Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

РОЗРОБКА НАПІВПРОВІДНИКОВОГО АНАЛОГА КОНТАКТОРА БК-78Т ЕЛЕКТРОВОЗА ВЛ10

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи магістра

КРМ.273.42.03.25.01 ПЗ

Розробив студент групи 215-ЕЕ-Д22
спеціальності 273 Залізничний транспорт
«Електровози та електропоїзди»
_____О.С. Завада

Керівник: канд.техн.наук, доцент
_____О.А.Плахтій

Рецензент: доцент: канд.техн.наук
_____Н.П. Карпенко

2025

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет механіко-енергетичний
Кафедра електроенергетика, електротехніки та електромеханіки
Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр
Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»
Освітня програма: «Електровози та електропоїзди»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук
_____М.М. Бабаєв
(підпис)
«___» _____2025р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
Заваді Олексію Сергійовичу

1 Тема: «Розробка напівпровідникового аналога контактора БК-78Т електровоза ВЛ10», керівник Плахтій О.А, к.т.н., доц. Затверджена розпорядженням по механіко-енергетичному факультету від «30» вересня 2024 року №42.

2 Термін подання студентом закінченої роботи: «12» грудня 2024 року.

3 Вихідні дані: характеристики силового контактора БК-78Т, характеристики електровоза ВЛ10, характеристики силових транзисторів та тиристорів.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

1) Електровози серії ВЛ10 і ВЛ10У;

2) Напівпровідниковий силовий комутатор;

3) Моделювання перехідних процесів силових кіл тягових електродвигунів;

4) Визначення економічного ефекту;

5 Перелік графічного матеріалу:

1) Електровоз ВЛ10 – один слайд (формат А4);

2) Силова схема електровоза ВЛ10 – один слайд (формат А4);

3) Швидкодіючий контактор БК-78Т – один слайд (формат А4);

4) Комутаційні перенапруги контактора електровоза – один слайд (формат А4);

5) Дані числа комутацій життєвого циклу силових контакторів компанії АВВ – один слайд(формат А4);

6) Характеристики силових напівпровідникових ключів – один слайд (формат А4);

7) Порівняння силових напівпровідникових ключів – один слайд (формат А4);

8) Параметри силового запираючого тиристора – один слайд (формат А4);

9) Моделювання перехідних процесів тягового електроприводу з реостатно-контакторною системою керування – чотири слайди (формат А4);

10) Висновки

6 Консультанти окремих розділів

Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	Уткіна Ю.М.		

7 Дата видачі завдання «15» вересня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1. Електровози серії ВЛ10 і ВЛ10У;	07.10.24 – 11.10.24	Виконано
2. Напівпровідниковий силовий комутатор	14.10.24 – 25.10.24	Виконано
3. Моделювання перехідних процесів силових кіл тягових електродвигунів	28.11.24 – 08.12.24	Виконано
4. Визначення економічного ефекту	11.12.24 – 15.12.24	Виконано
5. Нормоконтроль. Виправлення помилок. Підготовка до захисту.	16.12.24 – 22.12.24	виконано

Студент _____ О.С. Завада
(підпис)

Керівник _____ О.А. Плахтій
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 113 аркушів, пояснювальну записку формату А4, що включає 42 рисунків, 7 таблиць, 23 літературних джерел.

Ключові слова**:** КОНТАКТОР, ЕЛЕКТРОВОЗ, ЕЛЕКТРОДВИГУН, ВИМИКАЧ, РЕКУПЕРАЦІЯ, ТЛ2К1, БК-78Т, ВЛ10, ВЛ10У, ТЯГОВИЙ, ШВИДКОДІЮЧИЙ, MATLAB, SIMULINK.

Об’єктом дослідження є електричні процеси швидкодіючого контактора БК78Т у схемі тягових електродвигунів електровозів серії ВЛ10, ВЛ10^{У}.

Метою дослідження є розробка напівпровідникового аналога швидкодіючого контактора БК-78Т, здатного відключати струми короткого замикання в рекуперативному режимі електровозу.

У кваліфікаційній роботі запропонована модернізація силових контакторів електровоза напівпровідниковими тиристорними комутаторами, які дозволяють підвищити параметри надійності за рахунок збільшеного числа ресурсу числа комутацій. Проведено аналіз параметрів силових ключів. Визначено, що за параметрами комутованого струму і напруги оптимальним є застосування запираючих тиристорів. Визначено параметри їх надійності, які складають поряд сотні мільйонів комутацій, у той час як у силових контакторів це лише сотні тисяч.

Розроблена matlab-модель тягового електропривода на якій визначено перехідні процеси тягового електропривода в режимах тяги і рекуперації.

Визначено параметри економічного ефекту.

ABSTRACT

This qualified work includes 113 papers, an explanatory note in A4 format, which includes 42 drawings, 7 tables, 23 literary pieces.

Keywords: CONTACTOR, ELECTRIC LOCATOR, ELECTRIC MOTOR, VIMIKACH, RECOVERY, TL2K1, BK-78T, VL10, VL10U, TRAFFIC, SHVIKODYUCHIY, MATLAB, SIMULINK.

The object of investigation is the electrical processes of the BK78T sliding contactor in the circuit of traction electric motors of electric locomotives of the VL10, VL10U series.

The research method is the development of a conductor analogue of the BK-78T sliding contactor, designed to switch short-circuit jets in regenerative mode for an electric locomotive.

The qualified robot has been certified to modernize the power contactors of electric locomotives with overhead thyristor switches, which make it possible to increase the reliability parameters for a larger number of commutation number resources. The parameters of power switches were analyzed. It is determined that when the parameters of the switched circuit and voltage are optimal, the shut-off thyristors are stagnant. The parameters of their reliability have been determined, which amount to about a hundred million commutations, while power contactors have more than a hundred thousand.

The Matlab model of the traction electric drive has been expanded to indicate the transient processes of the traction electric drive in the traction and recuperation modes.

The parameters for the economical effect are indicated.

ЗМІСТ

Вступ.....7
1 Електровози серії ВЛ10 і ВЛ10^{У}.....8
1.2 Механічні та тягові характеристики електровозів серії ВЛ10 і ВЛ10^{У}.....8
1.2 Тяговий електродвигун ТЛ2К1.....16
1.3 Швидкодіючий контактор БК-78Т.....21
2 Напівпровідниковий силовий комутатор.....28
2.1. Аналіз силових напівпровідникових ключів.....28
2.2. GTO-тиристори.....30
2.3. GCT тиристори.....36
2.4. Тиристори IGCT.....39
2.5. Тиристорна схема комутатора.....44
3 Моделювання перехідних процесів силових кіл тягових електродвигунів.....53
3.1. Моделювання пуску та розгону електродвигунів.....53
3.1.1 Старт на послідовному та перехід на послідовно паралельне з'єднання тягових електродвигунів.....58
3.1.2 Перехід з послідовно-паралельного на паралельне з'єднання тягових електродвигунів.....63
3.2 Моделювання перехідних процесів швидкодіючого контактора БК-78Т.....67
4 Визначення економічного ефекту від модернізації.....80
4.1 Коротка характеристика запропонованого технічного рішення.....80
4.2 Методики розрахунку економічного ефекту.....81
4.3 Розрахунок вартісної оцінки витрат на модернізацію.....82
4.3.1 Розрахунок капітальних витрат.....82
4.4 Розрахунок показників використання.....89
Висновки.....96
Перелік використаних джерел.….....95
Додаток А - Ілюстраційний матеріал до кваліфікаційної роботи….....98

Вступ

Сучасні електровози мають в своєму складі мають велику кількість напівпровідникових приладів різних типів і призначення: від звичайних діодів, які пропускають струм в одному напрямку та не пропускають у зворотному, до силових тиристорів і транзисторів, здатних комутувати струми в десятки кілоампер і напруги в десятки кіловольт.

Основними перевагами напівпровідникових (безконтактних) приладів порівняно з контактними є їх висока швидкодія, велика швидкість і частота перемикань, довговічність, простота обслуговування, механічна стійкість тощо.

На даний час на залізницях України переважну більшість становлять електровози минулих поколінь, такі як ВЛ10, ВЛ10^{У} тощо. Багато обладнання на цих електровозах є застарілим. Одним із таких пристроїв є швидкодійний контактор БК-78Т, який захищає силовий ланцюг тягових електродвигунів електровозів ВЛ10 і ВЛ10^{У} від струмів короткого замикання та кругових вогнів у рекуперативному режимі. У цього контактора є низка недоліків, серед яких горіння дуги, часте обслуговування, перенапруги та часта заміна.

За оцінкою фахівців, потреба у вантажних та пасажирських залізничних перевезеннях в Україні до 2015 року порівняно з 2000 роком зросла в 2–4 рази залежно від регіону. Забезпечення такого попиту на транспортні послуги здійснюється за рахунок збільшення маси та швидкості руху поїздів. На початок 2013 року в інвентарному парку компанії АТ «Укрзалізниця» налічувалося близько 20 тисяч локомотивів. При цьому слід зазначити, що вік більшості тепловозів і електровозів становив близько 25–30 років (за терміну служби електровоза – 33 роки, тепловоза – 26 років), щороку з експлуатації виводиться понад тисячу одиниць.

1 Електровози серії ВЛ10 і ВЛ10^{у}

1.2 Механічні та тягові характеристики електровозів серії ВЛ10 і ВЛ10^{у}

Сьогодні парк електровозів Укрзалізниці складається здебільшого з локомотивів постійного і змінного струму, середній вік яких перевищує 40 років, а рівень зносу – близько 90%. Для подолання цієї кризи Україна активно працює над оновленням парку локомотивів. Це включає співпрацю з іноземними виробниками, зокрема, з французькою компанією Alstom, яка має поставити Україні двосистемні електровози. Такі локомотиви, здатні працювати як на змінному, так і на постійному струмі, допоможуть оптимізувати перевезення вантажів по всій території країни, де електромережі використовують різні системи струму, що спрощує логістику та скорочує витрати на перевезення.

Серед важливих критеріїв для нових електровозів є висока перевантажувальна здатність і широкі регулювальні можливості, що забезпечує стабільне і гнучке управління швидкістю. Однак, сучасний електропривід у старих моделях, зокрема колекторних машин, уже давно вичерпав свій потенціал для подальшого підвищення швидкості руху. Замість цього Укрзалізниця звертається до впровадження електровозів з асинхронними двигунами, які дозволяють досягти більшої потужності, ефективності та надійності в експлуатації, що сприятиме підвищенню швидкості і якості перевезень.

Електровози серії ВЛ10 і ВЛ10^{у} (рис. 1.1, 1.2) використовуються для роботи з вантажними поїздами на магістральних залізничних лініях, електрифікованих на постійному струмі з напругою в живильній мережі 3000 В.

Обладнання, встановлене на електровозах, розраховане на надійну роботу при живленні від контактної мережі з напругою від 2200 до 4000 В. Зовні кузова можливі зміни температури навколишнього середовища від -50 до +40 °С при відносній вологості повітря не більше 90 %, виміряній за температури +27 °С. Допустима висота над рівнем моря не перевищує 1200 м.

Електровози серії ВЛ10 виготовлялися Новочеркаським електровозобудівним заводом (НЕВЗ) з 1969 року, а Тбіліським електровозобудівним заводом (ТЕВЗ) з 1967 року.



Рис. 1.1 – Електровоз ВЛ10



Рис. 1.2 – Електровоз ВЛ10^{У}

Після модернізації електровозів ВЛ10 з 1976 року ТЕВЗ та НЕВЗ випускали електровози серії ВЛ10^{У}, у яких навантаження на рейки від колісної пари було збільшено з 23 тс до 25 тс. Якщо не враховувати технічні вдосконалення, впроваджені під час серійного виробництва електровозів, то в механічній, електричній та пневматичній частинах електровози ВЛ10 і ВЛ10^{У} є абсолютно ідентичними.

У електровозів серії ВЛ10 і ВЛ10^{У} механічна частина максимально уніфікована з механічною частиною електровозів серії ВЛ80^{К} і ВЛ80^{Т}. Єдиною відмінністю є окремі елементи конструкції для встановлення обладнання в кузові та на даху. Крім того, у них різні передатні числа тягової зубчастої передачі, оскільки використовуються різні типи тягових електродвигунів.

Електровози ВЛ10 і ВЛ10^{У} мають такі основні технічні характеристики:

– номінальна напруга мережі: 3000 В;

– ширина між рейками: 1520 мм;

– потужність на валах тягових електродвигунів у годинному режимі: 5360 кВт;

– потужність на валах тягових електродвигунів у тривалому режимі: 4600 кВт;

– зубчаста передача із передатним відношенням: 88/23;

– сила тяги, яка розвивається в годинному режимі: 39500 кгс;

– сила тяги, яка розвивається в тривалому режимі: 3200 кгс;

– швидкість (годинний режим): 48,7 км/год;

– швидкість (тривалий режим): 51,2 км/год;

– найбільша допустима швидкість: 100 км/год;

– найбільша допустима швидкість по ходовій частині: 110 км/год;

– коефіцієнт корисної дії в тривалому режимі: не менше 0,9;

– маса електровоза з урахуванням 2/3 запасу піску:

– електровоз ВЛ10: $184^{+5,52}_{-1,84}$ т;

– електровоз ВЛ10У: 200±4 т;

– сила натискання колісної пари на рейки:

– електровоз ВЛ10: $23^{+0,69}_{-0,23}$ тс;

– електровоз ВЛ10У: 25±0,5 тс.

На одному електровозі встановлено по вісім тягових електродвигунів. Вони мають послідовне збудження, примусову вентиляцію та потужність у годинному режимі по 670 кВт кожен. Тягові електродвигуни характеризуються високим ККД та надійністю. Передача обертального моменту від тягового електродвигуна на колісні пари здійснюється двосторонньою циліндричною одноступеневою косозубою передачею.

Системи охолодження та вентиляції в електричних машинах складаються з охолоджувальних трактів та теплообмінників, через які рухається охолоджувач (повітря), і напірних елементів – компресорів, що забезпечують рух охолоджувального повітря. У розглянутому типі асинхронних тягових електродвигунів охолоджувальне повітря нагнітається через вентиляційне отвір у верхній частині корпусу статора, потім обдуває сердечник статора та ротора, проходить через зазор між ротором і статором і виходить через повітровипускні отвори в торці підшипникового щита назовні.

Сама ж система вентиляції тягових двигунів електровоза працює таким чином: повітря, що всмоктується осьовим вентилятором системи охолодження тягових електродвигунів, проходить через механічні центробіжні відокремлювачі осадів, де відбувається очищення повітря від вологи і пилу. Очищене повітря потрапляє в форкамери вентиляторів охолодження АТЕД. З форкамери повітря всмоктується вентилятором охолодження тягових електродвигунів і викидається в основу, де розділяється на два потоки. Обидва потоки спрямовуються різними каналами до тягових електродвигунів. У кожній секції встановлено два осьових вентилятори охолодження АТЕД. Вентилятор обдуває два тягові двигуни, встановлені на одній візку електровоза. У свою чергу осьові вентилятори АТЕД забезпечують переміщення повітря, що не містить пилу та інших твердих домішок, при температурі навколишнього повітря від (-50)°С до (+60)°С.

Необхідно відзначити, що в сучасних електровозах кількість поданого повітря для охолодження АТЕД можна регулювати. На виходах з каналів встановлені механізми регулювання подачі повітря до тягових двигунів. Принцип їх роботи полягає у частковому перекритті перерізу каналу повітроводів, змінюючи положення заслінок на вході в тяговий двигун. При обертанні муфти відбувається переміщення важеля, який переміщає тягу, що викликає зміну положення заслінок у каналі повітропроводів до електродвигуна. Залежно від кута заслінок змінюється прохідне січення каналу. Максимальний кут нахилу заслінок складає 60 градусів. Регулювання витрати охолоджувального повітря можна здійснювати в кожному каналі подачі повітря окремо. Регулювання заслінки здійснюється в автоматичному режимі за закладеним алгоритмом залежно від вимірюваних температур.

Частота обертання тягових електродвигунів регулюється за допомогою трьох видів їх з’єднання: послідовного (С), послідовно-паралельного (СП) і паралельного (П). На всіх з’єднаннях можлива робота двигунів із ослабленим збудженням із коефіцієнтами збудження 0,75; 0,55; 0,43; 0,36.

Електричні кола електровозів живляться через струмоприймачі від контактного проводу, які забезпечують надійний знімання струму за будь-якої швидкості руху електровозів.

Окрім гальм із ручним та пневматичним управлінням, на електровозах передбачено рекуперативне гальмування, яке здатне значно підвищити безпеку руху електровозів, забезпечити суттєву економію електроенергії, зменшити знос гальмівних колодок і бандажів. Можливість рекуперативного гальмування не обмежується якимось одним видом з'єднання, а застосовується при всіх трьох видах з'єднань тягових електродвигунів.

На рисунку 1.3 наведені основні тягові характеристики електровозів серії ВЛ10 і ВЛ10^{у}.

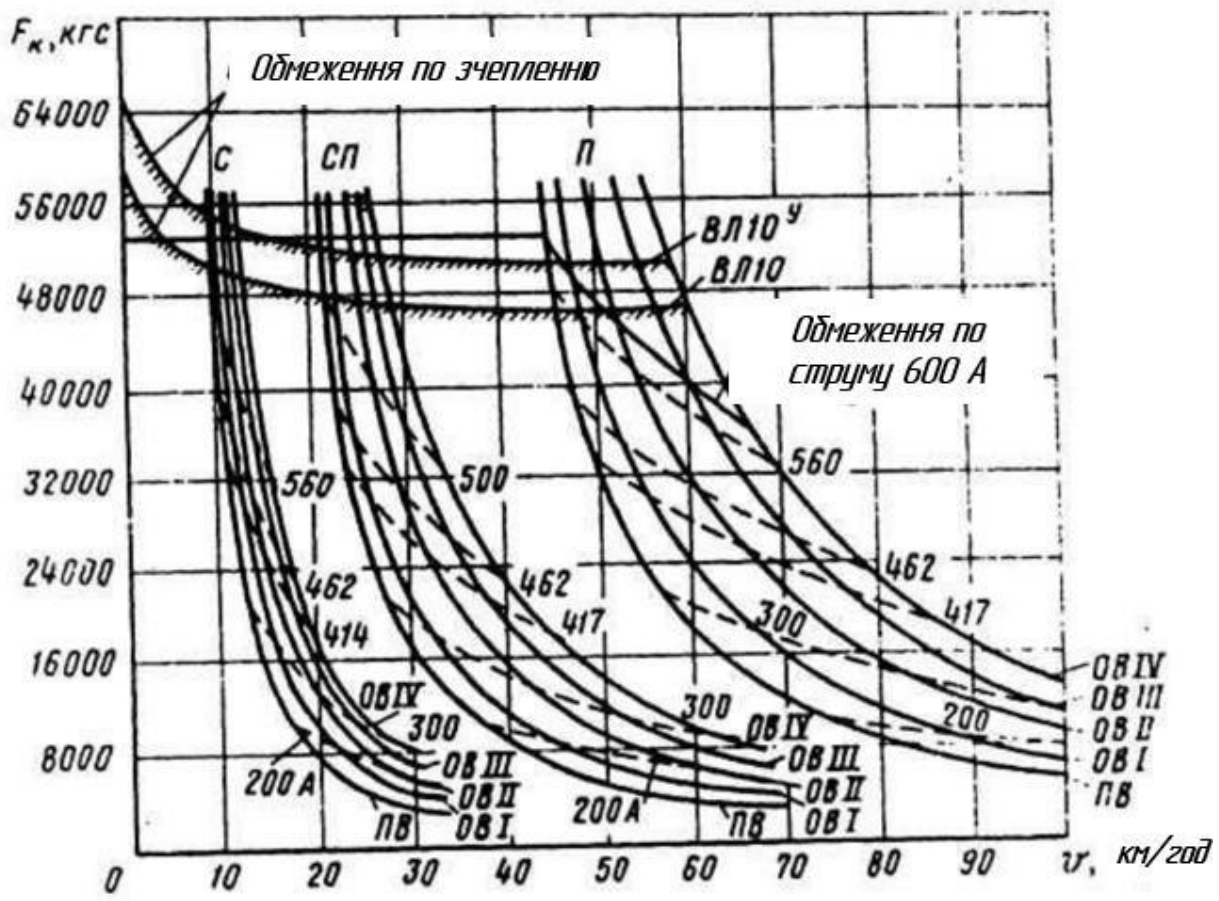


Рис. 1.3 – Тягові характеристики електровозів серії ВЛ10 та ВЛ10^{у}

Під час рекуперативного гальмування перетворювач постійного струму живить обмотки збудження тягових електродвигунів. Завдяки регулюванню частоти обертання тягових електродвигунів у широкому діапазоні, це значно підвищує економічність і дозволяє максимально ефективно використовувати технічні можливості електровоза.

Залежність сили тяги F_k від швидкості v електровоза при повному полі (ПП) та ослаблених збудженнях ОП1 (ослаблене поле), ОП2, ОП3 і ОП4 (рис. 1.3) побудована для роботи електровоза при напрузі живлення 3000 В з обмеженнями за струмом, конструктивною швидкістю, зчепленням і комутаційними умовами [1].

На електровозах серії ВЛ10 і ВЛ10^{у} встановлені тягові електродвигуни ТЛ2К1.

Тягові електродвигуни призначені для приведення в рух транспортних засобів, таких як електропоїзди, міський електротранспорт, великовантажні електромобілі, підйомно-транспортні машини тощо. Відмінною конструктивною особливістю ТЕД від звичайних електродвигунів великої потужності є компактність їхньої конструкції у зв'язку з обмеженим місцем їхнього розташування та умовами монтажу. Для тягових електродвигунів залізничного транспорту це також є актуальним. Установлення ТЕД на електровози здійснюється на рамах візків, тому проєктований електродвигун локомотива повинен мати відповідні розміри, щоб уміститися в габарити візка електровоза і забезпечувати необхідне навантаження на вісь.

Обмежені габарити ТЕД диктують необхідність максимального використання внутрішнього об’єму машини, що, у свою чергу, призводить до підвищеної робочої температури її вузлів порівняно з електричними машинами загальнопромислового виробництва.

Слід додати, що умови експлуатації таких електродвигунів є важчими, ніж у електричних машин, які розташовані в стаціонарних установках. Під важкими умовами роботи тут і надалі розумітимемо специфічні умови експлуатації тягових електродвигунів електропоїздів:

- значні коливання температури та вологості навколишнього середовища;
- різноманітні режими роботи ТЕД на локомотиві (короткочасний, повторно-короткочасний з частими пусками);
- наявність механічних впливів на електродвигун під час розгону або зупинки поїзда.

Електровоз і все його обладнання, зокрема й ТЕД, призначені для експлуатації в різних кліматичних зонах країни. При цьому температурні межі навколишнього середовища варіюються від (-50 °С) до (+50 °С) за відносно високої вологості повітря в різні пори року. Робота ТЕД за низьких температур сприяє зниженню механічної міцності окремих елементів конструкції, а також є причиною появи тріщин в ізоляційних матеріалах. У свою чергу, високі

позитивні температури також негативно впливають на електродвигуни. Експлуатація в сухому і теплому кліматі погіршує умови охолодження електричної машини і сприяє її запиленню, що призводить до пересихання застосовуваних ізоляційних матеріалів і, як наслідок, до прискореного їх старіння. Підвищена вологість повітря (під час снігу або дощу) знижує об'ємний і поверхневий опір ізоляції, сприяє прискореній корозії деталей, виготовлених з металу.

Необхідно зазначити, що робота ТЕД електровозів пов'язана з частими механічними навантаженнями. Навантаження, що виникають у двигуні, можна розділити на три групи:

– навантаження, викликані статичним ваговим навантаженням і короткочасними перехідними режимами (зрушення з місця, гальмування, зміна режиму роботи електродвигуна тощо);

– навантаження, спричинені взаємодією залізничного полотна та електровоза, проходженням стиків рейок і нерівностей шляху;

– навантаження, викликані власною вібрацією ТЕД та іншого обладнання електровоза.

Робота електродвигунів за таких навантажень також сприяє пошкодженню проводів обмоток машини в місцях паяння, появі тріщин і руйнуванню електричної ізоляції.

Таким чином, усе вищезазначене накладає підвищені вимоги на тягові електричні двигуни під час їхнього проєктування для залізничного транспорту. Беручи до уваги, що робота ТЕД супроводжується частими механічними, тепловими та електричними перевантаженнями, поштовхами і тряскою, у конструкцію машини повинна бути закладена підвищена електрична та механічна міцність її вузлів.

Слід зазначити, що тягові електродвигуни, які застосовуються на електровозах, мають підвищений захист вузлів від агресивних зовнішніх впливів

середовища [1]. Для забезпечення необхідного охолодження елементів конструкції електродвигуна використовується незалежна система вентиляції.

1.2 Тяговий електродвигун ТЛ2К1

Тяговий електродвигун ТЛ2К1 (рис. 1.4), що працює на постійному струмі, використовується для перетворення електричної енергії, отриманої з контактної мережі, в механічну. Передача обертального моменту з вала якоря електродвигуна на колісну пару здійснюється через двосторонню одноступеневу циліндричну косозубу передачу, при цьому підшипники двигуна не отримують додаткових осьових навантажень.

Електродвигун має опорно-осьове підвішування. Одним боком він спирається моторно-осьовими підшипниками на вісь колісної пари електровоза, іншим – на раму візка через гумові шайби та шарнірне підвішування. Коефіцієнт використання потужності тягового електродвигуна становить 0,74 і досягається при найбільшій швидкості електровоза (рис. 1.5).

Збудження електродвигунів у тяговому режимі – послідовне, а в рекуперативному – незалежне. На одному електровозі встановлено по вісім двигунів.

Електродвигун ТЛ2К1 має такі технічні параметри:

- напруга на затискачах електродвигуна: 1500 В;
- у годинному режимі: потужність: 670 кВт, струм: 480 А, ККД: 0,931, частота обертання: 790 об/хв;
- у тривалому режимі: потужність: 575 кВт, струм: 410 А, ККД: 0,93, частота обертання: 830 об/хв;
- при середньозношених бандажах максимальна частота обертання становить: 1690 об/хв;
- передаточне відношення: 88/23;
- маса двигуна: 5000 кг.

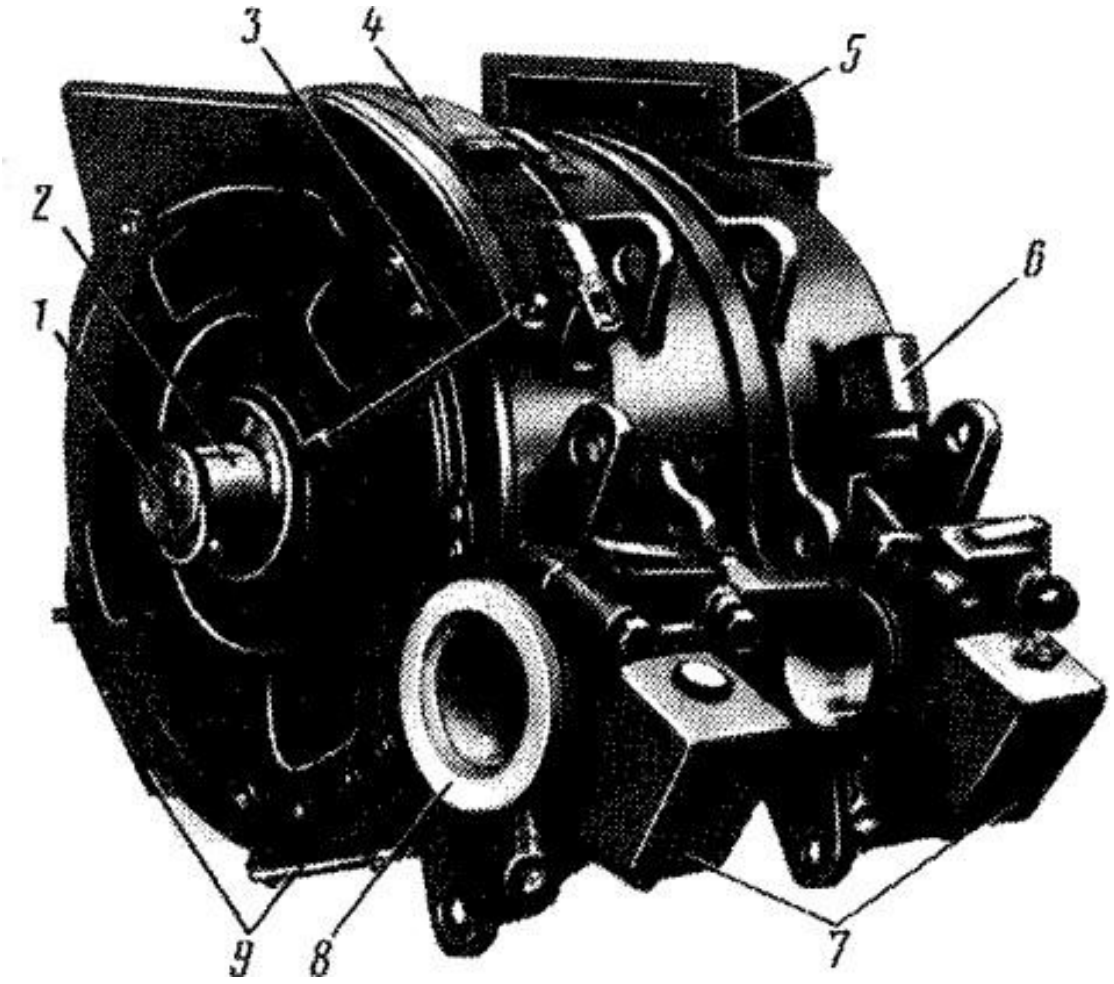


Рис. 1.4 – Тяговий електродвигун ТЛ2К1: 1 – гайка з пружинною шайбою; 2 – вал якоря; 3 – трубка для змащення підшипників якоря; 4 – кришка верхнього оглядового люка; 5, 6 – великий і малий вихлопні кожухи; 7, 8 – букса та вкладиш; 9 – оглядові люки (нижні)

Електромеханічні характеристики тягового електродвигуна ТЛ2К1 при $U_д$ = 1500 В представлені на рис.1.5

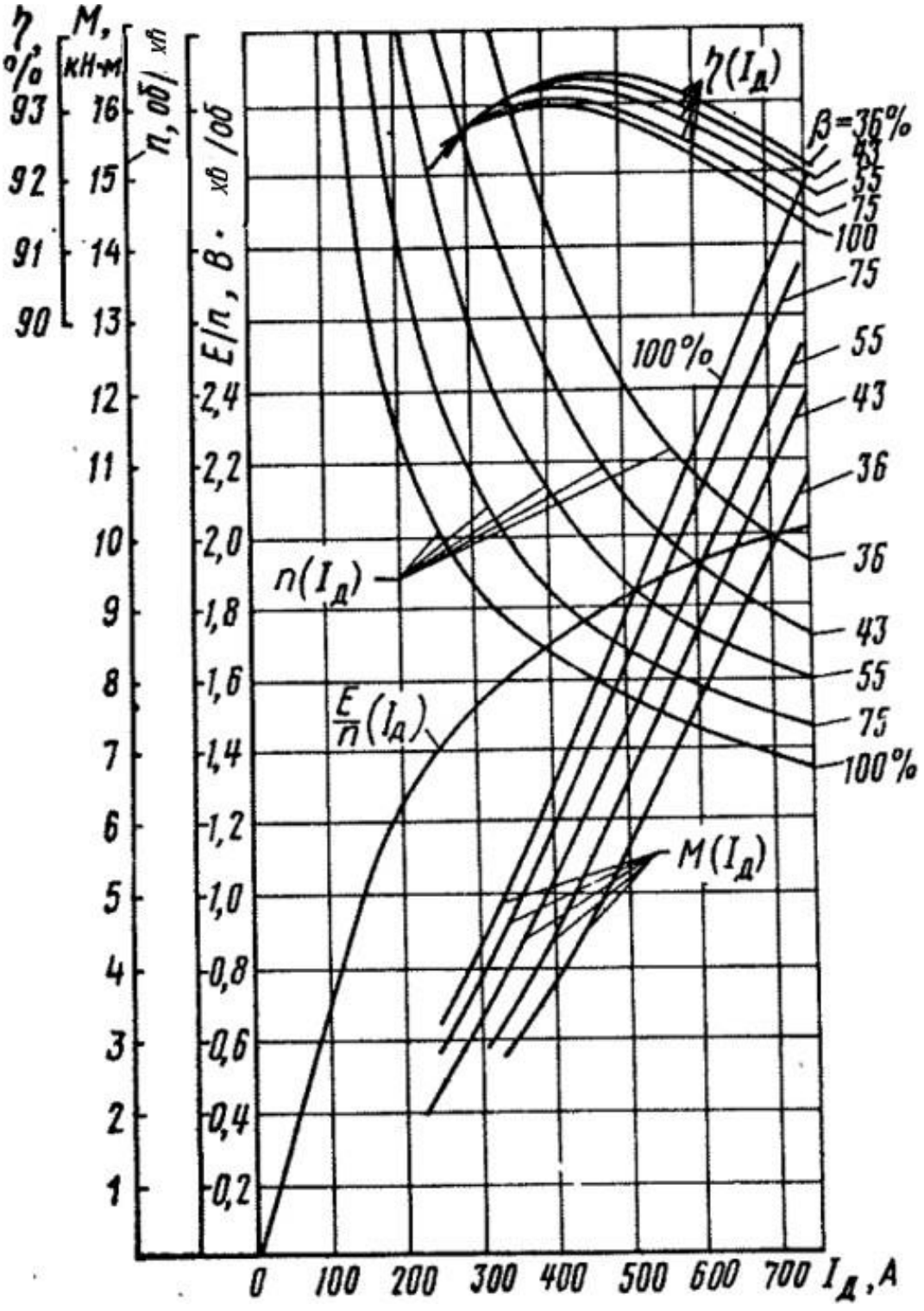


Рис. 1.5 – Електромеханічні характеристики тягового електродвигуна ТЛ2К1 при $U_д$ = 1500 В

Креслення тягового двигуна ТЛ2К1 представлено на рис.1.6.

