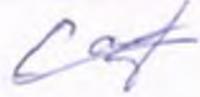


**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ»
ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

На правах рукописи
УДК 629.423.316



САИДАКБАРОВ ИСЛОМ ИКРОМ УГЛИ

**«ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ТЯГОВЫХ СВОЙСТВ
ЭЛЕКТРОВОЗОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ»**

по специальности

5А310603 -«Железнодорожный транспорт (Локомотивы)»

для получения степени магистра

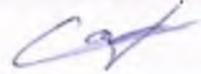
ДИССЕРТАЦИЯ МАГИСТРА

Научный руководитель: к.т.н., доцент Валиев М.Ш.

Ташкент – 2018

**«ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ»
АКЦИЯДОРЛИК ЖАМИЯТИ
ТОШКЕНТ ТЕМИР ЙЎЛ МУҲАНДИСЛАРИ ИНСТИТУТИ**

қўлёзма ҳуқуқида
УДК 629.423.316.



САИДАКБАРОВ ИСЛОМ ИКРОМ УГЛИ

**«Фойдаланиш жараёнида электровозларни тортув
хусусиятларини таҳлили ва тадқиқи»**

5А310603 -«Темир йўл транспорти (Локомотивлар)»

мутахассислиги

буйича магистр даражасини олиш учун

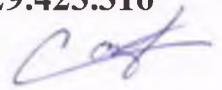
Магистерлик диссертацияси

Илмий раҳбар: т.ф.н , доцент Валиев М.Ш.

Тошкент – 2018

**JOINT-STOCK COMPANY «UZBEKISTAN RAILWAYS»
THE MINISTRY OF THE HIGHER AND THE REPUBLIC
UZBEKISTAN VOCATIONAL EDUCATION
THE TASHKENT INSTITUTE OF RAILWAY ENGINEERS**

**As the manuscript
UDC 629.423.316**



SAIDAKBAROV ISLOM IKROM O'G'LI

**«RESEARCH AND ANALYSIS OF TRACTION PROPERTIES OF
ELECTRIC LOCOMOTIVES IN OPERATION»**

On a speciality

5A310603 - «The Railway transport (Lokomotives)»

For reception of degree of the master

THE DISSERTATION OF THE MASTER

Scientific the head: p.h.D., docent Valiev M.SH.

Tashkent – 2018

«ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ» АЖ
ТОШКЕНТ ТЕМИР ЙЎЛ МУХАНДИСЛАРИ ИНСТИТУТИ

қўлезма ҳуқуқида

УДК 629.423.31.

Саидакбаров Ислон Икром Ўғли

**«Фоидаланиш жараёнида электровозларни тортув
хусусиятларини таҳлили ва тадқиқи»**

5А.310.603 – Темир йўл транспорти (Локомотивлар)

мутахасислиги

бўйича магистр даражасини олиш учун ёзилган

МАГИСТРЛИК ДИСЕРТАЦИЯСИ

Илмий раҳбар: т.ф.н., доцент в.б.

Валиев М.Ш.

Тошкент -2018

**JOINT-STOCK COMPANY «UZBEKISTAN RAILWAYS»
THE MINISTRY OF THE HIGHER AND THE REPUBLIC
UZBEKISTAN VOCATIONAL EDUCATION
THE TASHKENT INSTITUTE OF RAILWAY ENGINEERS**

As the manuscript

UDC 629.423.31

Saidakbarov Islom Ikrom O'g'li

**«RESEARCH AND ANALYSIS OF TRACTION PROPERTIES OF
ELECTRIC LOCOMOTIVES IN OPERATION»**

On a speciality

5A310603 - «The Railway transport (Lokomotives)»

For reception of degree of the master

THE DISSERTATION OF THE MASTER

Scientific the head: p.h.D, docent

Valiyev M.Sh.

Tashkent – 2018

«ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ» АЖ
ТОШКЕНТ ТЕМИР ЙЎЛ МУХАНДИСЛАРИ ИНСТИТУТИ

қўлезма ҳуқуқида

УДК 629.423.31.

Саидакбаров Илхом Икром ўғли

**«ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ТЯГОВЫХ СВОЙСТВ
ЭЛЕКТРОВОЗОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ»**

5А.310.603 – Темир йўл транспорти (Локомотивлар)

мутахасислиги

бўйича магистр даражасини олиш учун ёзилган

МАГИСТРЛИК ДИСЕРТАЦИЯСИ

Илмий раҳбар: т.ф.н., доцент в.б.

Валиев М.Ш.

Тошкент -2018

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «УЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙУЛЛАРИ»
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

Факультет «Эл. Механика»

Студент магистратуры: Саидакбаров И.И.

Кафедра «Локомотивы и л/х»

Учебный год 2016-2018

Научн. рук.: к.т.н. Валиев М.Ш.

Специальность: 5А310603 «Железнодорожный транспорт, (локомотивы)»

АННОТАЦИЯ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Тема диссертации Саидакбаров Ислом Икромвич «Исследование и анализа тяговых свойства электровозов в эксплуатации»

Актуальность работы. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором являются предпочтительным вариантом для привода вспомогательного оборудования ЭПС ввиду их дешевизны, надежности и простоты технического обслуживания. Недостатками асинхронных машин являются проблемы регулирования скорости их вращения и получения на ЭПС переменного тока симметричного трехфазного напряжения, а также снижение вращающего момента пропорционально квадрату питающего напряжения, что может привести к остановке вспомогательных машин при пониженном напряжении контактной сети. С учетом вышеизложенных, актуальным направлением при реконструкции электрической части вспомогательных машин существующих электровозов и проектировании вновь создаваемых электровозных систем, является направление, связанное с созданием частотно-регулируемых асинхронных приводов вспомогательных машин на основе перспективных схем преобразователей частоты.

Целью работы является исследования тяговых свойств электровозов в эксплуатации в условиях АО «Узбекистон темир йуллари»

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. анализ современного состояния и проблемы совершенствования цепи управления тягового электрического двигателя серии электровозов «Узбекистан»,

2. рассмотреть особенности проектирования асинхронного тягового двигателя в увязке с пускорегулирующим устройством и основы теории управления амплитудой и частотой напряжения.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, библиографического списка из 41 наименований и приложений. Общий объём диссертации 87 страниц, включая 45 рисунков и 10 таблиц.

Научный руководитель:

к.т.н., М.Ш Валиев

Студент магистратуры:

И.И Саидакбаров

«ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ» АКЦИЯДОРЛИК ЖАМИЯТИ
ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС ТАЪЛИМ
ВАЗИРЛИГИ
ТОШКЕНТ ТЕМИР ЙЎЛ МУҲАНДИСЛАРИ ИНСТИТУТИ

«Эл. механика» факультети Магистратура талабаси: Саидакбаров И.И.
«Локомотивлар ва л/х» кафедраси Илмий раҳбар: т.ф.н., Валиев М.Ш.
2016-2018 ўқув йили Мутахассислик: 5А310603 «Темир йўл
транспорти (Локомотивлар)»

МАГИСТЕРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИГА АННОТАЦИЯСИ

Саидакбаров Ислом Икром ўглининг магистрлик диссертация мавзуси
“Фойдаланиш жараёнида электровозларни тортув хусусиятларини таҳлили
ва тадқиқи”.

Тадқиқот мавзусининг долзарблиги. Қисқа туташган роторли
асинхрон моторлар ўзининг арзонлиги, ишончлилиги ва техник хизмат
кўрсатиш осонлиги билан электр ҳаракат таркиблари ёрдамчи жиҳозлари
юритмалари учун қулай ҳисобланади. Ўзгарувчан ток
электровозларининг кўпчилигида ёрдамчи асинхрон моторлар фаза
ажраткичлардан уч фазли озикланади.

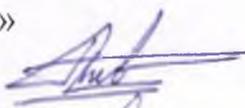
Асинхрон машиналарнинг камчиликлари сифатида уларнинг
тезликларини ростлаш ва электр ҳаракат таркибига олинаётган уч фазли
кучланишни симметриклигини таъминлаш, шунингдек айлантирувчи
моментни озиклаш кучланишининг квадратига пропорционал равишда
камайтириш заруратини кўрсатиш мумкин, бу эса ёрдамчи машиналарни
контакт тармоғидаги кучланиш пасайишида тўхтаб қолишига олиб келиши
мумкин.

Юқоридагилардан келиб чиқиб, мавжуд электровозлар ёрдамчи
машиналарини электр қисмларини реконструкция қилишда ва янгиларини
лойиҳалаштиришда частота ўзгартиргичларини қайта ўзгартиргичларини
истикболли схемалари асосида ёрдамчи машиналарнинг частотали
ростлашли асинхрон юритмаларни яратиш билан боғлиқ йўналиш долзарб
ҳисобланади.

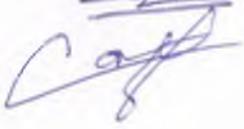
Диссертация мақсади. Электровозларни “Ўзбекистон темир
йўллари” АЖ шароитларида фойдаланишда тортув хусусиятларини тадқиқ
қилиш.

Диссертация кириш, уч боб, 41 номдаги адабиётлар ва иловалардан
иборат. Диссертация 87 саҳифа, ша жумладан 45 та расмлар ва 10 та
жадваллардан таркиб топган.

Илмий раҳбар: «Локомотивлар ва л/х»
кафедраси т.ф.н., доцент

 Валиев М.Ш.

Магистратура талабаси:

 Саидакбаров И.И.

JOINT-STOCK COMPANY «O'ZBEKISTON TEMIR YO'LLARI»
THE MINISTRY OF THE HIGHER AND THE REPUBLIC UZBEKISTAN
VOCATIONAL EDUCATION
THE TASHKENT INSTITUTE OF RAILWAY ENGINEERS

Faculty « El.Mechanics»
Chair «Locomotives and l/e»
Academic year 2016-2018

The Student of a magistracy: Saidakbarov I.I.
Scientific the head: PhD Valiev M.SH.
Specialty: 5A310603 «The Railway transport
(Locomotives)»

THE SUMMARY OF THE MAGISTER DISSERTATION

Theme of the dissertation Saidakbarov Islom Ikromvich "Research and analysis of tractive properties of electric locomotives in operation"

Actuality of work. Asynchronous squirrel-cage motors are the preferred option for driving auxiliary equipment because of their low cost of reliability and ease of maintenance. In turn, the reliability of locomotives is determined by the reliability of their individual elements, nodes and mechanisms. In this regard, the reliability of work, the resource of traction and auxiliary electrical machines are very relevant. The properties of insulation are determined by a whole set of operational factors and environmental conditions, among which the main is the process of its moistening during operation or long-term storage. A particularly sharp decrease in surface resistance is observed when the surface of an electrical machine is contaminated by conducting particles. The purpose of the work is to increase the service life of insulation of traction electric locomotive machines in various climatic conditions of operation by reducing the harmful effects of atmospheric moisture.

To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks:

1. Analysis of the current state and problems of improving the control circuit of the traction electric motor of the series of electric locomotives UZBEKISTON;
2. Consider the design features of the asynchronous traction motor in conjunction with the ballast and the basic theory of control of the amplitude and frequency of the voltage.

The thesis consists of an introduction, three chapters, a bibliographic list of 41 titles and annexes. The total volume of the thesis is 87 pages, including 45 figures and 10 tables.

Scientific the head:
of the chair «Locomotives and l/e», PhD,



Valiev M.SH.

The student of magistracy:



Saidakbarov I.I.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЯГОВЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОВОЗОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ	13
1.1. Главные параметры и характеристики электровозов	13
1.2. Тяговые и тормозные характеристики электровозов	18
1.3. Основные элементы систем автоматического управления	20
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВЫХ СВОЙСТВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ	33
2.1. Недостатки существующей системы управления тяговыми свойствами электровозов	33
2.2. Принципиальные схемы и принцип работы тяговых преобразователей электровозов	35
2.3. Особенности работы преобразователя электровоза.....	43
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОВОЗОВ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА	50
3.1. Вероятностно статистический анализ эксплуатационных режимов работы электровозов	50
3.2. Анализ результатов исследования тяговых свойств электровозов	67
3.3. Выводы и предложения по совершенствованию тяговых свойств электровозов	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	82
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	84
ПРИЛОЖЕНИЯ	88

1. Анализ тяговых свойств электровозов в эксплуатации

1.1. Главные параметры и характеристики электровозов

Электровозы «O`zbekiston» и «O`Z-Y» с приводом переменного тока для Узбекистана созданы согласно контракта по электровозам с АО «Узбекистон темир йуллари». Технические стандарты, применяемые при разработке и производстве данных электровозов соответствуют стандартам ISO, IEC, UIC, ГОСТ и GB и т.д. Электровозы данных типов предназначены для магистрального ж.д. участка Узбекских железных дорог, главным образом для осуществления грузовых перевозок, а также и для тяги пассажирских («O`Z-Y») поездов.

Основные особенности электровозов заключаются в следующем:

1. Номинальная мощность электровоза на валах тяговых двигателей в продолжительном режиме 6000 кВт.

Номинальная продолжительная мощность при рекуперативном торможении 5400 кВт. Номинальная сила тяги электровоза при пуске 450 кН. Номинальная сила тяги электровоза в продолжительном режиме 410 кН. Расчетный диапазон скоростей реализации продолжительной мощности 53- 120 км/ч для электровоза «O`zbekiston» и до 160 км/ч для электровозов «O`Z-Y». Формула ходовой части $V_0-V_0-V_0$ для электровоза «O`zbekiston», а для электровозов «O`Z-Y» C_0-C_0 . Номинальная ширина колеи 1520 мм.[3]

2. Конструкция общей компоновки электровоза с двумя кабинами машиниста и диагональным симметричным размещением интегральных шкафов. Применяется средний коридор и способ независимой вентиляции. Кузов с цельнонагрузочной конструкцией изготовлен из низколегированной стали с высокой механической прочностью.

3. На электровозе «O`zbekiston» установлены три двухосные тележки, две из которых концевые и одна промежуточная тележка. Первичное

рессорное подвешивание - цилиндрические винтовые пружины. Вторичное рессорное подвешивание - цилиндрические винтовые пружины с резиновыми накладками. Имеются вертикальные и поперечные гидравлические амортизаторы. Применяется способ односторонней прямозубой передачи. Тяговые двигатели с моторно-осевым подвешиванием при помощи роликовых подшипников. Применяется двухтактная тяговая установка с наклонной тягой в центральном низком положении.[4]

4. В силовой схеме применяются два преобразователя, на базе GTO модулей (запираемый тиристор) для электровозов «O'zbekiston», а для электровозов «O'Z-Y» на базе IGBT модулей (биполярный транзистор с изолированным затвором). Каждый силовой преобразователь состоит из промежуточного звена постоянного тока с 4-х квадрантными трёхфазными импульсными выпрямителями и двух инверторов, среди которых один инвертор питает тяговые двигатели одной и той же тележки. На электровозе данного типа применяется рамное управление. Другой инвертор питает один тяговый двигатель промежуточной тележки. Применяется осевое управление.

5. Вспомогательная цепь электровоза «O'zbekiston» получает электропитание от двух вспомогательных инверторов. Каждый, из которых соответственно состоит из 2-х модулей преобразователя с постоянной частотой и напряжением (VVVF).

6. На электровозах «O'zbekiston» и «O'Z-Y» применяется микропроцессорная система управления SIBAS 32 для осуществления управления. Применяется данная система преимущественно для управления и контроля на трёх уровнях. Система управления электровоза обладает сложной системой диагностики и контроля. Передача показаний и хранение осуществляется таким образом, чтобы повысить скорость выявления и ликвидации неисправностей электровоза.

7. Применяется способ управления с постоянством момента силы и

постоянством скорости для лучшей реализации максимальной силы тяги при пуске электровоза. Электровоз обладает защитной функцией против боксования и против юза, а также производится компенсация тяги между осями путем управления перераспределения осевых нагрузок. На электровозе имеется система автоматической подачи смазки к бандажу колеса и рельсу и установка контроля безопасности движения поезда.

8. Для пневматической тормозной системы электровоза применяется тормозная система CIS. Имеется функция электропневматического торможения.[12]

9. На электровозе предусмотрена установка пожарной безопасности, а также защитные установки от короткого замыкания, перезагрузки, перенапряжения, бросков тока, замыкания на землю и падения напряжения.

При сложных условиях через определенное время эксплуатации электровоза неизбежно будут появляться некоторые повреждения, т.е. для различных деталей и узлов будут появляться различные степени естественного износа, ослабления, трещины, деформации, коррозии или физико-химические изменения.

Основные технические параметры и характеристики электровозов серии «O‘zbekiston»

Электровозы предназначены для грузовых перевозок на железных дорогах Узбекистана.

Электровозы могут работать при следующих условиях:

-Высота над уровнем моря	не более 1500 м
-Температура окружающего воздуха:	-30 °С +50 °С
-Род тока:	однофазный переменный ток 50 Гц
-Рабочее напряжение:	
Номинальное напряжение	25 кВ

Максимальное напряжение	29 кВ
Минимальное напряжение	19 кВ
-Электровоз работает с полной мощностью при напряжении 22,5 – 27,5 кВ	
-Колея рельса	1520 мм
-Осевая формула	$B_0-B_0-B_0$
-Экипировочная масса электровоза	138 т
-Нагрузка на ось	23 т
-Высота продольной оси автосцепки над головками рельса:	1060±20 мм
-Высота с поверхности рельса до самой верхней точки электровоза	не более 4790мм±20 мм
-Рабочая высота продольной оси токоприемника над головками рельса:	5750 ÷ 6800 мм
Габаритные размеры и характеристики электровоза:	
-Расстояние между серединами тележки:	2×7200 мм
-Полная база:	17200 мм
-Диаметр колеса:	1250 мм
-Способ электрического привода:	
Переменно- постоянно-переменный ток	
-Мощность продолжительного режима:	6000 кВт
-Скорость электровоза:	
Продолжительная скорость	53 км/ч
Максимальная эксплуатационная скорость	120 км/ч
Максимальная испытательная скорость	130 км/ч
-Пусковая тяговая сила	450 кН
-Продолжительная тяговая сила	410 кН
-Способ электрические торможения:	Рекуперативное
-Максимальная электрическая тормозная сила:	285 кН
-Тормозная мощность на обode:	5400 кВт

Основные технические параметры и характеристики электровозов серии «O`Z-Y»

Назначение: электровозы предназначены для пассажирских перевозок на железных дорогах Узбекистана

Электровозы способны осуществлять перевозки при следующих условиях:

-высота над уровнем моря	1500 м
-температура окружающей среды	-30 °С +50 °С
-род тока:	переменный однофазный, 50 Гц
-рабочее напряжение:	
номинальное напряжение	25 кВ
мгновенное максимальное значение напряжения:	31 кВ
мгновенное минимальное значение напряжения:	17,5 кВ
-электровоз работает на полную мощность в диапазоне	22,5-30 кВ

Характеристики электровоза приведены далее:

-электропривод:	переменно – постоянный – переменный
-непрерывная мощность:	6000 кВт
-начальное тяговое усилие:	420 кН
-непрерывное тяговое усилие:	288 кН
-способ электрического торможения:	рекуперативное
-максимальное усилие электрического торможения:	220 кН
-колея рельса	1520 мм
-осевая формула	C ₀ -C ₀
-экипировочная масса электровоза	126 т
-нагрузка на ось	21 т

1.2. Тяговые и тормозные характеристики электровозов

Тяговая характеристика. На электровозе применён привод на переменном токе. Кривая тяговой характеристики электровоза приведена на рисунке 1.1.

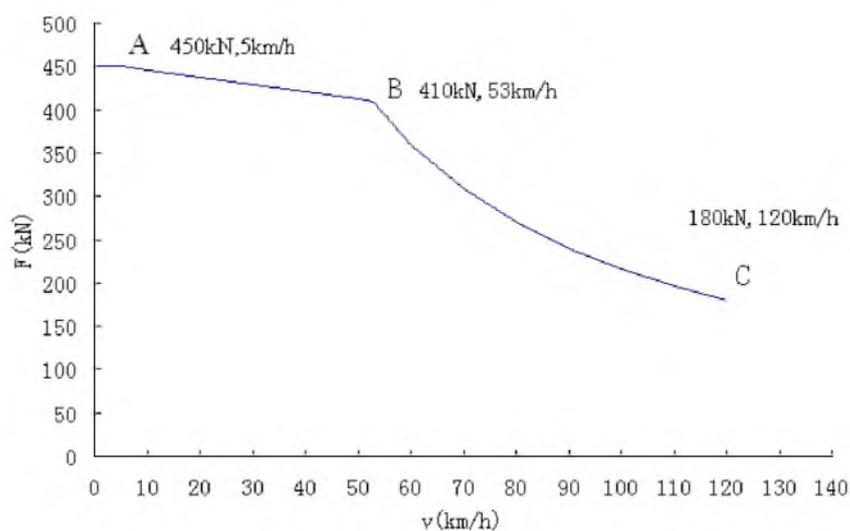


Рис. 1.1 Кривая тяговой характеристики электровоза «O'ZBEKISTON»

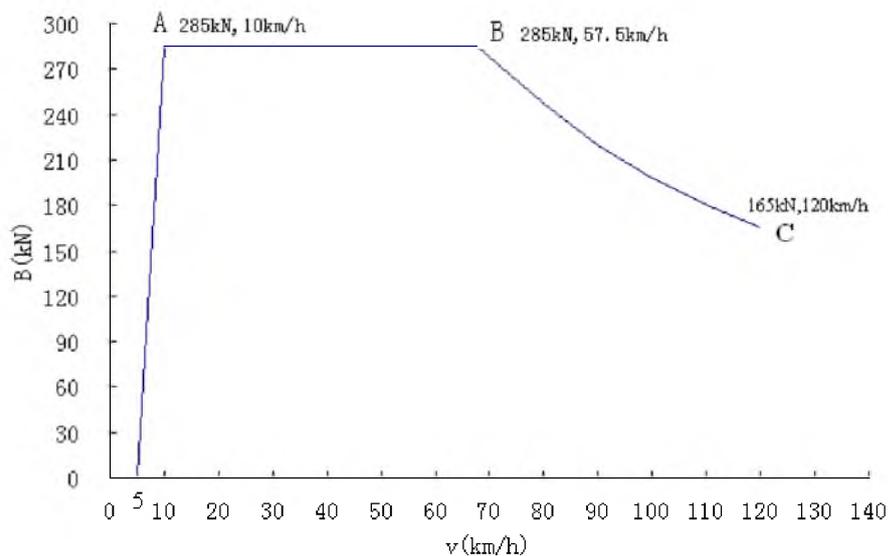


Рис. 1.2. Кривая характеристики электрического торможения электровоза «O'ZBEKISTON»

Тормозная характеристика. В электровозах новых серий применяется рекуперативное торможение. Тормозная характеристика приведена на рис.1.2. Электрическое торможение на электровозах реализуется на скоростях до <5км/ч.[40]

Тормозная зона контроллера машиниста разделяется на 10 ступеней. Зоны тормозного усилия равномерно распределены по тормозной характеристике электровоза (см. рис.1.3.)

