

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерних технологій і систем»


Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

на тему: Дослідження впливу нових типів електрорухомого складу
на роботу рейкових кіл
(назва теми на українській мові з наказу про затвердження тем за магістрами)

за освітньою програмою «Автоматика та автоматизація на транспорті»
зі спеціальності: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

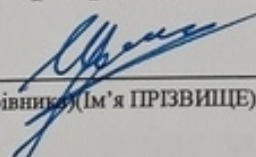
Виконав: студент групи АТ2221 (967М)



(підпис студента) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

/ Павло НОСОВ /

Керівник: доцент кафедри АТ

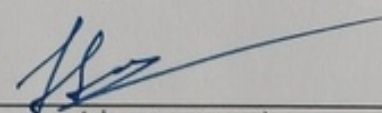


(підпис керівника) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

/ Вадим ЩЕКА /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань

Студент



(підпис студента)

Дніпро – 2024 рік

**Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies**

Faculty of Computer Technologies and Systems

Department of Automation and Telecommunication

Explanatory Note

to Master's Thesis

master

(higher education degree)

on the topic: Impact research of new types of electric rolling stock into the track circuits working

(назва теми на англійській мові з наказу про затвердження тем за магістрами)

according to educational curriculum «Automatic machinery and automation in transport industry»

in the Specialty: 151 Electronics and automation (Automation and computer-integrated technologies)

Done by the student of the group AT2221 (967M)

/ Pavlo NOSOV /

Scientific Supervisor: associate professor

/ Vadym SHCHEKA /

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Комп'ютерні технології та системи
 Кафедра: Автоматика та телекомунікації
 Рівень вищої освіти: магістр
 Освітня програма: Автоматика та автоматизація на транспорті
 Спеціальність: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АТ

_____ Володимир ГАВРИЛЮК

(підпис)

Дата _____

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу _____ магістр _____
(ступінь вищої освіти)

студенту _____ Носов Павло Валентинович _____
(Прізвище, Ім'я, По батькові)

1. Тема робо- Дослідження впливу нових типів електрорухомого складу на ро-
 ти: боту рейкових кіл

Керівник роботи: _____ доцент Вадим ЩЕКА _____
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від _____ «21» листопада 2022 р. № 1151

2. Строк подання студентом роботи: 25 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: _____ Принципові схеми тональних рейкових кіл та
 схем автоблокування з тональними рейковими колами, довідкова література

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина:

Огляд існуючих нових типів електрорухомого складу

4.2 Основна частина:

Аналіз апаратури рейкових кіл

Моделювання роботи асинхронного тягового приводу і його впливу на рейкові кола

4.3 Охорона праці та захист навколишнього середовища: не передбачена

4.4 Економічна частина: не передбачена

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Структурна та принципова схема силових кіл, результати моделювання роботи асинхронного тягового приводу в 120-, 150-, 180- градусних режимах та в режимі ШІМ.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та по-сада консультанта	Завдання ви-дав: (підпис консультан-та, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк вико-нання етапів роботи	Примітка
1	Огляд існуючих нових типів електрорухомого скла-ду	1.06.23	Вик.
2	Аналіз апаратури рейкових кіл	1.09.23	Вик.
3	Моделювання роботи асинхронного тягового приво-ду	1.10.23	Вик.
4	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	25.12.23	Вик.
5	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаме-наційної комісії	24.01.24	

Студент

_____ (підпис)

Павло НОСОВ

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Вадим ЩЕКА

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

58 сторінок, 31 рисунок, 24 джерела літератури.

Об'єкт розробки - електромагнітні процеси в системі «рейкове коло – асинхронний тяговий привод»

Мета роботи - дослідити впливу нових типів електрорухомого складу на роботу рейкових кіл.

Методи дослідження – літературний та патентний пошук, схемотехнічне моделювання у пакеті OrCAD та Mathcad, метод синтезу, числові методи розрахунку.

В даному дипломному проєкті проведені дослідження і аналіз, як може впливати робота нових типів електрорухомого складу на роботу тональних рейкових кіл. В роботі розглянутий принцип дії тональних рейкових кіл і принципові схеми їх обладнання. Також проведено аналіз існуючих систем автоблокування на базі тональних рейкових кіл. В роботі розроблено схемотехнічну модель для дослідження електромагнітного впливу тягових перетворювачів нових типів електрорухомого складу з асинхронним тяговим двигуном на роботу тональних рейкових кіл. Запропонована модель дає можливість визначити гармонічний склад зворотного тягового струму у рейкових лініях від локомотивів з асинхронним тяговим двигуном при різних режимах ведення локомотиву.

Висновок. При дослідженні було розглянуто режими керування тяговими перетворювачами: 150° режим, що застосовується при пуску двигуна і при малих швидкостях, 180° режим, який використовується при веденні локомотива у режимі тяги, та режим широтно-імпульсної модуляції. Останній є найбільш доцільним для використання, тому що при високих значеннях несучої частоти завдає мінімум заважаючого і небезпечного впливу на нормальну роботу рейкових кіл при використанні нових електровозів на ділянках залізниць, обладнаних тональними рейковими колами.

Ключові слова: РЕЙКОВЕ КОЛО, ЗВОРОТНИЙ ТЯГОВИЙ СТРУМ, НОВІ ТИПИ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ, АСИНХРОННИЙ ТЯГОВИЙ ПРИВОД, ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ВПЛИВ.

ЗМІСТ

<i>ВСТУП</i>	7
<i>1. НОВІ ТИПИ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ</i>	8
1.1. Існуючі нові типи електрорухомого складу	8
1.1.1. Використання асинхронних тягових двигунів	10
1.2. Керування асинхронним тяговим двигуном	11
1.2.1. Частотне регулювання швидкості АТД	12
1.2.2. Перетворювачі частоти та їх елементна база	13
<i>2. СУЧАСНІ РЕЙКОВІ КОЛА ТА СИСТЕМИ АВТОБЛОКУВАННЯ</i>	18
2.1. Рейкові кола	18
2.2. Автоблокування з використанням тональних рейкових кіл	21
2.2.1. Автоблокування з тональними рейковими колами і централізованим розміщенням апаратури (АБТЦ)	23
<i>3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НОВИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ НА РОБОТУ РЕЙКОВИХ КІЛ</i>	28
3.1. Схемотехнічне моделювання	28
3.1.1. Структурна та принципова схема силових кіл	28
3.2. Визначення параметрів моделі	34
3.2.1. Розрахунок часових параметрів керуючих імпульсів	34
3.2.2. Розрахунок параметрів АТД	35
3.3. Моделювання роботи асинхронного тягового приводу	37
3.3.1. 120-градусний режим роботи інвертора	38
3.3.2. 150-градусний режим роботи інвертора	40
3.3.3. 180-градусний режим роботи інвертора	43
3.3.4. Широтно-імпульсна модуляція	47
3.4. Висновки моделювання	53
<i>ВИСНОВКИ</i>	55
<i>ЛІТЕРАТУРА</i>	56

ВСТУП

Основним завданням залізничного транспорту є повне та своєчасне задоволення потреб народного господарства й населення в перевезеннях. Для виконання цієї задачі необхідне подальше підвищення пропускної спроможності, підвищення ваги вантажу та швидкості руху потягів. Багато в чому для цього сприяє впровадження сучасних засобів автоматики й телемеханіки. При порівняно невеликих витратах це дозволяє підвищити пропускну спроможність ліній, значно збільшити продуктивність і поліпшити умови праці залізничників, підвищити безпеку руху поїздів.

Рейкові кола тональної частоти володіють багатьма істотними експлуатаційними, технічними і економічними перевагами. Використання сигнального струму тонального діапазону дозволяє підвищити захищеність від впливу перешкод тягового струму, знизити споживану потужність, здійснити централізоване розміщення апаратури, виключити взаємний вплив між рейковими колами. До переваг варто також віднести можливість виключення в них малонадійних ізолюючих стиків, що особливо важливо для ділянок із цільнозварними рейковими колами, де установка ізолюючих стиків знижує міцність колії й ефективність її використання. При використанні тональних рейкових кіл зменшується кількість використовуваних дросель-трансформаторів, що робить їх застосування значно дешевшим. Дослідження показали, що експлуатаційні витрати, особливо при обслуговуванні пристроїв коротких рейкових кіл, для ділянок, обладнаних автоблокуванням з тональними рейковими колами знижуються в середньому на 67,5%. Крім цього, застосування тональних рейкових кіл скорочує щорічні витрати по господарству колії на 2 тисячі гривень на 1 кілометр.

1. НОВІ ТИПИ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

В цьому розділі проекту проведені дослідження і аналіз, як може впливати робота нових типів електрорухомого складу на роботу тональних рейкових кіл. Цей вплив зумовлюють тягові перетворювачі, що встановлені на електровозах чи електропоїздах. У зв'язку з роботою цих перетворювачів у зворотному тяговому струмі можуть бути присутні гармоніки, які потрапляють в смугу сигнальних частот тональних рейкових кіл, і завдавати заважаючий і навіть небезпечний вплив на роботу рейкових кіл.

1.1. Існуючі нові типи електрорухомого складу

Електрорухомий склад - це локомотив, який приводиться в рух тяговими електродвигунами, що живляться електричним струмом від контактної мережі.

Технічний прогрес у різних галузях техніки дозволяє створювати нові електровози з поліпшеними експлуатаційними характеристиками. У світовій практиці створення нових електровозів різного призначення в даний час здійснюється на єдиній базовій платформі з використанням великого числа уніфікованих вузлів, систем і елементів. Основними складовими ефективності рухомого складу нового покоління, що експлуатується, є:

1. Питоме зменшення ваги прокату чорних металів для виробництва ЕРС за рахунок:

- збільшення в 1,4 рази тривалості життєвого циклу вагонів;
- зменшення коефіцієнта їх матеріалоємності з 0,336 до 0,322-0,318;
- виготовлення несучих елементів конструкції кузовів з гарячекатаних та гнутих профілів із низьколегованих сталей класу міцності 375-390 МПа, що забезпечують однакову довговічність кузова і ходових частин;
- використання роздільної гальмівної системи для кожного візка вагона, що дало змогу зменшити загальну масу системи, з одночасним підвищенням надійності

роботи гальм за рахунок забезпечення більш рівномірного натиснення гальмівних колодок на колеса.

2. Зменшення питомих витрат електроенергії та палива на тягу поїздів у результаті:

- зменшення коефіцієнта тертя і опору руху вагонів до 10%;
- зменшення в 2—3 рази кутів набігання колісних пар на рейки і зменшення інтенсивності «виляння» візків;
- зниження маси тари вагонів.

3. Зменшення питомих витрат електроенергії, палива, інших видів технологічної енергії і трудових ресурсів на технічне утримання вагонів за рахунок:

- збільшення міжремонтного пробігу в 2 рази — до 500 тис. км,
- зниження середньорічних витрат на ремонт і обслуговування в 3,5 рази;
- збільшення гарантійного терміну експлуатації буксових вузлів до 8 років, або 800 тис. км пробігу, в результаті застосування дворядних касетних конічних підшипників типу ТВУ150х250х160;
- наплавлення ударно-тягових поверхонь автозчепів у середовищі аргону із твердістю поверхонь після наплавлення 400-500 НВ.

4. Зменшення питомих витрат електроенергії, палива, інших видів технологічної енергії й трудових ресурсів на технічне утримання рейкової колії за рахунок:

- зменшення рівня рамних сил у візках (на прямих і кривих ділянках колії $R > 800$ м — в 1,5—2 рази);
- зменшення впливу на верхню будову колії (рейки та елементи стрілочних переводів) у горизонтальній площині.

Серед нових електрорухомих складів на залізницях України використовуються електровози Hyundai, Skoda, Крюковського вагонобудівного заводу тощо.



Рисунок 1.1. Нові типи ЕРС на залізницях України

1.1.1. Використання асинхронних тягових двигунів

В якості тягових двигунів застосовувались і застосовуються колекторні машини постійного чи пульсуючого струму. Такі тягові двигуни володіють певними позитивними якостями, але одночасно вони мають і ряд серйозних недоліків. Ці недоліки полягають в порівняно невисокій надійності колекторного вузла і щіткового апарату; обмеженій по умовах комутації і механічній міцності потужності у відведених габаритах; високих витратах на технічне обслуговування в умовах експлуатації та ремонт; підвищеній масі двигуна при порівняно низьких значеннях крутного моменту, що обмежує використання опорно-осьового підвішування двигуна в умовах жорсткого шляху; підвищеній витраті кольорового металу і активних матеріалів тощо.

Усунення зазначених недоліків, зняття обмежень за потужністю, забезпечення гранично високого використання зчеплення колеса з рейкою можуть бути досягнуті переходом на безколекторні, зокрема асинхронні тягові двигуни (АТД). АТД можуть бути виконані з потужністю в 1,5-2 рази вище, ніж колекторні двигуни, при одночасному зниженні маси на 30-50%. При цьому значно знижується витрата кольорового металу, ізоляції та електротехнічної сталі. Важливим показником ефективності впровадження асинхронного тягового приводу є зниження витрат на утримання електровоза в умовах експлуатації.

При використанні в електричній тязі асинхронного тягового приводу можуть бути реалізовані наступні переваги:

1) значне спрощення тягового двигуна в порівнянні з колекторним і підвищення його надійності (відпадає необхідність щоденного огляду колекторно-щіткового вузла);

2) підвищення надійності кузовного електричного обладнання внаслідок застосування безконтактних пристроїв перетворення потужності;

3) поліпшення тягових властивостей електровозів завдяки використанню жорсткої тягової характеристики при боксуванні. Є досвідчені результати, що показують можливість збільшення коефіцієнта зчеплення на 20-40%;

4) збільшення потужності і моменту тягового двигуна при тих же габаритних розмірах (відсутні колектор, обмотки додаткових полюсів і компенсаційна);

5) можливість повної автоматизації режиму ведення поїзда;

7) скорочення витрати міді на виготовлення тягових двигунів. За результатами проектування останніх зразків колекторних тягових двигунів пульсуючого струму і асинхронних тягових двигунів витрата міді на виготовлення останніх знижується в 2-2,5 рази;

Перераховані переваги не залишають сумнівів у доцільності широкого впровадження асинхронних тягових двигунів в електричній тязі. Наявний досвід проектування і роботи електрорухомого складу з названими двигунами повністю це підтверджує.

1.2. Керування асинхронним тяговим двигуном

Одним з основних завдань системи управління тяговими двигунами є формування в заданих обмеженнях тягових і гальмівних характеристик відповідно з режимом роботи тягової рухомої одиниці. Так як задача побудови систем автоматичного управління тяговим приводом є досить широкою і не може бути детально викладена в рамках даного проекту, то розгляд обмежений основними питаннями, пов'язаними з формуванням статичних характеристик тягового приводу.

Наведена нижче схема показує існуючі способи регулювання частотою обертання асинхронного тягового двигуна.

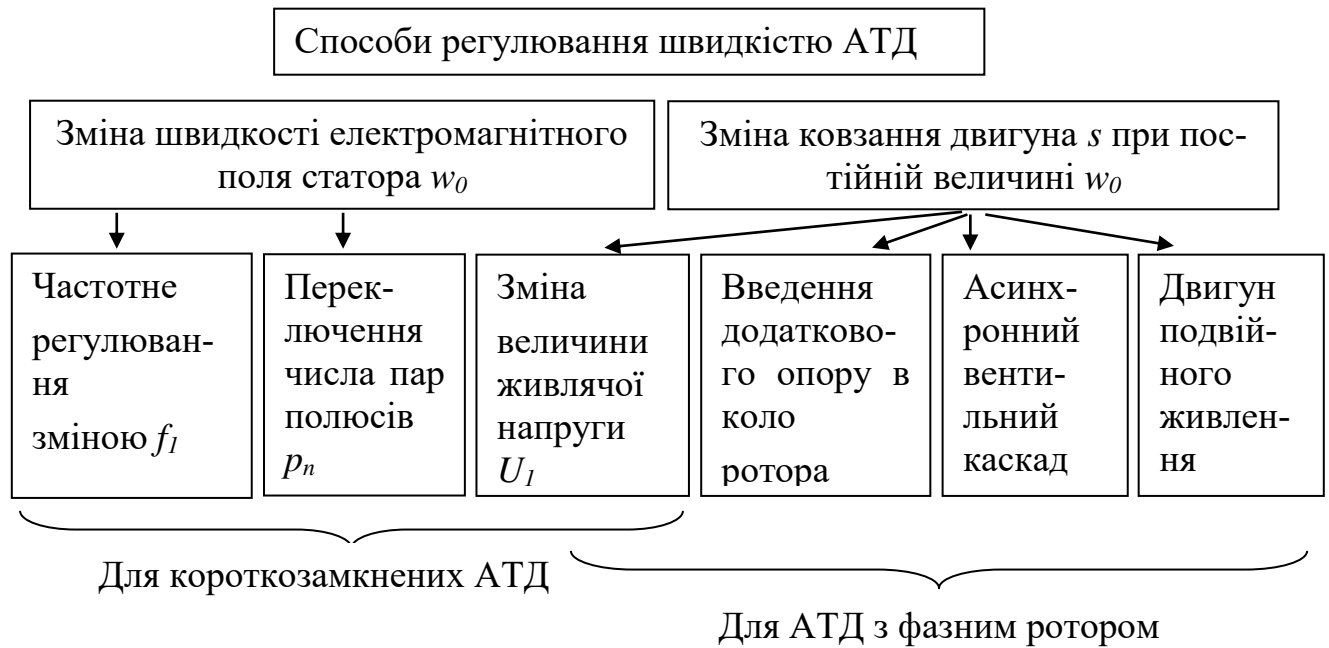


Рисунок 1.2. Способи керування швидкістю АТД

Сьогодні частотне керування є для асинхронного приводу свого роду технічним стандартом. У той же час практично вийшли з експлуатації і не використовуються в сучасних розробках такі способи управління як симетричне і несиметричне керування напругою, управління введенням додаткових опорів в колах статора і ротора, управління зміною числа пар полюсів тощо.