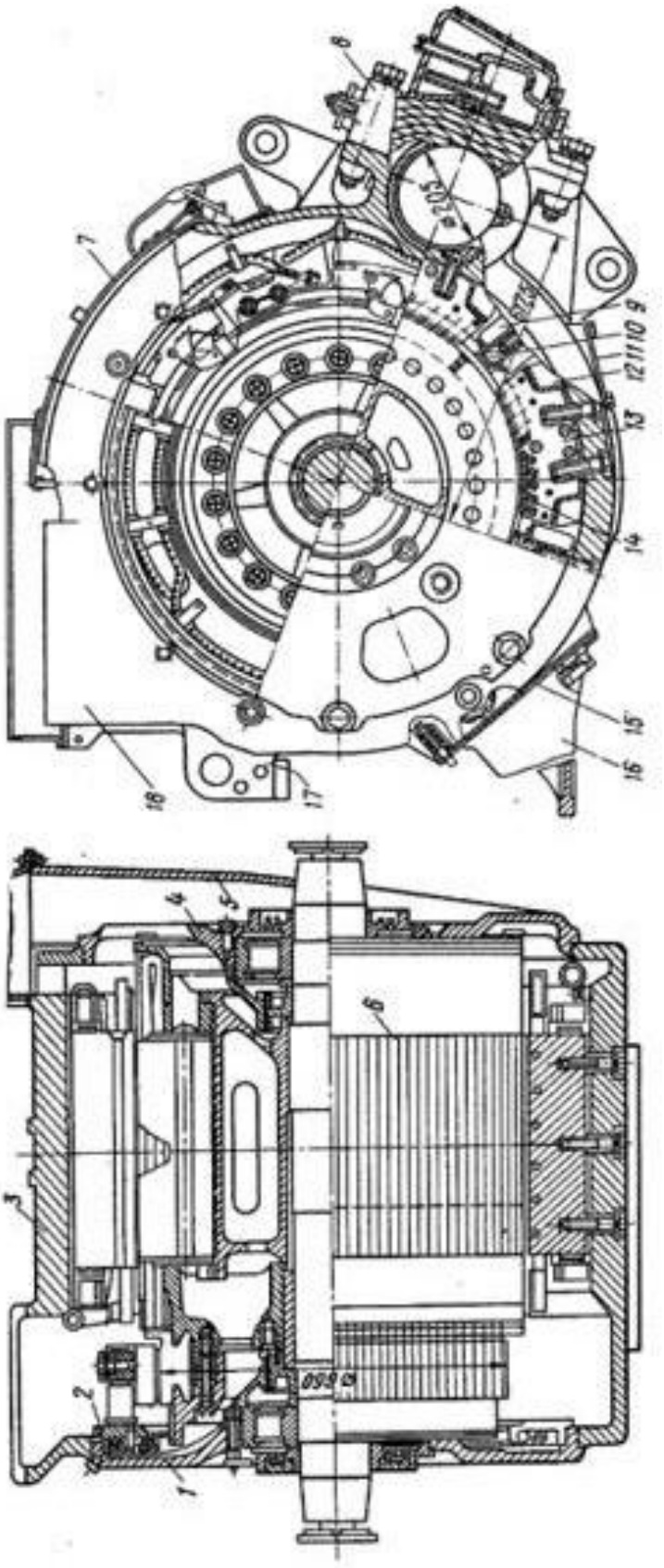
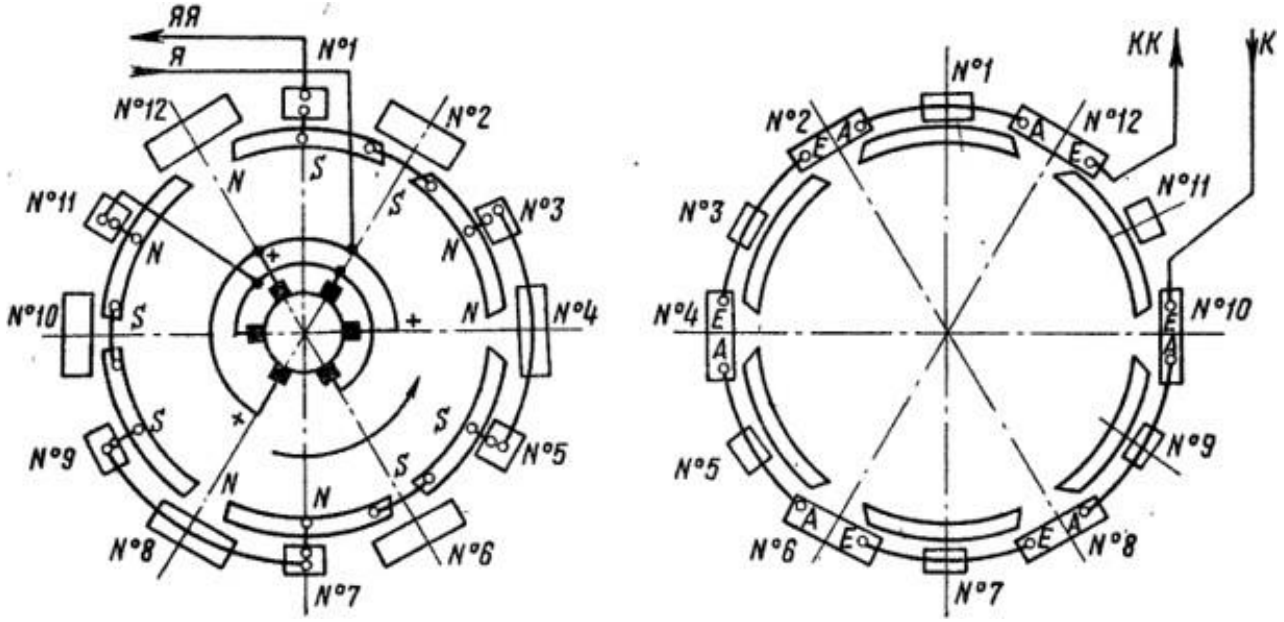


Рис. 1.6 – Тяговий електродвигун ТЛ2К1: а – поздовжній розріз; б – поперечний розріз

На рис.1.6 представлено наступні позначення: 1, 4 – щити підшипникові; 2 – апарат щітковий; 3 – остов; 5 – кожух; 6 – якір; 7, 11 і 15 – кришки; 8 – букса; 9, 10 – котушка і сердечник додаткового полюса; 12, 13 – котушка і сердечник головного полюса; 14 – компенсаційна обмотка; 16 – знімний кронштейн; 17 – запобіжний прилив; 18 – вентиляційний люк.

На рисунку 1.7 представлені схеми з’єднання котушок полюсів тягового електродвигуна ТЛ2К1 з боку колектора (а) та протилежного боку (б). Колектор електродвигуна має діаметр робочої поверхні 660 мм [2].



а б

Рис. 1.7 – Схеми з'єднання котушок полюсів тягового електродвигуна ТЛ2К1: а – з боку колектора; б – з протилежного боку колектора

Для захисту тягових двигунів у використовуються швидкодіючі контактори БК-78Т.

1.3 Швидкодіючий контактор БК-78Т

Швидкодіючий контактор БК-78Т (рис. 1.8) призначений для захисту від струмів короткого замикання тягових електродвигунів у рекуперативному режимі. Основні технічні параметри контактора наведені в таблиці 1.1.

На двох текстолітових планках шести швидкодійного контактора БК78Т змонтовані вузли контактора. У верхній частині текстолітових планок розташований включаючий механізм електромагніта: шихтований магнітопровід 18 та ярмо 15 із відключаючою котушкою 17 закріплені на латунному кронштейні 16. На цьому ж кронштейні закріплено кронштейн 20, що несе гнучкий провід 21, рухомий контакт 26 і магнітопровід 23 із дугогасильною котушкою 25.

Таблиця 1.1 – Технічні параметри контактора БК-78Т

Параметр	Значення
Максимальний струм, що відключається при індуктивності ланцюга 10 мГн і шунтування головних контактів резистором із опором 2 Ом, А	2500
Напруга номінальна, В	3300
Напруга найбільша, В	4000
Номінальний струм силових контактів, А	1000
Струм уставки, А	35 – 50
Час включення котушки засувки електромагніту, с, не більше	0,5
Маса, кг	43

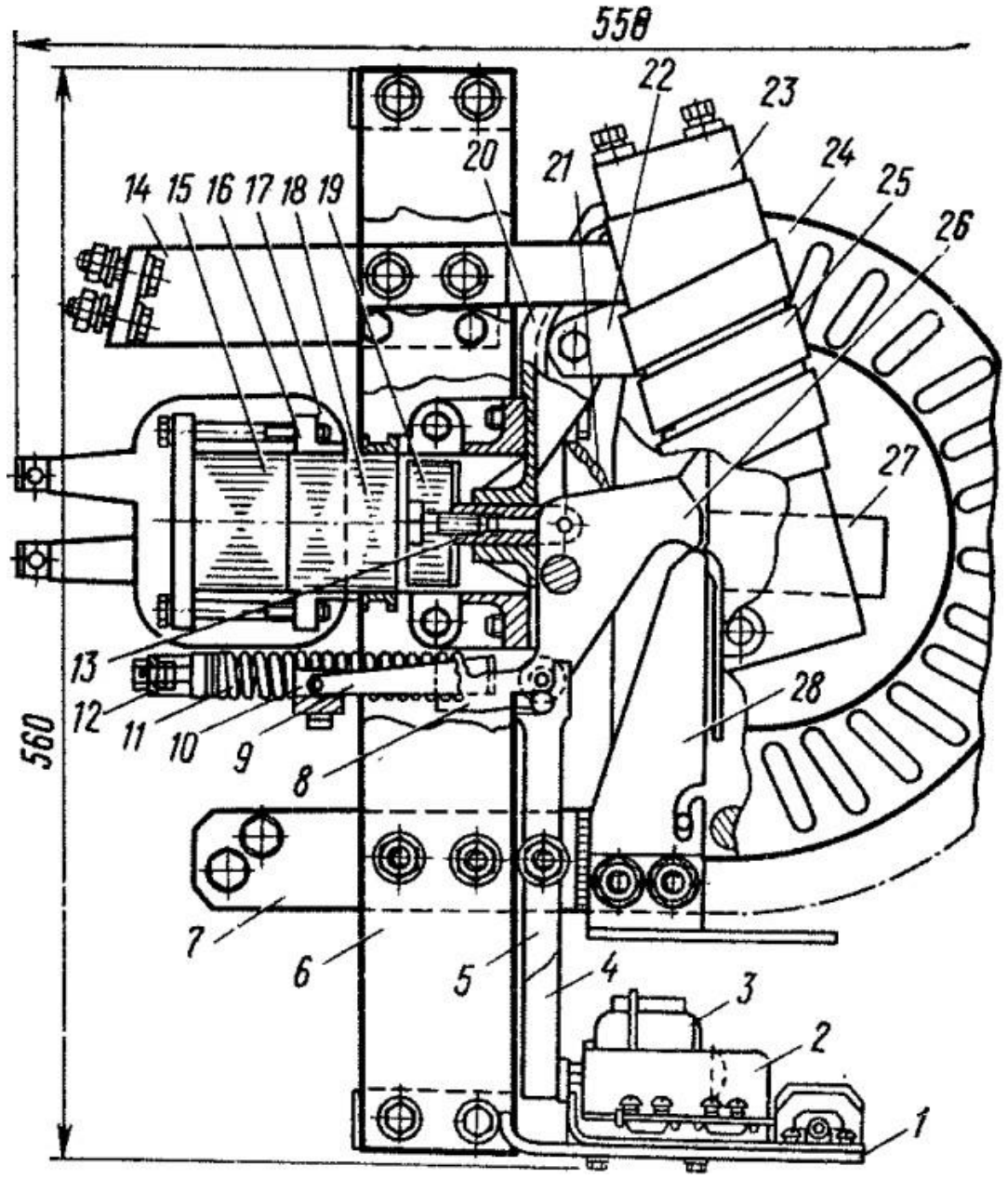


Рис. 1.8 – Швидкодіючий контактор БК-78Т

Рухомий контакт за допомогою тяги 13 з'єднаний із якорем 19. Контактна пружина 11, яка забезпечує замикання рухомого контакту з нерухомим 28, натягнута між скобою 12 та нижнім кінцем рухомого контакту. На рифленій поверхні шинного виводу 7 встановлений нерухомий контакт. До текстолітової планки прикріплений верхній вивід 14, до якого під’єднані котушки дуття.

Дугогасильна камера 24 виготовлена з дугостійкого матеріалу КМК-218 і складається з двох спресованих стінок. Промені обох стінок камери утворюють

лабіринт, що забезпечує швидке гасіння дуги. Шихтовані полюси 27 запресовані в стінки камери. У камері закріплений ріг 22.

На кронштейні 1 встановлені блок допоміжних контактів 2 та електромагніт 3, які через індивідуальні ізоляційні важелі 4 та 5 з'єднані з рухомим контактом і важелем засувки 9, що закріплений шарнірно на планці 10.

На індуктивному шунті при коротких замиканнях зростає напруга, і відключаюча котушка швидкодійного контактора збуджується. Потім якор притягується, і рухомий контакт відключається, розтягуючи контактну пружину. При цьому важіль засувки входить у паз тримача 8 рухомого контакту і утримує контакт у вимкненому положенні. Під час розриву контактів виникає дуга, яка гаситься в дугогасильній камері.

Рухомий контакт у процесі відключення зачіпає важіль блока допоміжних контактів, які розривають ланцюг утримуючої котушки швидкодійного контактора і відновлюють ланцюг включаючого електромагніта.

Електромагніт збуджується після переведення головної рукоятки контролера в нульове положення. Через ізоляційний важіль 4 ударяє якор, який піднімає вгору важіль засувки та замикає рухомий контакт із нерухомим, одночасно звільняючи контактну пружину [3].

Недоліками силових контакторів є їх відносно низькі показники надійності внаслідок дії комутаційних перенапруг, які призводять до виходу зі строю контактора.

Осцилограми реальних комутаційних перенапруг силового контактора КМ2 (КМ10) електровоза ДЕ1 представлено на рис.1.9. та 1.10.

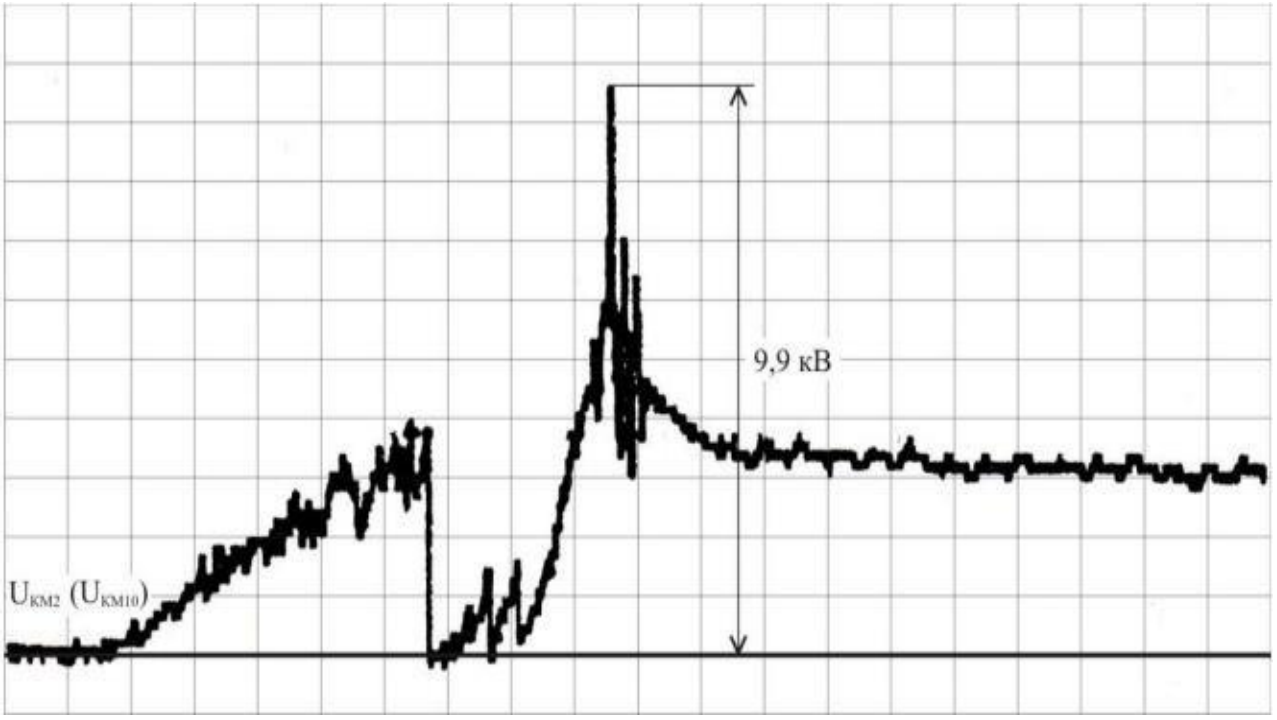


Рис. 1.9 – Осцилограма напруги при відключенні контактора КМ2 (КМ10)

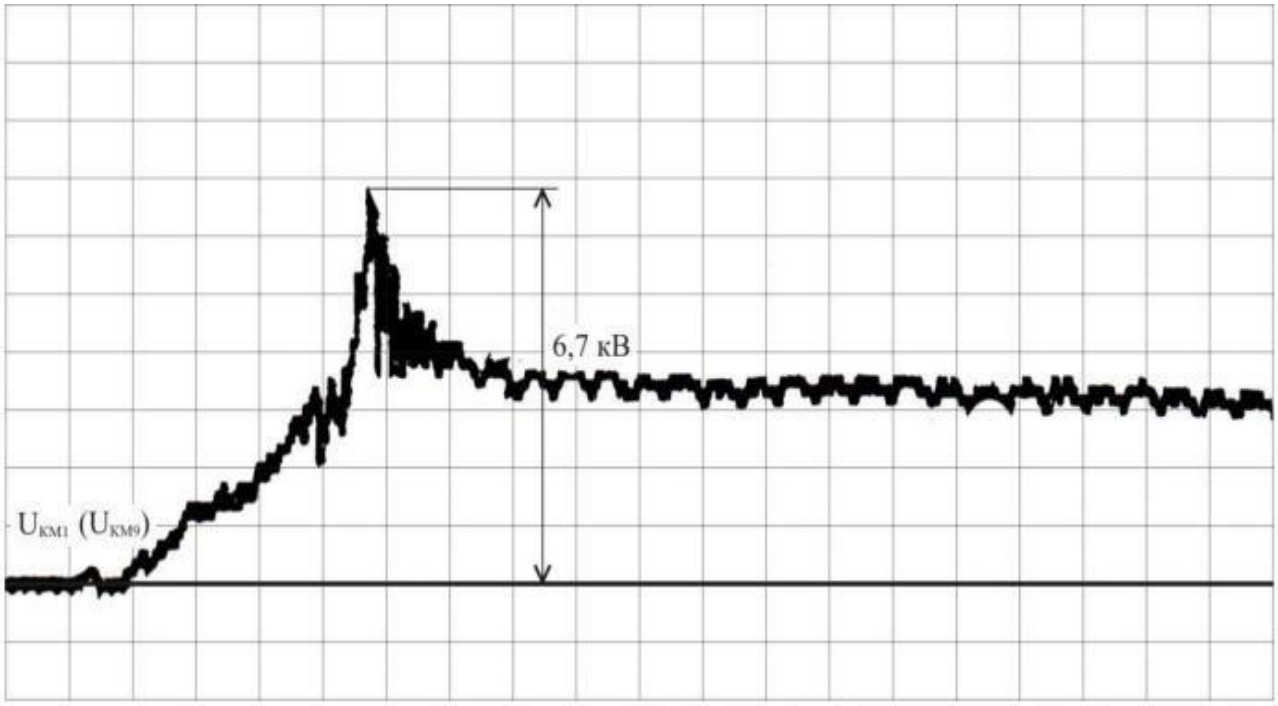
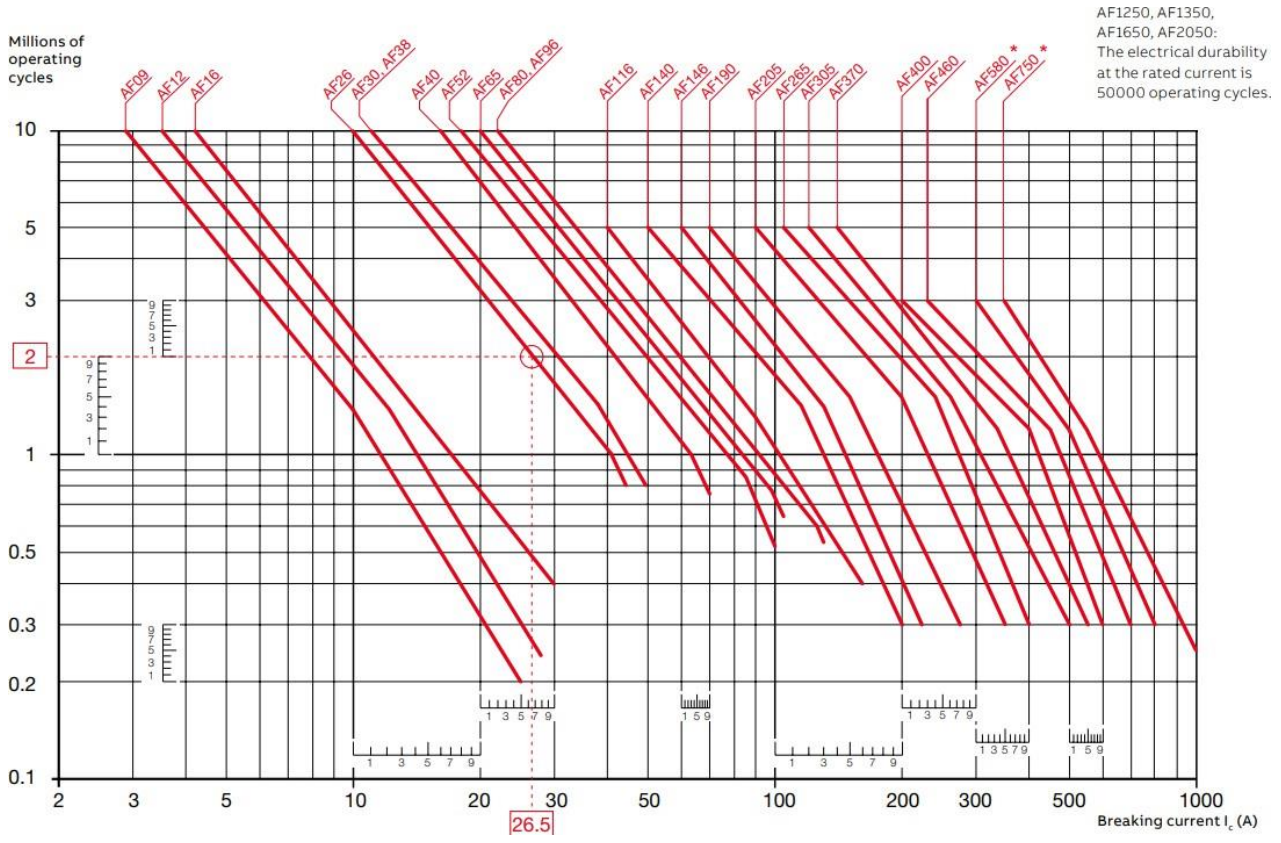


Рис. 1.10 – Осцилограма напруги при відключенні лінійного контактора КМ1 (КМ9)

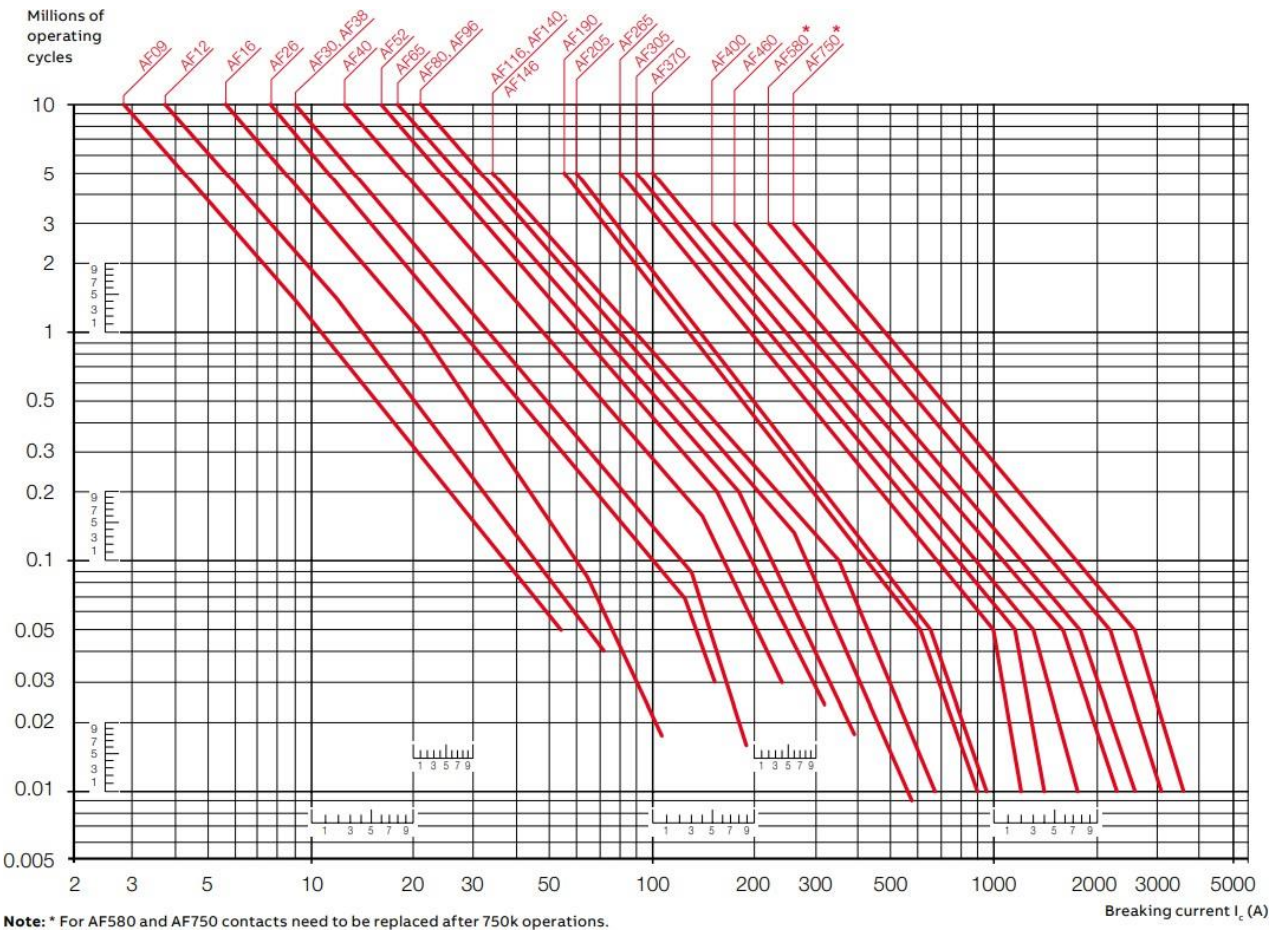
Швидкодіючий контактор БК-78Т здатний комутувати досить великі за амплітудою струми, включаючи стуми короткого замикання.

Під час комутації таких струмів за напруги мережі 3000 В виникає електрична дуга. У результаті її горіння зростає опір у контактному вузлі, утворюються «містки» з розплавленого металу. Горіння дуги супроводжується виділенням великої кількості енергії та підвищенням температури до кількох десятків тисяч градусів, що робить її надзвичайно небезпечною для електрообладнання.

Статистичні дані, щодо показників надійності контакторів БК-78Т відсутні, проте варто зазначені, що вони є досить старими і мають суттєвий рівень зносу. Проте є дані, щодо показників надійності сучасних силових контакторів виробництва компанії ABB, які наведені на рис.1.11.



а



б

Рис.1.11 – Показники надійності силових контакторів ABB:

а – для силових контакторів до 1000А;

б – для силових контакторів до 3500А.

Згідно даних на рис.1.11, сучасні силові контактори при комутації струмів 800А мають ресурс числа комутації 300 000 циклів комутації.

Контактні апарати, порівняно з безконтактними, мають низку недоліків:

– вібрація;

– підвищений шум під час комутаційних операцій і викид розпечених газів;

– механічний знос контактів і інших рухомих частин;

– обгорання і зварювання контактів.

Час спрацювання контактних апаратів становить десяті або соті частки секунди; частота комутацій обмежується інерційністю рухомих систем,

нагріванням розмикаємих контактів та часом деіонізації міжконтактних проміжків.

Усі ці недоліки змушують задуматися про розробку аналогів, наприклад, апаратів напівпровідникового типу.

Нижче наведено аналіз сучасної бази силових запираємих напівпровідникових приладів.

Таким чином, підвищення показників надійності силових контакторів електрорухомого складу може буди досягнено шляхом заміни механічних контакторів напівпровідниковими ключами та додання снаберних ланцюгів, які знижують значення комутаційних перенапруг.