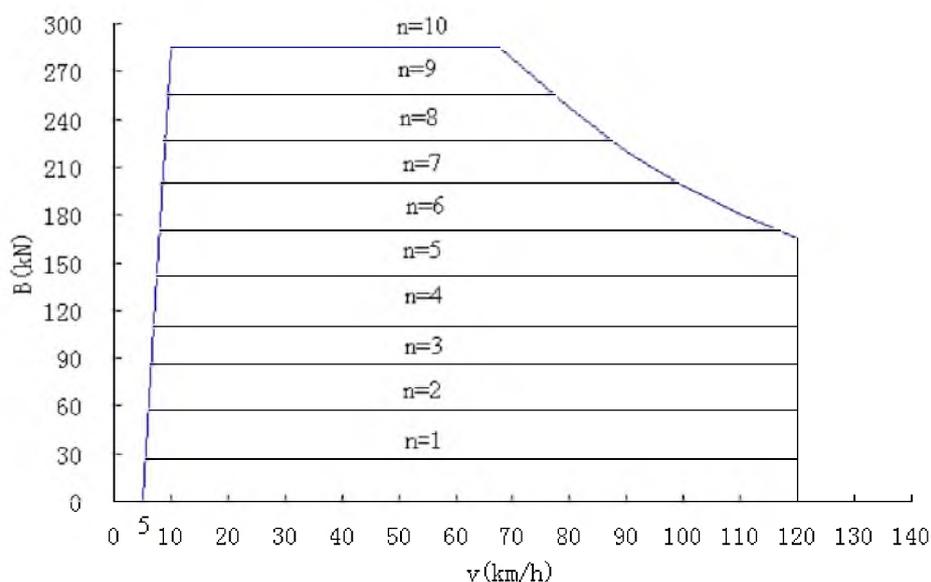


Рис. 1.3 Распределение кривых электрической тормозной силы электровоза для машиниста

На рисунке 1.4. изображены тяговая и тормозная характеристики пассажирского электровоза.

Зависимость рабочих характеристик от напряжения контактного провода распределяется в диапазоне от 17,5 кВ до 31 кВ. Однако наиболее эффективная эксплуатация реализуется в диапазоне от 22,5 кВ до 30 кВ. (Рис.1.5)



Рис.1.4. Диаграмма характеристики тягового и тормозного усилия при скорости 160 км/ч

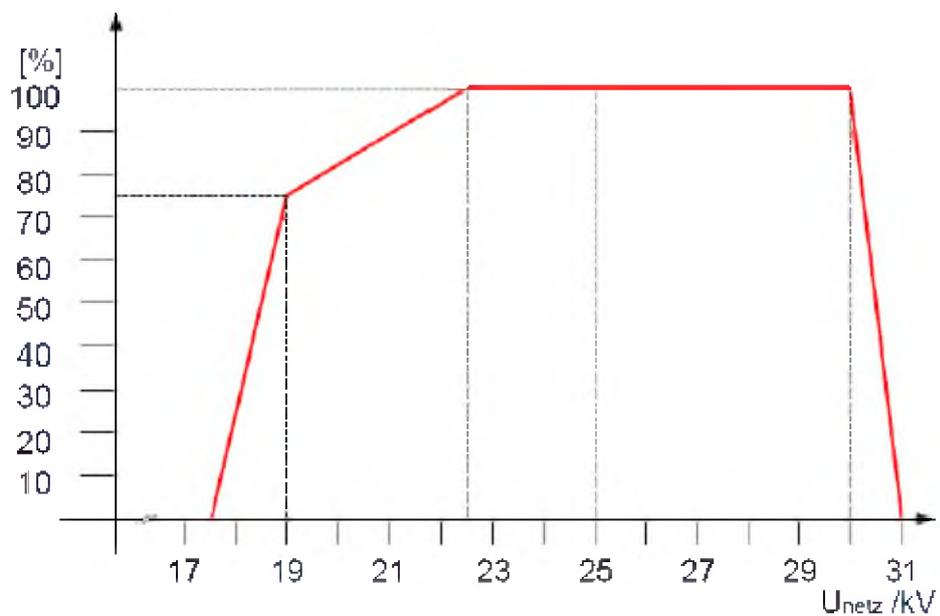


Рис.1.5. Зависимость рабочих характеристик от напряжения контактного провода

1.3. Основные элементы систем автоматического управления

Тяговый электродвигатель 1ТВ 2KF2624–3ЕА00 предназначен для преобразования электрической энергии, получаемой из контактной сети через преобразователь частоты и напряжения, в механическую энергию,

передаваемую колесной паре электровозов «O`zbekiston» и «O`Z-Y».

Подвешивание тягового электродвигателя на тележке электровоза опорно-осевое с индивидуальным приводом каждой колесной пары через редуктор.

Механические данные двигателя:

Внешне-охлаждаемый	1,4 м ³ /с
Диаметр ротора	446 мм
Диаметр отверстия статора	450 мм
Длина центрального узла	400 мм
Воздушный зазор	2 мм

Электрические данные двигателя:

При непрерывной эксплуатации номинальное напряжение	1987 В
Номинальный ток	344 А
Номинальная мощность	1020 кВт
Номинальная скорость	1450 об./мин.
Номинальная частота	0,83 Гц
Класс изоляции	200 °С
Номинальное изоляционное напряжение	2300 В
Максимальный ток	375 А
Максимальное напряжение	2027 В
Максимальная скорость	3450 об./мин.
Цепь.....	У
Кондукторный провод	1x95 мм ² /фаза
Спецификации	IEC 349-2 / VDE

0535

Вес двигателя:

Двигатель полностью	2450 кг
Ротор полностью (балансирующий комплект)	595 кг
Статор полностью (сердечник с обмоткой и корпусом)	1330 кг

Подшипник двигателя:

Подшипник (D-конец) BCI 7088 A, цилиндрический
роликподшипник
DIN (смазанный/электрически
изолированный)

Подшипник (N-конец) BBI 7009, глубоко канавный
шарикоподшипник
DIN (смазанный жиром/электрически изолированный)

Антифрикционная смазка для подшипников MOBILITH SHC 220

Первая смазка / количество для повторной смазки 1,1 кг

Количество для повторной смазки: Подшипник N-конец 240 г

Тяговый электродвигатель 1ТВ 2KF2624–3ЕА00 является трехфазной асинхронной электрической машиной бескорпусного исполнения, имеющий короткозамкнутый ротор, с принудительной вентиляцией и регулируемой частотой вращения, что обеспечивается изменением частоты питающего напряжения.

На рис.1.6. приведен продольный разрез тягового электродвигателя 1ТВ 2KF2624 – 3ЕА00.

Конструктивно электродвигатель состоит из статора 1, ротора 2, подшипниковых щитов 3 и 4, торсионного вала 5 с зубчатой полумуфтой 6.

Статор бескорпусного исполнения (рис.1.6.) содержит пакет магнитопровода, который в спрессованном состоянии зажат между двумя корпусами коробчатой формы, соединенными между собой сваркой шестью стальными накладками сечением 25x200 мм, имеющими длину, равную длине шихтованного сердечника. Корпусы являются несущей основой конструкции электродвигателя. На них выполнены «замки» для установки съемных кронштейнов 3, 4 (рис.1.7.) крепления электродвигателя к раме тележки; резьбовые отверстия А (см. рис.1.6.) для размещения транспортировочных рым-болтов; отверстия Б для слива конденсата и горловины для запрессовки подшипниковых щитов.

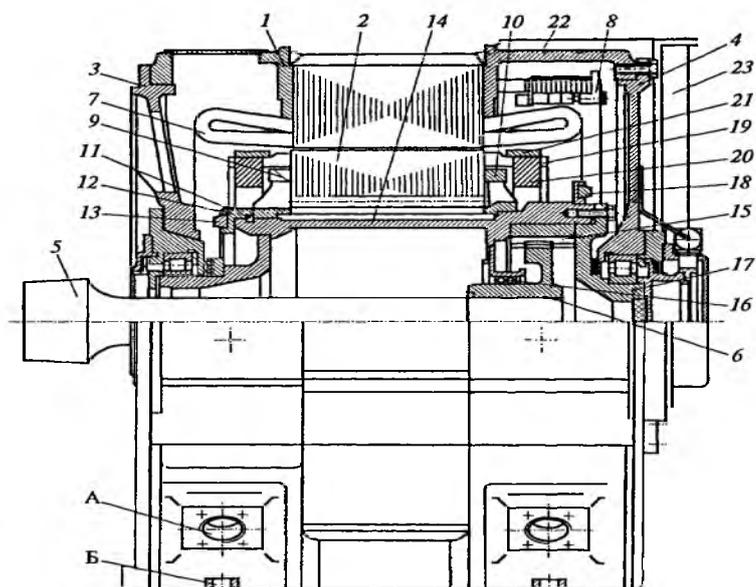


Рис. 1.6. Разрез асинхронного тягового электродвигателя 1ТВ 2КФ2624 – 3ЕА00:
 1-статор; 2-ротор; 3,4-подшипниковый щит; 5-торсионный вал; 6-зубчатая полумуфта;
 7-обмотка статора; 8-изоляционные пальцы; 9, 10-нажимные шайбы; 11-кольцевая
 шпонка; 12-удерживающее кольцо; 13-балансировочные грузы; 14-полый вал;
 15-зубчатый венец; 16-уплотнительная манжета; 17-съемная втулка; 18-кольцо;
 19-стержень ротора; 20-короткозамыкающее кольцо; 21-бандажное кольцо;
 22-вентиляционный короб; 23-кожух; А – резьбовые отверстия; Б – отверстия для слива
 конденсата.

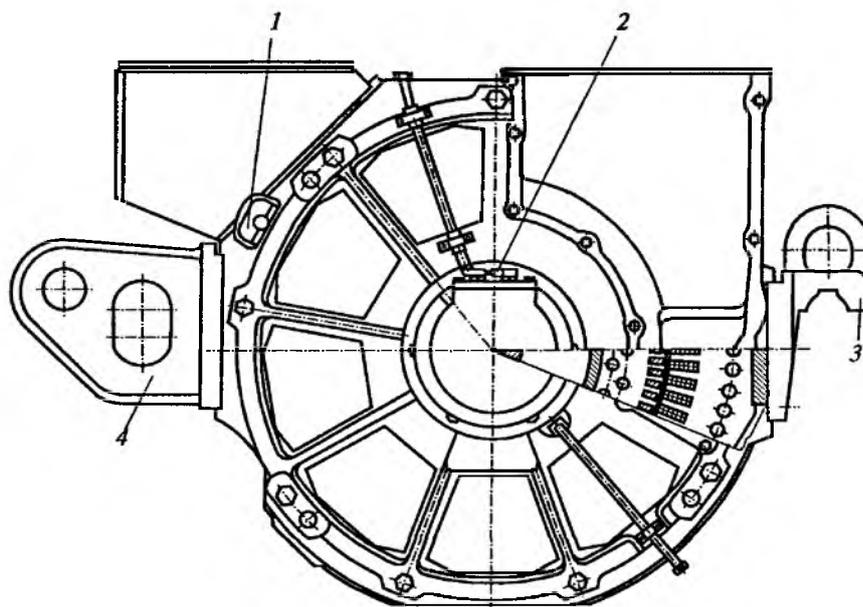


Рис. 1.7. Поперечный разрез тягового электродвигателя 1ТВ 2КФ2624 – 3ЕА00:
 1-датчик температуры; 2-датчик частоты вращения; 3,4-кронштейн для крепления
 электродвигателя

Одновременно корпуса являются камерами для размещения лобовых частей обмотки статора 7 и воздуховодами для равномерного распределения вентилирующего воздуха по поперечному сечению тягового электродвигателя.[41]

Трехфазная обмотка статора (рис.1.8.) состоит из двух независимых обмоток с общим числом полюсов $2p = 4$. Каждая фаза обмотки состоит из трех параллельных ветвей ($a = 3$). При этом каждая из обмоток собрана из фазных катушечных групп одной условной полярности. Обмотка 1 с катушками условно южной полярности соединена «в звезду» без вывода нулевой точки. Обмотка 2 с катушками условно северной полярности разомкнута и имеет свободные выводы начала и конца в каждой фазе.

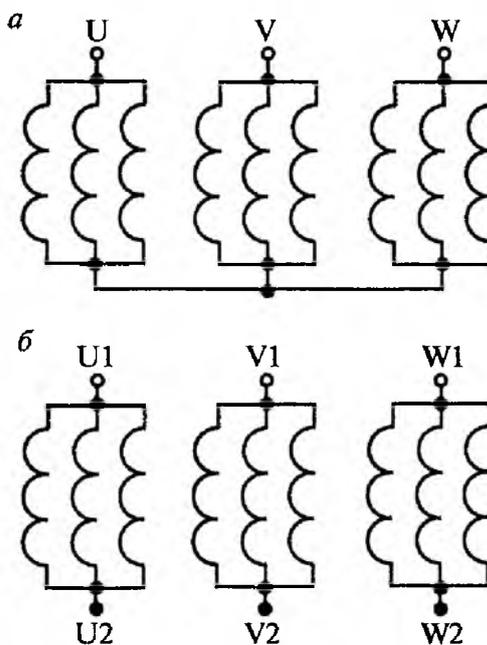


Рис. 1.8. Схема соединений обмотки статора в фазы тягового электродвигателя

1ТВ 2KF2624 – 3EA00: *a* – обмотка 1; *б* – обмотка 2

Такое исполнение статорной обмотки при некотором конструктивном усложнении выводов позволяет за счет внешней коммутации выводов в схеме электровоза соединять статорную обмотку на тяговом электродвигателе с включением фаз первой и второй обмоток последовательно в одну «звезду» или иметь две параллельные «звезды» с их независимым питанием, что продиктовано особенностями схемы

питания электровозов при работе от контактной сети переменного тока (25 кВ, 50 Гц). Конструктивно обмотка статора состоит из 72 жестких шаблонных катушек, уложенных в открытые пазы статора и закрепленных клиньями из профильного стеклопластика.

Катушки наматываются из медного изолированного прямоугольного провода марки ППИПК-1 с размерами 2,24x5,3/2,55x5,63мм (в два параллельных провода), имеют 9 витков. Корпусная изоляция катушек в пазовой части состоит из двух слоев с перекрытием в половину нахлестка и одного слоя с перекрытием 2/3 ширины ленты стеклослюдинитовой «Samikarog 366.86» – 0,11 x 20 мм и одного слоя стеклоленты ЛЭС 0,1 x 20 мм, уложенной встык. В лобовых частях – три слоя в половину нахлестка стеклослюдинитовой ленты и один слой ленты ЛЭС с аналогичным перекрытием. Пазы статора перед укладкой катушек изолируются гильзами из синтофлекса 828 толщиной 0,15 и 0,24 мм.

После укладки и расклиновки катушки соединяются между собой в катушечные группы и фазы шинными переключками (рис.1.9.) методом пайки припоем ПСР-25Ф. Соединения изолируются стеклослюдинитовой лентой ЛСЭК-5-СПл 0,1 x 20 мм и стеклолентой ЛЭС 0,1 x 20 мм. Шинные переключки выполнены из медной ленты ДПРНМ сечением 1,81 x 19,5 мм и изолированы шестью слоями стеклослюдинитовой ленты ЛСЭК-5-СПл в половину нахлестка, размером 0,1 x 20 мм и одним слоем в половину нахлеста стеклоленты ЛЭС 0,1 x 20 мм. Комплект шинных переключек размещен на жестких скобах, приваренных изнутри к корпусу статора со стороны выводов, и закрепляется специальными изоляционными пальцами, выполненными из прессматериала АГ-4В. К фазным шинным переключкам припаяны гибкие кабельные выводы с опрессованными и соответственно промаркированными наконечниками.

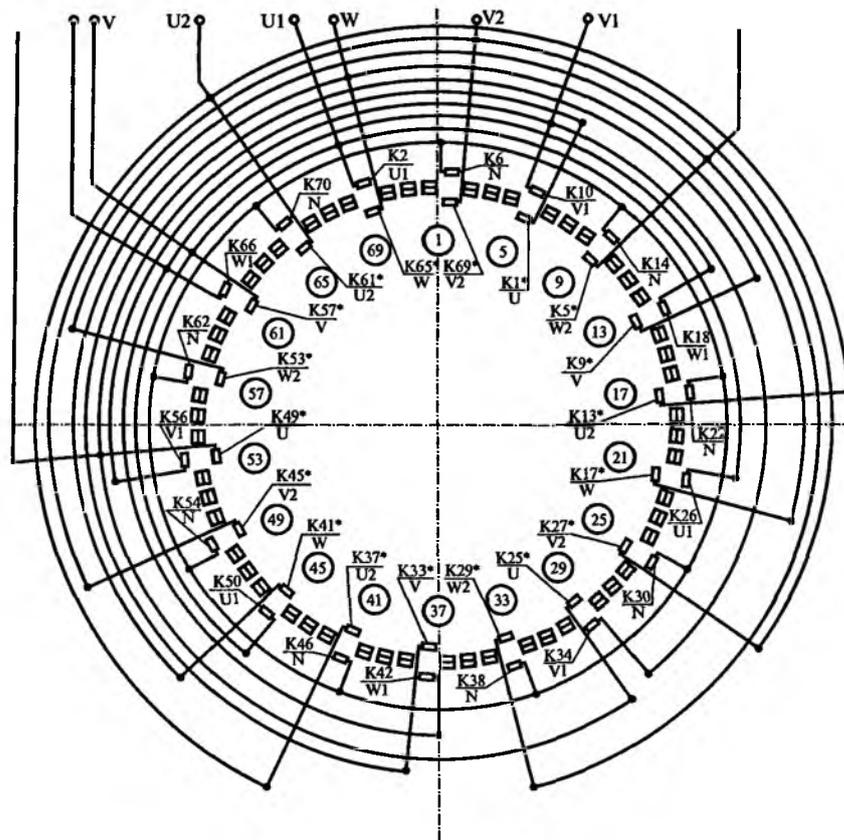


Рис. 1.9. Схема соединений выводов обмотки статора тягового электродвигателя
1ТВ 2КФ2624 – 3ЕА00

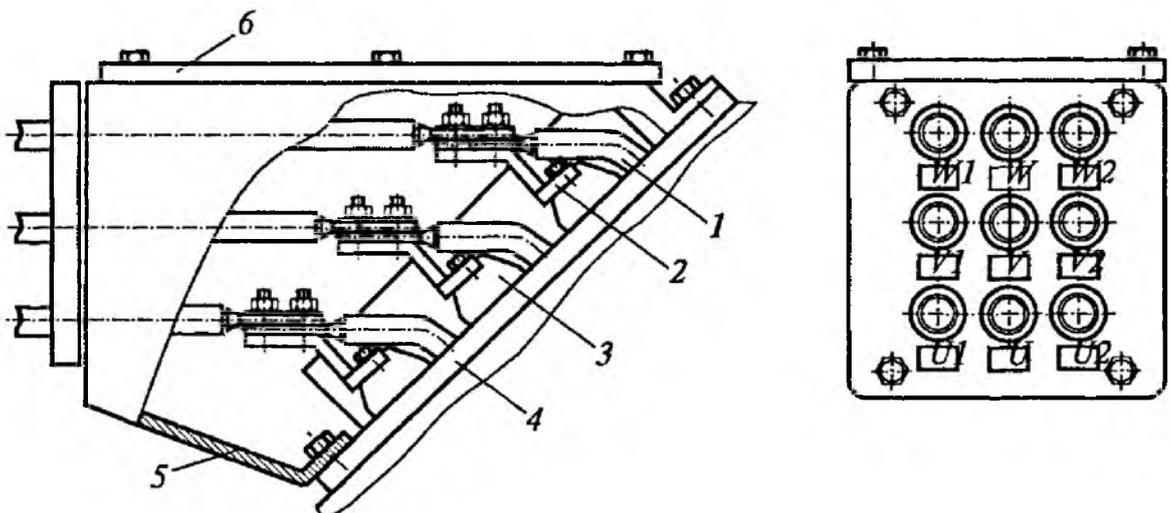


Рис. 1.10. Коробка выводов тягового электродвигателя 1ТВ 2КФ2624 – 3ЕА00:
1-наконечники выводных кабелей; 2-кронштейн; 3-опорный изолятор;
4-изоляционная панель; 5-корпус; 6-крышка

Коробка выводов (рис.1.10.) служит для расположения наконечников выводных кабелей 1, которые крепятся на кронштейнах 2 опорных изоляторов 3. Опорные изоляторы расположены на изоляционной панели 4, установленной в коробке выводов. Коробка закрывается крышкой б из стеклопластика.