1.2.1. Частотне регулювання швидкості АТД

Так як метою даної роботи є дослідження впливу нових типів ЕРС на роботу тональних рейкових кіл, доцільно розглянути саме частотне керування асинхронним тяговим двигуном.

Принцип частотного методу регулювання швидкості асинхронного двигуна полягає в тому, що, змінюючи частоту живлячої напруги f , можна відповідно з виразом

$$n = 60 f / p, \quad (3.1),$$

при незмінному числі пар полюсів p змінювати кутову швидкість n магнітного поля статора. Цей спосіб забезпечує плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні, а механічні характеристики мають високу жорсткість.

Для отримання високих енергетичних показників асинхронних двигунів (коефіцієнтів потужності, корисної дії, перевантажувальної здатності) необхідно одночасно з частотою змінювати і підведену напругу. Закон зміни напруги залежить від характеру моменту навантаження. При постійному моменті навантаження напруга на статорі повинна регулюватися пропорційно частоті.

Реалізувати можливість частотного регулювання швидкості АД вдалося лише з появою нової елементної бази - силових модулів на базі IGBT (біполярних транзисторів з ізольованим затвором), які розраховані на струми до декількох кілоампер, напругою до декількох кіловольт і мають частоту комутації 30 кГц і вище.

Велика частина приводів змінного струму живиться від промислової трифазної мережі, тому силова частина систем частотного управління зазвичай називається перетворювачем частоти, тому що вона формує в обмотках статора АД напруги і струми з частотою відмінною від частоти джерела живлення.

1.2.2. Перетворювачі частоти та їх елементна база

Існує два основних типи перетворювачів частоти: з безпосереднім зв'язком і з проміжним контуром постійного струму. У першому випадку вихідна синусоїдна напруга формується з ділянок синусоїд перетвореної вхідної напруги. При цьому максимальне значення вихідної частоти принципово не може бути рівним частоті живильної мережі. Частота на виході перетворювача цього типу зазвичай лежить в діапазоні від 0 до 25-33 Гц. Але найбільшого поширення набули перетворювачі частоти з проміжним контуром постійного струму, виконані на базі інвер-

торів напруги. Перетворювачі частоти, що встановлюються на ЕРС, служать для узгодження параметрів електричної енергії первинних джерел з параметрами електричної енергії на затискачах тягових двигунів. В якості первинного джерела електричної енергії для ЕРС використовується контактна мережа постійного або змінного струму з різними рівнями напруги і частоти, при цьому контактна мережа, як правило, має досить малий опір, що дозволяє розглядати її як джерело напруги.

У перетворювачах частоти з АІН напруга мережі спочатку випрямляється, а потім інвертується в змінну напругу необхідної частоти, тобто відбувається двоступеневе перетворення енергії за схемою змінний струм - постійний струм - змінний струм. Перетворювач частоти являє собою комбінацію випрямляча та автономного інвертора з проміжним контуром постійного струму. На практиці знайшли застосування два основних структурних варіанти перетворювачів частоти з АІН, що відрізняються методом регулювання напруги:

1) Амплітудне регулювання напруги за допомогою керованого випрямляча (Рисунок 3.3, а);

2) Широтно-імпульсна модуляція, здійснювана в АІН, який в цьому випадку виконує функції регулятора напруги і частоти (Рисунок 3.3, б).

3) Широтно-імпульсна модуляція, здійснювана в АІН, на вході якого встановлений керований випрямляч (Рисунок 3.3, в).

При амплітудному регулюванні напруги перетворювач частоти складається з керуючого випрямляча, фільтра і автономного інвертора (регулювання напруги і частоти здійснюється окремо).

Автономний інвертор представляє собою реверсивний перемикач, формуючий періодичні прямокутні різнополярні імпульси, апроксимуючі синусоїду напруги з випрямленої напруги.

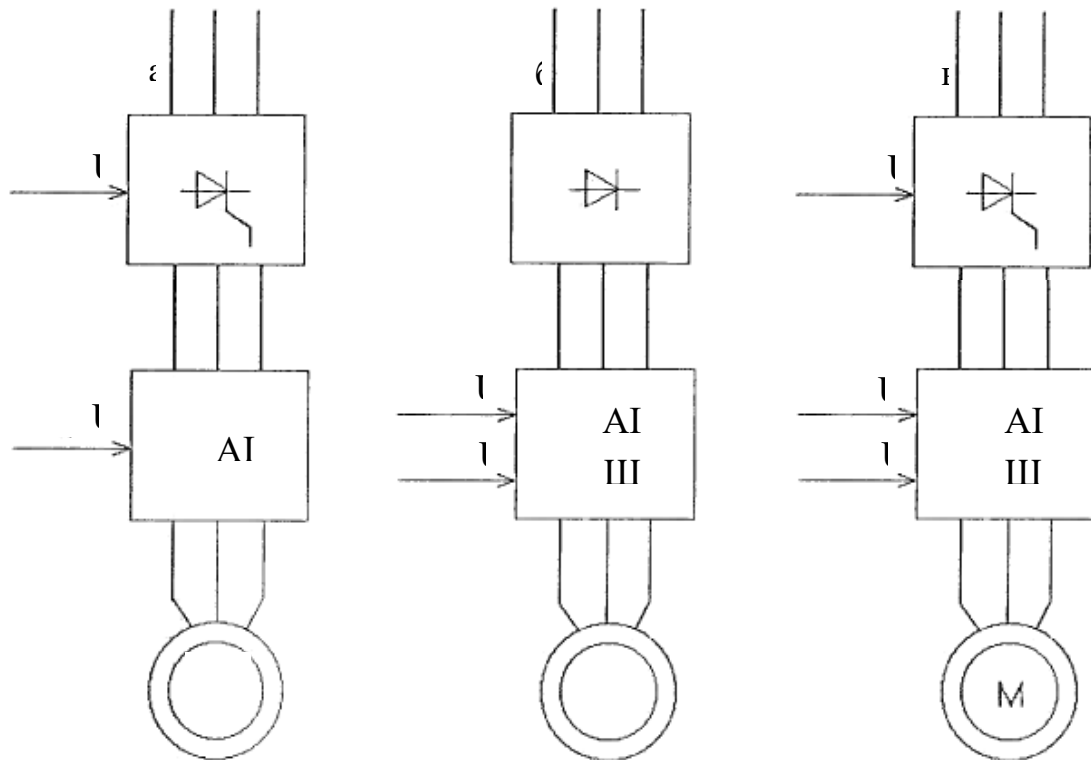


Рисунок 1.3. Типи перетворювачів частоти

За другим варіантом структури перетворювача частоти з АІН здійснюється формування вихідної напруги за методом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) напруги в самому інверторі (Рисунок 3.3, 6). При цьому інвертор не тільки змінює частоту вихідного напруги, але і регулює його середнє значення, що дозволяє відмовитися від регульованого випрямляча в контурі постійного струму і використовувати більш простий нерегульований діодний випрямляч.

Досягнення в галузі розробки і випуску нового покоління перетворювачів частоти пов'язані, в першу чергу, із створенням сучасних, повністю керованих, елементів силової електроніки та мікропроцесорних засобів управління. Такі ПЧ виробляються з використанням силових модулів і силових гібридних інтегральних (інтелектуальних) модулів на основі польових і біполярних транзисторів з ізольованим затвором типу IGBT, із зворотними швидко відновлюваними діодами. Модулі відносяться до класу повністю керованих ключів з високим рівнем комутованої напруги й сили струму при малих втратах, невеликих значеннях потужності

керування і часу перемикання. Границя комутуючих напруг досягає 3,5 кВ, а сила струму до 4 кА.

IGBT (англ. Insulated Gate Bipolar Transistor) - силовий електронний пристрій, біполярний транзистор з ізолюваним переходом. Застосовується для управління електричними приводами. Існують як окремі IGBT, так і сілові збірки (модулі) для управління мережами трифазного електричного струму.

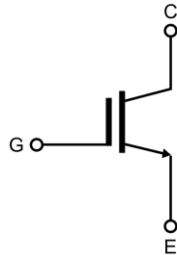


Рисунок 1.4. Умовне позначення IGBT

Тягові перетворювачі на базі транзисторів IGBT вигідно відрізняються двома особливостями, важливими для залізниць. Насамперед, ці пристрої створюють потенційні можливості для зниження витрат, головним чином завдяки здешевленню збірки і підвищенню ефективності тягових систем. Друга особливість, яка сприяла швидкому впровадженню перетворювальної техніки на базі транзисторів IGBT, полягає в підвищеній надійності та експлуатаційній готовності тягових систем.

Напівпровідникові прилади виконують на кремнієвих кристалах, з'єднаних паралельно (багатокристална конструкція). Такі прилади можна включати паралельно, для чого достатньо лише правильно привести параметри до стандартних умов. Тим самим забезпечується можливість простими засобами змінювати розрахункові значення потужності перетворювачів відповідно з пред'явленими вимогами.

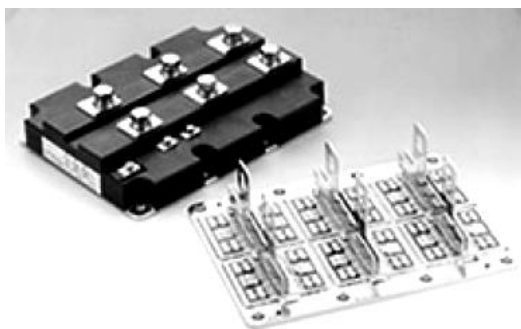


Рисунок 1.5. Стандартний корпус модуля на напругу 1,7 кВ на базі IGBT

2. СУЧАСНІ РЕЙКОВІ КОЛА ТА СИСТЕМИ АВТОБЛОКУВАННЯ

2.1. Рейкові кола

У межах блок-ділянки в залежності від її довжини організовується 2 ... 4 ТРК. При довгих БД або за наявності переїзду може бути встановлено більше 4-х ТРК. У зв'язку з тим, що в системі АБТЦ виключені рейкові кола типу ТРЦК, передбачено використання п'яти несучих частот (420, 480, 580, 720 і 780 Гц). Модулюючі частоти, як і в АБТ, - 8 і 12 Гц. За призначенням у системі АБТЦ розрізняють такі рейкові кола:

РК1 - короткі РК, які організовуються за світлофором для більш чіткої фіксації кордону БД. Для них рекомендуються частоти 780, 720 або 580 Гц. При довжині РК до 200 ... 350 м зона додаткового шунтування не перевищує 40 м. Тому точка підключення апаратури вносився за світлофор на 40 м у напрямку руху. РК1 може примикати до кордону БД як живлячим, так і релейним кінцем.

РК2 - рейкове коло, що має загальний генератор з РК1. Гранична допустима довжина цього РК вибирається виходячи з умови роботи приймача РК1 без перевантаження.

РК3 - рейкові кола, які не мають загального генератора з РК1. Довжини цих РК вибираються виходячи з умови застосування на БД мінімального числа РК, але не більше гранично допустимої довжини.

Гранично допустимі довжини L1, L2, L3 зазначених рейкових кіл наведено в таблиці 2.1 залежно від їх призначення, несучої частоти і довжини з'єднувального кабелю.

Таблиця 2.1

Гранично допустимі довжини рейкових кіл

L _{каб.} , км	580 Гц		720 Гц		780 Гц		420; 480 Гц	580;720; 780 Гц
	L1, м	L2, м	L1, м	L2, м	L1, м	L2, м	L3, м	L3, м
До 6,0	300	550	350	600	350	600	1000	800
6,0-9,0	300	500	350	500	350	500	800	600
9,0-12	-	-	200	400	200	400	700	500

Якщо в межах якої-небудь РЦ розташований дросель-трансформатор, призначений для вирівнювання тягового струму, включення між колійних перемичок, відсмоктувальних фідерів або пристрою заземлень, то її гранична довжина зменшується в 1,5 рази в порівнянні з даними, зазначеними в табл. 5.1. У межах Рц1 такі ДТ, як правило, не встановлюються. Підключення до середньої точки основної обмотки ДТ між колійних перемичок, відсмоктувальних фідерів і заземлень має здійснюватися не частіше, ніж через 5 ... 6 км. Цим виключається вплив обхідних кіл на основні режими роботи РК. Частоти генераторів ТРК чергуються і повинні вибиратися виходячи з таких вимог:

- між двома ТРК з однаковими значеннями несучої частоти f_n

повинно бути не менше двох пар рейкових кіл з частотами, відмінними від частоти f_n (наприклад, 420, 580, 480, 420, ... Гц);

- для однієї колії рекомендуються такі комбінації несучих

і модулюючих частот - 580/8, 480/12, 780/8, 420/12, 720/8 Гц; для іншої - 580/12, 480/8, 780/12, 420/8, 720/12 Гц.

Принципові схеми рейкових кіл аналогічні рейковим ланцюгам системи АБТ. Відмінність полягає в тому, що в розглянутих РК (як і в інших схемах АБТЦ) дублювання реле не передбачено. Змінена також схема пристроїв узгодження і захисту в місцях установки ДТ. У цих випадках підключення апаратури ТРК до РЛ здійснюється через додаткову обмотку ДТ, який крім основної функції виконує роль узгоджувального трансформатора. При цьому захисний резистор і автоматичний вимикач не встановлюються, а вирівнювач встановлюється на посту ЕЦ у зв'язку з відсутністю колійного ящика. Встановлення зовнішніх перемичок для налаштування генераторів і фільтрів на необхідні несучі та модулюючі частоти здійснюється згідно таблиць налаштувань (див. табл. 2.2 і табл. 2.3). Вибір виводів приймачів ПП для підключення колійних реле здійснюється в відповідності до різновидом приймача, яка визначається його налаштуванням. Вихідний опір фільтрів ФПМ вибирається залежно від довжини з'єднувального кабелю: при довжині

кабелю більше 5 км використовуються виводи 12-61; при довжині менше 5 км - виводи 12-62 або 12-63 в відповідності з регулювальною таблицею ТРК.

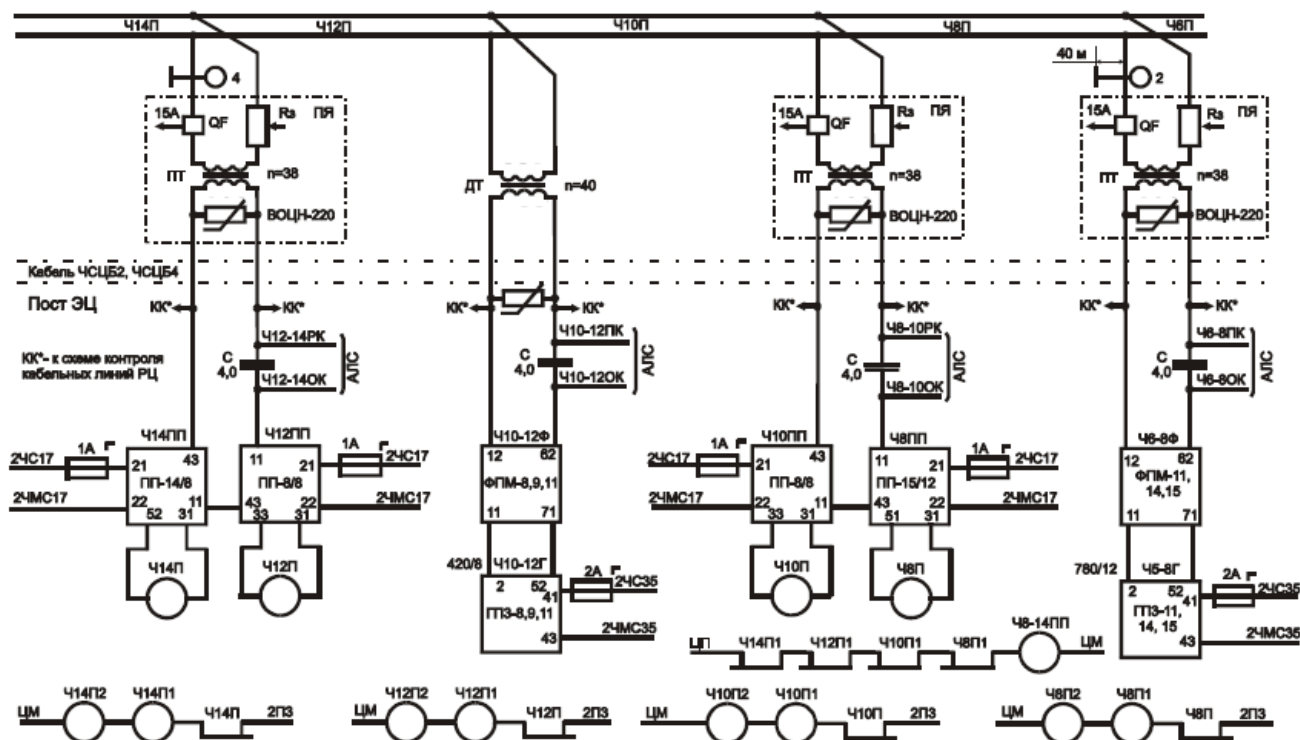


Рисунок 2.1. Схеми рейкових кіл системи АБТЦ

Опір захисного резистора R_z вибирається таким чином, щоб в сумі з опором з'єднувальних проводів отримати 0,2-0,3 Ом. Для здійснення схемних залежностей використовуються повторювачі коїйних реле: ... П1, ... П2 - два повторювача коїйного реле кожного РК (наприклад, Ч8П1 і Ч8П2); Ч8-14ПП - груповий повторювач всіх РК одної БД, 2ЧПП - груповий повторювач всіх коїйних реле другої коїї, що примикає до парної горловині станції.