2 Напівпровідниковий силовий комутатор

2.1. Аналіз силових напівпровідникових ключів

Останні десятиліття силові напівпровідникові ключі стрімко розвиваються. Наразі значення можливих комутованих струмів одного ключа сягають 6000А при напрузі до 12000В.

Класифікація силових напівпровідникових ключів представлена на рис.2.1.

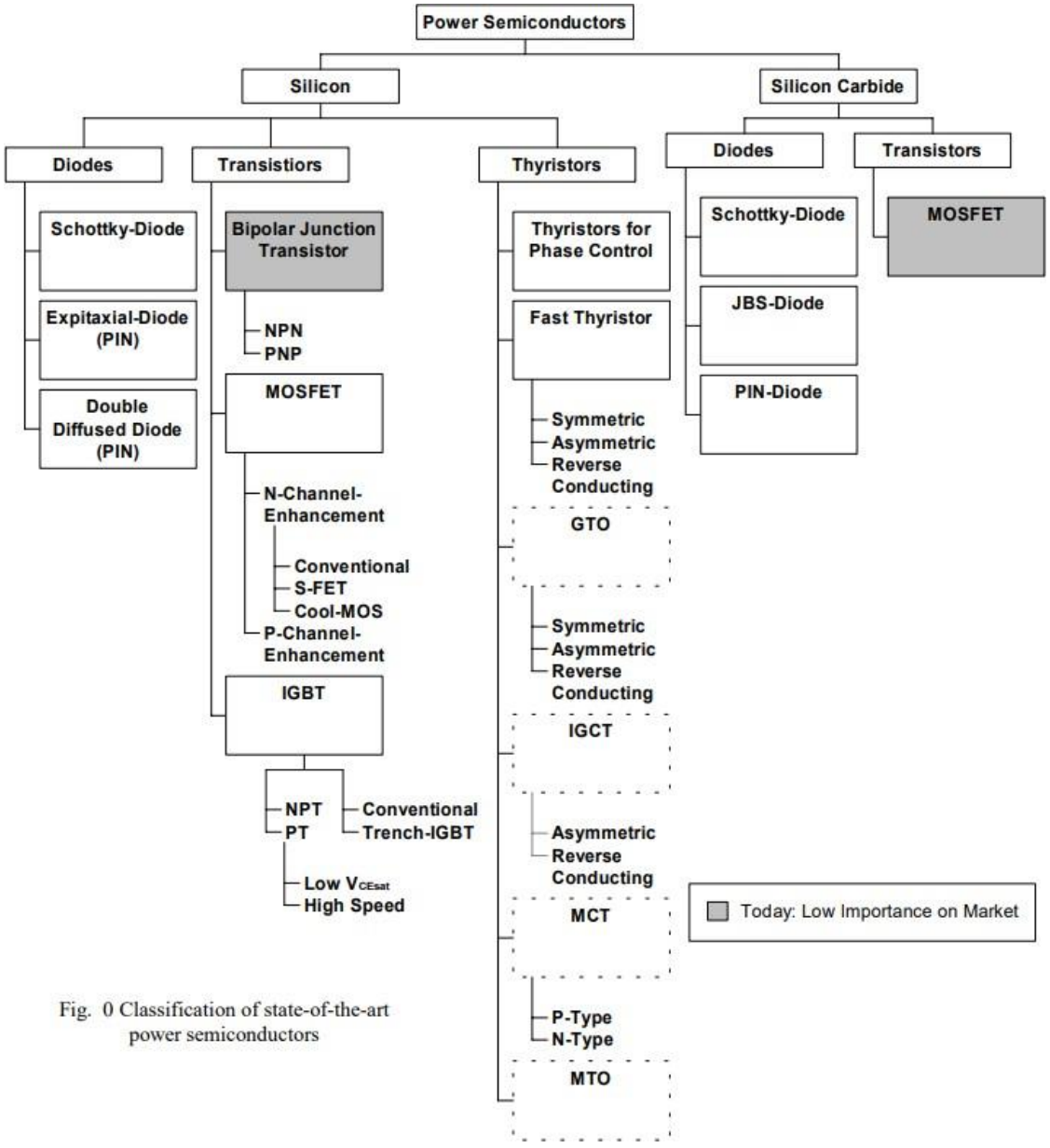


Fig. 0 Classification of state-of-the-art power semiconductors

Рис.2.1 – Класифікація силових напівпровідникових ключів

Діапазон можливих значень комутованих струмів та напруг сучасних напівпровідникових ключів представлено на рис.2.2.

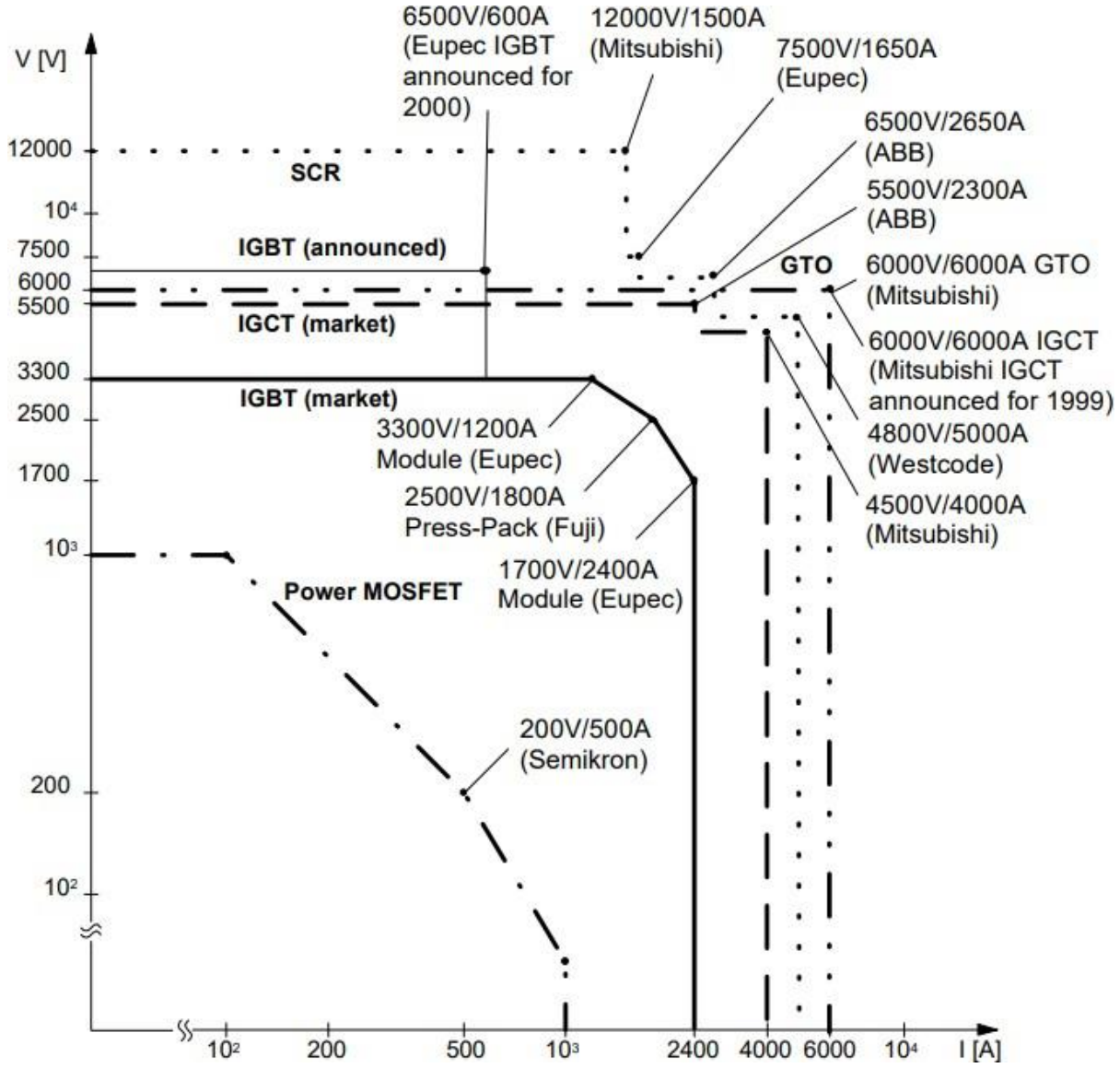
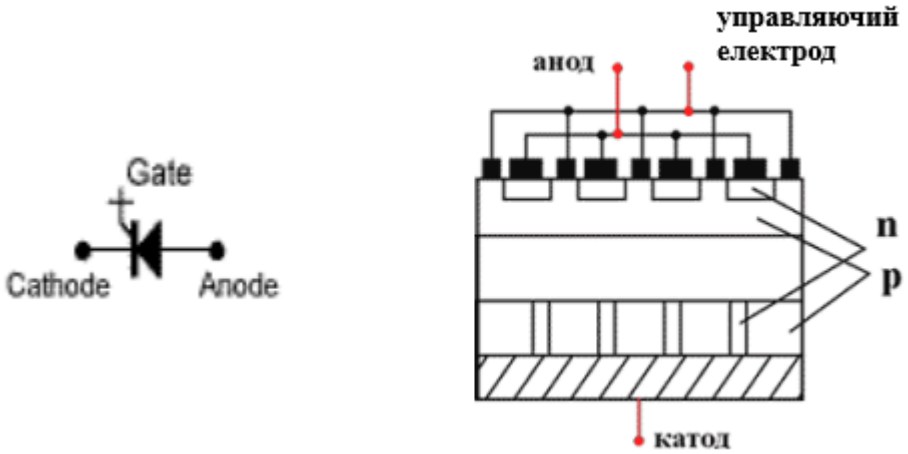


Рис.2.2 – Діапазон можливих значень комутованих струмів та напруг сучасних напівпровідникових ключів

В кожному застосуванні обрання силових ключів базується на значення його собівартості, характеристик комутованих струмів та напруг, а також втрат потужності в силових ключах в провідному стані та при комутації.

2.2. GTO-тиристори

Запираємий тиристор – це повністю керований напівпровідниковий прилад, у основі якого лежить класична чотиришарова структура. При подачі на електрод керування позитивного чи негативного імпульсу струму тиристор включається або вимикається. Умовне позначення (а) та структурна схема (б) запираємого тиристора наведені на рисунку 2.1.



а б

Рис. 2.1 – Замикаючий тиристор: а – умовне позначення; б - структурна схема

Як і у звичайного тиристора, у нього є катод *K*, анод *A* і керуючий електрод *G*. Різниця у структурах приладів полягає в розташуванні горизонтальних і вертикальних шарів з n- та p-провідністю.

Будова катодного шару n зазнала найбільших змін. Він розділений на кілька сотень елементарних осередків, рівномірно розподілених по площі та з'єднаних паралельно. Така конструкція забезпечує рівномірне зменшення струму по всій площі напівпровідникової структури під час вимкнення приладу.

Попри те, що базовий шар p виконаний як єдине ціле, він має велику кількість контактів керуючого електрода (приблизно рівну числу катодних

осередків), які також рівномірно розподілені по площі та з’єднані паралельно. Базовий шар n виконаний аналогічно відповідному шару звичайного тиристора.

Анодний шар p має шунти (зони n), які з’єднують n-базу з анодним контактом через невеликі розподілені опори. Ці шунти необхідні в тиристорах, що не мають зворотної блокувальної здатності. Завдяки покращенню умов вилучення зарядів із базової області n вони зменшують час вимкнення приладу.

Тиристори GTO мають переважно таблеткове виконання з чотиришаровою кремнієвою пластиною, затиснутою через молібденові термокомпенсаційні диски між двома мідними основами, які мають підвищену електро- та теплопровідність. Керуючий електрод контактує з кремнієвою пластиною та має вивід у керамічному корпусі.

Контактні поверхні приладу затискаються між двома половинами охолоджувачів, які ізольовані одна від одної та мають конструкцію, що визначається типом системи охолодження.

Тиристор GTO у своєму робочому циклі має чотири фази: увімкнення, вимкнення, провідний і блокувальний стани.

Тиристорна структура (рис. 2.1) у схематичному розрізі містить анодний нижній вивід структури. Анод з'єднаний зі шаром p. Далі, знизу вгору, розташовані: базовий шар n, базовий шар p (який має вивід керуючого електрода), шар n, що безпосередньо контактує з катодним виводом. Три p-n переходи формуються чотирма шарами: між шарами p та n – j_1; між шарами n та p – j_2; між шарами p та n – j_3.

Осцилограма комутації GTO тиристора представлена на рис.2.3.

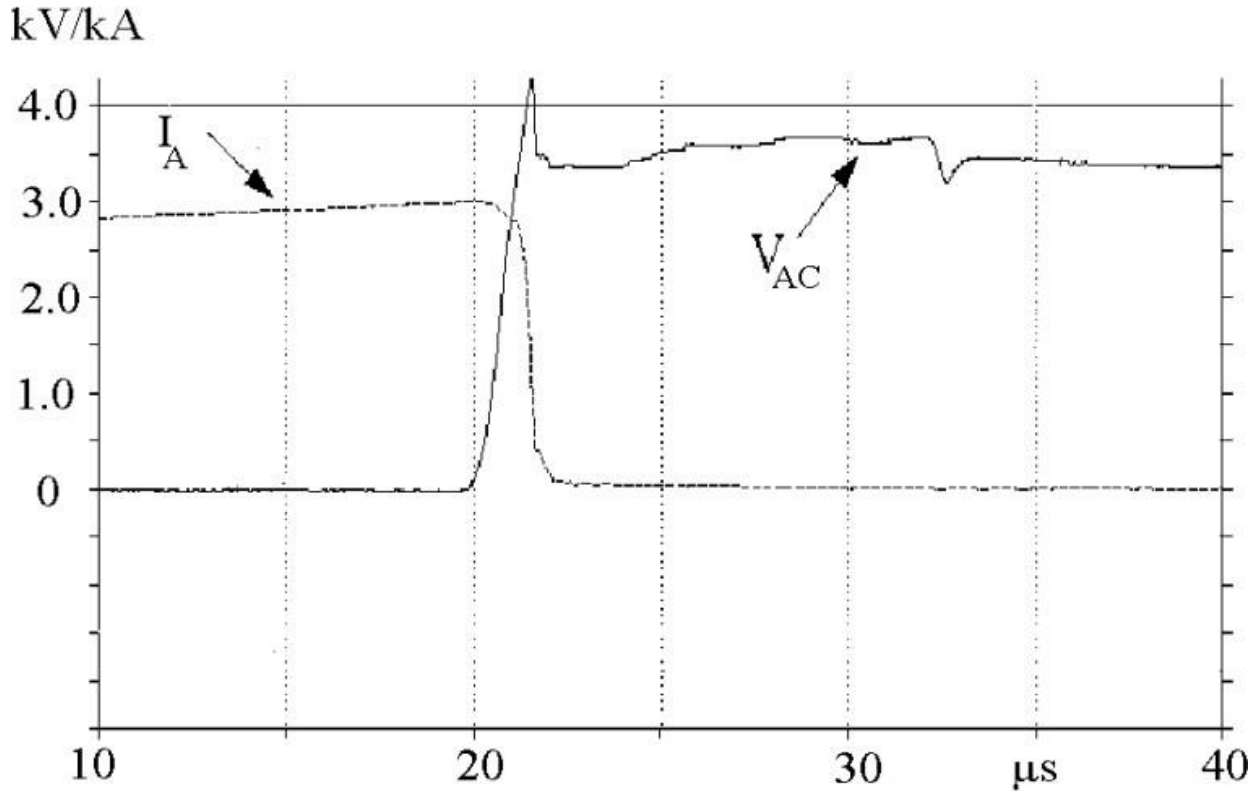


Рис.2.3 – Осцилограмма комутації запираємого тиристора типу 5SGX 06F6004 (Vdc-link= 3.3kV, Tj (t = 0) = 80°C, Lr = 17μH, Load = 2mH/50 mΩ, ton = 10 μs, toff = 30 μs)

Процес комутації складається з наступних етапів:

1. Фаза 1: Увімкнення.

Перехід тиристорної структури із закритого стану в увімкнений можливий лише за умови подачі прямої напруги між анодом і катодом. Щоб увімкнути тиристор GTO, необхідно прикласти до керуючого електрода і катода напругу позитивної полярності. У результаті через ланцюг потече струм увімкнення.

Сумарний струм, що проходить через базовий перехід j_2, перевищує струм увімкнення, унаслідок чого тиристор відкривається, і носії зарядів вільно переходять через усі чотири області.

2. Фаза 2: Провідний стан.

Якщо струм в анодному ланцюзі перевищує значення струму утримання, то режим протікання прямого струму через керуючий ланцюг не є обов'язковим.

Однак на практиці, для забезпечення стабільності при певному температурному режимі, необхідно підтримувати струм, щоб усі структури тиристора залишалися у провідному стані. У результаті протягом усього часу увімкнення і провідного стану система керування створює імпульс струму позитивної полярності.

3. Фаза 3: Вимкнення.

Щоб вимкнути тиристор GTO (рис.2.3), до керуючого електрода і катода прикладається напруга негативної полярності за умови незмінної полярності основної напруги. Негативна напруга викликає струм вимкнення, у процесі протікання якого відбувається розсіювання основних носіїв зарядів (дірок) у базовому шарі p.

Це означає, що дірки, які потрапили у шар p із базового шару n, рекомбінують із електронами, що надходять у цей шар через керуючий електрод.

Протягом часу, необхідного для звільнення базового переходу j_2, тиристор починає запиратися. Цей процес характеризується миттєвим зменшенням прямого струму тиристора до невеликого значення за короткий проміжок часу (рис. 3.2). Після того, як базовий перехід j_2 запирається, одразу починає закриватися перехід j_3. Однак через енергію, накопичену в індуктивності керуючих ланцюгів, перехід ще деякий час залишається частково відкритим.

З боку катода перехід j_3 повністю запирається лише після того, як уся енергія, накопичена в індуктивності керуючого ланцюга, буде витрачена. З цього моменту струм витоку, що протікає від анода до катода через ланцюг керуючого електрода, дорівнює струму через тиристор.

4. Фаза 4: запираючий стан.

У режимі блокувального стану блок управління продовжує подавати на керуючий електрод і катод напругу негативної полярності. Сумарний струм у ланцюзі управління складається зі струму витоку тиристора та зворотного струму управління, що проходить через перехід j_3. У результаті перехід j_3 зміщується в зворотному напрямку. Таким чином, у тиристорі GTO, що знаходиться у прямому блокувальному стані, два переходи (j_2 і j_3) зміщені у зворотному напрямку,

утворюючи дві області просторового заряду. Система управління формує імпульс негативної полярності протягом усього часу вимкнення і блокувального стану.

Для роботи тиристорів GTO необхідно застосування спеціальних захисних ланцюгів. Вони є важливими для нормального функціонування пристроїв, хоча і збільшують масу, габаритні розміри та вартість перетворювача, а також потребують додаткових пристроїв охолодження.

При комутації напівпровідникового приладу призначення будь-якого захисного ланцюга полягає в обмеженні швидкості наростання одного з двох параметрів електричної енергії. Для цього паралельно до захищуваного приладу підключають конденсатори захисного ланцюга (рис. 2.3). Під час вимкнення тиристора саме вони обмежують швидкість наростання прямої напруги.

Послідовно з приладом встановлюють дроселі, які обмежують швидкість наростання прямого струму під час увімкнення тиристора. Значення $\frac{dU_T}{dt}$ та $\frac{dI_T}{dt}$ вказані у паспортних даних і довідниках для кожного приладу, що нормується.

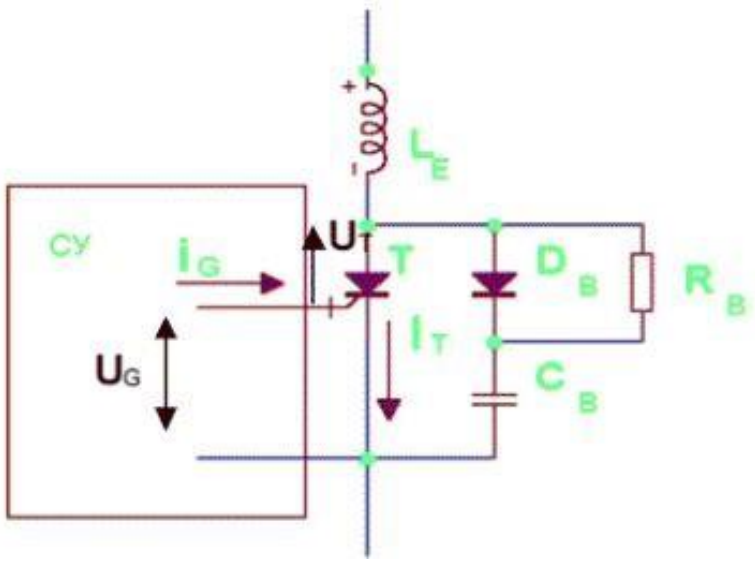


Рис. 2.3 – Схема захисного снаберного кола тиристора

Окрім конденсаторів і дроселів, для забезпечення розряду та заряду реактивних елементів у захисних ланцюгах використовуються додаткові компоненти. До таких компонентів належать: діод, що шунтує резистор під час

вимкнення тиристора та заряду конденсатора; резистор, який обмежує струм розряду конденсатора під час увімкнення тиристора.

Система керування.

Система керування (СК) складається з таких функціональних блоків:

– контур увімкнення, який включає схему формування відмикаючого імпульсу та джерело сигналу, що підтримує тиристор у відкритому стані;

– контур утримання тиристора в закритому стані;

– контур формування запираючого сигналу.

Кожна СК повинна містити контури формування відмикаючих і запираючих імпульсів, тоді як інші блоки можуть бути відсутніми, залежно від конкретної системи. Важливим є забезпечення гальванічної розв'язки між схемою керування та силовим ланцюгом вимикального тиристора.

Робота вимикального тиристора керується двома основними типами СК, які відрізняються способами подачі сигналу на керуючий електрод. У випадку, показаному на рисунку 2.4, сигнали, сформовані логічним блоком, проходять через гальванічну розв'язку, після чого подаються через ключі ввімкнення та вимкнення на керуючий електрод тиристора. У другому випадку сигнали спершу впливають на ключі ввімкнення та вимкнення, що знаходяться під тим самим потенціалом, що й система керування, а потім через пристрої гальванічної розв'язки передаються на керуючий електрод.

Існують різні схеми керування, які розрізняються за розташуванням ключів. За цією ознакою виділяють високопотенціальні (ВПСК) та низькопотенціальні (НПСК, рис. 2.4) схеми керування.

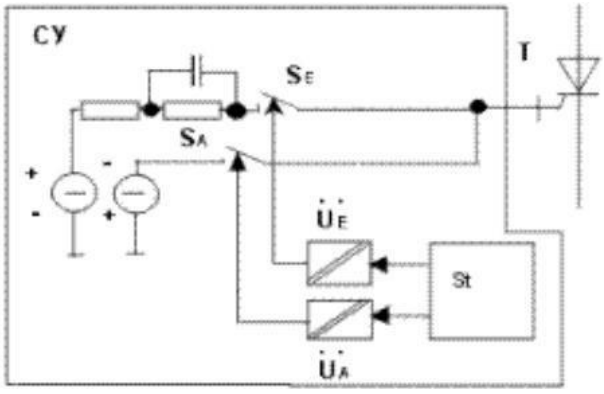


Рис. 2.4 – Один із варіантів ланцюга управління

Низькопотенціальна система конструктивно простіша за високопотенціальну, але її можливості обмежені щодо формування сигналів керування великої тривалості, які діють у режимі протікання прямого струму через тиристор, а також у забезпеченні крутизни імпульсів керування. Для формування сигналів великої тривалості доводиться використовувати дорожчі двотактні схеми.

Збільшена тривалість керуючого сигналу та висока крутизна в ВПСУ досягаються простіше. Крім того, тут повністю використовується сигнал керування, на відміну від НПСУ, де його величина обмежена пристроєм розподілу потенціалів (наприклад, імпульсним трансформатором).

Через оптоелектронний перетворювач на схему зазвичай подається інформаційний сигнал – команда на вимкнення або увімкнення.

2.3. GCT тиристори

Фірми «ABB» та «Mitsubishi» в середині 90-х років розробили новий тип тиристорів, який називається Gate Commutated Thyristor (GCT). Цей тип тиристорів є подальшим удосконаленням GTO або його модернізацією. Його розгляд є доцільним, оскільки він має принципово нову конструкцію керуючого електрода та помітно відрізняється процесами, які відбуваються при вимиканні приладу.

Проблеми, що виникають при роботі GTO тиристорів, відсутні у GCT, оскільки він розробляється як прилад, позбавлений недоліків, характерних для GTO.

При комутації GTO приладу основним недоліком є великі втрати енергії в захисних ланцюгах. На практиці тиристори GTO комутують з частотою не більше 250-300 Гц, оскільки з підвищенням частоти зростають втрати. При вимиканні тиристора, а отже, і розряді конденсатора, у резисторі виникають основні втрати.

Для вимикання приладу необхідний конденсатор, який буде обмежувати швидкість нарастання прямого напруги.

У конструкції GTC була реалізована можливість відмовитися від снаберної ланцюга (ланцюга формування траєкторії перемикання), зробивши тиристор нечутливим до ефекту *du*/*dt*.

Основною особливістю тиристорів GCT порівняно з приладами GTO є швидке вимикання, що досягається зміною принципу управління або поліпшенням конструкції приладу. Для реалізації швидкого вимикання необхідно перетворити тиристорну структуру в транзисторну при запиранні приладу, що зробить прилад нечутливим до ефекту *du*/*dt*.

У фазах провідного та блокувального стану GCT керується так само, як і GTO. Існують дві особливості керування GCT при вимкненні:

– струм керування дорівнює або перевищує анодний струм (струм керування менший у 3-5 разів для тиристорів GTO);

– завдяки низькій індуктивності керуючого електрода, швидкість наростання струму керування досягає значень, рівних 3000 А/мкс і більше (для тиристорів GTO наростання струму керування складає 30-40 А/мкс).

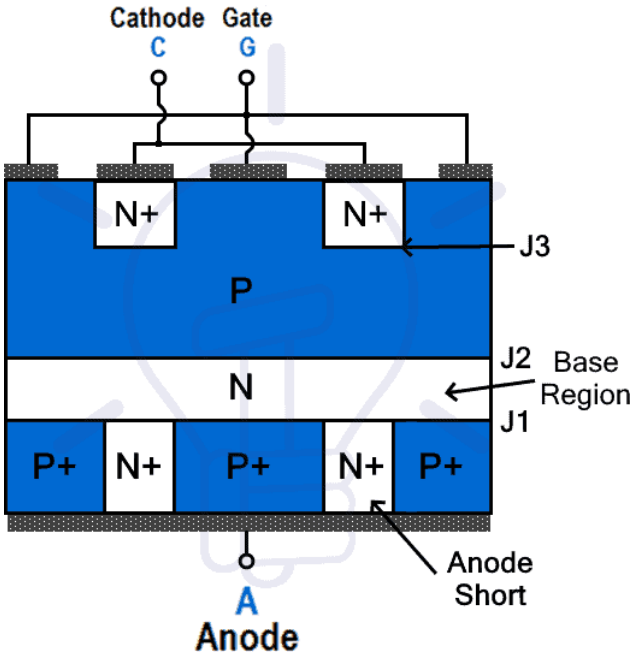


Рис. 2.5 – Структура GTO тиристора

Розподіл струмів у структурі тиристора GCT при вимиканні пристрою показано на рисунку 2.5. Процес увімкнення GCT подібний до увімкнення тиристорів GTO. Процес вимикання відрізняється. Увесь прямий струм, який проходить через пристрій, після подачі негативного імпульсу керування, що за амплітудою рівний анодному струму, відхиляється в систему керування і досягає катода, минаючи перехід j_3 (між областями p і n). Катодний транзистор n-p-n закривається, оскільки перехід j_3 зміщується в зворотному напрямку. Подальше відключення GCT подібне до вимикання будь-якого біполярного транзистора, що не потребує зовнішнього обмеження швидкості наростання прямого напруги і, відповідно, допускає відсутність снабберної ланцюга.

Динамічні процеси, які виникають у пристрої при вимиканні, протікають на порядок два швидше, ніж у GTO, у зв'язку з чим конструкція була змінена. Наприклад, якщо мінімальний час відключення і блокуючого стану для тиристора GTO складає 100 мкс, то для GCT ця величина не перевищує 10 мкс.

При вимиканні GCT швидкість наростання струму керування складає близько 3000 А/мкс, а для GTO – не перевищує 40 А/мкс.

Такі компанії, як Mitsubishi і ABB, випускають тиристори GCT, розраховані на напруги до 4500 В і струми до 4000 А.

2.4. Тиристори IGCT

З монолітними інтегрованими високомощними діодами для застосування в діапазоні 0,5-6 МВ·А було розроблено нову серію пристроїв IGCT. Завдяки наявним технічним можливостям паралельного та послідовного з'єднання, пристрої IGCT здатні збільшувати рівень потужності до сотень МВ·А.

Тиристор переходить з p-n-p-n стану в p-n-p режим при запиранні за 1 мкс, працюючи при «жорсткому» управлінні. В результаті вимикання тиристора відбувається повністю в транзисторному режимі, що усуває будь-яку ймовірність появи триггерного ефекту. Завдяки використанню на стороні анода буферного шару досягається зменшення товщини пристрою. Покращує характеристики традиційних елементів буферний шар силових напівпровідникових пристроїв завдяки зменшенню їх товщини на 30% при такому ж пробивному прямому напрузі. Покращення технологічних характеристик при низьких динамічних і статичних втратах – це головна перевага тонких елементів. Ефективне вивільнення електронів зберігається під час вимикання, однак при такому буферному шарі в чотирьохшаровому пристрої потрібно усунути анодні короткі замикання. У новому тиристорі IGCT разом із прозорим анодним еміттером комбінується буферний шар. Прозорий анод є p-n переходом з керованою ефективністю струмового еміттера.

Тиристор IGCT оточений блоком управління для максимальної підвищення стійкості до перешкод та компактності, який формує єдину конструкцію з охолоджувачем, що містить лише ту частину схем, необхідну для управління IGCT. В результаті кількість елементів керуючого блоку зменшена, електричні та теплові навантаження, параметри розсіювання тепла знижені. Завдяки цьому

також знижена інтенсивність відмов і вартість блоку управління. Через оптоволокно IGCT точно з'єднується з джерелом керуючого сигналу та джерелом живлення, легко фіксуючись у модулі з інтегрованим керуючим блоком. До IGCT додається правильно розраховане прижимне зусилля, яке створює електричний та тепловий контакт шляхом простого розмикання пружини, завдяки детально розробленій прижимній контактній системі. Завдяки цьому досягається найбільша надійність і максимальне полегшення збірки. Якщо IGCT працює без снаббера, то й зворотний діод повинен працювати без снаббера. Ці вимоги здатний виконати високомощний діод, який має прижимний корпус з поліпшеними характеристиками, виготовлений за допомогою процесу опромінення в поєднанні з класичними процесами.

Роботою діода визначаються можливості щодо забезпечення швидкодії струму за параметром *di*/*dt* (рис. 2.6).

