуперативного гальмування

4.2 Розробка способів управління пропонованими ВІП і ВУВ на базі IGBT-транзисторів для електропоїзда змінного струму в режимі рекуперативного гальмування

Спосіб управління вдосконаленим ВІП в режимі рекуперативного гальмування, полягає у включенні IGBT-транзисторів з деяким кутом t_{on} від переходу змінної напруги мережі через 0, а момент їх закриття є змінним значенням t_{off}^{var} , яке залежить від величини струму ТЕД, рис. 4.2. При цьому вимикання IGBT-транзисторів завжди здійснюється на мінімальних миттєвих значеннях напруги мережі ΔU_1 з урахуванням тривалості комутації струму, забезпечуючи кут $\varphi \approx 0$ і симетрію змінного струму щодо напруги мережі.

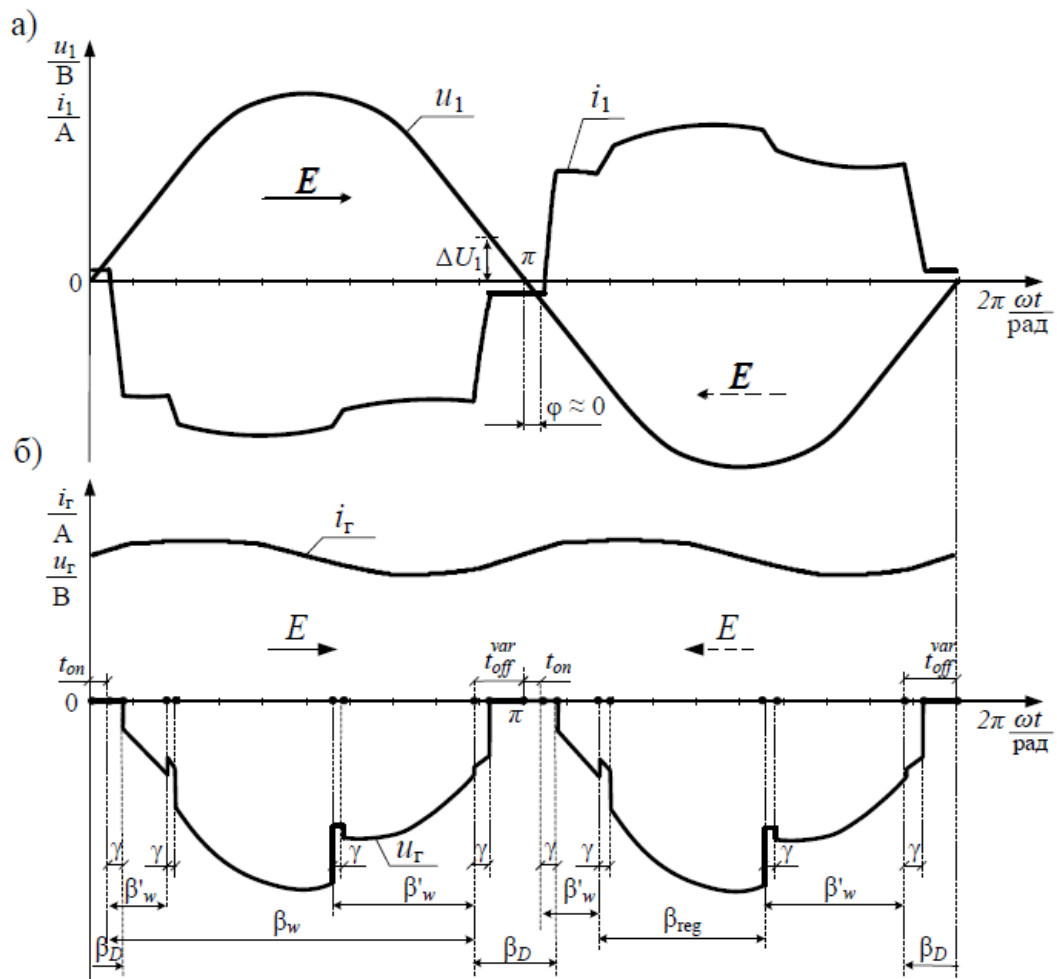


Рисунок 4.2 - Вдосконалений спосіб управління IGBT-транзисторами пропонованого ВІП в режимі рекуперативного гальмування: а) діаграми напруги і струму в первинній обмотці тягового трансформатора; б) діаграми випрямленої напруги і струму ВІП (u_1 - напруга мережі; i_1 - струм мережі; u_{Γ} - напруга ВІП; i_{Γ} - струм ВІП)