Таблиця 2.2

Налаштування фільтрів ФПМ

Тип	Несущая частота, Гц	Конденсаторы	Общая емкость, мкФ	Выводы обмоток TV	Перемычки
ФПМ 8,9,11	420	С5, С6, С7, С8	4,85	1-4	43-23-22-21-83
	480	С6, С7, С8	4,38	1-3	42-23-22-21
	580	С2, С3, С7, С8	4,07	1-2	41-23-22-73-81
ФПМ 11,14,15	580	С2, С3, С7, С8	4,07	1-4	43-23-22-73-81
	720	С4, С5, С6, С8	3,68	1-3	42-23-21-82-83
	780	С3, С5, С6, С8	3,57	1-2	41-23-21-81-83

Таблиця 2.3

Налаштування генераторів ГПЗ

Тип ГПЗ	Несущая/модулююча частота, Гц		Перемычки			
			генератора несущей частоты	генератора модулюющей частоты	настройки в резонанс	подключения выходного каскада
ГПЗ/8,9,11	420	8	12-23	62-42	81-73	83-72 3-4 51-61
		12		62-33		
	480	8	12-21	62-42	81-63	
		12		62-33		
	580	8	12-22	62-42	81-82	
		12		62-33		
ГПЗ/11,14,15	580	8	12-22	62-42	81-73	
		12		62-33		
	720	8	12-13	62-42	81-63	
		12		62-33		
	780	8	12-11	62-42	81-82	
		12		62-33		

2.2. Автоблокування з використанням тональних рейкових кіл

Основними відмінними особливостями системи АБТ являються:

1. Децентралізоване розміщення апаратури з установкою прохідних світлофорів.
2. Застосування ТРК без установки ізолюючих стиків між рейковими колами та на границях БД.
3. Використання ТРК4 для більш чіткої фіксації границь блок ділянок.
4. Передача інформації між сигнальними установками по лінійних колах.
5. Наявність захисних ділянок за прохідними світлофорами.
6. Двосторонню дію автоблокування по кожній колії двоколійного перегону.
7. Наявність схеми контролю втрати шунта під рухомою одиницею.

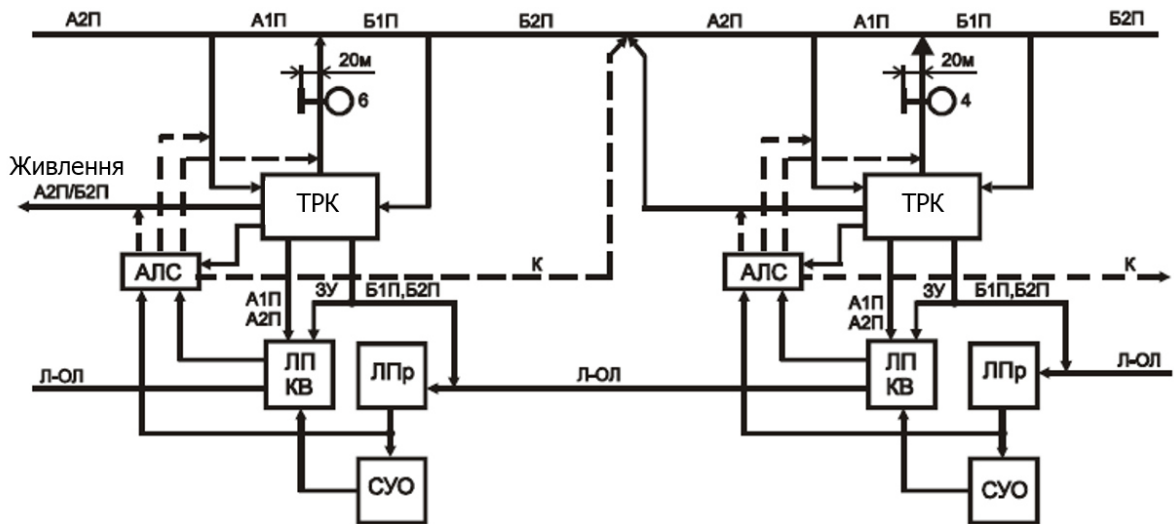


Рисунок 2.2. Структурна схема АБТ

До особливостей побудови електричних схем слід віднести дублювання основних реле і використання принципу двополюсного розмикання при реалізації схемних залежностей. У відповідності зі структурною схемою основними вузлами АБТ є: рейкові кола ТРК, лінійне коло Л-ОЛ з лінійним передавачем ЛП і приймачем ЛПр для ув'язки показань світлофорів, схема управління вогнями світлофора СУО, схема напільних пристроїв системи АЛС. У лінійне коло введено також кодовомикаюче реле КВ. Крім того, до основних вузлів АБТ слід віднести лінійні кола ув'язки з пристроями електричної централізації і переїзними пристроями та схему виключення дозволяючого показання світлофора при втраті шунтаї.

Рейкові кола тональної частоти (ТРК) володіють рядом експлуатаційних, технічних та економічних переваг. Використання сигнального струму тонального діапазону дозволяє підвищити захищеність від впливу перешкод тягового струму, практично на порядок знизити споживану потужність, застосувати сучасну елементну базу, виключити взаємні впливи між рейковими колами. Застосування необмежених рейкових кіл дозволяє виключити малонадійні в експлуатації ізолюючі стики, істотно скорочує число використовуваних дросель-трансформаторів, знижує втрати електроенергії на тягу поїздів.

На основі тональних рейкових кіл розроблені й функціонують ряд систем автоблокування з децентралізованим і централізованим розміщенням апаратури. Вони заміняють системи автоблокування з імпульсним і кодовим живленням і успішно конкурують з фазочуттєвими рейковими колами на станції, вони можуть застосовуватися на одноколієних і багатокілієних лініях з будь-яким родом тяги поїздів.

2.2.1. Автоблокування з тональними рейковими колами і централізованим розміщенням апаратури (АБТЦ)

Основними відмінними особливостями системи АБТЦ є: використання ТРК, відсутність ізолюючих стиків, наявність прохідних світлофорів і розміщення основного обладнання на станціях, що обмежують перегін.

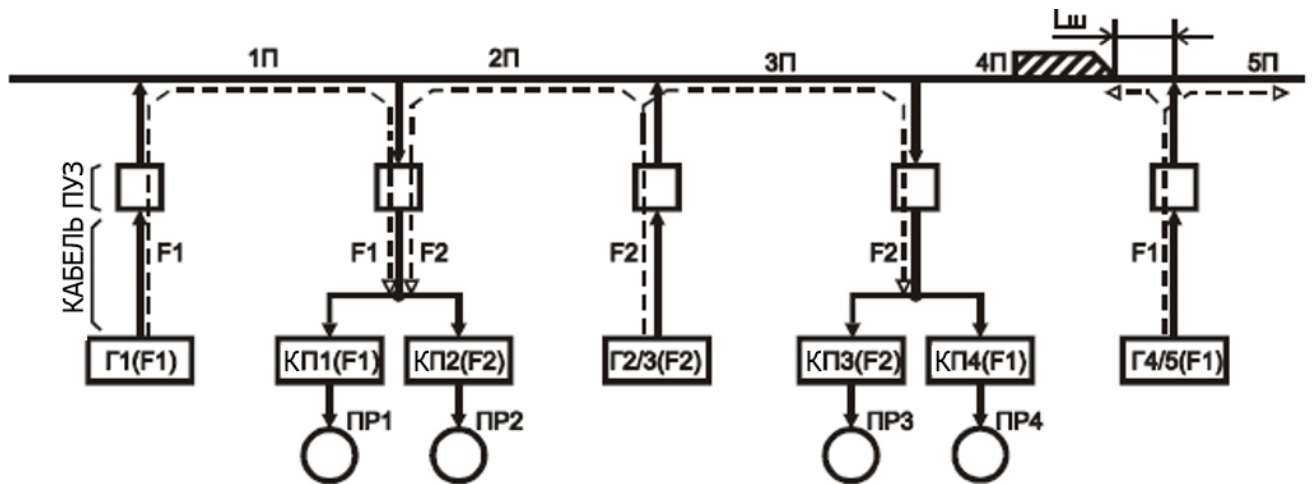


Рисунок 2.3. Структура ТРК

Як уже зазначалося, основною відмінною рисою ТРК є живлення двох суміжних РЦ від одного загального джерела сигнального струму (генератора) і можливість роботи без ізолюючих стиків. Така побудова ТРК скорочує число апаратури, кабелю для з'єднання апаратури з рейкової лінією, використовуваних частот сигнального струму і дозволяє просто реалізувати рейкові кола без ізолюючих стиків. Сигнальний струм частотою $F1$ або $F2$ від генераторів Γ подається в рейкову лінію, по якій розповсюджується в обидві сторони від точки підключення. Від

генератора Г1 живиться рейкове коло 1, від генератора Г 2/3 - рейкові кола 2 і 3 і т. д. Колійні приймачі КП1 і КП2, КП3 і КП4 підключаються до загальної точки релейних кінців РК. Приймачі володіють властивостями частотної селекції і пороговими властивостями, тобто реагують на сигнал певної частоти і амплітуди. Колійні реле на виходах приймачів нормально збуджені. При знаходженні рухомої одиниці (або зламі рейки), наприклад, на 4П колійне реле ПР4 знеструмлюється. Збудження цього реле від сигнального струму рейкового кола 3П виключено через велике загасання частоти F2 в приймачі КП4 (F1). Виключається і можливість збудження цього реле сигнальним

струмом частоти F1 від генератора Г1 рейкового кола 1П через природне загасання в рейковій лінії протягом трьох рейкових кіл. Розрахунки показали, що рівень перешкоди від цього сигналу буде приблизно в 100 разів нижче рівня корисного сигналу, що надходить на обмотку реле від генератора власного рейкового кола.

Централізоване розміщення апаратури АБТЦ приводить до збільшення витрати кабелю і знижує живучість системи в цілому, однак, має ряд істотних переваг:

- Забезпечує роботу обладнання в сприятливих умовах опалюваного приміщення, що підвищує надійність і довговічність приладів;
- Виключає необхідність передачі інформації між світлофорами, на переїзди і на станцію, що спрощує схемні залежності автоблокування, диспетчерського контролю та схеми зміни напрямку; зрештою підвищується надійність системи в цілому;
- Полегшує технічне обслуговування пристроїв і знижує витрати на обслуговування, значно скорочує час пошуку та усунення несправностей;
- Полегшує працю обслуговуючого персоналу, істотно зменшує час роботи на відкритому повітрі і в зоні підвищеної небезпеки в безпосередній близькості рухомих поїздів;

- Знижує вартість системи за рахунок виключення витрат на обладнання сигнальних точок релейними шафами, лінійними трансформаторами високовольтних ліній і кабельними ящиками, а також за рахунок спрощення схем.

З метою підвищення ефективності перевізного процесу, надійності пристроїв і безпеки руху в системі АБТЦ передбачено:

1. Двосторонній рух по кожній колії двоколійного перегону.
2. Наявність захисних ділянок для обох напрямів руху.
3. Застосування двониткових ламп червоного вогню на всіх прохідних світлофорах, а також жовтого вогню на передвхідних світлофорах.
4. Контроль справності жил кабелю рейкових кіл.
5. Контроль перемикання жил кабелю живлення ламп прохідних світлофорів.
6. Контроль послідовності заняття рейкових кіл при включенні кодових сигналів АЛС.
7. Більш досконала схема контролю правильності заняття та звільнення рейкових кіл блок-ділянки (контроль втрати шунта) з блокуванням світлофорів і схем кодування АЛС.

Недоліками ТРК є мала гранична довжина і наявність зони додаткового шунтування.

Основними вузлами станційних пристроїв системи є (див. структурну схему АБТЦ):

постове обладнання рейкових ланцюгів, схеми включення та контролю ламп прохідних світлофорів, схеми кодування рейкових кіл для передачі інформації на локомотив, схеми замикання і розмикання перегінних пристроїв з метою виключення небезпечних ситуацій при втраті шунта. Крім того, в роботі системи беруть участь лінійні ланцюги, схема зміни напрямку, схема ув'язки з пристроями електричної централізації і переїзними пристроями (на структурній схемі не показані).

У схемах ТРК передбачений контроль справності жил кабелю. При перемикання жил схема контролю відключає живлення рейкових кіл, при обриві - включає відповідну індикацію на пульті.

Колійні приймачі контролюють стан рейкових кіл тієї частини перегону, яка віднесена до даної станції. Колійні реле цих РК впливають на сигнальні реле, які забезпечують вибір необхідних показань прохідних світлофорів та кодових сигналів АЛС. Крім того, колійні реле впливають на схеми включення кодових сигналів в рейкові кола і на блокуючі реле, керують схемами контролю послідовного зайняття рейкових кіл та схемами контролю послідовного звільнення РК.

У схемах управління вогнями світлофорів передбачений контроль справності жил кабелю. При обриві жил забезпечується включення на табло індикації про перегорання нитки лампи світлофора, а в ряді випадків (при обриві прямої жили основної нитки двониткової лампи) здійснюється підключення резервної нитки. При перемикання прямої і зворотної жил проводиться відключення живлення ламп світлофора.

Для передачі на локомотив інформації про умови руху передбачений формувач сигналів АЛС. Схема вибору сигналів АЛС вибирає необхідні кодові комбінації в залежності від стану сигнальних реле.

Схема включення кодових сигналів подає їх в рейки зайнятої РК по команді відповідного колійного реле. При цьому кодові сигнали подаються в рейки тільки за умови дотримання послідовності їх зайняття. При накладенні стороннього шунта, зламі рейки або помилкової зайнятості рейкового кола схема контролю послідовного зайняття рейкових кіл забороняє передачу дозвільних кодових сигналів. Цим виключається можливість включення на локомотивному світлофорі дозволяючого показання при наближенні до закритого прохідного світлофора.

Кодові сигнали АЛС подаються в рейки за існуючими живильних та релейним жилах кабелю рейкових кіл.

Схеми замикання і розмикання перегінних пристроїв включає в себе блокуючі реле і схеми контролю послідовного звільнення рейкових кіл. При вступі поїзда на

яку-небудь блок-ділянку блокуюче реле впливає на сигнальні реле цієї блок-ділянки, чим виключається відкриття світлофора, що огорожує дану БД, і вибір дозволяючого кодового сигналу для попередньої блок-ділянки (замикання блок-ділянки).

Розмикання блок-ділянки проводиться автоматично за участю схеми контролю послідовного звільнення рейкових кіл цієї БД і захисної ділянки. Порушення зазначеної послідовності при звільненні блок-ділянки може бути наслідком втрати шунта при фактично зайнятій БД або захисній ділянці. При цьому розмикання блок-ділянки не відбувається і дозволяючий сигнал не включається.

Для розмикання блок-ділянки при помилковій зайнятості або несправності схеми в системі АБТЦ передбачена схема штучного розмикання, яку в інструктивному порядку проводить черговий по станції відправлення.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НОВИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ НА РОБОТУ РЕЙКОВИХ КІЛ

3.1. Схемотехнічне моделювання

Для побудови схемотехнічної моделі був використаний пакет аналізу електричних кіл OrCAD Pspice. Була створена модель автономного інвертора напруги на базі транзисторів IGBT. Для спрощення напруга проміжної ланки вважається вільною від сторонніх завад та моделюється джерелом постійної напруги. Навантаженням інвертора є обмотки статора асинхронного тягового двигуна, що моделюються індуктивним та активним опором. Стандартні моделі IGBT транзисторів не задовольняють умовам роботи тягового перетворювача, тому за допомогою редактора моделей було створено власну модель. Параметри моделі IGBT визначалися з характеристик транзистора, що були побудовані у редакторі моделей.

Отримана модель, за допомогою пристрою керування, дозволяє змінювати вихідну частоту інвертора, тим самим моделюючи різну швидкість локомотива.

3.1.1. Структурна та принципова схема силових кіл

Структурна схема живлення АТД на сучасного ЕРС (Рисунок 3.6) складається з наступних основних елементів: мережений фільтр, вхідний чотирьох квадрантний регулятор (4qS), проміжна ланка постійної напруги (Z), автономний інвертор (PWR), асинхронний тяговий двигун (ASM) та система керування.

Через мережений фільтр, задачею якого є зниження до задовільного рівня струмів вищих гармонік контактної мережі та зворотних впливів перетворювача на мережу, відбувається живлення чотирьох квадрантного регулятора (4QS) від контактної мережі змінного струму. Чотирьох квадрантний регулятор працює як керований випрямляч, на його виході отримуємо постійну напругу, рівень якої залежить від потужності тягового приводу. Ця постійна напруга з проміжної ланки

потрапляє на вхід автономного інвертора(PWR), який перетворює її у трьох фазну змінну напругу регульованої частоти та величини. Керування роботою інвертора та вхідного регулятора відбувається на базі мікропроцесорів[16,19].