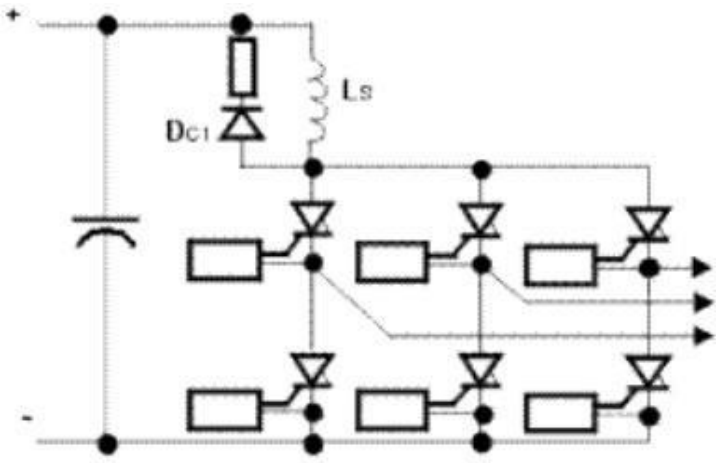


Рис. 2.6 – Схема трифазного інвертора на IGCT тиристорах

Фірма «ABB» є основним виробником тиристорів IGCT. Параметри тиристорів за напругою: 4500 В, 6000 В; за струмом: 3000 А, 4000 А.

В останні роки, завдяки появі IGBT з номінальною напругою до 4500 В і здатністю вимикати струми до 1800 А, відбулося витіснення запираних тиристорів (GTO) в пристроях потужністю до 1 МВт і напругою до 3,5 кВ.

При всьому цьому нові пристрої IGCT, які здатні працювати з перемиканнями частотою від 500 Гц до 2 кГц і мають високі параметри порівняно з транзисторами IGBT, поєднують у собі ідеальну комбінацію перевірених технологій тиристорів з типово низькими втратами і безснабберною, високо ефективною технологією вимикання, за допомогою впливу на керуючий електрод. Ідеальним рішенням сьогодні для застосування в галузі силової електроніки середньої та високої напруги є пристрій IGCT.

Потужні силові ключі з двостороннім теплоотводом мають наступні характеристики, представлені в таблиці 2.1 [7].

Таблиця 2.1 – Параметри сучасних потужних силових ключів з двостороннім тепловідведенням

Найменування приладу	Переваги	Недоліки	Область застосування
SCR тиристор	У включеному стані має найнижчі втрати. Володає найвищою перевантажувальною здатністю та надійністю. Легко з'єднується послідовно та паралельно.	Через керуючий електрод не здатний запиратися. Працює при низьких частотах.	Електроприводи постійного струму. Потужні джерела живлення Зварювання. Нагрів і плавлення. Статичні компенсатори. Напівпровідникові ключі змінного струму.
GTO тиристор	Має здатність запиратися сигналом управління. Володає досить високою перевантажувальною здатністю. Може з'єднуватися послідовно. При напрузі до 4 кВ може працювати при частоті до 250 Гц.	У включеному стані має високі втрати. У системі управління дуже великі втрати. Системи управління та подачі енергії на потенціал складні. На перемикання йдуть великі втрати.	Електроприводи. Статичні компенсатори реактивної потужності. Системи безперебійного живлення. Індукційний нагрів.
IGCT тиристор	Має здатність запиратися сигналом управління. Володає досить високою перевантажувальною здатністю.	Недоліки не виявлені, оскільки відсутній досвід експлуатації.	Потужні джерела живлення (інверторні та випрямлювальні підстанції ліній передач постійного струму). Електроприводи

	У включеному стані має низькі втрати для перемикання. Працює на частотах до кГц. Драйвер вбудований (блок управління). Може з'єднуватися послідовно.		(інвертори напруги для перетворювачів частоти та електроприводів різного призначення).
IGBT	Має здатність запиратися сигналом управління. Працює на частоті до 10 кГц. Система управління проста та неенергоємна. Драйвер вбудований (блок управління).	У включеному стані має дуже високі втрати.	Електроприводи (чопери). Системи безперебійного живлення. Статичні компенсатори та активні фільтри. Ключові джерела живлення.

Суттєвою перевагою напівпровідникових комутаторів, навідміну від класичних контакторів є значно більше значення числа комутацій під час життєвого циклу комутатора, яка може сягати 10^8 комутацій.

Залежність числа комутацій IGCT комутатора від температури представлено на рис.2.7.

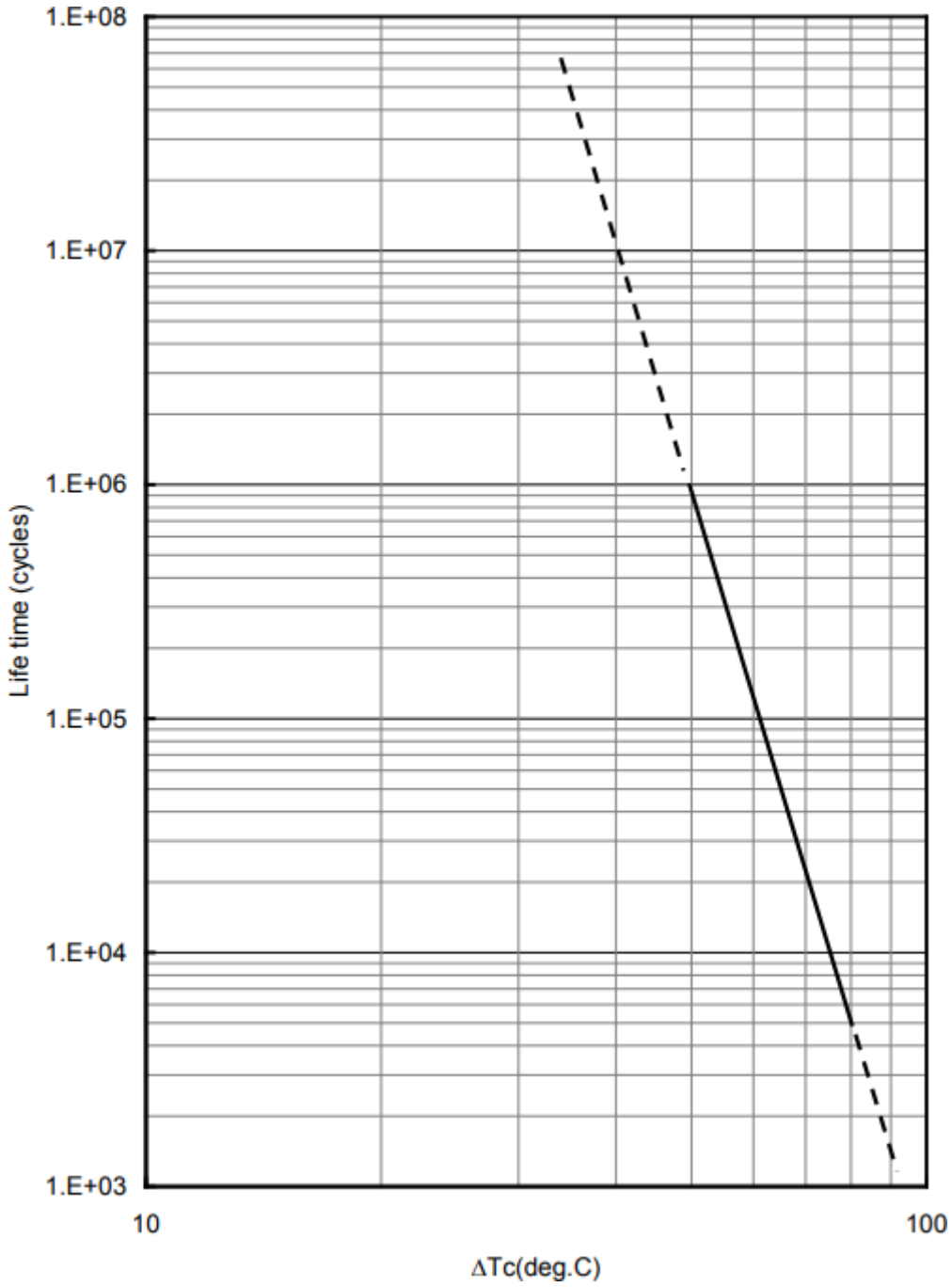


Рис.2.7 – Залежність числа комутацій IGCT комутатора від температури

У той же час середній ресурс вакуумного контактора КВТ-1,14 1,6/160А – 1-3 мільйони циклів вкл/викл.

Таким чином, заміна класичних контакторів напівпровідниковими ключами суттєво підвищить показники надійності ЕРС та знизить число ремонтів.

2.5. Тиристорна схема комутатора

Під час аналізу сучасних напівпровідникових ключів було встановлено, що найкращим варіантом для силової схеми електровоза є силовий запираний тиристор виробництва фірми «ABB»

Фірма «ABB» є одним із провідних підприємств електротехнічної промисловості з виробництва силових напівпровідникових приладів та перетворювачів струму в світі. Фірма розробляє та виробляє силову електроніку для транспорту, енергетики, видобувної та багатьох інших галузей промисловості.

Підприємство випускає понад 500 типів напівпровідникових приладів на струми від 10 до 10 000 А і напруги від 100 до 10 000 В.

Через швидкодіючий контактор БК-78Т протікають великі струми як в одному напрямку (режим тяги), так і в іншому (рекуперативний режим). Виходячи з цієї інформації, пропонується тиристорна схема на основі двох зустрічно-паралельних тиристорів (рис. 3.7).

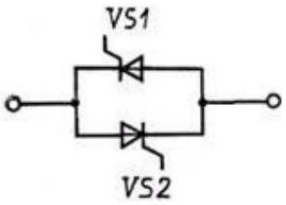


Рис. 3.7 – Схема включення тиристорів

Вибір тиристорів здійснюється за граничним значенням струму, що протікає через вентиль, і максимальним значенням зворотної напруги з урахуванням умов охолодження вентиля.

Виходячи з результатів, отриманих на етапі моделювання перехідних процесів силового кола, та аналізу сучасних запираних напівпровідникових ключів, обираємо відповідний силовий запираний тиристор.

Обрано силовий запираний тиристор Т3373-2000. Конструкція та габаритні розміри наведені на рисунку 3.8 [8].

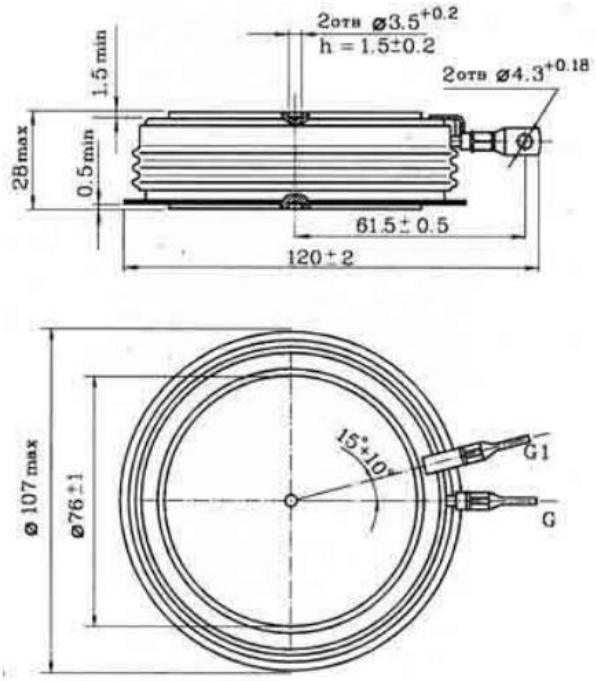


Рис. 3.8 – Запираючий силовий тиристор Т3373-2000

Основні особливості тиристора Т3373-2000:

– герметичні металокерамічні корпуси відповідають зарубіжним аналогам і міжнародним стандартам;

– оптимальне співвідношення між статичними та динамічними втратами;

– мініатюрна топологія катода та оптимальне регулювання часу життя для швидкого ввімкнення і вимкнення.

Сфери застосування:

– потужні електроприводи;

– електротранспорт;

– потужні джерела безперебійного живлення.

У таблиці 3.2 наведено основні параметри тиристора.

Таблиця 3.2 – Основні параметри запираючого силового тиристора

V_{DRM} V_{RRM}	I_{DRM} I_{RRM}	i_{tqrm} (TC, °C)	I_{TSM} 10 ms	V_{TM}	$\left(\frac{di_T}{dt}\right)_{crit}$	$\left(\frac{dv_D}{dt}\right)_{cruit}$	V_{GT}
В	мА	А	кА	В	А/мкс	В/мкс	В
5000	100	2000(85)	14	4,5	250	500	1,5
$i_{g(on)}$	i_{gqm}	V_{RDM}	T_{jmax}	$R_{th(j-c)}$	t_{qq}	F	W
А	А	В	°С	°С/Вт	Мкс	кН	кг
8	650	-	125	0,018	32	28-30	-

де:

V_{RRM} – повторювана імпульсна зворотна напруга;

V_{DRM} – повторювана імпульсна напруга у закритому стані;

I_{DRM} – повторюваний імпульсний струм у закритому стані;

I_{RRM} – повторюваний імпульсний зворотний струм;

i_{tqrm} – максимально допустимий повторюваний запираючий струм;

I_{TSM} – ударний струм у відкритому стані;

V_{TM} – імпульсна напруга у відкритому стані;

$\left(\frac{di_T}{dt}\right)_{crit}$ – критична швидкість наростання струму у відкритому стані;

$\left(\frac{dv_D}{dt}\right)_{cruit}$ – критична швидкість наростання напруги у закритому стані;

V_{GT} – відпираюча постійна напруга управління;

$i_{g(on)}$ – мінімальний підтримуючий струм управління;

i_{gqm} – запираючий імпульсний струм управління;

V_{RDM} – зворотна імпульсна напруга управління;

T_{jmax} – максимально допустима температура переходу;

$R_{th(j-c)}$ – тепловий опір перехід-корпус;

t_{qq} – час вимкнення за допомогою керуючого електрода (для GTO);

F – зусилля стискання;

W – маса.

Розшифровка умовного позначення тиристора Т3373-2000 є такою:

ТЗ – тиристор запираний;

3 – модифікація конструкції, третя;

7 – позначення модифікації за максимальним діаметром корпусу, 105 мм;

3 – позначення конструктивного виконання корпусу, таблетковий;

2000 – максимально допустимий середній прямий струм у відкритому стані, А.

Напівпровідникові ключі дуже чутливі до температури, тому їх необхідно охолоджувати. Для охолодження тиристора обираємо охолоджувач, який відповідає необхідним параметрам. Підходящий за параметрами охолоджувач – ДЖІЦ.32281.011-01. Основні параметри та розміри охолоджувача наведені в таблиці 3.3. На рисунку 3.9 показано загальний вигляд охолоджувача.

Таблиця 3.3 – Радіатор ДЖІЦ.32281.011-01

Габаритні розміри (ШДВ), мм (без струмовідводу)	Маса, кг	Діаметр контактної поверхні, мм	Тепловий опір, °С/Вт (витрата води 3 л/хв)	Перепад тиску, Па
100×200×80	5,000	78	0,025	24000

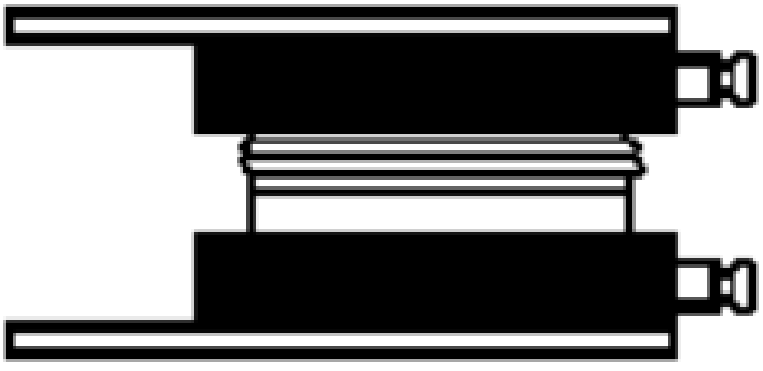


Рис. 3.9 – Профіль охолоджувача ДЖИЦ.32281.011-01

Тиристори керуються за допомогою спеціальних драйверів управління. У тиристора ТЗ373-2000 драйвер управління вбудований.

Для своєчасного спрацювання силових запираних напівпровідникових ключів необхідний датчик струму, який фіксуватиме перевищення струмів короткого замикання в рекуперативному режимі через обмежувальний резистор (аналогічно БК-78Т). Для цього використовуємо стандартний датчик струму.

Струм уставки (відключення) в швидкодіючому контакторі становить 35–50 А, тому обираємо датчик струму на 35–50 А.

Обраний датчик струму CSLA1CD на 50 А зображений на рисунку 3.10.



Рис. 3.10 – Датчик струму CSLA1CD

Час увімкнення напівпровідникових ключів становить величини від кількох десятих часток до кількох десятків мкс, час вимкнення – від кількох одиниць до кількох сотень мкс. Унаслідок швидкого спрацювання виникають значні перенапруги, які необхідно компенсувати, щоб запобігти пробою напівпровідникового ключа.

Для обмеження перенапруги використовуємо спеціальні обмежувачі перенапруги. Обмежувач перенапруги (ОПН) – це електричний апарат, призначений для захисту обладнання систем електропостачання від комутаційних і грозових перенапруг. ОПН також можна назвати розрядником без

іскрових проміжків. На сьогоднішній день ОПН є одним із найефективніших засобів захисту обладнання електричних мереж.

Фірма «ABB» розробляє спеціальні обмежувачі напруги, придатні для роботи з тиристорами. Обираємо обмежувач напруги ОНС453-15. Основні параметри обмежувача наведені в таблиці 3.4, а масо-габаритні розміри зображено на рисунку 3.11.

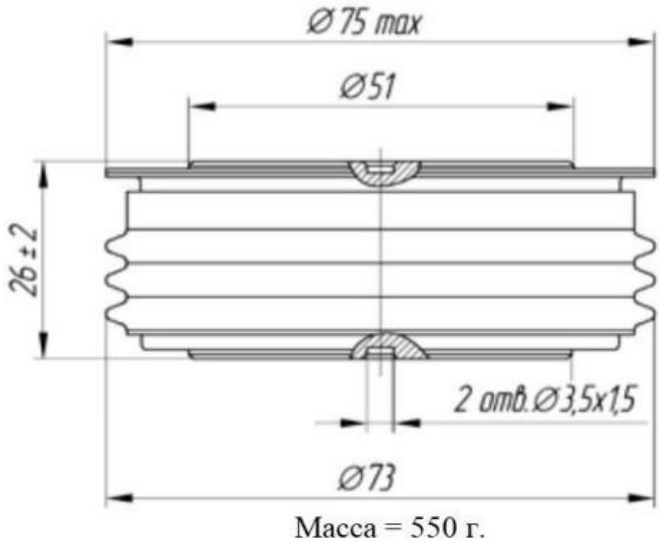


Рис. 3.11 – Масогабаритні розміри ОНС453-15

Таблиця 3.4 – Короткі параметри обмежувача напруги ОНС453-15

V_N	I_{DRM} I_{RRM}	V_{BR}	A_H	β	$R_{th(j\text{-}c)}$	T_{jmax}	F
В	мА	В	Дж	%, °С	°С/Вт	°С	кН
2800-4400	20	V_N+200	15	0,15	0,018	125	26

де:

V_N – номінальна напруга;

I_{DRM} – повторюваний імпульсний струм у закритому стані;

I_{RRM} – повторюваний імпульсний зворотний струм;

V_{BR} – напруга лавинного пробою;

A_H – енергія лавинного пробою;

β – температурний коефіцієнт напруги лавинного пробою;

$R_{th(j-c)}$ – тепловий опір перехід-корпус;

T_{jmax} – максимально допустима температура переходу;

F – зусилля стиснення.

Структура умовного позначення обмежувача напруги ОНС453-15:

ОНС – літери, що позначають «обмежувач напруги симетричний»;

4 – порядковий номер модифікації конструкції;

5 – позначення модифікації за розміром шестигранника для стрижневих ОНС або за діаметром корпусу для таблеткових ОНС;

3 – позначення конструктивного виконання корпусу;

15 – максимально допустима енергія лавинного пробою.

Основні особливості:

– дифузійна p-n-p структура;

– симетричні блокувальні характеристики, стійкі до лавинного пробою.

Сфери застосування:

– ефективний захист від повторюваних і неповторюваних перенапруг;

– застосовуються для роботи з тиристорами.

2.4 Висновок до другого розділу

Таким чином, сучасний стан розвитку силової напівпровідникової елементної бази дозволяє забезпечити впровадження в електричні кола керування і комутації електрорухомого складу.

Безконтактний електричний апарат – пристрій для комутації (увімкнення та відключення) електричних кіл без фізичного розриву самого ланцюга.

Основними важливими перевагами безконтактних апаратів у порівнянні з контактними є:

- відсутність контактів та рухомих частин;

- швидкодія, висока швидкість та частота перемикання: швидкодія рухомих частин контактних апаратів обмежується їх інерційність (особливо силових). Час перемикання безконтактних апаратів у 10-100 разів менше, ніж контактних, оскільки у безконтактних апаратах немає рухомих частин.

- довговічність: термін служби контактних апаратів обмежується зносом контактів і частин, що труться, він визначається в основному старінням матеріалів, яких виготовлено прилад.

- простота обслуговування: безконтактні апарати не потребують таких трудомістких операцій, як чищення та регулювання контактів.

- здатність до роботи у вибухонебезпечних та забруднених середовищах: не потрібні спеціальні заходи щодо захисту контактів від забруднення або пристрої, що забезпечують вибухобезпечність від виникаючої при комутації контактів іскри чи дуги.

- механічна стійкість: збереження працездатності за будь-якого становища у просторі.

- безшумність при роботі;

- менший рівень радіоперешкод.

Порівняльна характеристика швидкодіючого контактора БК78Т з безконтактним апаратом п/п типу представлена таблиці 11.

Таблица 11 – Сравнительная характеристика

Параметр сравнения	БК-78Т	Бесконтактный аппарат п/п типа
Скорость срабатывания, мс	5	0,001
Горение электрической дуги	да	нет
Обслуживание	частое	не требуется
Предельный ток, кА	2,5	10
Наибольшее напряжение, кВ	4	9
Масса, кг	43	10
Чувствительность к магнитным и электрическим полям	высокая	отсутствует

Як видно з таблиці 11, запропоноване інженерне рішення багато в чому перевершує свій аналог (швидкий контактор БК-78Т). Це відбувається за рахунок того, що БК-78Т був спроектований ще в минулому столітті, коли напівпровідникові пристрої тільки починали розвиватися в нашій країні. На даний момент випускаються різні напівпровідникові ключі, здатні комутувати ланцюги на десятки кА і десятки кВ.

3 Моделювання перехідних процесів силових кіл тягових електродвигунів

3.1. Моделювання пуску та розгону електродвигунів

Основною метою цієї роботи є моделювання перехідних процесів у силовому ланцюзі тягових електродвигунів електровоза ВЛ10 під час комутації його швидкодійним контактором БК-78Т у режимі рекуперації. Цей режим можливий за будь-якого з'єднання тягових електродвигунів: послідовного, послідовно-паралельного або паралельного. У даній роботі буде досліджено перехідний процес при комутації ланцюга за паралельного з'єднання, оскільки він є найбільш небезпечним.

Тягові електродвигуни неможливо запустити одразу за паралельного з'єднання, тому спочатку реалізується послідовне з'єднання (пуск і розгін), потім послідовно-паралельне (розгін), і, нарешті, паралельне з'єднання (вихід на номінальний режим роботи).

Для моделювання силового ланцюга тягових електродвигунів буде використано схему силового ланцюга, яка реалізується у програмному середовищі Matlab Simulink.

Підпрограма Simulink є додатком до програмного продукту Matlab.

Для роботи з Simulink не обов'язково знати Matlab та інші вбудовані додатки, оскільки Simulink є цілком самостійним інструментом. Більшість вбудованих підпрограм мають інструменти, які інтегруються з Simulink. Також доступні додаткові бібліотеки блоків для різних сфер застосування.

У Matlab Simulink користувач може редагувати бібліотечні блоки, створювати нові блоки та формувати нові бібліотеки блоків.

Під час моделювання користувач може вибирати метод розв’язання диференціальних рівнянь, а також спосіб зміни модельного часу (з фіксованим або змінним кроком). У процесі моделювання можна спостерігати за процесами в системі. Для цього використовуються спеціальні пристрої спостереження, які

входять до бібліотеки Simulink. Результати моделювання можуть бути представлені у вигляді графіків або таблиць.

Simulink дозволяє розширювати бібліотеки блоків за допомогою підпрограм, написаних як мовою Matlab, так і мовами програмування C++, Ada та Fortran [4].

Нижче наведена схема силового ланцюга тягових електродвигунів у положенні головної рукоятки контролера машиніста на 1-й позиції під час руху електровоза вперед (рис. 2.1).

Схема складається з таких елементів силового ланцюга: 45-1(2) (струмоприймач), 21-1 (дросель для згладжування перешкод), 47-1 (даховий роз'єднувач), 52-1 (диференціальне реле тягових електродвигунів), 51-1 (швидкодійний контактор), 1-1, 2-1, 3-1, 4-1 (лінійні контактори), 8-1 (урівнювальний контактор паралельного з'єднання тягових електродвигунів), 5-1, 6-1, 7-1, 10-1, 11-1 (реостатні контактори), 22-1, 23-1, 24-1, 26-1, 27-1 (контакторні елементи групового перемикача ПКГ1), Р1–Р8 (пускові резистори), 30-0, 31-0, 32-0 (контакторні елементи загального ПКГ), 65-1, 66-1 (реле перевантаження тягових електродвигунів), ОД1-2, ОД3-4 (подвійні ножі), I, II, III, IV (тягові електродвигуни ТЛ2К1), 143-1, 144-1 (реле боксування), Р158–Р160, Р162–Р164 (до реле боксування), 13-1, 14-1, 15-1, 16-1, 213-1, 214-1, 215-1, 216-1 (контактори послаблення збудження), Р9–Р13, Р15–Р19 (резистори послаблення збудження), 71-1, 72-1 (індуктивні шунти), 68-1, 69-1 (шунти амперметрів).

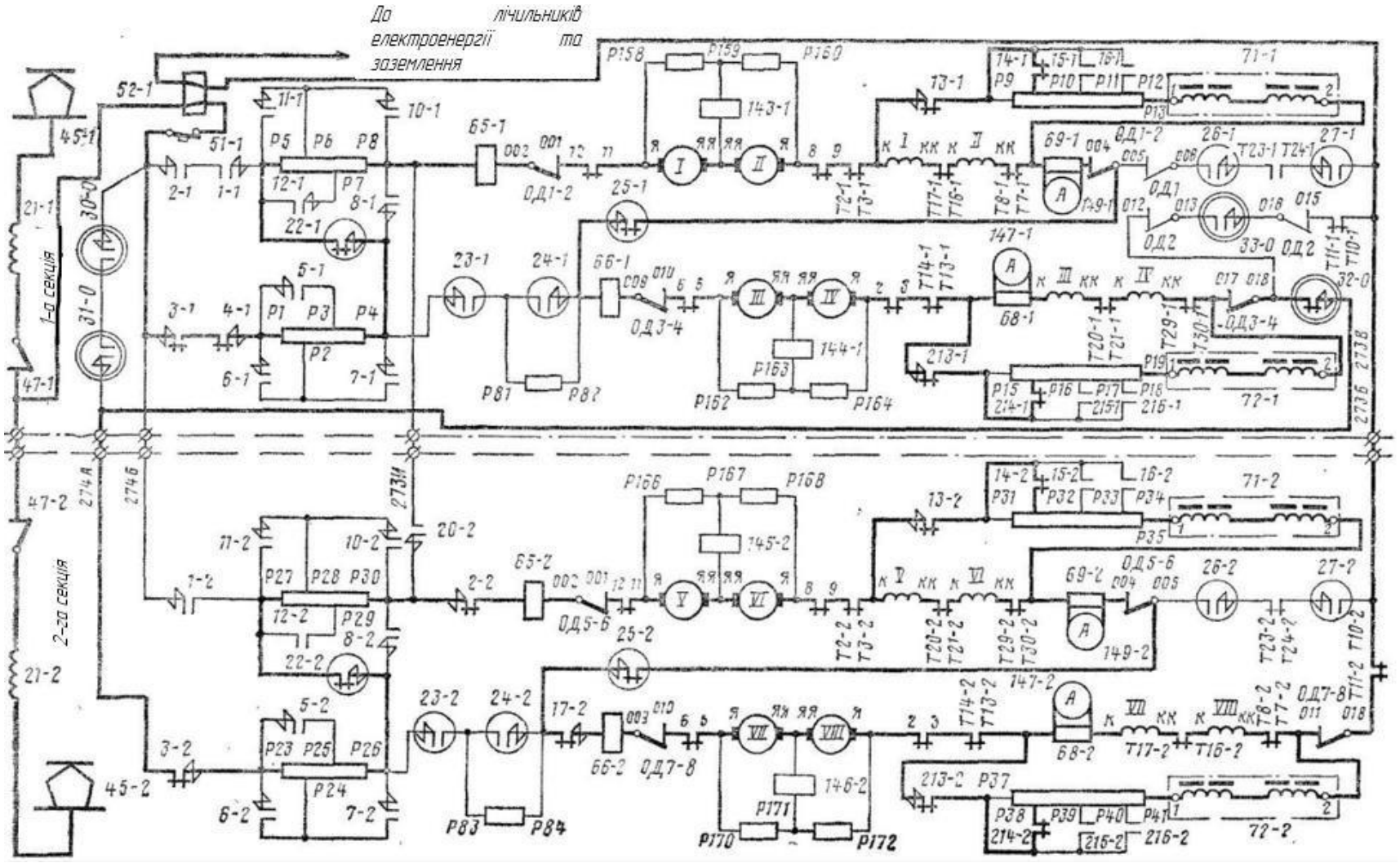


Рис. 3.1 – Схема силового ланцюга тягових двигунів при положенні головної рукоятки контролера машиніста на 1-ій позиції під час руху вперед

Для моделювання необхідні такі блоки бібліотеки Simulink: DC Voltage Source, RLC Branch, DC Machine, Ideal Switch, Ground, powergui, display, scope, constant, gain, demux.

Де:

– *constant* – джерело постійного сигналу (необхідне для увімкнення контакторів);

– *powergui* – інструмент графічного інтерфейсу користувача, що забезпечує розв’язання багатьох задач, зокрема задач моделювання;

– *gain* – виконує множення вхідного сигналу на постійний коефіцієнт (необхідне для задання моменту на валу двигуна);

– *demux* – розділяє вхідний векторний сигнал на окремі складові (необхідне для зняття значень швидкості, струму якоря, струму збудження та моменту з двигуна постійного струму);

– *display* – відображає значення сигналу у вигляді числа (необхідне для миттєвого визначення значення швидкості, струму або моменту);

– *scope* – будує графіки досліджуваних сигналів у функції часу, дозволяючи спостерігати за їх змінами під час моделювання (необхідне для отримання графіків перехідних процесів) [5].

Схема для моделювання в програмному продукті Matlab Simulink зображена на рисунку 3.2.