Короткозамкнутый ротор 2 содержит сердечник, выполненный из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 мм, с двух сторон зажатый нажимными шайбами 9, 10, имеющими прессовую посадку на вал. Со стороны запирающей шайбы установлена кольцевая шпонка 11 и удерживающее кольцо 12, соединенное с нажимной шайбой электросваркой. В удерживающем кольце предусмотрена канавка для установки балансировочных грузов 13.

Пакет магнитопровода ротора, имеющий вентиляционные отверстия и пазы для укладки роторной обмотки 19, напрессован на полый вал 14, представляющий собой втулку, через которую проходит торсионный вал 5.

Торсионный вал 5 с напрессованной зубчатой полумуфтой 6 соединяется с зубчатым венцом 75 муфты привода, который в свою очередь запрессован в полость втулки, образованную с одной стороны перегородкой с сальником (две уплотнительные манжеты 16), с другой стороны – съемной втулкой 17, служащей второй подшипниковой опорой ротора.

Сальниковые манжеты плотно прилегают к торсионному валу, создавая таким образом в зубчатой полумуфте 6 масляную камеру, в которую заливается масла.

При избыточном заполнении масляной камеры излишки масла могут в процессе монтажа электродвигателя с колесной парой, вследствие большого перекоса торсионного вала, вытекать через манжеты во внутреннюю полость втулки ротора по торсионному валу до создания нормального уровня в камере муфты, соответствующего при невращающемся роторе уровню расположения манжет. Наличие подтеков

масла на торсионном валу не является признаком ненормальной работы электродвигателя.

Кольцо с канавкой для балансировочных грузов 18 напрессовывается на втулку полого вала 14 и приваривается к нему после укладки и пайки обмотки ротора 19. Кроме того, на втулку полого вала напрессованы детали лабиринтно-щелевого уплотнения подшипников и внутренние обоймы подшипников.

Роторная короткозамкнутая обмотка выполнена из 88 медных прямоугольных стержней 19 сечением 9,0 x 25 мм, соединенных по торцам медными короткозамыкающими кольцами 20 пайкой серебрясодержащим припоем ПСР-25Ф. В средней части стержни заземлены в пакете железа ротора с помощью керновки. Отсутствие центрирующих элементов короткозамыкающих колец, а также наличие по краям пакета железа листов с расширенными размерами пазов позволяет стержням свободно перемещаться при тепловых деформациях как в аксиальном направлении – от места керновки, так и в радиальном направлении в консольной части – от места фиксации в пазу.

Для обеспечения прочности короткозамыкающих колец и соединений со стержнями на специально проточенные поверхности короткозамыкающих колец напрессованы бандажные кольца 21, которые выполнены из специальной высокопрочной немагнитной стали. Посадка колец осуществлена с предварительным нагревом до температуры 280 °С.

Для исключения появления дополнительного шума в работающем электродвигателе от вибрации листов в зубцовой зоне магнитопровода ротор пропитан в кремнийорганическом лаке КО-916К.

Окончательно собранный ротор подвергается динамической балансировке с допустимым остаточным дисбалансом не более 90 гсм на каждую сторону.

Подшипниковые щиты тягового электродвигателя выполняют роль опоры ротора и изготовлены из стального литья в виде дисков (рис.1.11.).

В средней части щиты имеют гнезда для посадки наружных колец подшипников *1, 2* и размещения деталей уплотнения подшипниковых камер: крышек подшипников *3, 4, 5*; дозирующих колец *6, 7*; лабиринтных колец *8, 9*, а по наружному контуру – утолщения с фланцами для запрессовки и крепления их болтами М20 в корпусах статора. Во фланцах имеется по четыре отверстия с резьбой М30 для выжимных болтов, с помощью которых щиты выпрессовываются из остова при разборке тягового электродвигателя. С наружной стороны на щитах установлены трубки *10, 11* для подачи смазки в подшипники и камеры *12* для сбора отработанной смазки.

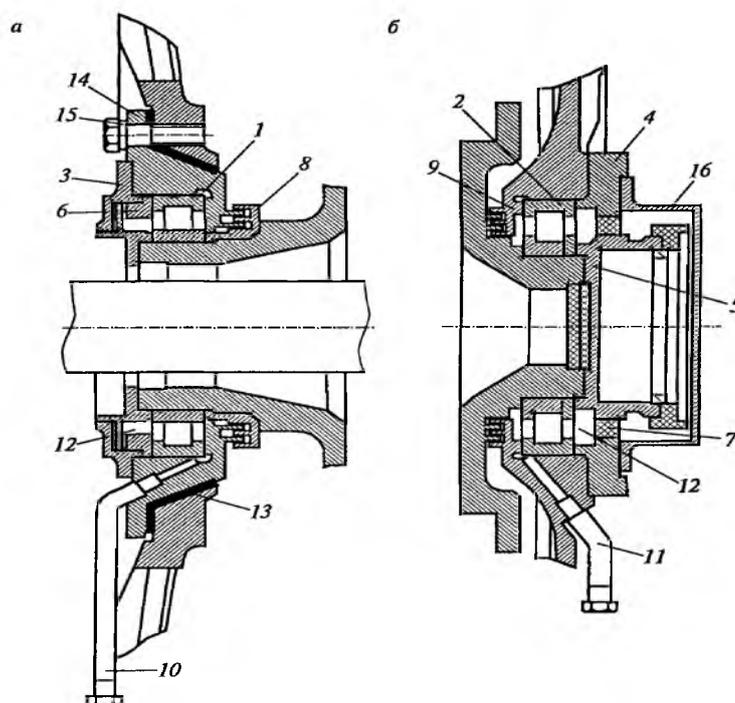


Рис. 1.11. Система уплотнения подшипников и подвода смазки тягового электродвигателя 1ТВ 2КФ2624–3ЕА00:

а–малый подшипниковый щит; *б*–большой подшипниковый щит; 1,2-подшипники; 3, 4, 5-крышки подшипников; 6, 7-дозировочные кольца; 8,9-лабиринтные кольца; 10, 11-трубки подачи смазки; 12-камера сбора отработанной смазки; 13-миканитовая манжета; 14-изоляционная втулка; 15-изоляционная прокладка; 16- крышка.

С целью защиты подшипников от протекания по ним «подшипниковых токов», возникающих от магнитной несимметрии машины, подшипниковый щит со стороны выхода конца торсионного вала выполнен

с изолированной ступичной частью. Изолировка осуществляется формованной миканитовой манжетой 13, изоляционными втулками 14 и изоляционными прокладками 15.

В электродвигателе 1ТВ 2KF2624-3ЕА00 применены специальные подшипники качения, рассчитанные на повышенную частоту вращения: со стороны привода – роликовый подшипник 80-32134М2; со стороны, противоположной приводу – роликовый фиксирующий подшипник 80-92228М1. Подшипниковые камеры заполняются специальной смазкой, которая закладывается при сборке электродвигателя.

Для реализации частотного управления на электродвигателе установлен бесконтактный датчик частоты вращения (рис.1.12.). Вращающаяся часть 2 датчика закреплена на втулке ротора со стороны зубчатой муфты, а неподвижная ответная часть 1 – на крышке подшипникового щита. Специальными кабелями и штепсельными разъемами датчик соединяется со схемой управления электровоза.

Для контроля теплового состояния на тяговом электродвигателе вмонтированы термодатчики. Датчик температуры (рис.1.13) представляет собой два терморезистора в виде капсул 1, установленных в специальные гнезда в одном из зубцов сердечника статора 2. Специальным кабелем 3 и штепсельным разъемом 4 соединяется со схемой управления электровоза. Терморезисторы соединены с выводным кабелем пайкой; место присоединения закрыто специальной уплотнительной крышкой 5.

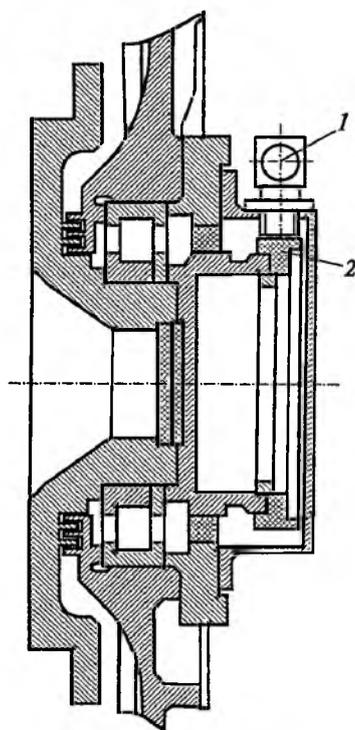


Рис.1.12. Установка датчика частоты вращения тягового электродвигателя 1ТВ 2KF2624 – 3ЕА00:

1-неподвижная часть датчика; 2-подвижная часть датчика

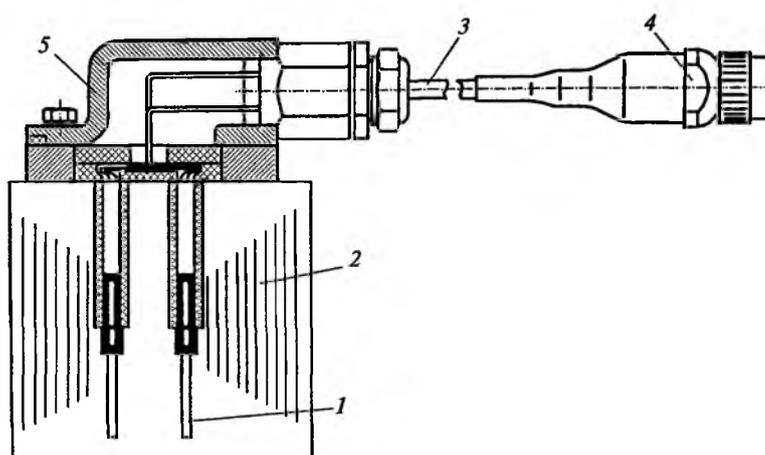


Рис. 1.13. Установка термодатчиков тягового электродвигателя 1ТВ 2KF2624 – 3ЕА00: 1-капсула с терморезисторами; 2-зубец сердечника статора; 3-кабель;

4-штепсельный разъем; 5-уплотнительная крышка

Вентиляция электродвигателя 1ТВ 2KF2624–3ЕА00 имеет независимую принудительную систему. Охлаждающий воздух подается в вентиляционный патрубок, который состоит из металлического короба 22,

установленного на боковине статора со стороны зубчатой муфты и стеклопластового кожуха 23, закрепленного на подшипниковом щите, и выходит из электродвигателя через торцевые окна в подшипниковом щите со стороны выходного конца торсионного вала.

Глава 2. Исследование тяговых свойств преобразователей электровозов

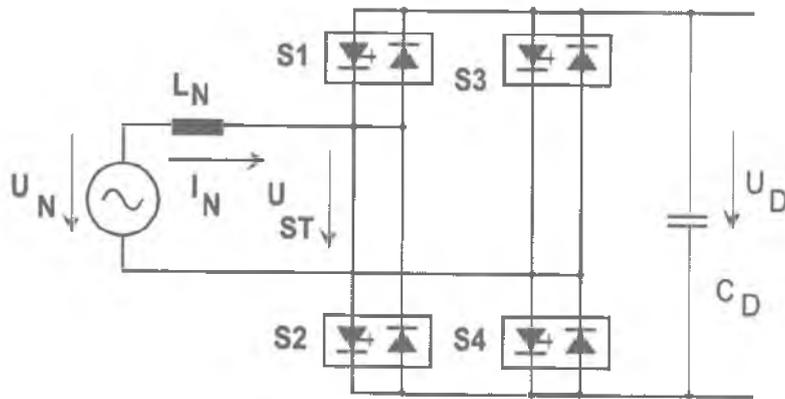
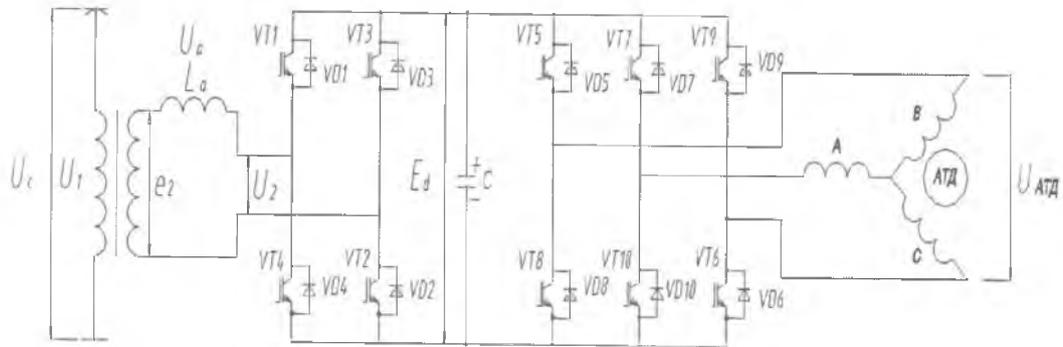
2.1. Недостатки существующей системы управления тяговыми свойствами электровозов

Тяговые преобразователи на полупроводниковых преобразователях используются в основном для асинхронных приводов, являются основными элементами силовых цепей электротранспорта и подъёмной техники. Самыми распространёнными видами тяговых преобразователей являются трёхфазные преобразователи (инверторы) по схеме Ларионова («три параллельных полумоста») на тиристорных ключах (GTO) или на транзисторных ключах (IGBT). Самыми распространёнными видами тяговых преобразователей на сегодняшний день являются GTO и IGBT, пришедшие на смену приводов с реостатным регулятором .

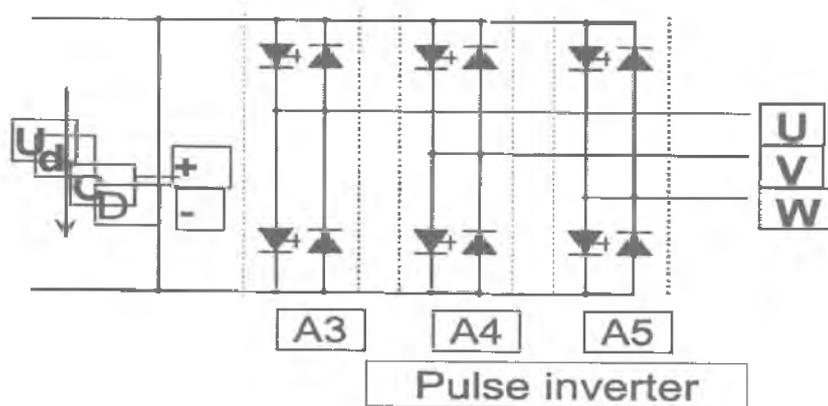
Приводы с реостатным регулятором начали использоваться в электротранспорте с 1880-х годов для обеспечения плавного передвижения вагона. Автоматический реостатный регулятор известен с начала XX века и называется реостатно-контакторной системой управления (РКСУ). Главным элементом является контактор с системой реостатов (на сленге техников «ускоритель»). При нажатии педали ускорения («ходовой» педали) «палец» ускорителя начинает медленно смещаться к контакту; машина начинает плавно ускоряться. При торможении привод переходит в режим генератора и нагревает резистор.

Тяговый преобразователь (4q-S) - это два моста (однофазный и трёхфазный) с тиристорами и обратными диодами, соединённые между собой со стороны постоянного напряжения. Со стороны переменного тока - последовательно включен индуктивный фильтр. Со стороны постоянного напряжения - параллельно включён емкостной фильтр.[8]

Со стороны однофазного моста напряжение контактной сети $U_{КС} = \text{const}$ и $f_{КС} = \text{const}$. Со стороны трёхфазного моста напряжение асинхронного тягового двигателя $U_{АТД} = \text{var}$ и $f_{АТД} = \text{var}$ (рис.2.1).



а) четырехквadrантный преобразователь



б) Инвертор напряжения (PWM)

Рис. 2.1. Принципиальная схема тягового преобразователя

Первые образцы четырёхквadrантного преобразователя, применённые фирмой «*Siemens*» в 1979 году на электровозе £120, имели однооперационные тиристоры с контурами искусственной коммутации. В дальнейшем эти преобразователи выпускались на двухоперационных тиристорах.[14]

Название преобразователя объясняется тем, что преобразователь допускает работу в режимах тяги и торможения. Причем ток, потребляемый из сети, может, как отставать от напряжения сети, так и опережать его. Если вектор напряжения сети совпадает с положительным направлением вещественной оси, то возможны режимы работы преобразователя, при которых вектор сетевого тока располагается в любом из четырех квадрантов комплексной плоскости. Режимы работы четырёхквadrантного преобразователя приведены в табл. 1.

Принцип работы четырёхквadrантного преобразователя проще рассмотреть на примере режима рекуперации, когда происходит однофазное инвертирование.

2.2 Принципиальные схемы и принцип работы тяговых

Постоянное напряжение E_d на конденсаторе преобразуется в переменное напряжение U_a . При этом происходит чередование следующих режимов:

$$f_M = f_{ATD}$$

Режимы работы четырёхквadrантного преобразователя

Режимы АТД	Режимы мостов		Частота модулирующего напряжения
	Однофазного	Трёхфазного	
Тяга	Транзисторы закрыты, неуправляемый выпрямитель, $E_d = \text{const}$	АИН с ШИМ, регулирование $f_{АТД}$ и $U_{АТД}$	$f_M \bar{f}_{АТД}$
Торможение	АРФЛ с ШИМ, постоянная частота f_c и действующее значение напряжения U , регулирование угла φ	Транзисторы закрыты, неуправляемый выпрямитель, $E_d = \text{var}$ при изменении скорости АТД	$f_M \bar{f}_c$

-Открыты два транзистора в противоположных плечах VT1 и VT2. Конденсатор разряжается на вторичную обмотку трансформатора с сохранением полярности $U_a = E_d$. Ток $i_a = i_d$ спадает;

- Открыты два транзистора в смежных плечах VT1 и VT3. Вторичная обмотка трансформатора замкнута накоротко в первом полупериоде через VD3 и VT1, во втором полупериоде через VD1 и VT3. Ток нарастает. Напряжение на выходе однофазного моста $U_a = 0$. Конденсатор заряжается от трехфазного моста и отделен от однофазного, $i_a = 0$. Открыты два транзистора в противоположных плечах VT3 и VT4. Конденсатор разряжается на вторичную обмотку трансформатора с изменением полярности $U_a = -E_d$. Ток $i_a = -i_d$ спадает;

- Открыты два тиристора в смежных плечах VT2 и VT4. Вторичная обмотка замкнута накоротко в первом полупериоде через VT2 и VD4, а во втором, полупериоде через VT4 и VD2. Как и в случае 3.2, конденсатор заряжается трехфазного моста и отделен от однофазного. Ток i_a нарастает, $i_d = 0$.

Система управления тиристорами сравнивает напряжения U_m и U_n . U_m – синусоидальное модулирующее напряжение с частотой f_c , сдвинутое по фазе на угол ψ относительно первой гармоники напряжения e_{a1} на вторичной обмотке трансформатора. Напряжение U_m вырабатывается специальным генератором, позволяющим регулировать угол ψ . $(-U_m)$ – синусоидальное напряжение, сдвинутое на 180° относительно U_m .

При рекуперации частота модулирующего напряжения равна частоте контактной сети $f_m = f_c$, а при тяге – частоте на статоре АТД $f_r = f_{\text{АТД}} = U_n$ – пилообразное напряжение симметричной формы с частотой

$$f_n = 2f = 5f_c,$$

достигающее максимума при прохождении модулирующего напряжения через ноль. Отношение частот пилообразного и модулирующего напряжений должно быть равно целому нечётному числу. На этом электровозе $n=5$.

Условия открытого состояния транзисторов:

$$-VT1: U_m > U_n;$$

$$-VT4: U_m < U_n;$$

$$-VT3: -U_m > U_n;$$

$$-VT2: (-U_m) < U_n.$$

Напряжение на вторичной обмотке трансформатора e_a можно разложить в ряд Фурье. Амплитуда первой гармоники этого ряда e_{a1} регулируется глубиной модуляции μ , которая равна отношению амплитуд модулирующего и пилообразного напряжений

при этом

$$e_{ma1} = \mu E_d$$

$$U_m = U_{mm} (2\pi f_m t)$$

Угол сдвига, φ_a – между первыми гармониками тока i_{a1} и напряжения e_{a1} регулируется изменением угла сдвига ψ между

модулирующим напряжением U_m и напряжением на вторичной обмотке трансформатора e_a .