Вдосконалений спосіб управління дозволить:

- отримати максимальний коефіцієнт потужності електропоїзда в режимі рекуперативного гальмування і значно збільшити повернення електроенергії в контактну мережу порівняно із електропоїздами зі штатними-тиристорними перетворювачами;
- зменшити післякомутаційні викиди напруги в ланцюзі випрямленого струму, що дозволить використовувати снабберні кола низької потужності, що мають менші габарити.

Розроблений алгоритм управління пропонується ВІП на базі IGBT-транзисторів в режимі рекуперативного гальмування представлений в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 - Алгоритм управління вдосконалим ВІП на базі IGBT-транзисторів в режимі рекуперативного гальмування

Зона регулювання	Напрямок ЕРС трансформатора	Плечі ВІП								
		VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6	VT7	VT8	VT9
IV	→	β_{reg}	—	β'_w	—	—	—	—	β_w	β_D
	←---		β_{reg}	—	β'_w			β_w	—	β_D
III	→	—	—	β_{reg}	—	β'_w	—	—	β_w	β_D
	←---				β_{reg}	—	β'_w	β_w	—	β_D
II	→	β_{reg}	—	β'_w	—	—	β_w	—	—	β_D
	←---		β_{reg}	—	β'_w	β_w	—	—	—	β_D
I	→	—	—	β_{reg}	—	—	β_{reg}	—	—	β_D
	←---	—	—	—	β_{reg}	β_{reg}	—	—	—	β_D

Спосіб управління пропонується ВУВ в режимі рекуперативного гальмування, полягає у включенні і виключенні IGBT-транзистора шляхом подачі керуючого сигналу α_{reg} , який регулюється від середини напівперіоду до нуля і π , при цьому швидкість зміни ширини імпульсу в бік нуля і π може бути однаковою або різною, рис. 4.3. Ширина імпульсу α_{reg} вибирається виходячи з необхідного струму збудження в тягових електродвигунах. Підтримка струму збудження в моменти відключення випрямної установки збудження від

тягового трансформатора здійснюється за допомогою роботи зворотного діода, підключеного паралельно обмоток збудження тягових електродвигунів, при цьому час роботи його визначається шириною імпульсу α_D . Алгоритм управління пропонованої ВУВ на базі IGBT-транзисторів представлений в табл. 4.4.

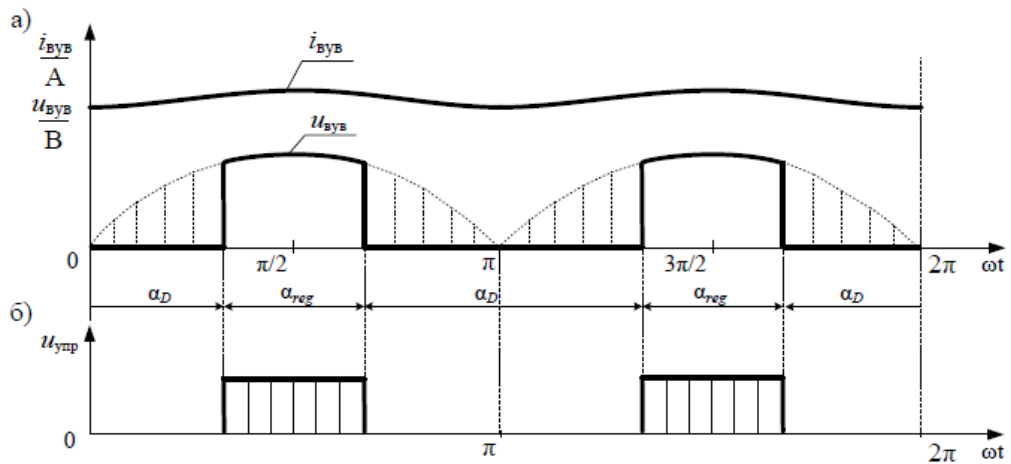


Рисунок 4.3 - Вдосконалений спосіб управління IGBT-транзистором пропонованої ВУВ в режимі рекуперативного гальмування: а) діаграми випрямленої напруги і струму ВУВ; б) діаграма управління IGBT-транзистором (u_{vyb} - напруга ВУВ; i_{vyb} - струм ВУВ; $u_{упр}$ - напруга управління IGBT-транзистором)