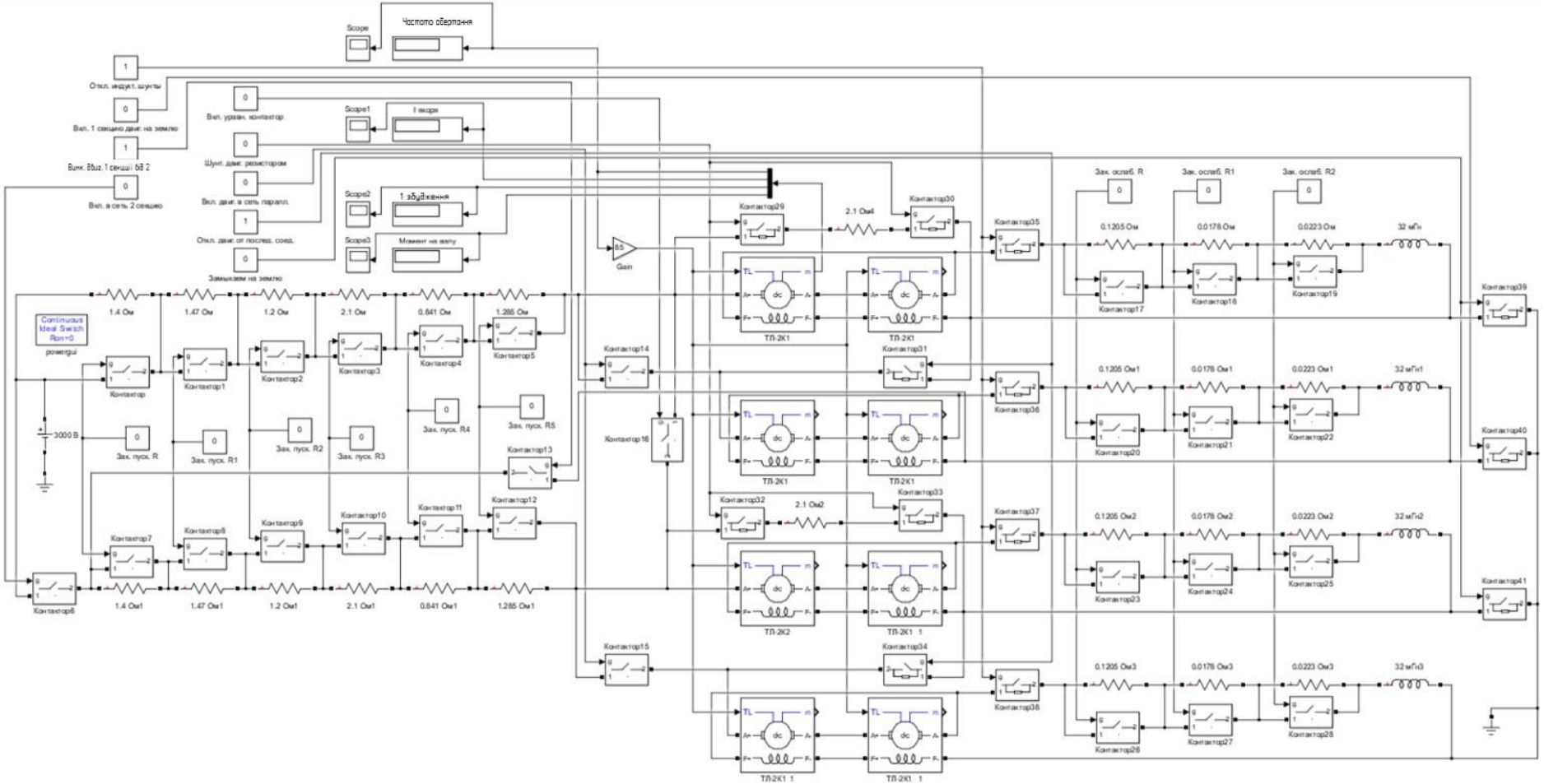


Рис. 3.2 – Електрична схема у програмному продукті Matlab Simulink

Частота обертання тягових двигунів регулюється напругою на їхніх затискачах або послабленням збудження головних полюсів. Зміна напруги на затискачах тягових двигунів електровозів постійного струму здійснюється за допомогою різних видів з'єднання тягових двигунів: послідовного (С), послідовно-паралельного (СП) та паралельного (П).

Здійснимо запуск і розгін електродвигунів.

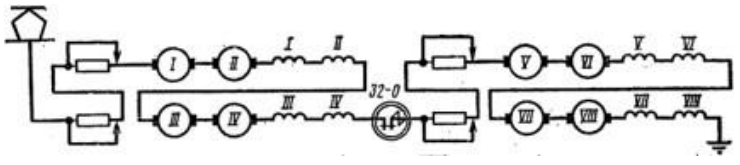
3.1.1 Старт на послідовному та перехід на послідовно паралельне з'єднання тягових електродвигунів

На електровозах ВЛ10 і ВЛ10^{у} перехід з послідовного на послідовно-паралельне з'єднання здійснюється шляхом підключення частини тягових електродвигунів до пускових резисторів. Такий перехід відбувається у п'ять етапів. Усі тягові двигуни на послідовному з'єднанні об'єднані в один послідовний ланцюг (рис. 2.3, а).

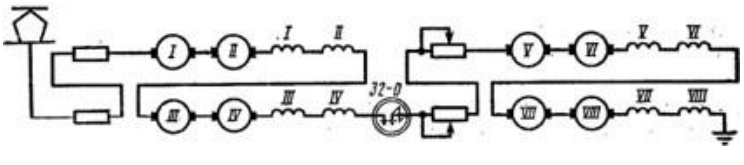
Для обмеження стрибка струму на першій перехідній позиції в ланцюг тягових електродвигунів вводяться пускові резистори першої секції електровоза та частина резисторів другої секції електровоза (рис. 2.3, б).

На другій перехідній позиції відбувається закорочування тягових електродвигунів V, VI та VII, VIII другої секції електровоза та послідовно з'єднаних з ними секцій пускових резисторів контактним елементом 33-0 групового перемикача (рисунок 2.3, в).

а



б



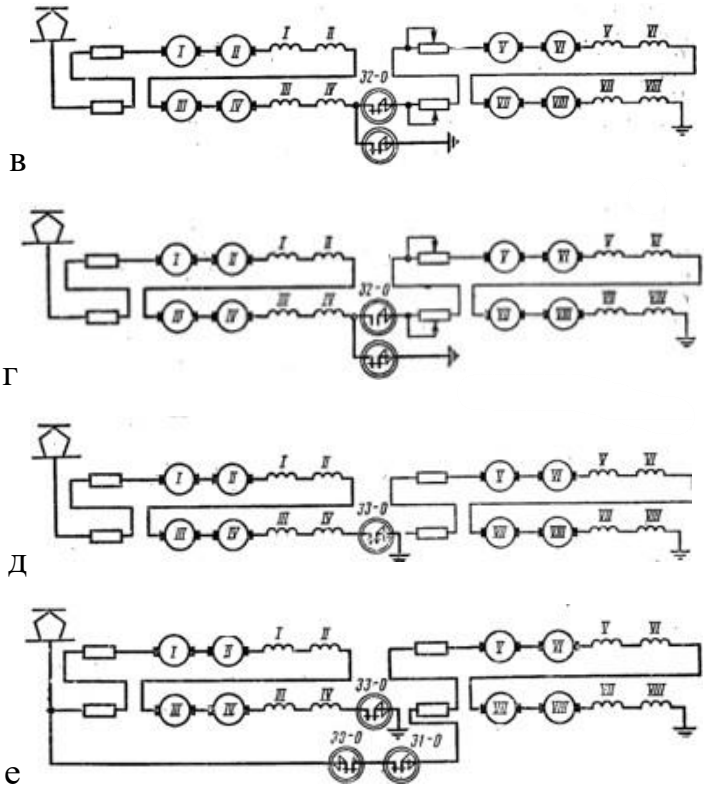


Рис. 3.3 – Схеми перемикання тягових двигунів восьмивісного електровоза з послідовного на послідовно-паралельне з'єднання: а – послідовне з'єднання; б, в, г, д, е – відповідно 1, 2, 3, 4 і 5-та перехідні позиції

Тягові електродвигуни першої секції залишаються в роботі, і через їхні обмотки на «землю» замикається струм, не проходячи через обмотки тягових електродвигунів другої секції електровоза. У силовому ланцюзі тягових електродвигунів другої секції електровоза введенням секцій пускових резисторів зменшується генераторний струм, а відповідно, і гальмівний момент.

На третій перехідній позиції силовий ланцюг тягових електродвигунів V–VIII відключається від ланцюга тягових електродвигунів першої секції електровоза контактором групового перемикача 32-0 (рис. 3.3, г).

На четвертій перехідній позиції в ланцюг тягових електродвигунів V–VIII додається частина секцій пускових резисторів, щоб запобігти миттєвому збільшенню сили тяги на 1-й позиції послідовно-паралельного з'єднання під час їхнього включення (рис. 3.3, д).

На п'ятій перехідній позиції, наприкінці переходу, відключені тягові електродвигуни V–VIII з'єднуються контакторами 30-0 і 31-0 з контактною мережею. Стрибок струму буде обмежено, оскільки разом із ними підключаються пускові резистори. Тягові електродвигуни формують два індивідуальні автономні ланцюги (рис. 3.3, е) [6].

Отримані під час моделювання графіки представлені на рисунках 3.4, 3.5, 3.6, 3.7.

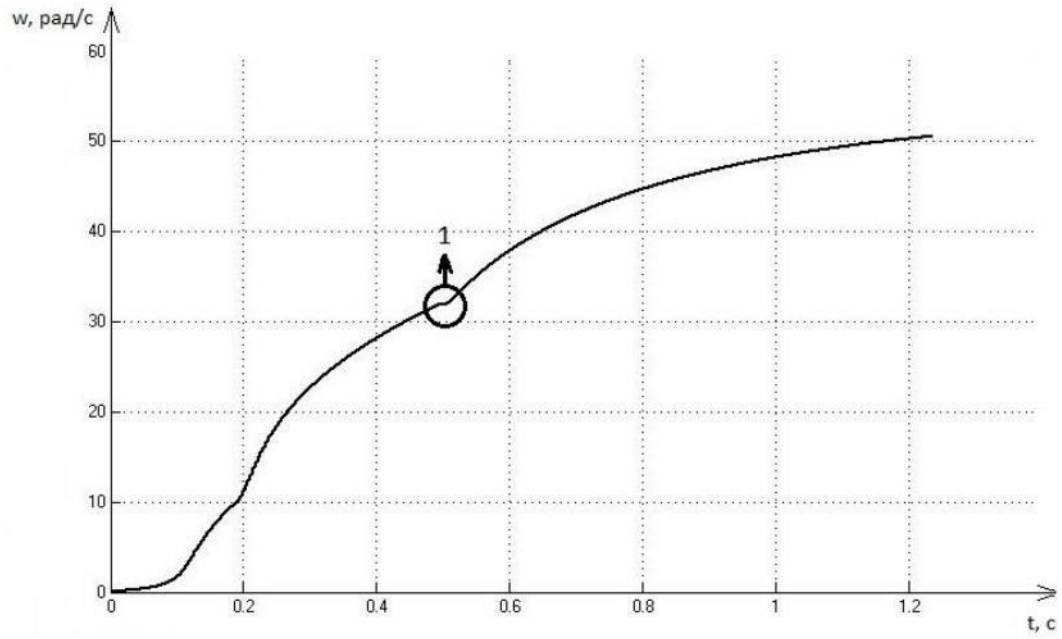


Рис. 3.4 – Графік залежності швидкості тягового електродвигуна постійного струму від часу

На рисунку 3.5 представлено графік залежності швидкості обертання якоря двигуна від часу моделювання. Двигун розганяється до певної швидкості (точка 1), після чого відбувається перехід із послідовного на послідовно-паралельне з’єднання тягових електродвигунів. У результаті цього на клемах двигунів підвищується напруга, що призводить до збільшення швидкості обертання якоря двигуна.

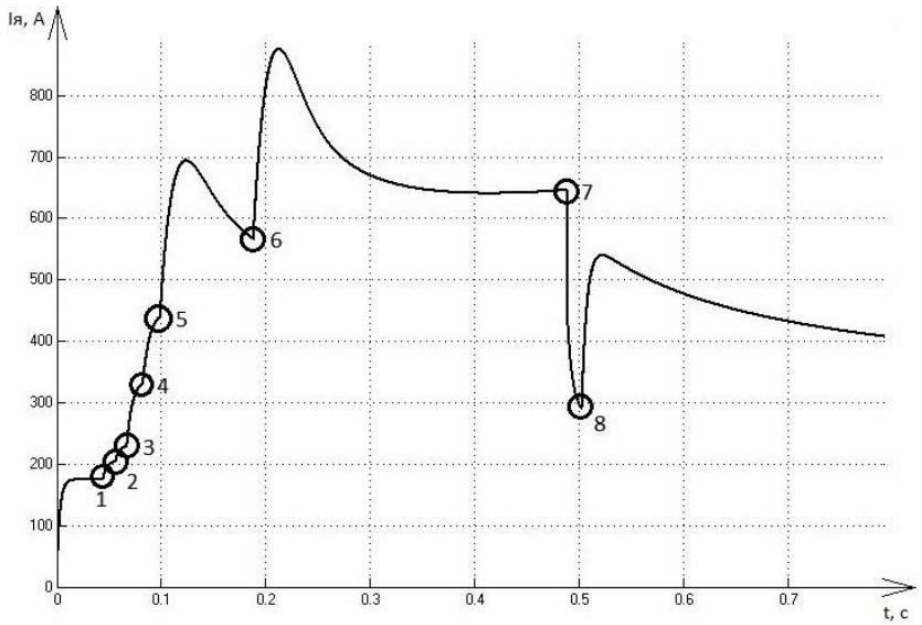


Рис. 3.5 – Графік залежності струму якоря від часу

На рисунку 3.5 представлено графік залежності струму якоря від часу моделювання. У точках 1–6 відбувається відключення пускових резисторів, необхідних для обмеження стрибків струму під час пуску двигуна. У точці 7 здійснюється підключення першої секції електровоза на землю, унаслідок чого відбувається стрибок струму якоря. У точці 8 відбувається відключення другої секції тягових електродвигунів від першої секції та замикання другої секції на землю.

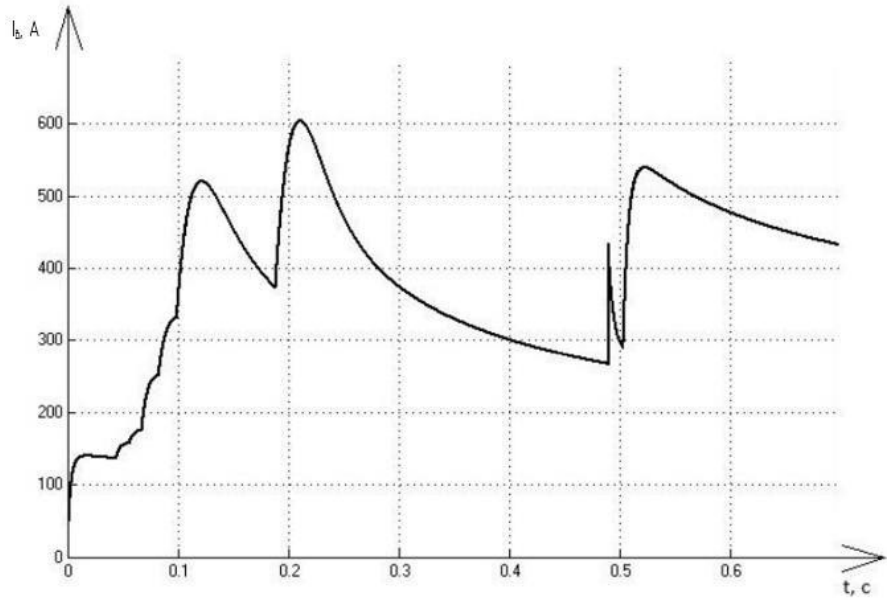


Рис. 3.6 – Графік залежності струму збудження від часу моделювання

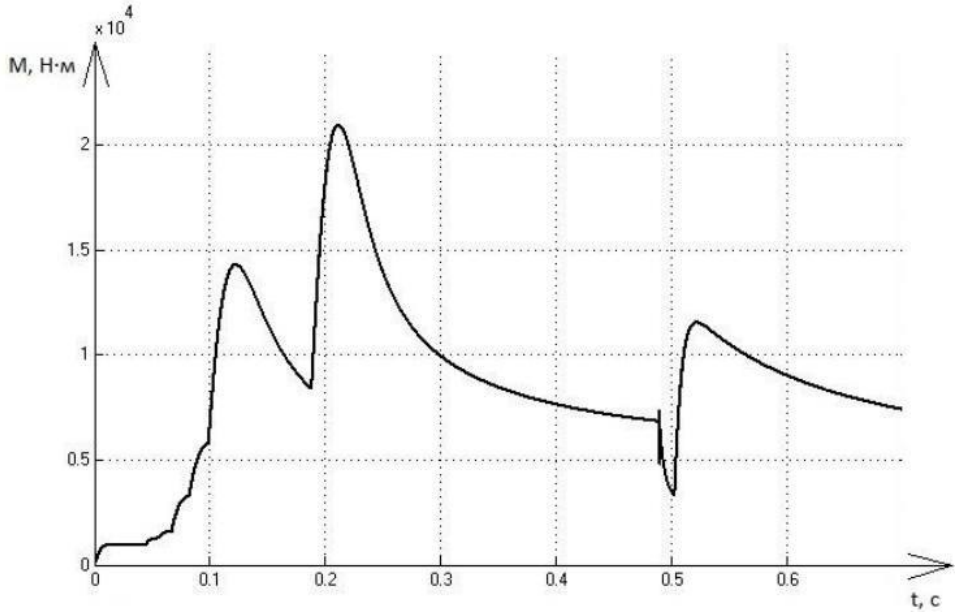


Рис. 3.7 – Графік залежності моменту на валу від часу моделювання

Графіки 3.5, 3.6 і 3.7 мають ідентичну форму, оскільки електродвигуни мають послідовне збудження.

Після досягнення швидкості обертання якоря двигуна понад 50 рад/с необхідно перевести двигуни на паралельне з’єднання для зменшення струму в ланцюзі та подальшого збільшення швидкості.

3.1.2 Перехід з послідовно-паралельного на паралельне з'єднання тягових електродвигунів

На електровозах ВЛ10, ВЛ10^{У} під час переходу з послідовно-паралельного з’єднання на паралельне застосовується шунтування частини тягових двигунів перехідними резисторами.

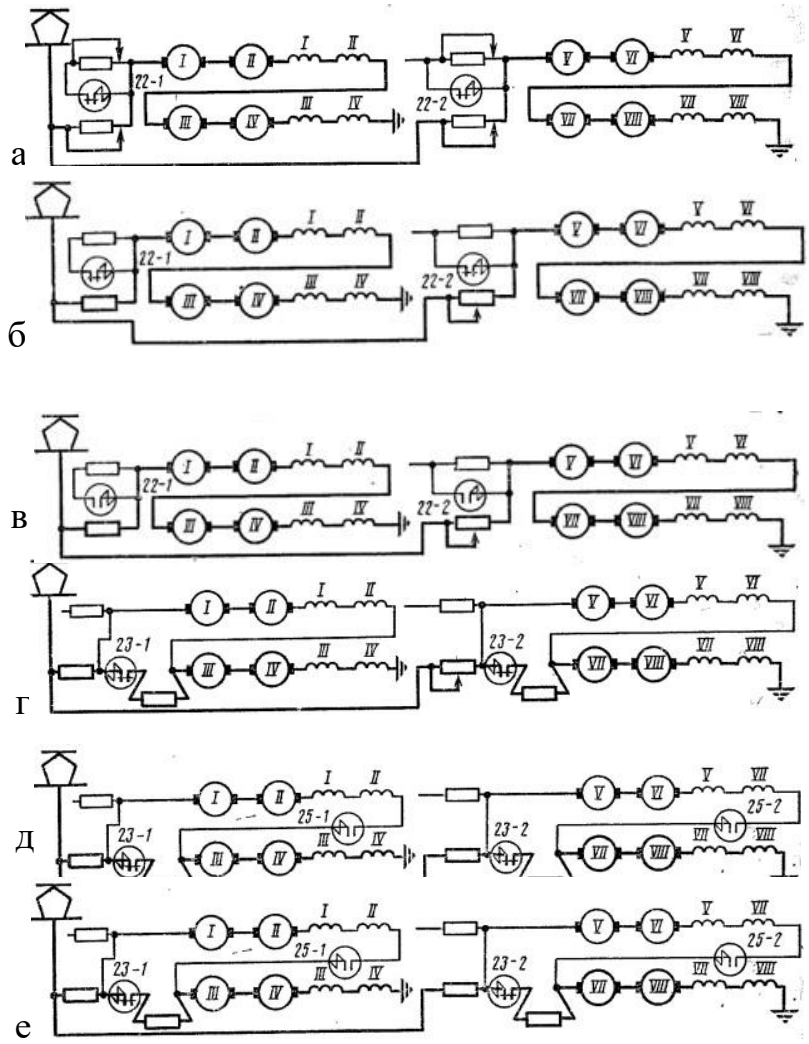


Рис. 3.8 – Схема перемикання тягових восьмивісних двигунів електровоза з послідовно-паралельного на паралельне з'єднання: а – послідовне з'єднання; б, в, г, д, е – відповідно 1, 2, 3, 4 і 5-та перехідні позиції

У силовому колі тягових двигунів на ходовій позиції послідовно-паралельного з’єднання всі пускові резистори виведені (рис. 3.8, а).

На першій перехідній позиції до кола тягових двигунів вводиться частина пускових резисторів (рис. 3.8, б).

На другій перехідній позиції вимкненням контакторних елементів 22-1 і 22-2 групових перемикачів готуються окремі групи резисторів для паралельного з’єднання двигунів (рис. 3.8, в).

Після включення контакторних елементів 23–1 і 23–2 на третій перехідній позиції, тягові електродвигуни I, II і V, VI шунтуються перехідними резисторами (рис. 3.8, г). При цьому через зашунтовані тягові електродвигуни може протікати частина струму з контактної мережі, якщо протидія ЕРС в зашунтованих тягових електродвигунах не велика (при низькій частоті обертання тягових двигунів). Через перехідні резистори і тягові електродвигуни III, IV, VII, VIII буде протікати більша частина струму. У цьому випадку зашунтовані тягові електродвигуни розвиватимуть певну силу тяги. У зашунтованих тягових електродвигунах I, II і V, VI при значній швидкості руху наводиться велика протидія ЕРС, і в такому разі в їх ланцюгах з'явиться генераторний струм, що створює невеликий гальмівний момент. Оскільки їх магнітна система швидко розмагнічується, то протікання цього струму швидко припиняється.

Тягові електродвигуни I, II і V, VI на четвертій перехідній позиції відключаються контакторними елементами 25-1 і 25-2 (рис. 3.8, д).

На п’ятій перехідній позиції тягові електродвигуни I, II і V, VI з’єднуються контакторами 26-1, 27-1 і 26-2, 27-2 з «землею», а групи пускових резисторів контакторами 1-2 і 2-1 до контактної мережі. Усі тягові електродвигуни утворюють чотири паралельні ланцюги, в кожному з яких включено по два електродвигуни (рис. 3.9, е) [6].

Отримані графіки швидкості обертання якоря, струму якоря, струму збудження і моменту на валу представлені на рисунках 2.9, 2.10, 2.11, 2.12.

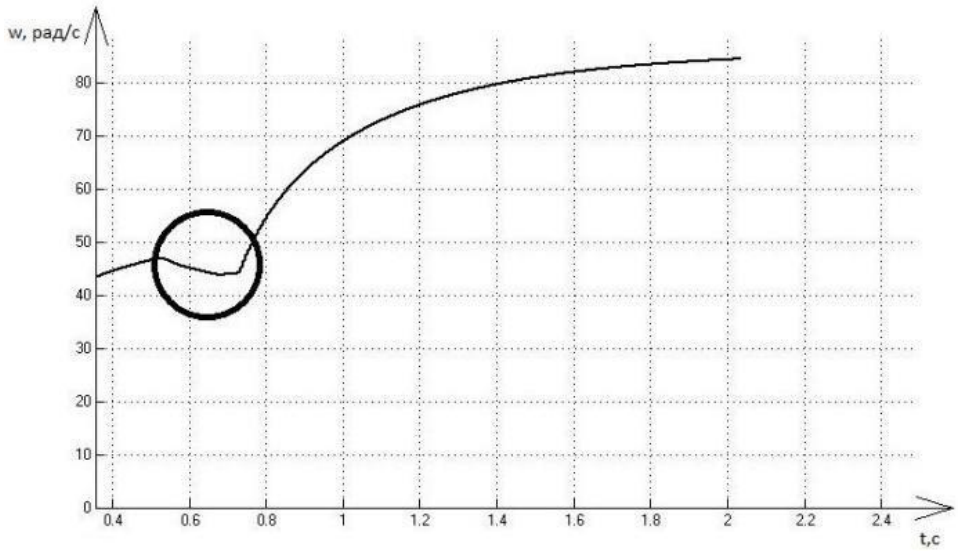


Рис. 3.9 – Графік залежності швидкості тягового електродвигуна постійного струму від часу

На рисунку 3.9 колом позначено момент переходу з послідовно-паралельного на паралельне з'єднання тягових електродвигунів. У результаті переходу електровоза на паралельне з'єднання, напруга на клемах двигунів і, відповідно, швидкість обертання якоря збільшилися.

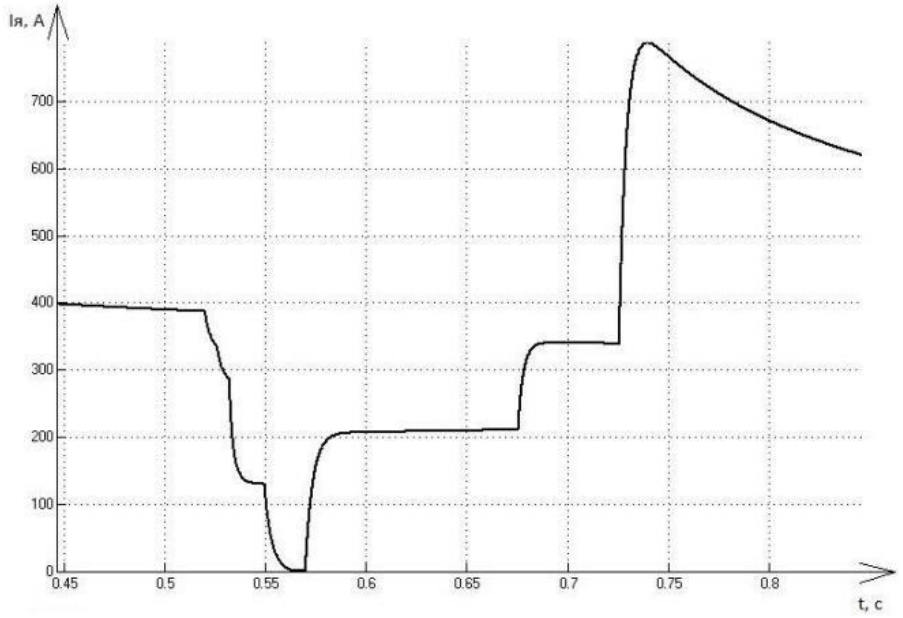


Рис. 3.10 – Графік залежності струму якоря від часу

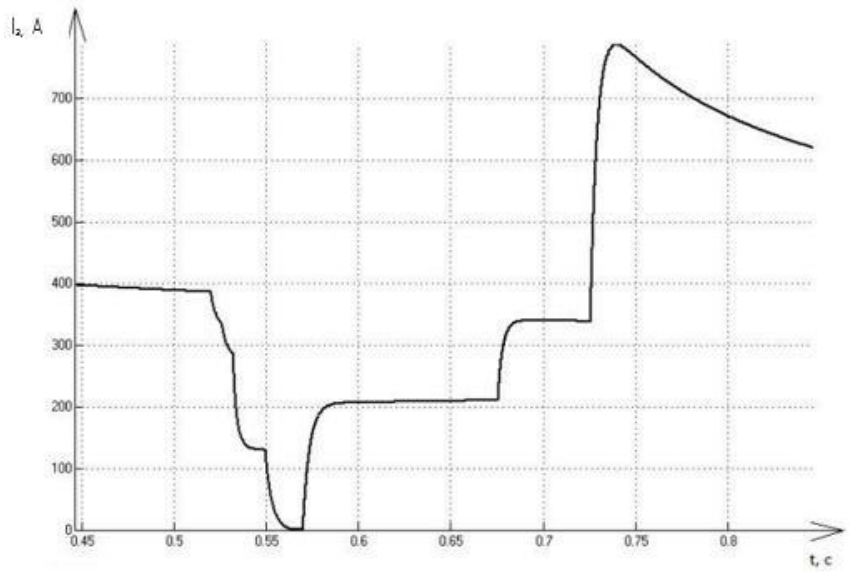


Рис. 3.11 – Графік залежності струму збудження від часу

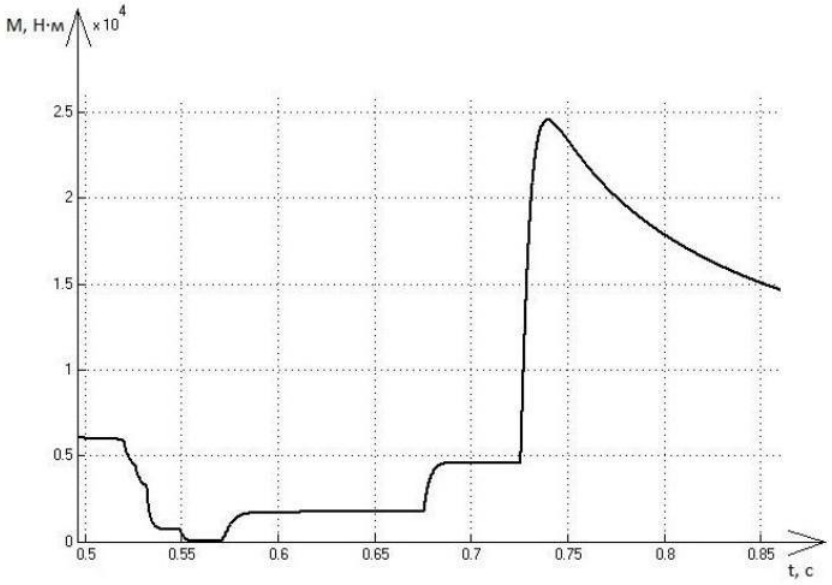


Рис. 3.12 – Графік залежності моменту на валу від часу

Графіки 17, 18 і 19 мають ідентичну форму, оскільки електродвигуни мають послідовне збудження.

При моделюванні ланцюга були зроблені наступні припущення:

– внутрішній опір контакторів прийнятий рівним 0;

– активні та індуктивні опори двигуна постійного струму розраховані та мають наближене значення;

– загальний активний і індуктивний опір ланцюга також є наближеним;

– усі процеси обмежені швидкістю моделювання програмного продукту Matlab Simulink;

– джерело напруги та інші елементи є ідеальними.

3.2 Моделювання перехідних процесів швидкодіючого контактора БК-78Т

На рисунку 2.13 представлена схема захисту тягових електродвигунів від коротких замикань в рекуперативному режимі. Вона складається з наступних елементів: джерело напруги (мережа), чотири тягових електродвигуни ТЛ2К1 (М1, М2, М3, М4), ОВГ (обмотки збудження генератора-перетворювача АМ-Г), $R_З$ (резистори 2 Ом), $R_{СТ}$ (стабілізуючі резистори), АМ-Г (генератор-перетворювач НБ-436В), Н2-НН2, Н3-НН3 (обмотки збудження тягових електродвигунів ТЛ2К1), контакти швидкодіючого контактора БК78Т (Кб45) і котушки (Кб45) з обмежувальним резистором (R9, R10) контактора.