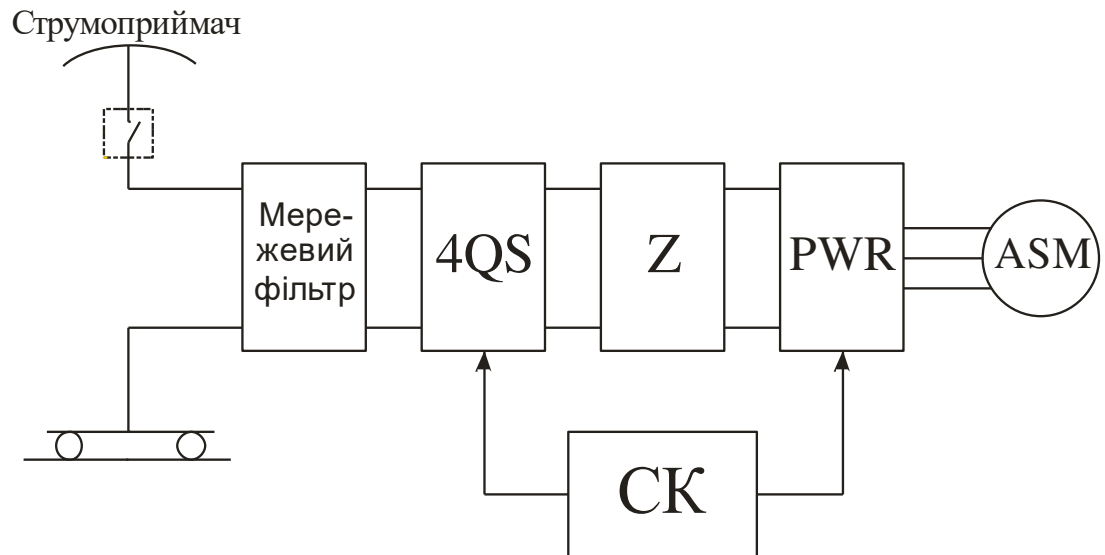


Рисунок 3.1. Структурна схема асинхронного тягового приводу

Схема керування виконує всі необхідні функції по перемиканню транзисторів, діагностиці схеми, її захисту та відновленню нормального режиму роботи при відмовах. Завдяки фазовому керуванню роботою загальний рівень гармонік суттєво знижується, чим забезпечується майже синусоїдальна форма кривої струму. Частота сформованої на виході інвертора трифазної напруги визначає швидкість обертання асинхронного двигуна.

Тяговий перетворювач - силовий модуль, призначений в основному для асинхронних приводів, є основним елементом силових кіл електровоза. На Рисунок 3.7 та 3.9. показані принципові схеми тягових перетворювачів для мереж змінного і постійного струмів відповідно.

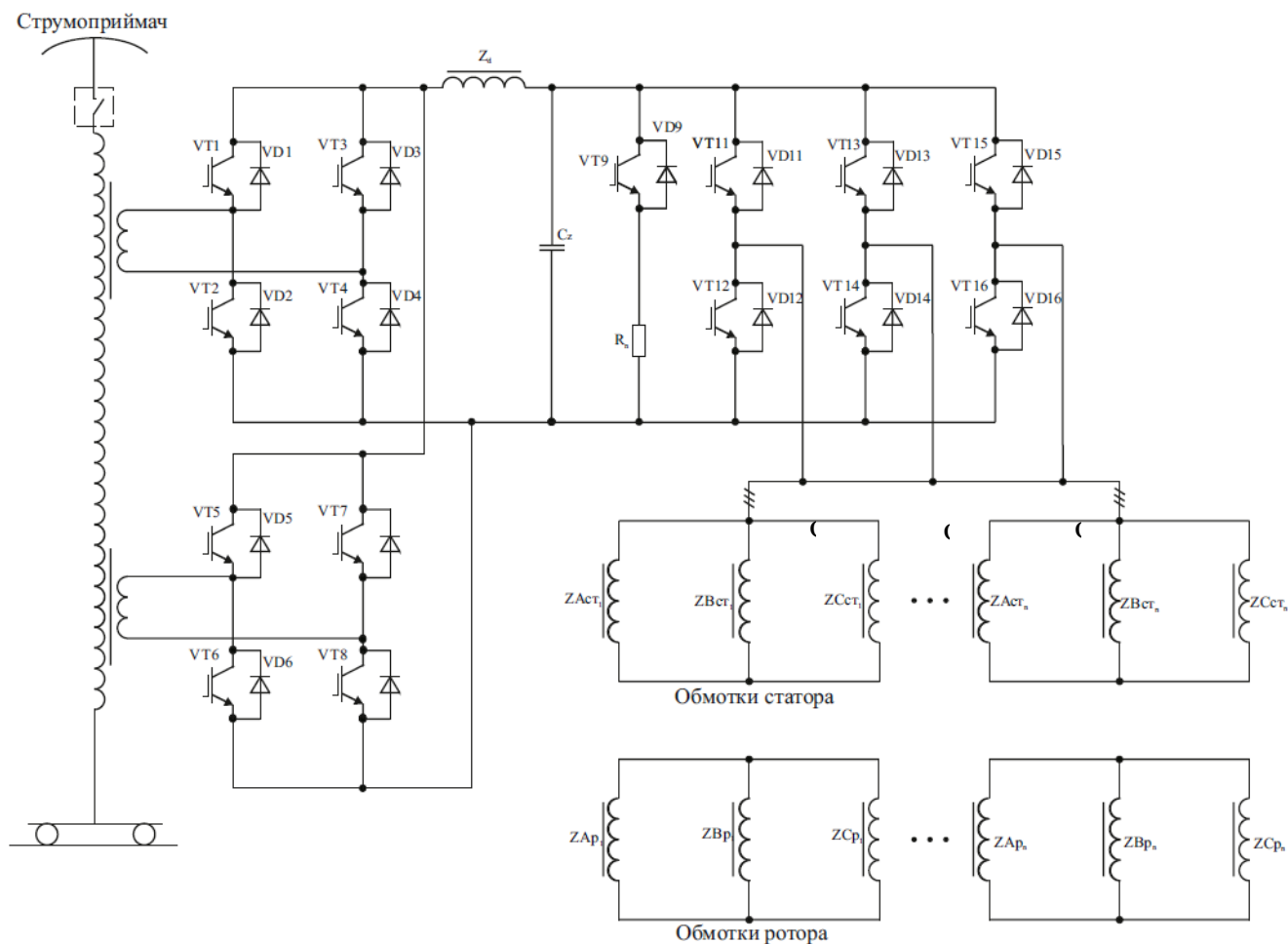


Рисунок 3.2. Схема тягових перетворювачів для мережі змінного струму

У схемі перетворювача змінного струму електрична енергія через струмоприймач з контактної мережі потрапляє на первинну обмотку тягового трансформатора і з його вторинної обмотки надходить на керований випрямляч, потім згладжується елементами фільтру, потрапляє на проміжну ланку постійної напруги, з якої вже керована за частотою напруга надходить на обмотки статора АТД. Розглянемо детальніше роботу інвертора. Автономний інвертор напруги (АІН) формує на виході змінну напругу заданої прямокутно-ступінчастою форми, а форма кривої струму визначається властивостями навантаження

Схему розглядуваного АІН зображено на Рисунок 3.7. Відмітна особливість АІН полягає в тому, що паралельно основним транзисторам VT11 – VT16 вклю-

чені діоди VD11-VD16. При такому з'єднанні тиристор і діод представляють собою ключ з двосторонньою провідністю. Наприклад, при підключенні фази А до «плюса» живильного джерела U_d через транзистор VT11 може протікати струм навантаження прямого напрямку (від точки А до точки 0), а через діод VD11 може протікати струм навантаження зворотного напрямку. Тому діоди VD11 – VD16 називають діодами зворотного струму.

Нехтуючи незначним падінням напруги в транзисторі і діоді при їх провідному стані, можна вважати, що потенціал на виході інвертора (тобто потенціал точок А, В, С) дорівнює або потенціалу позитивного полюса живильного джерела (при провідному стані транзисторів VT11, VT13, VT15 або діодів VD11, VD13, VD15), або потенціалу негативного полюса живильного джерела (при провідному стані транзисторів VT12, VT14, VT16 або діодів VD12, VD14, VD16).

Якщо протягом періоду вихідної напруги здійснювати багаторазове включення і виключення тиристорів, то АІН дозволяє регулювати вихідну напругу при незмінній входній напрузі U_d . В розглядуваному проекті інвертор регулює тільки частоту, а регулювання напруги проводиться на вході інвертора внаслідок зміни напруги U_d . Для цієї мети використовують керований випрямляч при живленні від мережі змінного струму (Рисунок3.7) або імпульсний переривач при живленні від мережі постійного струму (Рисунок3.9). В даному прикладі розглядаємо живлення від мережі змінного струму.

Напругу U_d приймаємо ідеально згладженою. Розглянемо алгоритм 180° градусного управління АІН, при якому інтервал провідності кожного з транзисторів VT11 – VT16 дорівнює половині періоду вихідної напруги. Вважаємо, що фази навантаження симетричні і з'єднані в зірку.

Діоди і транзистори, під'єднані до «плюса» джерела живлення U_d , тобто діоди і транзистори з індексами 11, 13, 15 відносяться до плюсової (анодної) групи, а транзистори і діоди з індексами 12, 14, 16, під'єднані до «мінуса» живильного джерела, - до мінусової (катодної) групи.

Щоб на виході АІН була сформована симетрична трифазна система напруг, зони провідності транзисторів однойменної групи повинні бути зсунуті відносно один одного на 120° і 240° , а зони провідності протифазних транзисторів, що належать одній фазі (тобто VT11 і VT12, VT13 і VT14, VT15 і VT16), - на 180° (Рисунок 3.8).

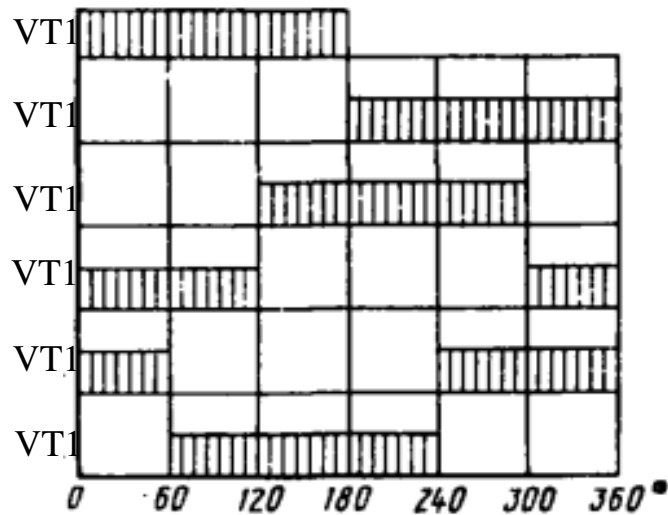


Рисунок 3.3. Схема тягових перетворювачів для мережі постійного струму

Розглянемо інтервал, який слідує за моментом 180° . Якщо навантаження було б чисто активним, то відразу ж після вимкнення транзистора VT11 і включення VT12 сталася б зміна полярності напруги і напрямку струму фази А. Оскільки струм статора асинхронної машини містить індуктивну складову, то після виключення транзистора VT11 струм фази А на інтервалі від 180° до $(180 + \varphi_0)^\circ$ зберігає попередній напрямок. Хоча сигнал управління для включення транзистора VT12 в цей час поданий, він не може проводити струм фази А такого напрямку. Тому після виключення транзистора VT11 вступає в роботу діод VD12, через який струм фази А протікає на інтервалі від 180° до $(180 + \varphi_1)^\circ$. До транзистора VT12 в цей час прикладено невелику зворотну напругу, яка рівна падінню напруги на діоді VD12.

Напруга на фазі А при цьому рівна тому ж значенню, що і при чисто активному навантаженні. Із описаного вище випливає, що АІН володіє цінною властивістю в режимі 180-градусного управління, яка полягає в тому, що вихідна напруга інвертора (значення і форма) не залежить від коефіцієнта потужності навантаження. Тому при використанні в тяговому електроприводі автономний інвертор напруги працює, як правило, в цьому режимі. Проте в початковій стадії пуску асинхронного тягового двигуна доцільно використовувати алгоритм 150-градусного управління. При цьому включення транзисторів здійснюється із затримкою 30 градусів після виключення відповідного транзистора даної фази.

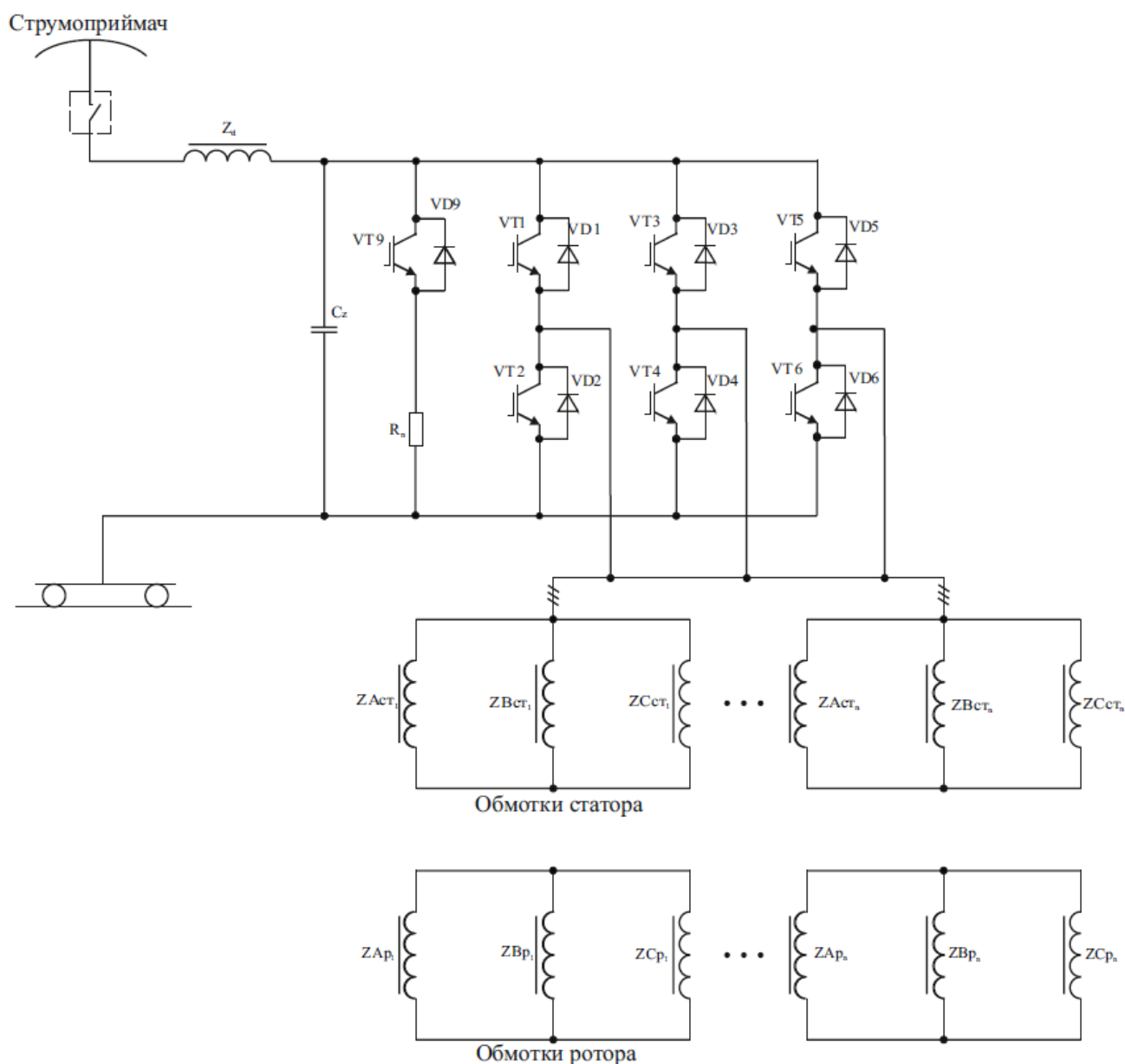


Рисунок 3.4. Схема тягових перетворювачів для мережі постійного струму

3.2. Визначення параметрів моделі

В даному розділі проведений розрахунок параметрів керуючих імпульсів та асинхронного тягового двигуна. Ці параметри в подальшому використовуються при моделюванні роботи АТД в пакеті моделювання OrCAD Pspice.