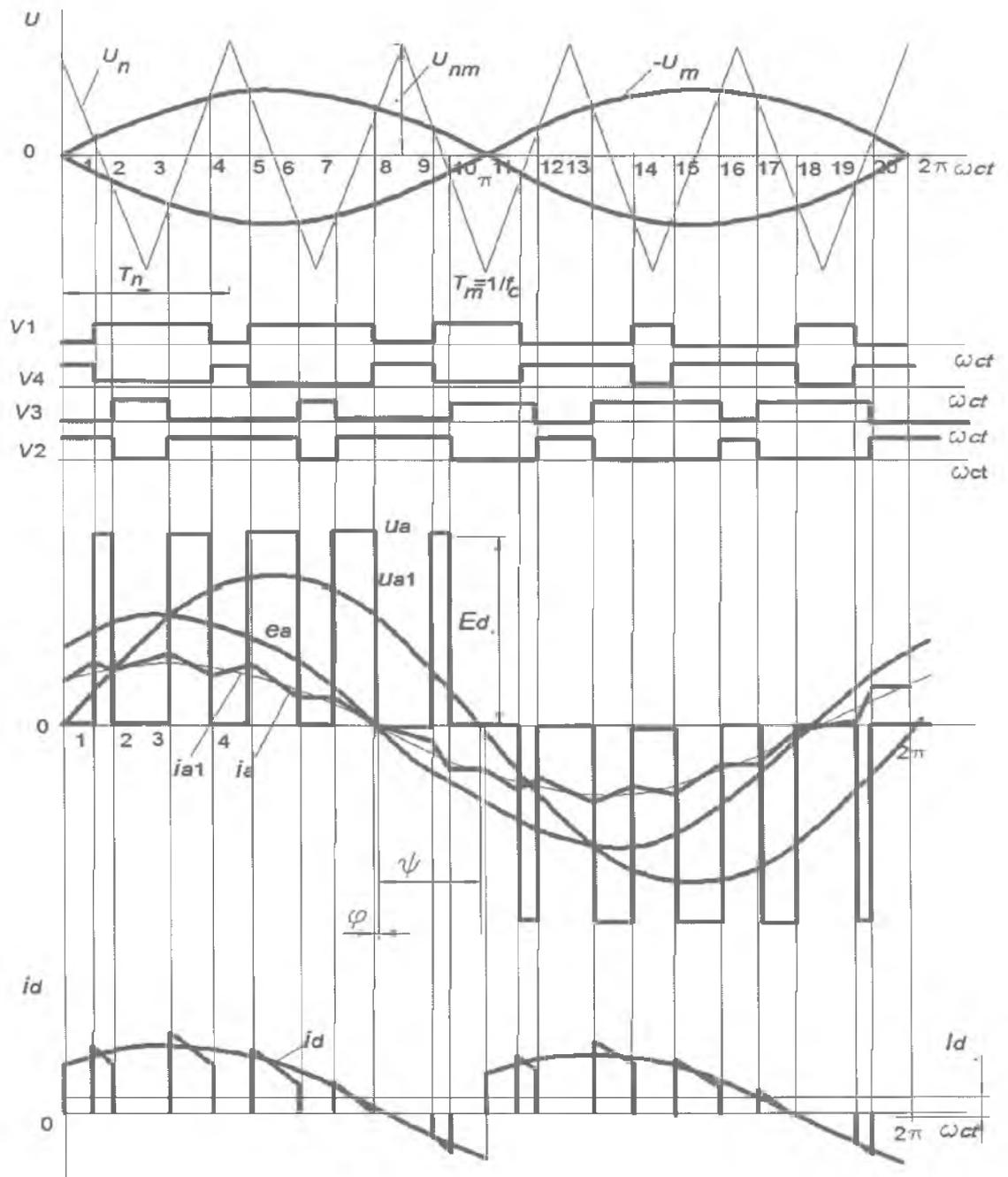


Рис.2.2. Осциллограмма напряжений и токов

Напряжение на первичной обмотке трансформатора E_a равно геометрической сумме напряжения на выходе инвертора U_a и падения напряжения на индуктивности $jU_a L_a \omega$. Регулируя угол сдвига ψ между U_m и e_a можно добиться, чтобы угол φ_a в режиме тяги был равен нулю, а в режиме рекуперации -180° .

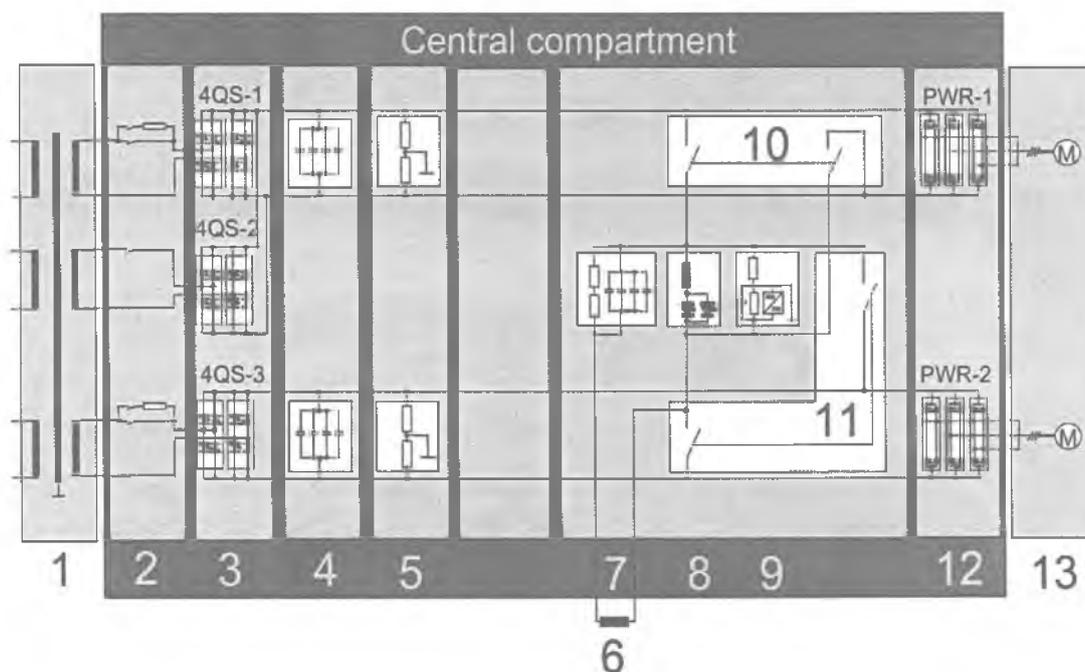


Рис 2.3. Тяговый преобразователь

Оборудование установленное в тяговом шкафу:

- 1- Main Transformer
(Главный трансформатор)
- 2- Pre-charging / transformer breaker (входные фильтры)
- 3- Four-quadrant regulating chopper (четырёхквadrантный преобразователь)
- 4- DC link capacitor battery

Этот электровоз стал результатом совместной работы китайских инженеров, инженеров немецкой компании «Siemens», российских инженеров, а также активного участия специалистов из Узбекистана. 7 лет эксплуатации на электрифицированных железных дорогах Узбекистана показали, что электровоз достаточно удачный и пригоден для осуществления перевозок в условиях Узбекистана.[32]

Схема и основные характеристики тягового преобразователя, используемого в новом электровозе представлена на рис. 2.2.

Оборудование установленное в тяговом шкафу:

- 1- Main Transformer (Главный трансформатор)
- 2- Pre-charging / transformer breaker (входные фильтры)
- 3- Four-quadrant regulating chopper (четырёхквadrантный преобразователь)
- 4- DC link capacitor battery (вставка постоянного тока)
- 5- Permanent discharger (разрядник)
- 6- Resonant circuit choke
- 7- Resonant circuit capacitor (конденсаторные емкости)
- 8- Protective module
- 9- Earth fault registration
- 10- Isolator Q8
- 11- Isolator Q9
- 12- Pulse width modulated inverter (Инверторы напряжения с широтно-импульсной модуляцией)
- 13- Traction motors. (Тяговые двигатели)

Основные параметры тягового преобразователя представлены далее в таблице 2.2.2.

Таблица 2.2.

№	Основные параметры тягового преобразователя	
1.	Nominal input voltage	3 x 1285 V 1 AC
2.	Input voltage range	930 V- 1500 V
3.	Input frequency	50 Hz
4.	Pulse 4QC	max. 5-fold
5.	GTO-switch frequency 4QC	max. 250 Hz
6.	Input current traction operation max.	3x 1195 Aeff
7.	Input current brake operation max.	3 x 950 A eff
8.	Nominal output voltage range traction operation	3 AC 0 V to 2200 V
9.	Nominal output voltage range brake operation	3 AC 0 V to 2200 V
10.	Nominal output current traction operation	2 x 3 AC 830 A eff

11.	Nominal output current brake operation	2x3 AC 615 A eff
12.	Output frequency driving/braking	0 Hz to 117 Hz
13.	DC link circuit voltage traction operation	300-2600 V
14.	DC link circuit voltage brake operation	2400 - 2600 V
15.	Capacity of DC link circuit	8,28 mF -2% +3%
16.	Capacity of resonant capacitor	9,8 mF ± 5%
17.	Protection ignition voltage (BOD)	3450 V±70 V
18.	Control voltage	110 V
19.	Control voltage range	77 Vto 138 V
20.	Three-phase current	440 V 60 Hz
21.	Interfaces	power connections
22.	Distance in air power current circuit	14 mm according to rEn 50124-1/01-1995 sketch
23.	Creep distance power current circuit	28mm according to rEn 50124-1/01-1995 sketch
24.	Overvoltage category	OV2 according to prEn 50124-1/01-1995 sketch
25.	Test voltage power part	5,1 kV DC
26.	Test voltage control part	1,06 kV DC
27.	Earthing	ohmic / capacitive
28.	Mode of cooling	water cooling
29.	Mixture of cooling agent	water/Antifrogen N proportion 56/44
30.	Flow volume of cooling agent	280 l/min
31.	Maximum temperature of cooling agent	i nflow / outflow 55 □ C / 63 □ C
32.	Filling amount (traction inverter on its wn)	301
33.	Protection class	1 according to VDE 0106 part 1
34.	Mode of protection	IP 54 according to DIN 5510 part 1 10/88
35.	Fire protection	Stage 2 according to DIN 5510 Part 110/88
36.	Protection against alien elements	DIN VDE 0160 sketch 4/9
37.	Protection against touch	DIN VDE 0160 sketch 4/9
38.	Protection against dangerous body currents	DIN VDE 0160 sketch 4/9
39.	Maximum height for operation	1.500 NN at full power
40.	Noise development	< 80 dB A according to IEC 61287-1
41.	Ecological friendliness	according to SN 36350 Part 1 and part 2 09/94

Трехфазный инвертор (состоящий из 3-х модулей) может строиться из фазных модулей. На рисунке представлены GTO модули, используемые в тяговом преобразователе электровозов Узбекистон. В одном модуле 2 тиристора GTO и элементы цепи необходимые для работы данного модуля. Модули имеют принудительную систему охлаждения(жидкостную).

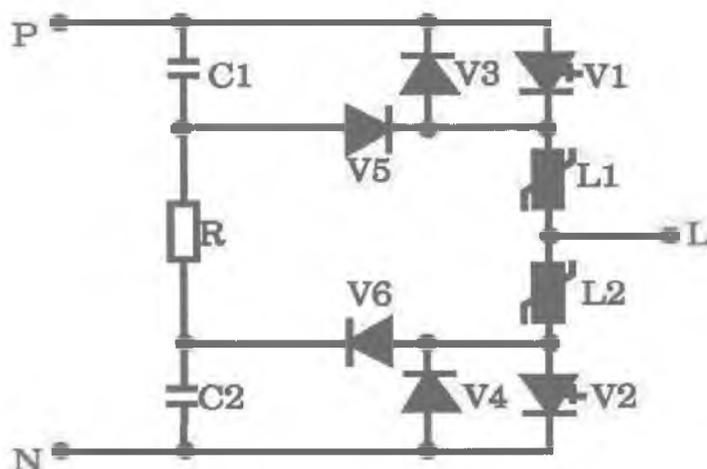


Рис.2.4. Схема цепи модуля GTO



Рис.2.5. Внешний вид GTO модуля

Каждый из модулей спроектирован для надежной работы с интегрированной системой управления TCU (блок управления преобразователем).[28]

2.3. Особенности работы преобразователя электровоза

В данном дипломном проекте рассматривается моделирование и расчет электрооборудования электровозов переменного тока с асинхронным тяговым приводом. Аппаратная часть взята стандартной (трансформатор типа ТВQ3 6-8460/25, IGBT модули и драйвера компании Toshiba, FUJI Electric, Eupec и Mitsubishi, асинхронный тяговый двигатель с короткозамкнутым ротором типа 1ТВ2624). Производители современной электронной техники предлагают широкий выбор полупроводниковых элементов, и по классу, и по цене. Правильно выборов IGBT модулей для выпрямительно-инверторной установки можно достичь оптимальной экономической выгоды, и при этом сохранять необходимой надежности системы. [34]

В данном разделе рассматриваются экономические показатели надежности полупроводниковых преобразователей.

С увеличением надежности систем их стоимость существенно возрастает. Стоимость эксплуатации аппаратуры тем ниже, чем она надежнее.

Для оценки влияния экономических показателей на надежность системы принято использовать коэффициент стоимости эксплуатации:

$$C = C_{э} + C_{и} \quad (2.1)$$

где $C_{э}$ – стоимость эксплуатации системы;

$C_{и}$ - стоимость изготовления системы;

Расчет будем вести отдельно для инвертора и для выпрямителя, так как требование к элементам у них разные.

Стоимость изготовления системы состоит из расходов на приобретение полупроводниковых элементов и из расходов на монтаж:

$$C_{и} = C_{п} + C_{мон} \quad (2.2)$$

где C_{Π} – стоимость полупроводниковых элементов, определяется как произведение количество элементов на стоимости единицы, Дол.

$$C_{\Pi} = N_{эл} \quad (2.3)$$

$C_{\text{монтаж}}$ – расходы на монтажных работ элементов, 20% от стоимости полупроводниковых элементов:

$$C_{\text{монтаж}} = 0,2 C_{\Pi} \quad (2.4)$$

Преобразователи на основе силовых полупроводниковых приборов как IGBT транзисторы практически не требуют обслуживания. Только надо периодически менять элементов вышедшие из строя. И так, стоимость эксплуатации состоит из расходов на приобретению новых элементов в место вышедших из строя и расходов на демонтаж.

$$C_{э} = C_{\text{зам}} + C_{\text{демонтаж}} \quad (2.5)$$

где $C_{\text{зам}}$ – стоимость заменяемых элементов;

$C_{\text{демонтаж}}$ – расходы на демонтажных работ, новых элементов, 25% от стоимости заменяемых элементов.

Стоимости заменяемых элементов определяется по формуле

$$C_{э} = N * (1 - P) * C_{эл} \quad (2.6)$$

где P – надежность преобразователя, после расчетного периода времени T ,
(принимая $T = 10000$ ч.)

2.3.1. Экономические показатели надежности инвертора.

IGBT модули для проектирования инвертора представлены в

Таблица 2.3.1

Производитель	Тип	Класс	Стоимость единицы $C_{эл.}$, дол.	Количество элементов преобразователя	Стоимость преобразователя $C_{п.}$, дол.	Надежность после 10000 ч. Работы Р
	1MBI100L-060	6	\$95	162	\$15 368	8,20E-06
	EVL32-060D	6	\$103	126	\$13 020	0,00023
	2DI200MC-050	6	\$156	90	\$14 025	0,005862
	1DI400A-060	6	\$140	54	\$7 533	0,120931
	2DI100D-100	10	\$155	108	\$16 740	0,000686
	1DI200Z-100	10	\$143	60	\$8 556	0,045822
	1DI400D-100	10	\$271	28	\$7 584	0,509304
Eupec	DD600S16K4	16	\$486	18	\$8 742	0,645143
Mitsubishi Electric	CM800HA-34H	17	\$556	18	\$10011	0,86217

Для экономического расчета выбираем из каждого класса по одного типа полупроводниковых приборов, который более надежен, чем остальные элементы того же класса.

Таблица 2.3.2.

Производитель	Тип	Класс	Стоимость преобразователя $C_{п.}$, Дол.	Монтажные работы -20% $C_{мон.}$, Дол.	Стоимость изготовления $C_{изг.}$, Дол.	Надежность после 10000 ч. Работы Р
	1DI400A-060	6	\$7 533	\$1 507	\$9 040	0,12
	1DI400D-100	10	\$7 584	\$1 517	\$9 101	0,51
Eupec	DD600S16K4	16	\$8 742	\$1 748	\$10 490	0,645
Mitsubishi Electric		17				

Предположим, что через 10000 часов работы те части элементов, что указано в столбце надежности, сохраняют свою работоспособность, а остальные элементы выйдут из строя.

Результаты расчетов приведены в таблице 2.3.3.

Графики приведены на рис 2.3.1.

Таблица 2.3.3.

Тип	Стоимость единицы Сэл., Дол.	Количество элементов преобразователя N, шт.	Вероятность отказов после 10000 ч. Работы (1-P)	Количество заменяемых элементов Nзам, шт.	Стоимость заменяемых элементов Сзам Дол.	Стоимость демонтажных работ Сдемонтаж Дол.	Стоимость эксплуатации, Сэ, Долг
1DI400A-060	\$140	54	0,88	48	\$6 696	\$1 674	\$8 370
1DI400D-100	\$271	28	0,49	14	\$3 792	\$948	\$4 740
DD600S16K4	\$486	18	0,355	7	\$3 400	\$850	\$4 250
CM800HA-34H	\$556	18	0,138	3	\$1 669	\$417	\$2 086

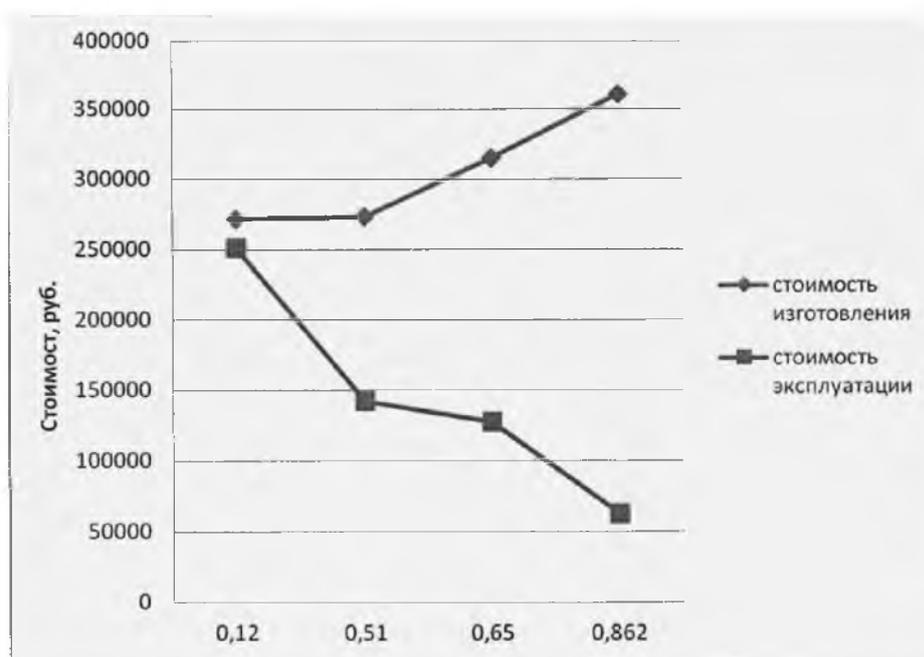


Рис 2.3.1. Экономические показатели надежности инвертора.

Во многих случаях выгодно выбрать аппаратуру на основании следующего критерия:

$$C_э + C_и = C_{\min} \quad (2.7)$$

Таблица 2.3.4

Тип	Стоимость эксплуатации, Сэ, Дол.	Стоимость изготовления Си, Дол.	Сумма стоимостей Сэ+Си, Дол.	Коэффициент стоимости эксплуатации К _{сэ}
ID1400A-060	\$8 370	\$9 040	\$17 410	0,926
ID1400D-100	\$4 740	\$9 101	\$13 841	0,5
DD600S16K4	\$4 250	\$10 490	\$14 740	0,4
CM800HA-34H	\$2 086	\$12 013	\$14 099	0,174

2.3.2. Экономические показатели надежности выпрямителя.

IGBT модули для проектирования инвертора представлены в таблице

2.3.5

Таблица 2.3.5

Производитель	Тип	Класс	Стоимость единицы С _{эл.} , Дол	Количество элементов в выпрямителе N _v	Стоимость выпрямителя С _v , Дол	Надежность после 10000 ч. Работы Р
Electric	2DI200MC-050	6	\$156	144	\$22 440	3,64E-05
	ID1400A-060	6	\$140	80	\$11 160	0,011781
	ID1200Z-100	10	\$143	108	\$15 401	0,000686
Euprec	ID1400D-100	10	\$204	60	\$12 252	0,045822
	DD600S16K4	16	\$406	32	\$12 981	0,297909
Toshiba	MG1500FXPIUSS1	34	\$871	12	\$13 936	0,925478

Экономический расчет надежности выпрямителя производится аналогично с инвертором. Результаты расчетов приведены ниже в таблицах 2.3.6, 2.3.7, 2.3.8, а график экономического показателя надежности на рис. 2.3.2.