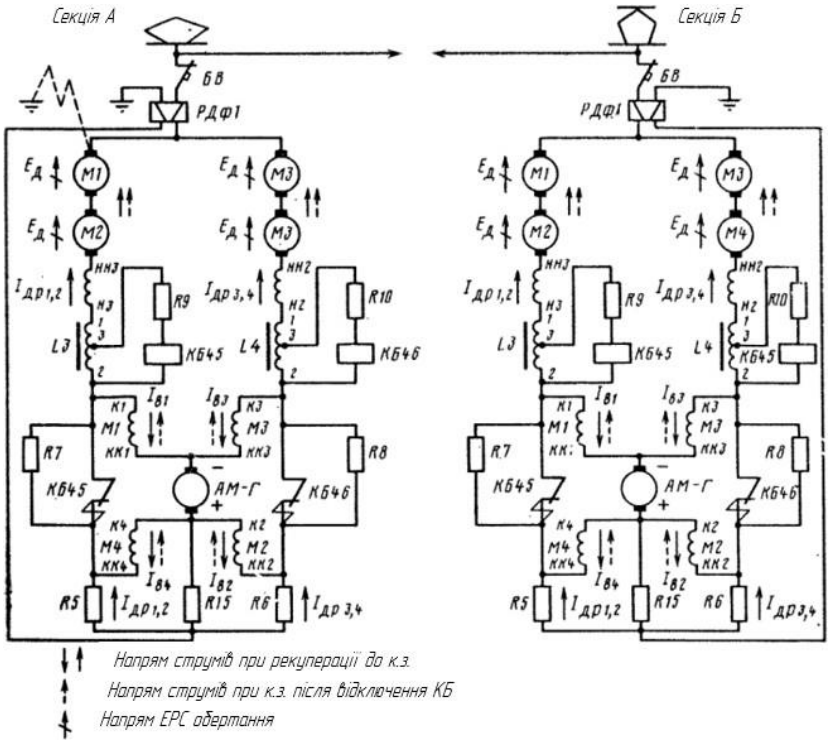


Рис. 3.13 – Схема захисту тягових електродвигунів від струмів короткого замикання в рекуперативному режимі на паралельному з'єднанні

Генератор-перетворювач АМ-Г (НБ–436В) необхідний для живлення обмоток збудження тягових електродвигунів при рекуперативному гальмуванні. У машинному відділенні кожної секції електровоза встановлений перетворювач. Параметри перетворювача наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 3.1 – Технічні параметри генератора-перетворювача

Параметр	Двигун	Генератор
Напруга на затискачах, В	3300	38
Якірний струм, А	15	800
Потужність, кВт	40,7	30,4
Частота обертання, об/хв	1290	1290
Опір демпферного резистора, Ом	10	-
ККД без демпферного резистора	0,857	0,755
Маса, кг	1900	

Перетворювач НБ–436В складається з генератора постійного струму та високовольтного електродвигуна, виконаних на одному валу, який є однокорпусним двомашинним агрегатом.

Електродвигун перетворювача має змішане збудження. Генератор перетворювача має незалежне збудження. Котушки послідовного збудження, які обтікають струмом рекуперації тягових електродвигунів, забезпечують необхідні характеристики генератора для стабільної роботи ланцюга. Вони з'єднані по три послідовно в дві паралельні ланцюги.

Швидкодіючий контактор БК-78Т розриває ланцюг при досягненні в силовій або допоміжній ланцюгу струмів короткого замикання, що перевищують струм 2500^{+100}_{-200} А.

Відключаючі котушки контактора БК-78Т через обмежувальні резистори включаються паралельно одній котушці індуктивних шунтів. Контактори

захищають ланцюг при напрузі на електродвигунах до 4000 В і початковій швидкості наростання струму до 350 А/мс.

Індуктивні шунти необхідні для того, щоб запобігти проходженню великих струмів через якорі електродвигунів при короткочасних перервах струму (відрив струмоприймача від контактної мережі, часткове зняття навантаження з тягових підстанцій, к.з. і т.д.) як у тяговому, так і в рекуперативному режимі. Індуктивні шунти підключаються в ланцюг ослаблення збудження тягових електродвигунів. Їх технічні параметри наступні:

- номінальна напруга: 3000 В;
- струм тривалого режиму: 310 А;
- струм годинного режиму: 410 А;
- струм рекуперативного режиму: 400 А;
- індуктивність при номінальному струмі: 16 мГн;
- індуктивність при повному насиченні сердечника: 4,5 мГн;
- сполучення котушок: послідовне;
- маса: 580 кг.

На рисунку 3.14 представлений загальний вигляд і габаритні розміри індуктивного шунта ІШ-2К.

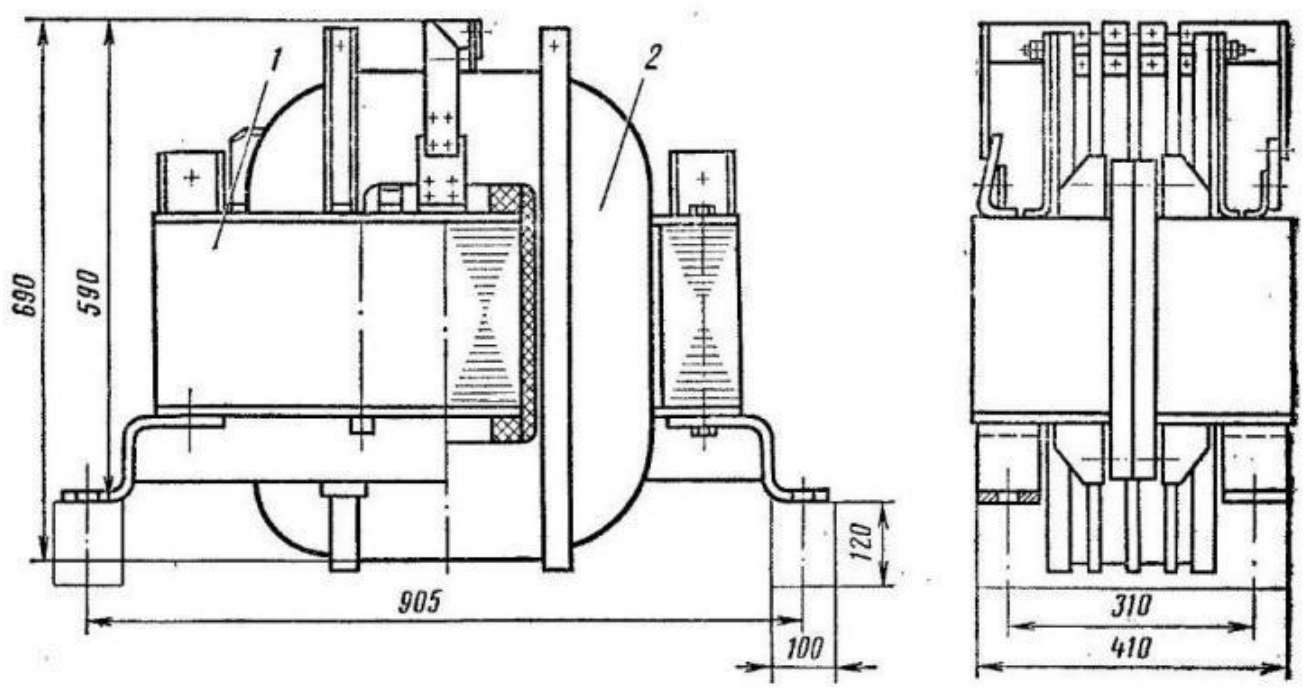


Рис. 3.14 – Індуктивний шунт ИШ-2К

При збільшенні струму короткого замикання в силовій ланцюзі тягових електродвигунів миттєво збільшується напруга на індуктивних шунтах, і в відключаючій котушці (КБ) швидкодіючого контактора протікає струм, який перевищує його уставку. В результаті розмикається силовий контакт, і в відключеному положенні він утримується засувкою.

При відключенні КБ розмикається ланцюг живлення обмоток збудження тягових електродвигунів від генератора-перетворювача АМ-Г. Одночасно обмотки збудження вводяться в ланцюг обмоток якорів тягових електродвигунів. Це викликає різке зміщення напрямку струму в обмотках збудження, і в них з'являється ЕРС самоіндукції, що має узгоджене напрямок з попереднім напрямком струму і зустрічне відносно ЕРС обертання тягових електродвигунів. У результаті зміни напрямку струму в обмотках збудження починається прискорене розмагнічування магнітної системи тягових електродвигунів.

Зі зменшенням магнітного потоку одночасно спадає до нуля ЕРС обертання та струм короткого замикання.

Для обмеження швидкості наростання струму короткого замикання в ланцюг якорів електродвигунів в рекуперативному режимі вводиться додаткове індуктивне навантаження, тобто індуктивні шунти, які перемикаються в якорний ланцюг за допомогою гальмівного перемикача.

На рисунку 3.15 представлена схема силової ланцюга при рекуперативному режимі гальмування на паралельному з'єднанні обмоток якорів тягових двигунів при русі вперед електровозів ВЛ10 та ВЛ10^{У}.

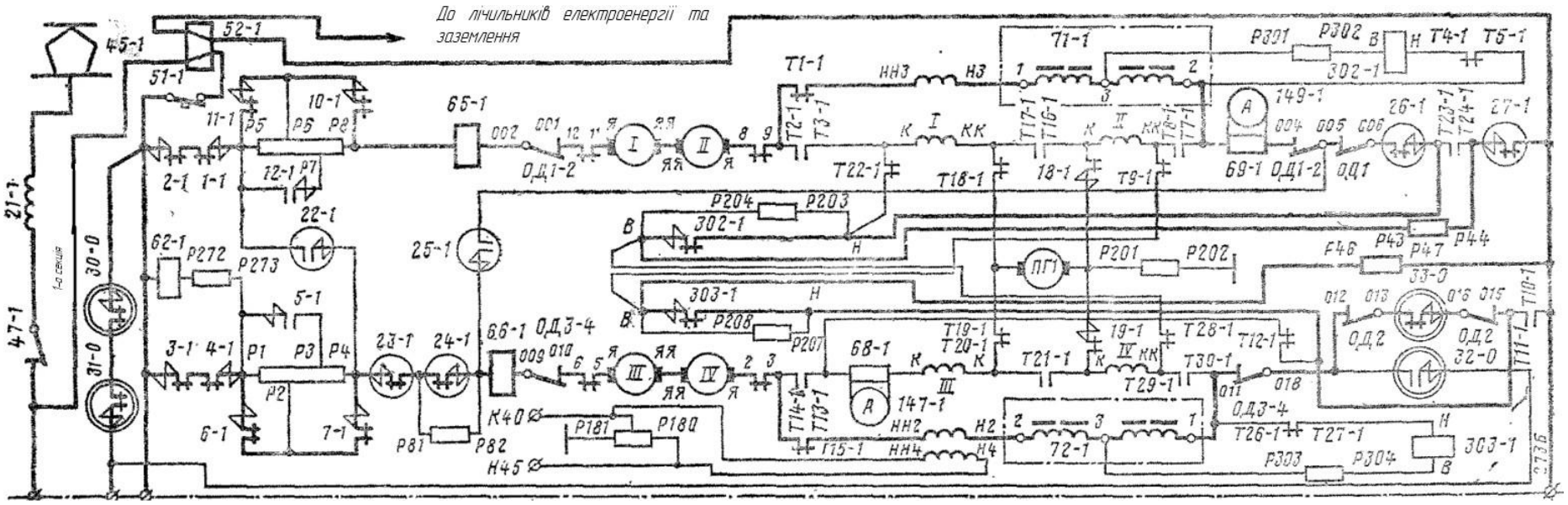


Рис. 3.15 – Схема силового ланцюга при рекуперативному режимі гальмування на паралельному з'єднанні обмоток якорів тягових двигунів під час руху вперед електровозів ВЛ10 та ВЛ10^{У}

Рекуперативний режим досягається завдяки більшій електрорушійній силі двигунів порівняно з напругою мережі, приблизно на 100 В.

Залежно від швидкості руху електровоза, рекуперативний режим може бути реалізований як на послідовному, послідовно-паралельному, так і на паралельному з'єднанні. У цій дисертації рекуперативний режим реалізовано на паралельному з'єднанні тягових двигунів, оскільки він вважається найбільш небезпечним.

На рисунку 3.16 представлено зібрану у Matlab Simulink схему силової схеми при рекуперативному гальмуванні на паралельному з'єднанні обмоток якорів тягових двигунів під час руху електровозів ВЛ10 і ВЛ10^{У} вперед.

Рекуперативне гальмування на електровозі зазвичай застосовується при русі поїзда з постійною швидкістю на спусках. Однак його також можна використовувати для зниження швидкості перед зупинкою, що є додатковим резервом економії електроенергії.

Залежно від швидкості руху, рекуперативне гальмування може застосовуватися на всіх трьох з'єднаннях тягових двигунів: у діапазоні швидкостей від 13 до 25 км/год – на послідовному; від 26 до 52 км/год – на послідовно-паралельному; від 52 до 100 км/год – на паралельному.

Щоб досягти максимальних гальмівних зусиль при напрузі у контактній мережі близько 3300 В, слід підтримувати такі швидкості:

- на послідовному з'єднанні двигунів – 14–17 км/год;
- на послідовно-паралельному – 27–37 км/год;
- на паралельному – 56–64 км/год.

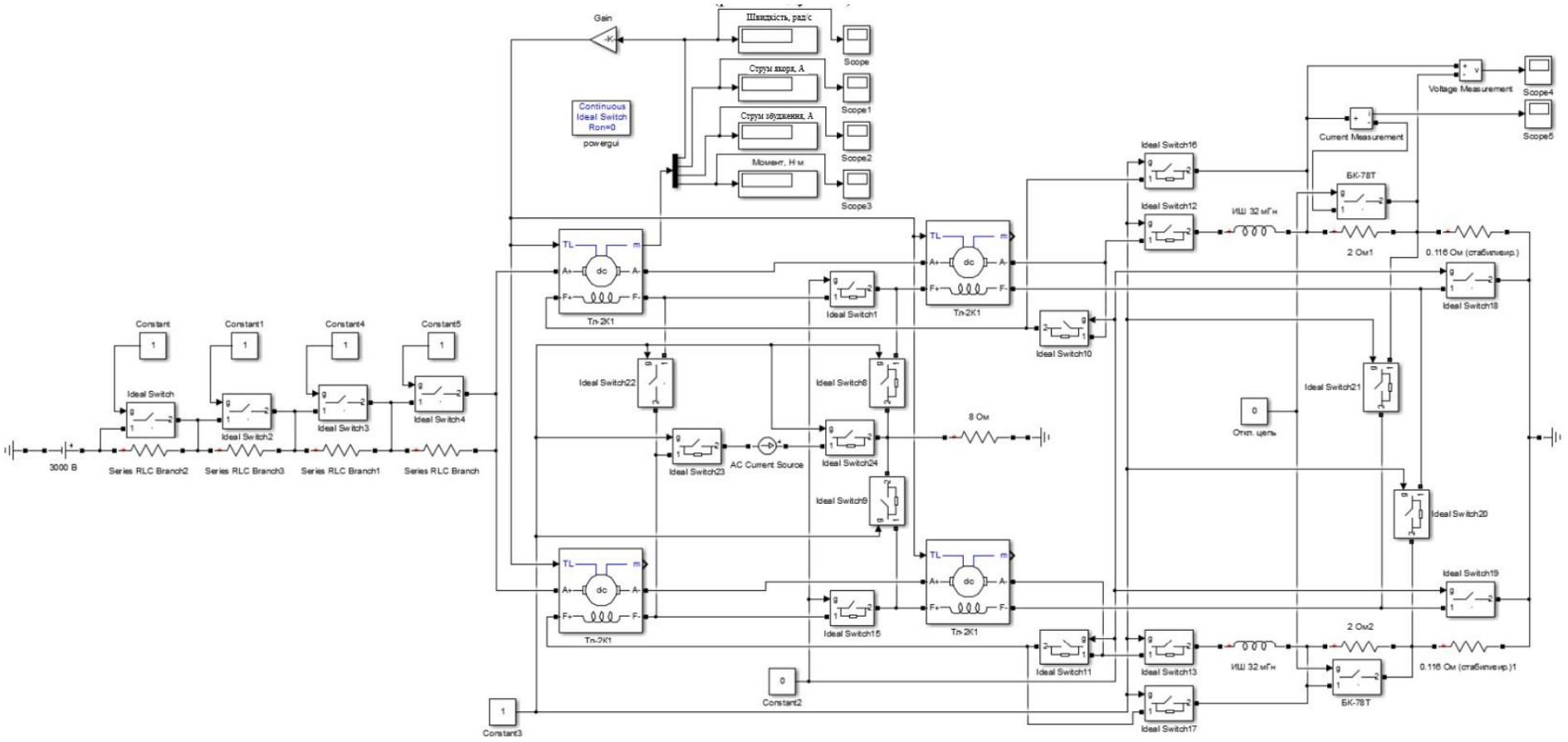


Рис. 3.16 – Електрична схема РКСУ електровоза в режимі рекуперації у програмному продукті Matlab Simulink

Перехід на режим рекуперативного гальмування включає наступні дії:

1. Увімкнути двигуни вентиляторів на високу частоту обертання.

2. Натисканням кнопки "Збудники" запустити перетворювачі.

3. Поставити реверсивно-селективну ручку контролера на обране положення П, СП або С.

4. Перемістити гальмівну ручку на 2-гу позицію, потім головну – на 1-шу позицію. При нормальній роботі ланцюга амперметр збудження повинен показувати наявність струму в обмотках збудження тягових двигунів (180–200 А).

5. Переміщуючи гальмівну ручку контролера в бік 15-ї позиції, поступово збільшити струм збудження тягових двигунів до моменту ввімкнення лінійних контакторів, що характеризується появою струму в ланцюзі якорів двигунів (близько 100 А).

6. Подальше регулювання гальмівного зусилля та швидкості здійснюється за допомогою гальмівної ручки контролера, при цьому головна ручка залишається на 1-й позиції.

Для забезпечення нормальних умов комутації тягових двигунів необхідно підтримувати такі співвідношення між струмами якоря та збудження:

Таблиця 3.2 – Співвідношення струмів якоря та збудження

Параметр	Значення				
Струм якоря, А	500	450	400	350	300
Струм збудження, не менше, А	180	170	150	130	110

Щоб уникнути виникнення юза, струм якоря на С та СП з’єднаннях тягових двигунів не повинен перевищувати 500 А, а на П з’єднанні – 450 А.

На рисунку 2.17 представлено частину схеми в програмному середовищі Matlab Simulink, де зображено блок Ideal Switch, що виконує функцію швидкодіючого контактора БК-78Т.

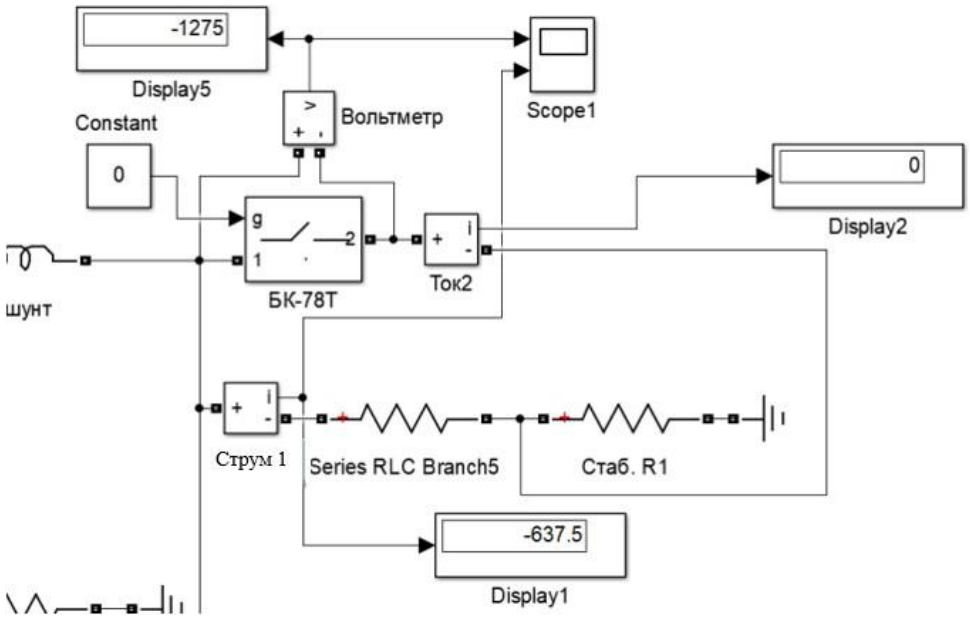


Рис. 3.17 – Схема з БК-78Т

На рисунку 3.16 представлено графік залежності напруги на контакторі та струму на паралельному резисторі в момент комутації швидкодіючим контактором БК-78Т силового кола, отриманий під час моделювання рекуперативного режиму роботи тягових електродвигунів у програмному середовищі Matlab Simulink.

Під час комутації кола виділилася певна потужність і енергія.

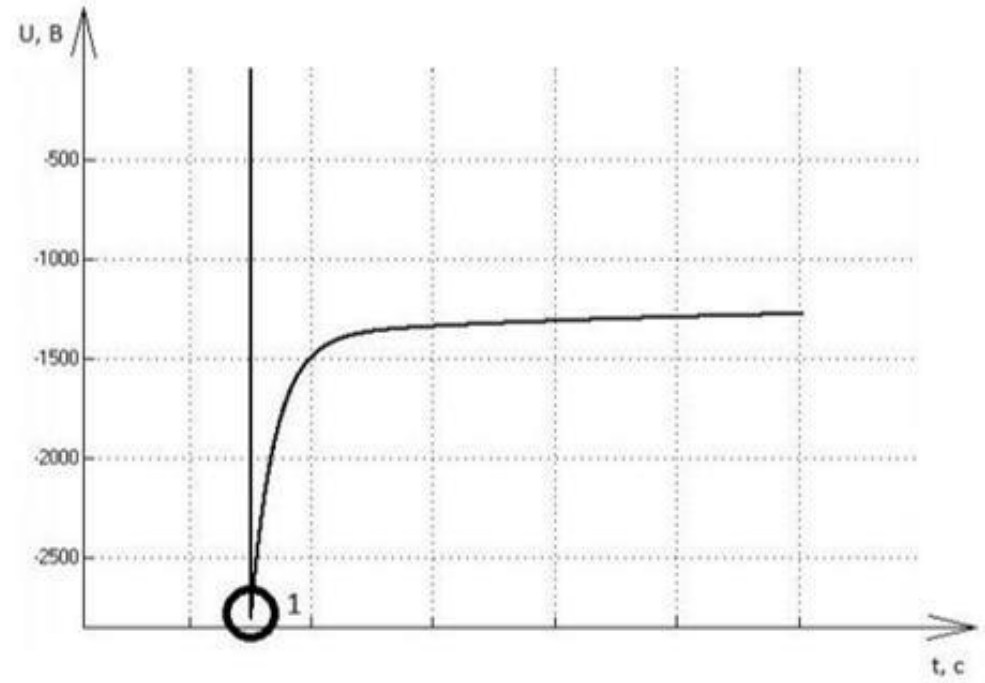
Миттєва електрична потужність $p(t)$, що виділяється на ділянці електричного кола, є добутком миттєвих значень напруги $u(t)$ і сили струму $i(t)$ на цій ділянці:

$$p(t)=u(t)\cdot i(t) \qquad (3.1)$$

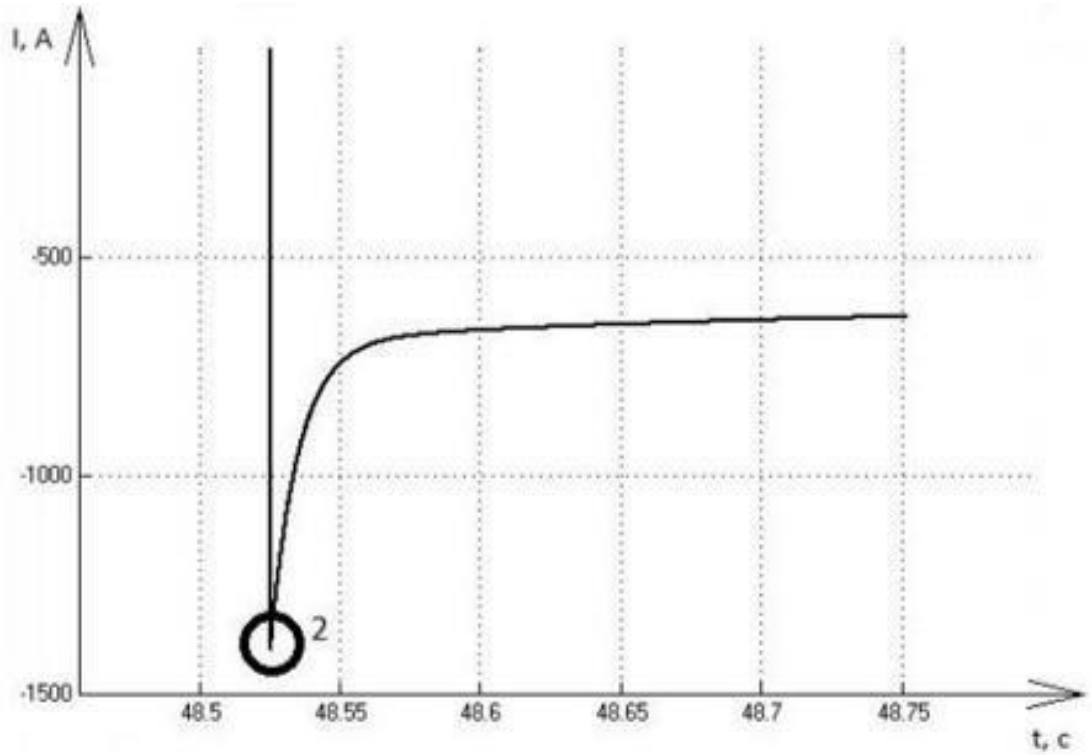
Максимальні значення струму та напруги представлені на рисунку 2.18 та позначені цифрами 1 і 2.

Розрахуємо миттєву потужність за формулою (3.1):

$$2800 \cdot 1400 = 3920 \text{ кВт}$$



а



б

Рис. 3.18 – Графік залежності напруги та струму в момент комутації ланцюги швидкодіючим контактором: а – напруга; б – струм

Енергія, що витрачається електричним струмом у колі, дорівнює добутку потужності на час, протягом якого проходить струм, кДж:

$$W = P(t) \cdot t \qquad (3.2)$$

Оскільки в різні періоди часу виділялася різна потужність, для визначення, яка енергія виділилася під час комутації, графік розбивається на дрібні ділянки, і розраховується енергія, виділена на кожній ділянці. Сумарна енергія дорівнює сумі енергії всіх ділянок.

На рисунку 3 .19 представлено графік із розбиттям на дрібні ділянки.

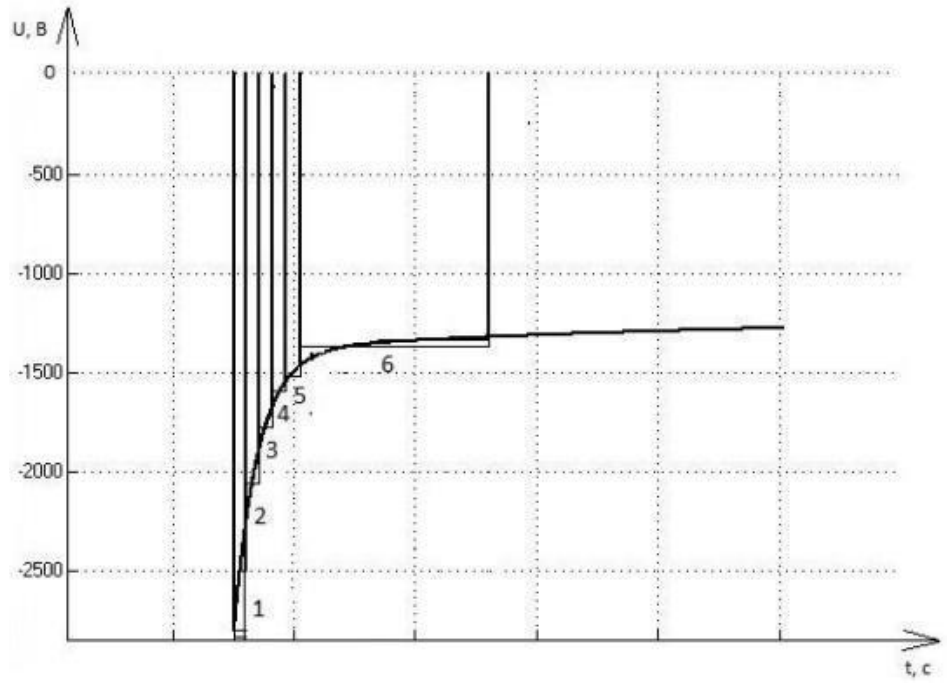
Розрахуємо енергію на першій ділянці за формулою (3.2):

$$W = 3920 \cdot 0{,}01 = 39{,}2 \text{ кДж}$$

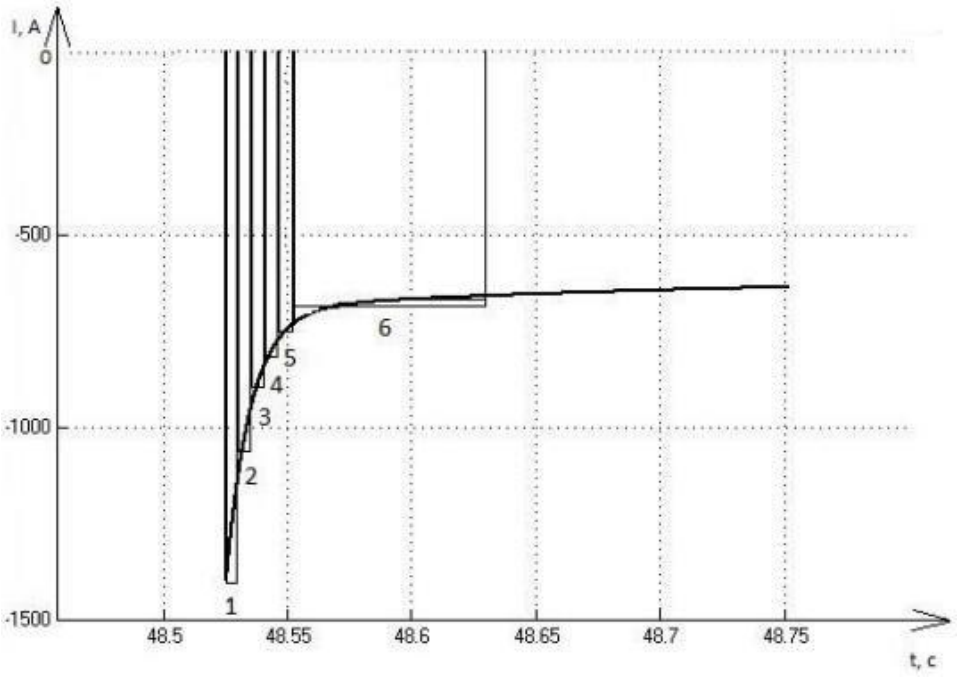
Розраховуємо сумарну енергію, виділену на всіх ділянках:

$$\sum_{1}^{i} W = 39,2 + 23,1 + 14,9 + 12,8 + 11,2 + 68,6 = 169,8 \text{ кДж}$$

Графік залежності напруги та струму в момент комутації ланцюги швидкодіючим контактором (розбитий на ділянки) представлено на рис.3.19.



а



б

Рис. 3.19 – Графік залежності напруги та струму в момент комутації ланцюги швидкодіючим контактором (розбитий на ділянки): а – напруга; б – струм

4 Визначення економічного ефекту від модернізації

4.1 Коротка характеристика запропонованого технічного рішення

В економічному розділі визначено економічний ефект від модернізації тягового електропривода двохсекційного вантажного електровоза постійного струму ВЛ10 шляхом впровадження асинхронних тягових електродвигунів зі статичним перетворювачем та асинхронними тяговими електродвигунами.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики двигунів базового та модернізованого електровозу

Параметр	Базовий	Модернізований
Тип ТЕД	ТЛ-2К	ДТА-1200А (новий двигун)
Годинна потужність електровозу	5100 кВт	6150 кВт
Кількість ТЕД	8	6
Потужність одного ТЕД	900 кВт	1100/1200 кВт
Рід струму ТЕД	Постійний	Змінний
Частота обертів у годинному режимі	1215 об/хв	1766 об/хв
Струм у годинному режимі при номінальному збудженні	1190 А	1190 А
Коефіцієнт корисної дії ТЕД	0,93	0,96

Запропоновано замінити базові тягові двигуни постійного струму типу 5AL4442пР на асинхронні двигуни DTA-1200A фірми Siemens з живленням від інверторів напруги. Технічні характеристики базового та запропонованого двигунів представлені у таблиці 5.1.