3.2.1. Розрахунок часових параметрів керуючих імпульсів

Період керуючих імпульсів рівний 360^0 незалежно від швидкості руху локомотива (частоти імпульсів на вході інвертора). Тоді для визначення часових параметрів імпульсів керування транзисторами приймемо, що для збільшення швидкості на 1 км/год необхідно збільшити частоту вихідних імпульсів на 1 Гц [Ротанов]. Період імпульсів $T=360^0$, отже частота імпульсів визначається за формулою

$$f = \frac{1}{360^0} . \quad (3.2)$$

Швидкість руху $v \approx f$, тоді

$$v = \frac{1}{360^0} . \quad (3.3)$$

Отримаємо вираз для отримання одного електричного градусу в секундах:

$$1^0 = \frac{1}{360^0 \cdot v} . \quad (3.4)$$

Знаючи вираз одного електричного градусу в секундах і маючи схему інвертора (Рисунок3.9) з діаграмою керування транзисторами (Рисунок3.10) визначимо параметри імпульсів керування для швидкості 25 км/год на прикладі 120^0 режиму керування.

$$V1: t_d=0^0; pw=120^0; T=360^0;$$

$$V2: t_d=60^0; pw=120^0; T=360^0;$$

$$V3: t_d=120^0; pw=120^0; T=360^0;$$

$$V4: t_d=180^0; pw=120^0; T=360^0;$$

$$V5: t_d=240^0; pw=120^0; T=360^0;$$

$$V6: t_d=300^0; p_w=120^0; T=360^0,$$

де t_d – це час затримки імпульсу, p_w – тривалість відкритого стану ключа, T – період імпульсів.

Величини фронту і зрізу приймаємо наближеними до нескінченності ($\approx 0,00000001$ с). Тепер визначимо часові параметри:

$$V1: t_d = 0 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0(c); p_w = 120 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0133(c); T = 360 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,04(c).$$

$$V2: t_d = 60 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0067(c); p_w = 120 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0133(c); T = 360 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,04(c).$$

$$V3: t_d = 120 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0133(c); p_w = 120 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0133(c); T = 360 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,04(c).$$

$$V4: t_d = 180 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,02(c); p_w = 120 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0133(c); T = 360 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,04(c).$$

$$V5: t_d = 240 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0267(c); p_w = 120 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0133(c); T = 360 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,04(c).$$

$$V5: t_d = 300 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0333(c); p_w = 120 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0133(c); T = 360 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,04(c).$$

3.2.2. Розрахунок параметрів АТД

Так як моделювання асинхронного тягового двигуна виконано шляхом заміщення його обмоток активним та реактивним опорами - їх необхідно визначити розрахунком. Ці параметри залежать від геометричних розмірів двигуна, способу намотки, типу провідника, кількості секцій тощо.

Визначимо індуктивний опір обмоток. Для цього потрібно визначити індуктивний опір однієї з секцій. Якщо розміри a і r поперечного перерізу котушки малі порівняно зі сторонами b і c її середнього витка (Рисунок 3.10), то індуктивність котушки (секції) можна визначити за формулою (3.5).

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \omega^2 (b+c) \cdot \left[\ln \frac{2bc}{a+r} - \frac{c}{b+c} \ln \left(c + \sqrt{b^2 + c^2} \right) - \frac{b}{b+c} \ln \left(b + \sqrt{b^2 + c^2} \right) + \right. \\ \left. + \frac{2\sqrt{b^2 + c^2}}{b+c} - \frac{1}{2} + 0,447 \times \frac{a+r}{b+c} \right], \quad (3.5)$$

де w – число витків котушки, $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ - магнітна стала.

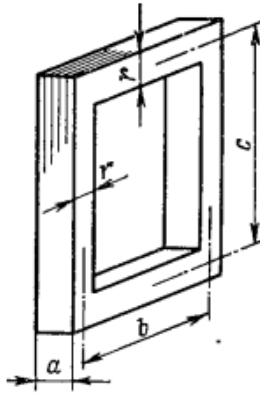


Рисунок 3.5. Прямокутна котушка індуктивності

Для модельованого двигуна встановлені такі параметри:

$w = 9$; $r = 0,0106$; $a = 0,02016$; $b = 0,13652$; $c = 0,281$; Підставивши задані параметри у формулу (3.5),

$$L = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{3,14} 9^2 (0,13652 + 0,281) \cdot \left[\begin{aligned} & \ln \frac{2 \cdot 0,13652 \cdot 0,281}{0,02016 + 0,0106} - \frac{0,281}{0,13652 + 0,281} \times \\ & \times \ln \left(0,281 + \sqrt{0,13652^2 + 0,281^2} \right) - \\ & - \frac{0,13652}{0,13652 + 0,281} \ln \left(0,13652 + \sqrt{0,13652^2 + 0,281^2} \right) + \\ & + \frac{2 \sqrt{0,13652^2 + 0,281^2}}{0,13652 + 0,281} - \frac{1}{2} + 0,447 \times \frac{0,02016 + 0,0106}{0,13652 + 0,281} \end{aligned} \right]$$

отримаємо значення $L = 6,123 \cdot 10^{-5}$ Гн. У проектованому двигуні одна фаза складається з 12 секцій. Визначимо індуктивність однієї фази обмотки, вона буде рівною

$$L_f = 12L, \quad (3.6)$$

тобто $12 \cdot 6,123 \cdot 10^{-5} = 7,348 \cdot 10^{-4}$ Гн. Так як маємо три фази, загальний індуктивний опір обмоток дорівнюватиме

$$L_{st} = 3L_f, \quad (3.7)$$

підставивши числові значення маємо $3 \cdot 7,348 \cdot 10^{-4} = 2,204 \cdot 10^{-3}$ Гн.

Активний опір секції визначимо за формулою (3.8)

$$R_s = q \frac{l_s}{S_s}, \text{ де} \quad (3.8)$$

$$l_s = 2b + 2c, \quad S_s = a \cdot r, \quad q = 0,0175 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.} \quad (3.9)$$

Підставивши числові значення, отримаємо вираз:

$$R_s = 0,0175 \cdot 10^{-6} \frac{2 \cdot 0,13652 + 2 \cdot 0,281}{0,02016 \cdot 0,0106} = 1,016 \text{ Ом.}$$

Активний опір однієї фази обмотки буде рівний

$$R_f = 12R_s, \quad R_f = 12 \cdot 1,016 \cdot 10^{-4} = 1,219 \text{ Ом,} \quad (3.10)$$

а загальний активний опір обмотки буде рівним

$$R_{st} = 3R_f, \quad R_{st} = 3 \cdot 1,219 = 3,657 \text{ Ом.} \quad (3.11)$$

3.3. Моделювання роботи асинхронного тягового приводу

Серед методів управління ключовими елементами для створення контурів протікання струму всередині комутаційного інтервалу можуть використовуватися

120-, 180- і 150-градусні методи управління. Також основним і найактуальнішим є метод широтно імпульсної модуляції. Комутаційним інтервалом (міжкомутаційним періодом) називається кут (в електричних градусах), на який повертається ротор двигуна між двома сусідніми перемиканнями фаз. У разі використання 120-градусного управління будь-який ключовий елемент знаходиться у включеному стані протягом 120 градусів відносно повного періоду фазної напруги, тобто протягом двох комутаційних інтервалів з шести; при 180-градусному управлінні - 180 градусів, тобто на протязі трьох комутаційних інтервалів з шести; при 150-градусному управлінні - 150 градусів тобто протягом п'яти комутаційних інтервалів з дванадцяти.

3.3.1. 120-градусний режим роботи інвертора

При даному режимі роботи тиристори нумеруються за аналогією з трифазними двохнапівперіодними випрямлячами. Різниця номерів тиристорів в кожній фазі дорівнює трьом. До трифазного мостового інвертору підключене активне навантаження, що складається з трьох резисторів, як показано на Рисунок3.11.

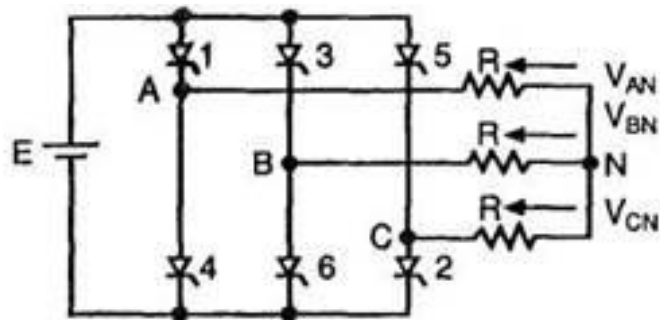


Рисунок 3.6. Схема трифазного мостового інвертора

При 120-градусному режимі роботи кожен тиристор знаходиться в провідному стані від 0 до 120° за період. У будь-який час два тиристори в цій схемі знаходяться в провідному стані, і два з трьох навантажувальних резисторів є споживачами потужності. Коли тиристор з непарної групи знаходиться в провідному стані, відповідна йому фазова напруга - позитивна. Якщо ж у провідному стані знаходиться тиристор з парної групи, відповідна йому фазова напруга - негативна.

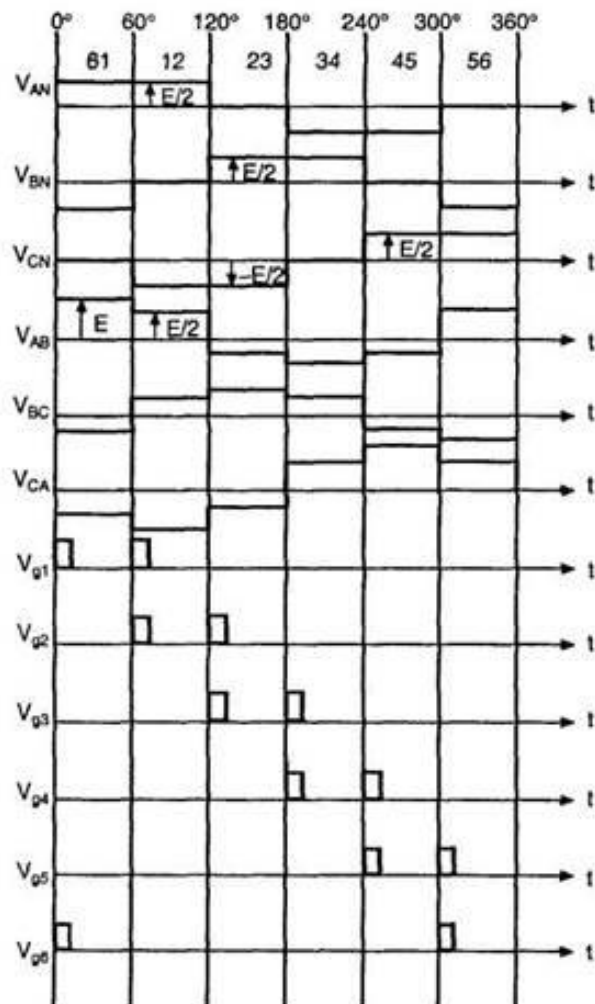


Рисунок 3.7. Форми фазових і лінійних напруг і діаграма провідності при 120° режимі

Фазові напруги тут представляють собою 120 -градусні псевдо прямокутні послідовності імпульсів. Вихідні лінійні напруги мають форми шести ступінчастих послідовностей імпульсів, зсунутих на 120° по відношенню один до одного. Форми фазових і лінійних напруг наведені на Рисунок 3.12.

Так як даний режим керування інвертором майже не застосовується при тязі, в даному проекті моделювання його не проводилося і детальніше на ньому зупинятись не будемо. В наступних розділах приділяється увага режимам керування, які застосовуються на практиці при використанні електричної тяги постійного чи змінного струму

3.3.2. 150-градусний режим роботи інвертора

150-градусний режим керування на залізниці використовується в умовах запуску двигуна електрорухомого складу та при малих швидкостях руху. У цьому режимі вмикання транзисторів відбувається із затримкою 30 градусів після вимкнення відповідного транзистору даної фази. Кожен з транзисторів знаходиться у ввімкненому стані впродовж 150 градусів за період (Рисунок 3.13). Форма фазного струму та отримані спектри струму зображено на Рисунок 3.14 і Рисунок 3.14 а, 3.14 б. відповідно.