Таблиця 4.4 - Алгоритм управління вдосконаленої ВУВ на базі IGBT-транзисторів в режимі рекуперативного гальмування

Зона регулювання	Напрямок ЕРС трансформатора	Плечі ВУВ				
		VD1	VD2	VD3	VD4	VT1
I	→	—	α_{reg}	α_{reg}	—	α_D
	← — —	α_{reg}		—	α_{reg}	α_D

Для порівняння енергетичних показників моделі електропоїзда зі звичайними і вдосконаленими ВП і ВУВ, необхідно для всіх випадків задатися рівними параметрами моделі. Також для виключення спотворення

форми кривої напруги контактної мережі і впливу на що відбуваються перехідні процеси, приймається, що на фідерної зоні ділянки кола знаходиться один електропоїзд.

В якості критеріїв порівняння при аналізі роботи електропоїзда зі штатними і пропонованими ВІП і ВУВ визначмо коефіцієнт потужності електропоїзда K_m . Розрахунок виконаємо за допомогою розроблених моделей на основі стандартних блоків Simulink MatLab на EOM.

Розрахунок коефіцієнта потужності електропоїзда проводився за формулою

$$K_m = \frac{\sum_{k=0}^n U_k I_k \cos \varphi_k}{\sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2}} = \frac{U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + \dots + U_k I_k + U_k I_k \cos \varphi_k}{\sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_k^2} \cdot \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_k^2}},$$

де U_0, I_0 – постійні складові напруги і струму мережі, в даному випадку дорівнюють нулю;

U_1, I_1 – діючі значення напруги і струму 1-ї гармоніки;

U_k, I_k – діючі значення напруги і струму k-ї гармоніки;

φ_k – кут зсуву фази між напругою і струмом k-ї гармоніки.

На рис. 4.4 представлено електромагнітний процес при роботі пропонованого ВІП на прикладі 3,5-ої зони регулювання в режимі рекуперативного гальмування, отримані в процесі математичного моделювання. При роботі пропонованого ВІП на 3,5 зоні зводиться до мінімуму утворення реактивної потужності, $Q \approx 0$ кВАр.

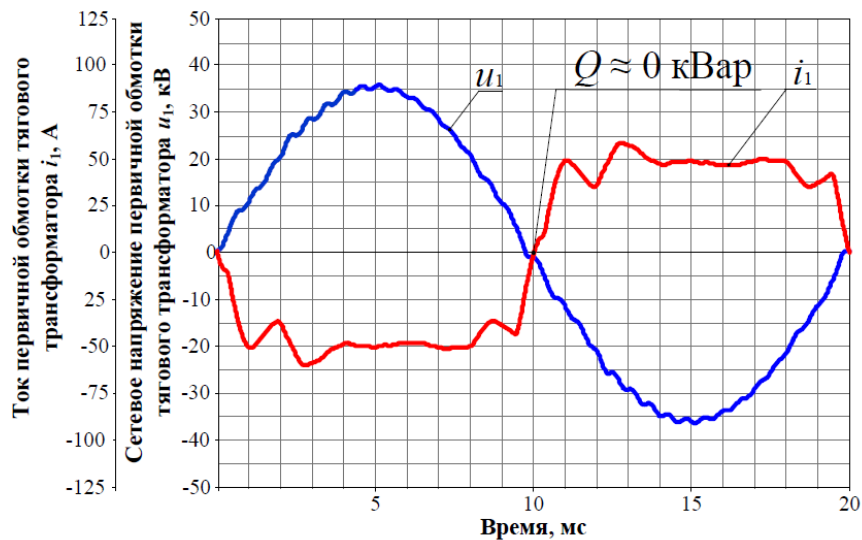


Рисунок 4.4 – Форма кривих напруги u_1 і струму i_1 в первинній обмотки тягового трансформатора електропоїзда при роботі пропонованого ВПІ на 3,5-ої зоні регулювання напруги