В результаті модернізації електровозу економічний ефект очікується від:

- скорочення витрат на електроенергію;

- скорочення витрат на поточні витрати при ремонті;

- підвищення надійності модернізованих електровозів, в наслідок чого збільшиться міжремонтні періоди і як наслідок зменшиться витрати на ремонт;

- підвищення якості обслуговування пасажирських перевезень.

4.2 Методики розрахунку економічного ефекту

Сумарний за роками розрахункового періоду економічний ефект E_T визначається як перевищення сумарної вартісної оцінки результатів інноваційного проекту за розрахунковий період P_T над вартісною оцінкою сукупних витрат на здійснення інноваційного проекту за розрахунковий період $З_T$:

$$\mathrm{E_T} = \mathrm{P_T} - \mathrm{З_T}, \tag{4.1}$$

Також може бути визначено за виразом

$$\mathrm{E_T} = \sum_{t=t_H}^{tK} (\mathrm{P}_t - \mathrm{З}_t) \cdot \alpha_t, \tag{4.2}$$

де E_T– економічний ефект у t-му році розрахункового періоду;

P_T – вартісна оцінка результатів заходу в t-му році розрахункового періоду, грн;

$З_T$ – вартісна оцінка витрат усіх ресурсів у t-му році розрахункового періоду, грн;

A_t – коефіцієнт приведення результатів, витрат, економічного ефекту різних років до розрахункового року;

$t_н$ - початковий рік розрахункового періоду;

$t_к$ - кінцевий рік розрахункового періоду.

Економічний ефект заходу НТП визначається за весь розрахунковий період, включаючи розробку, виробництво і використання нової техніки, тобто є інтегральним ефектом.

Приведення експлуатаційних витрат всіх років періоду реалізації до розрахункового року здійснюється шляхом множення їхньої величини за кожний рік на коефіцієнт дисконтування α_t , що визначається за формулою

$$\alpha_t = (1+\mathrm{E_н})^{tp-1}, \qquad (4.3)$$

де $E_н$ – норматив дисконту різночасових витрат і результатів, $E_н$=0,1;

t_p – розрахунковий рік;

t – рік, витрати і результати якого приводяться до розрахункового року.

4.3 Розрахунок вартісної оцінки витрат на модернізацію

4.3.1 Розрахунок капітальних витрат

Капітальні витрати на модернізацію електровоза ВЛ10:

$$K_t = k_{\text{одн}} + B_{\text{м/д}} + B_{\text{транс}}, \qquad (4.4)$$

де $K_{одн}$ – витрати на придбання восьми інверторів напруги фірми SIEMENS та восьми асинхронних ТЕД ДТА-1200А.

$B_{м/д}$ – витрати на демонтаж базових та монтаж нових ТЕД, грн

$B_{транс}$– витрати транспортування нового обладнання до підприємства, яке здійснює модернізацію, грн.

У таблиці 4.2 приведено перелік обладнання, яке буде демонтовано.

Таблиця 4.2 – Перелік демонтованого обладнання.

Обладнання	Тип	Кількість
Перетворювальна установка	РКСУ	2
ТЕД постійного струму	5AL4442пР	8

Вартість одного інвертора SIEMENS SIBAC E23-45-1DC-2ST дорівнює 53000 євро, тобто 2 238 500 грн (при курсі 1 євро =4 4,50 грн). Витрати на транспортування тягових інверторів складають 900 євро, що приблизно дорівнює 40 050 грн.

Вартість одного асинхронного ТЕД типу ДТА-1200А становить 698570 грн. Витрати на транспортування тягових асинхронних двигунів складатиме 1750 євро

В таблиці 4.3 приведена вартість силового обладнання, яке буде встановлюватися на електровозі з урахуванням транспортування

Витрати на монтаж та демонтаж складають:

$$В_{МОНТ/ДЕМОНТ} = З_М \cdot m + З_Д \cdot m, \quad (4.5)$$

де m – кількість обладнання (інверторів, транзисторів та асинхронних двигунів);

$З_Д$ – витрати на демонтаж одиниці обладнання, грн;

$З_М$ – витратина монтаж одиниці обладнання, грн.

В таблиці 4.4 приведені витрати на заробітну плату та відрахування на соціальні заходи для демонтажу випрямної установки

Таблиця 4.3 – Вартість силового обладнання, яке встановлюємо на електровозі з урахуванням транспортування

Обладнання	Тип	Кількість	Ціна одиниці, грн	Загальна сума, грн
Тягові інвертори	SIEMENS SIBAC E23-45-1DC-2ST	8	2 238 500	17 908000
Тягові двигуни	ДТА-1200А	8	698570	5588560
Витрати на транспортуванні інверторів				37000
Витрати на транспортування тягових двигунів				40500
Всього				23 574060

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату та відрахування на соціальні заходи для демонтажу випрямної установки

Вид робіт	Кількість працівників	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна плата, грн. (10%)	Відрахування на соціальні заходи , грн. (22%)	Всього, грн.
Демонтаж	2	3	8	61,66	986,56	98,656	238,748	1323,964
Демонтаж	2	5	8	73,57	1177,12	117,712	284,68	1579,512
Всього								2903,476

Розглянемо витрати підприємства на оплату праці працівників та нарахування на заробітну плату, що пов'язані з демонтажем базової моделі з випрямною установкою та двигуном постійного струму та монтажем нової схеми з асинхронним двигуном. Трудові витрати на демонтаж базової РКСК представленні в таблиці 5.5, а монтаж нової схеми та встановлення автономного інвертора напруги представлені в таблиці 5.6.

Сумарна вартість демонтажу базового обладнання та монтажу нового обладнання на електрорухомому складі може бути розрахована за наступною формулою:

$$B_{\text{монт/дмн}} = B_{\text{дмн.випр}} \cdot \eta_{\text{вип}} + B_{\text{дмн.ТЕД}} \cdot \eta_{\text{ТЕД}} + \\ + B_{\text{монт.інв}} \cdot \eta_{\text{інв}} + B_{\text{монт.АД}} \cdot \eta_{\text{АД}} \quad (4.6)$$

де $B_{монт/демонт}$ – сумарна вартість демонтажу базового обладнання та монтажу нового обладнання на електрорухомому складі, грн;

$B_{дмт/випр}$ – витрати на демонтаж випрямляльної установки, грн;

$B_{дмт.ТЕД}$ – витрати на демонтаж тягових двигунів постійного струму,

$n_{ТЕД}$ – кількість тягових двигунів постійного струму, шт.;

$B_{монт.4QS}$ – витрати на монтаж 4QS – випрямлячів, грн;

N_{4QS} – кількість 4QS – випрямлячів, шт.;

$B_{монт.інв}$ – витрати на монтаж тягових інверторів, грн;

$n_{інв}$ – кількість інверторів на одному електрорухомому складі, шт.;

$B_{монт.АД}$ – витрати на монтаж тягових асинхронних двигунів, грн;

$n_{АД}$ – кількість тягових асинхронних двигунів, шт.;

Витрати на заробітну плату та відрахування на соціальні заходи для демонтажу одного двигуна постійного струму представлено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Витрати на заробітну плату та відрахування на соціальні заходи для демонтажу одного двигуна постійного струму

Вид робіт	Кількість працівників	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна плата, грн. (10%)	Відрахування на соціальні заходи , грн. (22%)	Всього, грн.
Демонтаж	2	3	4	61,66	493,28	49,328	119,37	661,978
Демонтаж	2	5	4	73,57	588,56	58,856	142,43	789,846
Всього								1451,824

Таблиця 4.6 – Витрати на заробітну плату та відрахування на соціальні заходи для монтаж, встановлення та підключення одного асинхронного двигуна

Вид робіт	Кількість працівників	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна плата, грн. (10%)	Відрахування на соціальні заходи , грн. (22%)	Всього, грн.
Монтаж	2	3	8	61,66	986,56	98,656	238,748	1323,964
Монтаж	2	5	8	73,57	1177,12	117,712	284,68	1579,512
Всього								2903,476

Таблиця 4.7 – Витрати на заробітну плату та відрахування на соціальні заходи для монтажу та встановлення одного автономного інвертора напруги

Вид робіт	Кількість працівників	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна плата, грн. (10%)	Відрахування на соціальні заходи, грн. (22%)	Всього, грн.
Монтаж	2	3	4	61,66	493,28	49,328	119,24	661,978
Монтаж	2	5	4	73,57	588,56	58,856	142,12	789,846
Всього								1451,824

Таблиця 4.8 – Витрати на заробітну плату та відрахування на соціальні заходи для монтажу системи керування.

Вид робіт	Кількість працівників	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна плата, грн. (10%)	Відрахування на соціальні заходи, грн. (22%)	Всього, грн.
Монтаж	2	3	4	61,66	493,28	49,328	119,24	661,978
Монтаж	2	5	4	73,57	588,56	58,856	142,12	789,846
Всього								1451,824

Підставляємо значення розрахунку витрат на монтаж та демонтаж обладнання на локомотив і отримаємо:

$$В_{монт/демонт} = 2903{,}476 + 1451{,}824 \cdot 8 + 2903{,}476 \cdot 6 + 1451{,}824 \cdot 3 + 1451{,}824 \cdot 2 = 39198{,}044 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.9 – Витрати на комплектуючі вироби для встановлення та підключення автономного інвертора напруги, асинхронного двигуна

Матеріал	Марка	Кількість, шт (м).	Ціна за од., грн	Сума, грн
Силовий кабель, м	АКВВГ 4х2,5	30	12,03	360,9
Сигнальні проводи, м	МГТФ-0,35	50	7,90	395
Кабельні наконечники, компл.	ІЕК	30	10	300
Болти	М64	20	48,7	974
Гайки	М64	20	67,4	1348
Візок вантажний	К-8	2	1770	3540
Усього				6917,9

Таким чином капітальні витрати на придбання обладнання, транспортування та монтаж і демонтаж обладнання на локомотив складуть:

$$K_t = B_{АД} \cdot n_{АД} + B_{інв.} \cdot n_{інв.} + B_{транс.} + B_{монт./демонт.} + B_{компл.}, \qquad (4.7)$$

де $B_{АД}$ – вартість тягових асинхронних двигунів, грн;

$n_{АД}$ – кількість тягових асинхронних двигунів, шт.;

$B_{інв}$ – вартість тягових інверторів, грн;

$n_{інв}$ – кількість тягових інверторів, шт.;

$B_{ф}$ – витрати на монтаж вихідних фільтрів, грн;

$n_{ф}$ – кількість вихідних фільтрів, шт.;

$B_{транс}$ – витрати на транспортування нового обладнання, грн;

$B_{монт./демонт.}$ – витрати на монтаж та демонтаж тягових асинхронних двигунів, грн;

$B_{компл.}$ – вартість комплектуючих виробів, грн;

$$К_т = 23574060 + 39198{,}044 + 6917{,}9 = 23\ 620\ 175{,}944 \text{ грн.}$$

4.4 Розрахунок показників використання

Для розрахунку було обрано електровоз ВЛ10, який приводиться в рух 6-ма тяговими двигунами.

Потяг буде пряцювати на ділянці Харків – Одеса довжиною 280 км.

Програма технічного обслуговування та ремонту локомотивів розраховується виходячи із загального пробігу на лінії обертання локомотивів та встановлених норм пробігу між технічним обслуговуванням та ремонтами за формулами:

$$MS_{\text{р}} = 2 \cdot L \cdot N \cdot 365, \tag{4.8}$$

де L – довжина ділянки обігу локомотива;

N – кількість поїздів на даній ділянці.

$$MS_{\text{р}} = 2 \cdot 280 \cdot 2 \cdot 365 = 408800 \text{ лок км.}$$

Визначимо місячний пробіг електровозів:

$$MS_{\text{м}} = \frac{2 \cdot L \cdot N \cdot 365}{12}, \tag{4.9}$$

$$MS_{\text{м}} = \frac{2 \cdot 280 \cdot 2 \cdot 365}{12} = 34066{,}66 \text{ лок км.}$$

Визначимо добовий пробіг електровозів:

$$MS_{\text{д}} = 2 \cdot L \cdot N, \tag{4.10}$$

$$MS_{\text{д}} = 2 \cdot 280 \cdot 2 = 1120 \text{ лок км.}$$

Середньодобовий пробіг одного локомотива:

$$S_{\text{ср}} = \frac{2 \cdot L \cdot N}{2}, \tag{4.11}$$

$$S_{\text{ср}} = \frac{1120}{2} = 560 \text{ км.}$$

Визначимо експлуатаційні пари локомотивів:

$$M_e = \frac{\sum MS_{\text{р}}}{S_{\text{ср}} \cdot 365}. \tag{4.12}$$

$$M_e = \frac{408800}{560 \cdot 365} = 2 \text{ лок.}$$

Робота електровоза за добу:

$$A_{\text{доб}} = S_{\text{ср}} \cdot Q, \tag{4.13}$$

де Q – маса локомотива брутто, т.

$$A_{\text{доб}} = 560 \cdot 172 = 96320 \text{ т} \square \text{ км брутто.}$$

Визначимо роботу електровозів депо за рік:

$$A_{\text{рік}} = MS_{\text{ср}} \cdot Q, \tag{4.14}$$

$$A_{\text{рік}} = 408800 \cdot 172 = 70313600 \text{ т} \square \text{ км брутто.}$$

При визначенні економічної ефективності модернізації знаходимо лише ту частину витрат, яка змінюється в порівняльних варіантах. В даному випадку при

заміні реостатно-контакторної системи керування ТЕД на систему імпульсного керування асинхронними двигунами витрати на ремонт зменшиться на 10% за рахунок застосування більш надійних в експлуатації безконтактних приладів IGBT модулів та більшої надійності асинхронних тягових двигунів.

$$M_{\text{ПР}-1} = \frac{MS_{\text{ср}}}{L_{\text{ПР}-1}}. \tag{4.15}$$

$$M_{\text{ПР}-1} = \frac{408}{30} = 13 \text{ лок.}$$

$$M_{\text{ПР}-2} = \frac{MS_{\text{ср}}}{L_{\text{ПР}-2}}. \tag{4.16}$$

$$M_{\text{ПР}-2} = \frac{408}{200} = 2 \text{ лок.}$$

$$M_{\text{ПР}-3} = \frac{MS_{\text{ср}}}{L_{\text{ПР}-3}}. \tag{4.17}$$

$$M_{\text{ПР}-3} = \frac{408}{300} = 1 \text{ лок.}$$

Визначимо вартість поточних ремонтів при базовому варіанті:

$$B_{\text{ПР}-1} = 13 \cdot 250000 = 3250000 \text{ грн.}$$

де 250000 – нормативні міжремонтні періоди, км

$$B_{\text{ПР}-2} = 2 \cdot 600000 = 1200000 \text{ грн.}$$

де 600000 – нормативні міжремонтні періоди, км

$$B_{\text{ПР}-3} = 1 \cdot 1000000 = 1000000 \text{ грн.}$$

де 1000000 – нормативні міжремонтні періоди, км

Тобто розрахунок витрат на 1 локомотив:

$$B_{\text{рБ}} = \frac{B_{\text{ПР}-1} + B_{\text{ПР}-2} + B_{\text{ПР}-3}}{M_e}. \quad (4.18)$$

$$B_{\text{рБ}} = \frac{3250000 + 1200000 + 1000000}{2} = 2725000 \text{ грн.}$$

Визначимо вартість поточних ремонтів при модернізованому варіанті:

$$B_{\text{ПР}-1} = 13 \cdot 225000 = 2925000 \text{ грн.}$$

де 225000 – нормативні міжремонтні періоди, км

$$B_{\text{ПР}-2} = 2 \cdot 540000 = 1080000 \text{ грн.}$$

де 540000 – нормативні міжремонтні періоди, км

$$B_{\text{ПР}-3} = 1 \cdot 900000 = 900000 \text{ грн.}$$

де 900000 – нормативні міжремонтні періоди, км

Тобто розрахунок витрат на 1 локомотив:

$$B_{\text{рМ}} = \frac{B_{\text{ПР}-1} + B_{\text{ПР}-2} + B_{\text{ПР}-3}}{M_e}.$$

$$B_{\text{рМ}} = \frac{2925000 + 1080000 + 900000}{2} = 2452500 \text{ грн.}$$

Витрати електроенергії на тягу електровозів визначаються за формулою:

$$R_A = \overline{R_A} \cdot \sum MS \cdot 5{,}6 \qquad (4.19)$$

де $\overline{R_A}$ - питомі витрати енергії, для базового і модернізованого варіанту $\frac{кВт \cdot год}{поїзд - км}$

5,60 - вартість електроенергії для Укрзалізниці на 1кВ·год

Питомі витрати енергії, для нового і базового варіанту при дільничній швидкості 68 км/год, дорівнюють для базового – 10, а для нового 6 – $\frac{кВт \cdot год}{поїзд - км}$.

Витрати на електроенергію базового локомотива будуть складати

$$R_{A\text{Б}} = 11 * 408800 * 5{,}60 = 25182080 \text{ грн.}$$

$$b_e = \frac{R_{A\text{Б}}}{M_e} = \frac{21\ 449\ 736}{2} = 12591040 \text{ грн.}$$

$$R_{A\text{М}} = 6 * 408800 * 5{,}60 = 13735680 \text{ грн.}$$

$$b_e = \frac{R_{A\text{М}}}{M_e} = \frac{13735680}{2} = 6867840 \text{ грн.}$$

Результати розрахунку експлуатаційних витрат заносимо в таблицю 5.10.

Таблиця 4.10 – Результати розрахунку експлуатаційних витрат

Витрати, тис. грн в рік	Електровози	
	Базовий	Модернізований
Витрати на ремонт	2725000	2452500
Витрати на електроенергію	12591040	6867840
Всього	15 316 040	9 320340

Результати розрахунку економічного ефекту від експлуатації модернізованого електровоза протягом наступних 10 років зведені до таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Результати економічного ефекту від експлуатації модернізованого електровозу протягом 8 років

Роки	Капітальні вкладення., грн.	Експлуатаційні. витрати базового ел.воза , грн.	Експлуатаційні витрати модерн. ел.воза , грн.	Економ. ефект від реалізації модерн-ції, грн	Коефіцієнт. приведення до розрахункового року	Економічний ефект приведений до розрахункового року	Економічний ефект наростаючим підсумком, грн.
	Kt	*Ебаз*	*Емод*	*ЕТ*	$\alpha\tau$	$ЕТ \cdot \alpha\tau$	*ΣЕТ*
1	23 620 175	15316040	9 320 340	-17624475	0,909	-16020647,8	-16020647,8
2	0	15316040	9 320 340	5995700	0,826	4952448,2	-11068199,6
3	0	15316040	9 320 340	5995700	0,751	4502770,7	-6565428,88
4	0	15316040	9 320 340	5995700	0,683	4095063,1	-2470365,78
5	0	15316040	9 320 340	5995700	0,62	3717334	1246968,23
6	0	15316040	9 320 340	5995700	0,564	3381574,8	4628543,03
7	0	15316040	9 320 340	5995700	0,513	3075794,1	7704337,13
8	0	15316040	9 320 340	5995700	0,466	2793996,2	10498333,3
9	0	15316040	9 320 340	5995700	0,424	2542176,8	13040510,1
10	0	15316040	9 320 340	5995700	0,385	2308344,5	15348854,6

Таким чином економічний ефект від модернізації електровозу змінного струму асинхронними тяговими двигунами за 8 років експлуатації наростаючим підсумком склав 15348854,6 грн., затрати на капіталовкладення для модернізації електропоїзда окупаються на 5 році.

Висновки

У даній роботі виконано дослідження та розробку напівпровідникового аналога контактора БК-78Т для електровозів серії ВЛ10 і ВЛ10^{У}. Основна увага приділена моделюванню роботи силового кола тягових електродвигунів у рекуперативному режимі, аналізу характеристик швидкодіючих контакторів і розробці нового рішення для заміни традиційного контактора.

Теоретичні дослідження включали аналіз перехідних процесів під час роботи тягових електродвигунів у режимах пуску, розгону, виходу на номінальний режим і рекуперації. У середовищі Matlab Simulink створено моделі силового ланцюга, які дозволили оцінити параметри струмів і напруг, що виникають під час комутації контактів швидкодіючого контактора БК-78Т. Отримані результати дозволили краще зрозуміти роботу системи і виявити її основні недоліки.

На основі проведеного аналізу розроблено схему з використанням двох зустрічно-паралельних напівпровідникових ключів. Це рішення усуває основні недоліки механічних контакторів, зокрема утворення електричної дуги, повільну комутацію, механічне зношення та необхідність частого обслуговування. Напівпровідниковий аналог забезпечує більшу надійність, довговічність і швидкість роботи.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропоноване рішення може бути використане для модернізації електровозів серії ВЛ10 і ВЛ10^{У}. Це сприятиме зниженню витрат на обслуговування силових ланцюгів, підвищенню їх ефективності та надійності, а також покращенню умов експлуатації електровозів.

Робота демонструє доцільність і перспективність впровадження напівпровідникових технологій у тяговий електротранспорт, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності залізничного транспорту.

Список використаних джерел:

1. Чорних І.В. Simulink: Інструмент моделювання динамічних систем.
2. Чорних І.В. SimPowerSystems: Моделювання електротехнічних пристроїв та систем у Simulink.
3. Рогачов К.Д. Сучасні силові тиристори, що замикаються.
4. Фірма «ABB». Режим доступу: https://global.abb/group/en.
5. Авакумов В. Г., Багієв Г. Л., Воскобойніков Д. М. Техніко-економічна оцінка якості електроенергії в промисловості. Харків. ун-т, 1977. 132 с.
6. Андрієнко П. Д., Шило С. І., Немудрий І. Ю. Дослідження режимів гальмування в системі імпульсного регулювання серієсного електродвигуна. Електротехніка та електроенергетика. 2007. № 2. С. 11-14.
7. Анохов І. В., Бадьор М. П., Гаврилюк В. І., Січенко В. Г. Про електромагнітну сумісність електрифікованих ліній постійного струму. Залізничний транспорт України. 2000. № 2. С. 10-12.

8. Аріллага Дж., Бредлі Д., Боджер П. Гармоніки в електричних системах.: Вища школа, 1990. 320 с.

9. Бадер М. П. Електромагнітна сумісність.: Вища професійна освіта, 2002. 637 с.

10. Баранов В. А., Баршенков В. А., Дегтярьов Р. С., Лукашенко С. Н. Правильне гальмування – гарантія безпеки. Локомотив. 2008. № 1. С. 14-15.

11. Барковський Б. С., Лозін Б. А. Спосіб підвищення ефективності рекуперативного гальмування. Праці ОМІІТ: «Дослідження електрообладнання та питання міцності електрорухомого складу». 1974. Т. 163. С. 75-80.

12. Башук І. Б., Ляпустін В. Н., Путкарадзе Г. В. Автоматичне керування рекуперативним гальмуванням електровозів постійного струму. Електрична та тепловозна тяга. 1971. № 12. С. 30-31.

13. Бей Ю. М., Мамошин О. Р., Пупинін В. Н., Шалімов М. Г. Тягові підстанції: підручник для вузів ж.-д. транспорту.: Транспорт, 1986. 319 з.

14. Бєлов В. Ф., Шабанов Г. І. Аналіз якості електричної енергії при автоматизованому проектуванні фільтрокомпенсуючих пристроїв. Поліпшення електромагнітної сумісності електровозних напівпровідникових перетворювачів як економії матеріальних і енергетичних ресурсів: Інформелектро, 1987. С. 19-20.

15. Бесекерський В А. Теорія систем автоматичного управління: навч. допомога. СПб.: Професія, 2007. 254 с.

16. Бірюков. Ст В., Ворфоломєєв Г. Н., Євдокимов С. А., Щуров Н. І., Шальнев В. Г. Метод дослідження електромагнітних процесів у багатопульсових випрямлячах. Наук. вісник НДТУ. 2006 № 2. С. 105-118.

17. https://symmetron.ua/image/catalog/promotion/c_20ru_101.pdf

ДОДАТОК А – ІЛЮСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Український державний університет залізничного транспорту

Механіко-енергетичний факультет
Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ІЛЮСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ
до кваліфікаційної роботи

Розробка напівпровідникового аналога контактора БК-78Т електровоза ВЛ10

Розробив студент групи 214-ЕЕ-Д23

спеціальності 273 «Залізничний транспорт»
спеціалізацій «Електровози і електропоїзди»

Виконав	_____ О.С. Завада О.С
Керівник проекту:	_____О.А. Плахтій
Нормоконтроль:	_____О.А. Плахтій
Завідувач кафедри:	_____М.М . Бабаєв

2024

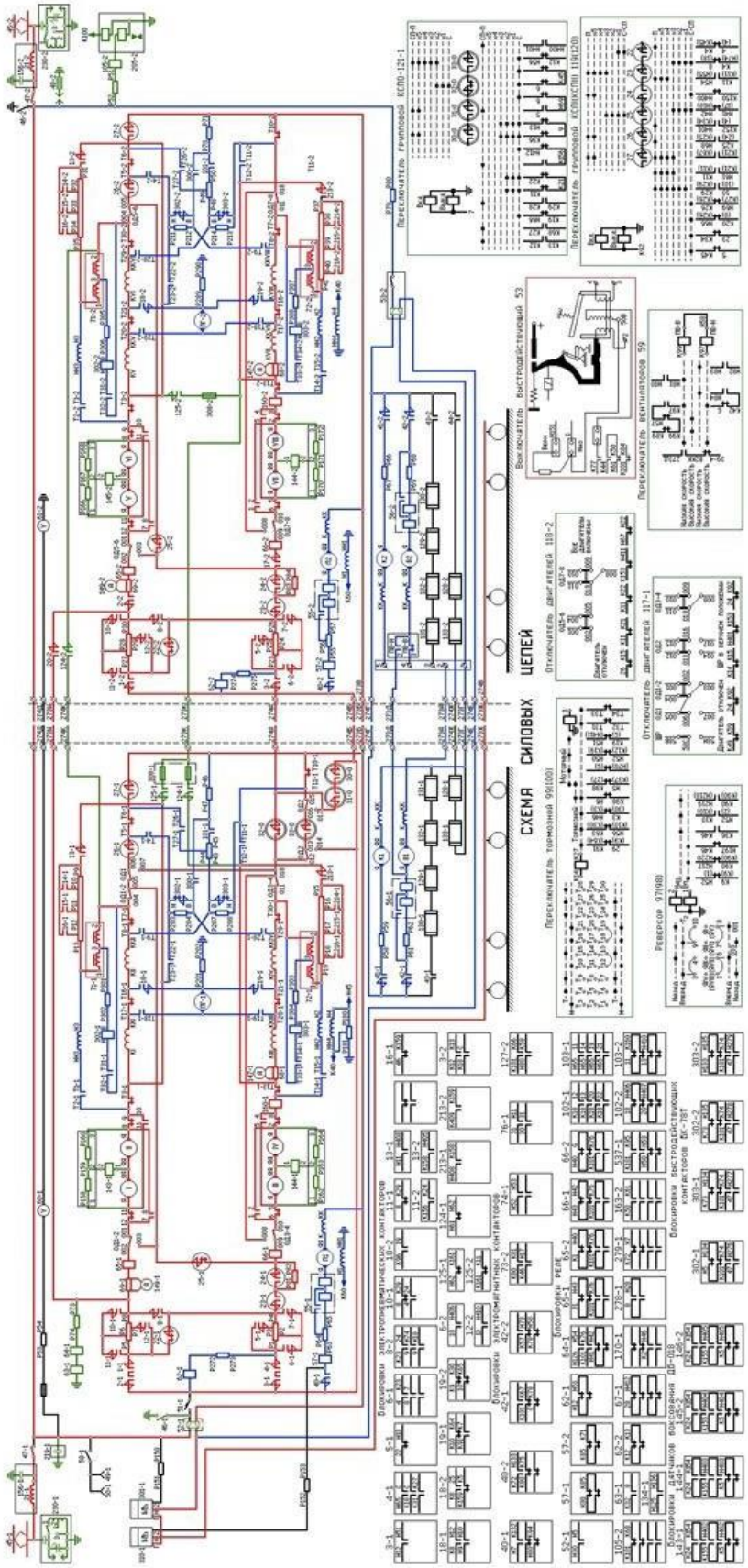
Електровоз ВЛ10

Електровози ВЛ10 і ВЛ10^{У} мають такі основні технічні характеристики:

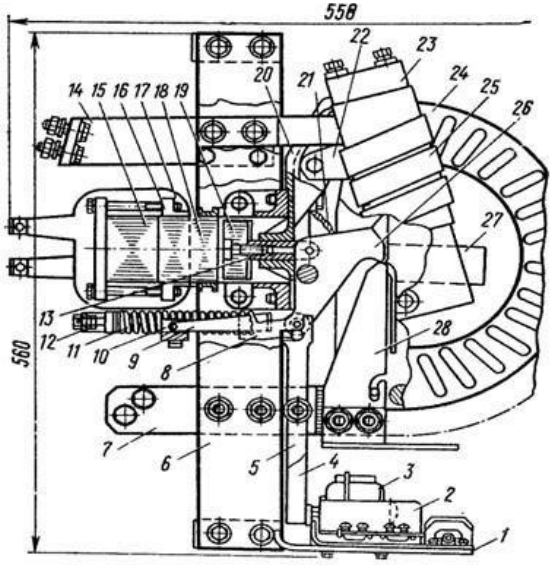
- номінальна напруга мережі: 3000 В;
- ширина між рейками: 1520 мм;
- потужність на валах тягових електродвигунів у годинному режимі: 5360 кВт;
- потужність на валах тягових електродвигунів у тривалому режимі: 4600 кВт;
- зубчаста передача із передатним відношенням: 88/23;
- сила тяги, яка розвивається в годинному режимі: 39500 кгс;
- сила тяги, яка розвивається в тривалому режимі: 3200 кгс;
- швидкість (годинний режим): 48,7 км/год;
- швидкість (тривалий режим): 51,2 км/год;
- найбільша допустима швидкість: 100 км/год;
- найбільша допустима швидкість по ходовій частині: 110 км/год;
- коефіцієнт корисної дії в тривалому режимі: не менше 0,9;
- маса електровоза з урахуванням 2/3 запасу піску:
- електровоз ВЛ10: $184^{+5,52}_{-1,84}$ т;
- електровоз ВЛ10У: 200±4 т;



Силова схема електровоза ВЛ10



Швидкодіючий контактор БК-78Т



Швидкодіючий контактор БК-78Т

Швидкодіючий контактор БК-78Т (рис. 66) призначений для захисту тягових електродвигунів від струмів к. з. у режимі рекуперації. Його технічні дані такі:

Таблиця 1.1 – Технічні параметри контактора БК-78Т

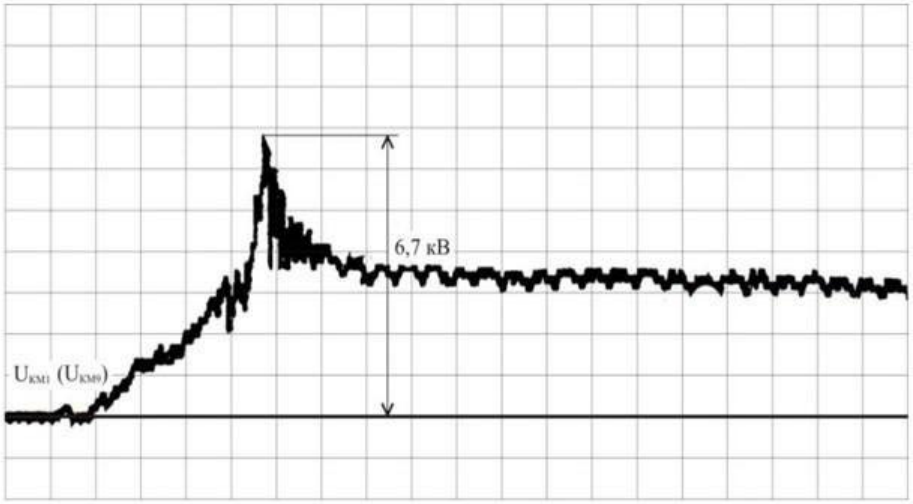
Параметр	Значення
Максимальний струм, що відключається при індуктивності ланцюга 10 мГн і шунтування головних контактів резистором із опором 2 Ом, А	2500
Напруга номінальна, В	3300
Напруга найбільша, В	4000
Номінальний струм силових контактів, А	1000
Струм уставки, А	35 – 50
Час включення котушки засувки електромагніту, с, не більше	0,5
Маса, кг	43

Дані показують, що найбільша частка відмов тягових двигунів електровозів припадає на пробої ізоляції обмоток машини, що є наслідком перегріву обмоток, яка призводить до прискорення старіння ізоляції.