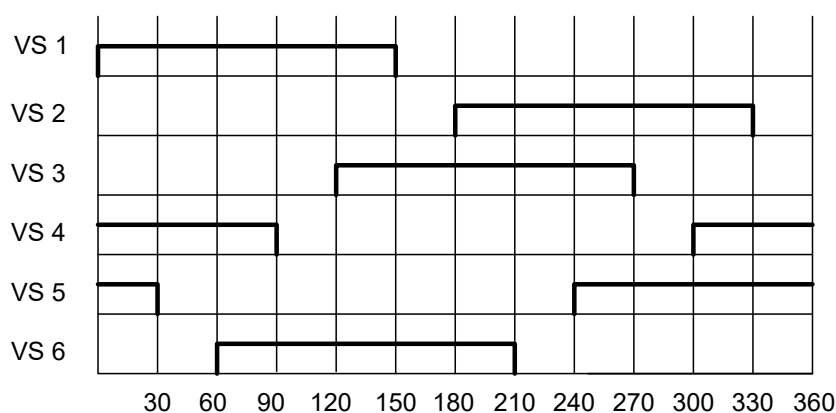


Рисунок 3.8. Діаграма провідності при 150⁰ режимі

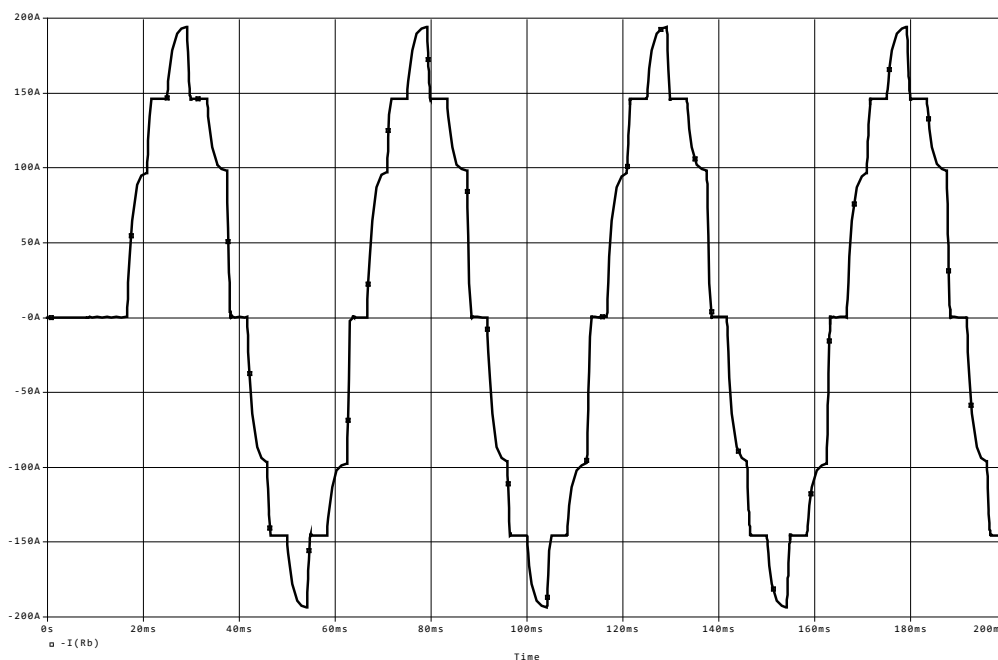


Рисунок 3.9. Форма фазного струму при 150⁰ режимі

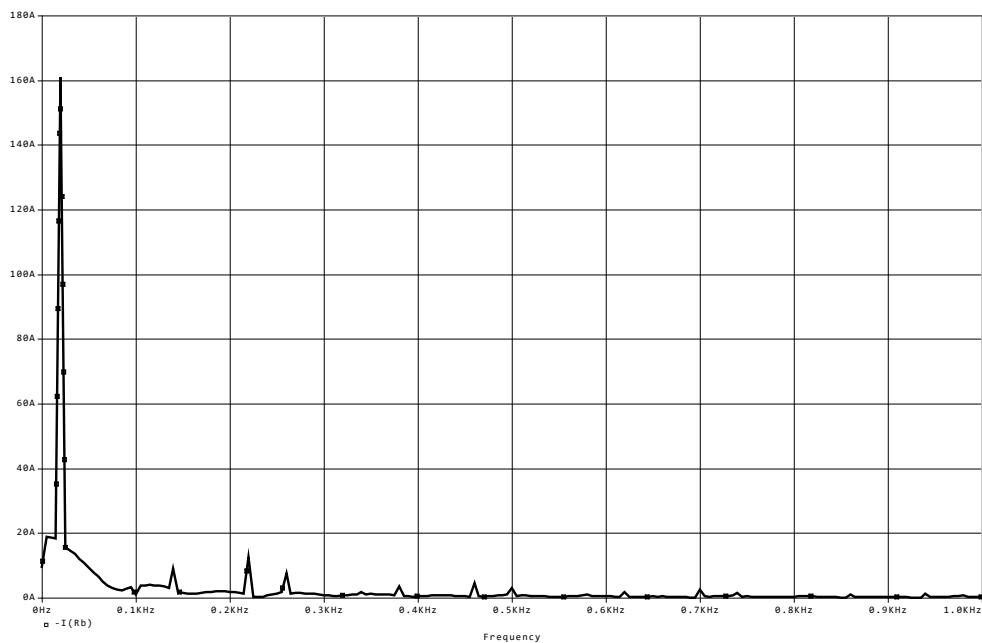


Рисунок 3.10 а. Спектр фазного струму при 150° режимі

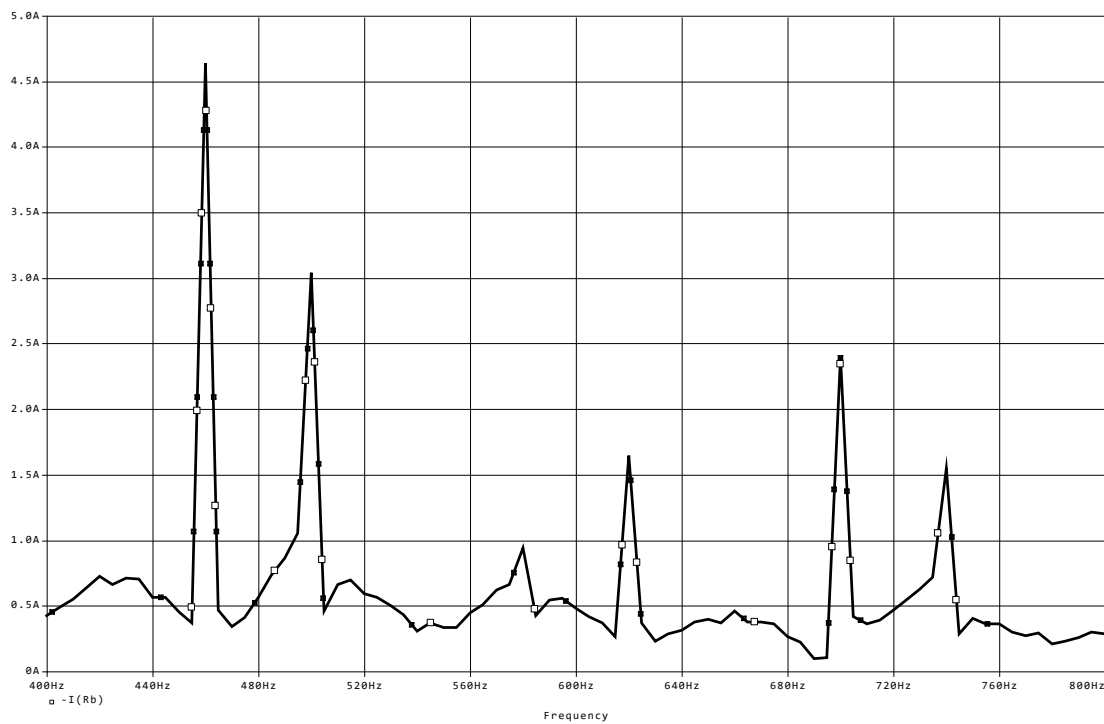


Рисунок 3.10 б. Спектр фазного струму 150° режимі в смузі сигнальних частот
ТРК

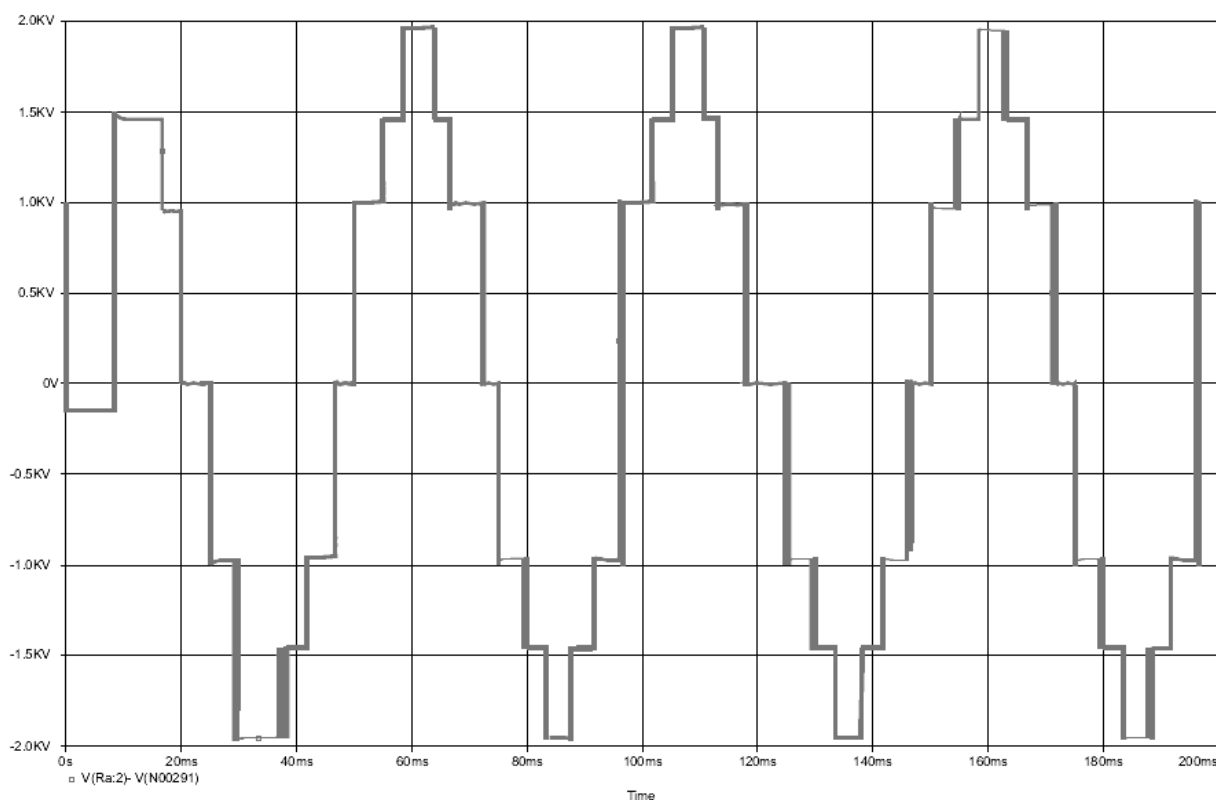


Рисунок 3.11. Форма фазної напруги при 150^0 режимі

У фазному струмі переважають гармоніки з кратністю $6k \pm 1$, внаслідок чого при певних швидкостях руху (20 км/год для даної моделі) гармоніки фазного струму потрапляють у смугу сигнальних частот тональних рейкових кіл.

Із спектру фазного струму (Рисунок 3.15 б.) видно, що третя гармоніка потрапляє в смугу сигнальних частот тональних рейкових кіл ТРК-3. Рівень гармоніки в смузі 580 Гц дорівнює 1 А, що може завдавати перешкоди для нормальної роботи тональних рейкових кіл при використанні нових типів електрорухомого складу з асинхронним тяговим двигуном.

Так, одним з важливих показників доцільності застосування певного методу керування асинхронним приводом є коефіцієнт гармоніки, який визначається відношенням діючого значення i -ої гармоніки до діючого значення першої гармоні-

ки. Для даної моделі з 150 градусним режимом керування, при частоті 580 Гц коефіцієнт гармоніки дорівнює $I_{580}^{150} = \frac{1}{160} 0,00625$. На даному етапі моделювання отримано проміжний результат, який далі порівнюємо з результатами інших методів керування, щоб наглядно побачити різницю впливу цих методів на роботу ТРК, та зробити висновок щодо доцільності вибору одного із них.

3.3.3. 180-градусний режим роботи інвертора

При 180-градусному режимі кожен тиристор знаходиться в стані провідності половину періоду. У цьому режимі роботи інвертора можливі два способи комутації тиристорів - два тиристори з непарної групи і один тиристор з парної групи або два з парної групи і один з непарної групи перебувають у провідному стані.

Фазова напруга інвертора буде позитивною, якщо тиристори з непарної групи перебувають у провідному стані, і негативною, якщо тиристори парної групи знаходяться в провідному стані. У будь-який час два резистора навантаження підключені до джерела живлення паралельно, а третій підключений послідовно до них.

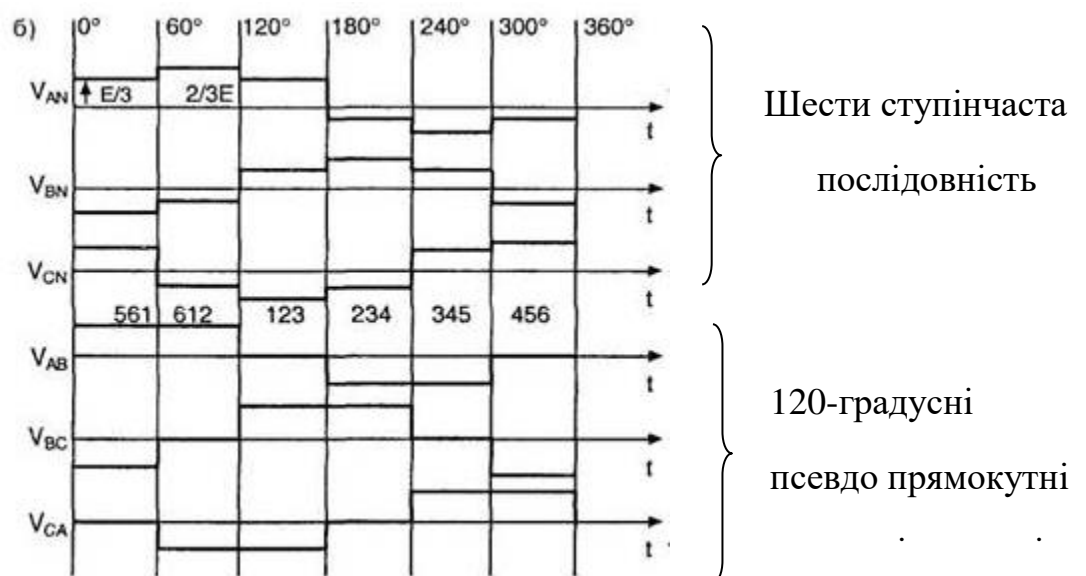


Рисунок 3.12. Форми фазних і лінійних напруг при 180° режимі керування

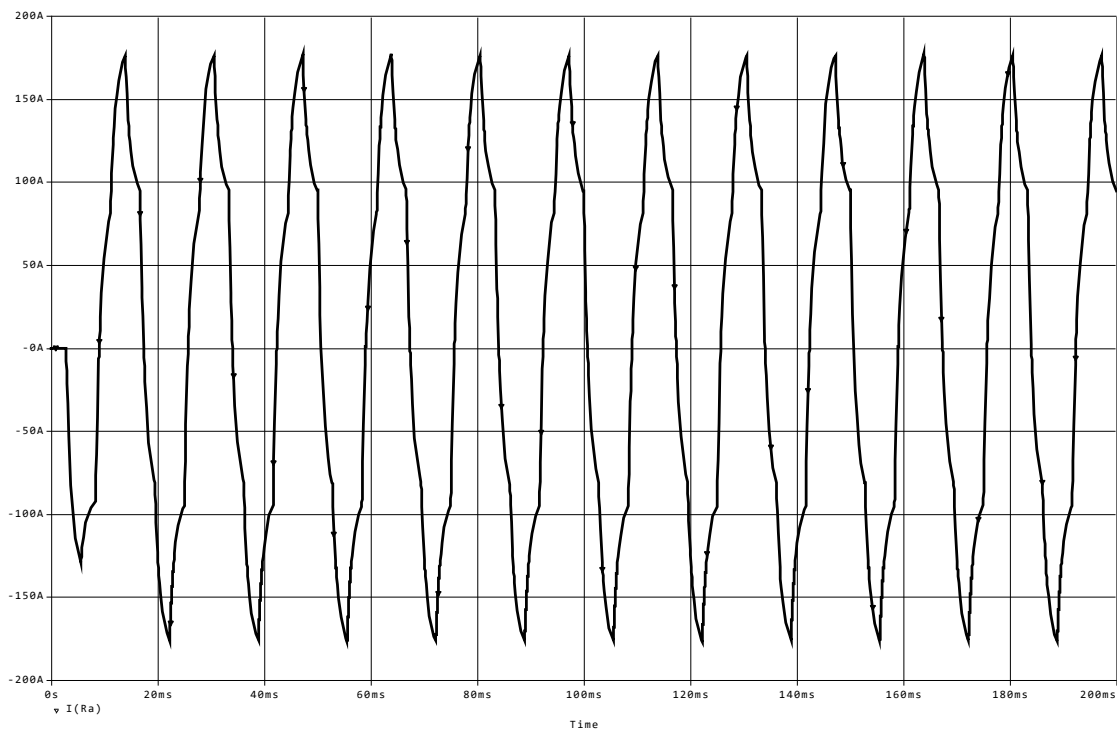


Рисунок 3.13. Форма фазного струму при 180^0 режимі

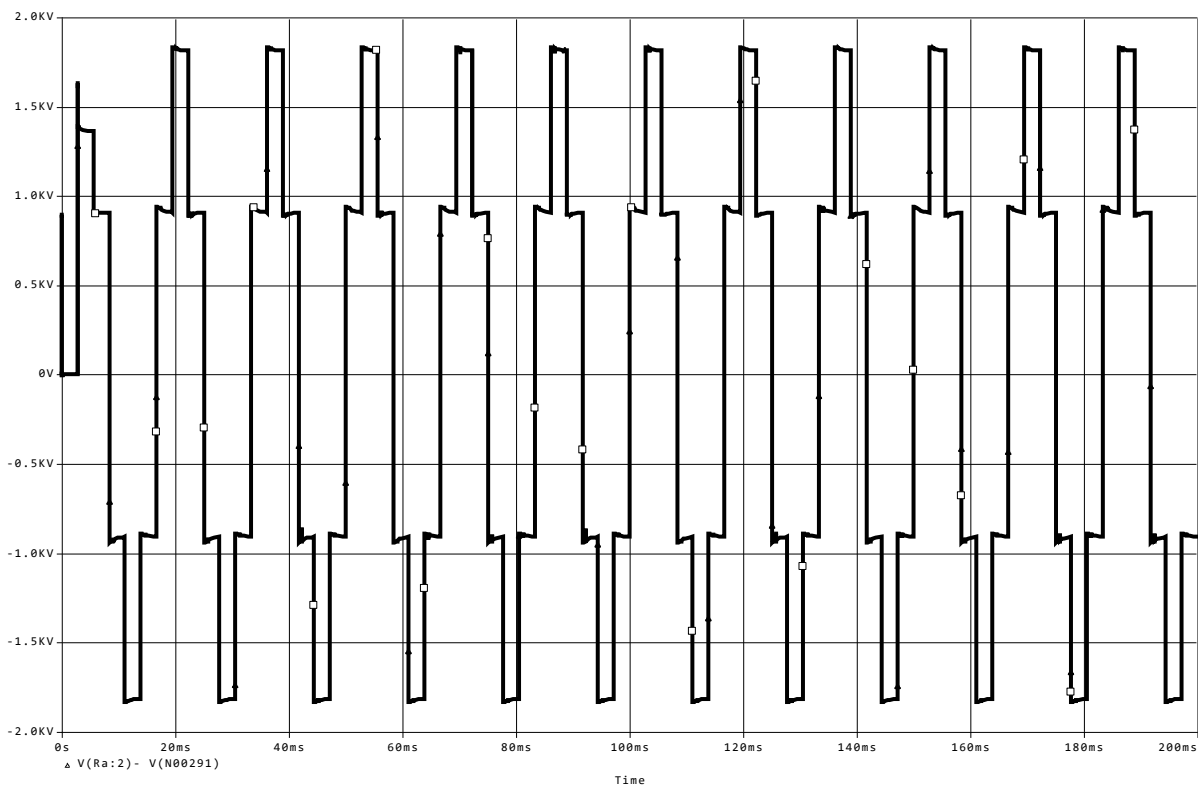


Рисунок 3.14. Форма фазної напруги при 180^0 режимі

Лінійні напруги тут представляють собою 120-градусні псевдо прямокутні послідовності імпульсів. Вихідні фазові напруги інвертора мають форми шестиступінчастих послідовностей імпульсів, зсунутих на 120° по відношенню один до одного. Форми фазових і лінійних напруг наведені на Рисунок 3.17. Тиристри в цій схемі запускаються в послідовності 561-612-123-234-345-456. Вихідна частота визначається частотою запуску тиристорів.