Таблица 2.3.6

Производитель	Тип	Класс	Стоимость преобразователя C_n Дол	Монтажные работы -20% $C_{мон}$ Дол	Стоимость изготовления $C_{из}$ Дол	Надежность после 10000 ч. Работы P
FUJI Electric	ID1400A-060	6	\$11 160	\$2 232	\$13 392	0,011781
	ID1400D-100	10	\$12 252	\$2 450	\$14 702	0,045822
Euprec	DD600S16K4	16	\$12 981	\$2 596	\$15 578	0,297909
Mitsubishi Electric	CM800HA-34H	17	\$13 348	\$2 670	\$16018	
Toshiba	MG1500FXFIUSS1	34	\$13 936	\$2 787	\$16 723	0,925478

Таблица 2.3.7

Тип	Стоимость единицы $C_{эл.}$, Дол	Количество элементов преобразователя N, шт.	Вероятность отказов после 10000 ч. Работы (1-P)	Количество заменяемых элементов $N_{зам}$, шт.	Стоимость заменяемых элементов $C_{зам}$ Дол	Стоимость демонтажных работ $C_{демонтаж}$ ДОЛ	стоимость эксплуатации, $C_э$, Дол
ID1400A-060	\$140	80	0,988219	79	\$11 021	\$2 755	\$8 370
ID1400D-100	\$204	60	0,954178	57	\$11 639	\$2 910	\$4 740
DD600S16K4	\$406	32	0,702091	22	\$8 925	\$2 231	\$4 250
CM800HA-34H	\$556	24	0,490696	12	\$6 674	\$1 669	\$2 086
MG1500FXFIUSS1	\$871	16	0,074522	1	\$871	\$218	\$1 089

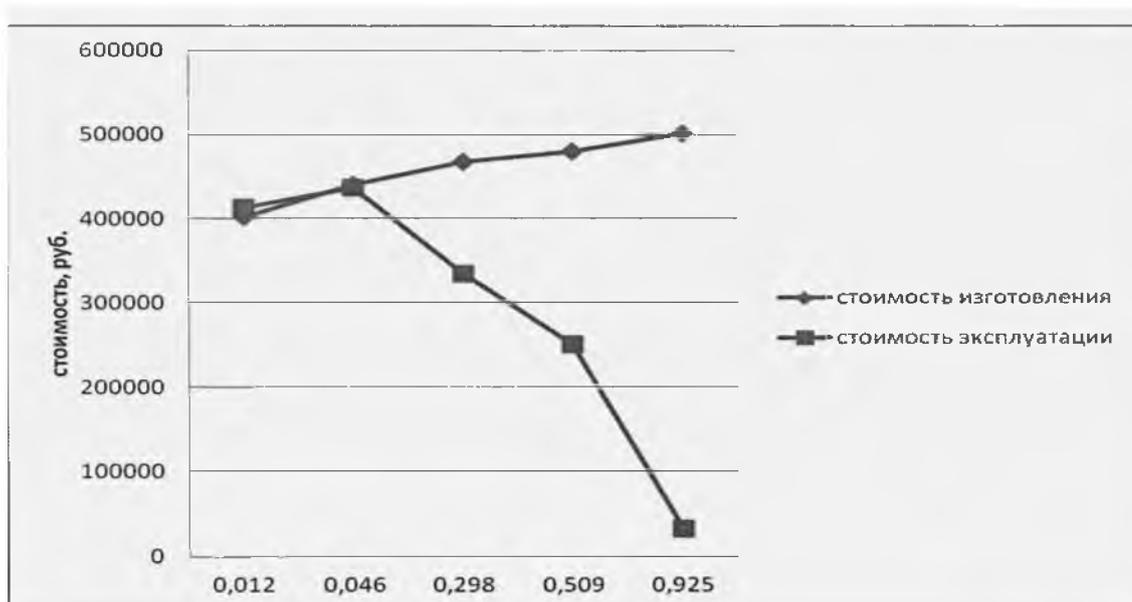


Рис 2.3.2. Экономические показатели надежности выпрямителя.

Таблица 2.3.8

Тип	Стоимость эксплуатации, $C_э$, дол	Стоимость изготовления $C_и$ Дол	Сумма стоимостей $C_э+C_и$, дол	Коэффициент стоимости эксплуатации $K_{Cэ}$
1DI400A-060	\$8 370	\$9 040	\$17410	1,028646
1DI400D-100	\$4 740	\$9 101	\$13 841	0,989583
DD600S16K4	\$4 250	\$10 490	\$14 740	0,716146
CM800HA-34H	\$2 086	\$12 013	\$14 099	0,520833
MG1500FXF1US51	\$1 089	\$16 723	\$17 812	0,065104

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОВОЗОВ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

3.1. Вероятностно статистический анализ эксплуатационных режимов работы электровозов

Среди электрических двигателей первое место по своему распространению занимают трехфазные асинхронные двигатели. Не менее 95% всех электродвигателей переменного тока, применяемых в разных отраслях промышленности и народном хозяйстве, принадлежат именно к этому классу. Как и все другие электрические машины, асинхронные электродвигатели обратимы и могут работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора. Однако в качестве генераторов асинхронные машины на подвижном составе не применяются, а потому мы будем рассматривать их только в качестве двигателей.

Неподвижный стальной кольцеобразный сердечник вместе с укрепленной в нем многофазной обмоткой носит название статора. В расточке статора расположена вращающаяся часть двигателя – ротор, который состоит из вала, сердечника и обмотки (рис.3.1). Обмотка ротора состоит из стержней, уложенных в пазы сердечника и замкнутых с двух сторон кольцами (рис.3.2).

Принцип действия асинхронного двигателя основан на свойствах вращающегося магнитного поля статора, образуемого многофазным, обычно трехфазным током, с токами в обмотке ротора. Благодаря чередованию фаз в неподвижно расположенных обмотках создается результирующий, постоянный по величине магнитный, поток, вращающийся в пространстве со скоростью n_1 , соответствующей частоте тока. Частота вращения ротора зависит не только от частоты приложенного напряжения, но и от величины нагрузки.



Рис.3.1. Статор ТЭД

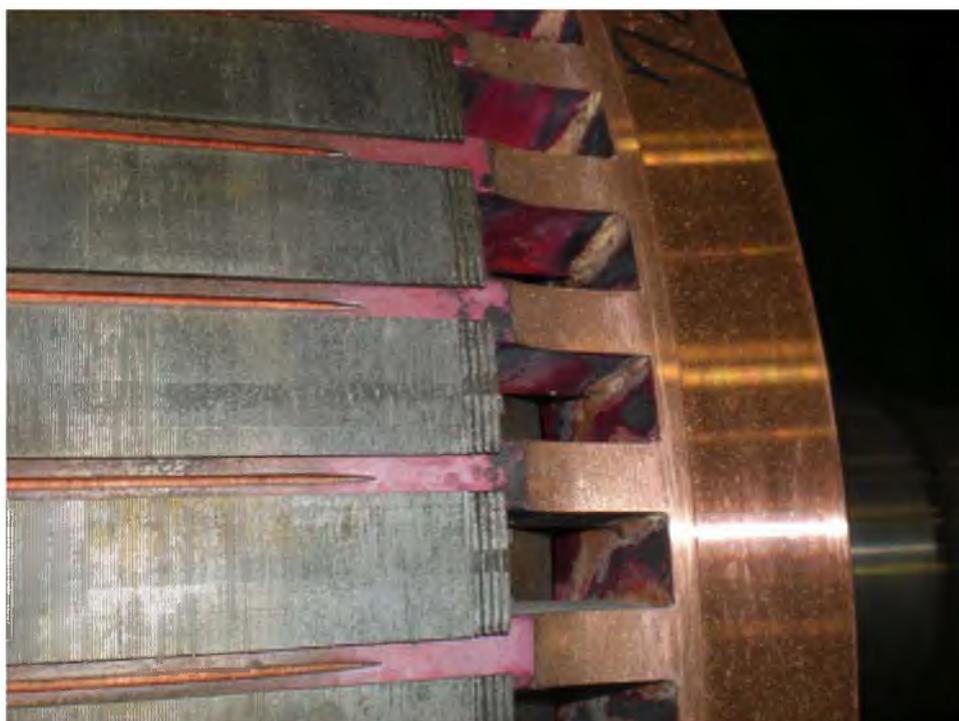


Рис.3.2. Ротор ТЭД

По основному принципу электромагнитной индукции (закон Ленца) взаимодействие индуцированного тока с потоком создает момент, противодействующий причине возникновения этого тока. Ток вызывается

в данном случае относительным перемещением потока и ротора. Следовательно, создается момент, стремящийся уменьшить относительную скорость магнитного потока и ротора, т. е. момент, приводящий ротор во вращение в сторону вращения поля. Однако скорость вращения ротора всегда меньше скорости вращения потока, ибо лишь при этом условии возможно пересечение ротора вращающимся полем и появление индуктированного в роторе тока. Отставание ротора от поля, лежащее в основе действия двигателя, обусловило появление термина «асинхронный», что значит «неодновременный». Асинхронные двигатели часто называются еще индукционными; так же как в индукционных (трансформаторах) приборах, работающих на том же принципе, ток движущейся части не подводится извне, а индуктируется движущимся магнитным полем.

Вращающееся поле статора пересекает проводники (стержни) обмотки ротора и наводит в них э.д.с. Но так как обмотка ротора замкнута накоротко, то в стержнях протекает относительно большой ток. Таким образом, имеем взаимодействие проводника с током в магнитном поле. На проводник обмотки ротора действует электромагнитная сила $F_{\text{ПР}}$, направленная вслед за вращением поля статора. Совокупность сил $F_{\text{ПР}}$, приложенных к отдельным проводникам, создает на роторе электромагнитный момент M , приводящий его во вращение со скоростью n_2 . Вращение ротора через вал передается исполнительному механизму.

Таким образом, электрическая энергия, поступившая в обмотку статора из сети, преобразуется в механическую.

Направление вращения магнитного поля статора, а следовательно, и направление вращения ротора, зависит от порядка чередования фаз питающего напряжения. При необходимости изменить направление вращения ротора асинхронного двигателя следует поменять местами любую пару фазных выводов, соединяющих двигатель с сетью.

За основу принимается двухполюсная система, создаваемая тремя

витками или катушками, взаимно сдвинутыми в пространстве на 120° . За один период переменного тока двухполюсное магнитное поле делает один оборот; поэтому число оборотов поля в минуту $n_1 = 60f$, где f — частота тока. При

стандартной частоте $f = 50$ *Гц* скорость вращения поля равна

$$n_1 = 60 \times 50 = 3000 \text{ об/мин.}$$

При числе полюсов больше двух необходимо различать механическую и электрическую угловую скорость вращения поля. Электрическая угловая скорость $\omega = 2\pi f$ независима от числа катушек и числа полюсов статорной обмотки. Что же касается механической скорости $\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}$, то

она обратно пропорциональна числу пар полюсов магнитного поля. Действительно, при числе p пар полюсов имеется $3p$ витков или катушек, сдвинутых взаимно на $\frac{2\pi}{3p}$ или $\frac{360}{3p}$ геометрических градусов. За один период переменного тока магнитный поток переместится в пространстве на часть окружности, занимаемую тремя соседними витками, принадлежащими трем фазам, т. е. на $\frac{2\pi}{p}$ или $\frac{360}{p}$ градусов. Очевидно,

угловая скорость вращения поля
$$\omega_1 = \frac{2\pi f}{p},$$

(3.1)

а число оборотов в минуту магнитного поля

$$n_1 = \frac{60f}{p} \text{ об/мин} \quad (3.2)$$

Таким образом, в двухполюсной машине $n_1 = 3000$ об/мин, четырехполюсной машине $n_1 = 1500$ об/мин, шестиполюсной $n_1 = 1000$ об/мин, в восьмиполюсной $n_1 = 750$ об/мин и т. д. при $f_1 = 50$ Гц.

Обозначая соответственно через n_1 и n_2 скорости вращения магнитного поля и ротора, мы найдем скорость вращения поля относительно ротора:

$n^1 = n_1 - n_2$. Отношение величины n^1 к скорости поля носит название скольжения асинхронного двигателя и обозначается буквой S . Итак,

$$S = \frac{n^1}{n_1} \text{ или в процентах: } S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%.$$

Скольжение является для асинхронных двигателей основным фактором, определяющим условия работы машины. Решая уравнение относительно n_2 , найдем:

$$n_2 = n_1 (1 - S) = \frac{60 f (1 - S)}{p}. \quad (3.3)$$

По причинам, рассмотренным ниже, скольжение S делается по возможности малым, порядка нескольких процентов. Поэтому скорость двигателя мало отличается от скорости поля; например, для четырехполюсного двигателя, при $S = 4\%$, скорость вала двигателя составит 1440 об/мин.

Взаимодействие магнитного поля ротора можно уподобить взаимодействию приводного ремня и ведомого шкива (механизм ременной передачи); в обоих случаях наблюдается асинхронизм в движении ведущего и ведомого звена, а также наличие скольжения.

В электромагнитном отношении асинхронная машина подобна трансформатору, в котором статор играет роль первичной, а ротор - вторичной системы.

Обмотка статора асинхронного двигателя, так же как и первичная обмотка трансформатора, выполняет две функции. Во-первых, она создает магнитодвижущую силу; в этом отношении обмотка статора выполняет роль обмотки возбуждения машин постоянного тока. Во-вторых, обмотка статора передает электрическую энергию ротору, в котором эта энергия преобразуется в механическую энергию вращения.

Для лучшего использования окружности статора и получения наибольшего магнитного потока обмотка статора распределяется по всей внутренней поверхности кольцеобразного сердечника статора.

Простейшая трехфазная однослойная четырехполюсная обмотка статора показана в разрезе . На приведена ее схема в развернутом виде. Обмотка состоит из 12 проводников (или сторон секций), соответственно пронумерованных на обоих рисунках. Каждый проводник располагается в соответствующем пазу в сердечнике статора. Если при одной паре полюсов вся окружность статора представляет 360 электрических градусов, то при двух парах полюсов ($p = 2$) 360 электрических градусов располагаются на половине окружности, это соответствует двойному полюсному делению 2τ как показано на рис 4.5. Начала обмоток трех фаз **A**, **B** и **C**, присоединенные к внешней сети, должны располагаться на расстоянии 120 электрических градусов друг от друга. Шаг обмотки, т. е. расстояние между соседними проводниками по ходу обмотки, равен полюсному шагу τ , т. е. в данном случае соответствует 180 электрическим градусам.

Концы всех трех фаз, обозначенные на буквами **X**, **Y** и **Z**, соединяются так, что образуют либо включение звездой, либо треугольником; в данном случае применено включение звездой, т.е. концы соединены вместе, образуя нулевую точку схемы. Для определения направления токов в проводниках обмотки необходимо задаться каким-либо мгновением времени, например соответствующим положению векторов токов трех фаз I, II и III. В это мгновение времени ток в первой фазе положителен, т.е. направлен от начала **A** к концу **X** в остальных двух фазах токи отрицательны, т. е. направлены от концов **Y** и **Z** началам **B** и **C**. На основании сказанного , поставлены стрелки, а на рис.4.4 стрелки, указывающие направления токов. Все проводники разбиваются на $2p - 4$ группы, с одинаковым направлением тока в каждой группе. Таким образом, создается 4 ветви магнитного потока и 4 полюса, районы которых

показаны на рис, а оси . Магнитные силовые линии, выходящие из статора, образуют северные полюсы, а входящие в статор - южные; магнитные силовые линии замыкаются по стальным сердечникам статора и ротора.

В группе проводников с одинаковым направлением тока среднее место занимает проводник той фазы, ток которой в данное мгновение времени имеет максимальное значение. По мере вращения векторов I, II, III картина распределения токов перемещается, а вместе с этим происходит вращение магнитного поля.

В действительности речь идет не об отдельных проводниках, а о катушках, состоящих из многих витков. Катушки в свою очередь разбиваются на секции, располагаемые в отдельных пазух. Показанная на рис.4.5 обмотка соответствует наименьшему возможному числу пазов, ибо на каждый полюс и на каждую фазу приходится только один паз; такая обмотка, как говорят, выполнена в один паз на полюс и фазу. Обычно же применяется несколько пазов на полюс и фазу; обозначая через Z общее число пазов статора, $m_1 = 3$ - число фаз и через g_1 - число пазов на полюс и фазу, имеем общую формулу:

$$Z_1 = 2pm_1g_1 = 6pg_1. \quad (3.4)$$

На показана в развернутом виде четырехполюсная обмотка, выполненная в 2 пазуха на полюс и фазу; проводники, принадлежащие разным фазам, обозначены различного вида линиями.

На рис. дана катушечная группа из трех секций, причем каждая из них состоит из трех витков. Сторона каждой секции расположена в отдельном пазу, так что в данном случае $g_1 = 3$.

В настоящее время чаще применяются двухслойные обмотки, при которых в каждом пазу располагаются две стороны секций, принадлежащие к разным катушкам. На показана развернутая схема четырехполюсной петлевой обмотки с двумя пазухами на полюс и фазу. Одна сторона каждой секции лежит в верхнем слое, а вторая сторона той

же секции лежит в нижнем слое в другом пазу. Проводники (стороны секций), расположенные в нижнем слое пазов, обозначены пунктирными линиями.

Общее число пазов Z_1 так же как и по схеме, равно 24. Распределение токов на рис.4.6 и рис.4.8, так же как и на рис.4.5 соответствует положительному максимуму в первой фазе.

Выводы отдельных фаз обмоток подключаются к зажимам на щитке двигателя. Обычное расположение зажимов на щитке показано на рис.4.9. Три начала и три конца обмоток расположены в два ряда, причем против начала одной фазы лежит конец соседней фазы. Обмотки могут быть соединены либо звездой, либо треугольником, в зависимости от напряжения питающей сети (зажимы L_1, L_2, L_3)., Например, один и тот же двигатель, рассчитанный на фазное напряжение (т. е. напряжение каждой фазы своей обмотки) может быть включен в сеть по схеме звездой при линейном напряжении 380В и по схеме треугольником при линейном напряжении 220 В.

В качестве простейшего ротора может быть применен сплошной стальной цилиндр, служащий одновременно и магнитопроводом и токопроводом. Двигатели с таким ротором, хотя иногда и применялись, имели низкий коэффициент полезного действия и низкий $\cos \varphi$. Индуктированные в роторе токи вызывают, с одной стороны, момент вращения, а с другой стороны, являются причиной тепла, выделяемого в роторе по закону Ленца — Джоуля.

Необходимо так сконструировать ротор, чтобы увеличить механический эффект и уменьшить тепловой эффект индуктированных токов. Для этого необходимо сосредоточить токи как можно ближе к периферии цилиндрического ротора с тем, чтобы увеличить плечо электромагнитных сил. Наоборот, во внутренних частях ротора необходимо создать в осевом направлении наибольшее сопротивление,

поскольку токи в частях превращают электрическую энергию, главным образом, в тепловую, а не в механическую.

Для достижения указанной цели цилиндрический сердечник ротора составляется, так же как и статор, из тонких стальных листов, изолированных друг от друга. Индуктированные же токи направляются по медным или алюминиевым проводникам - стержням, уложенным в пазах около внешней поверхности ротора. Для создания замкнутых цепей тока все стержни соединены между собой двумя замыкающими кольцами по обоим торцам сердечника. Таким образом, получается коротко замкнутая система, вследствие чего сам ротор называется короткозамкнутым. Стержни, расположенные по цилиндрической поверхности, вместе с короткозамкнутыми кольцами образуют так называемое беличье колесо. На изображен короткозамкнутый ротор, надетый на вала. Трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (их часто называют просто короткозамкнутыми двигателями) завоевали себе всеобщее распространение на ПС благодаря исключительной простоте, дешевизне и надежности в работе.

Электродвижущие силы статора и ротора

При синусоидальном распределении постоянного по величине вращающегося магнитного потока в воздушном зазоре асинхронной машины в обмотке ротора индуктируется э.д.с., изменяющаяся во времени по синусоиде. То же относится и к обмотке статора, проводники которого также пересекаются вращающимся магнитным потоком.

Если э.д.с. изменяется синусоидально, то ее мгновенное значение, как известно из теории переменных токов, равно $e = E_m \sin \omega t$

Для одного витка обмотки амплитуда E_m равна $E_m = \Phi_m \omega$.

Если обмотка занимает несколько пазов n а полюс и фазу, то

индуктируемые э.д.с. в отдельных проводниках, не лежащих в одних и тех же пазах, не будут совпадать по фазе, и для определения полной э.д.с. в обмотке одной фазы надо э.д.с. складывать геометрически. То же относится и к определению э.д.с. одного витка или катушки при так называемом укорочении шага, когда шаг обмотки меньше полюсного шага машины.

Вводя некоторый коэффициент k_1 меньшей единицы, зависящий от устройства обмотки и называемый обмоточным коэффициентом, мы можем написать: $E_1 = 4,44k_1\hat{O}f_1w_1$. Коэффициент зависит от типа и схемы статорной обмотки, в среднем он равен около 0,9.

Э.д.с. статорной обмотки уравновешивается приложенным к обмотке статора напряжением сети. По отношению к току статора эта э.д.с. является противодействующей.