Комутаційні перенапруги контактора електровоза



Осцилограма напруги при відключенні контактора КМ2 (КМ10)

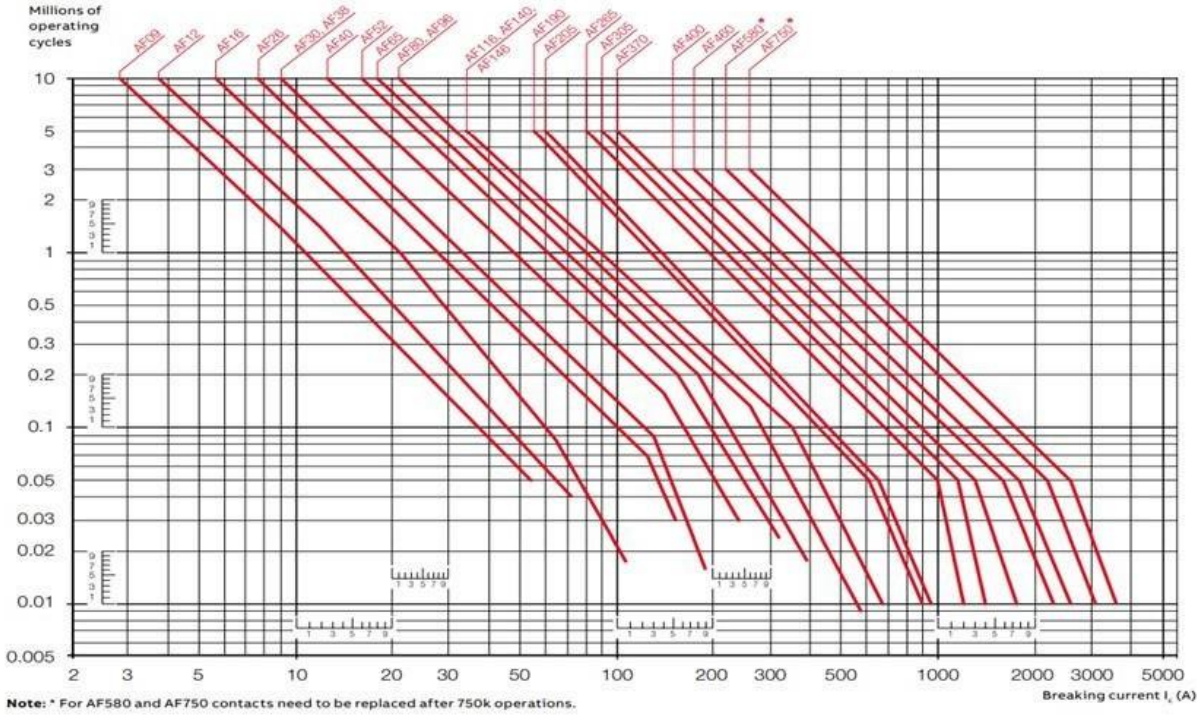


Осцилограма напруги при відключенні лінійного контактора КМ1 (КМ9)

Суттєвий ізнос та комутаційні перенапруги є причиною виходу з ладу силових контакторів, що зумовлює актуальність їх модернізації

Осцилограми взяті - Журнал «Локомотив -информ» №6, июнь 2013 – С. 29-30

Дані числа комутацій життєвого циклу силових контакторів компанії ABB



Показники надійності силових контакторів ABB

В залежності від значення комутованого стуму і моделі силових контакторів число комутацій життєвого циклу при комутації струму 50 000 – 300 000 комутацій. При цьому ресурс старих радянських контакторів є суттєво меншим.

Характеристики силових напівпровідникових ключів

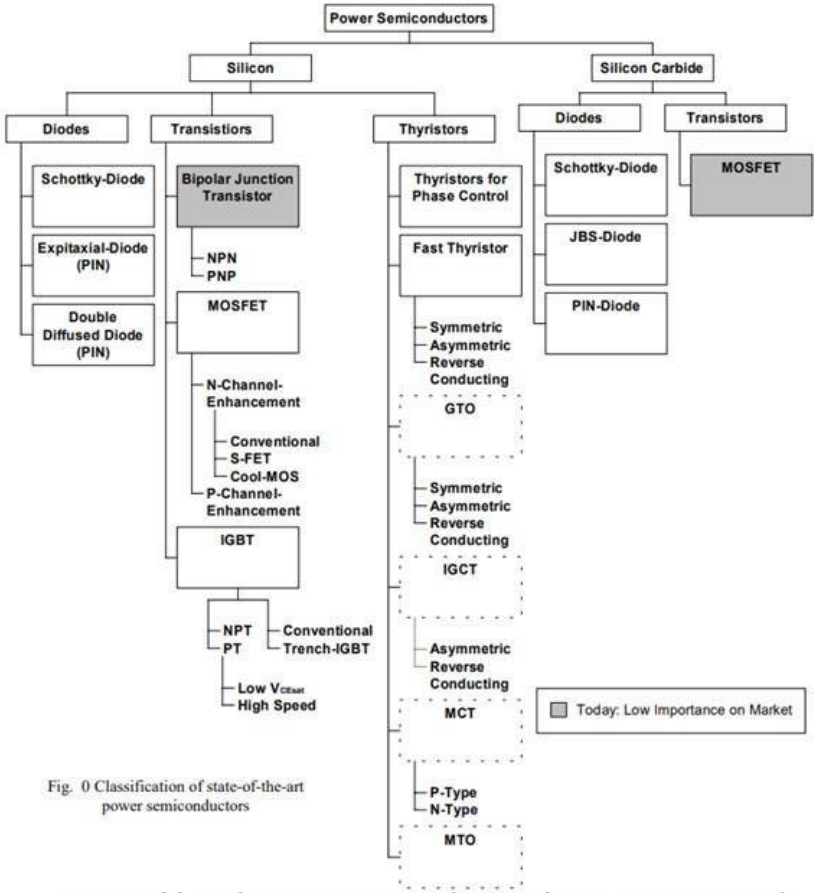
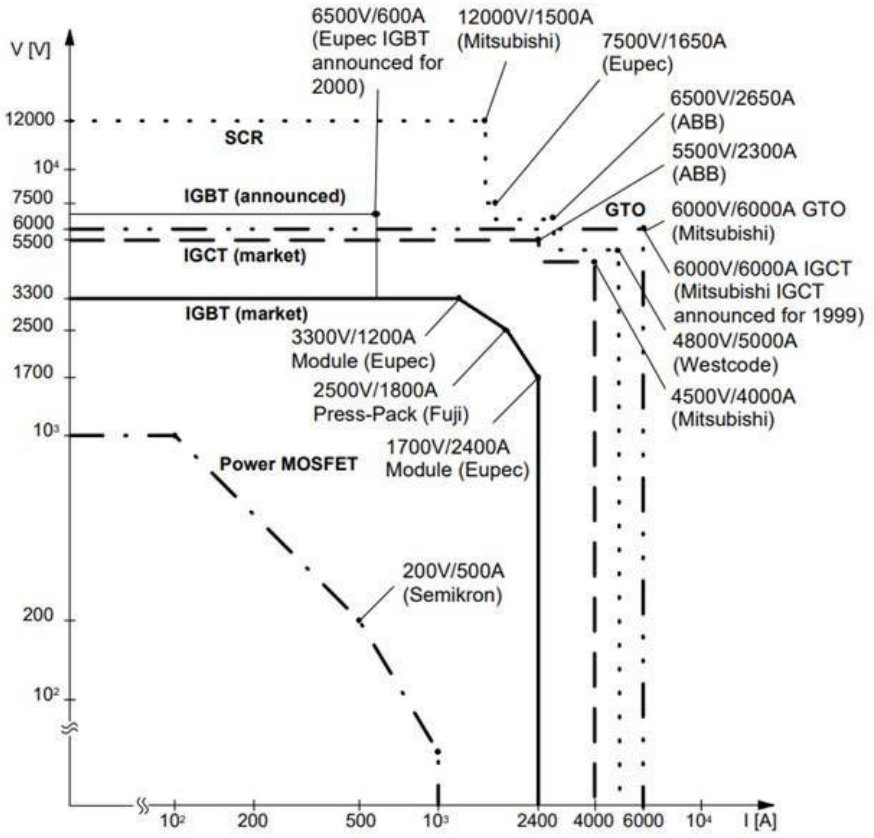


Fig. 0 Classification of state-of-the-art power semiconductors

Класифікація силових напівпровідникових ключів

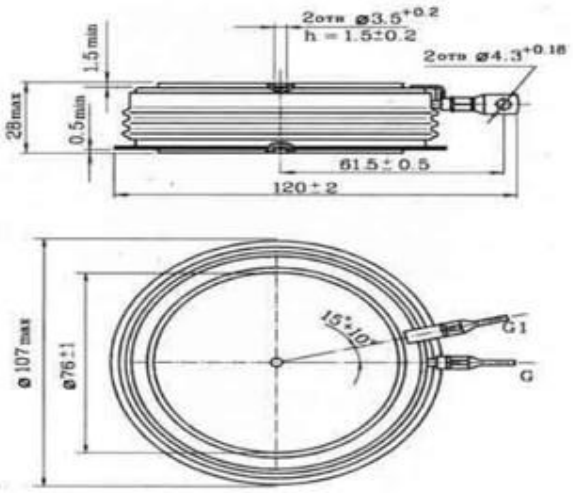


Діапазон можливих значень комутованих струмів та напруг сучасних напівпровідникових ключів

Порівняння силових напівпровідникових ключів

Найменування приладу	Переваги	Недоліки	Область застосування
SCR тиристор	У включеному стані має найнижчі втрати. Володає найвищою перевантажувальною здатністю та надійністю. Легко з'єднується послідовно та паралельно.	Через керуючий електрод не здатний запиратися. Працює при низьких частотах.	Електроприводи постійного струму. Потужні джерела живлення Зварювання. Нагрів і плавлення. Статичні компенсатори. Напівпровідникові ключі змінного струму.
GTO тиристор	Має здатність запиратися сигналом управління. Володає досить високою перевантажувальною здатністю. Може з'єднуватися послідовно. При напрузі до 4 кВ може працювати при частоті до 250 Гц.	У включеному стані має високі втрати. У системі управління дуже великі втрати. Системи управління та подачі енергії на потенціал складні. На перемикання йдуть великі втрати.	Електроприводи. Статичні компенсатори реактивної потужності. Системи безперебійного живлення. Індукційний нагрів.
IGCT тиристор	Має здатність запиратися сигналом управління. Володає досить високою перевантажувальною здатністю. У включеному стані має низькі втрати для перемикання. Працює на частотах до кГц. Драйвер вбудований (блок управління). Може з'єднуватися послідовно.	Недоліки не виявлені, оскільки відсутній досвід експлуатації.	Потужні джерела живлення (інверторні та випрямлювальні підстанції ліній передач постійного струму). Електроприводи (інвертори напруги для перетворювачів частоти та електроприводів різного призначення).
IGBT	Має здатність запиратися сигналом управління. Працює на частоті до 10 кГц. Система управління проста та неенергоємна. Драйвер вбудований (блок управління).	У включеному стані має дуже високі втрати.	Електроприводи (чопери). Системи безперебійного живлення. Статичні компенсатори та активні фільтри. Ключові джерела живлення.

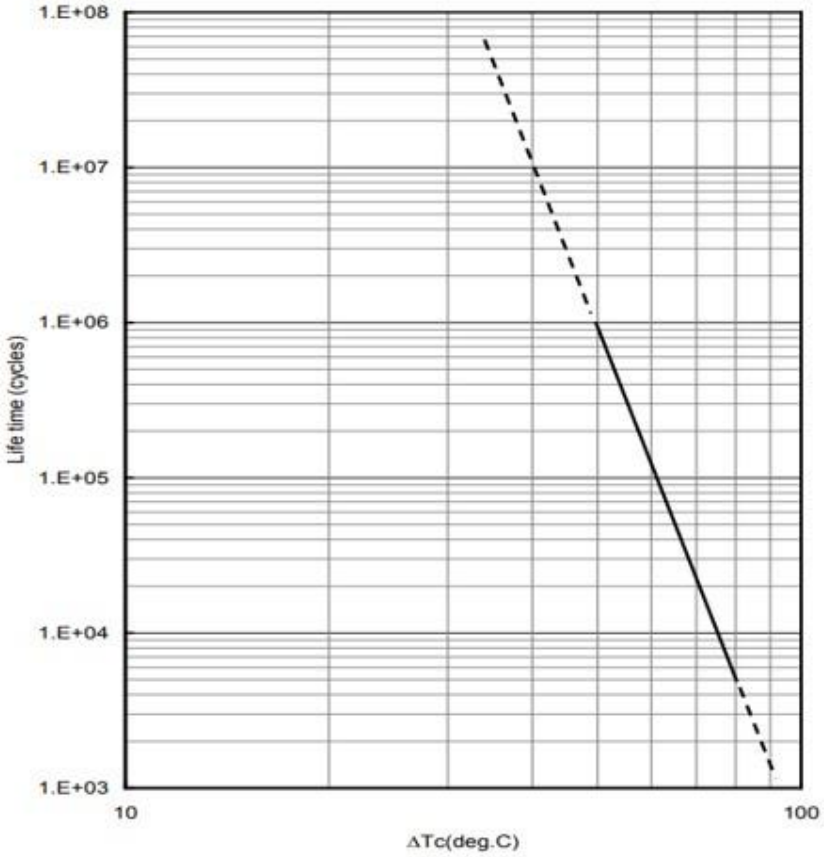
Параметри силового запираючого тиристора



Запираючий силовий тиристор Т3373-2000

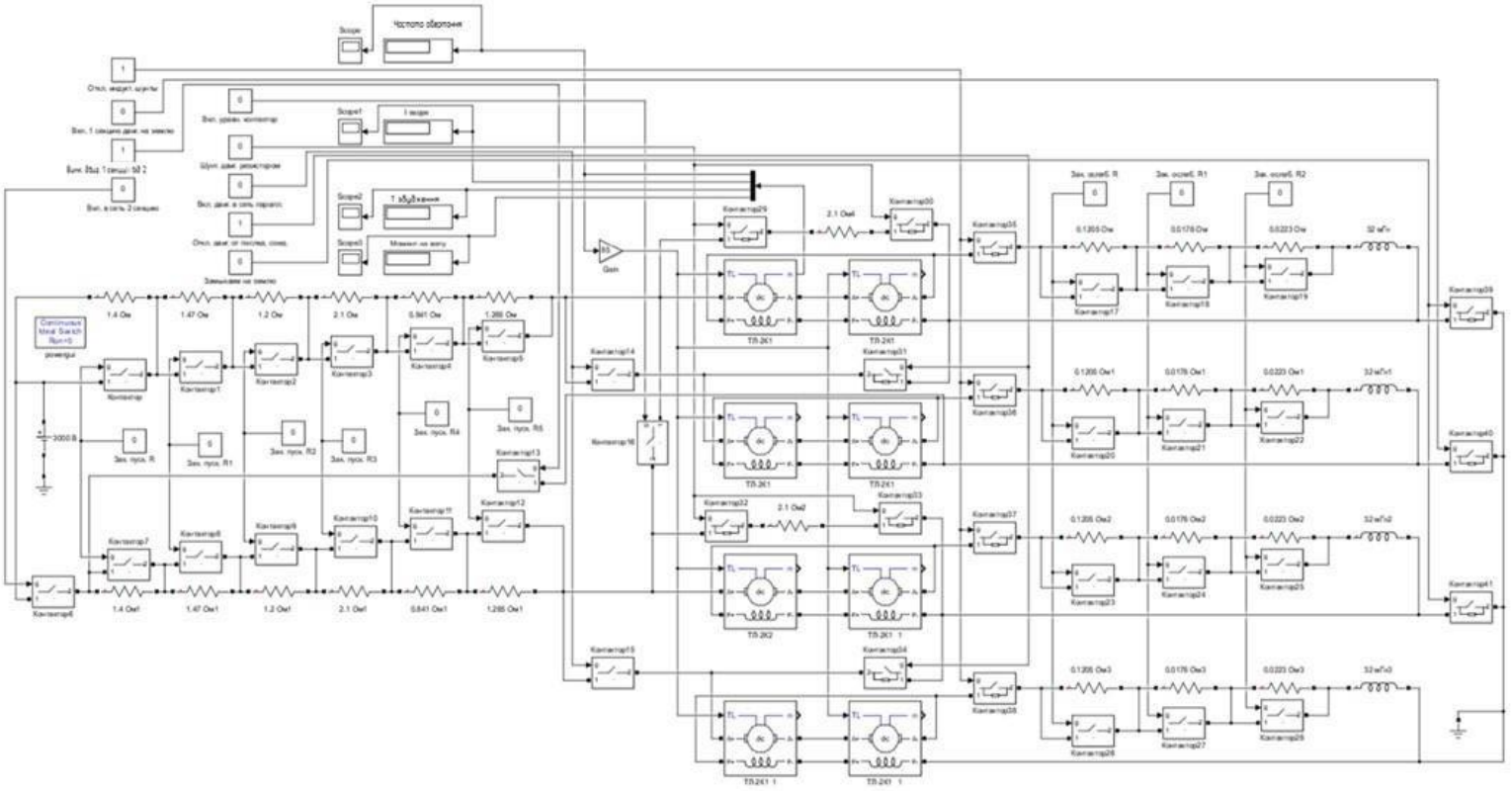
Таблиця 3.2 – Основні параметри запираючого силового тиристора

V_{DRM} V_{RRM}	I_{DRM} I_{RRM}	i_{TAVM} (TC, °C)	I_{TSM} 10 ms	V_{TM}	$\left(\frac{di_T}{dt}\right)_{crit}$	$\left(\frac{dv_D}{dt}\right)_{crit}$	V_{GT}
В	мА	А	кА	В	А/мкс	В/мкс	В
5000	100	2000(85)	14	4,5	250	500	1,5
$i_{G(on)}$	i_{GQM}	V_{RDM}	T_{jmax}	$R_{th(j-c)}$	t_{gq}	F	W
А	А	В	°С	°С/Вт	Мкс	кН	кг
8	650	-	125	0,018	32	28-30	-

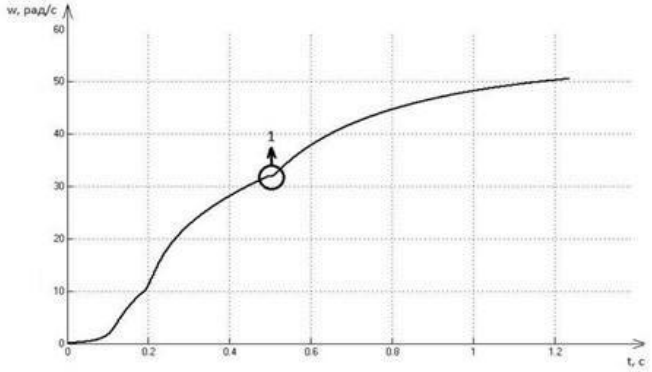


Залежність числа комутацій IGCT комутатора від температури

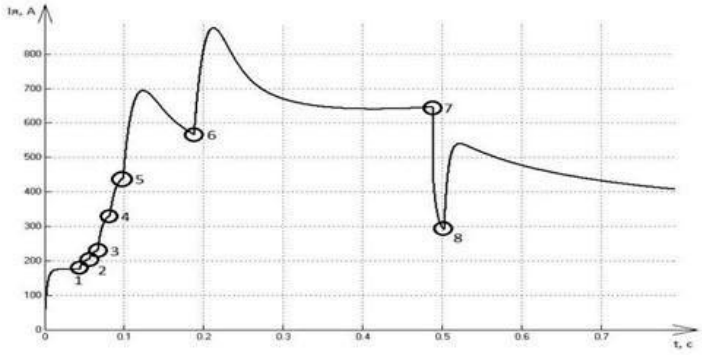
Моделювання перехідних процесів тягового електроприводу з реостатно-контакторною системою керування



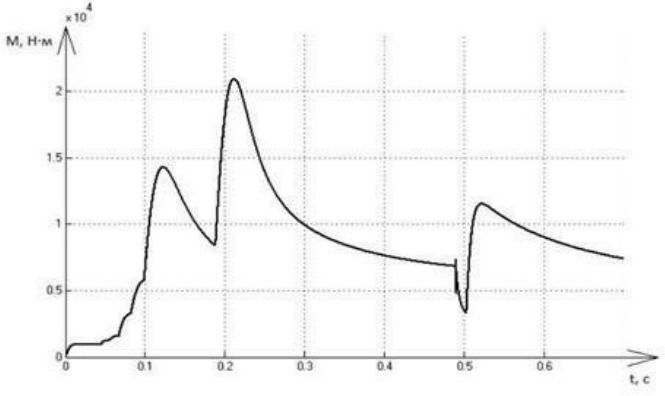
Результати моделювання режиму тяги



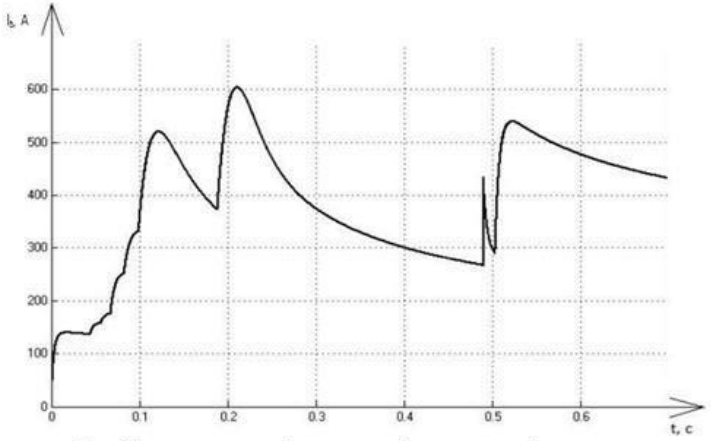
Графік залежності швидкості тягового електродвигуна постійного струму від часу



Графік залежності струму якоря від часу



Графік залежності моменту на валу від часу моделювання

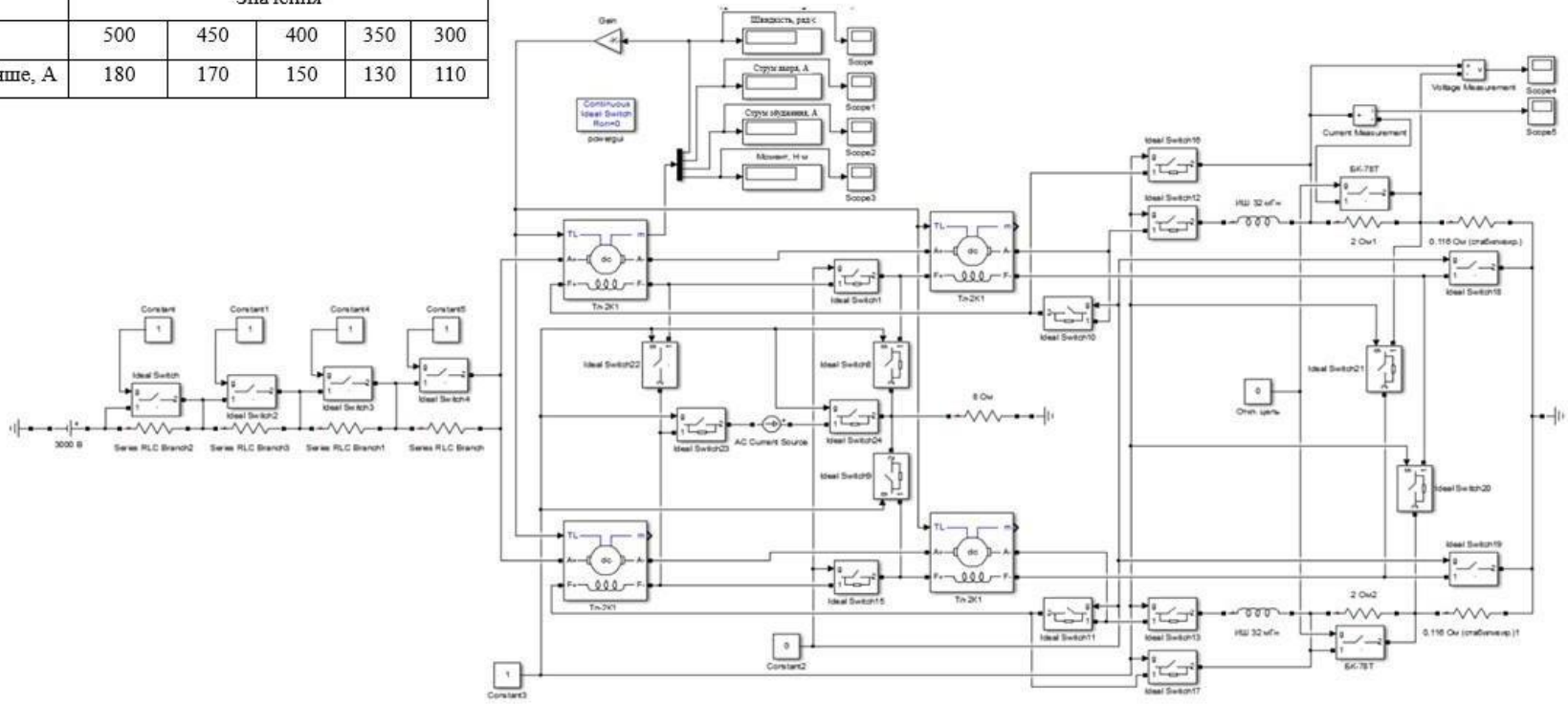


Графік залежності струму збудження від часу моделювання

Модель тягового електроприводу в режимі рекуперації

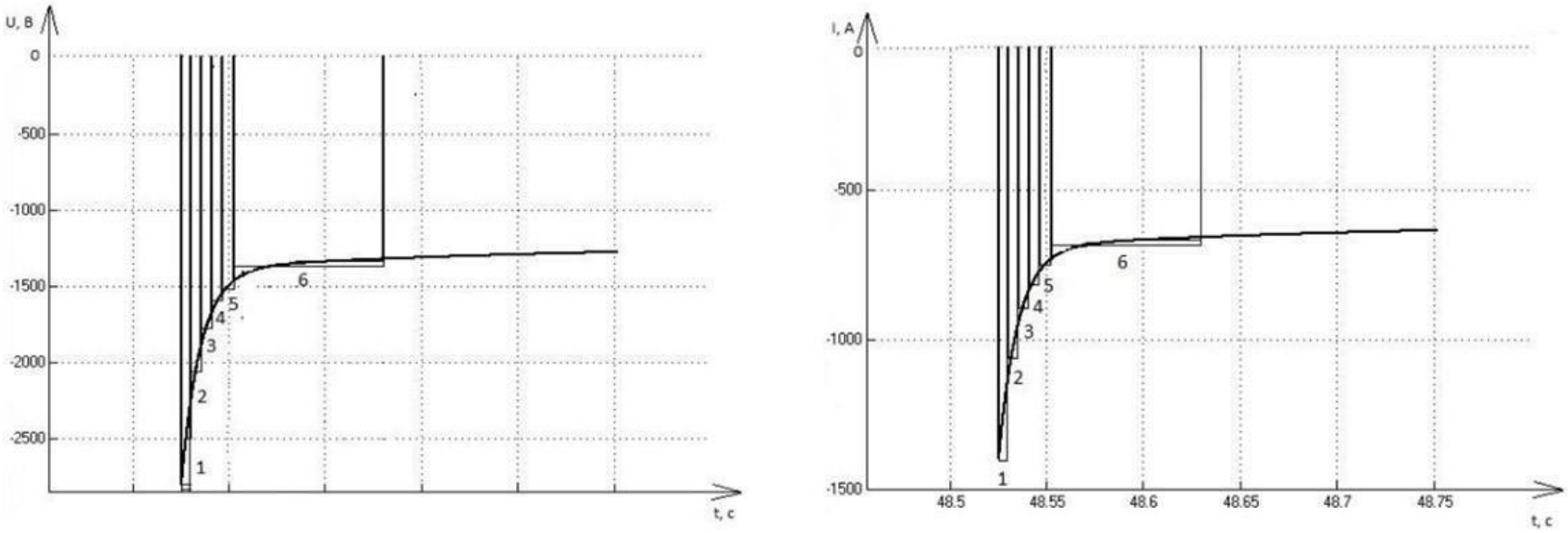
Таблиця 3.2 – Співвідношення струмів якоря та збудження

Параметр	Значення				
Струм якоря, А	500	450	400	350	300
Струм збудження, не менше, А	180	170	150	130	110



Електрична схема РКСУ електровоза в режимі рекуперації у програмному продукті Matlab Simulink

Результати моделювання напруги та струму



Графік залежності напруги та струму в момент комутації ланцюги швидкодіючим контактором (розбитий на ділянки): а – напруга; б – струм

Висновки до кваліфікаційної роботи

- У даній роботі виконано дослідження та розробку напівпровідникового аналога контактора БК-78Т для електровозів серії ВЛ10 і ВЛ10^{У}. Основна увага приділена моделюванню роботи силового кола тягових електродвигунів у рекуперативному режимі, аналізу характеристик швидкодіючих контакторів і розробці нового рішення для заміни традиційного контактора.

- Теоретичні дослідження включали аналіз перехідних процесів під час роботи тягових електродвигунів у режимах пуску, розгону, виходу на номінальний режим і рекуперації. У середовищі Matlab Simulink створено моделі силового ланцюга, які дозволили оцінити параметри струмів і напруг, що виникають під час комутації контактів швидкодіючого контактора БК-78Т. Отримані результати дозволили краще зрозуміти роботу системи і виявити її основні недоліки.

- На основі проведеного аналізу розроблено схему з використанням двох зустрічно-паралельних напівпровідникових ключів. Це рішення усуває основні недоліки механічних контакторів, зокрема утворення електричної дуги, повільну комутацію, механічне зношення та необхідність частого обслуговування. Напівпровідниковий аналог забезпечує більшу надійність, довговічність і швидкість роботи.

- Практичне значення роботи полягає в тому, що запропоноване рішення може бути використане для модернізації електровозів серії ВЛ10 і ВЛ10^{У}. Це сприятиме зниженню витрат на обслуговування силових ланцюгів, підвищенню їх ефективності та надійності, а також покращенню умов експлуатації електровозів.

- Робота демонструє доцільність і перспективність впровадження напівпровідникових технологій у тяговий електротранспорт, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності залізничного транспорту.