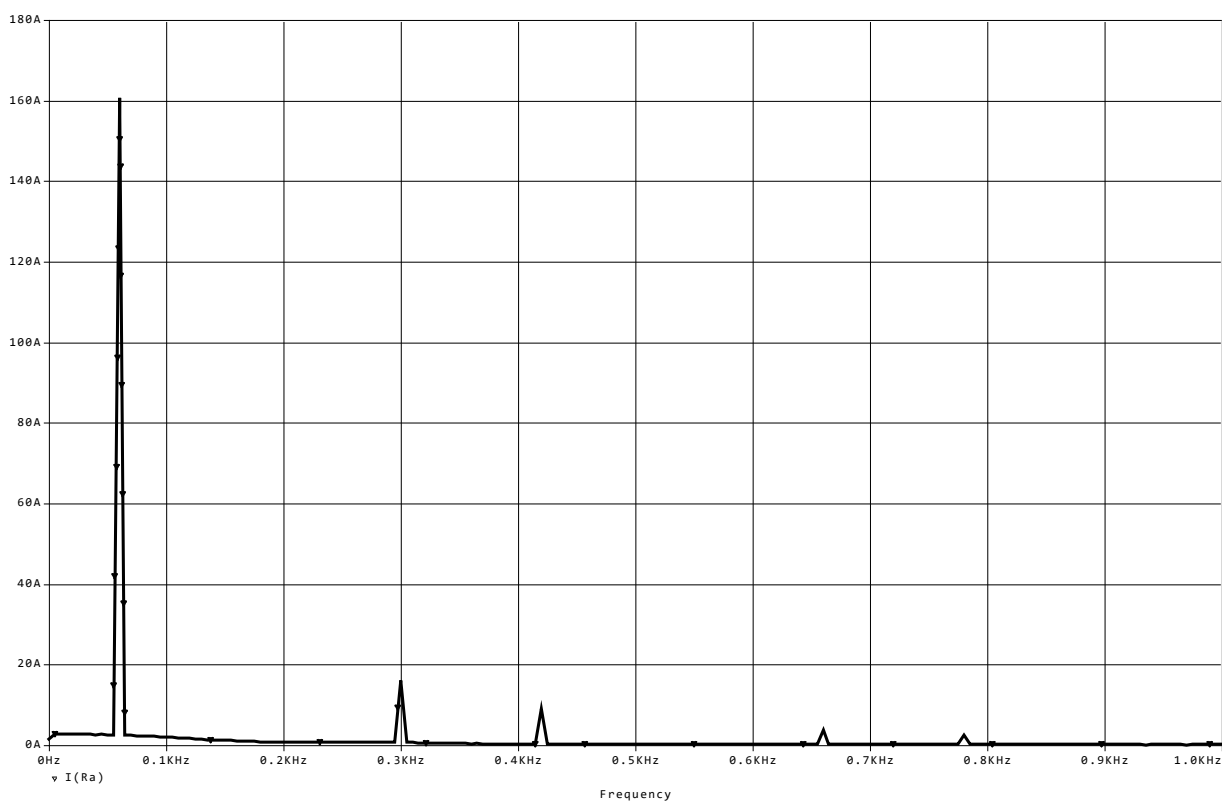


Рисунок 3.15 а. Спектр фазного струму 180° режимі

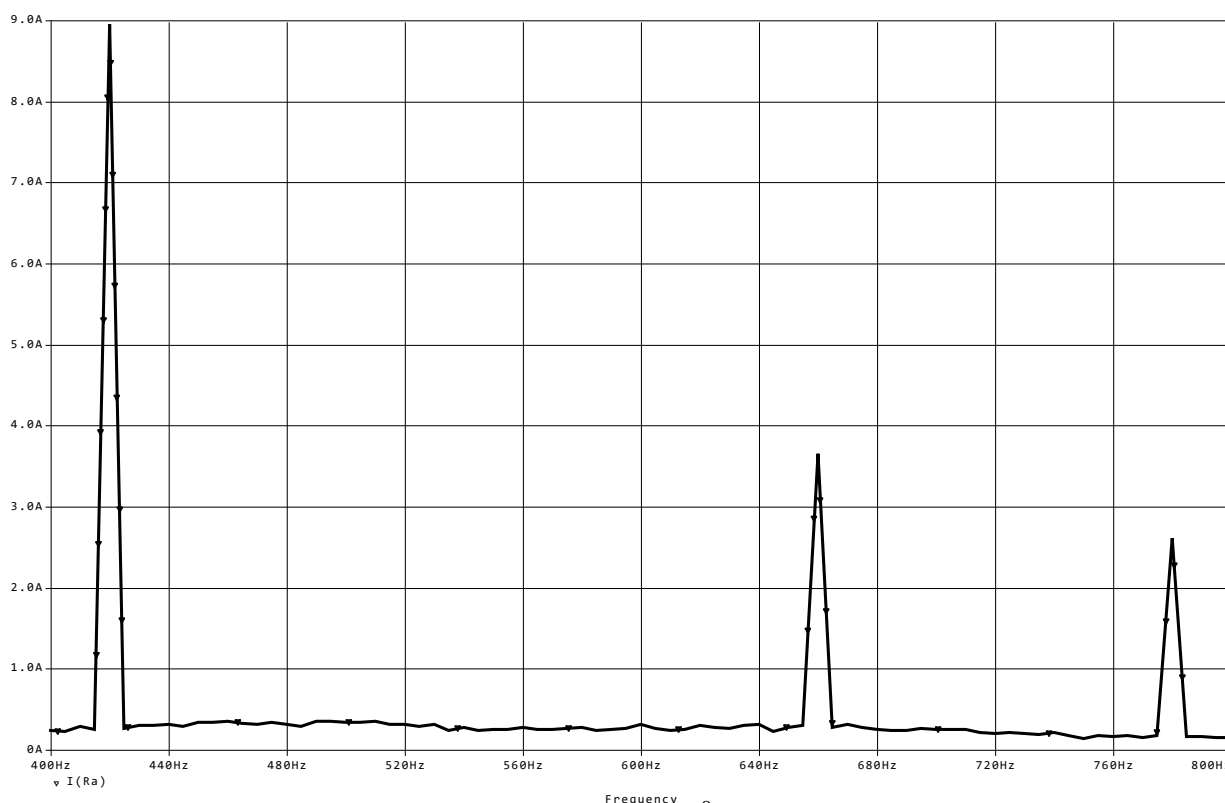


Рисунок 3.15 б. Спектр фазного струму 180° режимі в смузі сигнальних частот ТРК

Так як очікуваний спектральний склад фазної напруги та фазного струму буде містити гармоніки з кратністю $6k \pm 1$, то для наглядного моделювання була обрана швидкість руху локомотива 60 км/год, щоб показати власне гармоніки, які при такій швидкості потрапляють до смуги сигнальних частот ТРК. Сьома гармоніка буде $60 \cdot 7 \approx 420$ Гц, а тринадцята $60 \cdot 13 \approx 780$ Гц.

За допомогою пакету OrCAD Pspice отримано спектральний склад фазного струму (Рисунок 3.20 а), а на Рисунок 3.20 б приведено частину спектру для частот тонального діапазону (420 Гц).

Рівень гармоніки у смузі 420 Гц дорівнює 9 А, що може завдавати заважаючий вплив на рейкові кола зі сторони нових типів електрорухомого складу.

Коефіцієнт гармоніки в смузі сигнальних частот тональних рейкових кіл для даного режиму роботи інвертора (180 градусний режим), при частоті 420 Гц дорівнює

$$\text{внює } I_{420}^{180} = \frac{9}{160} 0,05625 \text{ А.}$$

3.3.4. Широтно-імпульсна модуляція

Широтно-імпульсний спосіб регулювання вихідної напруги (тобто напруги на статорі АТД) – це такий спосіб, при якому вихідна напруга регулюється внутрішніми засобами інвертора (при незмінній вхідній напрузі) шляхом багаторазового включення і виключення ключів інвертора за один період вихідної напруги. Інвертор, в якому застосовують такий спосіб регулювання, називають інвертором з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

У інверторі з ШІМ для регулювання вихідної напруги змінюють співвідношення між інтервалами підключення фази двигуна до «плюса» і «мінуса» джерела живлення протягом одного періоду вихідної напруги і тим самим змінюють глибину регулювання вихідної напруги, яку характеризує коефіцієнт регулювання K_p . Чинне значення першої гармоніки фазної напруги в цьому випадку визначається

$$U_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_d K_p. \quad (3.12)$$

Відповідно середній струм на вході інвертора з ШІМ дорівнює

$$I_d = \frac{3U_1 I_1 \cos \varphi_1}{U_d} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_1 \cos \varphi_1 K_p = 1,35 I_1 \cos \varphi_1 K_p. \quad (3.13)$$

При управлінні способом ШІМ напруга на виході АІН має форму серії імпульсів позитивної і негативної полярності з нульовими паузами, причому тривалість імпульсів і пауз в межах одного періоду вихідної напруги можна змінювати за різними законами.

Для живлення асинхронних тягових двигунів у АІН найбільш часто використовують два види ШІМ: синусоїдальну і прямокутну. Другий вид є найбільш простим і його зазвичай називають широтно-імпульси регулюванням (ШІР).

Вважаємо, що АІН виконаний за схемою Рисунок 3.21. Принцип управління таким інвертором способом синусоїдальної ШІМ пояснює Рисунок 3.22.

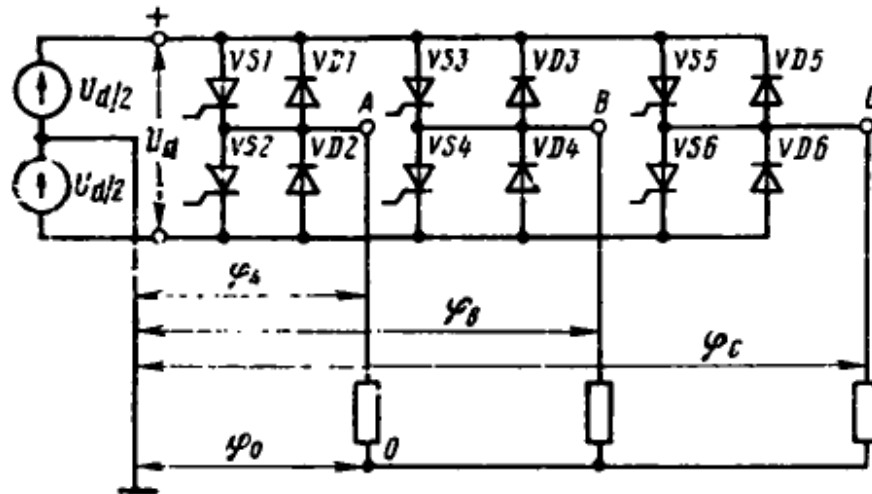


Рисунок 3.16. Трифазна схема автономного інвертора напруги

Період вихідної напруги T_1 розбивають на N рівних інтервалів (в розглянутому прикладі $N = 9$). Тривалість одного інтервалу дорівнює

$$T_n = \frac{T_1}{N}. \quad (3.14)$$

З періодом повторення T_n і частотою

$$f_n = Nf_1, \quad (3.15)$$

яку називають несучою, змінюється двополярний розгортаючий сигнал трикутної форми u_p . Модулюючий синусоїдний сигнал u_m , має частоту першої гармоніки вихідної напруги інвертора f_1 . Відношення амплітуд сигналів

$$\frac{U_m}{U_p} = \mu \quad (3.16)$$

називається глибиною модуляції. При регулюванні вихідної напруги μ змінюється від 0 до 1. В інверторі з ШІМ на одному інтервалі T_n здійснюються дві комутації, а за період $T_1 - 2N$ комутацій на одну фазу. Тому кратність комутацій n_n в інверторі з синусоїдною ШІМ рівна N .

Моменти комутацій інвертора відповідають точкам перетину сигналів u_m і u_p . За умови $u_m > u_p$ фаза підключається до «плюса» джерела живлення та її потенціал відносно середньої точки джерела живлення

$$\varphi_{\phi} = 0,5U_d. \quad (3.17)$$

За умови $u_m < u_p$ фаза підключається до «мінуса» джерела живлення і

$$\varphi_{\phi} = -0,5U_d. \quad (3.18)$$

Діаграма φ_{ϕ} на Рисунок 3.10 симетрична по півхвилях вихідної напруги (відносно моментів $T_1/4$ і $3T_1/4$) тільки в тому випадку, якщо N - непарне число.

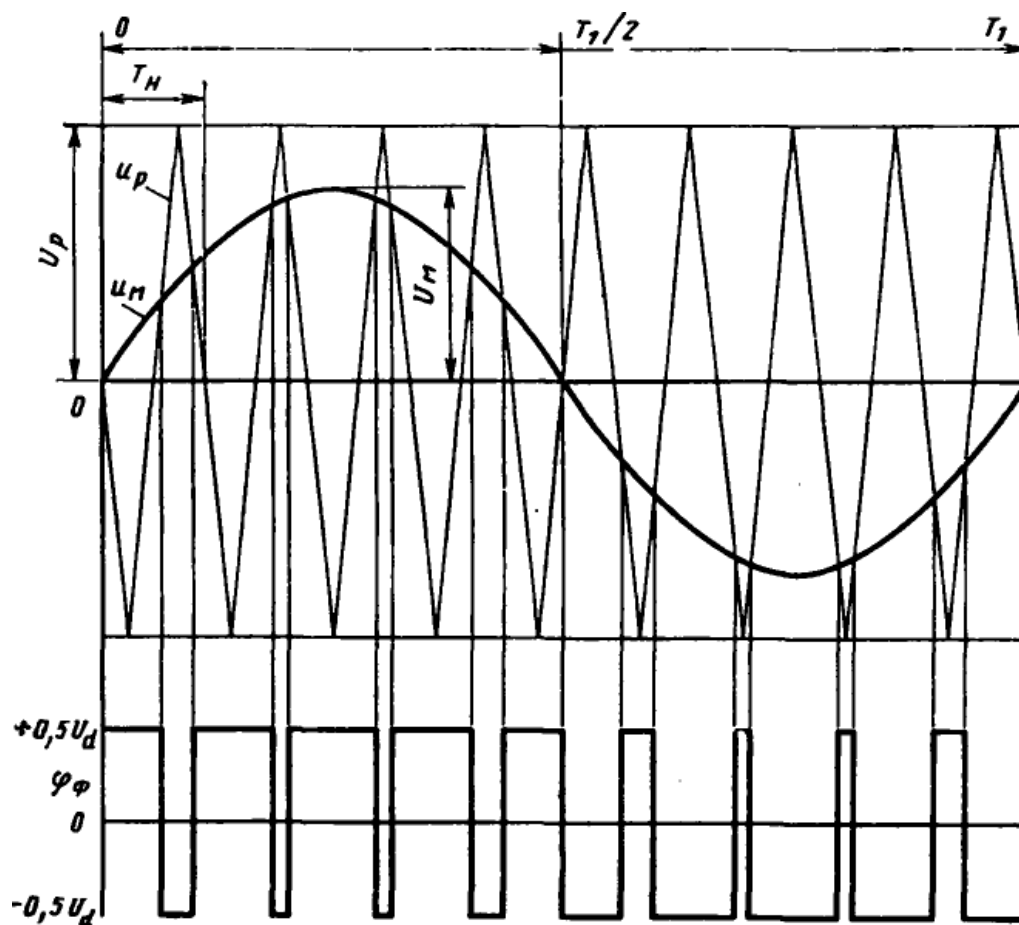


Рисунок 3.17. Діаграми модулюючого u_m , розгортаючого u_p сигналів і потенціалу фази φ_{ϕ} при синусоїдній ШІМ

На Рисунок 3.23 наведені діаграми потенціалів трьох фаз - φ_A , φ_B , φ_C - для інвертора з синусоїдною ШІМ при $N = 9$. Криві φ_B і φ_C зсунуті відносно φ_A на 120° і 240° . Діаграма лінійної напруги u_{AB} побудована відповідно з рівністю $u_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$.

Також там наведена діаграма потенціалу середньої точки $\varphi_0 = \frac{(\varphi_A + \varphi_B + \varphi_C)}{3}$. Напря- га фази φ_A побудована відповідно до рівності $u_A = \varphi_A - \varphi_0$.

Управління інвертором способом ШІМ застосовують для вирішення двох за- вдань: зміни першої гармоніки вихідної напруги інвертора і наближення форми кривої фазного струму двигуна до синусоїдальної. При вирішенні другого завдан- ня кратність комутацій повинна бути досить великою. Але збільшення частоти комутацій інвертора тягне за собою зростання втрат на перемикання тиристорів, підвищення потужності елементів вузла комутації та зниження ККД перетворю- вача. З наведених причин високі значення кратності комутацій використовують тільки при малих вихідних частотах у початковій зоні пуску АТД.

Інвертор з ШІМ працює при незмінній (або змінюваній в невеликих межах) вхідній напрузі і не вимагає додаткових пристроїв підзаряду комутуючих конден- саторів. Тому найбільш доцільною областю застосування АІН з ШІМ є електрору- хомий склад, який отримує живлення від мережі постійного струму. При такому живленні для інвертора з амплітудним регулюванням (крім пристроїв підзаряду комутуючих конденсаторів) потрібно використовувати імпульсний переривач, тобто необхідно здійснювати дворазове перетворення енергії. Інвертор з ШІМ при живленні від мережі постійного струму дозволяє обмежуватися одноразовим пе- ретворенням енергії, і в цьому полягає його найбільш важлива перевага.

Для моделювання роботи приводу в режимі широтно-імпульсної модуляції об- рано несучу частоту 1550 Гц, а модулюючу частоту (яка приблизно відповідає швидкості руху локомотива) – 60 Гц.

За допомогою розробленої схемотехнічної моделі було отримано діаграму ча- сової залежності асинхронного тягового двигуна, з якої видно застосування широ- тно-імпульсної модуляції для частотного керування асинхронним двигуном (Ри- сунок 3.24).