Электродвижущая сила в обмотке ротора, как уже было сказано, определяется относительной скоростью вращения поля и ротора. Обозначая через $\omega_2 = 2\pi f_2$ соответствующую электрическую угловую скорость, мы найдем, согласно уравнению $\omega_2 = 2\pi fs = s\omega$.

Поэтому для обмотки ротора электродвигателя, вращающегося со скоростью $n_2 = n_1(1-s)$, имеем: $e = E_m \sin \omega_2 t = E_m \sin(s\omega t)$

Амплитудное значение э.д.с. в обмотке ротора, имеющей w_2 последовательно соединенных витков, равно аналогично формуле

$$E_{2m} = \hat{O}_m \omega_2 w_2 = \hat{O} s \omega_2 w_2. \quad (3.5)$$

Значение магнитного потока, входящее в уравнения, ибо Φ есть магнитный поток взаимной индукции, охватывающий обе обмотки, статорную и роторную.

Д действуюшего значения э.д.с. обмотке ротора при скольжении s мы получим аналогично $E_{2s} = 4,44k_2\Phi f_2 w_2 = 4,44k_2\hat{O}f_1 w_2$.

Для определения токов ротора и статора, как и в трансформаторе, исходной величиной является ток во вторичной цепи, т. е. в роторе

асинхронного двигателя. Величина роторного тока определяется нагрузкой машины, причем в данном случае речь идет о механической нагрузке, т.е. о моменте на валу двигателя. С увеличением момента на валу вращение ротора замедляется, скорость пересечения поля и ротора увеличивается, в соответствии с чем возрастают э.д.с. и ток в роторе. Зависимость тока от скорости вращения двигателя можно получить, применяя для цепи ротора закон Ома. Обозначая через I_2 ток в одной фазе ротора, Z_{2s} - полное сопротивление одной фазы вращающегося ротора, имеем для короткозамкнутой цепи ротора:
$$I_2 = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}}$$

В большинстве проводников статора и ротора, находящихся в данное мгновение времени друг против друга, токи имеют противоположное направление; так оно и должно быть, ибо м.д.с. статора и ротора действуют в противоположные стороны.

Вращающий момент асинхронного двигателя

Образование механической силы взаимодействия между проводниками ротора и вращающимся магнитным полем показано на . Однако этот рисунок изображает только небольшой участок обмотки ротора; если же мы рассмотрим всю поверхность ротора с распределенной на нем обмоткой, то картина окажется более сложной.

На показана в разрезе часть статора и ротора с несколькими проводниками обмотки ротора. Допустим, что вращающееся магнитное поле вращается со скоростью n_1 в направлении против часовой стрелки; в рассматриваемое мгновение времени вращающийся поток занимает показанное на рисунке положение, т.е. в данной зоне магнитные линии входят в статор из ротора (южный полюс статора). Для определения направления э.д.с., индуцируемой в проводниках ротора, необходимо принять во внимание,

что по правилу правой руки учитывается направление движения проводников относительно магнитного поля. Очевидно, что относительное движение проводников ротора (соответствующую скорость обозначим через $n_{\text{от}}$) направлено обратно движению поля, т.е. в данном случае по часовой стрелке. Применив для этого случая правило правой руки, найдем, что в проводниках ротора э.д.с. направлена в сторону читателя (знак точки). Ток в этих проводниках направленный в ту же сторону, вызывает по закону электромагнитных сил (правило левой руки) механическую силу F и вращение ротора в направлении вращения поля, как это и должно быть по закону Ленца.

Очевидно, когда против рассматриваемых проводников, ротора окажется северный полюс статора, направление э. д.с. и тока в роторе переменится на обратное. Частота этих перемен зависит от относительной скорости перемещения поля и проводников ротора. Если ротор вращается со скоростью $n(\dot{a} / \dot{e}i)$,

$$n' = n_1 - n = sn_1.$$

Частота тока в роторе f_2 так же связана с относительной скоростью n' , как частота тока в статоре f_1 , равная частоте сети f , связана со скоростью поля $n_1 = \frac{60f}{p}$. Таким образом,

$$n' = sn_1 = \frac{60f_2}{p},$$

откуда $f_2 = sf$

Например, при $s = 0,04$, частота тока в роторе $f_2 = 0,04 \times 50 = 2 \text{ д.}$ Для, четырехполюсной машины относительная скорость при такой частоте $n' = 0,04 \times 1500 = 60 \dot{a} / \dot{e}i$.

На показан двухполюсный ротор с распределенной по всей окружности короткозамкнутой обмоткой, состоящей из 12 стержней или проводников. Магнитный поток вращается против часовой стрелки т. е. ось магнитного потока направлена от А к В, Направления э.д.с.,

индуктируемых магнитным потоком, определенные по правилу правой руки, показаны на внешнем ряду значков, ближе к поверхности ротора. Эти направления в точности соответствуют знаку магнитной индукции. Максимальные (по абсолютной величине) значения магнитной индукции и э.д.с. соответствуют проводникам 4 и 10, находящимся на линии АВ.

Вследствие наличия индуктивного сопротивления обмотки ротора, между э.д.с. и током существует сдвиг фаз, определяемый углом φ_2 . Так как ток отстает по фазе от э.д.с., то все знаки (точки и кресты), относящиеся к токам, сдвинуты по отношению к знакам э. д. с. φ_2 на угол против направления вращения поля, как это показано на внутреннем ряду значков (ближе к оси ротора).

Определяя по правилу левой руки механические силы, действующие на проводники ротора, мы видим, что не на все проводники эти силы действуют в направлении вращения поля, как это следует из элементарного принципа действия асинхронного двигателя. Этот закон действителен только для тех проводников, в которых направление тока совпадает с направлением э.д.с.

В общем случае, при достаточно большом числе проводников, можно сказать, что механическая сила действует по направлению поля в районе, соответствующем углу $2\pi - 2\varphi_2$. К и против направления поля в районе угла $2\varphi_2$. Это показано соответствующими стрелками. Границы районов определяются прямыми, НГ и ЛК, перпендикулярными к прямым АВ и CD. При большем числе полюсов участки с противоположным направлением силы будут чередоваться чаще, но общая сумма геометрических углов, соответствующих тому или иному направлению силы, останется такою же. После определения средней силы или среднего вращающего момента, действующего на проводники ротора, можно перейти к определению момента машины. Имеем следующее выражение для магнитного потока

$$\Phi = \frac{E_1}{4,44k_1 f w_1}, \text{ а также } I = \frac{SE_2}{\sqrt{r_2^2 + S^2 x^2}} \text{ и } \cos \varphi = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + S^2 x^2}}. \quad (3.6)$$

Из них, обозначив постоянную величину

$$\frac{C_m}{4,44k_1 f w_1} = C, \quad (3.7)$$

получим значение для номинального момента асинхронного двигателя

$$M_n = CE_1^2 \frac{Sr_2}{r_2^2 + S^2 x_2^2}. \quad (3.8)$$

Для дальнейшего упрощения анализа примем, что э.д.с. статора при изменении S остается постоянной, т. е. пренебрежем изменением падения напряжения в обмотке статора. Это, однако, возможно только в известных пределах изменения нагрузки, токов и скольжения двигателя, ибо при больших значениях S падение напряжения в обмотке статора сильно возрастает, а E_1 соответственно падает. Положив $E_1 = \text{const}$, найдем, что выражение 4.8 дает зависимость от одной независимой переменной, именно скольжения S , т.е. мы получаем $M = f(S)$. Графическое изображение этой функции показано на рис.4.14. Как показывает кривая $M = f(S)$, при малых значениях скольжения преобладает влияние S в числителе формулы, соответственно чему M увеличивается приблизительно пропорционально скольжению. Однако при больших значениях начинает преобладать влияние S в знаменателе формулы, и момент падает с увеличением S . Наличие максимума на кривой $M = f(S)$ объясняется физически следующим образом. Беря исходную формулу

$$M = C_M \Phi I_2 \cos \varphi_2 \quad (3.9)$$

и принимая $\Phi = \text{const}$, мы видим, что на изменение момента влияет I_2 , который растет с увеличением S и $\cos \varphi$, который падает с увеличением S . Величина угла φ_2 , как видно из, связана с наличием проводников, в которых электромагнитная сила направлена против вращения поля. Таким

образом, с увеличением S , т. е. с уменьшением скорости вращения ротора, токи, а, следовательно, электромагнитные силы взаимодействия поля и ротора в отдельных проводниках растут, но одновременно меняется распределение токов относительно кривой магнитной индукции так, что увеличивается количество проводников, тянущих в обратную сторону. Последний фактор при малых значениях S и φ_2 мало дает себя знать, и момент растет с увеличением тока. Однако при значительных величинах S и φ_2 влияние увеличения числа проводников с обратным направлением силы тяги начинает преобладать над влиянием увеличения силы тяги большинства проводников, тянущих по направлению вращения. Ввиду этого результирующий момент, действующий в направлении поля, начинает падать.

Повернув кривую $M = f(S)$ на 90° по часовой стрелке, мы получим механическую характеристику, на которой та же кривая изображает функцию $n = f(M)$. Действительно, если по оси абсцисс отложены значения S от нуля, причем $S = 0$ соответствует холостому ходу, а $S_{max} = 1$ - неподвижному состоянию ротора, то на нуле ординат получается $n = 0$ (при $S = 1$), а наибольшая ордината соответствует $n - n_1$ (при $S = 0$). Строго говоря, и на холостом ходу двигатель вращается со скоростью $n < n_1$ и $M = M_0$, где M_0 — момент потерь на трение. Однако, пренебрегая весьма малой величиной M_0 , можно считать, что на холостом ходу двигатель вращается синхронно с полем.

Сделанные допущения соответствуют равенству вращающего момента M и момента сопротивления M_c , т. е. момента внешней нагрузки, приложенной к валу двигателя. Так как последняя величина является в отношении работы двигателя независимой переменной, то зависимость $n = f(M_c) = f(M)$ отвечает действительным физическим условиям. Эта кривая носит название механической характеристики асинхронного двигателя.

Механическая характеристика делится на две части: верхняя «устойчивая» часть для значения от $S = 0$ до $S = S_K$ и нижняя «неустойчивая» часть от $S = S_K$ до $S = 1$. Для устойчивой части действует принцип саморегулирования двигателя. При увеличении нагрузки или момента сопротивления внешних сил скорость двигателя уменьшается, скольжение увеличивается, растет ток, а вместе с тем и вращающий момент, уравновешивая увеличение момента сопротивления.

Пусковые свойства короткозамкнутых двигателей определяются в первую очередь значением начального пускового момента M_{II} , т. е. момента, соответствующего $n_2 = 0$ и $S = 1$. Этот момент зависит от многих факторов, определяемых расчетом и конструкцией асинхронных двигателей. Отношение начального пускового момента к номинальному или кратность начального момента, M_n к $M_{ном}$ изменяется для различных типов двигателей в широких пределах, большей частью от 0,9 до 2. Правда в начале разгона, при небольших скоростях вращения, момент уменьшается по сравнению с начальной величиной $M_{ном}$, но это уменьшение незначительно. Двигатели с такими значениями пусковых моментов в большинстве случаев легко преодолевают моменты сопротивления при пуске в ход.

Кроме пускового момента, большое значение имеет также величина пускового тока. Пусковой ток ротора I_{2n} (при $S = 1$) должен быть значительно выше тока при номинальной нагрузке (при $S = S_n$). Соответственно возрастанию роторного тока при увеличении скольжения растет также ток статора. Отношение начального пускового тока I_n к номинальному току I_n носит название «кратности пускового тока», и колеблется обычно в пределах 5 - 7. Для двигателя постоянного тока такой пусковой ток был бы недопустим, он вполне приемлем для асинхронного двигателя благодаря отсутствию в нем коллектора. С точки зрения нагрева двигателя большой пусковой ток также в большинстве случаев (за исключением большой частоты пусков ход) не представляет опасности,

поскольку пусковой процесс, т. е. разгон двигателя, происходит весьма быстро, за время от малых долей секунды до нескольких секунд. За такой малый промежуток времени пусковой ток несмотря на его большое значение, не может вызвать значительного повышения температуры.

Более существенным является влияние пускового тока на напряжение сети. Если, как это чаще всего бывает, от одного и того же источника питается много двигателей, причем мощность каждого отдельного двигателя составляет небольшую часть от всей установленной мощности, то падение напряжения, вызванное пусковым током одного двигателя, не может существенно отразиться на напряжении всей сети. Только при наличии двигателей большой мощности (примерно более 20 - 25 % по сравнению с мощностью питающего источника) падение напряжения, вызванное пуском такого двигателя, может стать недопустимым.

Из сказанного следует, что в большинстве случаев для двигателей малой и средней мощности естественные пусковые условия, характеризуемые кратностями коэффициентов пусковых тока и момента, являются допустимыми. Поэтому чаще всего асинхронные двигатели не нуждаются ни в каких особых пусковых устройствах (реостатах и пр.), и пускаются в ход непосредственным включением в сеть. Улучшение пусковых свойств, т. е. увеличение пускового момента и уменьшение пускового тока, может быть достигнуто путем специальной конструкции обмотки ротора. Сюда относится применение проводников ротора с большим активным сопротивлением, применение проводников в виде узких и высоких стержней (двигатели с глубоким пазом) и, в особенности, применение двух концентрически расположенных беличьих клеток

В случае тяжелых пусковых условий, а именно необходимости получения большого пускового момента для быстрого разгона под полной нагрузкой, а также большой частоты пусковых операций, прибегают к асинхронным двигателям с фазным ротором (с контактными кольцами).

3.2 Анализ результатов исследования тяговых свойств электровозов

Виртуальная установка для исследований, предусмотренных содержанием работы, показана на рис. 3.2.1, она содержит;

- источник синусоидального напряжения (AC Voltage);
- однофазный трансформатор (Transformer);
- однофазный диодный мост (Universal Bridge),
- активно-индуктивную нагрузку (R, L);
- обратный диод (Diode);
- измерители мгновенных токов в источнике питания (I) и нагрузке (I Load),
- измеритель мгновенного напряжения на нагрузке (U Load);
- блок для измерения гармонических составляющих тока питания (Fourier II;

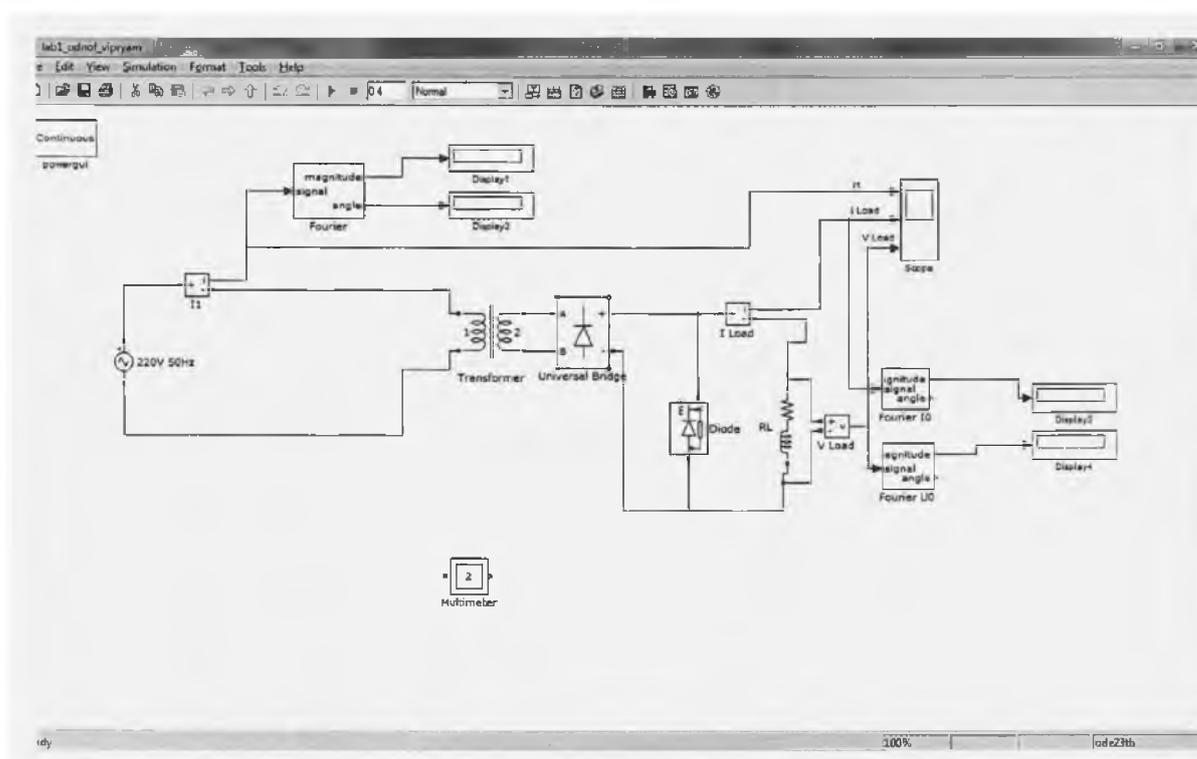


Рис. 3.2.1 Модель однофазного выпрямителя

- блок для измерения гармонических составляющих тока нагрузки (Fourier 10) и аналогичный блок для измерения гармонических составляющих напряжения на нагрузке (Fourier U0);
- блок для наблюдения (измерения) мгновенных значений тока в цепи питания, тока нагрузки и напряжения на нагрузке (Score);
- блок для наблюдения и измерения мгновенных значений величин, которые выбраны в поле Measurement соответствующих блоков (Multimeter);
- блок для измерения амплитудного значения тока первой гармоники и ее фазы в цепи питания (Display 1);
- блок для измерения средних значений тока и напряжения на нагрузке (Display 2).

Окно настройки параметров источника питания показано на рис.3.2.2.

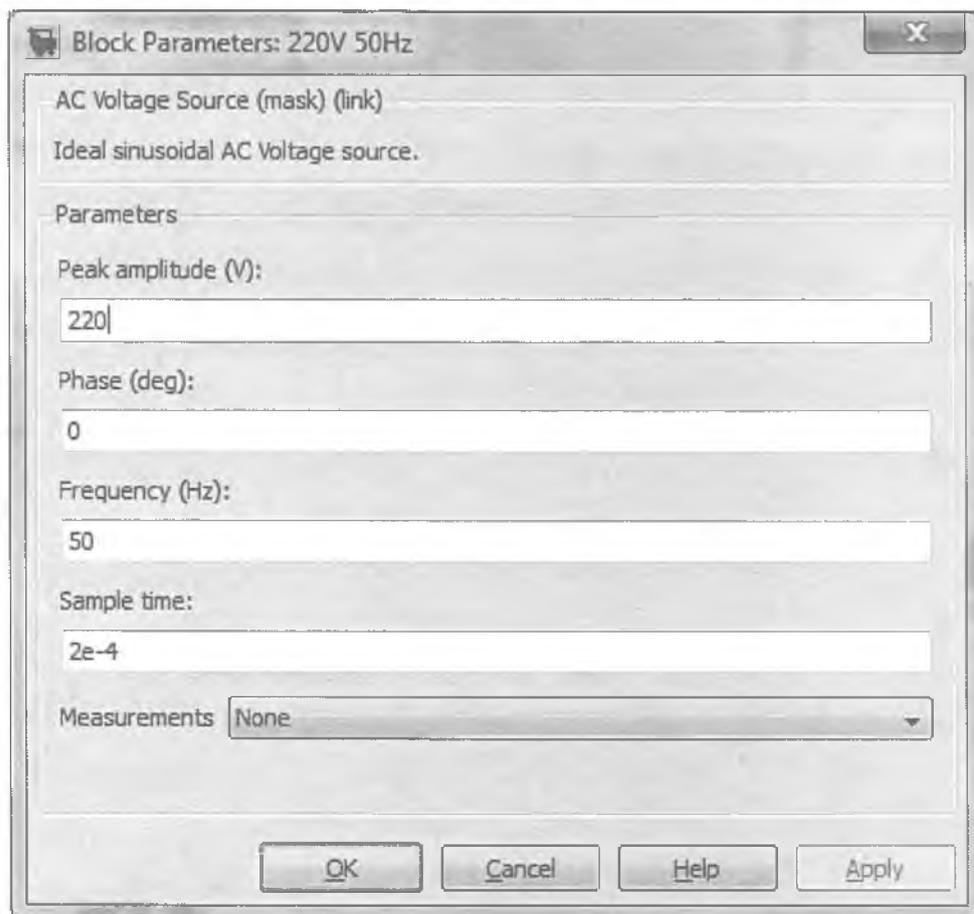


Рис. 3.2.2 Окно настройки параметров источника питания

В полях настройки задаются:

- амплитуда напряжения в вольтах (Peak amplitude, V);
- начальная фаза напряжения в градусах (Phase, deg);
- частота напряжения в герцах (Frequency, Hz).

Параметр Sample time задает дискретность задания напряжения. Данный параметр имеется во многих библиотечных блоках, он должен быть согласован со временем дискретизации при задании параметров.

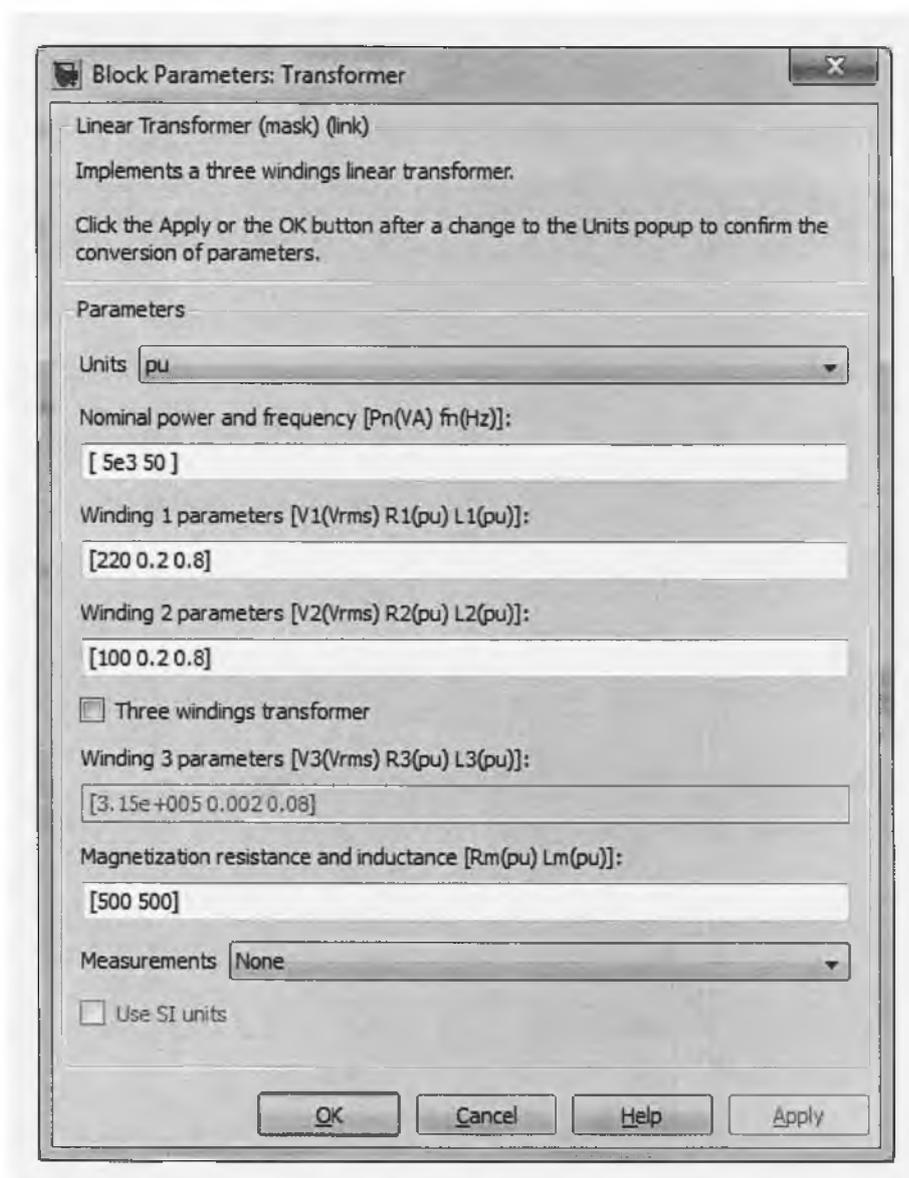


Рис. 3.2.3 Окно настройки параметров трансформатора

Окно настройки параметров трансформатора показано на рис. 3.2.3. В полях окна настройки вводятся номинальная мощность и частота трансформатора (Nominal power and frequency), параметры первичной и вторичной обмоток (Winding 1 parameters, Winding 2 parameters) и параметры ветви намагничивания (Magnetization resistance and reactance). Параметры схемы замещения трансформатора приведены к относительным (безразмерным) величинам.[40]

Для определения относительных параметров трансформатора необходимо рассмотреть его схему замещения.

Обобщенная схема замещения трансформатора показана на рис. 3.2.4. Эта схема замещения представлена как идеальный трансформатор с вынесенными элементами, характеризующими потери в обмотках (R_1 , R_2 , R_3), потоки рассеяния обмоток (L_1 , L_2 , L_3) и цепь намагничивания трансформатора (L_m , R_m).

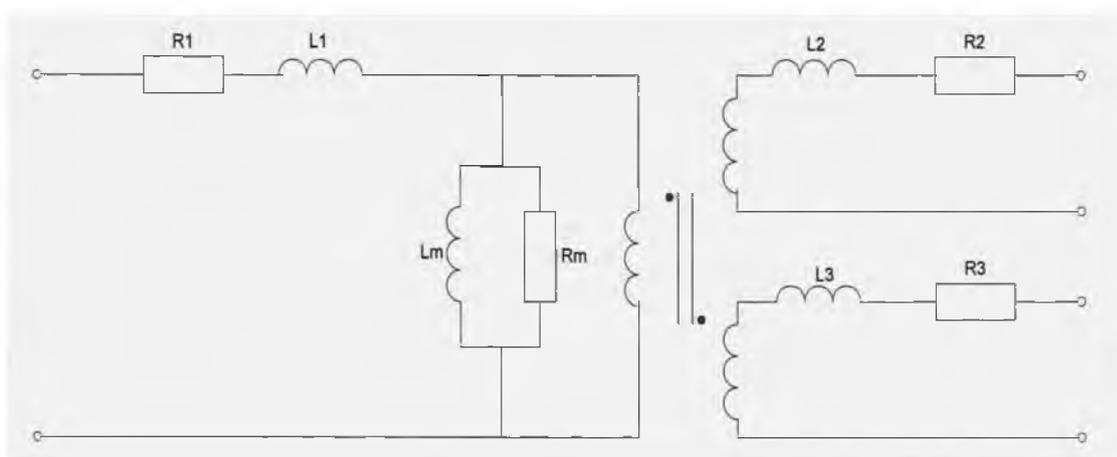


Рис. 3.2.4. Обобщенная схема замещения трансформатора

Преимущество задания параметров трансформатора в относительных величинах состоит в том, что для первичной и вторичных обмоток они оказываются равными (рис. 3.2.4). Кроме того, относительные параметры ветви намагничивания тоже равны между собой. В лабораторной работе исследуется двухобмоточный трансформатор. В этом случае не надо выделять поле параметров для третьей обмотки.[39]

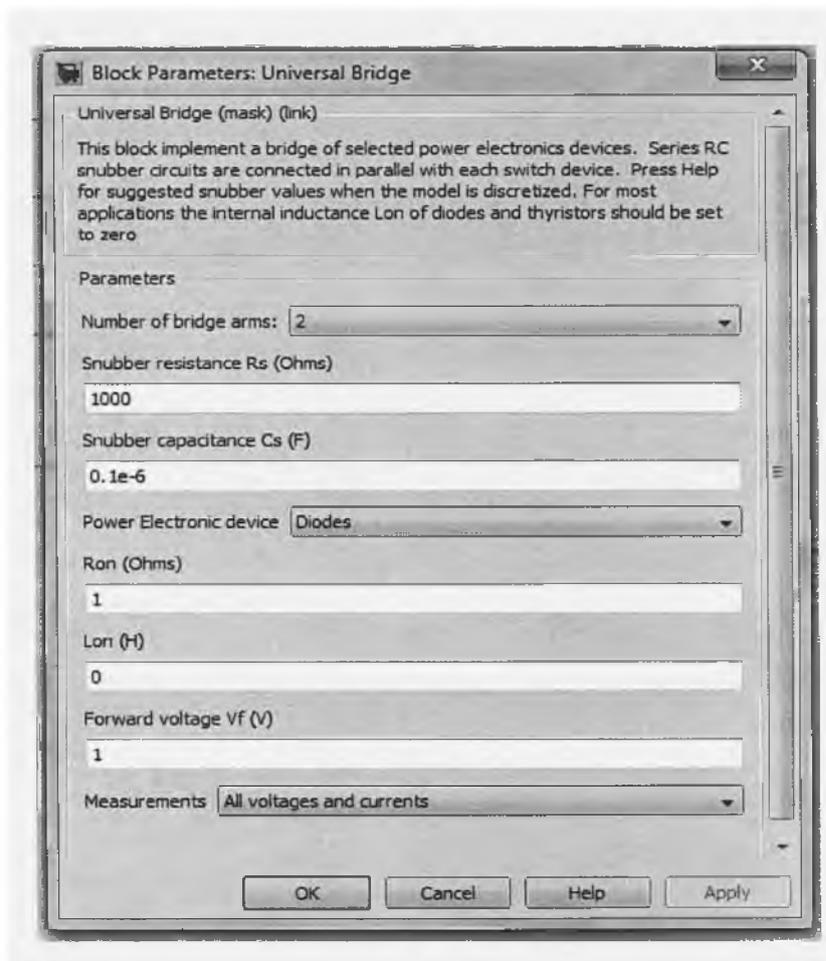


Рис. 3.2.5 Окно настройки параметров диодного выпрямителя

Окно настройки параметров выпрямителя показано на рис. 3.2.5. В полях настройки заданы:

- количество ветвей моста (2) (Number of bridge arms);
- конфигурация входных и выходных портов (Port configuration); •параметры демпфирующих цепей (Snubber resistance, Snubber capacitance);
- тип полупроводниковых приборов в универсальном мосте (Power Electronic device);
- динамическое сопротивление диодов в открытом состоянии в Омах (Ron, Ohms);

- индуктивность диода в открытом состоянии в генри (Lon, H);
- пороговое напряжение на диоде в открытом состоянии в вольтах (Forward voltage, V). В поле Measurement выбраны величины, которые измеряются блоком Multimeter.

Окно настройки параметров нагрузки показано на рис. 3.2.6. Для реализации активно-индуктивной нагрузки в последовательной R, L, C цепи в двух первых полях (Resistance R, Ohms, Inductance L, H) устанавливается значение активного сопротивления в Омах и индуктивности в генри, в третьем поле (Capacitance C, F) - бесконечность (inf).

В окне настройки параметров блока Fourier (рис. 3.2.7) устанавливается частота, равная частоте питающего напряжения, и номер первой гармоники.

Блоки Fourier 10, FourierUO измеряют постоянные составляющие выходного тока и напряжения. При двухполупериодном выпрямлении основная частота выходного напряжения (тока) равна удвоенной частоте источника ($f = 100$).

В поле (Harmonic n) задается номер гармоники. В данном случае измеряется постоянная составляющая ($n = 0$).

Окно приборов Display для измерения значений исследуемых процессов показано на рис. 3.2.8. В первом поле задается формат представления измеряемых значений. Второе поле (Decimation) определяет периодичность вывода значений в окне Display.

Окно настройки блока Multimeter показано на рис. 3.2.9.

В левом поле (Available) высвечиваются все напряжения и токи универсального моста, так как они заданы в окне настройки блока рис.

3.2.5.

В правом поле (Selected) отражены те переменные, которые измеряет блок (эти значения перенесены из левого поля в правое кнопкой Select).

Переменные правого поля можно измерить на выходе блока внешними приборами. При включенном флажке Plot selected measurements

мгновенные значения этих величин отражаются в графическом окне блока по окончании очередного моделирования.

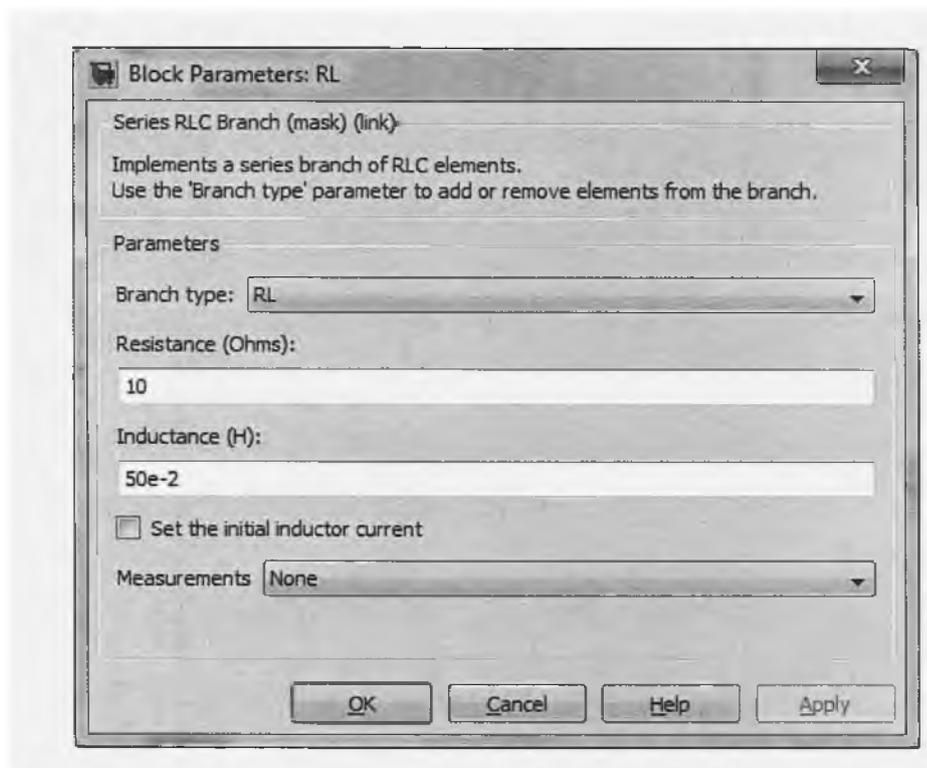


Рис. 3.2.6 Окно настройки параметров нагрузки

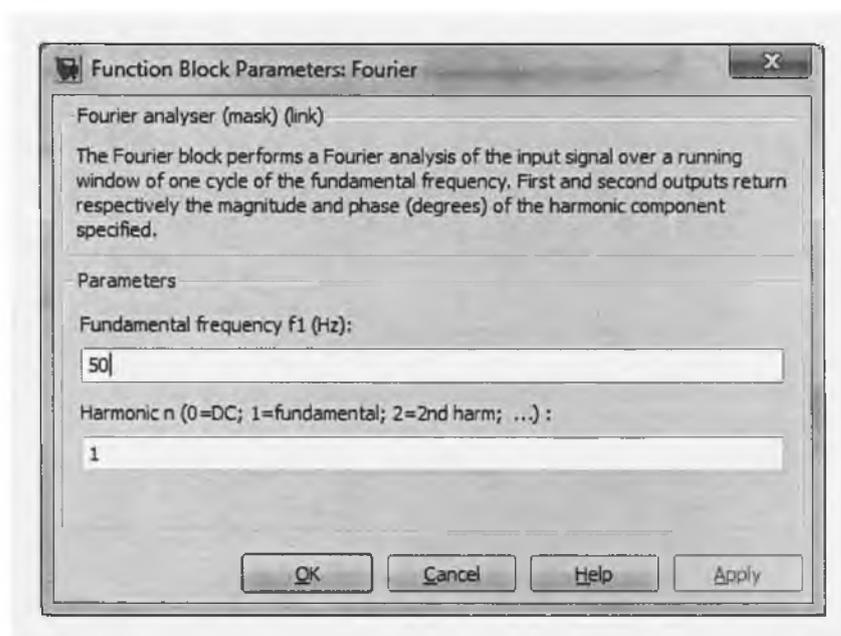


Рис. 3.2.7 Окно настройки блока Fourier

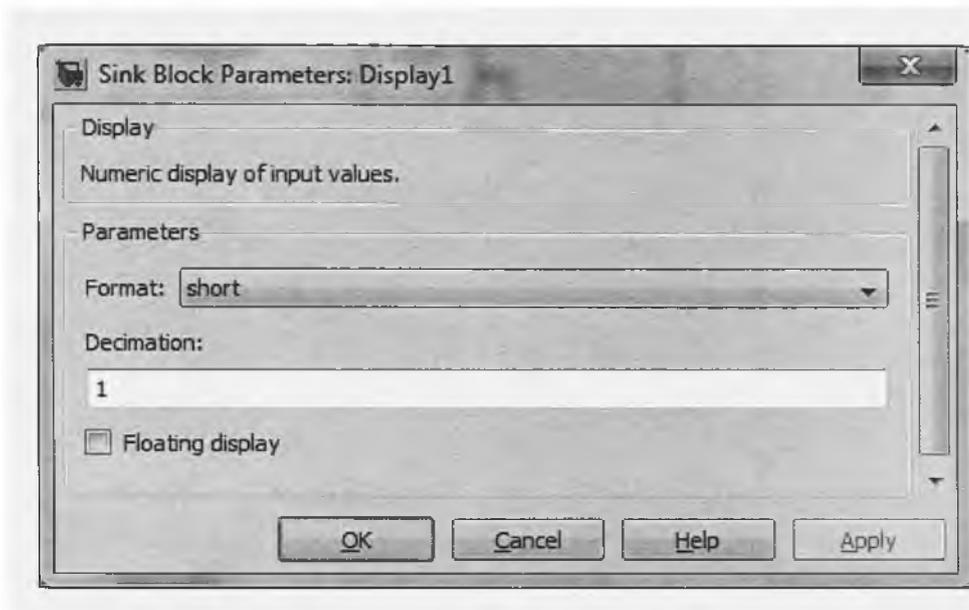


Рис. 3.2.8 Окно настройки блока Display1

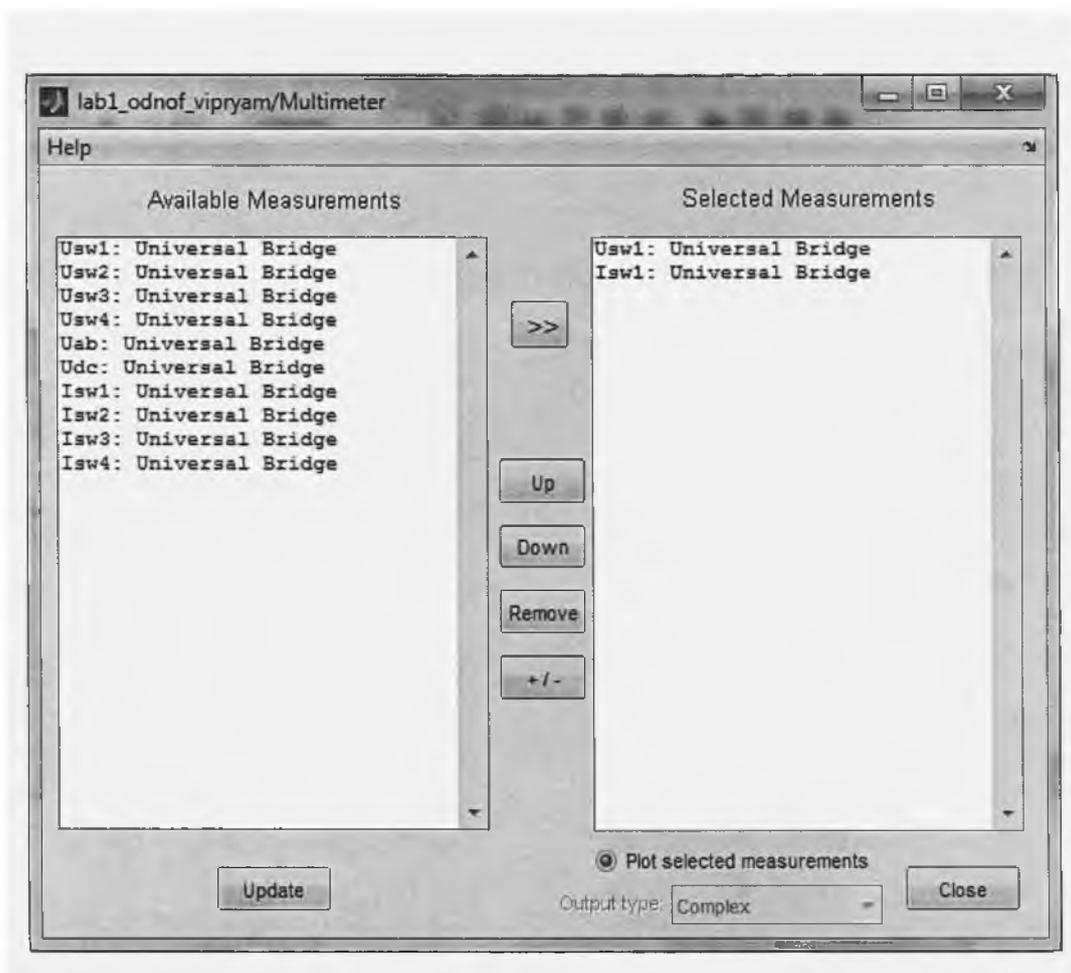


Рис. 3.2.9 Окно настройки блока Multimeter

Порядок проведения работы

Исследование однофазного двухполупериодного выпрямителя при работе на активно-индуктивную нагрузку с обратным диодом проводится на виртуальной установке (рис. 3.2.1), подробное описание которой приведено выше.[13]

Параметры источника питания, трансформатора, нагрузки и диодного моста задаются преподавателем. При самостоятельном изучении параметры источника питания и диодного моста целесообразно задать такими, как на рис. 3.2.2, 3.2.5.

Параметры нагрузки задаются так, чтобы

постоянная времени нагрузки $m = \frac{L}{R}$ находилась в пределах $(2 \dots 5) \left(m = \frac{L}{R} \right)$, f

f - частота источника).

Параметры моделирования задаются на вкладке Simulation/Configuration Parameters (рис. 3.2.10). В поле Stop time задается время в секундах, равное 10...20 периодов напряжения источника.

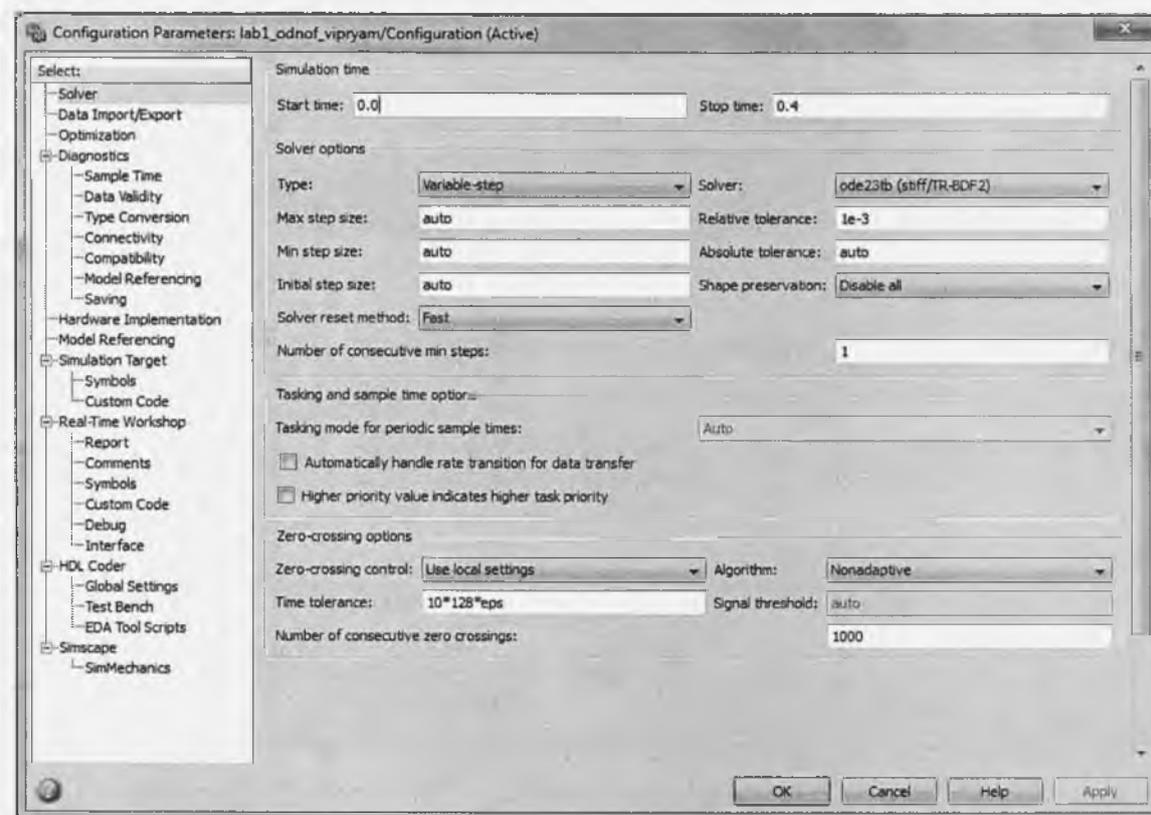


Рис. 3.2.10 Окно настройки параметров моделирования

В поле Type задается переменный шаг (Variable-step) и метод решения дифференциальных уравнений - ode 23 tb (stiff/TR-BDF2). В поле Max step size устанавливается значение шага моделирования, это же значение заносится в поле Sample time всех блоков, которые это поле имеют (рис. 3.2.2, 3.2.8). В оставшихся полях можно оставить то, что компьютер устанавливает по умолчанию.

Изменяя сопротивление нагрузки от 10 Ом до 100 Ом с шагом 10 Ом и индуктивность нагрузки так, чтобы постоянная времени

$$T_H = \frac{L_H}{R_H}$$

оставалась постоянной, измеряют и рассчитывают основные характеристики выпрямителя. При этом моделирование проводится для каждого сопротивления нагрузки.

Амплитуда первой гармоники тока в источнике питания \hat{I}_1 и начальная фаза этого тока φ_1 определяются по показаниям Display 1 и Display 2 соответственно, ток и напряжение на нагрузке определяются по показаниям Display 3 и Display 4. Мгновенные значения этих величин можно наблюдать на экране осциллографа (рис. 3.2.11).

Вычисления полной и активной мощности, потребляемой выпрямителем от источника питания по первой гармонике, а также мощности в нагрузке, осуществляются по выражениям:

$$S_1(1) = \frac{U_{1\max} I_1(1)_{\max}}{2}, \text{ ВА}; P_1(1) = S_1(1) \cos \varphi, P_H = U_H I_H, \text{ Вт.}$$

По завершении очередного моделирования появляется графическое окно блока Multimeter (рис. 3.2.12) с кривыми мгновенных значений напряжения и тока диода.

Максимальные значения этих величин табл. 3.2.1 определяются из графического окна блока Multimeter. По результатам табл. 3.2.1 строятся:

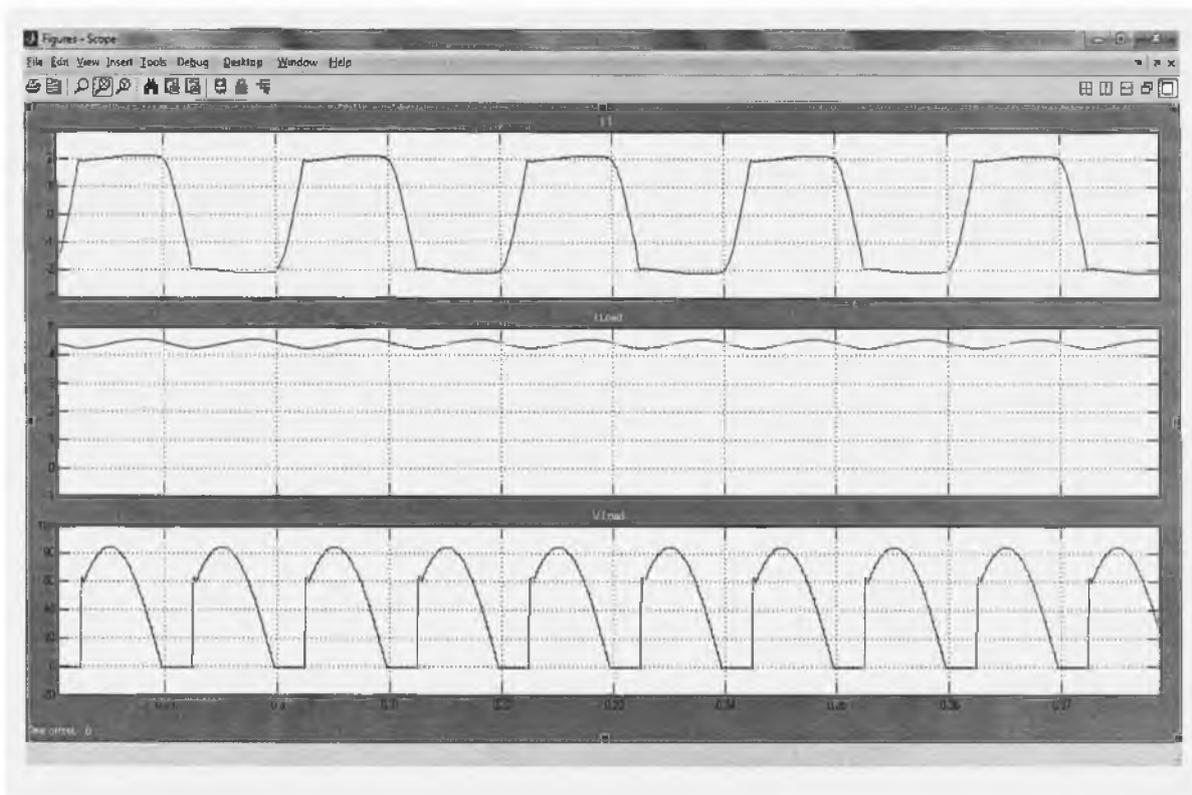


Рис. 3.2.11 Осциллограммы тока питания, нагрузки и напряжения на нагрузке

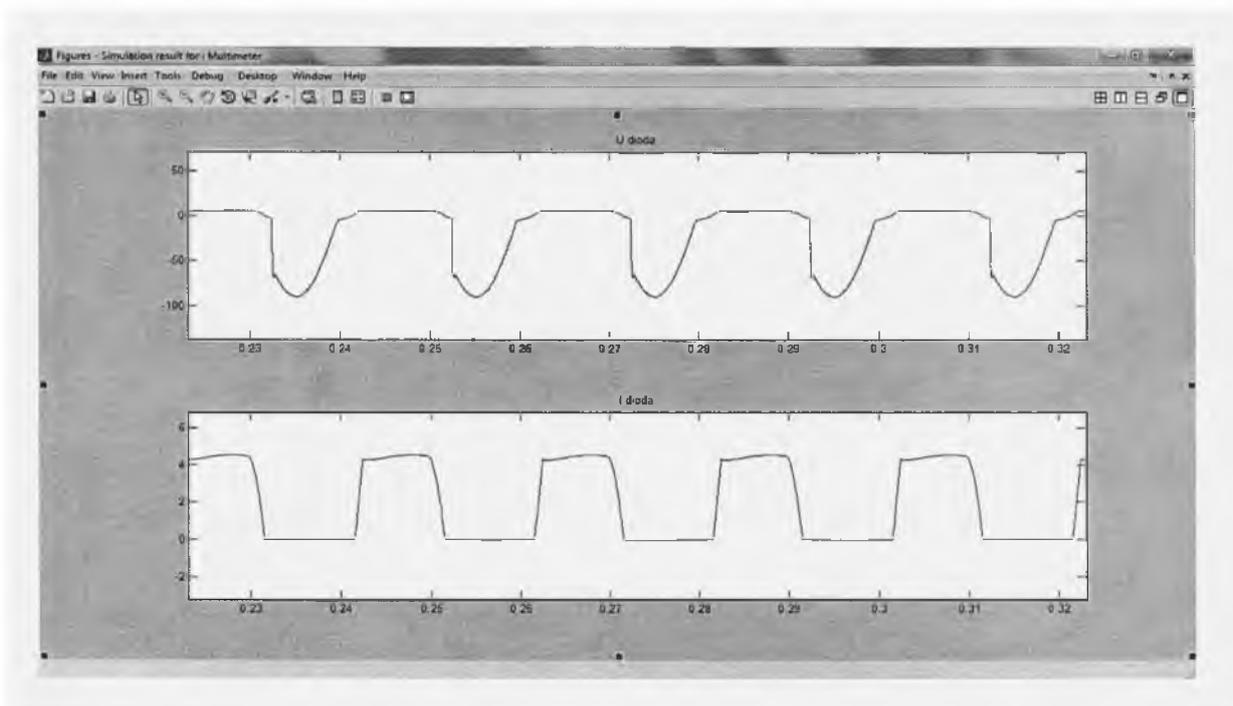


Рис. 3.2.12. Осциллограммы напряжения и тока диода моста

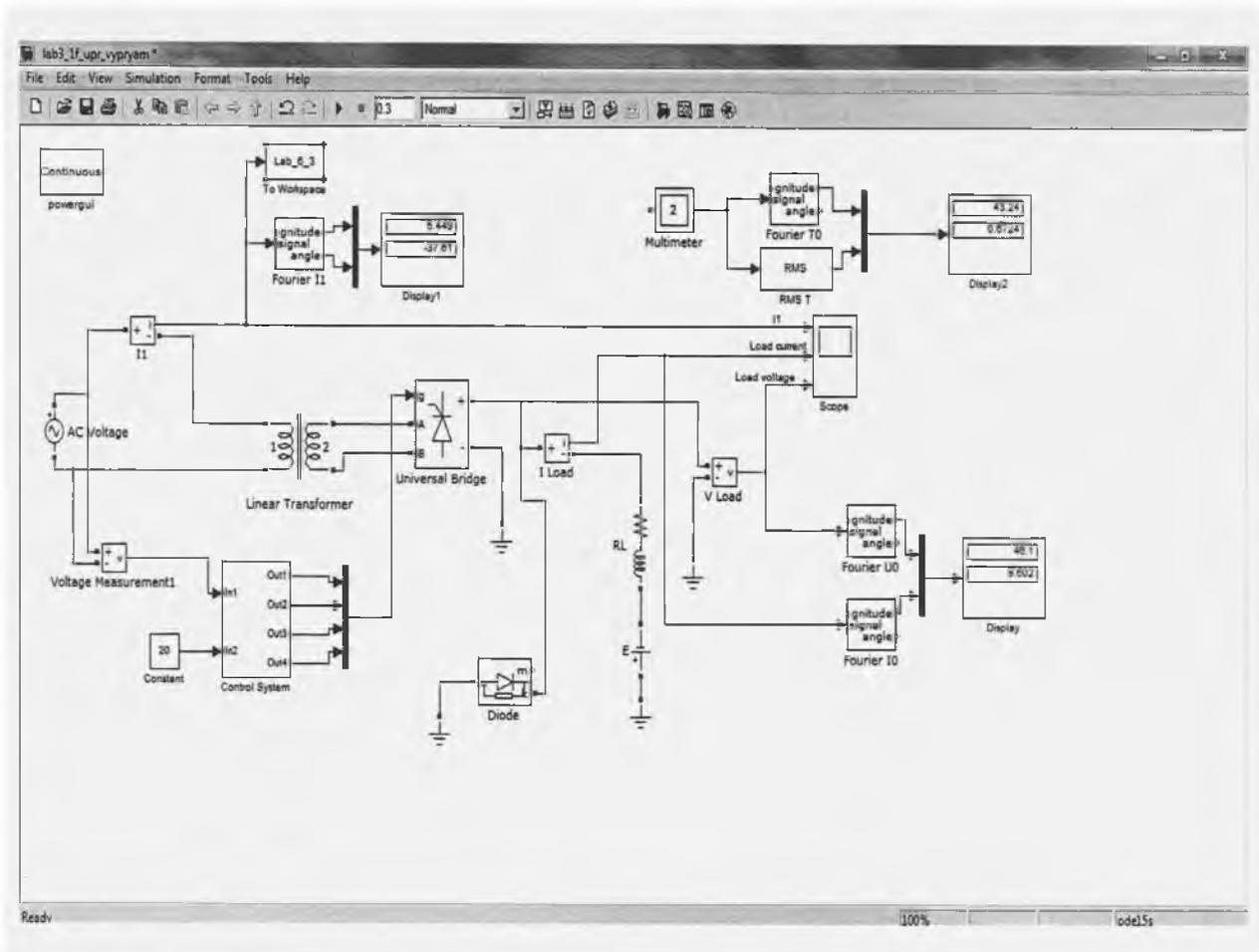


Рис. 3.2.13 Модель однофазного управляемого выпрямителя

Выводы

Расчеты показывают, что преобразователи, состоящие из полупроводниковых приборов высокого класса не смотря на их стоимость, более выгодны за счет расходов на обслуживание. В преобразователях с элементами низкого класса количества приборов очень велика. В таком случае кратность резервирования снижается, и вероятность отказов увеличивается. По показателям коэффициента стоимости эксплуатации видно, что эксплуатировать полупроводниковых приборов высокого класса несколько раз выгоднее, тем не менее они более надежные.

3.3. Выводы и предложения по совершенствованию тяговых свойств электровозов

1. Так как Республика Узбекистан делится на два типа местности: западная равнинная и восточная горная. Крупные города и промышленные предприятия располагаются в основном в восточной части. Поэтому железные дороги в этом регионе имеют большую загруженность и электрификация железных дорог и повышение скорости движения целесообразно в первую очередь в восточной части.

2. На пассажирский поток оказывают влияние потоки туристов, для привлечения которых целесообразно повышать скорость на направлениях от Ташкента до Самарканда, а в дальнейшем и до Бухары.

В Узбекистане широко развита горнодобывающая промышленность и металлургия, что требует обеспечения большого объема грузовых перевозок в восточной части, где построены гидроэлектростанции. Это сделало возможным и целесообразным электрификацию железных дорог в этой части Республики.

3. Для обеспечения перевозок на электрифицированных железных дорогах Узбекистана необходима замена существующего парка электровозов ВЛ60 и ВЛ80 на новые электровозы и электропоезда, позволяющие реализовать более высокие скорости и рекуперативное торможение в горной местности.

4. Для повышения эффективности электроподвижного состава целесообразно использовать новые решения по системам управления электроподвижного состава, разработанные фирмой Siemens, использующие асинхронные тяговые двигатели, преобразователи на тиристорах GTO и транзисторах IGBT, в частности $4q-S$ преобразователи. В связи с этим на основе тендера было принято решение заказать

электровозы на китайском электровозостроительном заводе по проекту фирмы Siemens.

5. В тендере участвовали также электровозы Американского производителя, электровоз компании Siemens AG. Электровозы Новочеркасского завода не рассматривались, так по условиям Банка ЕБРР, который финансировал данный проект, в тендере могут участвовать лишь европейские производители, либо производители работающие по патенту европейских фирм, а также американские производители.

Электровоз заменит электровоз ВЛ60к.

Выбор электровоза обоснован следующими факторами:

- возможность рекуперации,
- долгосрочные условия гарантийного обслуживания,
- доступность технического обслуживания.
- ниже цена по сравнению с другими производителями.

6. Исследуя преобразователь 4q-S, были учтены разработки, выполненные в МИИТе д.т.н Литовченко В. В [2]. Преобразователь 4q-S позволяет использовать рекуперативное торможение. В данной работе наряду с регулированием частоты и напряжения на асинхронном тяговом двигателе, исследовано регулирование коэффициента мощности нового электровоза. Показатели работы 4q-S преобразователя проанализированы на модели в MatLab.

Результаты тягового расчета показали, что за счет рекуперативного торможения на крутых спусках горных участков закупленные электровозы могут обеспечить снижение расхода электроэнергии грузовыми поездами на 50-60 %. Этому способствует то, что грузовые поезда с массой 2268 т. на этом участке идут на спуск, а на подъем идут составы с массой 2188 т. По данным железной дороги Узбекистана, на 2017 г. на данном участке перевозились составы массой 1800-2000 т. в обоих направлениях. Расчетные данные расхода электроэнергии расходятся с данными дороги о расходе на этом участке на 9-15%.

Применение пассажирского электровоза не дает заметного снижения времени хода и расхода энергии. Поэтому для данного конкретного участка целесообразно применять грузопассажирский электровоз для всех видов перевозок, что позволит упростить организацию эксплуатации электровозов.

7. Проведенный анализ современного состояния научно-технической проблемы повышения надёжности изоляционных конструкций силовых цепей электровозов показал, что наименее надёжными узлами силовых цепей локомотивов являются электрическая аппаратура (28,7 % от всех видов unplanned ремонтов) и неисправности преобразователей. Отказы диодов преобразователей составляют, в среднем 22,2 %. Основными факторами, снижающими надёжность эксплуатации преобразователей при изготовлении и в эксплуатации, являются термомеханические и электрические нагрузки.

Цикл нагрева изоляции до температуры 105-120°C и охлаждения до 20°C, вызывает снижение её импульсной прочности, аналогичное эксплуатации электрической машины в течении 3-4 лет. Складирование в шесть и более слоёв приводит к отбраковке корпусной изоляции 40,7 %. Изменения класса изоляции преобразователей с кл. В на кл. Б увеличивает их ресурс лишь в 1,2 раза.

Поэтому наиболее перспективным направлением повышения надёжности изоляционных конструкций силовых цепей необходимо считать комплекс технических мер, снижающих уровень воздействующих на них термических и электрических нагрузок в эксплуатации и повышающих уровень их электрической прочности при изготовлении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первый электровоз стал результатом совместной работы китайских инженеров, инженеров компании «*Siemens*», российских инженеров, а также активного участия специалистов из Узбекистана. 8 лет эксплуатации на электрифицированных железных дорогах Узбекистана показали, что электровоз достаточно удачный и пригоден для осуществления перевозок в условиях Узбекистана. За весь период эксплуатации серьезных неисправностей не было. В процессе эксплуатации были выявлены неисправности отдельных электрических цепей управления, которые были устранены совместно с сотрудниками Чжучжоуской электровозостроительной компании и локомотивного депо.

Электровозы зарекомендовали себя с хорошей стороны, что и послужило продолжению отношений с Чжучжоуской электровозостроительной компанией. Судя по успешному проведению испытаний, а также эксплуатации в течении 2 лет, электровоз второго поколения имеет все возможности, чтобы повторить успех первой серии.

Для повышения эффективности электроподвижного состава целесообразно использовать новые решения по системам управления электроподвижного состава, разработанные фирмой *Siemens*, использующие асинхронные тяговые двигатели, преобразователи на тиристорах GTO и транзисторах IGBT, в частности *4q-S* преобразователи и инверторы с широтно-импульсной модуляцией. Преобразователь *4 q-S* позволяет использовать рекуперативное торможение. Инвертор напряжения позволяет осуществить плавное регулирование силы тяги, обеспечивая максимальную реализацию силы тяги и плавный пуск. В данной работе исследованно с регулирование частоты и напряжения на асинхронном тяговом двигателе.

Расчеты показывают, что преобразователи, состоящие из полупроводниковых приборов высокого класса не смотря на их стоимость,

более выгодны за счет расходов на обслуживание. В преобразователях с элементами низкого класса количества приборов очень велика. В таком случае кратность резервирования снижается, и вероятность отказов увеличивается. По показателям коэффициента стоимости эксплуатации видно, что эксплуатировать полупроводниковых приборов высокого класса несколько раз выгоднее, тем не менее они более надежные.