За результатами моделювання роботи електропоїзда зі штатними і пропонованими ВПІ, ВУВ можна зробити наступні висновки:

- коефіцієнт потужності електропоїзда зі штатними ВПІ і ВУВ в середньому склав $K_m = 0,635$, з пропонованими ВПІ і ВУВ $K_m = 0,945$, що вище щодо штатного електропоїзда на 49 %;
- коефіцієнт потужності електропоїзда в режимі рекуперативного гальмування на першій зоні регулювання напруги при роботі зі штатними ВПІ і ВУВ становить $K_m \approx 0,44$, з пропонованими ВПІ і ВУВ $K_m \approx 0,92$, що вище щодо штатного електропоїзда на 109 % відповідно;
- коефіцієнт потужності електропоїзда в режимі рекуперативного гальмування на 3,5 зони регулювання напруги при роботі зі штатними ВПІ і ВУВ становить $K_m \approx 0,68$, з пропонованими ВПІ і ВУВ $K_m \approx 0,96$, що вище щодо штатного електропоїзда на 41% відповідно.

4.3 Розрахунок снаберних кіл для захисту силових ключів вдосконалених ВПІ і ВУВ від комутаційних перенапруг

Проектування кіл захисту перетворювачів високої потужності є одним з важливих завдань, від яких буде залежати не тільки працездатність, але і

довговічність перетворювача. В якості силових ключів, розробленого ВІП електропоїзда змінного струму, пропонується використовувати сучасні напівпровідникові прилади IGBT-транзистори.

Як правило, виходи з ладу IGBT-транзисторів найчастіше відбуваються в моменти його комутації. При вимкненнях транзистора, можуть виникати зворотні індуктивні викиди, здатні вивести з ладу транзистор. Зменшення амплітуди таких викидів досягається управлінням драйвера, що формує плавне вимикання транзистора. Крім того, за допомогою драйвера є можливість контролю падіння напруги на переході колектор-емітер, що запобігає перевищенню порогового значення струмового навантаження, тим самим знижуючи нагрів транзистора.

Так само при комутаціях транзистора можуть виникнути пробої напругою, які в свою чергу діляться на пробій переходу затвор-емітер і колектор-емітер, основною причиною яких є несправність драйвера управління.

На сьогоднішній день існують два способи боротьби з даними видами перенапруги. Перший - це активний захист "active clamping", що полягає в збільшенні тривалості виключення транзистора, за рахунок підзарядки ємності Міллера у випадках перевищення порогового значення напруги на колекторі. Однак активний захист не володіє швидкодією, що є основним недоліком даного способу захисту. Так само існує і другий спосіб - пасивний. До пасивного захисту відносяться снабберні ланцюги і варистори, що виконують роль обмежувача.

В якості захисту перетворювачів обрано *RC*-снаббер, з огляду на те що снабберний ланцюг, що включає в себе резистор, виконує роль фільтра низьких частот, при цьому замикаючи струм перехідного процесу через себе. Крім того, *RC*-снаббер зменшує викид під час комутаційного процесу і динамічні втрати в IGBT-транзисторах. На рис. 4.5 та 4.6 наведені електричні принципові схеми підключення снабберних ланцюгів ВІП і ВУВ електропоїзда.

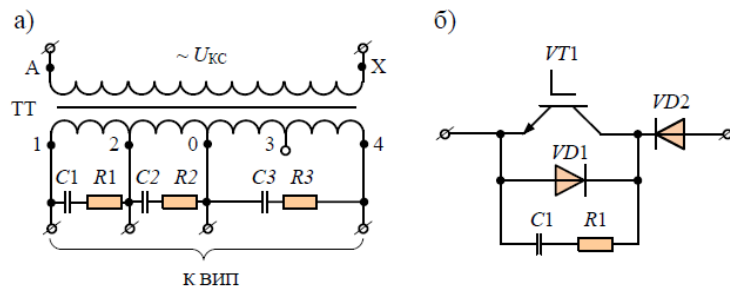


Рисунок 4.5 – Електрична принципова схема підключення снабберних ланцюгів ВІП: а) в ланцюзі вторинної обмотки тягового трансформатора; б) в ланцюзі IGBT-транзистора

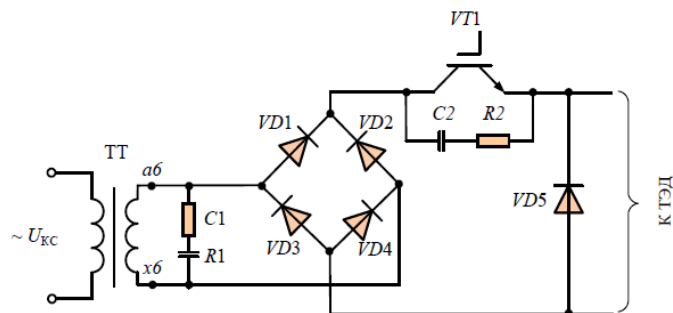


Рисунок 4.6 - Електрична схема підключення снабберних ланцюгів ВУВ

При використанні IGBT-транзистора на його виводах виникають перенапруги викликані впливом індуктивності розсіювання L_{σ} при комутації великих струмів з високою швидкістю. При відключенні IGBT-транзистора, напруга на його колекторі зростає на величину

$$\Delta U_{\text{пер}} = \frac{di_c}{dt} \cdot L_{\sigma},$$

щодо потенціалу шини живлення U_{DC} , де di_c / dt – швидкість спаду струму колектора, в результаті чого сумарна напруга колектор-емітер $U_{CE} = U_{DC} + U_{\text{пер}}$ може перевищити допустиме значення і вивести транзистор з ладу. При відкритті транзистора перенапруга викликається стрибком струму di_{rr} / dt_{rr} (i_{rr} , t_{rr} – струм і час зворотного відновлення) при виключенні опозитного діода.

Для визначення індуктивності розсіювання обмоток тягового трансформатора електропоїзда скористаємося формулою (2.2).

Індуктивність розсіювання вторинної обмотки тягового трансформатора (1-4):

$$L_{\sigma(1-4)} = \frac{9,6 \cdot 2208}{600 \cdot 314 \cdot 100} = 1125,1 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

Індуктивність розсіювання вторинної обмотки тягового трансформатора (А6-х6):

$$L_{\sigma(А6-х6)} = \frac{1,1 \cdot 122}{133,3 \cdot 314 \cdot 100} = 32,06 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

Час вимкнення IGBT-транзисторів CM1000HG-130H і CM600HA-24a перетворювачів становить 10,6 мкс і 1,05 МКС відповідно, отже, величини перенапруг, що викликаються впливом індуктивностей розсіювання обмоток тягового трансформатора, складають:

$$\Delta U_{\text{пер.вип}} = \frac{600}{10,6 \cdot 10^{-6}} \cdot 1125,1 \cdot 10^{-6} = 63,68 \text{ кВ.}$$

$$\Delta U_{\text{пер.вув}} = \frac{133,3}{1,05 \cdot 10^{-6}} \cdot 32,06 \cdot 10^{-6} = 4,07 \text{ кВ.}$$

Для зниження небезпечного рівня перенапруги на виводах IGBT-транзистора скористаємося формулою, представленою в керівництві від виробника Semicon по потужним напівпровідниковим приладам, згідно з якою зниження небезпечного рівня перенапруги здійснюється шляхом підбору ємності снабберного конденсатора, який поглинає збережену енергію в індуктивності

$$\Delta V_{\text{пер}} = \sqrt{\frac{L_{\sigma}}{2} \cdot \frac{I^2}{C}},$$

де C – номінал снабберного конденсатора.

Величина перенапруги на виводах (1-4) тягового трансформатора при використанні конденсатора ємністю $C = 330 \text{ мкФ}$ складе:

$$\Delta V_{\text{пер.вип}} = \sqrt{\frac{1125,1 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot \frac{600^2}{330 \cdot 10^{-6}}} = 783,4 \text{ В.}$$

Величина перенапруги на виводах (А6-х6) тягового трансформатора при використанні конденсатора ємністю $C = 33 \text{ мкФ}$ складе:

$$\Delta V_{\text{пер.вув}} = \sqrt{\frac{32,06 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot \frac{133,3^2}{33 \cdot 10^{-6}}} = 92,9 \text{ В.}$$

Поглинена енергія конденсатором повинна розрядитися шляхом перетворення в тепло на резисторах снабберного ланцюга, номінальне значення яких підбирається таким чином, щоб постійна часу RC -ланцюга була не менше ніж тривалість викиду самого викиду, що виникає під час комутації

$$\tau \leq RC,$$

де t – тривалість імпульсу при перенапрузі;

R – номінал снабберної перенапруги.

За результатами математичного моделювання, тривалість імпульсу при перенапрузі ВПІ дорівнює $t = 156$ мкс, ВУВ – $t = 14$ мкс, отже, значення опорів снабберних резисторів складуть:

$$R_{\text{снаб.вип}} = \frac{156 \cdot 10^{-6}}{330 \cdot 10^{-6}} = 0,47 \text{ Ом.}$$

$$R_{\text{снаб.вув}} = \frac{14 \cdot 10^{-6}}{33 \cdot 10^{-6}} = 0,42 \text{ Ом.}$$

Отримані значення опорів снабберних резисторів складають 0,47 і 0,42 Ома, відповідно. Приймаємо з ряду стандартних номінальних значень опорів найбільш близьке, яке дорівнює 0,5 Ом.

Розсіюється потужність на резисторі снаббера визначається за формулою:

$$P = f \cdot C \cdot U^2,$$

де U – максимальна напруга, до якої зарядиться конденсатор снаббера, В;

f – частота перемикавання транзистора за секунду, Гц.

Потужність, що розсіюється на резисторі снаббера ВПІ складе

$$P_{\text{рас.вип}} = 50 \cdot 330 \cdot 10^{-6} \cdot 552^2 = 5,03 \text{ кВт.}$$

Потужність, що розсіюється на резисторі снаббера ВУВ складе

$$P_{\text{рас.вув}} = 100 \cdot 33 \cdot 10^{-6} \cdot 122^2 = 49,12 \text{ Вт.}$$

За проведеними розрахунками, зробимо математичне моделювання з прийнятими значеннями номіналів снабберних ланцюгів ВПІ і ВУВ.

Як видно з рис. 4.7, викиди напруги ВІП і ВУВ при включенні транзистора не перевищують амплітудного значення їх випрямленої напруги.

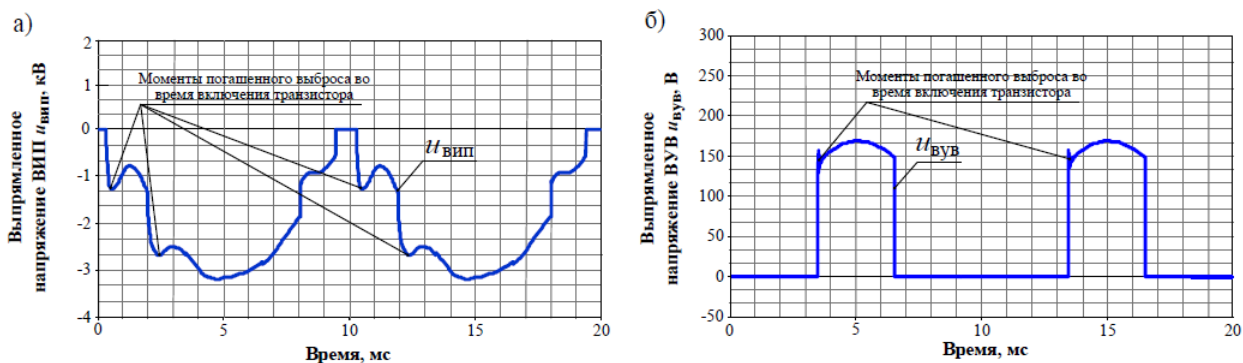


Рисунок 4.7 - Випрямлена напруга при включенні IGBT-транзистора зі снаберними ланцюгами: а) випрямно-інверторного перетворювача; б) випрямної установки збудження

В ході моделювання експериментальним способом були визначені номінальні значення резисторів і конденсаторів снаберних ланцюгів транзисторних плечей перетворювачів. Значення ємності і активного опору для ВІП, ВУВ склали $C = 2,2 \text{ мкФ}$, $R = 200 \text{ кОм}$.

Висновки

Розроблено способи управління пропонованими ВІП і ВУВ електропоїзда на базі IGBT-транзисторів в режимі рекуперативного гальмування і їх схемотехнічні рішення, що дозволяють в середньому підвищити коефіцієнт потужності електропоїзда на 49% щодо електропоїзда зі штатними ВІП і ВУВ.

Виконано розрахунок і підбір снабберних ланцюгів захисту для IGBT-транзисторів ВІП і ВУВ електропоїзда від комутаційних перенапруг, що дозволяють знизити викиди напруги нижче амплітудного значення випрямленої напруги перетворювачів.

Визначено, що коефіцієнт потужності електропоїзда в режимі рекуперативного гальмування на 3,5 зоні регулювання напруги при роботі зі звичайним ВІП і ВУВ становить 0,68, а із запропонованими ВІП і ВУВ становить 0,96, що вище щодо штатного електропоїзда на 41% відповідно.

Література

1. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 1. – 456 с.
2. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 2. – 364 с.
3. HVIGBT Modules/HVIPM X series CM1000HG-130XA [Электронный ресурс]. Токио, Япония., 2019. – Режим доступа: <http://www.mitsubishielectric.com>
4. IGBT Modules A series CM600HA-24A [Электронный ресурс]. Токио, Япония., 2019. – Режим доступа: <http://www.mitsubishielectric.com>
5. Бозе Б.К. Современная силовая электроника и преобразователи переменного тока [Текст] / Б. К. Бозе // Prentice Hall PTR, 2002. – 738 с.
6. Калинин В. К. Электровозы и электропоезда [Текст] / В. К. Калинин. – М.: Транспорт, 1991. – 480 с.
7. Кулинич Ю.М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием [Текст]: монография / Ю.М. Кулинич. – Хабаровск: изд-во ДВГУПС, 2001. – 153 с.
8. Плакс, А.В. Системы управления электрическим подвижным составом [Текст]: учебник для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2005. – 360 с.
9. Тушканов Б.А. Электровоз ВЛ80Р. Руководство по эксплуатации [Текст] / под ред. Б.А. Тушканова. – М.: Транспорт, 1985. – 541 с.
10. Электровоз ВЛ85: Руководство по эксплуатации / Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарев, Л. А. Позднякова и др. – М.: 1995. – 480 с.
11. Электропоезд ЭД9Э. Руководство по эксплуатации [Текст] / ОАО «Демиховский машиностроительный завод», 2015. – 433 с.
12. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н. А. Ротанов, А. С. Курбасов, Ю. Г. Быков, В. В. Литовченко; Под ред. Н. А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.

13. Котельников, А.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы / А.В. Котельников.—М.: Интекст,2002.—104 с.
14. Иванов В. С. Разработка выпрямительно-инверторного преобразователя и выпрямительной установки возбуждения для моторвагонного подвижного состава переменного тока на диодно-транзисторной базе / В. С. Иванов, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков [Текст] // Электропривод на транспорте и в промышленности: тр. II Всероссийской. науч.-практической. конференции (Хабаровск, 20–21 сентября 2018 г.) / Дальневосточный ун.-т. путей сообщения. Хабаровск, 2018. С. 135-143.
15. Иванов В. С. Теоретические исследование электромагнитных процессов инвертора на базе тиристоров и *IGBT*-транзисторов электропоезда переменного тока в режиме рекуперативного торможения [Текст] / В. С. Иванов, О. В. Мельниченко / Научно- технический журнал «Известия Транссиба» / Омский гос. ун.-т. путей сообщения. Омск, 2018. Вып. 3. С 28-44.