Із спектрального складу фазного струму бачимо, що спільно з основною гар- монікою, яка визначається несучою частотою присутні гармоніки з комбінаційни- ми частотами $|mf_n + nf|$. Також видно, що гармоніки фазного струму не потрапля-

ють в смугу сигнальних частот, тобто не завдають істотного заважаючого впливу на роботу тональних рейкових кіл. Це пов'язано з використанням в якості несучої частоти для ШІМ при керуванні ключами інвертора

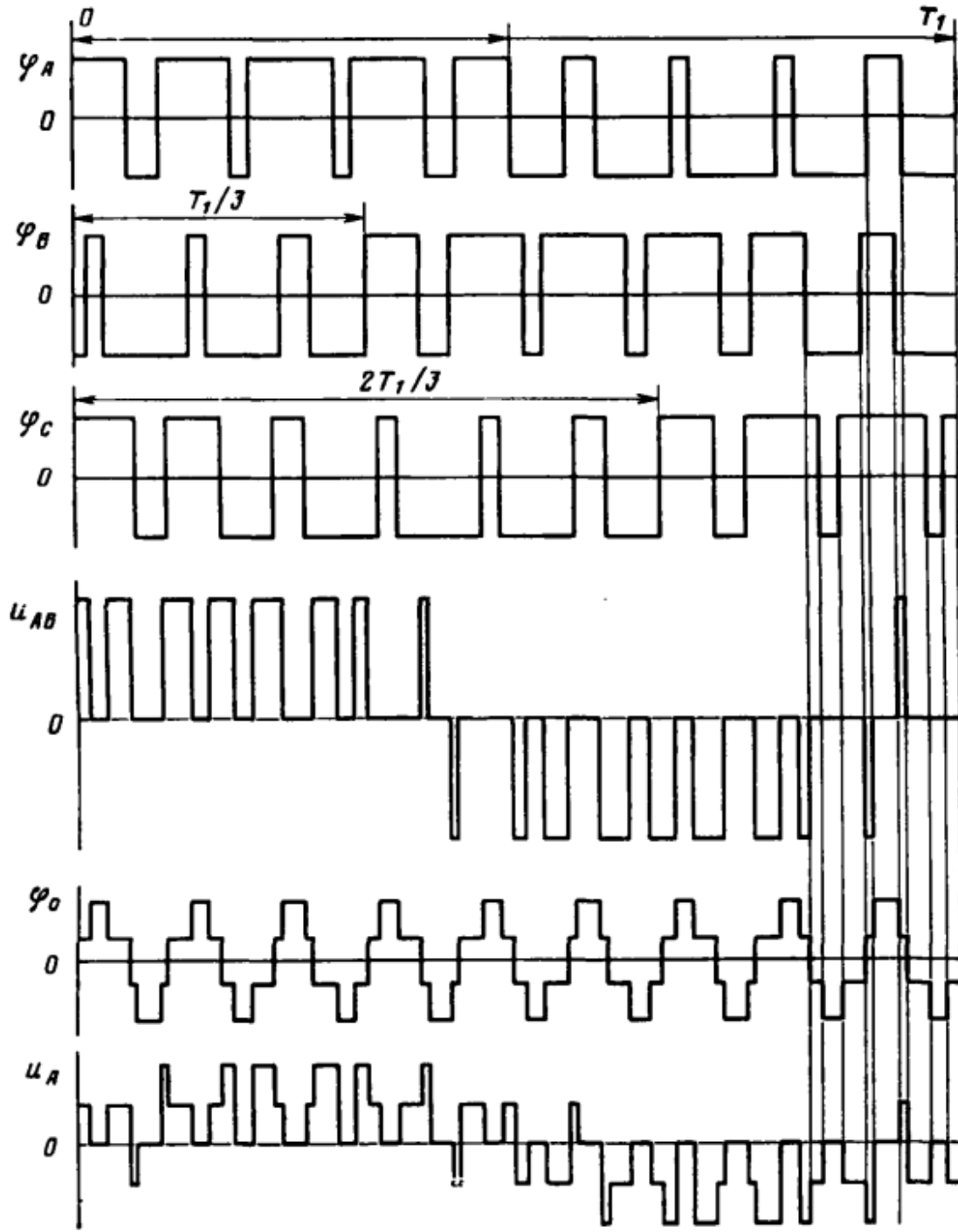


Рисунок 3.18. Діаграми потенціалів і напруг інвертора з синусоїдною ШІМ

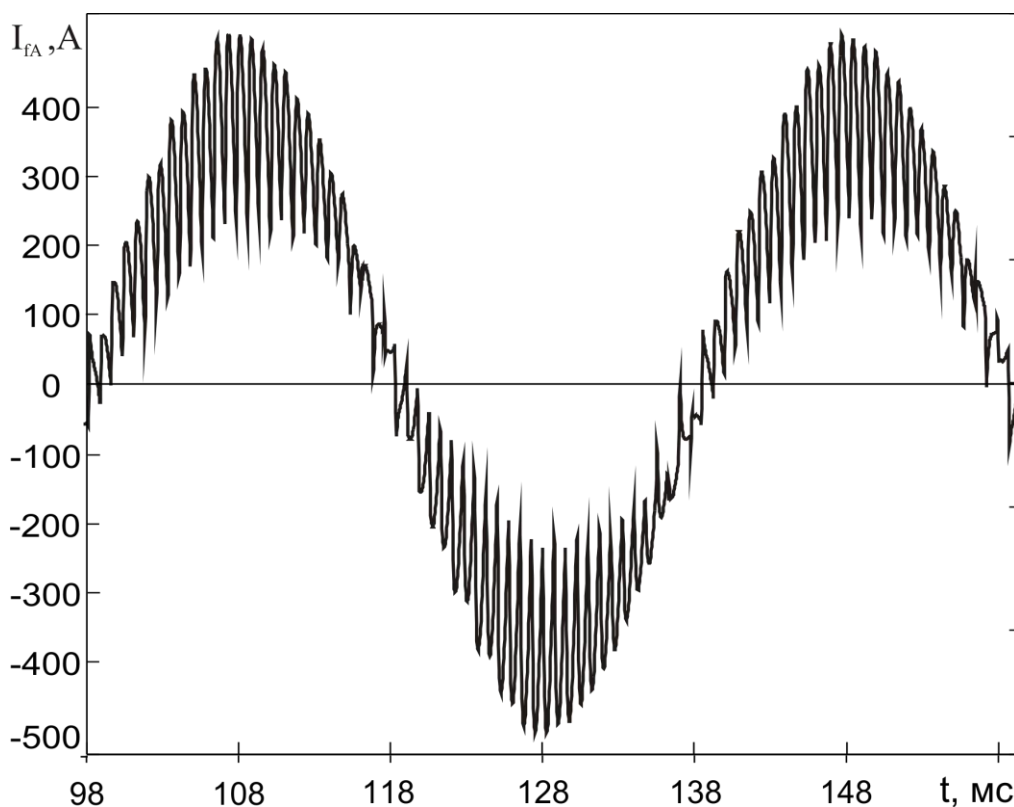


Рисунок 3.19. Крива фазного струму при ШІМ

Результати моделювання наведено на Рисунок 3.25, де показаний спектральний склад фазного струму отриманий з моделі.

Для організації керування ключами силових перетворювачів сучасного ЕРС з АТД доцільно використовувати метод широтно-імпульсної модуляції з високою несучою частотою, що дозволить уникати потрапляння гармонік зворотного тягового струму в смугу сигнальних частот ТРК.

Теоретично, чим вище буде несуча частота, тим менший вплив буде створювати рухомий склад на роботу рейкових кіл. Проте, обираючи несучу частоту, необхідно враховувати технічні особливості використовуваних у інверторі транзисторів, а саме – швидкість (частоту) комутацій.

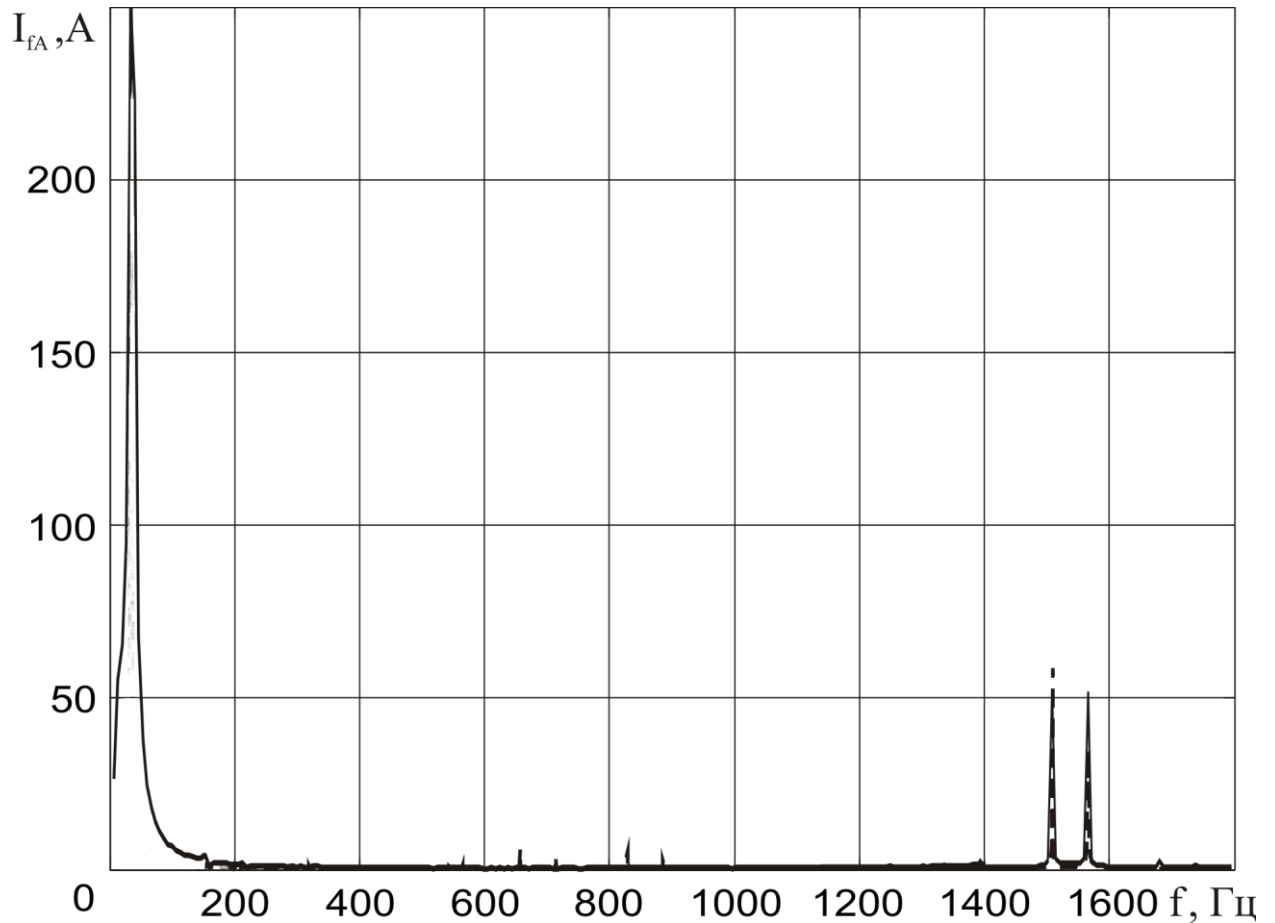


Рисунок 3.20. Спектральний склад фазного струму

3.4. Висновки моделювання

В роботі розроблено схемотехнічну модель для дослідження електромагнітного впливу тягових перетворювачів нових типів електрорухомого складу з асинхронним тяговим двигуном на роботу тональних рейкових кіл. Запропонована модель дає можливість визначити гармонічний склад зворотного тягового струму у рейкових лініях від локомотивів з асинхронним тяговим двигуном при різних режимах ведення локомотиву.

При розгляді можливого впливу напруги асинхронного двигуна на роботу рейкових кіл слід звернути увагу, що перша гармоніка, частота якої залежить від частоти вихідної напруги інвертора, а отже - від швидкості обертання ротора асинхронного двигуна, досягає великих значень, порівняно з напругою спрацьовування колійного приймача. При певних швидкостях руху електровоза деякі гармоніки зворотного тягового струму будуть потрапляти в смугу сигнальних частот рейко-

вих кіл, і створювати заважаючий і, навіть, небезпечний вплив. Рівень цих гармонік у рейкових лініях буде залежати від рівня постійної напруги проміжної ланки, потужності асинхронних двигунів електровозу, первинних та вторинних параметрів рейкової лінії, кількості локомотивів на тяговій ділянці та швидкості їх руху, погодних умов тощо.

При дослідженні було розглянуто три режими керування тяговими перетворювачами: 150° режим, що застосовується при пуску двигуна і при малих швидкостях, 180° режим, який використовується при веденні локомотива у режимі тяги, та режим широтно-імпульсної модуляції. Останній є найбільш доцільним для використання, тому що при високих значеннях несучої частоти завдає мінімум заважаючого і небезпечного впливу на нормальну роботу рейкових кіл при використанні нових електровозів на ділянках залізниць, які обладнані тональними рейковими колами.

ВИСНОВКИ

В даному дипломному проекті проведені дослідження і аналіз, як може впливати робота нових типів електрорухомого складу на роботу тональних рейкових кіл. Цей вплив зумовлюють тягові перетворювачі, що встановлені на електровозах чи електропоїздах. У зв'язку з роботою цих перетворювачів у зворотному тяговому струмі можуть бути присутні гармоніки, які потрапляють в смугу сигнальних частот тональних рейкових кіл, і завдавати заважаючий і навіть небезпечний вплив на роботу рейкових кіл. В роботі розглянутий принцип дії тональних рейкових кіл і принципові схеми їх обладнання. Також проведено аналіз існуючих систем автоблокування на базі тональних рейкових кіл.

В роботі розроблено схемотехнічну модель для дослідження електромагнітного впливу тягових перетворювачів нових типів електрорухомого складу з асинхронним тяговим двигуном на роботу тональних рейкових кіл. Запропонована модель дає можливість визначити гармонічний склад зворотного тягового струму у рейкових лініях від локомотивів з асинхронним тяговим двигуном при різних режимах ведення локомотиву.

При дослідженні було розглянуто три режими керування тяговими перетворювачами: 150° режим, що застосовується при пуску двигуна і при малих швидкостях, 180° режим, який використовується при веденні локомотива у режимі тяги, та режим широтно-імпульсної модуляції. Останній є найбільш доцільним для використання, тому що при високих значеннях несучої частоти завдає мінімум заважаючого і небезпечного впливу на нормальну роботу рейкових кіл при використанні нових електровозів на ділянках залізниць, які обладнані тональними рейковими колами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Федоров Н. Е. Современные системы автоблокировки с тональными рельсовыми цепями // Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте. – 1996. – №5.
2. Аркатов В. С., Котляренко Н. Ф., Баженов А. И., Лебедева Т. Л. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: Справочник. Под редакцией В. С. Аркатова. – М.: Транспорт, 1982. – 360 с. {УДК 656.25 (035) Р 36}
3. Аркатов В. С., Кравцов Ю. А., Степенский Б. М. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание. – М.: Транспорт, 1990. – 295 с. {УДК 656.25 Р 82}
4. Дмитриев В. С., Воронин В. А. Рельсовые цепи тональной частоты // Автоматика, телемеханика и связь. – Самара: СамГАПС, 2004 – 132с. {УДК 656.256.3:656.259.12}
5. Дмитриев В. С., Лучинин В. С. Особенности расчёта и регулировки рельсовых цепей тональной частоты // Автоматика, связь, информатика. – 1998. – №8.
6. Дмитриев В. С., Минин В. А. Новые системы автоблокировки. – М.: Транспорт, 1981. – 247 с.
7. Дмитриев В. С., Минин В. А. Системы автоблокировки с рельсовыми цепями тональной частоты. – М.: Транспорт, 1992.
8. Дмитриев В. С., Минин В. А. Совершенствование систем автоблокировки. – М.: Транспорт, 1987. – 143 с. {УДК 656.25 Д 53}
9. Казаков А. А., Бубнов В. Д., Казаков Е. А. Системы интервального регулирования движения поездов. – М.: Транспорт, 1986. – 399 с., ил., табл. {УДК 656.2 К 14}
10. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Под ред. Н. А. Ротанова. М.: Транспорт, 1991. 336 с

11. Кокурин И. М., Кондратенко Л. Ф. Эксплуатационные основы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. – М.: Транспорт, 1980. – 168 с. {УДК 656.25 К 60}
12. Кеон Дж. OrCAD Pspice. Анализ электрических цепей. – СПб.: Питер, 2008. – 640 с.
13. Щека В.І., Гаврилюк В.І. Математичне моделювання електромагнітних завод від тягових перетворювачів з асинхронним двигуном. {УДК 656.259.12:629.423.31}
14. Кулик П. Д., Ивакин Н. С., Удовиков А. А. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надёжности. – К.: Изд. дом “Мануфактура”, 2004. – 288 с. – Ил. 57. {УДК 656.25 К 90}
15. Норми технологічного проектування пристроїв автоматики і телемеханіки на залізничному транспорті України. – К.: Державна адміністрація залізничного транспорту України, 2003.
16. Правила безпечної експлуатації пристроїв автоматики, телемеханіки та зв'язку на залізницях України. ЦШ 0030. – К.: 2004. {УДК 656.25 П 68}
17. Тарасов Б. Н., Плавник Я. Ю. Автоблокировка и автоматическая локомотивная сигнализация. – М.: Транспорт, 1988.
18. Сороко В. И., Разумовский Б. А. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: Справочник. В 2-х томах. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1981. {УДК 656.25 (035) С 65}
19. Гусарова Е.В. Экономика и управление на железнодорожном транспорте. – Хабаровск. Изд-во ДВГУПС, 2008. – 109 с.
20. Терешина Р.П. Экономика железнодорожного транспорта. – М.: УМЦ ЖДТ, 2006. {УДК 656.003}
21. ДСТУ 2867-94 Шум. Методи оцінювання. Виробничого шумового навантаження. Загальні вимоги. {УДК 613.644-658.382.2/083.74/}

22. ДСТУ 7237:2011 Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту.
23. ДБН В.2.5-28-2006 Природне і штучне освітлення.
24. ГН 3.3.5-8.6.6.1-2002 Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу.