

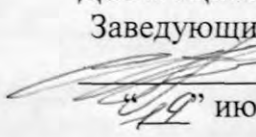
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И
РОБОТОТЕХНИКИ

КАФЕДРА «ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой


 С.А. Павлюковец

«19» июня 2019г.

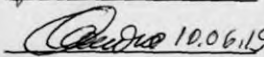
РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА
«АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
ТРАМВАЯ С ТРЕМЯ ТЕЛЕЖКАМИ МОДЕЛИ В85300М»

Специальность 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»
Специализация 1-53 01 05 01 «Автоматизированный электропривод
промышленных и транспортных установок»

Обучающийся
группы 10705114

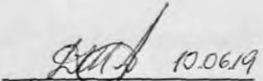
 10.06.19 Ф.Ю. Алёшин

Руководитель

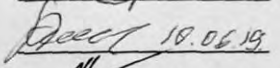
 10.06.19 О.Ф. Опейко

Консультанты:

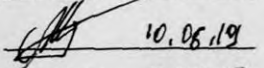
по разделу электропривода

 10.06.19 Д.Н. Жарко

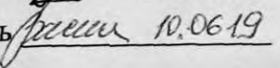
по разделу охраны труда

 10.06.19 Л.П. Филянович

по разделу экономики

 10.06.19 А.В. Манюкевич

Ответственный за нормоконтроль

 10.06.19 С.В. Васильев

Объём проекта:

расчетно-пояснительная записка – 128 страниц;

графическая часть – 8 листов;

Минск 2019

РЕФЕРАТ

Дипломный проект: 128 с., 57 рис., 21 табл., 33 источника.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД,
ТРАМВАЙ С ТРЕМЯ ТЕЛЕЖКАМИ МОДЕЛИ В85300М, ВЕКТОРНОЕ
УПРАВЛЕНИЕ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ,
МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА, РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК

Объектом проектирования является трамвай с тремя тележками модели В85300М, предназначенный для городских пассажирских перевозок.

Цель проектирования – разработка автоматизированного тягового электропривода тележки трамвая модели В85300М.

В ходе проектирования проведён анализ технологического процесса, выполнено технико-экономическое обоснование проекта, разработана система автоматического управления и модель электропривода, рассмотрены вопросы автоматизации установки и охраны труда.

В результате проектирования был разработан автоматизированный тяговый электропривод с трёхфазным преобразователем напряжения и тяговым электродвигателем переменного тока типа ТМР35-30-4 мощностью 105 кВт.

Результаты проектирования могут быть внедрены при проектировании трёхсекционных трамваев.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКИ И ФОРМУЛИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ ЭЛЕКТРОПРИВОДУ	9
1.1 Описание промышленной установки.....	9
1.2 Анализ технологического процесса промышленной установки и выбор управляемых координат электропривода механизма	12
1.3 Формулирование требований к автоматизированному электроприводу механизма	14
2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА	16
2.1 Обзор систем электропривода, применяемых для привода механизма	16
2.2 Выбор рациональной системы электропривода механизма	19
2.3 Проектирование функциональной схемы автоматизированного электропривода механизма	22
3 ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ	26
3.1 Анализ кинематической схемы механизма и определение её параметров. Составление математической модели механической части электропривода и определение её параметров	26
3.2 Расчёт нагрузок, построение механической характеристики $M_{\text{мех}}=f(\omega)$ и нагрузочной диаграммы механизма $M_{\text{мех}}=f(t)$	27
3.3 Предварительный выбор двигателя по мощности	34
3.4 Выбор номинальной скорости и типоразмера двигателя. Построение характеристики $M_{\text{доп}}=f(\omega)$, где $\omega_{\text{мин}} \leq \omega \leq \omega_{\text{макс}}$	38
3.5 Построение нагрузочной диаграммы электропривода $M=f(t)$ за цикл работы	40
3.6 Предварительная проверка выбранного электродвигателя по нагреву и перегрузочной способности	41
4 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ	45
4.1 Определение возможных вариантов и обоснование выбора вида преобразователя электрической энергии	45
4.2 Расчёт электрических переменных и выбор типоразмера преобразователя электрической энергии	46
4.3 Расчёт параметров и выбор электрических аппаратов силовой цепи: входного и выходного фильтров, тормозного резистора	47

5	ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	50
5.1	Выбор датчиков электрических и технологических переменных для измерения управляемых координат электропривода на основе требований к автоматизированному электроприводу	50
5.2	Составление математических моделей и расчёт параметров объекта управления, датчиков и исполнительного устройства	51
5.3	Проектирование регуляторов технологических и электрических переменных на основе разработанных математических моделей и требований к автоматизированному электроприводу	59
6	РАСЧЁТ И АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	62
6.1	Разработка компьютерной (имитационной) модели автоматизированного электропривода механизма	62
6.2	Расчёт зависимости задающего воздействия от времени $U_3=f(t)$ для реализации технологического процесса за цикл работы механизма	71
6.3	Построение статических характеристик электропривода, соответствующих зависимости $U_3=f(t)$ за цикл работы механизма	73
6.4	Расчёт переходных процессов за цикл работы механизма и определение показателей качества	75
6.5	Сравнительный анализ полученных показателей качества с требованиями к электроприводу механизма	81
7	ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ ВЫБОРА ДВИГАТЕЛЯ ПО МОЩНОСТИ	82
7.1	Построение точной нагрузочной диаграммы электропривода за цикл работы автоматизированного электропривода механизма	82
7.2	Проверка электродвигателя по нагреву и перегрузочной способности электропривода по точной нагрузочной диаграмме механизма за цикл работы	83
8	ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММИРУЕМОГО КОНТРОЛЛЕРА	86
8.1	Формализация условий работы промышленной установки	86
8.2	Разработка алгоритма функционирования промышленной установки	87

8.3 Проектирование релейно-контакторной схемы системы автоматизации и описание её работы. Разработка программы управления для программируемого контроллера	90
8.4 Проектирование функциональной схемы системы автоматизации	91
8.5 Выбор аппаратов системы автоматизации	93
8.6 Проектирование схемы электрической соединений системы автоматизации	95
8.7 Полное описание функционирования системы автоматизации	97
9 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКИ	98
9.1 Выбор аппаратов, проводов и кабелей	98
10 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	100
10.1 Схема электрическая принципиальная автоматизированного электропривода.....	100
10.2 Составление перечня элементов электрооборудования электроустановки	102
10.3 Полное описание функционирования схемы электрической принципиальной автоматизированного электропривода	103
11 ОХРАНА ТРУДА	105
11.1 Требования к электротехническому персоналу обслуживающему электрооборудование трамвая	105
11.2 Меры безопасности при эксплуатации и обслуживании электродвигателей	108
11.3 Меры безопасности при эксплуатации и обслуживании преобразователя частоты	110
11.4 Общие меры безопасности	111
11.5 Электробезопасность	113
11.6 Пожарная безопасность	114
12 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ..	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	125

ВВЕДЕНИЕ

Современный городской электрический транспорт является крупнейшим перевозчиком населения в крупных городах. Различные его виды отличаются технико-экономическими и эксплуатационными показателями, которые определяют целесообразность применения каждого вида пассажирского транспорта в тех или иных конкретных условиях. Перспективным направлением является развитие городской сети скоростного трамвая.

Ориентация на трамваи связана с преимуществами этого вида транспорта: высокой провозной способностью (по сравнению с автобусами), низкой себестоимостью и затратами на ремонт (по сравнению с метро) и, наконец, высокой экологичностью. Актуальность данной темы дипломного проекта обусловлена повышением технического уровня трамваестроения и необходимостью обновить существующий парк городского транспорта. На современном трамвае применяются конструкторские решения, обеспечивающие плавный ход, тихую работу, низкую высоту пола и большую пассажироместимость. Трамвай не выделяет при работе продуктов сгорания, что для городов имеет большое экологическое значение.

Целью дипломного проекта является разработка тягового электропривода трамвая модели В85300М. В качестве источника электроэнергии для работы трамвая выступает контактная сеть постоянного тока. Оси колёсных пар трамвая приводятся в движение тяговыми электродвигателями, которые управляются тяговыми преобразователями. Исходя из требований и анализа технологического процесса необходимо выбрать оптимальный вариант электропривода, программируемого контроллера и микроконтроллера для системы управления, а также выполнить подключение к нему всех управляющих сигналов и устройств. Для подтверждения правильности выбора приведём имитационные модели и графики переходных процессов спроектированной системы.

1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКИ И ФОРМУЛИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ ЭЛЕКТРОПРИВОДУ

1.1 Описание промышленной установки

Трамвай — вид уличного и частично уличного рельсового общественного транспорта для перевозки пассажиров по заданным маршрутам, используемый преимущественно в городах.

Вагон трамвайной модели В85300М трёхсекционный, с двумя моторными поворотными и одной поддерживающей тележкой. Моторные тележки расположены под первой и третьей секциями вагона. Поддерживающая тележка, расположенная под второй секцией, имеет возможность поворота на минимальный угол. Секции вагона соединены гибким сочленением, что дает возможность беспрепятственного прохода по всей длине вагона.

На вагонах по левому и правому бортам установлены четыре двухстворчатые двери поворотно-раздвижного типа.

Для обеспечения удобства посадки-высадки пассажиров с ограниченными способностями к передвижению вагоны оборудованы площадками для инвалидной коляски с устройством фиксации и аппарелями, установленными в районе второй двери по ходу движения.

Кабины водителя отделены от пассажирского салона перегородками с дверью для входа водителя и окошком для продажи проездных билетов. Вход водителя в кабину осуществляется через первую дверь салона.

Приборная панель управления в кабине водителя должна удовлетворять эргономическим требованиям. Контроллер водителя расположен по левой стороне.

Приведение вагона в движение обеспечивается четырьмя тяговыми электродвигателями. Тяговый преобразователь должен обладать возможностью рекуперации электроэнергии. Каждая моторная тележка должна иметь свой тяговый преобразователь, управляющий работой двух двигателей, установленных на тележке. Два комплектных преобразователя секций А и В (рисунок 1.1) трамвая модели В85300М должны подключаться к контактной сети через быстродействующие автоматические выключатели.

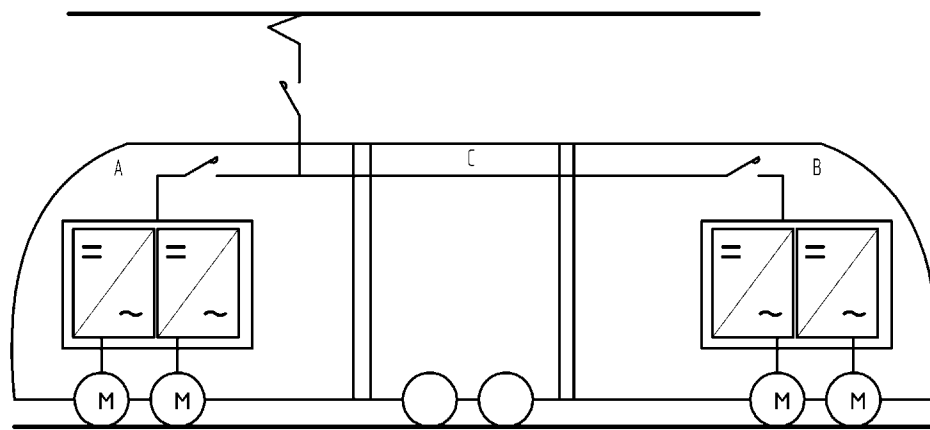


Рисунок 1.1 – Подключение тяговых модулей преобразователей вагона

Тележки вагона имеют шарнирную раму, обеспечивающую постоянный контакт колес с рельсами, что исключает сход вагона с рельс, а также прохождение неровностей рельсовых путей без кососимметрических нагрузок на тележку и на рельсовый путь.

Все колесные пары моторных тележек являются ведущими. Каждая моторная ось имеет пассивный тормозной механизм. Механические тормоза всех тележек имеют электромеханическое управление. Все тележки оборудованы электромагнитными рельсовыми тормозами.

Рамы с силовым электрооборудованием установлены на крыше таким образом, чтобы их монтаж и демонтаж можно было производить доступным оборудованием в условиях депо.

Вагон оснащен двумя полупантографами, установленными на крыше крайних секций, с управлением из кабин водителя. Ось полоза токоприемника находится над первой (по ходу движения) моторной тележкой.

Салон вагона обеспечивает комфортные условия для пассажиров и водителя. Количество дверей обеспечивает быструю посадку-высадку пассажиров. Системы отопления, вентиляции и кондиционирования обеспечивают комфортную температуру для пассажиров и водителя.

В вагоне должна быть обеспечена электробезопасность пассажиров и обслуживающего персонала, хороший доступ для обслуживания оборудования, учтены требования пожарной безопасности и экологии.

Общий вид трамвайного вагона показан на рисунке 1.2:

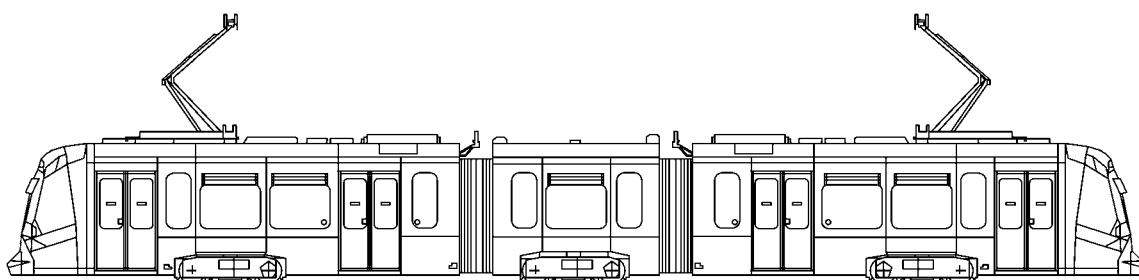


Рисунок 1.2 – Общий вид трамвайного вагона Stadler - B85300M

Технические характеристики трамвайного вагона Stadler - B85300M приведены в таблице 1.1 [1].

Таблица 1.1 – Технические характеристики трамвая Stadler - B85300M

Ширина колеи	1524 мм
Напряжение контактной сети	600 В ($\pm 20\%$)
Осевая формула	Bo'2'Bo'
Количество сидячих мест	58
Количество дверей на одной стороне	4
Длина	26 715 мм
Ширина	2500 мм
Максимальная техническая масса	55 480 кг
База моторной тележки	1800 мм
Диаметр колеса	610 мм
Максимальное ускорение, брутто	1,24 м/с ²
Конструкционная скорость	75 км/ч

1.2 Анализ технологического процесса промышленной установки и выбор управляемых координат электропривода механизма

Stadler B85300M является пассажирским трамваем, который осуществляет перевозку пассажиров по некоторому заданному маршруту. Маршрут представляет собой последовательность остановочных пунктов, на которых нужно остановиться для посадки-высадки пассажиров. В конце маршрута водитель останавливается в депо для отдыха. Через 20-30 минут проезжает тот же маршрут в обратном направлении.

Технологический цикл трамвая состоит из следующих этапов:

- 1) плавный разгон до номинальной скорости;
- 2) движение с номинальной скоростью в течении некоторого промежутка дороги;
- 3) свободный выбег (движение по инерции) за время которого скорость изменяется примерно на 10-20%;
- 4) торможение до нулевой скорости;
- 5) фиксация транспортного средства;
- 6) посадка – высадка пассажиров;

Выше был представлен технологический цикл трамвая за время отработки некоторого маршрута. Но т.к. за всей работой трамвая следит водитель, который и управляет данным транспортным средством, а именно осуществляет разгон, движение на заданной скорости и торможение, то он является ответственным за выполнение технологического процесса. Так же он подготавливает трамвай к началу отработки технологического цикла.

Рассмотрим действия водителя, которые требуются для подготовки трамвая к отработке технологического процесса.

Включение и пуск вагона:

- 1) поднять токоприёмник;
- 2) включить цепи управления и вспомогательные цепи;
- 3) нажать и удерживать педаль безопасности;

4) выбрать направление движения и повернуть реверсор в соответствующее положение;

5) повернуть рукоятку контроллера (пусковую педаль) до включения необходимой ходовой позиции;

6) после набора нужной скорости вернуть рукоятку или педаль контроллера в нулевое положение, тяговые двигатели при этом отключатся и вагон будет двигаться выбегом.

Торможение, остановка и выключение вагона:

1) установить контроллер на одну из тормозных позиций.

При этом тяговые электродвигатели (ТЭД) переводятся в генераторный режим, в силовую цепь вводятся тормозные реостаты, начинается электродинамическое торможение.

2) для полной остановки вагона необходимо включить тормозную позицию, на которой при истощении электродинамического торможения автоматически сработает колодочный тормоз. Вагон при этом затормаживается полностью.

Для применения экстренного торможения необходимо включить последнюю тормозную позицию, при этом одновременно включатся электродинамическое торможение на полную мощность, рельсовый тормоз и при истощении электродинамического торможения — колодочный.

3) вернуть контроллер в нулевое положение;

4) установить реверсор в нулевое положение;

5) выключить вспомогательные цепи и цепи управления;

6) опустить токоприёмник.

Управляемой координатой электропривода является момент, т.к. трамвай должен преодолевать подъём, указанный в техническом задании, при этом скорость преодоления подъема не так важна, также водитель должен контролировать ускорение, что достигается путём задания момента. Выходной величиной системы автоматического управления (САУ) является ток задания канала момента и канала потокосцепления.

1.3 Формулирование требований к автоматизированному электроприводу механизма

Основные требования к современным трамваям были установлены на 2-й конференции МСОТ (Международный союз общественного транспорта), которая проходила в сентябре 1994 года в Амстердаме. Среди них можно выделить общие положения:

- 1) низкая стоимость и дешевизна в обслуживании, надёжность;
- 2) применение современных технологий (рекуперация энергии торможения, использование двигателей переменного тока, применение противоскользющего управления колесами) и др.

На основании данных положений и анализа технологического процесса можно выдвинуть следующие требования к автоматизированному электроприводу трамвая:

- 1) тяговый привод должен обеспечить работоспособность в четырех квадрантах осей скорости и момента (двигательный режим вперед и назад; тормозной режим вперед и назад);
- 2) разгон и торможение должны происходить с максимально допустимым ускорением $a = 1,24 \text{ м/с}^2$;
- 3) ограничение рывка при разгоне $\rho = 1 \text{ м/с}^3$. При торможении от скорости ниже 5-10 км/ч ограничение на рывок не устанавливается;
- 4) скорость движения на ровном участке пути при номинальной загруженности не менее 75 км/ч;
- 5) движение трамвая на участке пути с 4% подъемом с максимальной загруженностью со скоростью не менее 25 км/ч;
- 6) передаточное число редуктора тележки $i = 6,24$;
- 7) операции по управлению тягового электродвигателя должны быть основаны на простых и легко запоминающихся манипуляциях и исключить ошибочные действия и обеспечить при любых условиях наиболее безопасный режим движения-торможения;

- 8) должен быть максимально облегчен труд водителя;
- 9) должны быть обеспечены минимальные габариты и вес регулирующей аппаратуры, а также минимальная стоимость системы управления и расходы на ее обслуживание.

2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА

2.1 Обзор систем электропривода, применяемых для привода механизма

Целью обзора является определение технического уровня, выявление тенденций и направлений развития. Для этого рассмотрены наиболее современные решения и патенты в области систем управления тяговым электроприводом.

Способ и устройство управления асинхронным электродвигателем без датчика скорости [2] предусматривает вычисление частоты скольжения, при которой имеет место наибольший электромагнитный момент электродвигателя, и на основании этого значения формируется сигнал задания скорости. Если электромагнитный момент превышает это значение, возникает сигнал о перегрузке двигателя.

Устройство векторного управления скоростью асинхронного двигателя [3] предназначено для поддержания максимального КПД двигателя во всем допустимом диапазоне изменения внешнего момента при заданной угловой скорости. Технический результат достигается тем, что в структуру предложенного устройства вводится вычислительный блок, который в условиях незначительной вариации внешнего момента сопротивления рассчитывает параметры скорости и потокосцепления. Это позволяет без применения датчика скорости, механически связанным с валом двигателя и блока датчиков главного потокосцепления, размещаемых в зазоре статора, поддерживать максимальный и постоянный КПД двигателя во всем допустимом диапазоне изменения внешнего момента при заданной угловой скорости.

Устройство управления электрическим транспортным средством [4] относится к способу управления железнодорожным транспортным средством, имеющим трехфазную электрическую машину. Способ содержит следующие

этапы: определение тока первой и второй фаз трехфазной электрической машины, определение углового положения ротора, определение расчетного крутящего момента. Управление транспортным средством ведётся на основе оценённого крутящего момента.

Перечисленные технические решения показывают, что векторное управление тяговым асинхронным электроприводом нашло широкое применение благодаря известным преимуществам, позволяющим улучшить динамические характеристики транспортных средств и экономии электроэнергии.

Усовершенствование тягового электропривода транспортных средств является актуальным направлением, которое приобретает большое значение в связи с необходимостью энергосбережения. Усовершенствование может вестись по следующим направлениям.

Патент [5] описывает метод широтно-импульсной модуляции с выборочным исключением гармоник для тягового инвертора напряжения. Система содержит два процессора: первый процессор содержит программу для генерации сигнала, второй - хранит зависимость углов переключения от значения модуляции. Метод может реализовывать переключение между различными значениями несущей частоты широтно-импульсной модуляции.

Метод снижения шума электродвигателя [6] описывает изменения магнитного потока в двигателе таким образом, чтобы отношение основных колебаний магнитного потока к высшим гармоникам уменьшалось. Кроме того, предлагается дополнительно или альтернативно изменять напряжение на двигателе и/или частоту импульсов. Технический результат заключается в снижении шума, производимого двигателем.

В тяговом электроприводе наиболее применимы три вида двигателей: двигатель постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТ ПВ), асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АДКЗР) и синхронный двигатель с ротором на постоянных магнитах (СДПМ).

ДПТ ПВ являются самым старым видом тяговых электродвигателей и в настоящее время вытеснены синхронными и асинхронными двигателями.

Из-за простоты устройства и обслуживания, высокой надежности и низкой стоимости наибольшее распространение получили АДКЗР. Данный вид двигателей наиболее широко представлен на рынке такими производителями как АВВ, TSA, VEM, Skoda, Электротяжмаш и др.

С развитием технологии производства мощных постоянных магнитов начались научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по внедрению СДПМ в тяговый электропривод. Данный вид двигателей имеет жёсткую характеристику и более высокий КПД, по сравнению с асинхронными. Однако система управления СДПМ более сложная, что обуславливает их не такое широкое распространение. В таблице 2.1 представлена сравнительная характеристика различных двигателей, применимых в тяговом электроприводе трамвая.

Таблица 2.1 – Сравнительные характеристики тяговых электродвигателей:

Параметр		TMR35 -30-4	2MLU 3343 К/4	DKCBZ 0211-4BB	YZQ28 0L-4	АТД- 9У1
Ном. мощность, кВт	P_H	105	105	105	130	125
Ном. напряжение, В	U_H	430	400	430	400	570
Ном. частота, Гц	f	60	60	60	50	80
Ном. ток, А	I_H	180	204	190	230	153
Частота вращения ном., об/мин	n_H	1770	1784	1780	1512	2400
Частота вращения макс., об/мин	n_{max}	4472	5100	4463	4000	4000
Ном. коэффициент мощности	$\cos\varphi_H$	0,84	0,8	0,8	0,82	0,89
Ном. крутящий момент, Н·м	M_H	565	548	560	830	520
КПД	η_H	0,92	0,90	0,93	0,94	0,93
Масса, кг	m	385	375	385	560	387

2.2 Выбор рациональной системы электропривода механизма

Рассмотрим основные системы, применяемые в тяговых электроприводах: тиристорно-импульсная система управления (ТИСУ), частотное управление.

Создание тиристорно-импульсной системы управления (ТИСУ) стало возможным с появлением мощных тиристорov, т.е. полупроводниковых приборов, способных коммутировать электрический ток достаточной величины и напряжения [7].

Основным принципом работы ТИСУ является регулирование скорости и вращающего момента тягового электродвигателя путём пропускания через него импульсов электрического тока с заданной частотой и скважностью следования, что осуществляет система управления тиристорами (СУТ). При необходимости увеличения оборотов или вращающего момента импульсы становятся более частыми и длительными во времени, таким образом возрастает средний ток через электродвигатель. Если нужно понизить обороты или развиваемый момент, то ТИСУ формирует более редкие и короткие импульсы в их временной последовательности, обеспечивая уменьшение среднего тока, проходящего через обмотки электродвигателя.

Упрощенная функциональная схема тиристорно-импульсной системы приведена на рисунке 2.1.

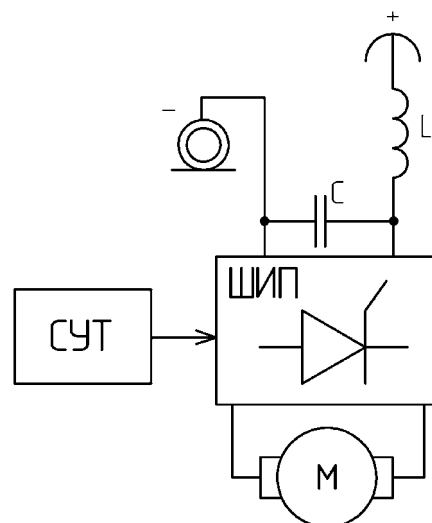


Рисунок 2.1 – Упрощенная функциональная схема ТИСУ

Преимущество ТИСУ перед более ранними моделями систем управления током (непосредственная, косвенная реостатно-контакторная) в том, что отсутствуют тепловые потери в пусковых сопротивлениях, что положительно сказывается на КПД. Также за счёт бесступенчатого увеличения тока в обмотках двигателя ТИСУ позволяет достичь плавного разгона транспортного средства без рывков и толчков, отсутствие сложных электромеханических устройств коммутации положительным образом сказывается на надёжности.

Недостатком ТИСУ является её более высокая сложность по сравнению с электромеханическими аналогами, требующая более высокого уровня обслуживающего персонала для диагностики и ремонта. В отличие от непосредственной и в несколько меньшей степени косвенной реостатно-контакторной систем управления, ТИСУ практически не ремонтируется в условиях депо (требует радиомонтажной, а не обычной для транспортных предприятий механической и электрической мастерской).

Далее рассмотрим современный вариант управления асинхронным двигателем, который стал возможен с появлением микроконтроллеров, которые позволяют реализовать сложные алгоритмы управления электродвигателями. Так, микроконтроллеры позволяют реализовать частотное регулирование электродвигателями.

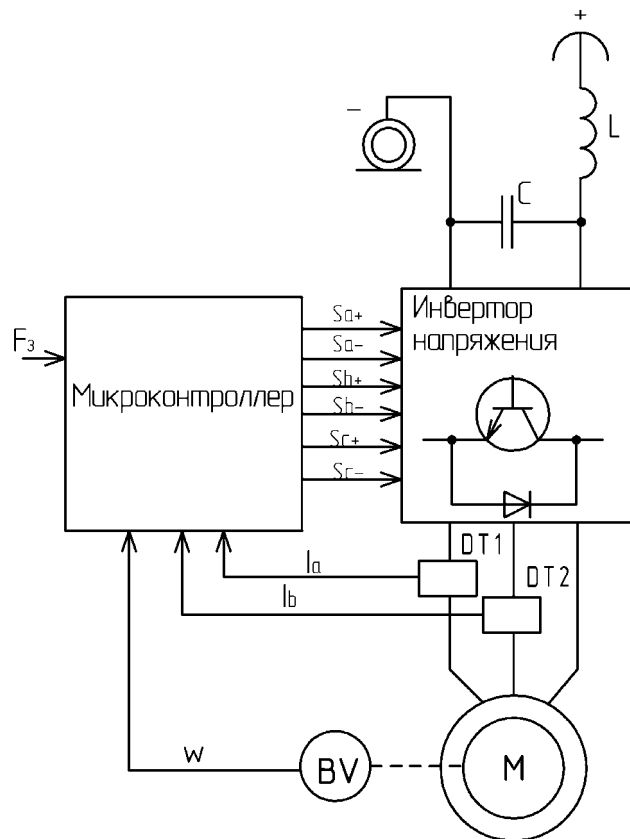


Рисунок 2.2 – Функциональная схема частотного управления

При частотном регулировании на базе асинхронного двигателя, применяются скалярное и векторное частотное управление. Под скалярным методом управления понимается согласованное изменение напряжения питания при изменении частоты сети. При вольт-частотном способе управления $U=F(f)$ момент, развиваемый двигателем, прямо пропорционален квадрату напряжения и обратно пропорционален частоте питающей сети. В случае если во время работы требуется поддерживать постоянный момент и мощность, отношение $U/f=const$ поддерживается постоянным.

Скалярное управление применяется в частотно регулируемых электроприводах с диапазоном регулирования частоты вращения двигателя 1:40.

Использование векторного управления дает возможность увеличить диапазон регулирования, наиболее быстро и точно осуществлять управление электроприводом. «Векторное управление» - получило свое название из-за способа изменения вращающего момента. Для изменения момента требуется

изменять фазу и амплитуду тока статора двигателя, то есть его вектор. Для изменения вектора тока и положения магнитного потока статора требуется иметь знания о положении ротора двигателя. Это положение определяется с помощью датчика обратной связи по скорости устанавливаемого на вал двигателя, либо с помощью направления тока и напряжения статора. Векторное управление имеет значительное преимущество перед скалярным, а именно: диапазон регулирования до 1:1000, регулирование скорости и момента с погрешностью соответственно до 0,01% и 1 % [8].

Недостатком приводов переменного тока является сложность тяговых инверторов и системы управления приводом. В силовой части ТИ содержатся бесконтактные полупроводниковые элементы. Каждый из них надежен, но их настолько много, что вероятность отказа в работе ТИ достаточно высока. Поэтому сейчас ведутся разработки по повышению надежности работы ТИ. Также к недостаткам следует отнести искажение формы кривой тока и напряжения от синусоидальной, вызываемые работой преобразователя, что увеличивает потери в двигателях.

Проанализировав системы электроприводов можно сделать вывод, что самой эффективной по сравнению с остальными системами электроприводов является электропривод с частотным векторным управлением.

2.3 Проектирование функциональной схемы автоматизированного электропривода механизма

На основе сформулированных требований к автоматизированному электроприводу и выбранной системы электропривода спроектирована функциональная схема автоматизированного тягового электропривода тележки трамвая (рисунок 2.3), на которой введены следующие обозначения:

ТИ1, ТИ2 – тяговые инверторы напряжения, преобразуют входное напряжение постоянного тока в трёхфазное переменное напряжение питания тяговых двигателей;

МВ – модуль входной, выполняет следующие функции: разрешение и запрет рекуперации, обеспечивает возможность контроля тока потребляемого входной цепи питания тяговых инверторов, используется как повышающий источник напряжения аварийного автономного хода;

БКАХ – блок контакторов автономного хода, предназначен для подачи напряжения аккумуляторных батарей, используемых для обеспечения аварийного автономного хода трамвая;

ТБ – тормозной блок, в случае торможения избыточную энергию от рекуперации рассеивает на тормозном резисторе;

МК1, МК2 – микроконтроллеры, обеспечивают векторное управление электроприводом на основе сигналов от датчиков тока и скорости;

BV1, BV2 – датчики скорости;

ЭБУ – электронный блок управления, управляет автоматикой и задаёт режимы работы тягового преобразователя в зависимости от сигналов с панели управления водителя через интерфейс CAN;

ДТ1, ДТ2 – датчики тока, необходимые для векторного управления электроприводом.

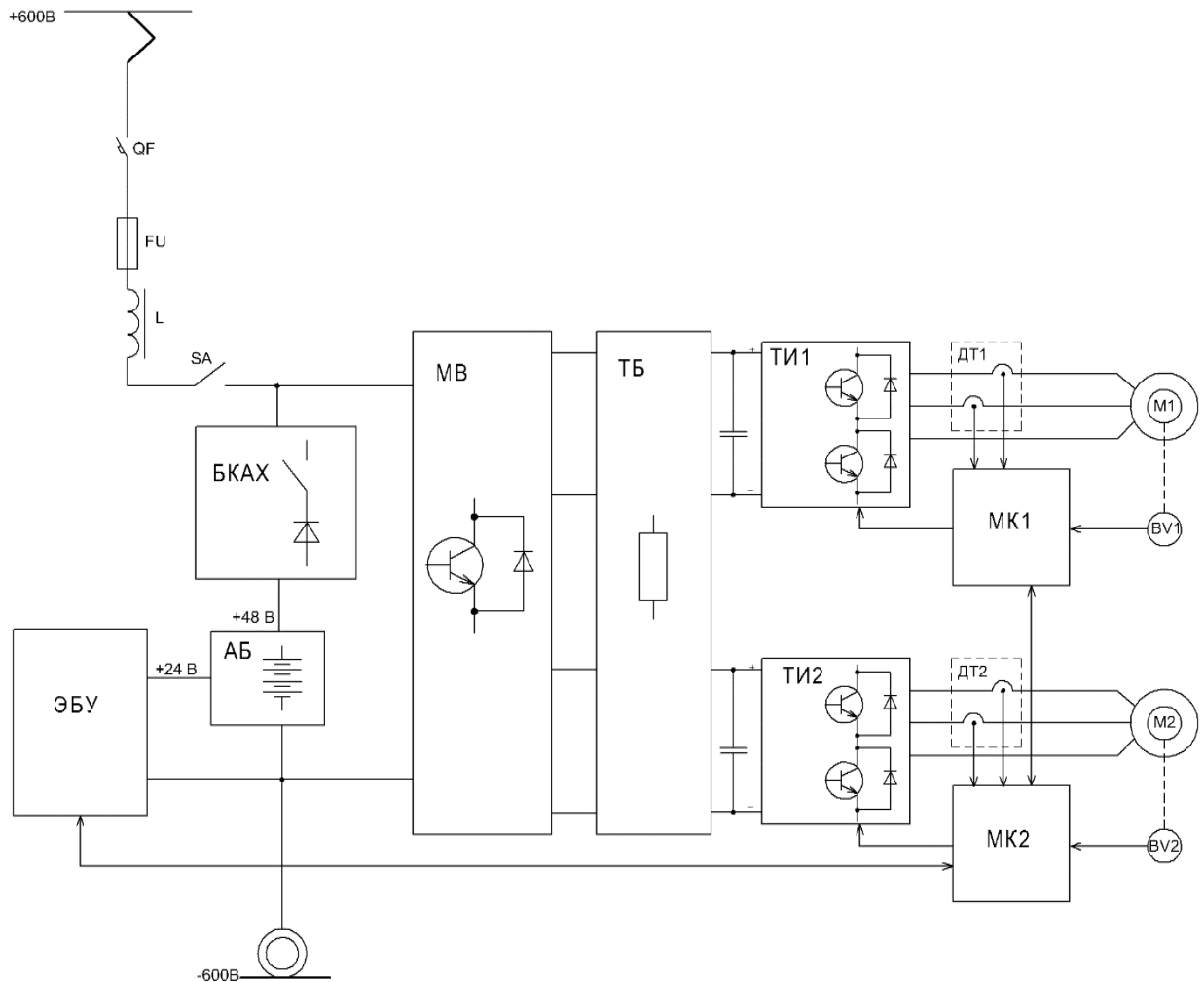


Рисунок 2.3 – Функциональная схема автоматизированного тягового электропривода тележки трамвая

Тяговый преобразователь подключается к контактному проводу сети с напряжением 600В постоянного тока через токоприемник. Автоматический выключатель, подключаемый к токоприемнику, имеет большую мощность и имеет дистанционный привод. Внешние автоматические выключатели в цепи преобразователей не имеют дистанционного привода. Каждый тяговый инвертор имеет свой независимый линейный контактор, а также фильтровые дроссели.

Отдельно, через независимые контакторы к тяговым инверторам подается напряжение 48В аварийного автономного хода.

На входе инвертора установлен сетевой дроссель, обеспечивающий требуемое сглаживание тока. Тяговый инвертор преобразовывает входное

напряжение постоянного тока в трёхфазное переменное напряжение питания тяговых двигателей.

Выходное напряжение имеет переменную амплитуду и частоту, обеспечивая работу в четырех квадрантах (движение вперед, движение назад, разгон, торможение). Основная частота на выходе инверторов изменяется от 0 до 150 Гц.

На выходе тяговых инверторов формируется напряжение широтно-импульсной модуляции. Несущая частота переключения транзисторов инвертора составляет 2 кГц в диапазоне изменения основной частоты от 0 до 60 Гц. При более высокой основной частоте происходит переход к ШИМ с меньшей частотой коммутации, что положительно сказывается на нагреве транзисторов.

Тормозной транзистор (чоппер) расположен параллельно инвертору, что обеспечивает возможность гашения на тормозной резистор динамических перенапряжений контактной сети, а также сброс энергии при электродинамическом торможении в случае отсутствия в контактной сети потребителей, которые должны принимать рекуперированную энергию.

3 ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

3.1 Анализ кинематической схемы механизма и определение её параметров. Составление математической модели механической части электропривода и определение её параметров

Кинематическая схема тележки вагона приведена на рисунке 3.1.

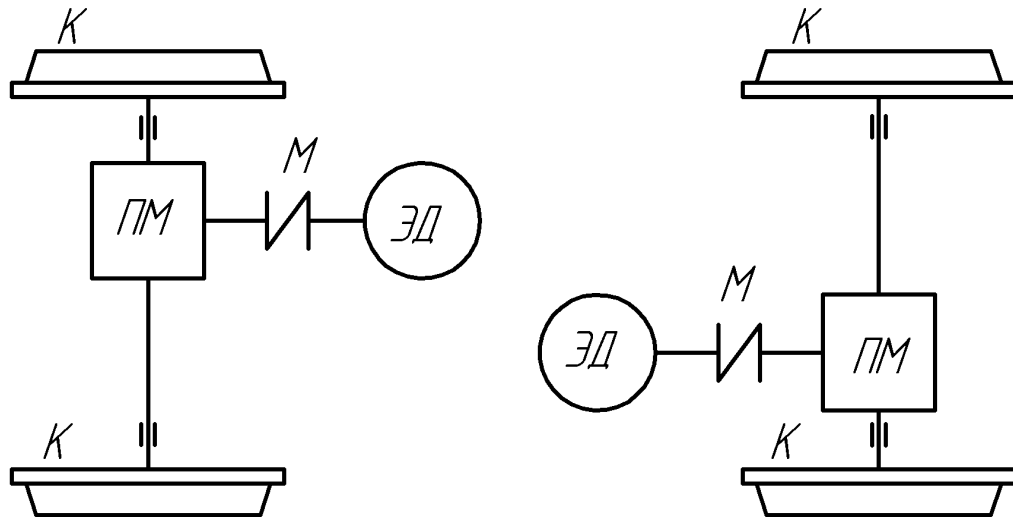


Рисунок 3.1 – Кинематическая схема тележки вагона

На рисунке 3.1 введены следующие обозначения:

ЭД – электродвигатель;

К – колесо, $d_k = 0,61$ м;

М – муфта;

ПМ – передаточный механизм (редуктор с передаточным числом $i = 6,24$ и коэффициентом полезного действия (КПД) $\eta = 0,97$).

Для анализа механической части электропривода используется переход от реальной кинематической схемы к одномассовой, если упругими деформациями можно пренебречь. В одномассовой системе электропривода не учитываются зазоры и все соединения принимаются абсолютно жесткими, и не учитывается проскальзывание колёс относительно рельс. Реальные силы, моменты и моменты инерции заменяются эквивалентными, приведенными к одинаковой скорости [9].

Целесообразно приводить силы и моменты к скорости двигателей, считая скорости одинаковыми. После приведения многомассовой системы мы

имеем одномассовую систему электропривода в которой не учитываются упругие связи.

Выразим суммарный приведенный момент инерции электропривода J_{Σ} пренебрегая моментом инерции муфты и самого двигателя:

$$J_{\Sigma} = \frac{m_{mp} \cdot g_{ном}^2}{\omega_{дв.ном}^2},$$

где m_{mp} - масса трамвая;

g_{mp} - скорость трамвая;

$\omega_{дв}$ - угловая скорость каждого электродвигателя.

3.2 Расчёт нагрузок, построение механической характеристики $M_{мех}=f(\omega)$ и нагрузочной диаграммы механизма $M_{мех}=f(t)$

Расчет произведем на основе типовой скоростной диаграммы трамвая, показанной на рисунке 3.2, построенной на основе анализа технологического процесса.

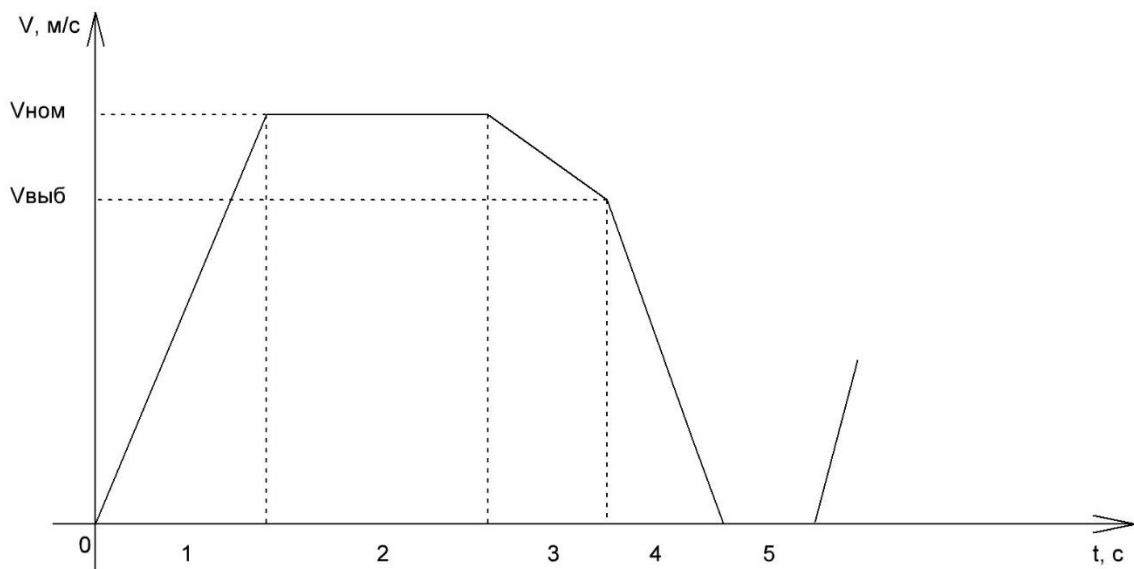


Рисунок 3.2 – Типовая скоростная диаграмма передвижения трамвая

Типовая скоростная диаграмма передвижения трамвая состоит из следующих этапов:

- 1) Разгон до номинальной скорости;
- 2) Движение на номинальной скорости с ослаблением поля;
- 3) Свободный выбег, за время которого принимаем, что скорость изменяется примерно на 10-20%;
- 4) Торможение до нуля;
- 5) Время стоянки на остановочном пункте

Чтобы отразить примерные нагрузки на электропривод за цикл отработки трамваем маршрута при максимальной загруженности, построим нагрузочную диаграмму, состоящую из двух участков: движение трамвая в гору с ограничением номинальной скорости до 25 км/ч и движение трамвая по ровной местности со скоростным ограничением в 60 км/ч. Для построения нагрузочной диаграммы и механической характеристики произведем расчёты, представленные ниже.

Вычислим номинальную скорость вращения двигателя и колеса для обоих участков, зная передаточное число $i_{mp} = 6,24$, КПД трансмиссии $\eta_{mp} = 0,97$ и радиус колеса $r_k = 0,305$ м :

$$g_{ном.1} = 25 [км / ч] = 6,9 м / с,$$

$$g_{ном.2} = 60 [км / ч] = 16,7 м / с,$$

$$\omega_{дв.1} = \frac{g_{ном.1} \cdot i_{mp}}{R_k} = \frac{6,9 \cdot 6,24}{0,305} = 141,2 \text{ рад} / с,$$

$$\omega_{дв.2} = \frac{g_{ном.2} \cdot i_{mp}}{R_k} = \frac{16,7 \cdot 6,24}{0,305} = 341,8 \text{ рад} / с,$$

$$\omega_{к.ном.1} = \frac{g_{ном.1}}{R_k} = \frac{6,9}{0,305} = 22,6 \text{ рад} / с,$$

$$\omega_{к.ном.2} = \frac{g_{ном.2}}{R_k} = \frac{16,7}{0,305} = 54,8 \text{ рад} / с.$$

По формуле (3.1) [10] уравнения тягового баланса трамвая найдем касательную силу тяги колес трамвая, которая является результирующей силой сопротивления передвижения:

$$F_k = F_f + F_v, \quad (3.1)$$

где F_k - касательная сила тяги колес:

$$F_k = \frac{M_{\text{дв}} \cdot i_{\text{мп}}}{r_k}, \quad (3.2)$$

F_f - сила сопротивления качению:

$$F_f = f_c \cdot m \cdot g, \quad (3.3)$$

f_c - усредненный коэффициент сопротивления качению, равный 0,01;

$F_{\text{в}}$ - сила сопротивления воздуху:

$$F_{\text{в}} = k_{\text{в}} \cdot A_{\text{лоб}} \cdot v^2, \quad (3.4)$$

$k_{\text{в}}$ - коэффициент обтекаемости, равный 0,3;

$A_{\text{лоб}}$ - площадь лобовой поверхности трамвая, равная $6,5 \text{ м}^2$;

v - суммарная скорость трамвая и ветра; пренебрегая скоростью ветра, принимаем как максимальную скорость движения $v_{\text{max}} = 75 [\text{км/ч}] = 20,8 \text{ м/с}$.

F_j - сила, затрачиваемая на разгон вращающихся масс трамвая, т.е. динамическая сила.

По [11] длину линии первого участка примем $L_1 = 400 \text{ м}$, уклон $\alpha = 40\% = 3,4^\circ$, второго участка $L_2 = 800 \text{ м}$.

Подставляя (3.3) и (3.4) в уравнение (3.1) рассчитаем силы сопротивления передвижению трамвая для участка с подъёмом:

$$\begin{aligned} F_{c1,\text{max}} &= f_c \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha + k_{\text{в}} \cdot A_{\text{лоб}} \cdot v_{\text{max}}^2 + m \cdot g \cdot \sin \alpha = \\ &= 0,01 \cdot 55480 \cdot 9,81 \cdot \cos 3,4^\circ + 0,3 \cdot 6,5 \cdot 20,8^2 + 55480 \cdot 9,81 \cdot \sin 3,4^\circ = 38554,67 \text{ Н} \end{aligned}$$

Для ровного участка:

$$F_{c2,\text{max}} = f_c \cdot m \cdot g + k_{\text{в}} \cdot A_{\text{лоб}} \cdot v_{\text{max}}^2 = 0,01 \cdot 55480 \cdot 9,81 + 0,3 \cdot 6,5 \cdot 20,8^2 = 6286,24 \text{ Н}$$

Далее определим моменты сопротивления передвижению, выразив момент из формулы (3.2) для двух участков:

$$M_{c1,\text{max}} = \frac{F_{c1,\text{max}} \cdot r_k}{\eta_{\text{мп}}} = \frac{38554,67 \cdot 0,305}{0,97} = 12122,86 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{c2,\min} = \frac{F_{c2,\min} \cdot r_k}{\eta_{mp}} = \frac{6286,24 \cdot 0,305}{0,97} = 1976,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Рассчитаем время движения и расстояние, пройденное трамваем на каждом из участков. Весь цикл передвижения разделен на два участка. В конце каждого участка трамвай совершает остановку на 20 секунд, после чего продолжает движение по заданному маршруту.

Движение в гору:

1) Разгон до номинальной скорости:

$$t_1 = \frac{g_{ном.1}}{a} = \frac{6,9}{1,24} = 5,56 \text{ с},$$

$$S_1 = \frac{g_{ном.1} \cdot t_1}{2} = \frac{6,9 \cdot 5,56}{2} = 19,2 \text{ м},$$

2) Свободный выбег:

$$a_{выб.1} = \frac{F_{c1,\max}}{\eta_m \cdot m} = \frac{38554,67}{0,97 \cdot 55480} = 0,72 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Время выбега находим по следующей формуле, при этом скорость падает на 40%:

$$t_3 = t_{выб.1} = \frac{0,4 \cdot g_{ном.1}}{a_{выб.1}} = \frac{0,4 \cdot 6,9}{0,72} = 3,85 \text{ с}.$$

Путь, пройденный трамваем при выбеге в гору:

$$S_3 = g_{ном.1} \cdot t_{выб.1} - \frac{a_{выб.1} \cdot t_{выб.1}^2}{2} = 6,9 \cdot 3,85 - \frac{0,72 \cdot 3,85^2}{2} = 21,27 \text{ м}.$$

3) Торможение до нулевой скорости:

$$t_4 = \frac{0,6 \cdot g_{ном.1}}{a} = \frac{0,6 \cdot 6,9}{1,24} = 3,34 \text{ с},$$

$$S_4 = \frac{0,6 \cdot g_{ном.1} \cdot t_4}{2} = \frac{0,6 \cdot 6,9 \cdot 3,34}{2} = 6,91 \text{ м}.$$

4) Движение на номинальной скорости

$$S_2 = L_1 - S_1 - S_3 - S_4 = 400 - 19,2 - 21,27 - 6,91 = 352,63 \text{ м},$$

$$t_2 = \frac{S_2}{g_{ном.1}} = \frac{352,63}{6,9} = 51,11 \text{ с},$$

5) Разгон до номинальной скорости:

$$t_5 = \frac{g_{ном.2}}{a} = \frac{16,7}{1,24} = 13,47 \text{ с},$$

$$S_5 = \frac{g_{ном.2} \cdot t_1}{2} = \frac{16,7 \cdot 13,47}{2} = 112,46 \text{ м},$$

6) Свободный выбег:

$$a_{выб.2} = \frac{F_{c2,max}}{\eta_m \cdot m} = \frac{6286,24}{0,97 \cdot 55480} = 0,12 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Время выбега находим по следующей формуле, при этом скорость падает на 20%:

$$t_7 = t_{выб.2} = \frac{0,2 \cdot g_{ном.2}}{a_{выб.2}} = \frac{0,2 \cdot 16,7}{0,12} = 28,59 \text{ с}.$$

Путь, пройденный трамваем при выбеге:

$$S_7 = g_{ном.2} \cdot t_{выб.2} - \frac{a_{выб.2} \cdot t_{выб.2}^2}{2} = 16,7 \cdot 28,59 - \frac{0,12 \cdot 28,59^2}{2} = 429,76 \text{ м}.$$

7) Торможение до нулевой скорости:

$$t_8 = \frac{0,8 \cdot g_{ном.2}}{a} = \frac{0,8 \cdot 16,7}{1,24} = 10,77 \text{ с},$$

$$S_8 = \frac{0,8 \cdot g_{ном.2} \cdot t_4}{2} = \frac{0,8 \cdot 16,7 \cdot 10,77}{2} = 71,97 \text{ м}.$$

Движение по ровному участку:

8) Движение на номинальной скорости

$$S_6 = L_2 - S_5 - S_7 - S_8 = 800 - 112,46 - 429,76 - 71,97 = 185,82 \text{ м},$$

$$t_6 = \frac{S_6}{g_{ном.2}} = \frac{185,82}{16,7} = 11,13 \text{ с}$$

Рассчитаем полное время цикла:

$$t_u = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + 2 \cdot t_{ост} = 5,56 + 51,11 + 3,34 + 6,91 + \\ + 20 + 13,48 + 11,13 + 28,59 + 10,77 + 2 \cdot 20 = 167,82 \text{ с}.$$

Определим момент инерции механизма:

$$J_{мех} = \frac{m \cdot g_{ном.2}^2}{\omega_{к.ном.2}^2} = \frac{55480 \cdot 16,7^2}{54,75^2} = 5161,03 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Угловое ускорение колеса:

$$\varepsilon_k = \frac{\omega_{к.ном.2}}{t_{пуск.2}} = \frac{54,75}{13,47} = 4,07 \text{ рад} / \text{с}^2.$$

Динамический момент определяется следующим образом:

$$M_{дин.м} = J_{мех} \cdot \varepsilon_k = 5161,03 \cdot 4,07 = 20982,54 \text{ Нм}.$$

Рассчитаем моменты на всех интервал нагрузочных диаграмм.

При движении в гору:

$$M_1 = M_{с.мах} + M_{дин.м} = 12122,86 + 20982,54 = 33105,4 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_2 = M_{с.мах} = 12122,86 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_3 = 0 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_4 = M_{с.мах} - M_{дин.м} = 12122,86 - 20982,54 = -8859,68 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При движении на ровном участке:

$$M_5 = M_{с.мах} + M_{дин.м} = 1976,6 + 20982,54 = 22959,14 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_6 = M_{с.мах} = 1976,6 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_7 = 0 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_8 = M_{с.мах} - M_{дин.м} = 1976,6 - 20982,54 = -19005,94 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Для построения механической характеристики $M_{мех} = f(\omega)$ во всём диапазоне скоростей воспользуемся следующей формулой, которая учитывает зависимость момент сопротивления движению трамвая от крутизны уклона и сопротивления воздуха:

$$M_{с,мах} = \frac{F_c \cdot r_k}{\eta_{мп}} = \frac{(f_c \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha + k_v A_{лоб} v^2 + m \cdot g \cdot \sin \alpha) \cdot r_k}{\eta_{мп}}.$$

Выразим данную формулу через угловую скорость колеса:

$$M_{с,мах} = \frac{(f_c \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha + k_v A_{лоб} (\omega_k \cdot r_k)^2 + m \cdot g \cdot \sin \alpha) \cdot r_k}{\eta_{мп}}.$$

Механическая характеристика механизма представлена на рисунке 3.3:

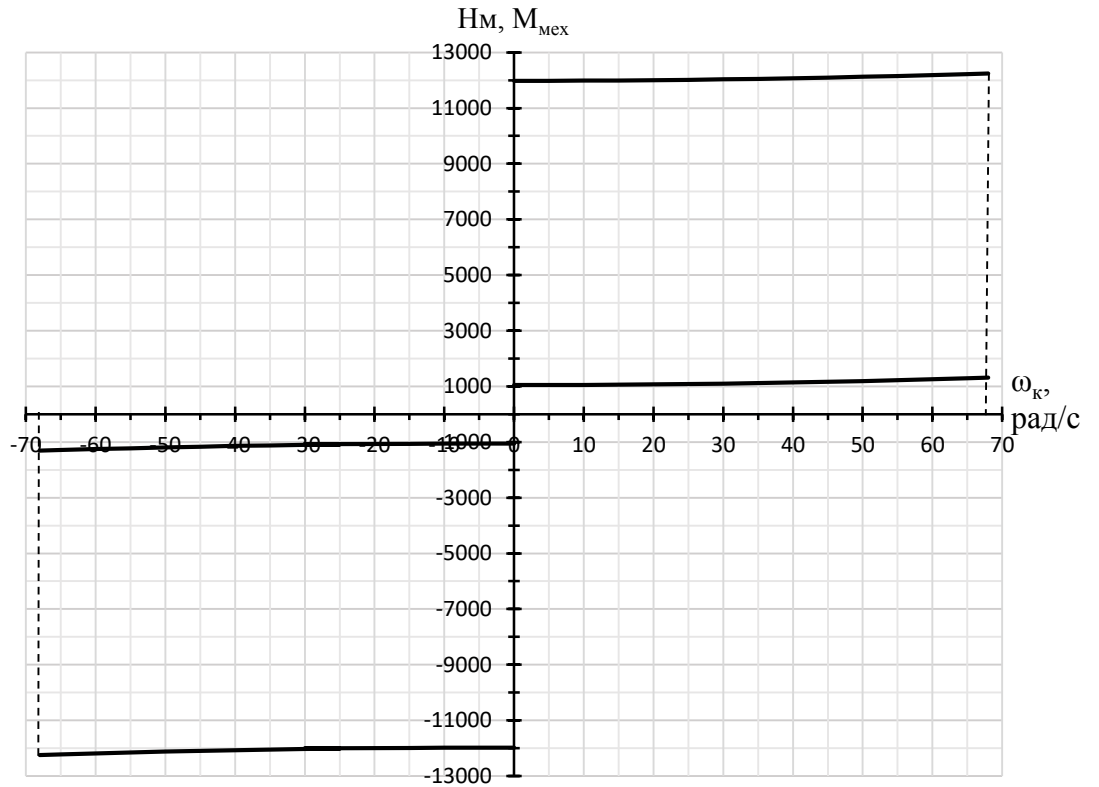


Рисунок 3.3 – Механические характеристики механизма $M_{\text{мех}}=f(\omega)$

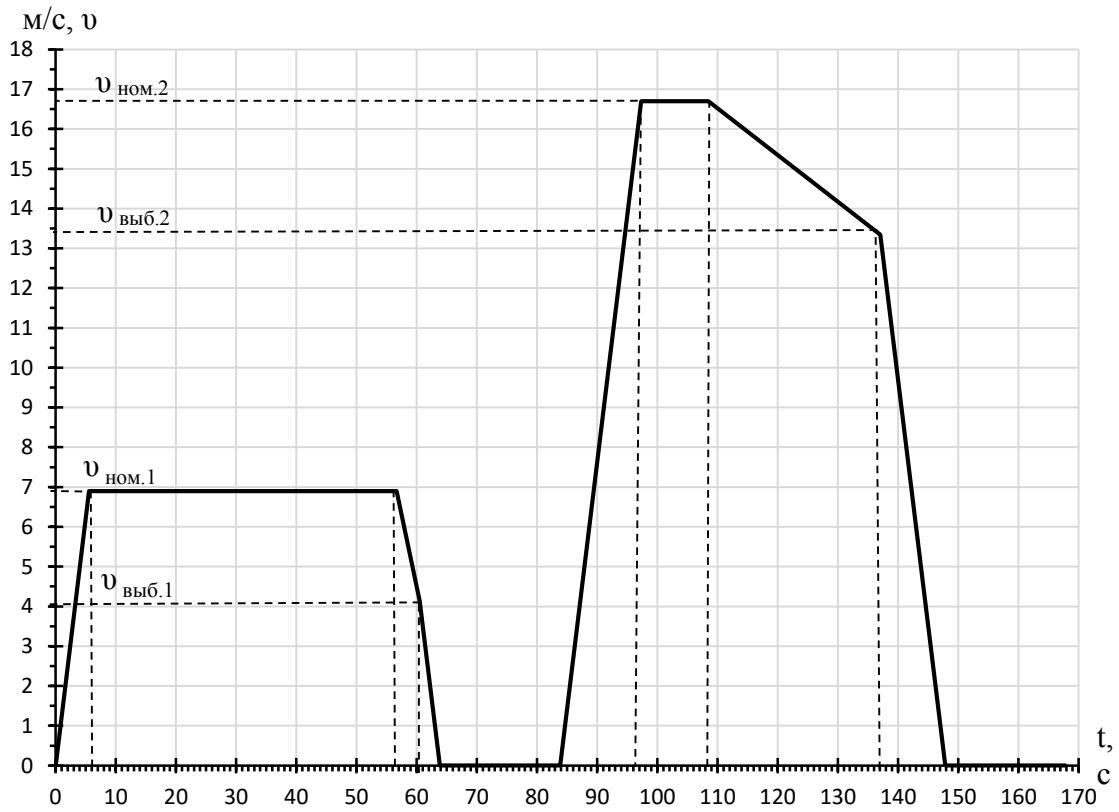


Рисунок 3.4 – Скоростная диаграмма механизма за цикл работы

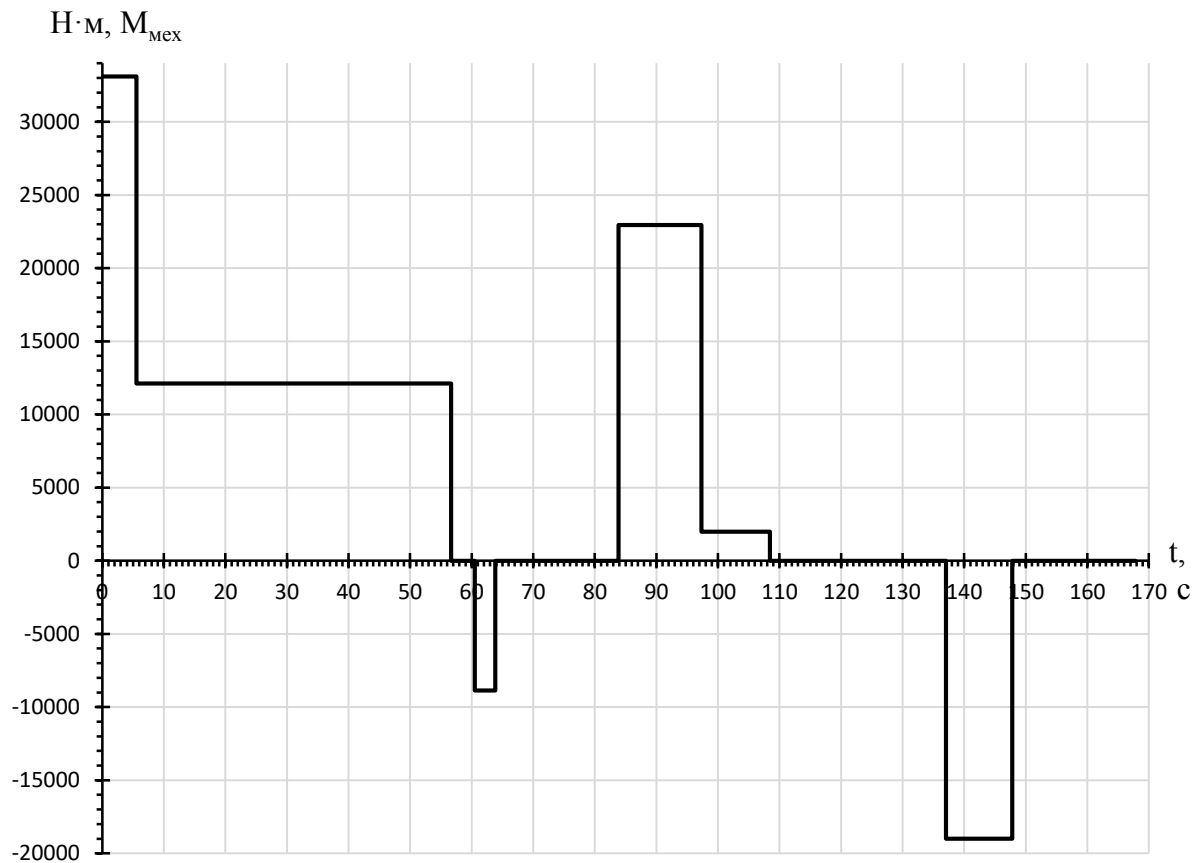


Рисунок 3.5 – Нагрузочная диаграмма механизма $M_{\text{мех}}=f(t)$

3.3 Предварительный выбор двигателя по мощности

При выборе двигателей руководствуются условиям требуемой мощности, момента и скорости. Произведем выбор двигателя по мощности методом эквивалентного момента.

Определим момент сопротивления передвижению трамвая, приведенный к валу ЭД:

$$M_{c.нр} = \frac{F_{c.max} \cdot R_{\kappa}}{i_{np}} = \frac{F_{c.max} \cdot \varrho_{ном}}{\omega_{о\epsilon}}, \quad (3.4)$$

$$M_{c1.нр} = \frac{38554,67 \cdot 0,305}{6,24} = 1884,48 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{c2.нр} = \frac{6286,24 \cdot 0,305}{6,24} = 307,26 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Теперь рассчитаем и построим моменты ЭД при разгоне, равномерном движении на номинальной скорости, свободном выбеге и торможении трамвая.

Определим момент инерции тихоходного вала:

$$J_{тв} = \frac{m_{\max} \cdot g^2}{\omega_{\text{дв}}^2} = \frac{55480 \cdot 6,9^2}{141,17^2} = 132,55 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Определим момент инерции быстроходного вала. Момент инерции со стороны быстроходного вала предварительно оценим как 5% от момента инерции $J_{тв}$:

$$J_{\text{бв}} = 0,05 \cdot J_{тв} = 6,63 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Определим угловое ускорение электродвигателя:

$$\varepsilon_{\text{дв}} = \frac{\omega_{\text{дв.ном}}}{t_{\text{пуск}}} = \frac{141,17}{5,56} = 25,37 \text{ рад} / \text{с}^2.$$

Определим динамический момент, развиваемый электродвигателем, при разгоне и торможении:

$$M_{\text{дин}} = (J_{тв} + J_{\text{бв}}) \cdot \varepsilon_{\text{дв}} = (132,55 + 6,63) \cdot 25,37 = 3530,72 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Определим электромагнитный момент ЭД, развиваемый на каждом участке движения по формулам, представленным ниже:

$$M = -M_{\text{техн}} - \Delta M_{\text{кц}} + M_{\text{дин}},$$

где $\Delta M_{\text{кц}}$ – момент потерь кинематической цепи, определяемый по формуле:

$$|\Delta M_{\text{кц}}| = a \cdot |M_{\text{кц}}| + b \cdot |M_{\text{кц.норм}}|,$$

где a и b – коэффициенты, характеризующие переменные и постоянные потери соответственно,

$M_{\text{кц}}$ – момент кинематической цепи,

$M_{\text{кц.норм}}$ – момент кинематической цепи нормативный.

Определим коэффициенты a и b по следующим формулам:

$$a = \frac{(1 - \eta)\gamma}{\eta(1 + \gamma)},$$

$$b = \frac{1-\eta}{\eta(1+\gamma)},$$

где γ – коэффициент качества редуктора, равный 2,

η – паспортное значение КПД механизма, равное 0,97.

$$a = \frac{(1-0,97) \cdot 2}{0,97 \cdot (1+2)} = 0,02,$$

$$b = \frac{1-0,97}{0,97(1+2)} = 0,01.$$

Рассчитаем электромагнитный момент ЭД, развиваемый на участке движения в гору:

1) Разгон до номинальной скорости:

$$M_{кц1} = M_{кц.норм} = M_{с1.нр} + J_{\Sigma} \cdot \varepsilon = 1884,48 + 139,18 \cdot 25,37 = 5247,07 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$\Delta M_{кц1} = 0,02 \cdot 5247,07 + 0,01 \cdot 5247,07 = 162,28 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_1 = 1884,48 + 162,28 + 3530,72 = 5577,48 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2) Движение на номинальной скорости:

$$M_{кц2} = M_{с1.нр} = 1884,48 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$\Delta M_{кц2} = 0,02 \cdot 1884,48 + 0,01 \cdot 1884,48 = 58,28 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_2 = 1884,48 + 58,28 = 1942,77 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3) Выбег:

$$M_3 = 0.$$

4) Торможение до нулевой скорости:

$$M_{кц4} = 1884,48 - 139,18 \cdot 25,37 = -1478,1 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$\Delta M_{кц4} = 0,02 \cdot 1478,1 + 0,01 \cdot 1478,1 = 45,71 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_4 = 1884,48 + 45,71 - 3530,72 = -1600,52 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

На ровном участке:

5) Разгон до номинальной скорости:

$$M_{кц5} = M_{кц.норм} = M_{с2.нр} + J_{\Sigma} \cdot \varepsilon = 307,26 + 139,18 \cdot 25,37 = 3669,85 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$\Delta M_{кц5} = 0,02 \cdot 3669,85 + 0,01 \cdot 3669,85 = 113,5 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_5 = 307,26 + 113,5 + 3530,72 = 3951,48 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

б) Движение на номинальной скорости:

$$M_{кц6} = M_{с2.нр} = 307,26 \text{ Н} \cdot \text{м} ,$$

$$\Delta M_{кц6} = 0,02 \cdot 307,26 + 0,01 \cdot 307,26 = 9,5 \text{ Н} \cdot \text{м} ,$$

$$M_6 = 307,26 + 9,5 = 316,76 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

7) Выбег:

$$M_7 = 0 .$$

8) Торможение до нулевой скорости:

$$M_{кц8} = 307,26 - 139,18 \cdot 25,37 = -3055,33 \text{ Н} \cdot \text{м} ,$$

$$\Delta M_{кц8} = 0,02 \cdot 3055,33 + 0,01 \cdot 3055,33 = 94,49 \text{ Н} \cdot \text{м} ,$$

$$M_8 = 307,26 + 94,49 - 3530,72 = -3128,96 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

Найдем продолжительность включений:

$$ПВ = \frac{t_{раб}}{t_{цикла}} \cdot 100 = \frac{t_{цикла} - 2t_{ост} - t_{выб.1} - t_{выб.2}}{t_{цикла}} \cdot 100 = \frac{95,38}{167,82} \cdot 100 = 56,8\% .$$

Определим эквивалентный момент двигателя за время работы:

$$M_э(ПВ) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 M_i^2 \cdot t_i}{t_p}} ,$$

$$M_э(ПВ) = \sqrt{\frac{5577,48^2 \cdot 5,56 + 1942,77^2 \cdot 51,11 + (-1600,52)^2 \cdot 3,34}{95,38} + \frac{3951,48^2 \cdot 13,47 + 316,76^2 \cdot 11,13 + (-3128,96)^2 \cdot 10,77}{95,38}} = 2692,48 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

$M_э(ПВ)$ пересчитываем на стандартное значение $ПВ_{ст}=100\%$:

$$M_э(ПВ_{ст}) = M_э(ПВ) \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ст}}} = 2692,48 \cdot \sqrt{\frac{56,8\%}{100\%}} = 2029,78 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

Расчетная суммарная мощность двигателей:

$$P_{эд.расч\Sigma} = 1,05 \cdot M_э(ПВ_{ст}) \cdot \omega_{дв} = 1,05 \cdot 2029,78 \cdot 185,35 = 395,04 \text{ кВт} .$$

Учитывая, что на вагон приходится четыре двигателя, определим мощность одного:

$$P_{эд.расч} = \frac{P_{эд.расч\Sigma}}{4} = 98,76 \text{ кВт} .$$

3.4 Выбор номинальной скорости и типоразмера двигателя.

Построение характеристики $M_{\text{доп}}=f(\omega)$, где $\omega_{\text{мин}} \leq \omega \leq \omega_{\text{макс}}$

Двигатели, которые могут быть использованы в качестве тяговых, должны удовлетворять как минимум двум требованиям. Прежде всего они должны допускать возможность регулирования в широких пределах частоты вращения. Это позволяет изменять скорость движения трамвая. Кроме того, необходимо иметь возможность регулировать в широком диапазоне силу тяги, т. е. вращающий момент, развиваемый двигателем. Двигатели трамвая должны обеспечивать значительную силу тяги при трогании вагона с места, его разгоне, преодолении крутых подъемов и т. п.

По условиям мощности $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{эд.рас}}$ и скорости выбираю двигатель ТМР35-30-4, со следующими техническими характеристиками, приведенными в таблице 3.1 [12].

Таблица 3.1 – Технические характеристики электродвигателя ТМР35-30-4:

Параметр двигателя		Величина	Единица измерения
Номинальная мощность	$P_{\text{ном}}$	105	кВт
Номинальное напряжение	$U_{\text{ном}}$	430	В
Номинальная частота напряжения	f	60	Гц
Номинальный ток	$I_{\text{ном}}$	180	А
Частота вращения номинальная	$n_{\text{ном}}$	1770	об/мин
Частота вращения максимальная	$n_{\text{мах}}$	4472	об/мин
Номинальный коэффициент мощности	$\cos\varphi_{\text{ном}}$	0,84	-
Номинальный крутящий момент	$M_{\text{н}}$	565	Н·м
Максимальный крутящий момент	$M_{\text{мах}}$	2063	Н·м
КПД	$\eta_{\text{ном}}$	0,92	-
Номинальное скольжение	S	1,65	%

Построение характеристики $M_{\text{доп}} = f(\omega)$, где $\omega_{\text{мин}} \leq \omega \leq \omega_{\text{макс}}$ предполагает, что при регулировании скорости асинхронного двигателя вниз

от основной ухудшаются условия охлаждения и возникает необходимость определения допустимой нагрузки двигателя. Уменьшение скорости вала АД непосредственно влияет на теплоотдачу и, следовательно, на допустимый момент нагрузки. Зависимость имеет следующее выражение:

$$M_{доп} = M_{ном} \cdot \beta_{ок} ,$$

где $\beta_{ок}$ - коэффициент ухудшения теплоотдачи АД при отклонении скорости от номинальной определяемый по формуле:

$$\beta_{ок} = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \sqrt{v} ,$$

где $\beta_0 = 0,45$ - коэффициент ухудшения охлаждения при неподвижном роторе АД;

$v = \omega / \omega_{ном}$ - относительная угловая скорость вращения электродвигателя.

Номинальная угловая скорость двигателя $\omega_{ном}$, рад/с:

$$\omega_{ном} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{ном}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1770}{60} = 185,3 \text{ рад/с} ,$$

$$\omega_{макс} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{макс}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 4472}{60} = 468,1 \text{ рад/с} .$$

Зависимость $M_{доп} = f(\omega)$, где $\omega_{мин} \leq \omega \leq \omega_{макс}$ представлена на рисунке 3.6.

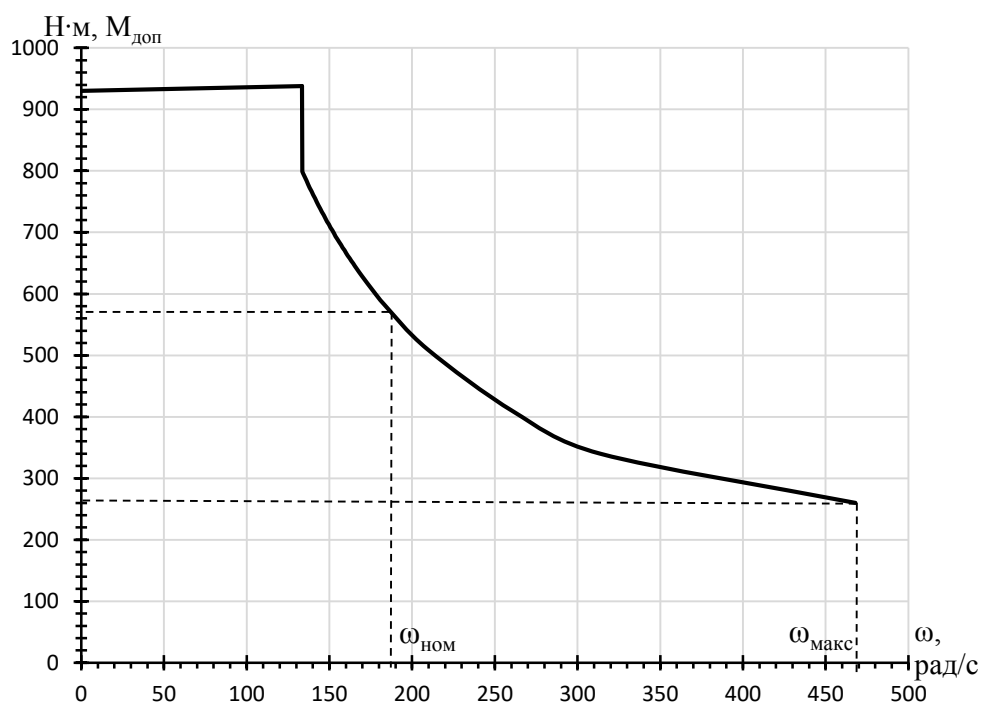


Рисунок 3.6 – Зависимость $M_{\text{дон}} = f(\omega)$

3.5 Построение нагрузочной диаграммы электропривода $M=f(t)$ за цикл работы

В пункте 3.3 был рассчитан электромагнитный момент электродвигателя, развиваемый на каждом участке движения скоростной диаграммы трамвая, а в пункте 3.2 рассчитано время передвижения на каждом участке. Поэтому можем построить нагрузочную диаграмму электропривода за цикл работы.

Рассчитанные скоростная и нагрузочная диаграммы механизма передвижения трамвая показаны на рисунках 3.7, 3.8:

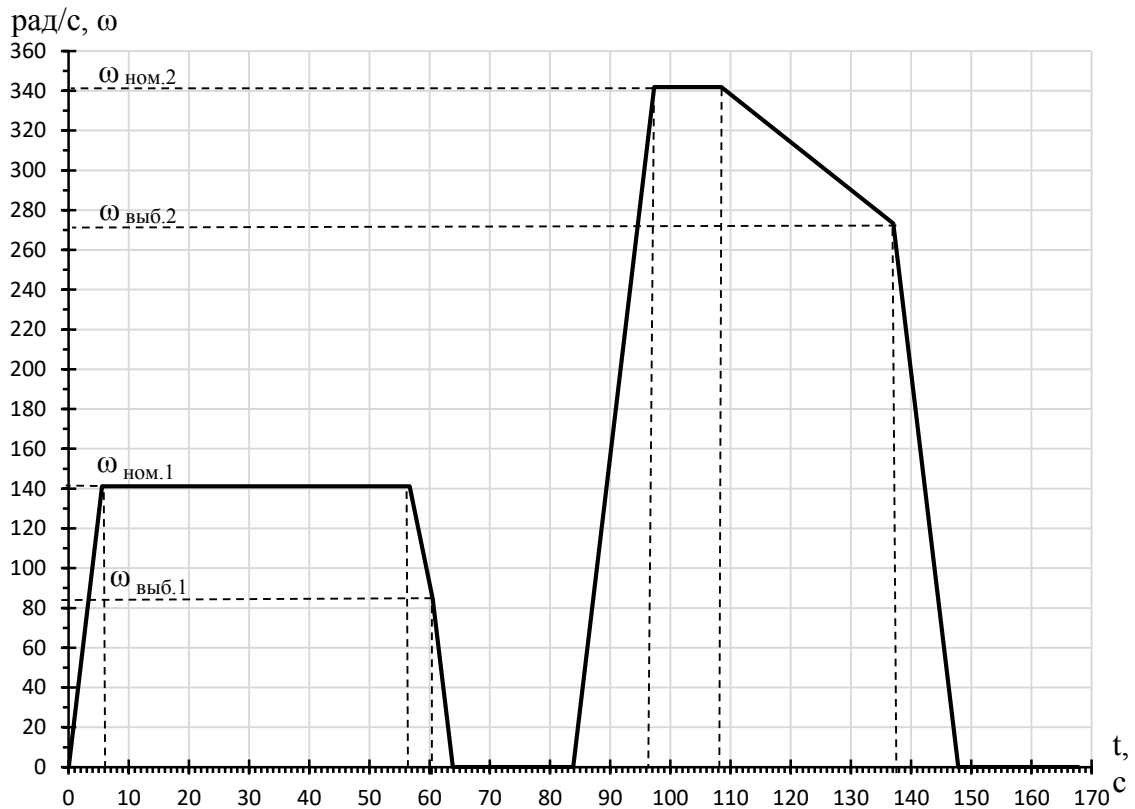


Рисунок 3.7 – Скоростная диаграмма электропривода за цикл работы

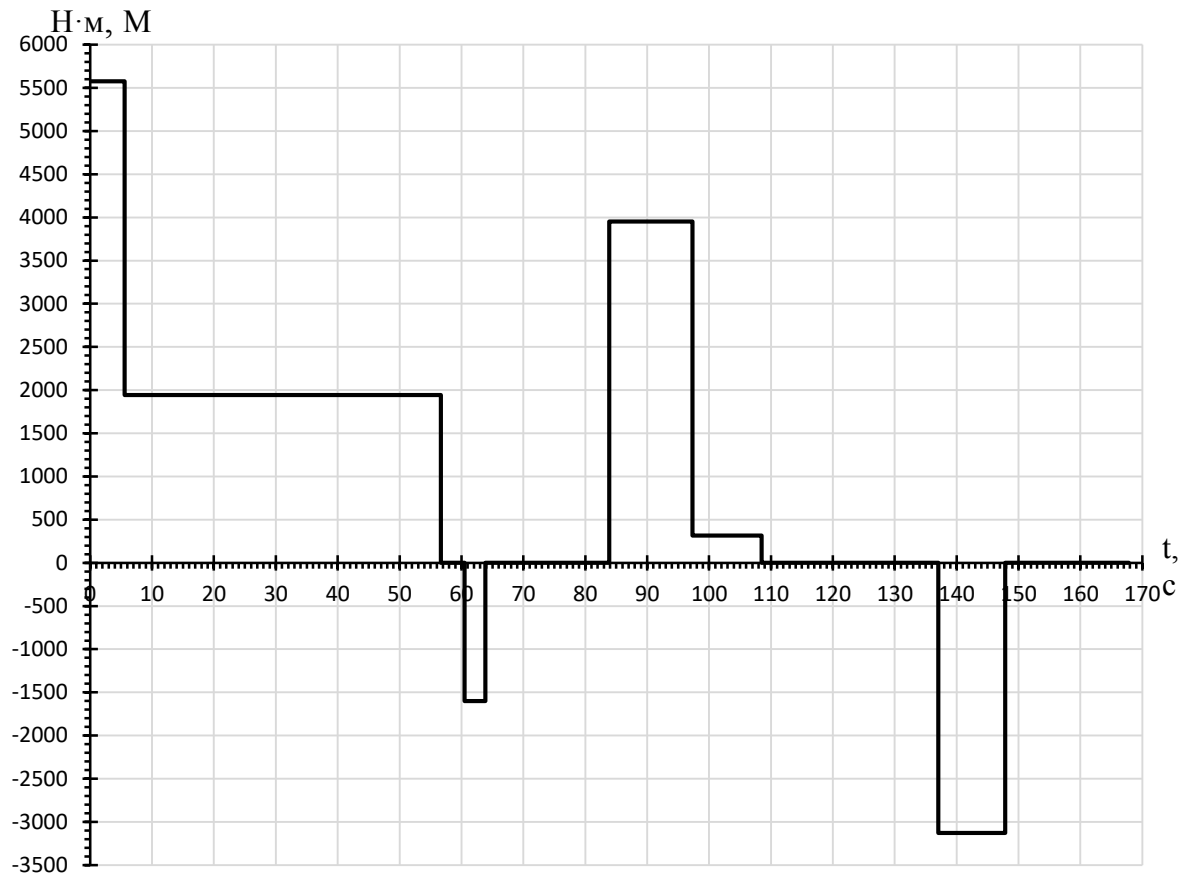


Рисунок 3.8 – Нагрузочная диаграмма электропривода за цикл работы

3.6 Предварительная проверка выбранного электродвигателя по нагреву и перегрузочной способности

Построенная нагрузочная диаграмма электропривода позволяет провести предварительную проверку двигателя по нагреву, учитывая режим работы привода, исходя из технологического процесса. При работе электродвигателя с примерно постоянным магнитным потоком среднеквадратичный (эквивалентный) момент двигателя $M_{\text{э}}$ отражает его среднюю температуру нагрева. А в режимах с ослаблением поля условия охлаждения будут улучшаться из-за увеличения частоты вращения ротора. Поэтому для повторно – кратковременного режима работы эквивалентный момент $M_{\text{э}}$ рассчитывается только для включенного (рабочего) состояния двигателя с учетом условий охлаждения:

$$M_{\text{эв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 M_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^6 \beta_{\text{ox},i} \cdot t_i}} = M_{\text{э}}(\text{ПВ}), \quad (3.5)$$

где M_i – электромагнитный момент двигателя на i -ом участке упрощенной нагрузочной диаграммы электропривода, $H \cdot м$;

t_i – временной интервал i -го участка, с;

$\beta_{\text{ox},i}$ – коэффициент охлаждения двигателя на i -ом участке, рассчитываемый по формуле:

$$\beta_{\text{ox},i} = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \sqrt{\frac{\omega_i}{\omega_{\text{ном}}}}, \quad (3.6)$$

где ω_i – средняя угловая скорость на i -ом участке;

β_0 – коэффициент ухудшения охлаждения при неподвижном роторе двигателя;

$\beta_0 = 0,45-0,55$ – для закрытых (обдуваемых) самовентилируемых двигателей, примем $\beta_0 = 0,45$.

Рассчитаем $\beta_{\text{ox},i}$ и ω_i на каждом участке диаграммы:

1) Разгон до номинальной скорости:

$$\omega_1 = \frac{0 + \omega_{\text{ном.1}}}{2} = \frac{0 + 141,17}{2} = 70,58 \text{ рад/с},$$

$$\beta_{\text{ox},1} = 0,45 + (1 - 0,45) \cdot \sqrt{\frac{70,58}{185}} = 0,79.$$

2) Движение на номинальной скорости:

$$\omega_2 = 141,17 \text{ рад/с},$$

$$\beta_{\text{ox},2} = 0,45 + (1 - 0,45) \cdot \sqrt{\frac{141,17}{185}} = 0,93.$$

3) Торможение до нулевой скорости:

$$\omega_{\text{выб.1}} = 0,6 \cdot \omega_{\text{ном.1}} = 84,7 \text{ рад/с},$$

$$\omega_3 = \frac{\omega_{\text{выб.1}} + 0}{2} = \frac{84,7 + 0}{2} = 42,4 \text{ рад/с},$$

$$\beta_{ox,3} = 0,45 + (1 - 0,45) \cdot \sqrt{\frac{42,4}{185}} = 0,71.$$

4) Разгон до номинальной скорости:

$$\omega_4 = \frac{0 + \omega_{ном.2}}{2} = \frac{0 + 341,7}{2} = 170,8 \text{ рад/с},$$

$$\beta_{ox,4} = 0,45 + (1 - 0,45) \cdot \sqrt{\frac{170,8}{185}} = 0,98.$$

5) Движение на номинальной скорости:

$$\omega_5 = 341,7 \text{ рад/с},$$

$$\beta_{ox,5} = 0,45 + (1 - 0,45) \cdot \sqrt{\frac{341,7}{185}} = 1,2.$$

б) Торможение до нулевой скорости:

$$\omega_{выб.2} = 0,8 \cdot \omega_{ном.2} = 273,3 \text{ рад/с},$$

$$\omega_6 = \frac{\omega_{выб.2} + 0}{2} = \frac{273,3 + 0}{2} = 136,7 \text{ рад/с},$$

$$\beta_{ox,6} = 0,45 + (1 - 0,45) \cdot \sqrt{\frac{136,7}{185}} = 0,92.$$

$$M_3(ПВ) = \sqrt{\frac{5577,48^2 \cdot 5,56 + 1942,77^2 \cdot 51,11 + (-1600,52)^2 \cdot 3,34}{0,79 \cdot 5,56 + 0,93 \cdot 51,11 + 0,71 \cdot 3,34} + \frac{3951,48^2 \cdot 13,47 + 316,76^2 \cdot 11,13 + (-3128,96)^2 \cdot 10,77}{0,98 \cdot 13,47 + 1,2 \cdot 11,13 + 0,92 \cdot 10,77}} = 2755,98 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$M_3(ПВ)$ пересчитываем на стандартное значение $ПВ_{ст}=100\%$:

$$M_3(ПВ_{ст}) = M_3(ПВ) \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ст}}},$$

$$M_3(ПВ_{ст}) = 2755,98 \cdot \sqrt{\frac{56,8\%}{100\%}} = 2077,6 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

что в пересчёте на один двигатель:

$$M_3(ПВ_{ст}) = \frac{2077,6}{4} = 519,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Предварительно выбранный электродвигатель будет удовлетворять условиям нагрева, если:

$$M_3(ПВ_{ст}) \leq M_{ном}(ПВ_{ст}), \quad (3.7)$$

$$M_э(ПВ_{ст}) = 519,4 \text{ Н}\cdot\text{м} < M_{ном}(ПВ_{ст}) = 565 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Очевидно, что условие (3.7) соблюдается, следовательно, выбранный двигатель соответствует условиям по нагреву.

Условием проверки двигателя по перегрузочной способности является следующее условие:

$$M_{\text{макс,расч}} \leq M_{\text{макс,доп}} \quad (3.8)$$

где $M_{\text{макс,расч}}$ и $M_{\text{макс,доп}}$ – расчётное и каталожное значение максимального момента, $\text{Н}\cdot\text{м}$:

$$M_{\text{макс,расч}} = \frac{M_1}{4} = 1394,37 \text{ Н}\cdot\text{м} < M_{\text{макс,доп}} = 2063 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Соблюдение условия (3.8) указывает на то, что электродвигатель будет удовлетворять условиям перегрузки.

4 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

4.1 Определение возможных вариантов и обоснование выбора вида преобразователя электрической энергии

Техническое устройство, преобразующее переменное напряжение одной частоты на входе, в изменяющееся по определенному закону переменное напряжение с другой частотой на выходе называется преобразователем частоты (ПЧ). ПЧ бывают двух типов: непосредственные и двухзвенные.

В непосредственных преобразователях частоты (НПЧ) выходное напряжение формируется из участков синусоид напряжения сети питания, при этом двигатель в процессе работы преобразователя через открытые ключи в каждый момент времени оказывается подсоединенным непосредственно к источнику питания. Главное их достоинство в том, что они подключаются напрямую в сеть без дополнительных устройств. Применение НПЧ совместно с двигателем переменного тока невозможно, т.к. трамвай получает питание от сети постоянного тока.

Двухзвенные преобразователи частоты представляют собой транзисторный или тиристорный преобразователь. Но главное их отличие от НПЧ в том, что для корректной и безопасной работы инвертора необходимо звено постоянного напряжения. Соответственно в трамвае роль такого звена выполняет контактная сеть постоянного тока. Как правило изготавливаются комплектами (инвертор и дроссель поставляются вместе и работают от одной системы управления).

Наиболее распространены преобразователи частоты на базе автономных инверторов тока (АИТ) и автономных инверторов напряжения (АИН) на IGBT транзисторах, в силу лучших показателей качества энергии на выходе преобразователя и их влияния на сеть. Чем выше частота коммутации,

тем лучше качество синусоиды на выходе преобразователя, но также возрастают потери [13].

Тяговый преобразователь отличается от общепромышленного главным образом особенностями питающей сети. Тяговый преобразователь должен выдерживать большие перегрузки по току и иметь возможность возвращать часть энергии торможения в сеть.

4.2 Расчёт электрических переменных и выбор типоразмера преобразователя электрической энергии

Выбор преобразователя для регулируемого электропривода выполняется исходя из имеющейся питающей электрической сети, номинальных данных выбранного электродвигателя и максимальных значений момента и тока.

При выборе преобразователя частоты следует соблюдать следующие условия:

$$\begin{aligned} P_{ном,пр} &\geq P_{ном}; \\ U_{вых,мах,пр} &\geq U_{ном}; \\ I_{ном,пр} &\geq I_{ном}; \\ I_{мах,пр} &\geq I_{мах}, \end{aligned}$$

где $P_{ном}$, $U_{ном}$, $I_{ном}$ - номинальная мощность, напряжение и ток асинхронного двигателя;

$I_{мах}$ - максимальный ток электродвигателя в нагрузочной диаграмме электропривода;

$P_{ном,пр}$, $I_{ном,пр}$ - номинальная мощность и номинальный ток преобразователя;

$U_{вых,мах,пр}$ - максимальное выходное напряжение преобразователя;

$I_{мах,пр}$ - максимальный ток преобразователя.

Перегрузочная способность двигателя по моменту (и по току):

$$\lambda_m = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} = \frac{2063}{565} = 3,65.$$

Максимальный ток электродвигателя:

$$I_{\max} = \lambda_m \cdot I_{\text{ном}} = 3,65 \cdot 180 = 657 \text{ A}.$$

По соотношениям:

$$P_{\text{ном,пр}} \geq 105 \text{ кВт};$$

$$U_{\text{вых,мах,пр}} \geq 430 \text{ В};$$

$$I_{\text{ном,пр}} \geq 180 \text{ А};$$

$$I_{\text{мах,пр}} \geq 657 \text{ А},$$

выбираем преобразователь частоты типа BORDLINE CC800 производства компании ABB, с параметрами, приведенными в таблице 4.1 [14].

Таблица 4.1 – Параметры преобразователя частоты BORDLINE CC800

Параметр	Характеристика
Входное напряжение	600/750В DC
Выходная мощность	2 x 150 кВт
Выходное напряжение	0...500В AC
Номинальный выходной ток	220 А
Максимальный выходной ток	720 А (60 с)
Диапазон частот	0...180 Гц
Степень защиты	IP65
Охлаждение	Воздушное принудительное

4.3 Расчёт параметров и выбор электрических аппаратов силовой цепи: входного и выходного фильтров, тормозного резистора

Преобразователь ABB серии BORDLINE CC800 DC представляет собой компактные блоки, выполненные по технологии IGBT и разработан для применения на рельсовом транспорте.

Силовое и управляющее электронное оборудование преобразователя выполнено по стандарту IP65. Рассеяние тепла осуществляется продувкой

наружного воздуха через радиаторы. Встроенный вентилятор предназначен для циркуляции воздуха и охлаждения внутренней части преобразователя.

Система силовой электроники постоянного тока BORDLINE CC800 предназначена для установки на крыше вагона. Система служит для преобразования входного постоянного напряжения в переменное для тяговых электродвигателей. Кроме того, вспомогательные преобразователи снабжают энергией пульт управления, систему кондиционирования салона и обеспечивают зарядку аккумуляторной батареи.

Преобразователь частоты BORDLINE CC800 поставляется в укомплектованном виде, имеет модульную структуру и содержит следующие аппараты:

- 2 независимых силовых преобразователя;
- главный выключатель;
- сетевой фильтр;
- 2 тормозных прерывателя;
- вспомогательный преобразователь;
- аккумуляторная батарея +48/24В;
- зарядное устройство и устройство управления.

На крыше крайних секций трамвая модели 853 установлены два совершенно идентичных блока преобразователей BORDLINE CC800. Один преобразователь имеет два тяговых модуля. Каждый тяговый модуль управляет одним двигателем. Таким образом, поскольку в комплект блока BORDLINE CC800 входят два тяговых модуля, то каждый преобразователь BORDLINE CC800 питает два двигателя тележки той секции, на которую он установлен.

Функциональная схема преобразователя серии BORDLINE CC800 представлена на рисунке 4.1.

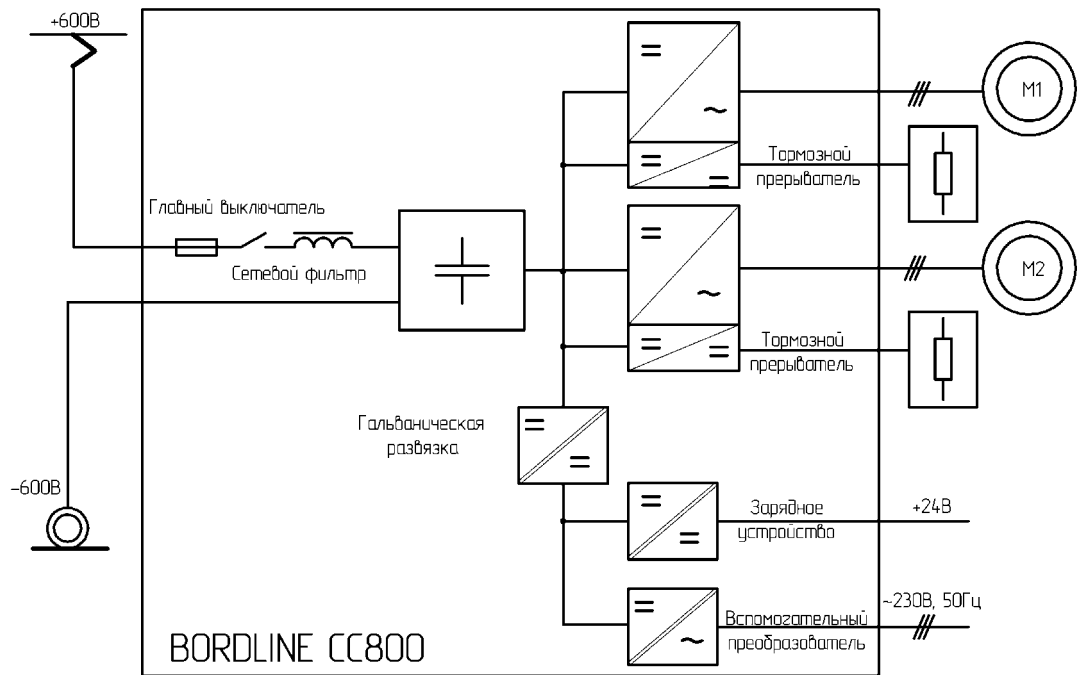


Рисунок 4.1 – Функциональная схема преобразователя BORDLINE CC800 для одной тележки трамвая

При торможении электропривода тормозной резистор подключается к шине постоянного тока внутри преобразователя частоты, и на нем рассеивается энергия от электродвигателя.

Произведём расчет тормозного резистора R_m :

$$P_2 = \frac{\Delta W_{КИН}}{4 \cdot t_{ТОРМ}} \cdot K_{II} = \frac{m \cdot v_{выб}^2}{4 \cdot 2 \cdot t_{ТОРМ}} \cdot K_{II} = \frac{55480 \cdot 13,36^2}{4 \cdot 2 \cdot 6,26} \cdot 0,8 = 91910,4 \text{ Вт},$$

где P_2 – мощность освобожденная за время торможения $t_{ТОРМ}$;

K_{II} – коэффициент учитывающий потери в двигателе, инверторе и механизме, $K_{II} = 0,8$.

Сопротивление тормозного резистора определяем по формуле:

$$R_m = \frac{U_d^2}{P_{T.CP}} = \frac{660^2}{91910,4} = 3,92 \text{ Ом},$$

где U_d, B – напряжение звена постоянного тока.

Выбираем блок резисторов типа КФ-38В1У2 с сопротивлением 4 Ом

[15].

5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

5.1 Выбор датчиков электрических и технологических переменных для измерения управляемых координат электропривода на основе требований к автоматизированному электроприводу

Выходной управляемой величиной системы является момент двигателя. Для управления моментом необходимы сигналы обратных связей по токам фаз двигателей. В преобразователе частоты имеются встроенные датчики тока, которые обеспечивают надежную защиту от превышения тока силовой цепи выше максимально допустимого [14]. Так же имеется тепловая (время – токовая) защита преобразователя и двигателя. Устройство управления непрерывно вычисляет нагрев двигателя на основе настроенного значения номинального тока и реально потребляемого тока. Таким образом, нет необходимости в выборе датчика тока.

Важной проблемой в рельсовом транспорте является буксование – срыв сцепления между колесом и рельсом при реализации тягового усилия. Для устранения данной проблемы в тяговый электропривод входит система защиты от буксования и юза, обеспечивающая быстрое выравнивание разности скоростей вращения колес. На основании значения обратной связи по скорости, блок согласования скорости (БСС) определяет, находится ли рассогласование скоростей в заданной границе. На базе рассогласования БСС через регулятор формирует управляющие воздействия для формирования заданий момента и потока двигателей.

В качестве датчика скорости используется Lenord Bauer GEL 247 [16]. Принцип действия данного датчика скорости – бесконтактное магнитное сканирование. Встроенное магнитное поле датчика изменяется при вращении целевого колеса. В зависимости от области применения и используемого датчика используются целевые колёса с различными модулями. Модуль представляет собой параметр зубца для зубчатых колёс и описывает соотношение между количеством зубцов и диаметром фаски зубчатого колеса.

Сенсорная система датчика записывает изменения в магнитном поле. Далее сигнал трансформируется в одиночный или двойной сигнал напряжения прямоугольной или синусоидальной формы. Далее сигналы передаются к усиливающим устройствам через специальный кабель.

Количество импульсов на оборот зависит от числа зубцов целевого колеса.

$$d_a = m \cdot (z+2),$$

где d_a - внешний диаметр колеса; m – модуль колеса; z - число зубцов.

Датчик скорости GEL247 обеспечивает определение очень медленного вращения от 0 Гц без потери импульса, а также высокоскоростного вращения до 25 кГц.

Данный бесконтактный датчик скорости вращения – 2-канальный, имеет 2 смещённых на 90° канала, которые позволяют определить направление вращения. Основные параметры датчика представлены в таблице 5.1 [16].

Таблица 5.1 – Технические характеристики датчика скорости GEL 247

Модуль целевого колеса	1.0...3.5
Материал целевого колеса	ферромагнитная сталь
Диапазон рабочих температур	-40...+120°C
Питающее напряжение	10...30 В
Диапазон измерений скорости вращения	0...25 кГц
Количество импульсов за оборот	25...1024
Степень защиты	IP68

5.2 Составление математических моделей и расчёт параметров объекта управления, датчиков и исполнительного устройства

Объектом управления в системе автоматизированного тягового электропривода является транспортное средство, а именно трамвай. Динамика

системы управления существенно зависит от подсистемы преобразователь-двигатель.

Для того чтобы составить структурную схему двигателя опишем для начала его математически, т. е. запишем уравнения по которым структурная схема будет построена.

Существует метод математического описания асинхронного электропривода с преобразователем частоты, основанный на полных дифференциальных уравнениях асинхронного двигателя записанных на базе теории обобщенной электрической машины. Такой подход позволяет построить структуру системы управления частотным электроприводом называемую системой векторного управления и осуществить анализ и синтез асинхронного электропривода более простыми методами. Для этой цели управляемые координаты электропривода, измененные в неподвижной системе координат, преобразуются к вращающейся системе координат, в которой координаты электропривода рассматриваются как векторные величины. Из этих величин, расположенных в виде проекций на вращающиеся оси координат, путем координатных преобразований, выделяются пропорциональные или постоянные величины координат электропривода, которые используются в качестве сигналов управления в системе электропривода.

Дифференциальные уравнения, описывающие электромеханическое преобразование энергии в асинхронном короткозамкнутом двигателе при описании во вращающейся системе координат X-Y будут иметь вид [17, стр. 33]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{1X} = R_1 i_{1X} + \frac{L_{12}}{L_2} \frac{d\Psi_2}{dt} + \left(L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_2} \right) \left(\frac{di_{1X}}{dt} - i_{1Y} \omega_0' \right), \\ u_{1Y} = R_1 i_{1Y} + \frac{L_{12}}{L_2} \Psi_2 \omega_0' + \left(L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_2} \right) \left(\frac{di_{1Y}}{dt} - i_{1X} \omega_0' \right), \\ 0 = \frac{R_2}{L_2} \Psi_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} - R_2' \frac{L_{12}}{L_2} i_{1X}, \\ 0 = R_2 \frac{L_{12}}{L_2} i_{1Y} - \Psi_2 \omega_2, \\ M = \frac{3}{2} p_{\Pi} \frac{L_{12}}{L_2} \Psi_2 i_{1Y}. \end{array} \right.$$

где u_{1X} , u_{1Y} , i_{1X} , i_{1Y} - проекции вектора напряжения и тока статора двигателя на оси x и y ;

Ψ_2 - модуль результирующего вектора потокосцепления ротора;

$\omega_2 = \omega_0' - \omega$ - круговая частота скольжения ротора относительно поля ротора.

Полученная структура асинхронного двигателя с векторным управлением приведена на рисунке 5.1. Она представляет собой сложную систему взаимосвязанных цепей управления. Однако она позволяет сравнительно просто исследовать динамические свойства двигателя при задающих и возмущающих воздействиях и осуществить определение параметров двигателя методами моделирования.

Принимаем:

Номинальные механические потери:

$$\Delta P_{\text{мех.ном}} \approx 0,06 \cdot \Delta P_{\text{ном}} = 0,06 \cdot 7299,47 = 437,97 \text{ Вт.}$$

Добавочные потери:

$$\Delta P_{\text{доб.2}} \approx 0,03 \cdot \Delta P_{\text{ном}} = 0,03 \cdot 7299,47 = 218,98 \text{ Вт.}$$

Момент холостого хода:

$$M_0 = \frac{\Delta P_{\text{мех.ном}} + \Delta P_{\text{доб.2}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{437,97 + 218,98}{185,35} = 3,54 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Электромагнитный номинальный момент:

$$M_{\text{э.ном}} = M_{\text{ном}} + M_0 = 566,48 + 3,54 = 570,02 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (5.2)$$

Переменные номинальные потери мощности в роторе:

$$\Delta P_{\text{пер.2ном}} = M_{\text{э.ном}} \cdot \omega_0 \cdot S_{\text{ном}} = 566,48 \cdot 188,5 \cdot 0,0165 = 1772,89 \text{ Вт.}$$

Задаемся коэффициентом загрузки $k_{3,m}$, соответствующим максимальному КПД АД:

$$k_{3,m} = 0,5 - 1,0.$$

Переменные номинальные потери мощности при $k_{3,m} = 0,7$:

$$\Delta P_{\text{пер.ном}} = \frac{\Delta P_{\text{ном}}}{1 + k_{3,m}^2} = \frac{7299,47}{1 + 0,7^2} = 4898,97 \text{ Вт.}$$

Постоянные потери мощности:

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{ном}} - \Delta P_{\text{пер.ном}} = 7299,47 - 4898,97 = 2400,5 \text{ Вт.}$$

Переменные номинальные потери мощности в обмотках статора:

$$\Delta P_{\text{пер.1ном}} = \Delta P_{\text{пер.ном}} - \Delta P_{\text{пер.2ном}} = 4898,97 - 1772,89 = 3126,08 \text{ Вт.}$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = \frac{\Delta P_{\text{пер.1ном}}}{3 \cdot I_{\text{ном}}^2} = \frac{3126,08}{3 \cdot 180^2} = 0,0325 \text{ Ом.}$$

Максимальное значение электромагнитного момента:

$$M_{\text{э,мах}} = \lambda_m \cdot M_{\text{ном}} + M_0 = 3,65 \cdot 566,48 + 3,54 = 2071,21 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Коэффициент:

$$\epsilon = \frac{3U_{\phi,ном}^2 \cdot S_{ном}}{\Delta P_{пер.2ном}} - 2 \cdot R_1 = \frac{3 \cdot 248^2 \cdot 0,0165}{1772,89} - 2 \cdot 0,0325 = 1,656.$$

Сопротивление:

$$Z = \frac{3U_{\phi,ном}^2}{2\omega_0 \cdot M_{\varepsilon,маx}} - R_1 = \frac{3 \cdot 248^2}{2 \cdot 188,5 \cdot 2071,21} - 0,0325 = 0,2043 \text{ Ом.}$$

Приведенное активное сопротивление фазы ротора:

$$R'_{2,0} = 0,5 \cdot S_{ном} \cdot (\epsilon + \sqrt{\epsilon^2 - 4 \cdot Z^2}) = 0,5 \cdot 0,0165 \cdot (1,656 + \sqrt{1,656^2 - 4 \cdot 0,2043^2}) = 0,0269 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_{k,0} = \sqrt{Z^2 - R_1^2} = \sqrt{0,2043^2 - 0,0325^2} = 0,2017 \text{ Ом.}$$

Критическое скольжение:

$$S_k = \frac{R'_{2,0}}{Z} = \frac{0,0269}{0,2017} = 0,1317.$$

Коэффициент a :

$$a = \frac{R_1}{R'_{2,0}} = \frac{0,0325}{0,0269} = 1,209.$$

Рассчитываем электромагнитный момент АД по формуле Клосса для найденных параметров и скольжения $S = S_{ном}$:

$$M(S_{ном}) = \frac{2M_{\varepsilon,маx}(1 + aS_k)}{\frac{S_{ном}}{S_k} + \frac{S_k}{S_{ном}} + 2aS_k} = \frac{2 \cdot 2071,21 \cdot (1 + 1,209 \cdot 0,1317)}{\frac{0,0165}{0,1317} + \frac{0,1317}{0,0165} + 2 \cdot 1,209 \cdot 0,1317} = 569,93 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (5.3)$$

Сравниваем $M_{\varepsilon,ном}$, рассчитанный по формуле (5.2), с $M(S_{ном})$ по формуле (5.3). Если погрешность Δm превышает допустимую (обычно 5-10%), то корректируем $k_{3,m}$ и M_0 , а затем повторяем расчет до получения требуемой погрешности.

$$\Delta m = \left| \frac{M(S_{ном}) - M_{\varepsilon,ном}}{M_{\varepsilon,ном}} \right| = \left| \frac{569,93 - 570,03}{570,0} \right| = 0,0002.$$

Погрешность Δm не выходит за допустимые пределы, следовательно перерасчет производить не нужно.

Принимаем:

$$X_{1,0} = X'_{2,0} = 0,5 \cdot X_{k,0} = 0,5 \cdot 0,2017 = 0,1008 \text{ Ом.}$$

Потери в стали:

$$\Delta P_{ст.ном} = \Delta P_{пост} - (\Delta P_{мх.ном} + \Delta P_{доб2}) = 2400,5 - (437,97 + 218,98) = 1743,54 \text{ Вт.}$$

Ток холостого хода:

$$I_0 = I_{ном} \cdot \sqrt{1 - \cos \varphi_{ном}} = 180 \cdot \sqrt{1 - 0,84} = 71,6 \text{ А.}$$

Эквивалентное активное сопротивление намагничивающего контура:

$$R_{\mu} = \frac{\Delta P_{ст.ном}}{3 \cdot I_0^2} = \frac{1743,54}{3 \cdot 71,6^2} = 0,1134 \text{ Ом.}$$

Синус φ_0 холостого хода:

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - \left[\frac{(R_1 + R_{\mu}) \cdot I_0}{U_{\phi.ном}} \right]^2} = \sqrt{1 - \left[\frac{(0,0325 + 0,1134) \cdot 71,6}{248} \right]^2} = 0,99.$$

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура:

$$X_{\mu} = \frac{U_{\phi.ном}}{I_0} \sin \varphi_0 - X_1 = \frac{248}{71,6} \cdot 0,99 - 0,1008 = 3,363 \text{ Ом.}$$

Рассчитанные параметры указаны на эквивалентной однофазной схеме асинхронного двигателя, рисунок 5.2.

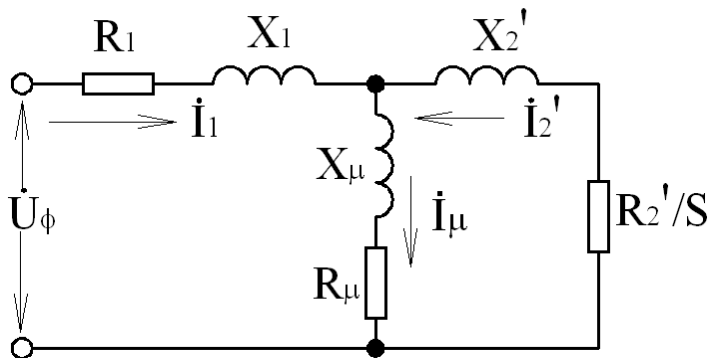


Рисунок 5.2 – Эквивалентная Т – образная схема для одной фазы асинхронного двигателя

Определив значения сопротивлений, рассчитываем значения индуктивностей.

Индуктивности рассеивания статора и ротора:

$$L_{1\delta} \approx L_{2\delta} = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,1008}{2 \cdot 3,14 \cdot 60} = 0,000268 \text{ Гн.}$$

Взаимная индуктивность обмоток статора и ротора:

$$L_{12} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{3,363}{2 \cdot 3,14 \cdot 60} = 0,0089 \text{ Гн.}$$

Индуктивность статора и ротора:

$$L_1 \approx L_2 = \frac{X_1 + X_{\mu}}{2\pi f} = \frac{0,1008 + 3,363}{2 \cdot 3,14 \cdot 60} = 0,0092 \text{ Гн.}$$

Эквивалентное сопротивление цепи статора:

$$R_{\sigma} = R_1 + R_2' \cdot \left(\frac{L_{12}}{L_2} \right)^2 = 0,0325 + 0,0269 \cdot \left(\frac{0,0089}{0,0092} \right)^2 = 0,0579 \text{ Ом.}$$

Коэффициент рассеяния:

$$\sigma = 1 - \frac{L_{12}^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0,0089^2}{0,0092 \cdot 0,0092} = 0,064.$$

Эквивалентная индуктивность цепи статора:

$$L_{\sigma} = L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_2} = 0,0092 - \frac{0,0089^2}{0,0092} = 0,00053 \text{ Гн.}$$

Эквивалентная времени ротора:

$$T_2 = L_2 / R_2' = 0,0092 / 0,0269 = 0,342 \text{ с.}$$

Эквивалентная постоянная времени:

$$T_{\sigma} = L_{\sigma} / R_{\sigma} = 0,00053 / 0,0579 = 0,009 \text{ с.}$$

Потокоцепление ротора:

$$\psi_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot R_2' \cdot M_{ном}}{3 \cdot p_{II}^2 \cdot \omega_0 \cdot s_{ном}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,0269 \cdot 566,48}{3 \cdot 4 \cdot 188,5 \cdot 0,0098}} = 0,904 \text{ Вб.}$$

Структурная схема векторного управления моментом представлена на рисунке 5.3.

$$W_{\text{ж.разомкн.пт}}(p) = \frac{1}{2 \cdot \tau \cdot p + 2 \cdot \tau^2 \cdot p^2},$$

$$K_{\text{пты}} \cdot \frac{\beta_n}{\tau \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{R_3 \cdot (T_3 \cdot p + 1)} \cdot k_{\text{омы}} = \frac{1}{2 \cdot \tau \cdot p + 2 \cdot \tau^2 \cdot p^2}.$$

Выражаем $K_{\text{пты}}$:

$$K_{\text{пты}} = \frac{R_3 \cdot (T_3 \cdot p + 1) \cdot (\tau \cdot p + 1)}{\beta_n \cdot k_{\text{омы}} \cdot (2 \cdot \tau \cdot p + 2 \cdot \tau^2 \cdot p^2)} = \frac{R_3 \cdot (T_3 \cdot p + 1)}{2 \cdot \tau \cdot k_{\text{омы}} \cdot \beta_n \cdot p},$$

Определяем коэффициент обратной связи по току:

$$k_{\text{отх}} = k_{\text{оту}} = \frac{U_{3.E.max}}{i_{1y.max}} = \frac{10}{657} = 0,0152.$$

Тогда:

$$k_{\text{пты}} = \frac{R_3 (T_3 p + 1)}{2 \cdot \tau \cdot k_{\text{омы}} \cdot \beta_n \cdot p} = \frac{0,0579(0,009 p + 1)}{2 \cdot 0,001 \cdot 0,0152 \cdot 55 \cdot p} = 0,312 + 34,63 \frac{1}{p}.$$

Желаемая передаточная функция замкнутого контура определяется как:

$$W_{\text{ж.замк.пт}}(p) = \frac{W_{\text{ж.разомкн.пт}}(p)}{1 + W_{\text{ж.разомкн.пт}}(p)},$$

$$W_{\text{пт}}(p) = \frac{W_{\text{ж.разомкн.пт}}(p)}{1 + W_{\text{ж.разомкн.пт}}(p)},$$

Тогда передаточная функция замкнутого контура регулирования тока примет вид:

$$W_{\text{пт}}(p) = \frac{1}{1 + 2 \cdot \tau \cdot p + 2 \cdot \tau^2 \cdot p^2} \cdot \frac{1}{k_{\text{омы}}}.$$

Контур регулирования потокосцепления представлен на рисунке 5.5.

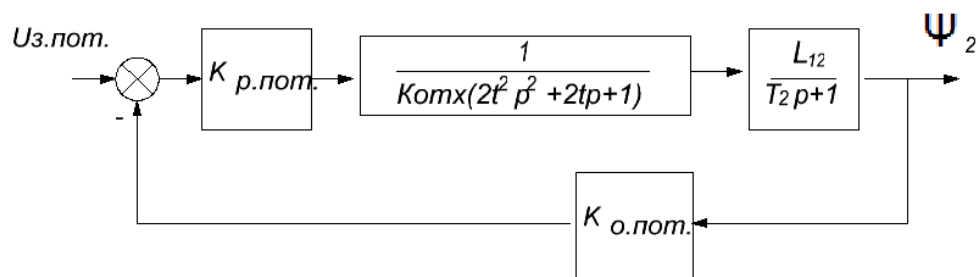


Рисунок 5.5 – Контур регулирования потокосцепления

Определяем коэффициент обратной связи по потокосцеплению:

$$k_{оном} = \frac{U_{\max}}{\psi_2} = \frac{10}{0,904} = 11,07 ;$$

Порядок контура $n=3$. Запишем желаемую передаточную функцию разомкнутого контура потокосцепления:

$$W_{ж.разомкн.пот}(p) = \frac{1}{4\tau p + 8\tau^2 p^2 + 8\tau^3 p^3},$$

$$K_{пном} \cdot \frac{1}{k_{омх} \cdot (2\tau^2 p^2 + 2\tau p + 1)} \cdot \frac{L_{12}}{T_2 p + 1} \cdot k_{оном} = \frac{1}{4\tau p \cdot (2\tau^2 p^2 + 2\tau p + 1)}.$$

Выразим $K_{пном}$:

$$K_{пном} = \frac{k_{омх} \cdot (2\tau^2 p^2 + 2\tau p + 1) \cdot (T_2 p + 1)}{L_{12} k_{оном} \cdot 4\tau p \cdot (2\tau^2 p^2 + 2\tau p + 1)}.$$

После преобразований получим:

$$k_{пном} = \frac{(T_2 p + 1) \cdot k_{омх}}{4\tau p \cdot L_{12} \cdot k_{оном}} = \frac{(0,342 p + 1) \cdot 0,0152}{4 \cdot 0,001 \cdot p \cdot 0,0089 \cdot 11,07} = 13,19 + 38,57 \frac{1}{p}.$$

Для ограничения ускорения и рывка при пуске двигателя на вход системы устанавливается задатчик интенсивности.

Передаточная функция задатчика интенсивности имеет выражение:

$$W_{з.и}(p) = \frac{1}{T_{зи} \cdot p},$$

Постоянная времени задатчика интенсивности определяется по выражению:

$$T_{зи} = \frac{a_{дон}}{\rho_{дон}} = \frac{1,24}{1} = 1,24 \text{ с.}$$

6 РАСЧЁТ И АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

6.1 Разработка компьютерной (имитационной) модели автоматизированного электропривода механизма

Компьютерное моделирование электропривода в программной среде Matlab Simulink позволяет получить близкие к реальным динамические и статические характеристики системы [19]. С этой целью разработана модель системы векторного управления асинхронным электроприводом, состоящая из следующих блоков и подсистем:

Induction motor – блок асинхронного электродвигателя;

Inverter – подсистема частотного преобразователя с ШИМ;

Clarke – подсистема преобразований Кларке;

Park – подсистема преобразований Парка;

Inv.Clarke – подсистема обратного преобразования Кларке;

Inv.Park – подсистема обратного преобразования Парка;

Flux observer – подсистема вычисления магнитного потока;

Compensation block – подсистема компенсации перекрёстных связей;

Flux channel – подсистема регулятора канала потока;

Torque channel – подсистема регулятора канала момента;

Ramp gen. – подсистема задатчика интенсивности момента;

Torque request – подсистема момента статического;

Eqv. current estimation – подсистема расчёта эквивалентного тока двигателя.

В разработанной системе электропривода сигналами задания являются потокосцепление и момент, пропорциональный составляющей тока i_y при условии $\bar{\Psi}_2 = const$. На рисунке 6.1 приведена имитационная модель автоматизированного электропривода.

Для упрощения процесса расчёта и удобства отладки всей модели заменим числовые значения в блоках на буквенные переменные. Значения этих переменных хранятся в текстовом файле `parameters.m`, который инициализируется при начале моделирования:

```

Pn = 105000;           % Номинальная мощность [Вт]
Vn = 450;              % Линейное номинальное напряжение [В]
fn = 60;               % Номинальная частота [Гц]
Rs = 0.0325;           % Сопротивление статора [Ом]
Lls = 0.000268;        % Индуктивность рассеяния статора [Гн]
Rr = 0.0269;           % Сопротивление ротора [Ом]
Llr = 0.000268;        % Индуктивность рассеяния ротора [Гн]
Lm = 0.0089;           % Взаимоиндукция [Гн]
J = 34.79;             % Момент инерции [кг.м^2]
p2 = 2;                % Число пар полюсов
wn = 1770*pi/30;        % Номинальная скорость [рад/с]
Ls = Lm + Lls;         % Индуктивность статора [Гн]
Lr = Lm + Llr;         % Индуктивность ротора [Гн]
T2 = Lr/R2;            % Постоянная времени ротора [с]
sigma = 1 - Lm^2/(Ls*Lr); % Коэффициент рассеяния
a = 1.24;              % Макс. ускорение [м/с^2]
r = 1;                 % Макс. допустимый рывок [м/с^3]
Tz = a/r;              % Постоянная времени задатчика момента [с]
rk = 0.305;            % Радиус колеса [м]
itr = 6.24;            % Передаточное отношение
ntr = 0.97;            % КПД трансмиссии
k = 4;                 % Число двигателей
Kp_p = 13.19;           % Пропорциональный коэфф. регулятора потока
Kp_i = 38.57;           % Интегральный коэфф. регулятора потока
Kt_p = 0.312;           % Пропорциональный коэфф. регулятора тока
Kt_i = 34.63;           % Интегральный коэфф. регулятора тока

```

$Kop = 11.07$; % Коэфф. обратной связи по потоку

$Kot = 0.0152$; % Коэфф. обратной связи по току

В таблице 6.1 отражены числовые значения используемых переменных.

Таблица 6.1 – Значения переменных в блоках модели

Обозначение в расчётах	Обозначение в модели	Числовое значение	Ед. измерения
$P_{ном}$	Pnom	105000	Вт
$U_{ном}$	Vn	450	В
f	fn	60	Гц
R_1	Rs	0,0325	Ом
$L_{1\delta}$	Lls	0,000268	Гн
$R'_{2,0}$	Rr	0,0269	Ом
$L_{2\delta}$	Llr	0,000268	Гн
L_{12}	Lm	0,0089	Гн
J_{Σ}	J	34,79	кг·м ²
p	p2	2	-
$\omega_{ном}$	wn	185,35	рад/с
L_1	Ls	0,0092	Гн
L_2	Lr	0,0092	Гн
T_2	T2	0,342	с
σ	sigma	0,064	-
a	a	1,24	м/с ²
-	Kp_p	13,19	-
-	Kp_i	38,57	-
-	Kt_p	0,312	-
-	Kt_i	34,63	-
$k_{оном}$	Kop	11,07	-
$k_{от}$	Kot	0,0152	-

Далее отдельно рассмотрим каждый блок.

Подсистема Clarke, преобразует токи из трехфазной системы ABC в двухфазную систему α - β преобразование фаз происходит согласно следующему выражению:

$$\left. \begin{aligned} i_{1\alpha} &= \frac{2}{3} \cdot \left(i_{1a} - \frac{1}{2} \cdot i_{1b} - \frac{1}{2} \cdot i_{1c} \right), \\ i_{1\beta} &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} (i_{1b} - i_{1c}). \end{aligned} \right\}$$

Структурная схема подсистемы Clarke приведена на рисунке 6.2.

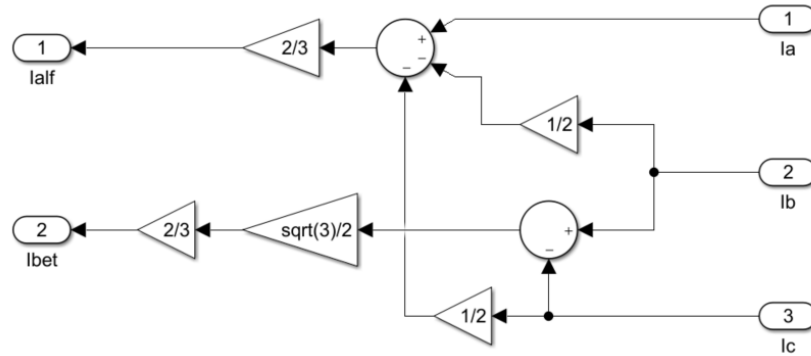


Рисунок 6.2 – Структурная схема подсистемы Clarke

Подсистема Park преобразования токов из системы координат α - β в систему координат x - y выполняет преобразование по следующему выражению:

$$\left. \begin{aligned} i_{1x} &= i_{1\alpha} \cdot \cos \varphi_0 + i_{1\beta} \cdot \sin \varphi_0, \\ i_{1y} &= -i_{1\alpha} \cdot \sin \varphi_0 + i_{1\beta} \cdot \cos \varphi_0. \end{aligned} \right\}$$

Структурная схема подсистемы Park приведена на рисунке 6.3.

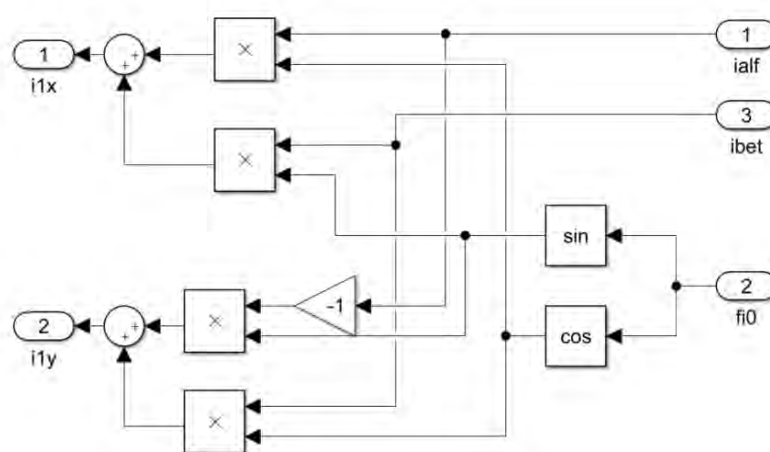


Рисунок 6.3 – Структурная схема подсистемы Park

Подсистема преобразования Inv.Clarke напряжения из двухфазной системы α - β в трехфазную систему ABC выполняет преобразование по следующему выражению.

$$\left. \begin{aligned} U_{1a} &= U_{1\alpha}, \\ U_{1b} &= -\frac{1}{2} \cdot U_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_{1\beta}, \\ U_{1c} &= -\frac{1}{2} \cdot U_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_{1\beta}. \end{aligned} \right\}$$

Структурная схема подсистемы Inv.Clark приведена на рисунке 6.4.

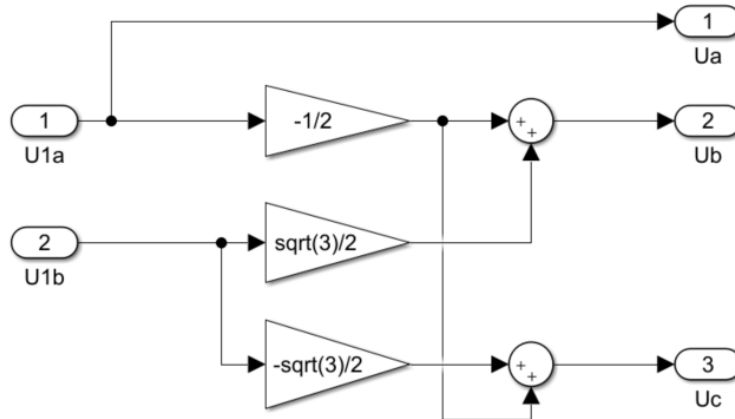


Рисунок 6.4 – Структурная схема подсистемы Inv.Clark

Подсистема преобразования напряжения Inv.Park из системы координат x - y в систему координат α - β выполняет преобразование по следующему выражению:

$$\begin{aligned} U_{1\alpha} &= U_{1x}' \cdot \cos \varphi_0 - U_{1y}' \cdot \sin \varphi_0, \\ U_{1\beta} &= U_{1x}' \cdot \sin \varphi_0 + U_{1y}' \cdot \cos \varphi_0. \end{aligned}$$

Структурная схема подсистемы Inv.Park приведена на рисунке 6.5.

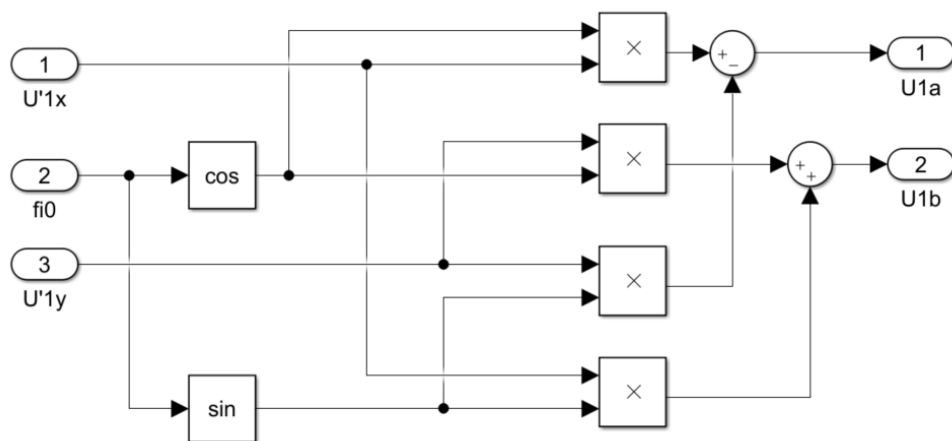


Рисунок 6.5 – Структурная схема подсистемы Inv.Park

Структурная схема подсистемы определения потока Flux observer изображена на рисунке 6.6.

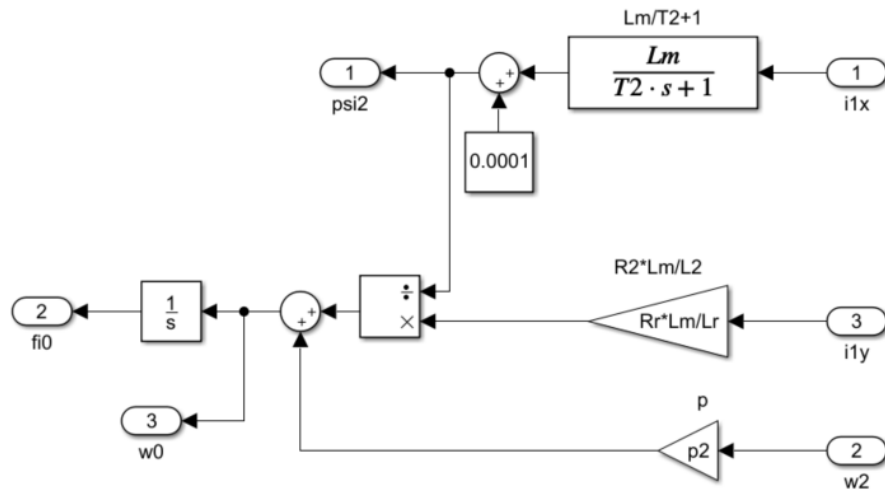


Рисунок 6.6 – Структурная схема подсистемы определения потока

Структурная схема подсистемы канала момента Torque channel приведена на рисунке 6.7.

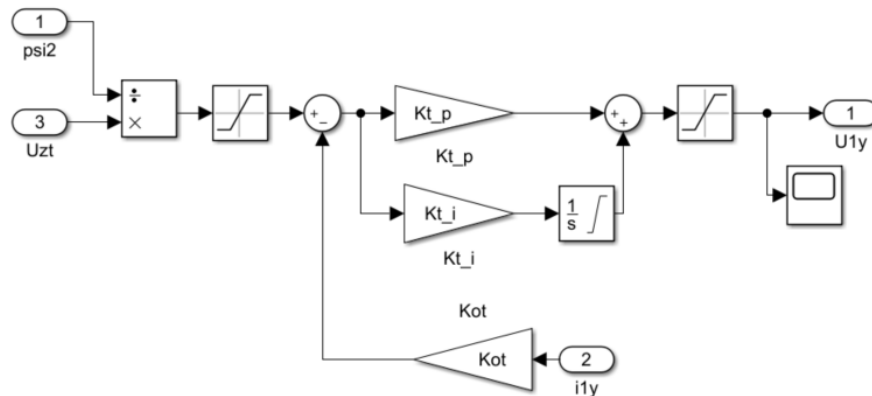


Рисунок 6.7 – Структурная схема подсистемы канала момента

Структурная схема подсистемы канала потока Flux channel приведена на рисунке 6.8.

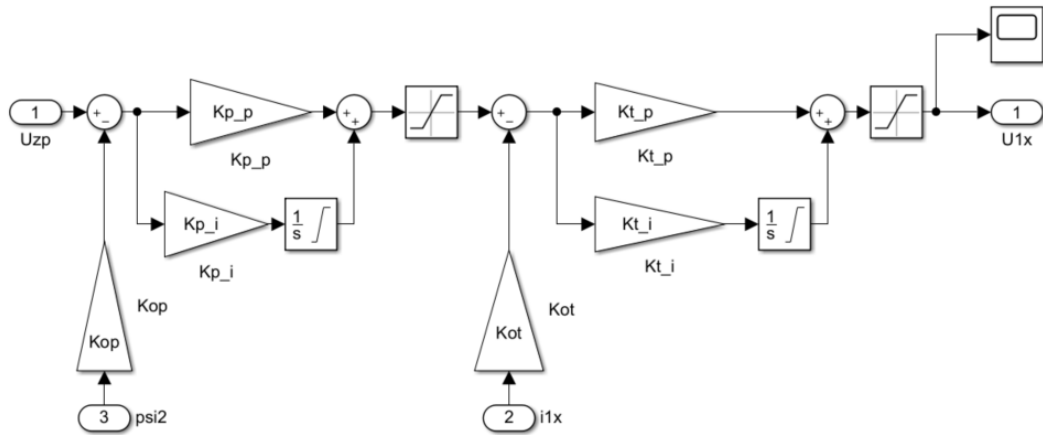


Рисунок 6.8 – Структурная схема подсистема канала потока

Структурная схема подсистемы компенсации Compensation block приведена на рисунке 6.9.

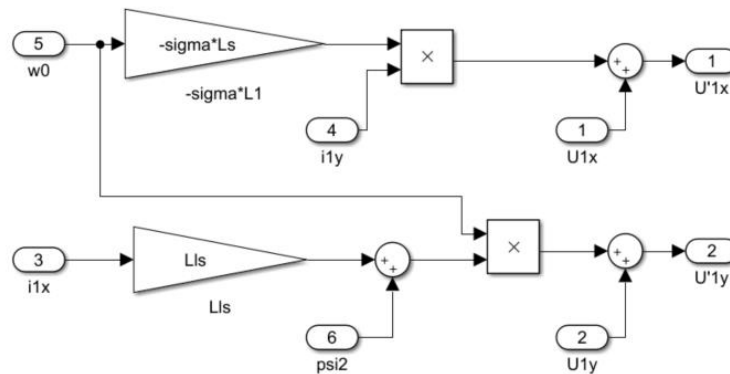


Рисунок 6.9 – Структурная схема подсистемы компенсации

Структурная схема подсистемы реализации преобразователя частоты Inverter приведена на рисунке 6.10.

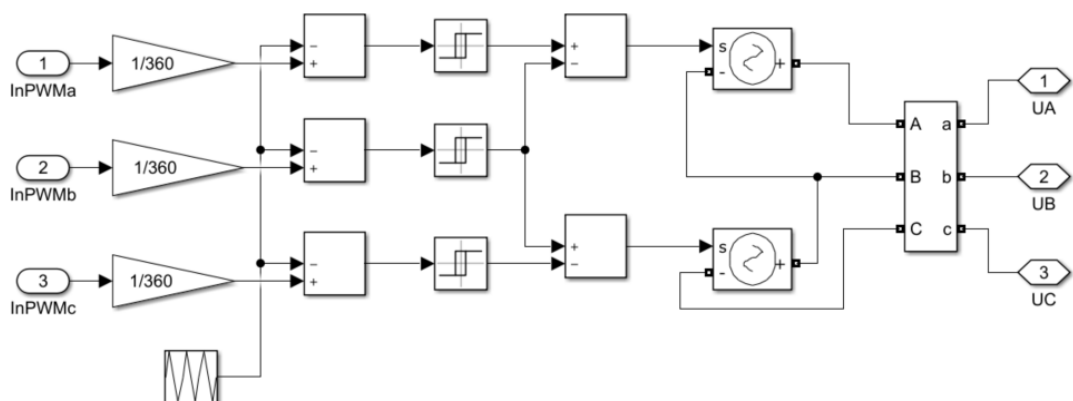


Рисунок 6.10 - Структурная схема подсистемы преобразователя частоты

Структурная схема подсистемы расчета эквивалентного тока E_{qv} . current estimation приведена на рисунке 6.11.

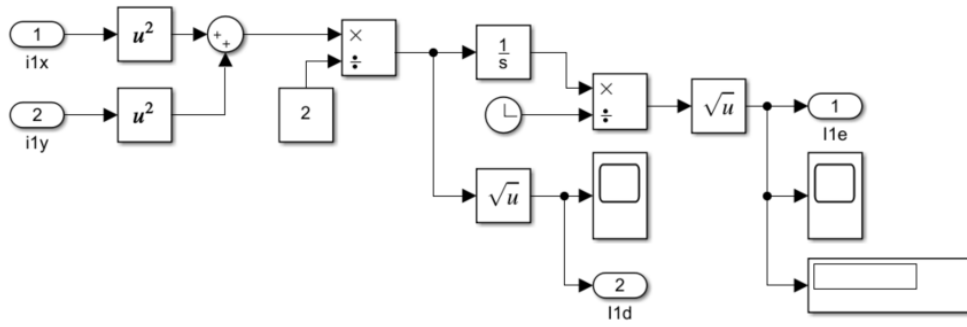


Рисунок 6.11 – Структурная схема подсистемы вычисления эквивалентного тока

Структурная схема подсистемы реализации статического момента Torque request приведена на рисунке 6.12.

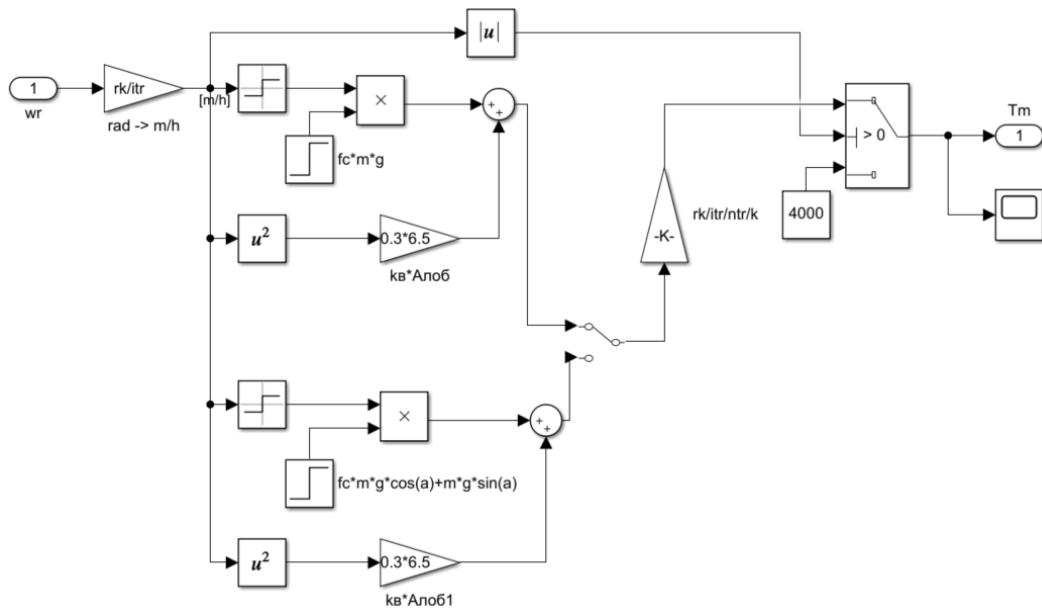


Рисунок 6.12 - Структурная схема подсистемы реализации статического момента

Структурная схема подсистемы задатчика интенсивности Ramp gen. приведена на рисунке 6.13.

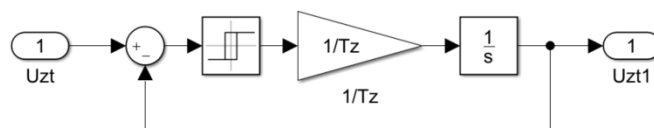


Рисунок 6.13 - Структурная схема подсистемы задатчика интенсивности

6.2 Расчёт зависимости задающего воздействия от времени $U_3=f(t)$ для реализации технологического процесса за цикл работы механизма

Т.к. в системе векторного управления задаем ток, то для того чтобы обеспечить нужный момент выразим ток i_{1y} через момент M :

$$M = \frac{3}{2} \cdot i_{1y} \cdot \psi_{2x} \cdot \frac{L_{12}}{L_2} \cdot p_n, \quad (6.1)$$

$$i_{1y} = \frac{2 \cdot M \cdot L_2}{3 \cdot p_n \cdot L_{12} \cdot \psi_{2x}},$$

$$U_3 = \frac{10 \cdot 2 \cdot M \cdot L_2}{3 \cdot i_{1y, \max} \cdot p_n \cdot L_{12} \cdot \psi_{2x}},$$

$$U_3 = \frac{10 \cdot 2 \cdot M \cdot 0,01}{3 \cdot 657 \cdot 2 \cdot 0,01 \cdot \psi_{2x}} = 0,01 \cdot \frac{M}{\psi_{2x}}.$$

Имея двухзонное регулирование при котором идет уменьшение потока при скорости двигателя выше номинальной в формуле (6.1) деление на поток реализуется в системе управление. Тогда формула для расчета сигнала задания в пересчете на один двигатель трамвая примет вид:

$$U_3 = 0,0052 \cdot \frac{M}{4} = 0,0013 \cdot M.$$

Модель будет отражать рабочий цикл трамвая при максимальной загрузке и ограничении ускорения $a = 1,24 \text{ м/с}^2$. Для этого произведем расчет сигналов задания.

Разгон до скорости 25 км/ч под уклон в 40 ‰:

1) Разгон до скорости 25 км/ч, $M = 5577,48 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $t = 5,56 \text{ с}$:

$$U_3 = 0,0013 \cdot 5577,48 = 7,25 \text{ В}.$$

2) Движение с постоянной скоростью, $M = 1942,77 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $t = 51,1 \text{ с}$:

$$U_3 = 0,0013 \cdot 1942,77 = 2,54 \text{ В}.$$

3) Свободный выбег $M = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $t = 3,85 \text{ с}$:

$$U_3 = 0 \text{ В};$$

4) Торможение до нулевой скорости, $M = -1600,52 \cdot \text{м}$, $t = 3,34 \text{ с}$:

$$U_3 = 0,0013 \cdot (-1600,52) = -2,1 \text{ В.}$$

Разгон до скорости 60 км/ч на ровном участке:

1) Разгон до скорости 60 км/ч, $M = 3951,48 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $t = 13,47 \text{ с}$:

$$U_3 = 0,0013 \cdot 3951,48 = 5,16 \text{ В.}$$

2) Движение с постоянной скоростью, $M = 316,76 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $t = 11,13 \text{ с}$:

$$U_3 = 0,0013 \cdot 316,76 = 0,41 \text{ В.}$$

3) Свободный выбег $M = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $t = 28,6 \text{ с}$:

$$U_3 = 0 \text{ В.}$$

4) Торможение до нулевой скорости, $M = -3128,96 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $t = 10,77 \text{ с}$:

$$U_3 = 0,0013 \cdot (-3128,96) = -4,09 \text{ В.}$$

Зависимость задающего воздействия от времени $U_3 = f(t)$ для реализации технологического процесса трамвая за цикл его работы представлена на рисунках 6.14 и 6.15.

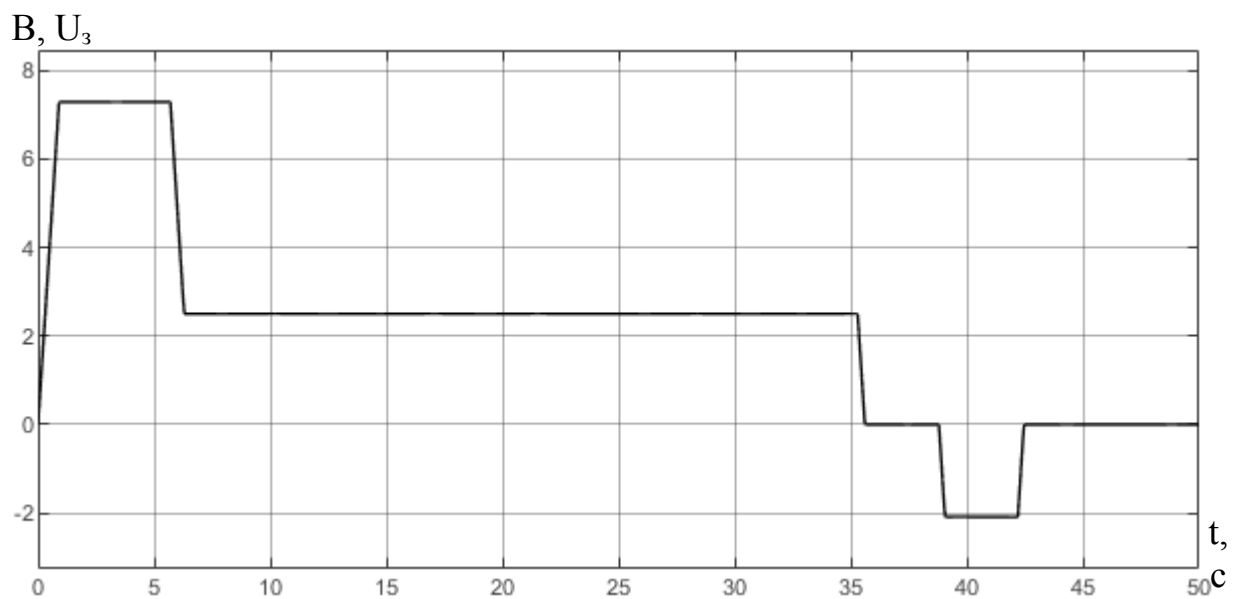


Рисунок 6.14 – Зависимость задающего воздействия от времени

$U_3 = f(t)$ при движении на участке с уклоном

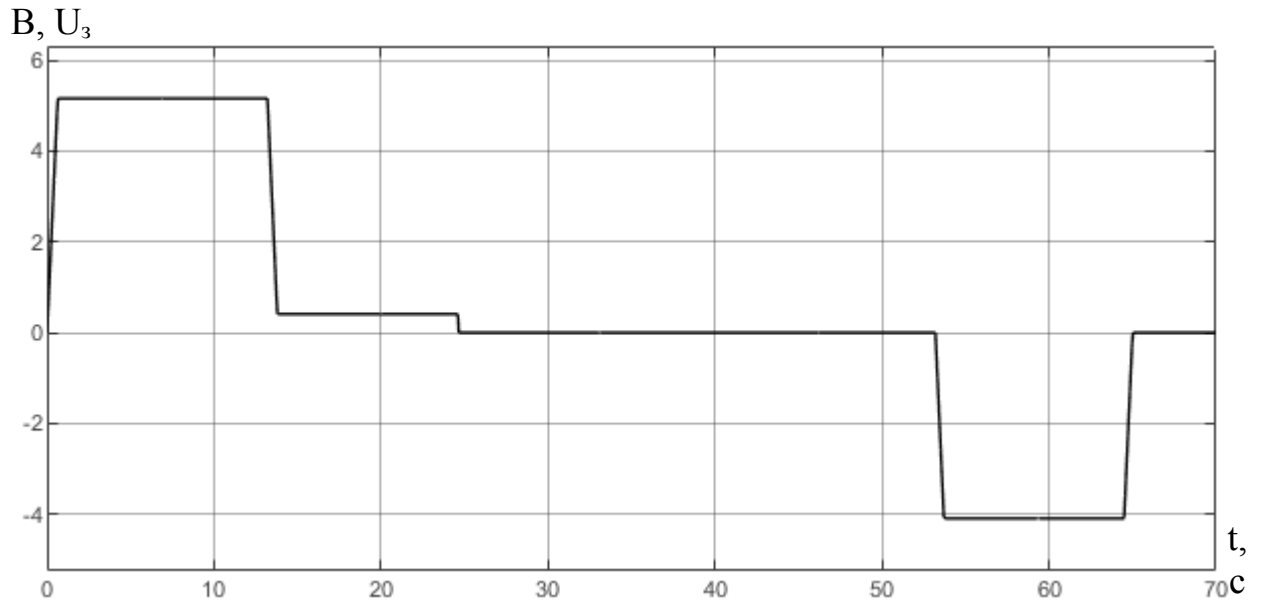


Рисунок 6.15 – Зависимость задающего воздействия от времени

$U_3 = f(t)$ при движении на ровном участке

6.3 Построение статических характеристик электропривода, соответствующих зависимости $U_3=f(t)$ за цикл работы механизма

Семейство статических характеристик может быть представлено системой параметрических уравнений [18]:

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{2 \cdot M_{\kappa}}{\frac{s_a}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s_a}}, \\ \omega &= \omega_{0,ном} \cdot (\alpha - s_a), \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

где M_{κ} – критический момент электродвигателя,

s_{κ} – критическое скольжение электродвигателя.

Тогда исходная система уравнений 6.2 примет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} M &= \frac{2 \cdot 3514,78}{\frac{s_a}{0,06} + \frac{0,06}{s_a}}, \\ \omega &= 157 \cdot (\alpha - s_a), \end{aligned} \right.$$

где α – относительная частота напряжения, питающего двигатель:

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1ном}} = \frac{\omega_0}{\omega_{0,ном}},$$

$\omega_{0,ном}$ – синхронная угловая скорость АД при номинальной частоте.

Задаваясь рядом значений S_a , построим механические характеристики АД при частотном управлении. Результаты расчетов приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Расчет механических характеристик АД

S_a	ω , рад/с				M , Нм
	$a=1$	$a=0,6$	$a=0,2$	$a=0,04$	
1	0	-75,36	-150,72	-180,86	534,13
0,95	9,42	-65,94	-141,3	-171,44	561,21
0,90	18,84	-56,52	-131,88	-162,02	591,11
0,85	28,26	-47,1	-122,46	-152,60	624,30
0,80	37,68	-37,68	-113,04	-143,18	661,32
0,75	47,1	-28,26	-103,62	-133,76	702,85
0,70	56,52	-18,84	-94,2	-124,34	749,74
0,65	65,94	-9,42	-84,78	-114,92	803,02
0,60	75,36	0	-75,36	-105,50	864,03
0,55	84,78	9,42	-65,94	-96,08	934,41
0,50	94,2	18,84	-56,52	-86,66	1016,28
0,45	103,62	28,26	-47,1	-77,24	1112,27
0,40	113,04	37,68	-37,68	-67,82	1225,62
0,35	122,46	47,1	-28,26	-58,40	1359,99
0,30	131,88	56,52	-18,84	-48,98	1518,64
0,25	141,3	65,94	-9,42	-39,56	1701,41
0,20	150,72	75,36	0	-30,14	1895,18
0,15	160,14	84,78	9,42	-20,72	2045,66
0,10	169,56	94,2	18,84	-11,30	1987,19
0,09	171,444	96,084	20,724	-9,42	1922,02
0,08	173,328	97,968	22,608	-7,54	1830,77
0,07	175,212	99,852	24,492	-5,65	1709,95
0,06	177,096	101,736	26,376	-3,77	1556,64
0,05	178,98	103,62	28,26	-1,88	1369,10
0,04	180,864	105,504	30,144	0,00	1147,32
0,03	182,748	107,388	32,028	1,88	893,50
0,02	184,632	109,272	33,912	3,77	612,45
0,01	186,516	111,156	35,796	5,65	311,49
0,00	188,4	113,04	37,68	7,54	0

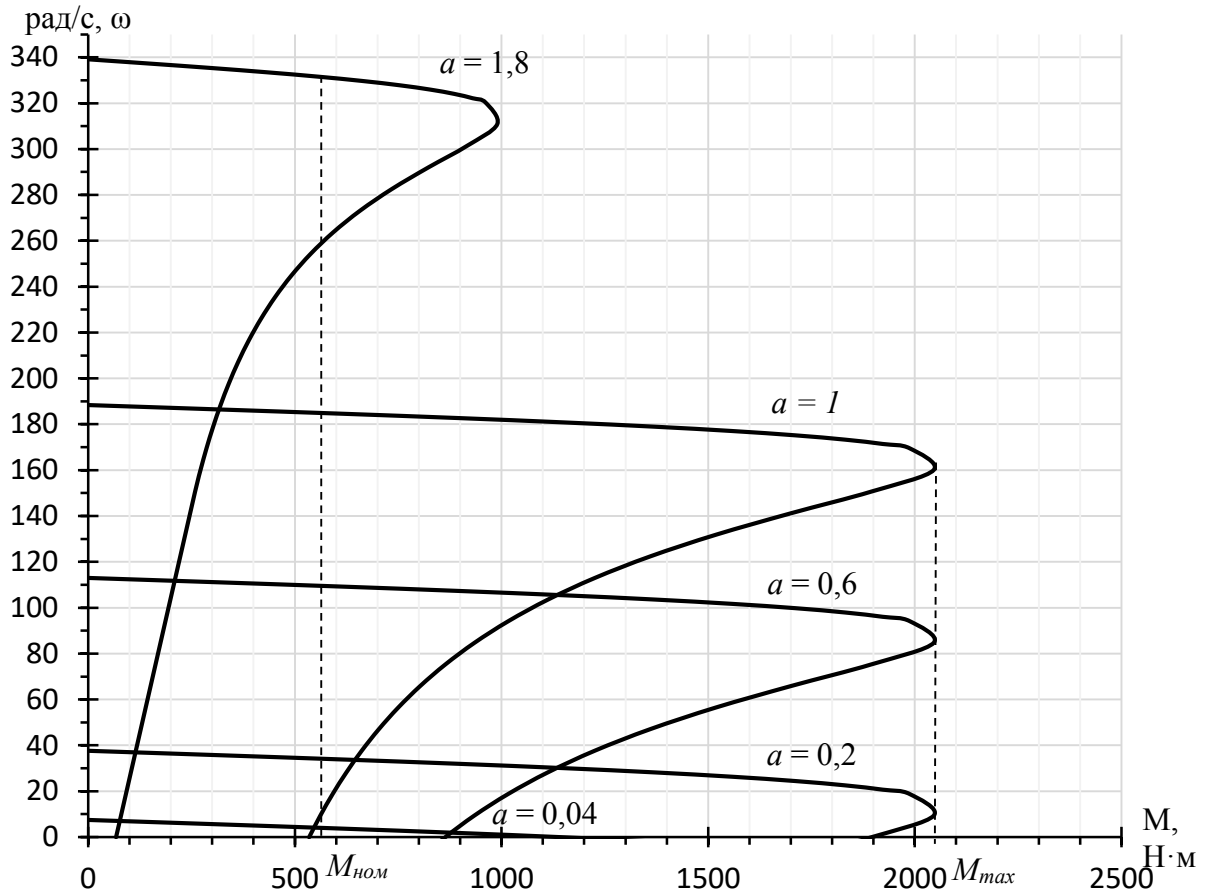


Рисунок 6.16 – Статические характеристики АД при частотном управлении

6.4 Расчёт переходных процессов за цикл работы механизма и определение показателей качества

Произведем построение графиков переходных процессов за цикл работы механизма с помощью разработанной имитационной модели автоматизированного электропривода трамвая. В результате имитационного моделирования можно проанализировать устойчивость системы к воздействующим на неё факторам, а также определить показатели качества работы установки.

Произведем построение графиков переходных процессов электропривода при движении трамвая в гору.

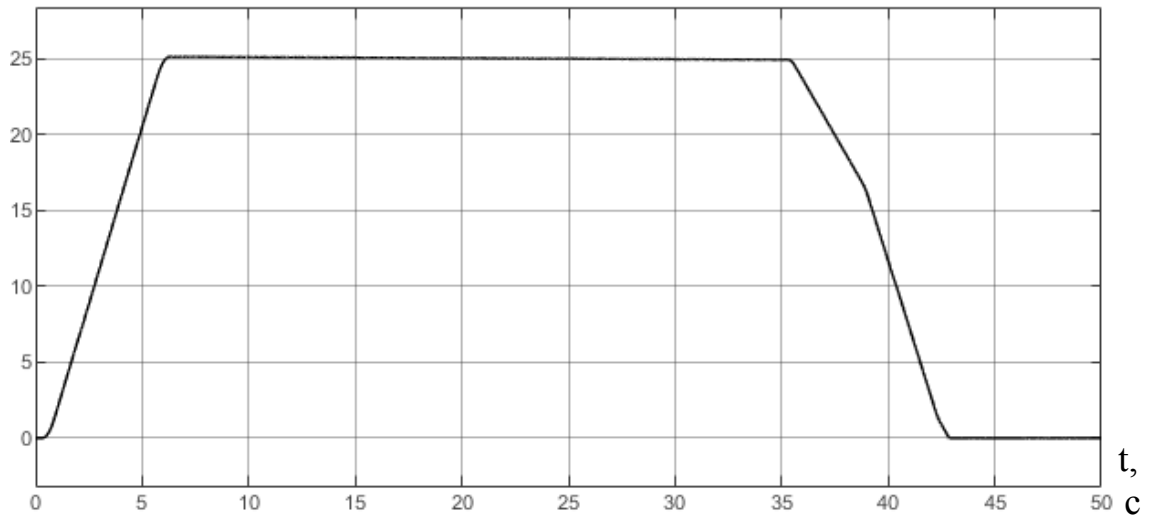
км/ч, v 

Рисунок 6.17 – График изменения линейной скорости трамвая при разгоне до 25 км/ч

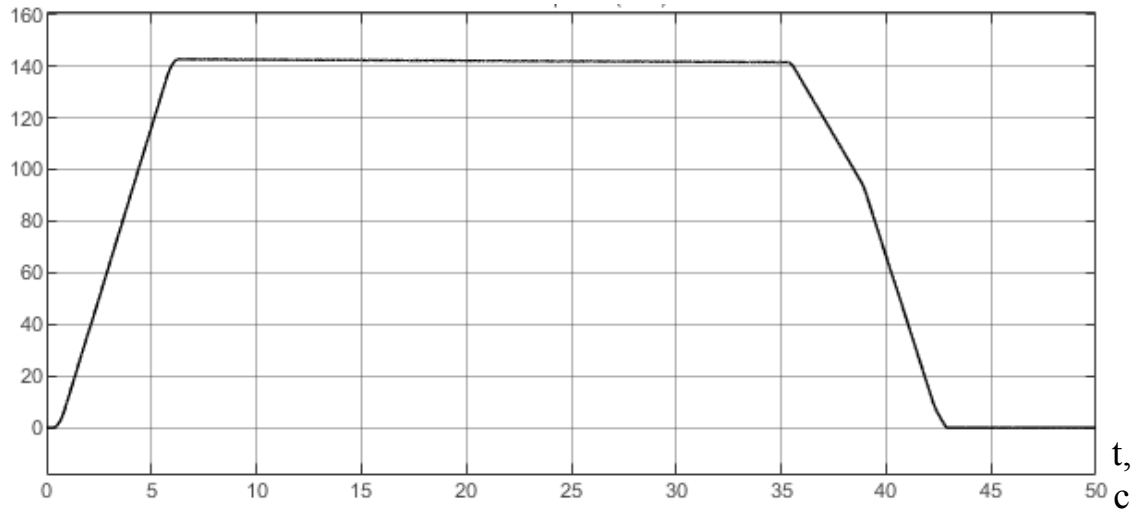
рад/с, ω 

Рисунок 6.18 – График изменения угловой скорости двигателя при разгоне до 25 км/ч

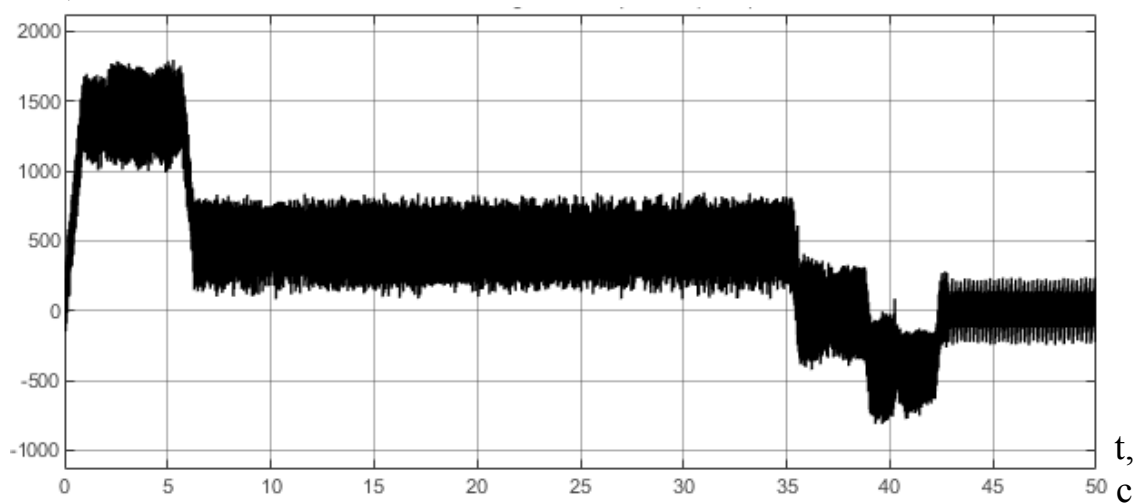
Н·м, M 

Рисунок 6.19 – График изменения электромагнитного момента двигателя при разгоне до 25 км/ч

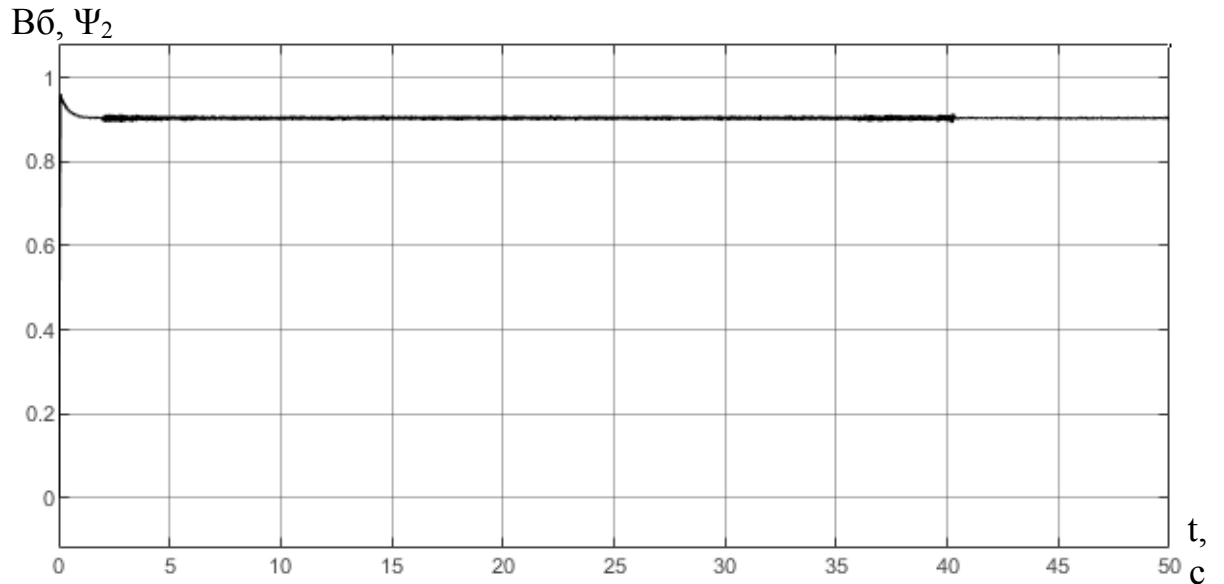


Рисунок 6.20 – График изменения потокосцепления ротора при разгоне до 25 км/ч

Произведем построение графиков переходных процессов электропривода при движении трамвая на ровном участке.

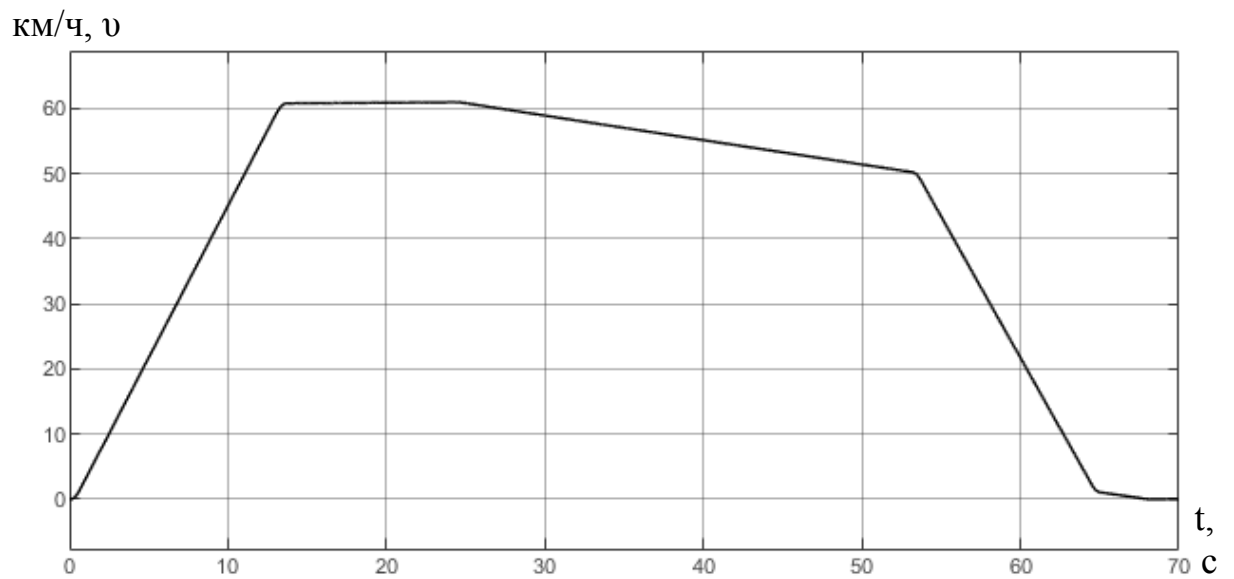


Рисунок 6.21 – График изменения линейной скорости трамвая при разгоне до 60 км/ч

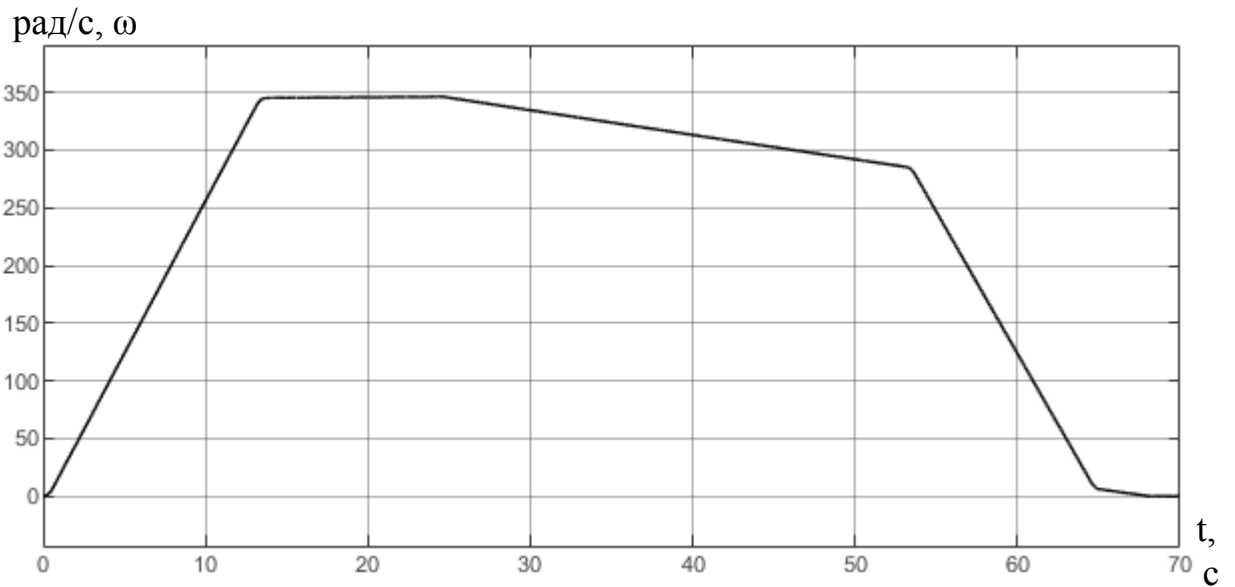


Рисунок 6.22 – График изменения угловой скорости двигателя при разгоне до 60 км/ч

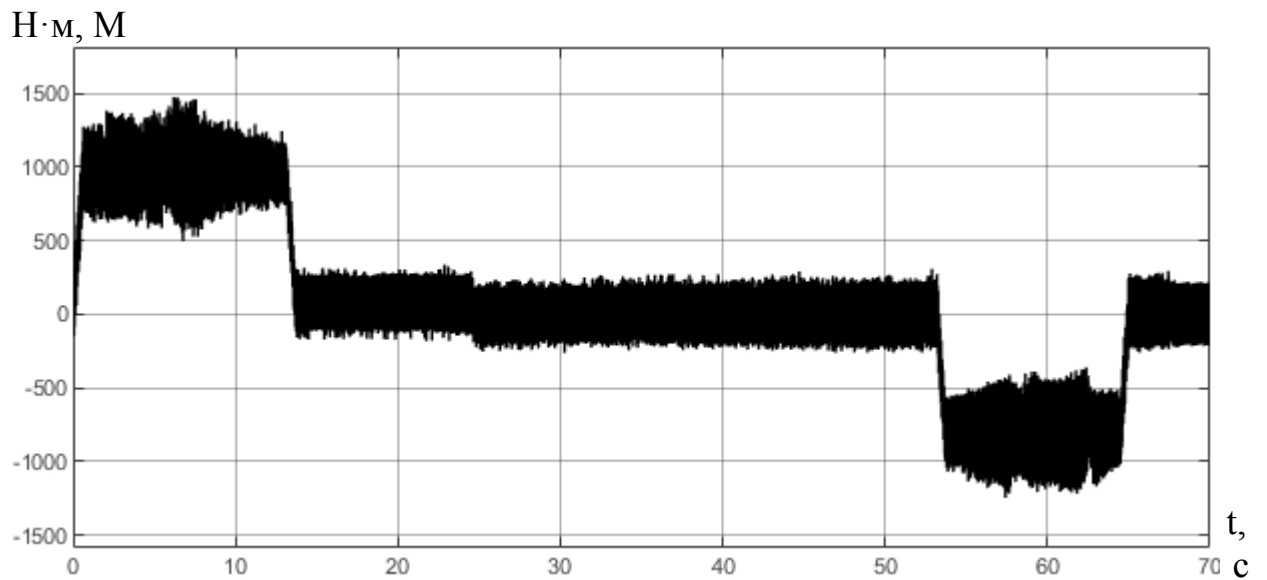


Рисунок 6.23 – График изменения электромагнитного момента двигателя при разгоне до 60 км/ч

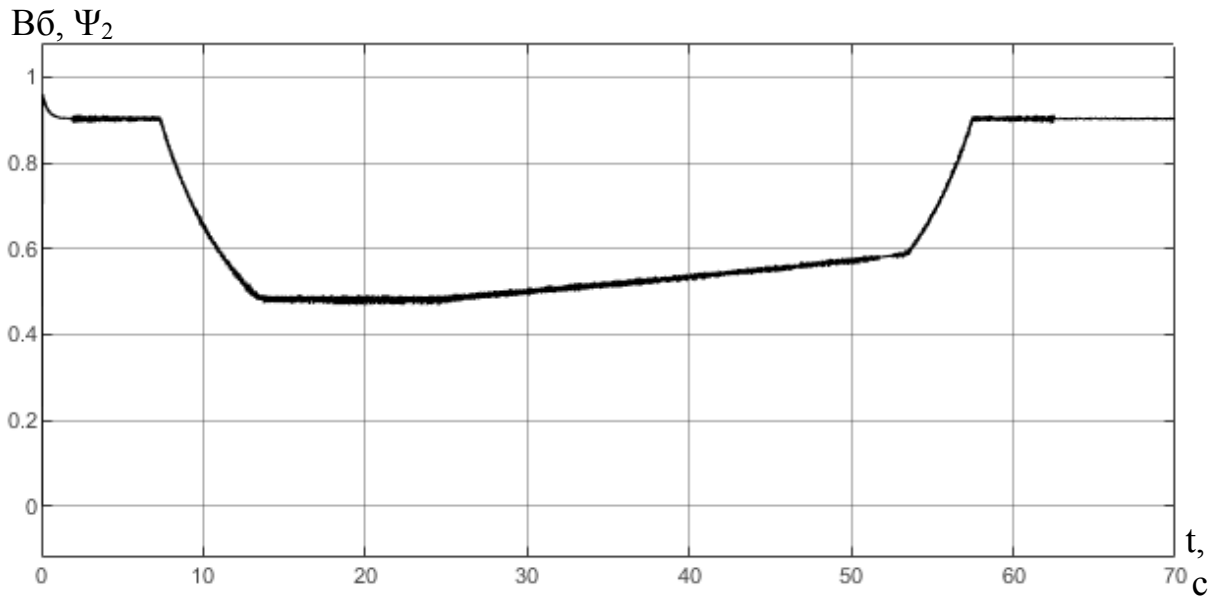


Рисунок 6.24 – График изменения потокосцепления ротора при разгоне до 60 км/ч

Исходя из требований к электроприводу произведем построение графиков переходных процессов электропривода при движении трамвая на ровном участке при полной загрузке с максимальной скоростью 75 км/ч.

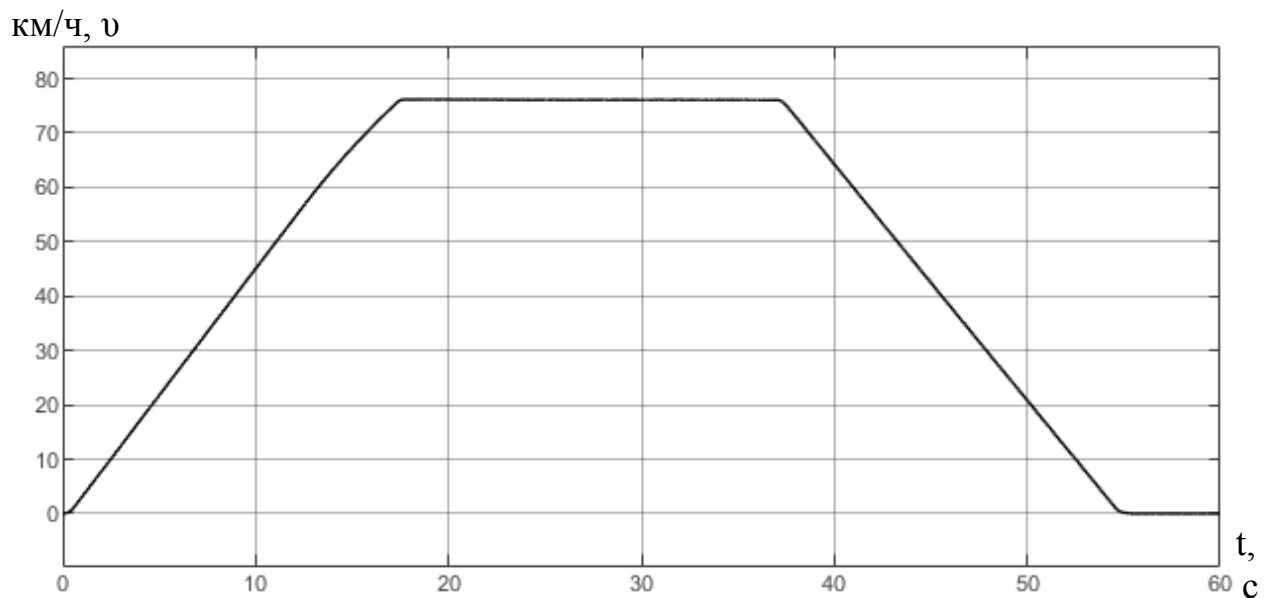


Рисунок 6.25 – График изменения линейной скорости трамвая при разгоне до 75 км/ч

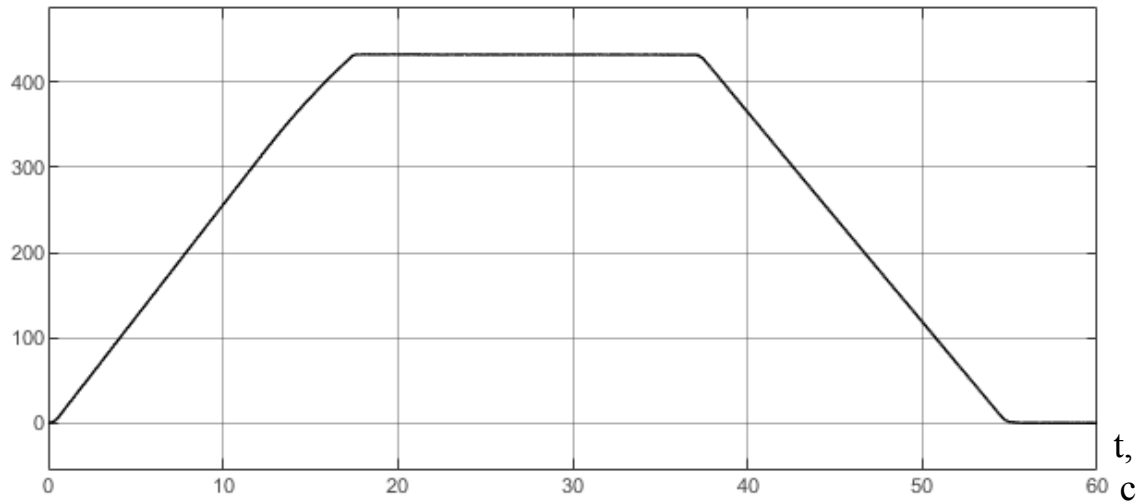
рад/с, ω 

Рисунок 6.26 – График изменения угловой скорости двигателя при разгоне до 75 км/ч

Н·м, М

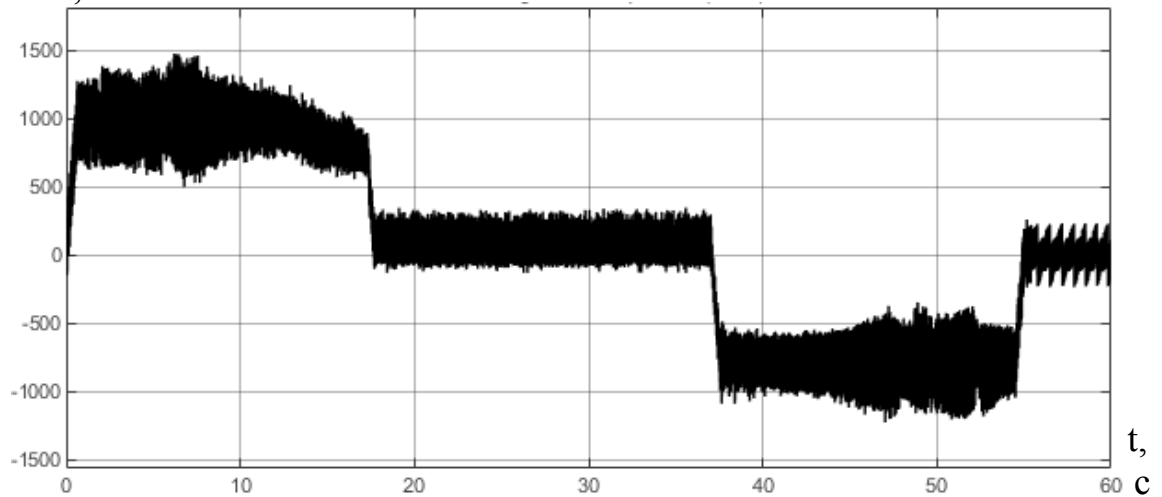


Рисунок 6.27 – График изменения электромагнитного момента двигателя при разгоне до 75 км/ч

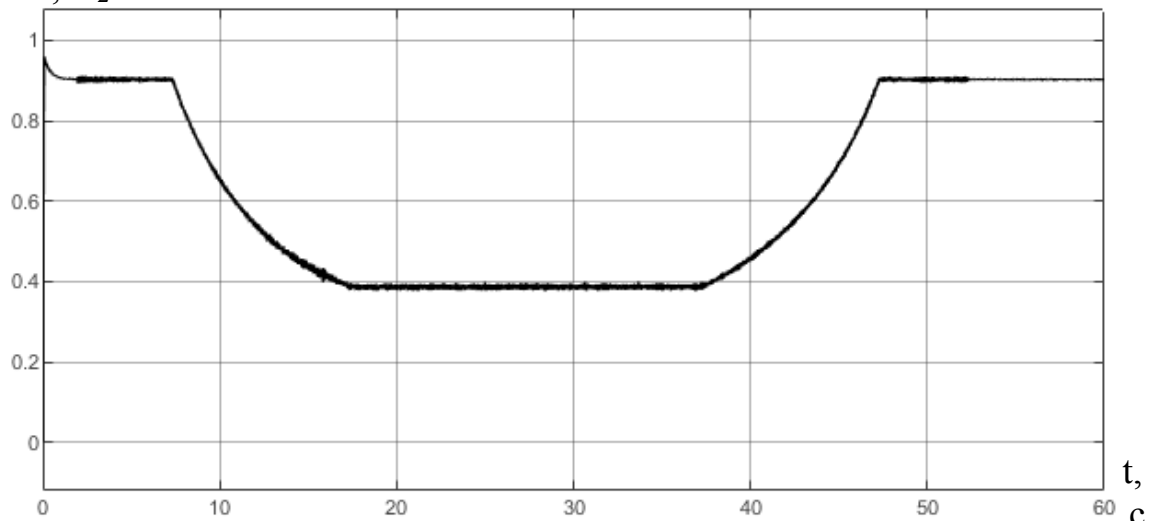
Вб, Ψ_2 

Рисунок 6.28 – График изменения потокосцепления ротора при разгоне до 75 км/ч

6.5 Сравнительный анализ полученных показателей качества с требованиями к электроприводу механизма

В соответствии с графиками переходных процессов, полученных в ходе моделирования системы электропривода трамвая, можно сравнить полученные показатели качества с требованиями к электроприводу механизма. Из графиков переходных процессов видно, что:

- 1) обеспечивается плавный пуск двигателя с ограниченным значением момента и ускорения;
- 2) ограничение рывка составляет $\rho = 1 м / с^3$;
- 3) разгон и торможение происходят с ускорением $a = 1,1 - 1,24 м / с^2$;
- 4) время разгона до скорости 60 км/ч с при полной загруженности на ровном участке менее 15 с, что объясняется наличием на входе системы задатчика интенсивности.;
- 5) обеспечивается движение трамвая на участке дороги с 4% подъемом со скоростью 25 км/ч и полной загруженностью;
- 6) обеспечивается движение трамвая на ровном участке дороги со скоростью 75 км/ч и полной загруженности;
- 7) обеспечивается плавное управление тормозным моментом при скорости более 5 км/ч.

Требования к быстродействию и по перерегулированию не предъявлялись, но по графикам переходных процессов видно, что время регулирования составляет не более 1,4 с, а перерегулирование по моменту и потоку составляет $\sigma \approx 4 \%$. Колебательность системы равна нулю, так как значения не превосходят 5% от установившегося режима.

Все показатели качества удовлетворяют требованиям, предъявленным к автоматизированному тяговому электроприводу трамвая.

7 ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ ВЫБОРА ДВИГАТЕЛЯ ПО МОЩНОСТИ

7.1 Построение точной нагрузочной диаграммы электропривода за цикл работы автоматизированного электропривода механизма

Для того чтобы окончательно проверить выбранный двигатель по нагреву и перегрузочной способности, необходимо построить уточнённую нагрузочные диаграммы электропривода при помощи модели, разработанной в разделах 5, 6.

Т.к. электродвигатель работает с ослаблением потока ротора, то момент двигателя уже не отражает нагрев. Поэтому проверку двигателя будем осуществлять по нагрузочной диаграмме тока статора.

Нагрузочная диаграмма тока статора для первого участка приведена на рисунке 7.1.

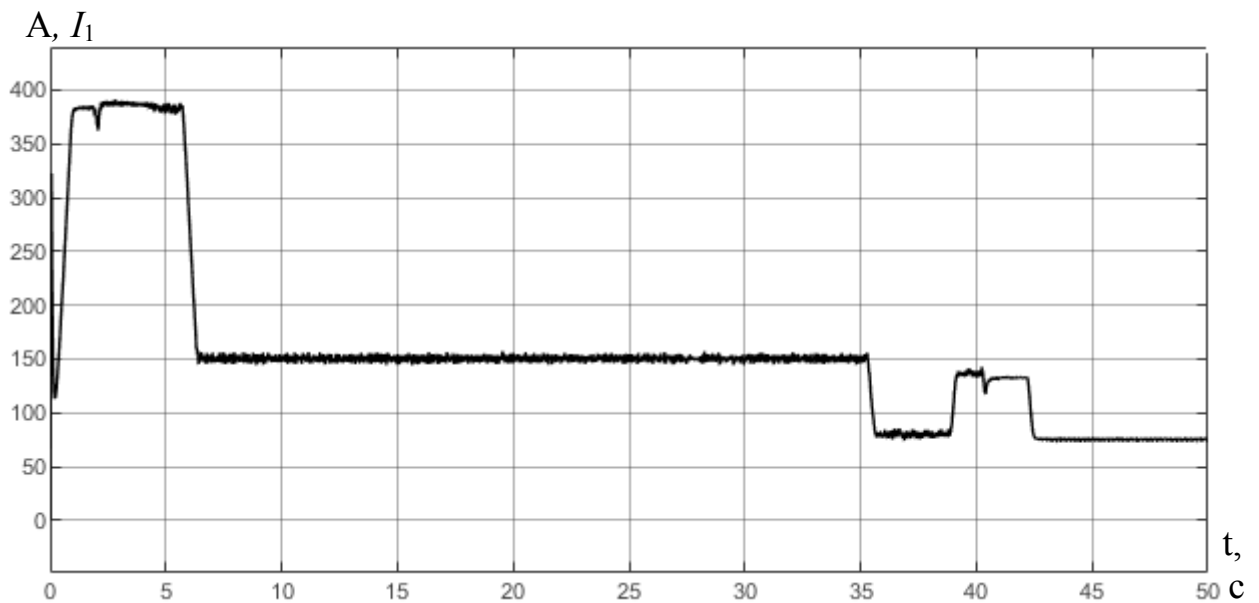


Рисунок 7.1 – Нагрузочная диаграмма тока для первого участка

Нагрузочная диаграмма тока статора для второго участка приведена на рисунке 7.2.

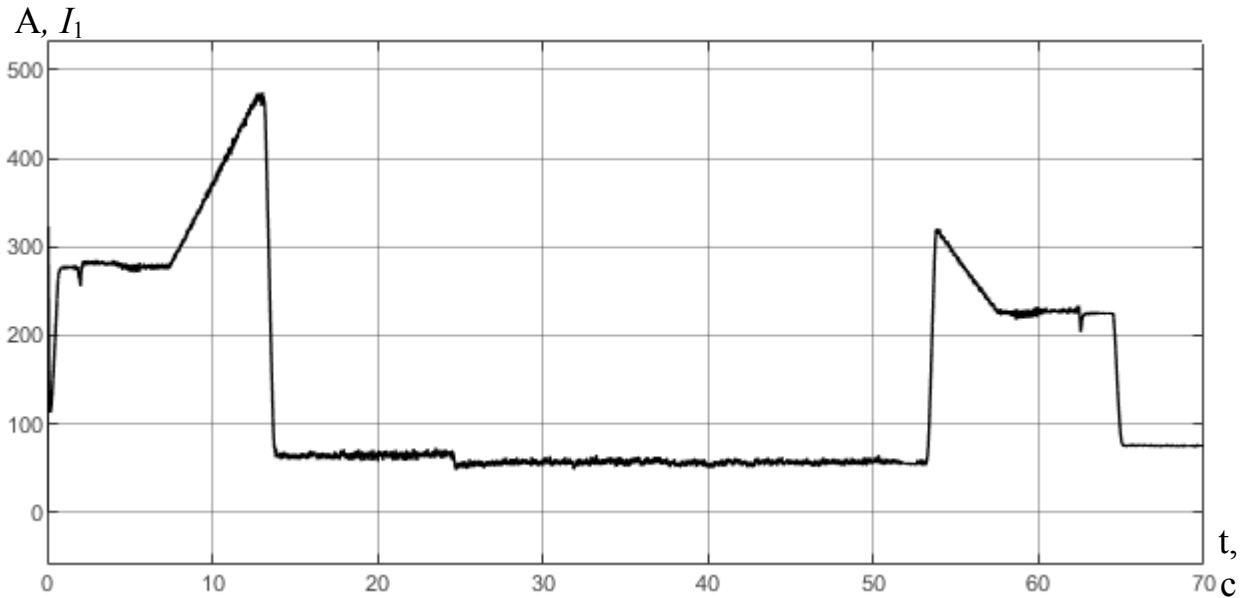


Рисунок 7.2 – Нагрузочная диаграмма тока для второго участка

7.2 Проверка электродвигателя по нагреву и перегрузочной способности электропривода по точной нагрузочной диаграмме механизма за цикл работы

Двигатель будет удовлетворять условиям нагрева, если соблюдается условие:

$$I_{\text{э}} \leq I_{\text{ном}}$$

Эквивалентный ток определяется по следующей формуле:

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\int I_1^2 dt}{t}},$$

где I_1 — действующее значение тока статора двигателя, определяется по формуле:

$$I_1 = \frac{\sqrt{ix^2 + iy^2}}{\sqrt{2}}.$$

Графики изменения эквивалентного тока приведены на рисунке 7.3 для первого участка цикла. Для второго участка моделирования изменения эквивалентного тока приведены на рисунке 7.4.

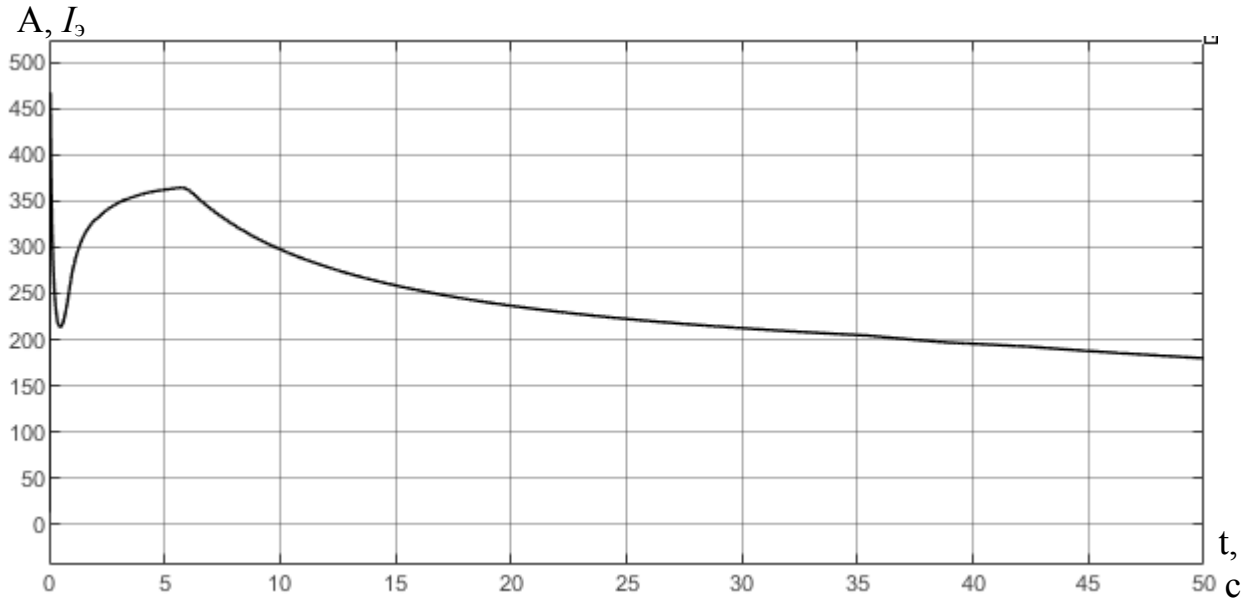


Рисунок 7.3 – График изменения эквивалентного тока для первого варианта

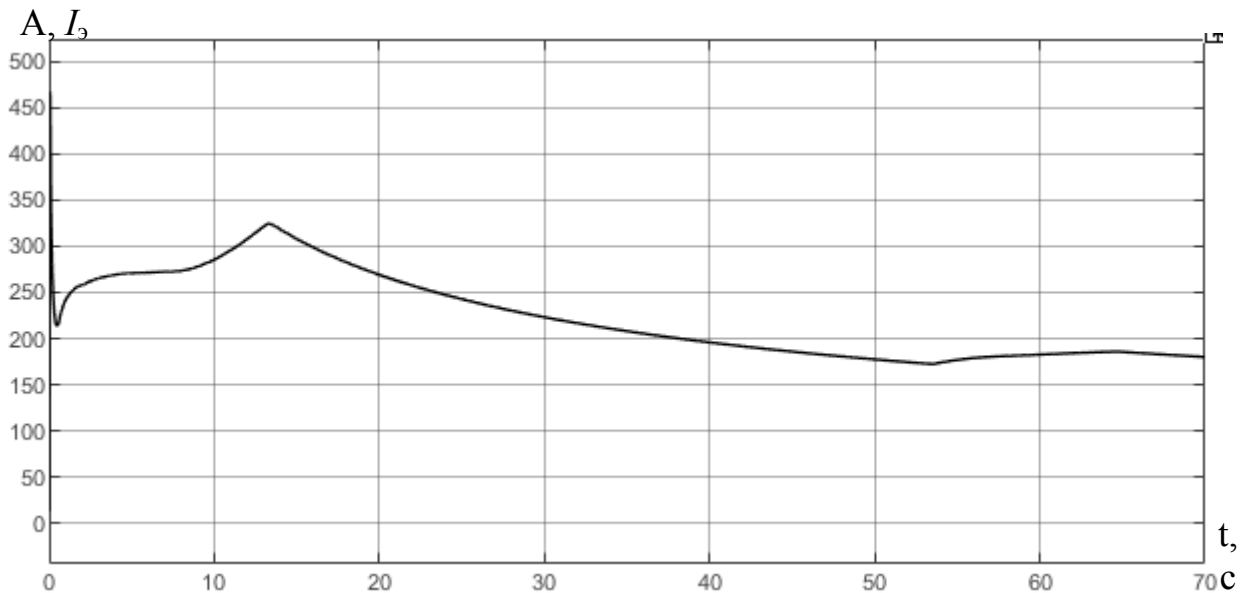


Рисунок 7.4 – График изменения эквивалентного тока для второго варианта

Полученные в ходе моделирования численные значения эквивалентного тока составляют 179,8А и 180А соответственно.

Сравним полученные значения эквивалентных токов с номинальным током $I_{\text{ном}} = 180\text{А}$:

$$179,8\text{А} \leq 180\text{А};$$

$$180\text{А} \leq 180\text{А}.$$

Следовательно, выбранный двигатель типа ТМР35-30-4 удовлетворяет условиям проверки по нагреву.

Условием проверки двигателя по перегрузочной способности является следующее условие:

$$M_{\text{макс,расч}} \leq M_{\text{макс,доп}} ,$$

где $M_{\text{макс,расч}}$ и $M_{\text{макс,доп}}$ – расчётное и каталожное значение максимального момента, $H \cdot m$:

$$M_{\text{макс,расч}} = 1394,37 \text{ Нм} < M_{\text{макс,доп}} = 2063 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

Условие соблюдается, электродвигатель будет удовлетворять условиям перегрузки.

8 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММИРУЕМОГО КОНТРОЛЛЕРА

8.1 Формализация условий работы промышленной установки

В разрабатываемой тяговой системе электропривода автоматизации подлежат включения и отключения, пусковой и тормозной режимы работы, а также реализация различных защит привода.

Для начала работы системы электропривода необходимо убедиться в исправности всего его оборудования. Источниками электроэнергии в трамвае являются контактная сеть, и аккумуляторная батарея. Запуск системы осуществляется подключением ПЛК и блока индикации к аккумуляторной батарее. После чего имеется возможность подключения тягового преобразователя к высокому напряжению. Для этого необходимо поднять пантограф, используя переключатель регулировки высоты пантографа, а затем включить главный автоматический выключатель. Подключение и отключение высокого напряжения должно осуществляться как в ручном режиме, так и в автоматическом режиме при недопустимом значении напряжения звена постоянного тока. При подключении высокого напряжения питание ПЛК осуществляется от преобразователя статического бортового, при этом, аккумуляторная батарея становится на подзарядку, которую также выполняет бортовой преобразователь.

Если двери в салоне открыты, то запрещается движение трамвая во избежание несчастных случаев. Так же запрещено движение при отсутствии водителя в кабине.

Для начала движения трамвая с помощью рукоятки реверсора необходимо выбрать режим «ВПЕРЁД» или «НАЗАД», при этом предусмотрена блокировка от одновременного выбора двух режимов.

8.2 Разработка алгоритма функционирования промышленной установки

Разрабатываемый алгоритм управления представляет собой совокупность правил выработки управляющих воздействий к исполнительным элементам объекта управления, учитывая сигналы внешних датчиков и команды, поступающие от водителя трамвая. Данные управляющие воздействия обеспечивают функционирование объекта управления с целью решения поставленной перед ним задачи.

Графически последовательность элементарных действий представим в виде блок-схем алгоритма управления, в целом представляющего различные варианты работы трамвая.

В таблицах 8.1 и 8.2 приведены соответственно входные и выходные сигналы, а также промежуточные сигналы используемые в системе автоматизации установки.

Таблица 8.1 – Перечень входных сигналов

Входные сигналы		
Функциональное назначение	Адрес	Устройство передачи
Сигналы о закрытии дверей	I0.1 - I0.8	Датчики дверей SQ1- SQ8
Педаля бдительности водителя	I0.9	Педаля бдительности SQ9
Автономный ход	I1.0	Кнопка SB1
Подключение к контактной сети	I1.1	Кнопка SB2
Включение остановочного тормоза	I1.2	Кнопка SB3
Разрешение движения «ВПЕРЕД»	I1.3	Переключатель SA1
Разрешение движения «НАЗАД»	I1.4	Переключатель SA1
Сигнал о недопустимом токе утечки	I1.5	УКТУ S1

Таблица 8.2 – Перечень выходных сигналов

Выходные сигналы		
Функциональное назначение	Адрес	Устройство приёма
Вкл./откл. высокого напряжения	Q0.1	Выключатель QF2
Автономный ход	Q0.2	Преобразователь UZ1
Стояночный тормоз	Q0.3	Преобразователь UZ1
Движение вперёд	Q0.4	Преобразователь UZ1
Движение назад	Q0.5	Преобразователь UZ1

Реализацию программы управления обеспечим на языке релейно-контакторных схем (РКС), который представляет собой совокупность инструкций, представленных в виде символов РКС. Этот язык основан на методике проектирования схем электроавтоматики с аппаратной реализацией на основе реле, контакторов, бесконтактных логических элементов.

По описанию работы установки, приведенной в пункте 8.1, можно составить алгоритм программы управления. Разработанный алгоритм системы автоматизации в соответствии с формализованным режимом работы, приведен на рисунке 8.1.

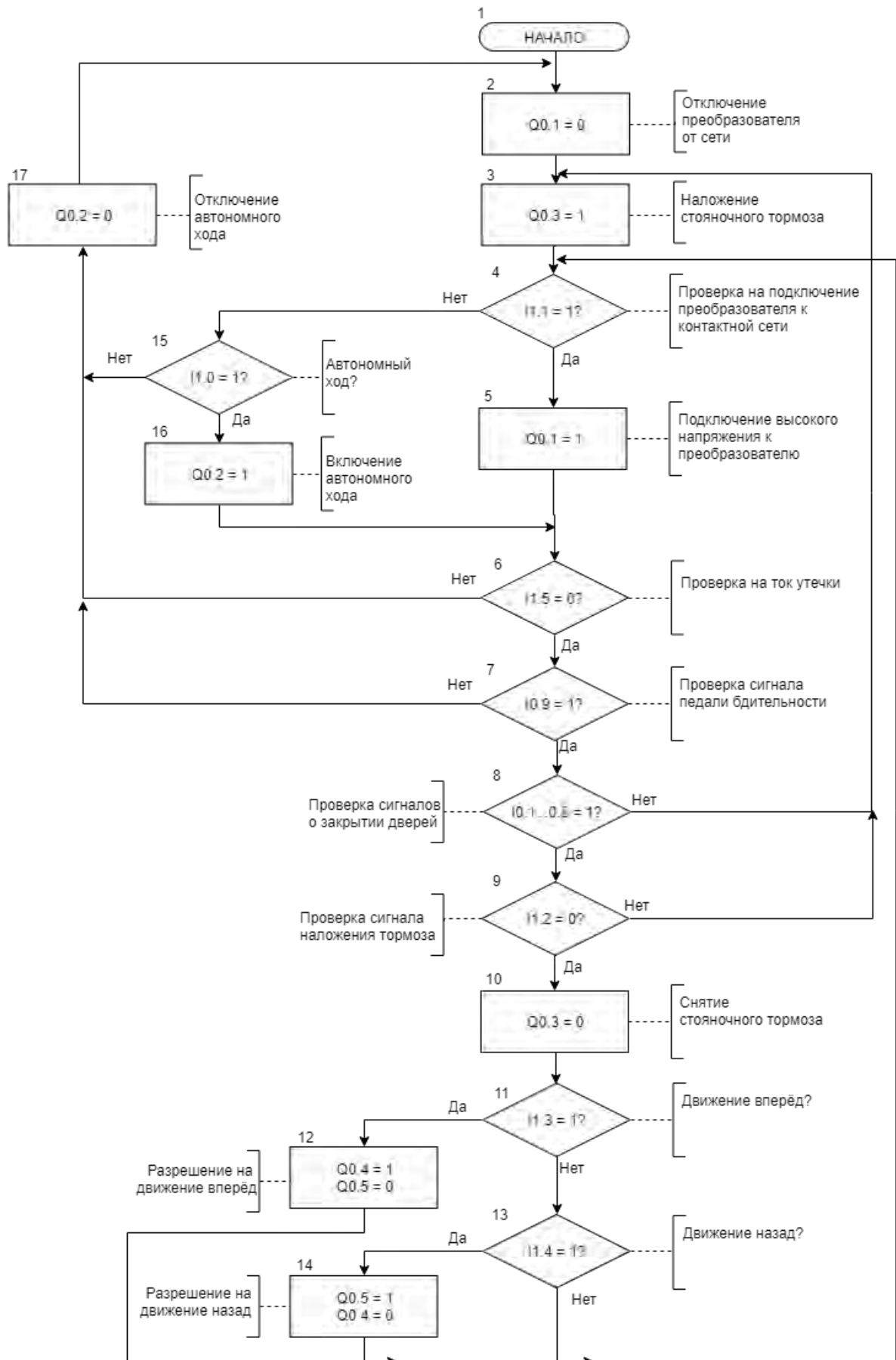


Рисунок 8.1 – Блок-схема алгоритма управляющей программы

8.3 Проектирование релейно-контакторной схемы системы автоматизации и описание её работы. Разработка программы управления для программируемого контроллера

На основании алгоритма и таблицы описания сигналов из раздела 8.2 составлена релейно-контакторная схема системы автоматизации установки.

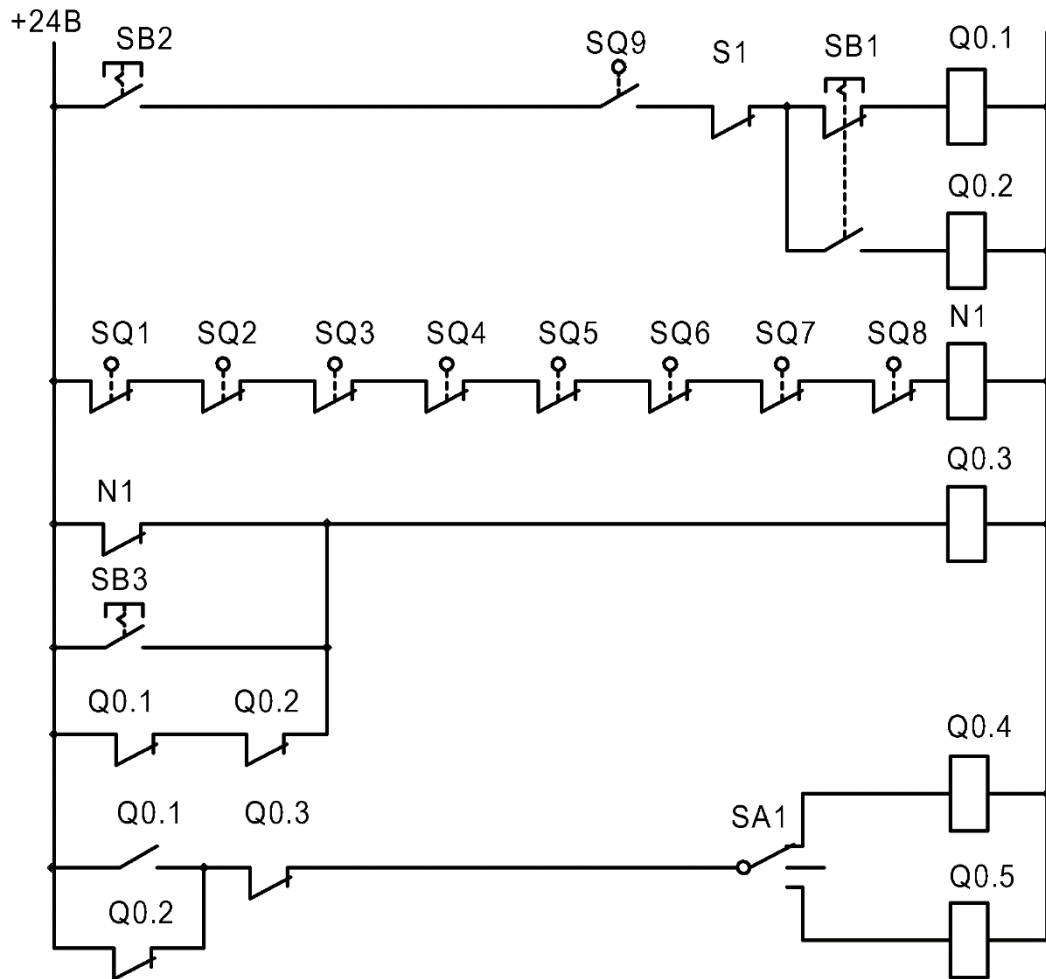


Рисунок 8.2 – Релейно-контакторная схема системы автоматизации

В современных системах аналоговые реле давно вытеснены цифровыми логическими микроконтроллерами. Контроллер позволяет в текстовом или графическом виде написать программу управления технологическим процессом любой сложности. Язык релейных схем является самым распространённым языком программирования логических контроллеров. Программа на языке релейной логики имеет наглядный и интуитивно понятный инженерам-электрикам графический интерфейс,

представляющий логические операции, как электрическую цепь с замкнутыми и разомкнутыми контактами. Протекание или отсутствие тока в этой цепи соответствует результату логической операции (истина — если ток течёт; ложь — если ток не течёт). Программа управления, составленная по алгоритму из раздела 8.2 и написанная на языке релейных схем, представлена на рисунке 8.3.

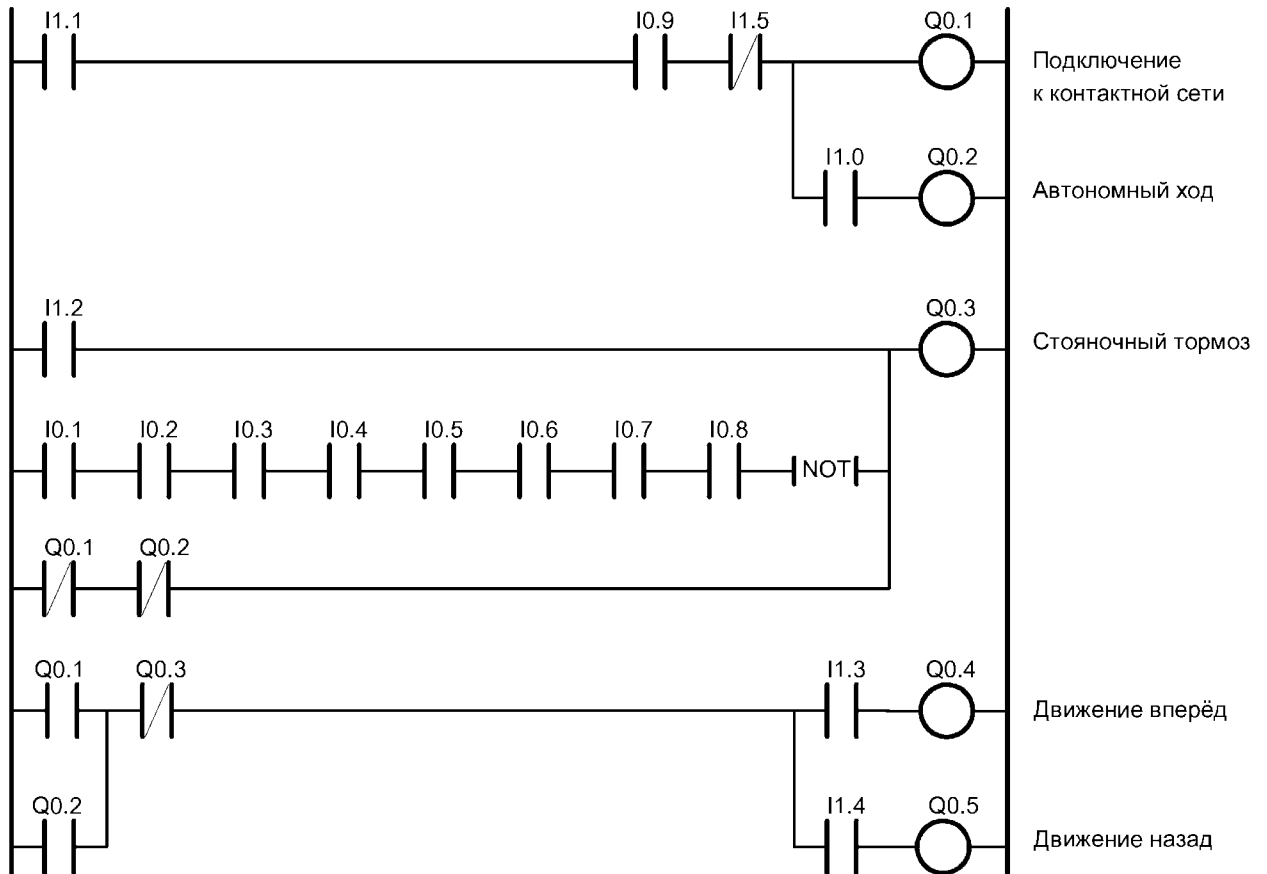


Рисунок 8.3 – Программа управления на языке релейных схем для микроконтроллера

8.4 Проектирование функциональной схемы системы автоматизации

Функциональная схема автоматизации является одним из основных проектных документов, определяющих функциональную структуру и объем автоматизации технологических установок и отдельных агрегатов промышленного объекта.

На основе описания работы установки и составленного алгоритма управляющей программы спроектируем функциональную схему системы автоматизации трамвая, которая представлена на рисунке 8.4.

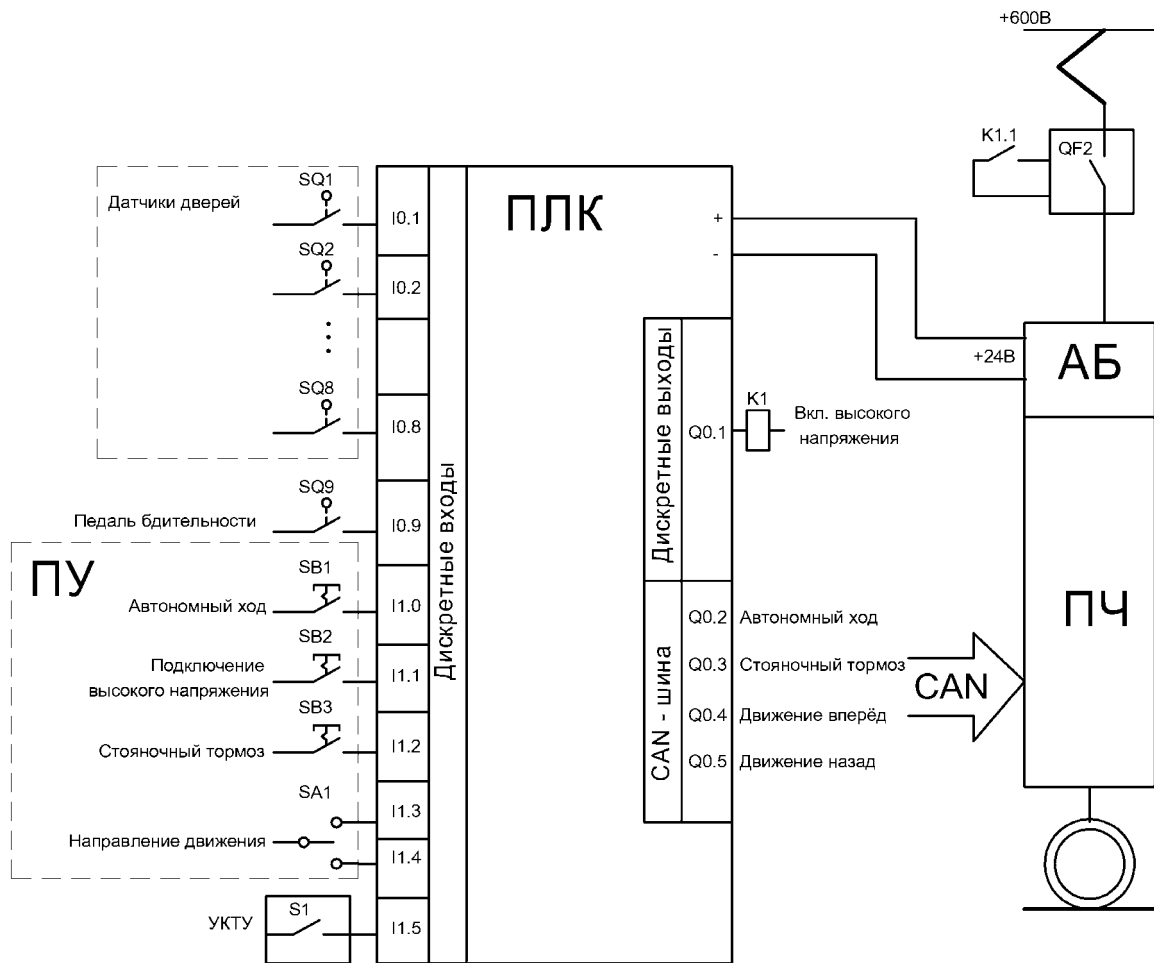


Рисунок 8.4 – Функциональная схема системы автоматизации

На функциональной схеме системы автоматизации приняты следующие обозначения:

АБ – аккумуляторная батарея;

ПЛК – программируемый логический контроллер;

ПЧ – преобразователь частоты;

УКТУ – устройство контроля тока утечки;

ПУ – панель управления.

С панели управления ПУ, которая размещается в кабине водителя трамвая, посредством кнопок, осуществляется запуск установки. Соответствующие сигналы поступают на дискретные входы ПЛК. После

обработки входных сигналов, ПЛК своими дискретными выходными сигналами или CAN - шиной управляет автоматизированной установкой.

8.5 Выбор аппаратов системы автоматизации

Программируемый логический контроллер является базовой системой автоматизации высокого уровня всей промышленной установки и связан с преобразователем частоты протоколом CAN. В качестве программируемого контроллера выбираем контроллер фирмы Omron CP1L [20]. Контроллер серии CP1 – это универсальное, простое и удобное средство для автоматизации установок с числом локальных дискретных сигналов до 320. Из широкого модельного ряда этой серии всегда можно выбрать оптимальную модель под конкретную задачу автоматизации.

Программируемые контроллеры Omron CP1L имеют модульную конструкцию и состоят из таких элементов: модули цифровых вводов/выводов, аналоговых вводов/выводов, модули датчиков температуры, устройства связи.

В качестве базового центрального устройства выбираем модуль CP1L-EM30DR-D содержащий 18 цифровых вводов и 12 выводов и встроенным блоком питания.

Таблица 8.3 – Технические характеристики центрального модуля

Тип модуля	CP1L-EM30DR-D
Количество цифровых входов	18
Количество цифровых выходов	12
Количество релейных выходов	12
Напряжение питания постоянного тока	20,4...26,4 В
Объем памяти	450 кБайт

Для связи с тяговыми преобразователями выбираем модуль связи CPM1A-PRT21, основные характеристики которого приведены в таблице 5.4.

Таблица 8.4 – Технические характеристики модуля связи

Тип модуля	CPM1A-PRT21
Интерфейс	CAN
Максимальное число устройств	40

Далее нужно выбрать промежуточные реле, которые будут своими контактами коммутировать цепи управления. Выбираем промежуточные реле RP-403DL [21]. Основные технические характеристики промежуточного реле приведены в таблице 8.5.

Таблица 8.5 – Технические характеристики реле RP-403DL

Напряжение питания	+24 В
Номинальный ток контактов	5 А
Номинальное напряжение коммутации контактов	+30 В

Для ввода информации о состоянии дверей выберем концевые выключатели Omron серии D4N [22].

Таблица 8.6 – Технические характеристики конечных выключателей Omron серии D4N

Рабочая частота максимальная	30 операций/мин
Прочность механическая минимальная	15 млн операций
Ток короткого замыкания	100 А (EN60947-5-1)
Уровень защиты	IP67

Кнопки выбираем фирмы Omron A22N/NS [23, 24], максимальный ток через кнопку при 24В составляет 1А.

8.6 Проектирование схемы электрической соединений системы автоматизации

На схеме электрических соединений изображают все электрические элементы или устройства, необходимые для осуществления и контроля заданных электрических процессов, все электрические связи между ними, а также электрические элементы (соединители, зажимы и т. п.), которыми заканчиваются входные и выходные цепи.

На схеме электрических соединений в общем случае приводят:

- первичные приборы и исполнительные механизмы, установленные непосредственно на технологическом оборудовании и коммуникациях;
- щиты, пульты, комплексы технических средств;
- внешние электрические и трубные проводки.

Схема электрическая соединений системы автоматизации моторной тележки представлена на рисунке 8.4.

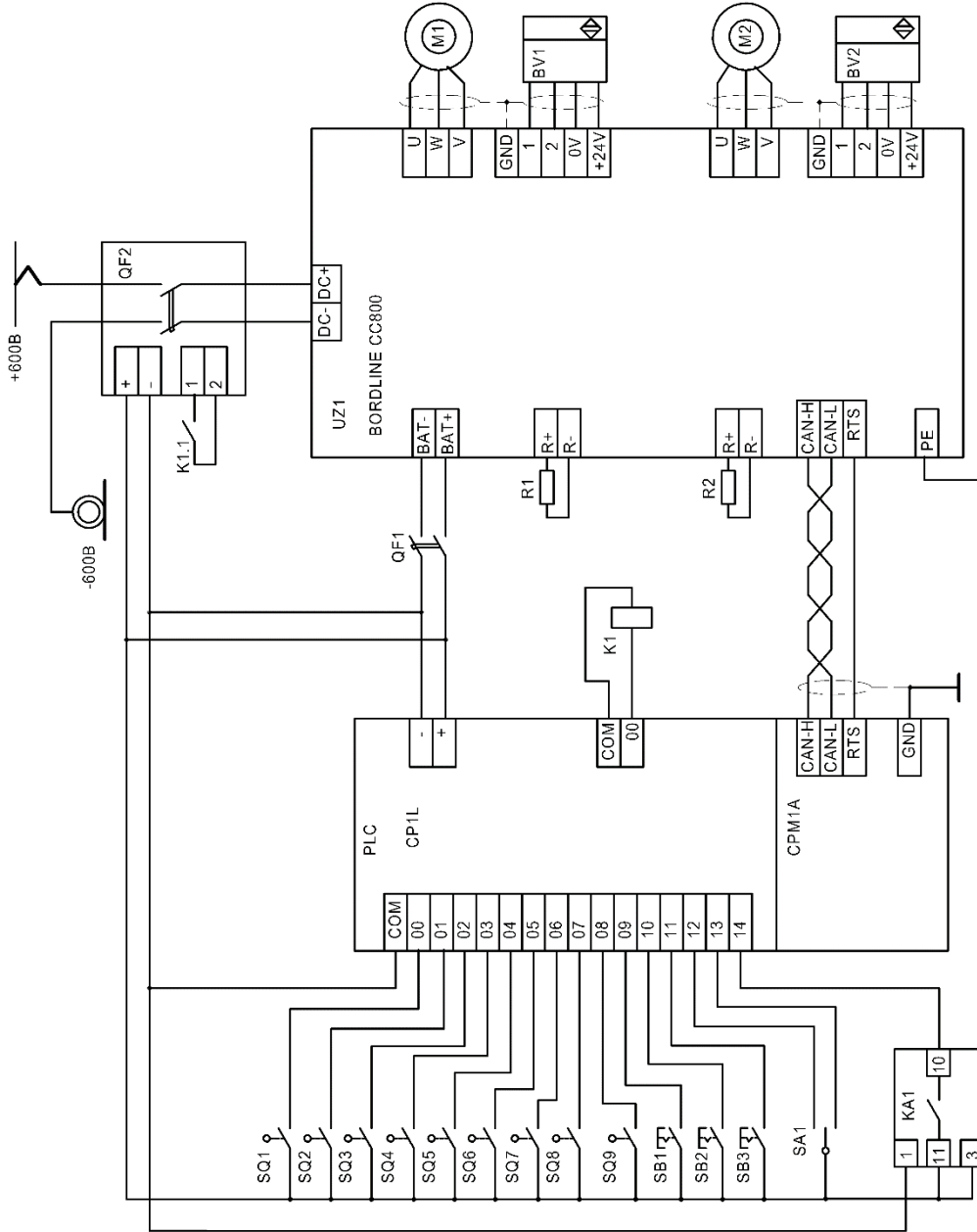


Рисунок 8.4 – Схема электрическая соединений систем автоматизации тележки трамвая

8.7 Полное описание функционирования системы автоматизации

При включении автоматического выключателя QF1 происходит подключение цепей управления к встроенной в преобразователь аккумуляторной батарее. После поднятия пантографа преобразователь через быстродействующий выключатель QF2 подключается к высокому напряжению. При нажатии SB2 происходит запитывание катушки реле K1, срабатывает его нормально разомкнутый контакт K1.1 в цепи управления QF2. Происходит включение QF2, и на преобразователь поступает высокое напряжение. Отключение QF2 осуществляется, если напряжение контактной сети превысит 850В, либо сработает одна из защит. Кнопкой SB2 можно отключить преобразователь от напряжения. Так же получает питание, встроенный в UZ1, преобразователь статический бортовой, который заряжает аккумуляторную батарею. После подключения силовых цепей можно выбрать направление движения трамвая трёхпозиционным переключателем SA1 (вперёд, нейтраль, назад). От программируемого контроллера по CAN-шине на тяговый преобразователь передаётся сигнал о выборе направления, тем самым разрешая электроприводу движение вперёд или назад соответственно. Режим автономного хода возможен при отключенном высоком напряжении. При нажатии кнопки SB1 программируемый контроллер по CAN передаёт команду на переключение цепей питания тяговых модулей на аккумуляторную батарею напряжением +48В. Для начала движения необходимо снять стояночный тормоз трамвая кнопкой SB3. Также необходимо чтобы были закрыты все пассажирские двери, за которые отвечают конечные выключатели SQ1-SQ9, и была зажата педаль бдительности водителя, за которую отвечает конечный выключатель SQ9. В противном случае трамвай не снимется со стояночного тормоза. Стояночный тормоз так же может быть активирован повторным нажатием кнопки SB3. Устройство КА1 предназначено для контроля токов утечек в электрических цепях трамвая, отключая трамвай от высокого напряжения контактной цепи.

9 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКИ

9.1 Выбор аппаратов, проводов и кабелей

Для надежной и бесперебойной работы электроустановки необходим правильный выбор аппаратов системы электроснабжения. Автоматический выключатель (АВ) предназначен для отключения электрических цепей при аварийных режимах работы установки: коротком замыкании, перегрузках.

Для подключения цепей управления к аккумуляторной батарее выбираем автоматический выключатель DZ47-60 с техническими характеристиками, приведенными в таблице 9.1 [25].

Таблица 9.1 – Технические характеристики DZ47-60

Номинальное напряжение изоляции	500 В
Номинальный рабочий ток	32 А
Количество полюсов	2р

Для подключения тягового преобразователя к высокому напряжению выбираем АВ с дистанционным управлением ВБ-11/1-400/6-У1 с техническими характеристиками, приведенными в таблице 9.2 [26].

Таблица 9.2 – Технические характеристики ВБ-11/1-400/6-У1

Номинальное напряжение	600 В
Номинальный рабочий ток	400 А
Диапазон изменения напряжения главной цепи	400...720 В
Пределы токов уставки	400...1220 А
Количество полюсов	2р

В связи с тем, что питание цепей трамвая осуществляется от контактной сети напряжением 600 В, всякое ухудшение или нарушение изоляции токоведущих частей может вызвать появление на корпусе трамвая некоторого потенциала по отношению к земле. От этого потенциала зависит

величина тока утечки. Согласно СТБ 1841-2009 «Трамваи. Требования к техническому состоянию. Методы проверки» [27] величина тока утечки с кузова трамвая на землю должна составлять не более 3 мА при заземленной системе питания или не более 1,5 мА при изолированной системе питания. Запрещается эксплуатировать трамвай, не оборудованный бортовым прибором тока утечки.

В качестве устройства контроля тока утечки выбираем ПКТУ-1 с техническими характеристиками, приведенными в таблице 9.3 [28].

Таблица 9.3 – Технические характеристики ПКТУ-1

Контроль и индикацию превышения порогового значения тока утечки: – для первого порога: – для второго порога:	1,0 мА 3,0 мА
Погрешность	< 3%
Время срабатывания приборов	не более 100 мс
Питание от аккумуляторной батареи	(15 – 40) В

Произведем выбор провода для подключения двигателя.

Номинальный ток двигателя составляет 180А. Плотность тока, протекающего по проводу, примем $j = 5 \text{ А/мм}^2$. Тогда необходимое сечение провода составляет:

$$S = \frac{I_{ном}}{j} = \frac{180}{5} = 36 \text{ мм}^2.$$

Выбираем провод ПВЗнг(А)-LS [29] с номинальным сечением жил 50мм². Данный провод обладает поливинилхлоридной изоляцией и предназначен для электрооборудования, машин, механизмов и станков с номинальным напряжением до 450 В и частотой до 400 Гц или постоянным напряжением до 1000 В.

10 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

10.1 Схема электрическая принципиальная автоматизированного электропривода

Схема электрическая принципиальная – это графическое изображение, служащее для передачи с помощью условных графических и буквенно-цифровых обозначений связей между элементами электрического устройства, дающее детальное представление о принципе работы изделия. Схемы выполняют без соблюдения масштаба, действительное пространственное расположение составных частей изделия (установки) не учитывают или учитывают приближенно. Условные графические обозначения (УГО) элементов, устройств, функциональных групп и соединяющие их линии взаимосвязи следует располагать на схеме таким образом, чтобы обеспечивать наилучшее представление о структуре изделия и взаимодействии его составных частей. Допускается располагать УГО на схеме в том же порядке, в котором они расположены в изделии, при условии, что это не нарушит удобочитаемость схемы. При наличии в изделии нескольких одинаковых элементов (устройств, функциональных групп), соединенных параллельно, допускается вместо изображения всех ветвей параллельного соединения изображать только одну ветвь, указав количество ветвей при помощи обозначения ответвления. Схемы допускается выполнять в пределах условного контура, упрощенно изображающего конструкцию изделия. В этих случаях условные контуры выполняют линиями, равными по толщине линиям взаимосвязи. Допускается контур изделия выполнять более тонкими линиями.

Схема электрическая принципиальная приведена на рисунке 10.1.

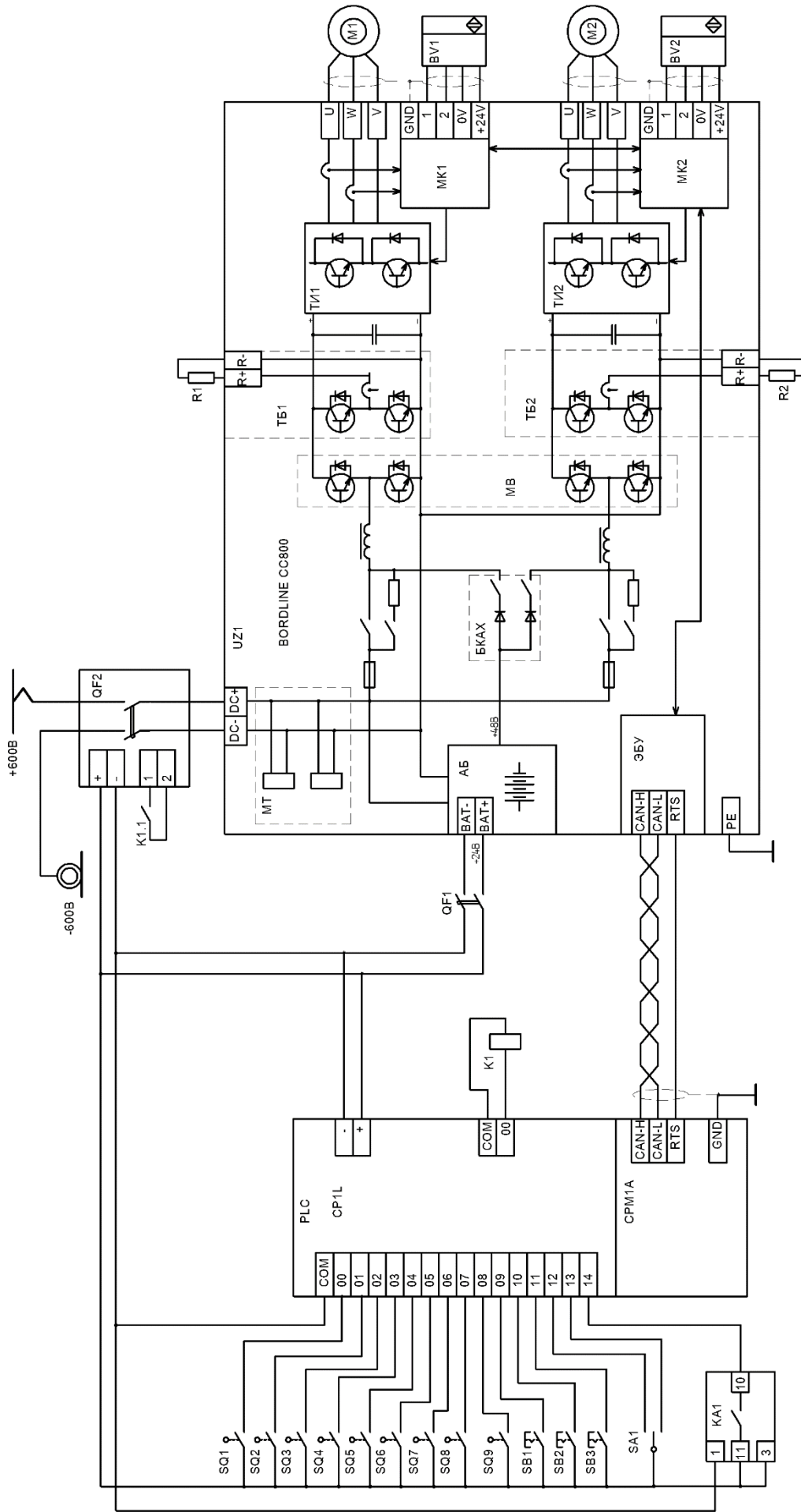


Рисунок 10.1 – Схема электрическая принципиальная автоматизированного электропривода тележки трамвая

10.2 Составление перечня элементов электрооборудования электроустановки

Перечень элементов электрооборудования для одной тележки трамвая приведён в таблице 10.1.

Таблица 10.1 – Перечень элементов электрооборудования установки

Поз.обозн.	Наименование	Кол	Примечание
	<u>ПЛК</u>		
A1	Omron CP1L-EM30DR-D	1	
A2	Omron CPM1A-PRT21	1	
	<u>Датчики</u>		
BV1,BV2	Lenord Bauer GEL 247	2	
KA1	ПКТУ-1	1	
	<u>Промежуточные реле</u>		
K1	RP-403DL	1	
	<u>Электродвигатели</u>		
M1,M2	TMR35-30-4	2	
	<u>Автоматические выключатели</u>		
QF1	DZ47-60	1	
QF2	ВБ-11/1-400/6-У1	1	
	<u>Тормозные резисторы</u>		
R1,R2	КФ-38В1 У2	2	

Окончание таблицы 10.1

Поз.обозн.	Наименование	Кол	Примечание
	<u>Кнопочные выключатели</u>		
SA1	Omron A22NS/W	1	
SB1-SB3	Omron A22N	3	
	<u>Конечные выключатели</u>		
SQ1-SQ9	Omron D4N	9	
	<u>Преобразователи энергии</u>		
UZ1	ABB BORDLINE CC800	1	

10.3 Полное описание функционирования схемы электрической принципиальной автоматизированного электропривода

При включении автоматического выключателя QF1 происходит подключение цепей управления к встроенной в преобразователь аккумуляторной батарее. После поднятия пантографа трамвай через отключенный быстродействующий выключатель QF2 подключается к высокому напряжению. Нажатием кнопки SB2, если не сработала ни одна из защит, происходит запитывание катушки реле K1, срабатывает его нормально разомкнутый контакт K1.1 в цепи управления QF2. Происходит включение QF2, и на преобразователь поступает высокое напряжение. Отключение QF2 осуществляется, если напряжение контактной сети превысит 850В, либо сработает одна из защит, а также высокое напряжение можно отключить повторным нажатием кнопки SB2. Так же получает питание, встроенный в UZ1, преобразователь статический бортовой, который заряжает аккумуляторную батарею. После подключения силовых цепей можно выбрать направление движения трамвая трёхпозиционным переключателем SA1 (вперёд, нейтраль, назад). При коммутации SA1 от программируемого

контроллера по CAN-шине на тяговый преобразователь передаётся сигнал о выборе направления, тем самым разрешая электроприводу движение вперёд или назад соответственно. Режим автономного хода возможен при отключенном высоком напряжении. При нажатии кнопки SB1 программируемый контроллер по CAN передаёт команду на переключение цепей питания тяговых модулей на аккумуляторную батарею напряжением +48В. Для начала движения необходимо снять стояночный тормоз трамвая кнопкой SB3. Также необходимо чтобы были закрыты все пассажирские двери, за которые отвечают конечные выключатели SQ1-SQ9, и была зажата педаль бдительности водителя, за которую отвечает конечный выключатель SQ9. В противном случае будет активирован магниторельсовый тормоз МТ. Тормоз так же может быть активирован повторным нажатием кнопки SB3. Устройство КА1 предназначено для контроля токов утечек в электрических цепях трамвая. В случае возникновения таких токов контакт КА1 замыкается, и срабатывает защита, отключающая трамвай от высокого напряжения контактной цепи.

11 ОХРАНА ТРУДА

11.1 Требования к электротехническому персоналу обслуживающему электрооборудование трамвая

Электротехнологический персонал производственных цехов и участков, не входящих в состав энергослужбы предприятия, осуществляющий эксплуатацию электротехнологических установок и имеет группу по электробезопасности II и выше, в своих правах и обязанностях приравнивается к электротехническому и подчиняется в техническом отношении энергослужбе предприятия [30].

Электротехнический персонал, имеющий по электробезопасности II—V группу включительно, должен быть: старше 18 лет; годен по состоянию здоровья; прошедший подготовку и проверку знаний; имеющий удостоверение на допуск к работам в электроустановках.

Учащимся и студентам, не достигшим 18-летнего возраста, разрешается находиться в действующих электроустановках только под постоянным надзором лица из электротехнического персонала с группой по электробезопасности не ниже III — в установках напряжением до 1000 В и не ниже IV — в установках напряжением выше 1000 В по ТКП 181 – 2009 [31].

Медицинское освидетельствование электротехнического персонала осуществляется при приеме на работу и периодически в установленные сроки. От медицинского освидетельствования распоряжением по предприятию освобождается административно-технический персонал, не принимающий непосредственного участия в оперативных переключениях, ремонтных, монтажных и наладочных работах в электроустановках и не организующий их.

До назначения на самостоятельную работу или при переходе на другую работу (должность), связанную с эксплуатацией электроустановок, а также при перерыве в работе в качестве электротехнического персонала свыше

одного года персонал обязан пройти производственное обучение на новом месте работы.

Персоналу предоставляется срок, достаточный для приобретения практических навыков, ознакомления с оборудованием, аппаратурой и одновременного изучения в необходимом для данной должности объеме: правил эксплуатации электроустановок потребителей; правил устройства электроустановок; производственных (должностных и эксплуатационных) инструкций; инструкций по охране труда; дополнительных правил, нормативных и эксплуатационных документов, действующих на данном предприятии.

Обучение проводится по утвержденной программе под руководством опытного работника из электротехнического персонала данного предприятия или вышестоящей организации.

Прикрепление обучаемого к обучающему его работнику с указанием срока обучения оформляется приказом или распоряжением в установленном порядке. Обучаемый может производить оперативные переключения, осмотры или иные работы в электроустановке только с разрешения и под надзором обучающего. Ответственность за правильность действий обучаемого и соблюдение им правил технической эксплуатации электроустановок потребителей (ТКП 181-2009), а также правил техники безопасности несут обучающий и сам обучаемый.

По окончании производственного обучения обучаемый должен пройти проверку знаний в квалификационной комиссии.

После проверки знаний работник из оперативного и оперативно-ремонтного персонала проходит стажировку на рабочем месте продолжительностью не менее 12 рабочих дней под руководством опытного работника, после чего допускается к самостоятельной оперативной работе. Допуск к стажировке и самостоятельной работе осуществляется для инженерно-технических работников распоряжением по предприятию, для рабочих — распоряжением по цеху.

Периодическая проверка знаний персонала производится в следующие сроки: один раз в год — для электротехнического персонала, непосредственно обслуживающего действующие электроустановки или проводящего в них наладочные, электромонтажные, ремонтные работы или профилактические испытания, а также для персонала, оформляющего распоряжения и организующего эти работы; один раз в три года — для ИТР, не относящихся к предыдущей группе.

Лица, допустившие нарушение ТКП 181-2009, должны подвергаться внеочередной проверке знаний. Проверка знаний должна производиться в комиссии (не менее трех человек) того предприятия, на котором работает проверяемый (за исключением командированного персонала и лиц, упомянутых в Правилах).

Проверка знаний каждого работника производится и оформляется индивидуально (в журнале установленной формы). Работнику, успешно прошедшему проверку знаний, выдается удостоверение установленной формы с присвоением группы (II—V) по электробезопасности. Удостоверение дает право на обслуживание электроустановок в качестве административно-технического с правами оперативного, ремонтного или оперативно-ремонтного персонала; в качестве оперативного, ремонтного, оперативно-ремонтного, а также электротехнического персонала с группой по электробезопасности II и выше. Если проверяемый одновременно прошел проверку знаний на право выполнения специальных работ, то об этом делается отметка в журнале проверки знаний и в графе удостоверения «Свидетельство на право ведения специальных работ».

Инженеры по технике безопасности, контролирующие электроустановки, должны проходить проверку знаний в объеме IV группы по электробезопасности в той же комиссии, что и лицо, ответственное за электрохозяйство. При этом им выдается удостоверение на право инспектирования электроустановок данного предприятия [32].

11.2 Меры безопасности при эксплуатации и обслуживании электродвигателей

На электродвигателях и на приводимых ими механизмах должны быть нанесены стрелки, указывающие направление вращения механизма и двигателя. На пускорегулирующих устройствах должны быть отмечены положения «Пуск» и «Стоп». При кнопочном включении и отключении оборудования и механизмов, кнопки включения должны быть заглублены на 3—5 мм за габариты пусковой коробки. Выключатели, контакторы, магнитные пускатели, рубильники, пускорегулирующие устройства и т.п., а также предохранители должны иметь надписи, указывающие, к какому электродвигателю они относятся. Выводы статорной и роторной обмоток и кабельной воронки должны быть закрыты ограждениями. Вращающиеся части машин – шкивы, муфты, вентиляторы, открытые части валов, должны быть закрыты ограждениями, снятие которых во время работы электродвигателей запрещается.

Защита электродвигателей выполнена в соответствии с ТКП 427-2012. На электродвигателях, у которых возможна систематическая перегрузка по техническим причинам, устанавливается защита от перегрузки, действующая на сигнал, автоматическую разгрузку механизма или на отключение. При отключении электродвигателя ответственного механизма от действия защиты и отсутствии резервного допускается повторное включение электродвигателя после тщательной проверки схемы управления, защиты и самого электродвигателя.

Электродвигатели механизмов, технологический процесс которых регулируется по току статора, а также механизмов, подверженных технологической перегрузке, должны быть оснащены амперметрами, устанавливаемыми на пусковом щите или панели. Амперметры должны быть также включены в цепи возбуждения синхронных электродвигателей. На шкале амперметра должна быть красная черта соответствующая длительно

допустимому или номинальному значению тока статора (ротора). На электродвигателях постоянного тока, используемых для привода ответственных механизмов, независимо от их мощности должен контролироваться ток якоря. Электродвигатели, длительно находящиеся в резерве, должны быть постоянно готовы к немедленному пуску; их необходимо периодически осматривать и опробовать вместе с механизмами по графику, утверждённому техническим руководителем Потребителя. При этом у электродвигателей наружной установки, не имеющих обогрева, должны проверяться сопротивление изоляции обмотки статора и коэффициент абсорбции.

Электродвигатели немедленно отключаются от сети в следующих случаях: при несчастных случаях с людьми; появлении дыма или огня из корпуса электродвигателя, а также из его пускорегулирующей аппаратуры; поломке приводного механизма; резком увеличении вибрации подшипников механизма; нагреве подшипников сверх допустимой температуры, установленной в инструкции завода изготовителя; значительным снижением числа оборотов, сопровождающимся быстрым нагревом электродвигателя.

Если работа на электродвигателе или приводимом им в движение механизме связана с прикосновением к токоведущим и вращающимся частям, электродвигатель отключается с выполнением технических мероприятий, предотвращающих его ошибочное включение. Работа, не связанная с прикосновением к токоведущим или вращающимся частям электродвигателя и приводимого им в движение механизма, может производиться на работающем электродвигателе. Не допускается снимать ограждения вращающихся частей работающих электродвигателя и механизма. При работе на электродвигателе допускается установка заземления на любом участке кабельной линии, соединяющей электродвигатель с секцией РУ, щитом, сборкой. Если работы на электродвигателе рассчитаны на длительный срок, не выполняются или прерваны на несколько дней, то отсоединенная от него кабельная линия должна быть заземлена также со стороны электродвигателя.

В тех случаях, когда сечение жил кабеля не позволяет применять переносные заземления, у электродвигателей напряжением до 1000В допускается заземлять кабельную линию медным проводником сечением не менее сечения жилы кабеля либо соединять между собой жилы кабеля и изолировать их. Такое заземление или соединение жил кабеля должно учитываться в оперативной документации наравне с переносным заземлением.

Перед допуском к работам на электродвигателях, способных к вращению за счёт соединённых с ними механизмов (дымососы, вентиляторы, насосы и др.), штурвалы запорной арматуры (задвижек, вентилей, шиберов и т.п.) должны быть заперты на замок. Кроме того, приняты меры по затормаживанию роторов электродвигателей или расцеплению соединительных муфт.

При необходимости проведения опробования в процессе работы порядок включения электродвигателя (для опробования) должен быть следующим: производитель работ удаляет бригаду с места работы, оформляет окончание работы и сдаёт наряд оперативному персоналу; оперативный персонал снимает установленные заземления, плакаты, выполняет сборку схемы; после опробования при необходимости продолжения работы на электродвигателе оперативный персонал вновь подготавливает рабочее место и бригада по наряду повторно допускается к работе на электродвигателе. Работа на вращающемся электродвигателе без соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями может проводиться по распоряжению.

11.3 Меры безопасности при эксплуатации и обслуживании преобразователя частоты

Не снимать крышку прибора при наличии питания. В противном случае возможно поражение электрическим током. Не запускать преобразователь со снятой крышкой. В противном случае возможно поражение электрическим

током, поскольку на силовых клеммах имеется опасное напряжение; опасность представляет также заряд, накапливающийся на конденсаторах в процессе работы. Не снимать крышку без необходимости, даже если питающее напряжение отключено. В противном случае возможно поражение электрическим током при касании цепей, имеющих электрический заряд.

Подключение кабелей и периодическая проверка может проводиться не ранее, чем через 10 минут после отключения питающего напряжения и измерения напряжения в цепи постоянного тока (оно не должно превышать $\approx 30\text{В}$). Включайте выключатели только сухими руками. Не используйте кабель с поврежденной изоляцией. Не подвергайте кабели ударам, царапанию, большим нагрузкам и заземлению. В противном случае возможно поражение электрическим током.

Устанавливайте преобразователь на негорючей поверхности. Не допускайте наличия горючих материалов в непосредственной близости. В противном случае возможно возникновение пожара. Отсоедините кабели питания, если преобразователь поврежден. Несоблюдение этой рекомендации может привести к аварии и пожару. После отключения питания преобразователь остается горячим в течение нескольких минут. Игнорирование этой информации может привести к ожогу или повреждению оборудования. Не подавайте питание на поврежденный или некомплектный преобразователь, даже если монтаж завершен. В противном случае возможно поражение электрическим током. Не допускайте попадания в прибор посторонних материалов: пуха, бумаги, опилок, пыли, металлической стружки и т.п. Несоблюдение этой рекомендации может привести к аварии и пожару.

11.4 Меры безопасности при эксплуатации технологической установки

Трамвайный вагон оборудован правым и левым наружными зеркалами заднего вида и звуковыми приборами.

Покрытие пола пассажирского помещения, подножек и ступенек износостойко, исключаяющее скольжение и позволяющее вести обработку моющими и дезинфицирующими средствами.

Окна и форточки имеют уплотнения, не допускающие попадания пыли и влаги.

Управление дверьми вагона осуществляется из кабины водителя.

Питание цепей управления и вспомогательного оборудования осуществляется от статического преобразователя напряжения и аккумуляторной батареи. Номинальное напряжение цепей управления и вспомогательного оборудования должно составляет 24В.

Трамвай оборудован электрическим и механическим тормозами. Служебное торможение производится электрическим тормозом. Дотормаживание вагона со скоростью 5-7 км/ч производится механическими тормозами. Экстренное торможение производится с применением электрического и электромагнитного рельсового тормозов. В случае отказа электрического тормоза, последний автоматически замещается механическим.

Стекло ветрового окна полированное, трехслойное. Остальное остекление кабины изготовлено из безосколочного стекла.

Система обогрева и вентиляции кабины обеспечивает устранение запотевания и обмерзания стекла ветрового окна на всей площади, очищаемой стеклоочистителем. К каждой щетке стеклоочистителя подается смачивающая жидкость. В ветровом и боковых стеклах нету зеркального отражения предметов и источников света, расположенных на рабочем месте водителя. Внутренние и наружные поверхности вагона, попадающие в поле зрения водителя, не ослепляют его отраженным светом.

Уровень внутреннего шума на рабочем месте водителя при закрытых окнах, дверях, люках – по ГОСТ 19358-74.

Расположение органов управления обеспечивает удобство управления транспортным средством, не отвлекая их от дороги. Вокруг рукояток и других органов управления в любом рабочем положении имеются свободные зоны.

11.5 Электробезопасность

Все применяемые в трамвае элементы электрооборудования и электронных систем устойчивы к воздействию импульсов от электростатических разрядов в соответствии с требованиями ГОСТ 30378-95.

Трамвай оборудован устройством контроля токов утечки (УКТУ), отключающем привод при появлении опасных токов утечки. УКТУ контролирует ток утечки между корпусом вагона и землей. Для этого одна из его входных цепей подключена к корпусу троллейбуса, а другая к заземляющему электроду, имеющему электрический контакт с землей. Величина входного тока ограничивается схемой на уровне 6-8 мА. Схема устройства контролирует превышение током двух пороговых значений на уровне 2 мА и 3 мА. Поручни двери и нижние ступеньки изолированы от каркаса вагона. Сопротивление изоляции не менее 6 МОм.

Защита от токов утечки имеет большое значение в плане безопасности пассажиров и водителей.

Для защиты и предохранения от токов утечки можно применять следующие способы: усиление изоляции электрической проводки и токоведущих частей электрического оборудования; сокращение протяженности высоковольтной электрической проводки, разветвленной по вагону; введение в схему сигнализирующих устройств.

Каждая электрическая цепь питания любого элемента электрооборудования оснащена плавким предохранителем или автоматическим выключателем.

При проведении в вагоне трамвая сварочных работ или других работ с применением электроинструмента аккумуляторные батареи должны быть отключены от электрических цепей. Зажим массы сварочного аппарата должен подключаться как можно ближе к точке сварки.

11.6 Пожарная безопасность

На случай пожарной опасности в трамвае имеются порошковые огнетушители.

Огнетушители порошковые применяются для тушения возгорания нефтепродуктов, горючих материалов (пожары класса А), горючих жидкостей (пожары класса В), а также для тушения возгорания электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В, для тушения возгораний в автомобилях. На сегодняшний день это самый распространенный тип огнетушителей. Порошковые огнетушители представляют собой баллоны красного цвета, где хранится огнетушащий состав, а именно порошок, и они оборудованы запорно-пусковыми устройствами.

Порошковые огнетушители не предназначены для тушения загораний щелочных и щелочноземельных металлов и других материалов, горение которых может происходить без доступа воздуха (алюминий, магний и их сплавы, натрий, калий).

При пожаре, если невозможно открыть двери с места водителя предусмотрены следующие меры.

Наличие аварийных выключателей открытия дверей, расположенные снаружи трамвая рядом с каждой дверью.

При невозможности открытия дверей в салоне имеются аварийные выходы через оконные проемы, которые обозначены специальными надписями. Для выхода через аварийный выход необходимо разбить стекло молотком, который закреплен над соответствующим окном.

12 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Расчёт технико-экономических показателей осуществляется на основе анализа сравнительных технических данных двух альтернативных систем электропривода. Экономическая оценка базируется на принципе минимальных приведенных затрат: капиталовложений, эксплуатационных затрат, затрат электроэнергии и затрат, связанных с вынужденным простоем электрооборудования.

Проведём сравнение двух возможных вариантов преобразователей различной мощности для трамвайного вагона. На рисунке 12.1 представлены отличия в компоновке между сравниваемыми системами.

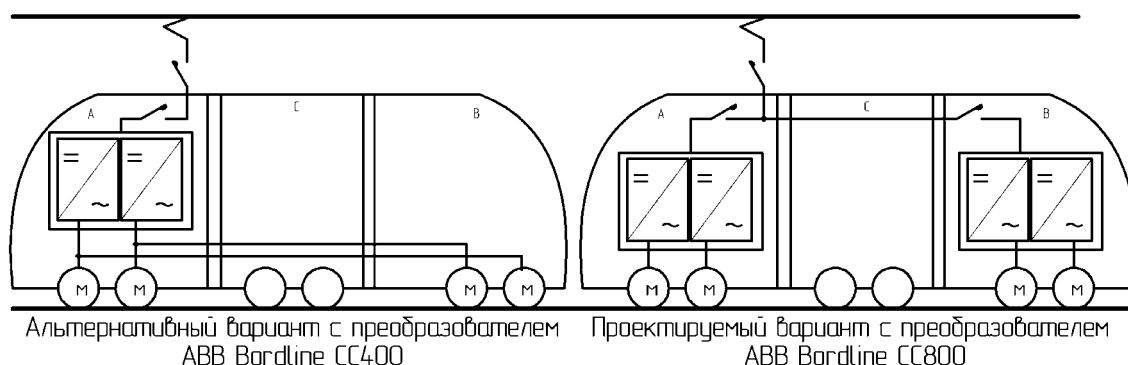


Рисунок 12.1 – Варианты подключения тяговых модулей преобразователей

Технические данные электрооборудования сравниваемых систем приведены в таблице 12.1.

Таблица 12.1 – Технические характеристики сравниваемых систем

Параметры	Альтернативный вариант	Проектируемый вариант
Тип двигателя	TMR35-30-4	TMR35-30-4
Мощность двигателя, кВт	105	105
к.п.д., %	93,7	93,7
Частота вращения, об/мин	1770	1770
Тип преобразователя	ABB Bordline CC400	ABB Bordline CC800
Мощность преобразователя, кВт	2 x 220	2 x 150
к.п.д. преобразователя, %	98	98
Передаточный механизм	редуктор	редуктор

Наиболее дорогостоящими составляющими электропривода являются тяговый электродвигатель, преобразователь и передаточный механизм. Таким образом, сметная стоимость электропривода составляет:

$$K_{эл} = n \cdot K_{дв} + m \cdot K_{пр} + n \cdot K_p,$$

где n – количество электродвигателей (редукторов) на вагон трамвая;

m – количество преобразователей на вагон трамвая;

$K_{дв}$ – стоимость электродвигателя TMR35-30-4, $K_{дв} = 33\,380$ руб;

$K_{пр}$ – стоимость преобразователя, $K_{пр1} = 141\,270$ руб., $K_{пр2} = 68\,310$ руб;

K_p – стоимость редуктора, $K_p = 3\,958$ руб.

Для альтернативного варианта электропривода сметная стоимость составляет:

$$K_{эл1} = 4 \cdot 33380 + 141270 + 4 \cdot 3958 = 290622 \text{ руб.}$$

Для проектируемого варианта:

$$K_{эл2} = 4 \cdot 33380 + 2 \cdot 68310 + 4 \cdot 3958 = 285972 \text{ руб.}$$

Стоимость монтажных работ вычисляется отдельно для электропривода и рабочего механизма. Для электропривода эту величину можно принять равной 6% от стоимости электропривода, для рабочего механизма – 5% стоимости электропривода.

Таким образом, стоимость монтажных работ для альтернативного варианта:

$$K_{мп1} = (0,06 + 0,05) \cdot K_{эл1} = 0,11 \cdot 290622 = 31968,42 \text{ руб.}$$

Стоимость монтажных работ для проектируемого варианта:

$$K_{мп2} = (0,06 + 0,05) \cdot K_{эл2} = 0,11 \cdot 285972 = 31456,92 \text{ руб.}$$

Транспортно-заготовительные работы, составляют 2% от суммы стоимости электропривода и стоимости монтажных работ.

Стоимость транспортно-заготовительных работ для альтернативного варианта:

$$K_{мзп1} = 0,02 \cdot (K_{эл1} + K_{мп1}) = 0,02 \cdot (290622 + 31968,42) = 64518,08 \text{ руб.}$$

Стоимость транспортно-заготовительных работ для проектируемого варианта:

$$K_{мзр2} = 0,02 \cdot (K_{эл2} + K_{мп2}) = 0,02 \cdot (285972 + 31456,92) = 63485,78 \text{ руб.}$$

Плановое накопление монтажной организации составляет 10% от стоимости монтажных работ.

Стоимость плановых накоплений монтажной организации для альтернативного варианта:

$$K_{нм1} = 0,1 \cdot K_{мп1} = 0,1 \cdot 31968,42 = 3196,84 \text{ руб.}$$

Стоимость плановых накоплений монтажной организации для проектируемого варианта:

$$K_{нм2} = 0,1 \cdot K_{мп2} = 0,1 \cdot 31456,92 = 3145,69 \text{ руб.}$$

Для наглядности выполненный расчет капитальных вложений для обоих вариантов сведем в таблицу 12.2.

Таблица 12.2 – Капитальные вложения

Источник затрат	Альтернативный вариант	Проектируемый вариант
Электродвигатели, руб.	133 520	133 520
Преобразователи, руб.	141 270	136 620
Редуктор, руб.	15 832	15 832
Монтажные работы, руб.	31 968,42	31 456,92
Транспортно- заготовительные работы, руб.	64 518,08	63 485,78
Плановые накопления монтажной организации, руб.	3 196,84	3 145,69
Суммарные капитальные вложения, руб.	454 823,43	447 546,18

Затраты на электроэнергию определяются количеством энергии, потребляемой за год, номинальной мощностью двигателей, а также тарифной ставкой на электроэнергию. Для расчета энергии, потребляемой за год, необходимо знать суммарное время работы электропривода за год, которое определяется коэффициентом использования:

$$K_{исп} = \frac{ПВ \cdot t_{раб.см}}{t_{см}},$$

где ПВ – продолжительность включения установки, ПВ = 56,8%;

$t_{раб.см}$ – продолжительность работы установки за смену, $t_{раб.см} = 8$ ч;

$t_{см}$ – число рабочих часов за смену, $t_{см} = 8$ ч.

$$K_{исп} = \frac{0,568 \cdot 8}{8} = 0,568.$$

Определим число рабочих часов установки за год:

$$T_y = T_{раб.дн.} \cdot n_{см} \cdot t_{см} \cdot K_{исп},$$

где $T_{раб.дн.}$ – число рабочих дней в году, $T_{раб.дн.} = 365$;

$n_{см}$ – число смен в сутки, $n_{см} = 2$.

$$T_y = 365 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 0,568 = 3317 \text{ ч.}$$

Определим энергию, потребляемую за год для обоих вариантов:

$$\mathcal{E}_z = \frac{P_{идв} \cdot T_y}{\eta_n} = \frac{150 \cdot 3317}{0,937} = 371715,68 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Таким образом, затраты на электроэнергию для обоих вариантов:

$$C_{\mathcal{E}} = \mathcal{E}_z \cdot T_{эм},$$

где $T_{эм}$ – Тариф на электроэнергию, расходуемую на работу электрифицированного городского транспорта, $T_{эм} = 0,21383$ руб/кВт·ч.

$$C_{\mathcal{E}} = 371715,68 \cdot 0,21383 = 79483,96 \text{ руб.}$$

Для расчёта амортизационных отчислений примем нормативный срок службы трамвая равным 10 годам. Тогда норма амортизации составит 10% от стоимости электропривода. Амортизация происходит равномерно.

Тогда ежегодная сумма амортизации для альтернативного и проектируемого вариантов:

$$C_{a1} = 0,1 \cdot K_{эм1} = 0,1 \cdot 290622 = 29062,2 \text{ руб.},$$

$$C_{a2} = 0,1 \cdot K_{эм2} = 0,1 \cdot 285972 = 28597,2 \text{ руб.}$$

Плановая продолжительность ремонтного цикла (ремонтный цикл – наработка электрического оборудования, выраженная в годах календарного

времени между двумя капитальными плановыми ремонтами) для электрического двигателя:

$$T_{нл.д} = T_{табл.дв.} \cdot \beta_p \cdot \beta_o \cdot \beta_c;$$

где $T_{табл.дв.}$ – продолжительность ремонтного цикла для электродвигателя, $T_{табл.дв.} = 9$ лет;

β_p – коэффициент, определяемый сменностью работы оборудования, $\beta_p = 2$;

β_o – коэффициент, учитывающий уменьшение ремонтного цикла машин, отнесенных к категории основного оборудования, $\beta_o = 0,85$;

β_c – коэффициент, учитывающий условия работы в электротранспорте, $\beta_c = 0,6$.

$$T_{нл.д} = 10 \cdot 2 \cdot 0,85 \cdot 0,6 = 9,18 \text{ лет.}$$

Для преобразователя частоты:

$$T_{нл.пч} = T_{табл.пч} \cdot \beta_o \cdot \beta_c,$$

где $T_{табл.пч.}$ – продолжительность ремонтного цикла для преобразователя частоты, $T_{табл.пч.} = 6$ лет.

$$T_{нл.пч} = 6 \cdot 0,85 \cdot 0,6 = 3,06 \text{ года.}$$

Для редуктора:

$$T_{нл.р} = T_{табл.р} \cdot \beta_o \cdot \beta_c;$$

где $T_{табл.р.}$ – продолжительность ремонтного цикла для редуктора, $T_{табл.р.} = 5$ лет.

$$T_{нл.р} = 5 \cdot 0,85 \cdot 0,6 = 2,55 \text{ года.}$$

Наработка энергетического оборудования, выраженная в месяцах календарного времени между двумя плановыми ремонтами, для электродвигателя:

$$t_{нл.дв} = t_{табл.дв.} \cdot \beta_p \cdot \beta_o \cdot \beta_c = 9 \cdot 2 \cdot 0,85 \cdot 0,6 = 9,18 \text{ мес.}$$

Для преобразователя частоты:

$$t_{нл.пч} = t_{табл.пч} \cdot \beta_o \cdot \beta_c = 18 \cdot 0,85 \cdot 0,6 = 9,18 \text{ мес.}$$

Для редуктора:

$$t_{нл.р} = t_{табл.р} \cdot \beta_o \cdot \beta_c = 6 \cdot 0,85 \cdot 0,6 = 3,06 \text{ мес}$$

По полученным величинам можно рассчитать количество капитальных и текущих ремонтов в расчете за 1 год. Количество капитальных ремонтов в год составляет:

$$M_{к.р.д} = \frac{1}{T_{нл.д}} = \frac{1}{9,18} = 0,109 ,$$

$$M_{к.р.нч} = \frac{1}{T_{нлч}} = \frac{1}{3,06} = 0,327 ,$$

$$M_{к.р.р} = \frac{1}{T_{нлр}} = \frac{1}{2,55} = 0,392 .$$

Количество текущих ремонтов за один год определяется аналогично:

$$M_{т.р.д} = 0,109 ,$$

$$M_{т.р.нч} = 0,327 ,$$

$$M_{т.р.р} = 0,392 .$$

По заданному количеству ремонтов в год, а также по заданной норме трудоёмкости определяется годовая трудоёмкость ремонтов. Годовая трудоёмкость электрических машин рассчитывается по формуле:

$$T_{к.р.д} = M_{к.р.д} \cdot H_{к.р.дв} \cdot K_{\omega} ,$$

где $H_{к.р.д}$ – норма трудоёмкости капитальных ремонтов для двигателя;
 K_{ω} – поправочный коэффициент, учитывающий частоту вращения электродвигателя.

Для асинхронного двигателя $H_{к.р.д} = 48$ человеко-часов, $K_{\omega} = 1$, тогда:

$$T_{к.р.д} = 0,109 \cdot 48 \cdot 1 = 5,229 \text{ человеко-часов}$$

Для преобразователя частоты $H_{к.р.нч} = 43$ человеко-часов, тогда:

$$T_{к.р.нч} = M_{к.р.нч} \cdot H_{к.р.нч} = 0,327 \cdot 43 = 14,05 \text{ человеко-часов} .$$

Для редуктора $H_{к.р.р} = 53$ человеко-часов, тогда:

$$T_{к.р.р} = M_{к.р.р} \cdot H_{к.р.р} = 0,392 \cdot 53 = 20,78 \text{ человеко-часов} .$$

Годовая трудоемкость текущих ремонтов для соответствующих типов определяем аналогично трудоемкости капитальных ремонтов:

$$T_{m.p.ад} = M_{m.p.д} \cdot H_{m.p.дв} \cdot K_{\omega} = 0,109 \cdot 48 \cdot 1 = 5,23 \text{ человеко-часов},$$

$$T_{m.p.пч} = M_{m.p.пч} \cdot H_{m.p.пч} = 0,327 \cdot 43 = 14,05 \text{ человеко-часов},$$

$$T_{m.p.p} = M_{m.p.p} \cdot H_{m.p.p} = 0,392 \cdot 53 = 20,78 \text{ человеко-часов}.$$

Трудоемкость технического обслуживания электропривода за год для альтернативного варианта:

$$\begin{aligned} T_{т.о.1} &= 0,1 \cdot (4 \cdot T_{т.р.ад} + T_{т.р.пч} + 4 \cdot T_{m.p.p}) = \\ &= 0,1 \cdot (4 \cdot 5,23 + 14,05 + 4 \cdot 20,78) = 11,81 \text{ человеко-часов}. \end{aligned}$$

Для проектируемого варианта:

$$\begin{aligned} T_{т.о.2} &= 0,1 \cdot (4 \cdot T_{т.р.ад} + 2 \cdot T_{т.р.пч} + 4 \cdot T_{m.p.p}) = \\ &= 0,1 \cdot (4 \cdot 5,23 + 2 \cdot 14,05 + 4 \cdot 20,78) = 13,22 \text{ человеко-часов}. \end{aligned}$$

Для удобства сравнения выполненный расчет трудоёмкости ремонта и технического обслуживания для обоих вариантов сведен в таблицу 12.3.

Таблица 12.3 – Трудоёмкость ремонта и технического обслуживания

Тип оборудования	Альтерн. вариант	Проект. вариант
Годовая трудоёмкость капитальных ремонтов, человеко-часы		
Электродвигатель	20,92	20,92
Преобразователь	14,05	28,1
Редуктор	83,12	83,12
Годовая трудоёмкость текущих ремонтов, человеко-часы		
Электродвигатель	20,92	20,92
Преобразователь	14,05	28,1
Редуктор	83,12	83,12
Годовая трудоёмкость технического обслуживания, человеко-часы		
Электропривод	11,81	13,22
Суммарная трудоёмкость эксплуатации оборудования:	248,02	276,12

По известной годовой трудоемкости эксплуатации оборудования, учитывая тарифную ставку ремонтного рабочего, а также соответствующие налоги, можно определить затраты на заработную плату ремонтных рабочих:

$$C_{зп} = C_{тар} \cdot C_{нал} \cdot T_{\Sigma},$$

где $C_{тар}$ – часовая тарифная ставка ремонтного рабочего (по 4-му разряду), $C_{тар} = 5,62$ руб/ч;

$C_{нал}$ – коэффициент, определяющий затраты на выплату обязательных отчислений в связи с начислением зарплаты: 34% - отчисления в фонд социальной защиты населения; 0,6 – отчисления обязательного страхования;

T_{Σ} – суммарная трудоемкость эксплуатации оборудования.

Для альтернативного варианта:

$$C_{эн1} = C_{тар} \cdot C_{нал} \cdot T_{\Sigma1} = 5,62 \cdot (1 + 0,346) \cdot 248,02 = 1876,15 \text{ руб.}$$

Для проектируемого варианта:

$$C_{эн2} = C_{тар} \cdot C_{нал} \cdot T_{\Sigma2} = 5,62 \cdot (1 + 0,346) \cdot 276,12 = 2088,75 \text{ руб.}$$

Стоимость материалов для ремонта и обслуживания принимается равной 100% от основной заработной платы ремонтных рабочих без учета выплаты налогов для альтернативного варианта:

$$C_{мат1} = C_{тар} \cdot T_{\Sigma1} = 5,62 \cdot 248,02 = 1393,87 \text{ руб.}$$

Для проектируемого варианта:

$$C_{мат2} = C_{тар} \cdot T_{\Sigma2} = 5,62 \cdot 276,12 = 1551,82 \text{ руб.}$$

Общеховые расходы принимаются равными 100% от основной заработной платы без учета налогов:

$$C_{ц1} = C_{мат1} = 1393,87 \text{ руб.},$$

$$C_{ц2} = C_{мат2} = 1551,82 \text{ руб.}$$

Общезаводские расходы принимаются равными 50% от основной заработной платы без учета налогов:

$$C_{з1} = 0,5 \cdot C_{ц1} = 0,5 \cdot 1393,87 = 696,94 \text{ руб.},$$

$$C_{з2} = 0,5 \cdot C_{ц2} = 0,5 \cdot 1551,82 = 775,91 \text{ руб.}$$

Таким образом, найдены все величины, необходимые для определения годовых эксплуатационных расходов для обоих вариантов.

Эффективность проекта рассчитаем с использованием приведенных затрат:

$$Z = E_n \cdot K + C,$$

где $E_n = 0,15$ – коэффициент приведения;

K – капиталовложения;

C – годовые эксплуатационные издержки;

$$Z_1 = 0,15 \cdot 454823,43 + 113906,99 = 182130,51 \text{ руб.},$$

$$Z_2 = 0,15 \cdot 447546,18 + 114049,46 = 181181,38 \text{ руб.}$$

Годовой экономический эффект составит:

$$\Delta = Z_1 - Z_2 = 182130,51 - 181181,38 = 949,12 \text{ руб.}$$

Полученные показатели сравниваемых вариантов приведены в таблице 12.4.

Таблица 12.4 – Техничко-экономические показатели

Наименование	Обозначение	ABB Bordline CC400	ABB Bordline CC800
Номинальная мощность преобразователя, кВт	$P_{ном}$	220	150
Количество преобразователей	n	1	2
Номинальный к.п.д. преобразователя, %	$\eta_{ном}$	98	98
Капиталовложения, руб.	K	454 823,43	447 546,18
Амортизационные отчисления, руб.	C_a	29 069,2	28 597,2
Плата за потребляемую электроэнергию, руб.	C_{Δ}	79 483,96	79 483,96
Заработная плата ремонтных рабочих, руб.	$C_{ЗП}$	2 322,08	1 579,24
Стоимость материалов для ремонта ЭП, руб.	$C_{мат}$	1 393,87	1 551,82
Цеховые расходы, руб.	$C_{ц}$	1 393,87	1 551,82
Общезаводские расходы, руб.	C_3	696,94	775,91
Суммарные эксл. расходы, руб.	C_{Σ}	113 906,99	114 049,46
Приведенные затраты, руб.	Z_i	182 130,51	181 181,38
Годовой экономический эффект, руб.	Δ	949,12	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке данного дипломного проекта был произведен расчет и проектирование автоматизированного тягового электропривода тележки трамвая модели В85300М. В результате проведенной работы были разработаны расчетно-пояснительная записка и графическое приложение.

В ходе работы был проведен анализ технологического процесса трамвая, а также детальный анализ работы тягового электропривода. Был осуществлен выбор системы электропривода установки, выбор и проверка электродвигателя ТМР35-30-4 номинальной мощностью 105 кВт, выбор тягового преобразователя АВВ Bordline СС800. Так же была спроектирована система векторного управления двигателем, составлена математическая модель автоматизированного электропривода. На основании математической модели была построена имитационная модель автоматизированного электропривода и смоделированы режимы тягового электропривода. Полученные графики переходных процессов полностью соответствуют требуемым переходным процессам. Это означает, что параметры САУ рассчитаны точно, и тяговый электропривод трамвая удовлетворяет всем выдвинутым требованиям.

Была спроектирована система автоматизации на базе программируемого логического контроллера Omron CP1L.

Были рассмотрены мероприятия по обеспечению охраны труда при эксплуатации установки.

В результате расчета технико-экономических показателей на основе анализа сравнительных технических данных двух альтернативных систем электропривода, получен положительный экономический эффект.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метелица - полностью низкопольный трамвай моделей В853 и В85300М/ Штадлер Минск, 2016.
2. Драйвер для асинхронного двигателя и способ его управления. Патент US 7 545 116 В2, Hitachi Industrial Equipment Systems Co., Ltd., Tokyo [JP]. Оpubл. 22.01.2014.
3. Устройство векторного управления скоростью асинхронного двигателя. Патент RU 1 434 66 U1. Оpubл. 20.07.2014.
4. Способ управления электрическим транспортным средством, в частности железнодорожным транспортным средством, устройством управления электрическим транспортным средством и железнодорожным транспортным средством. Патент EP 3 144 175 A1, ALSTOM TRANSP TECH [FR]. Оpubл. 22.03.2017.
5. Система широтно-импульсной модуляции на основе SHEPWM и метод модуляции. Патент CN 1 083 220 77 A (CRRC QINGDAO SIFANG ROLLING STOCK RES INST CO LTD). Оpubл. 24.07.2018.
6. Способ снижения шума электродвигателя. Патент RU 2 667 079 C1, SIEMENS AG [DE]. Оpubл. 14.09.2018.
7. Преображенский В.И. Полупроводниковые выпрямители/ Преображенский В.И.; 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 136 с.
8. Михеев Евгений Александрович Частотное регулирование электропривода / Символ науки. 2016. №11-3/2016 ISSN 2410-700.
9. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Теория электропривода: учебное пособие/ Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик.- Минск: ЗАО "Техноперспектива", 2004.-527с.
10. Троллейбус. Теория, конструирование, расчет/Богдан, Ю.Е. Атаманов, А.И. Сафонов; под ред. Н. В. Богдана - Мн.: Ураджай, 1999.

11. Улицы и дороги городов, поселков и сельских населенных пунктов: СНБ 3.03.02-1997. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 1998. – 61 с.
12. Electrical calculation and simulation TMR35-30-4: Motor data / TSA Austria, 2012.
13. Лукутин Б. В., Обухов С. Г. Силовые преобразователи в электроснабжении: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 144 с.
14. BORDLINE® CC800 MS for tram-train with 600/750 Vdc and 25 kVac 50 Hz line voltage/ ABB Switzerland, 2009.
15. Блоки резисторов для трамваев (типов КФ38В1; КФ38В2; КФ38Б12; КФ54А2; КФ65А; БТР06; БТР07; БТР08; БПТР01; БПТР02). [Электронный ресурс]. – 30.05.2019. – Режим доступа: http://reostat.ru/production/cat-2/bloki_rezistorov, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
16. Датчик скорости для рельсового транспорта Lenord Bauer GEL 247. [Электронный ресурс]. – 30.05.2019. – Режим доступа: <https://www.lenord.com/products/speed-sensors/gel-247/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
17. Фираго, Б. И. Векторные системы управления электроприводами : учеб. пособие / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. – Минск : Вышэйшая школа, 2016. – 159 с.
18. Фираго, Б. И. Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию по теории электропривода для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» / Б. И. Фираго. – Минск : БНТУ, 2005. – 126с.
19. Мигдаленок, А.А. Моделирование электропривода на ЭВМ: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-53 01 05 "Автоматизированные электроприводы": в 2 ч. / А.А. Мигдаленок. - Минск: БНТУ, 2009. – Ч.2. – 93с.

20. Микроконтроллер Omron CP1L. [Электронный ресурс]. – 30.05.2019. – Режим доступа: <https://industrial.omron.ru/ru/products/cp1l>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
21. Промежуточные реле Owen RP-403DL. [Электронный ресурс]. – 30.05.2019. – Режим доступа: http://www.owen.ru/catalog/promezhutochnie_rele_kippribor/19408610, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
22. Концевые выключатели Omron D4N. [Электронный ресурс]. – 30.05.2019. – Режим доступа: <https://industrial.omron.ru/ru/products/d4n>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
23. Кнопочные переключатели Omron A22N. [Электронный ресурс]. – 30.05.2019. – Режим доступа: <https://industrial.omron.ru/ru/products/a22ns>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
24. Селекторные переключатели Omron A22NS/W. [Электронный ресурс]. – 30.05.2019. – Режим доступа: <https://industrial.omron.ru/ru/products/a22ns-w>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
25. Автоматические выключатели DZ47-60. [Электронный ресурс]. – 30.05.2019. – Режим доступа: <http://nvacontact.com/wp-content>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
26. Выключатель автоматический быстродействующий постоянного тока ВБ-11/1-400/6-У1. [Электронный ресурс]. – 29.05.2019. – Режим доступа: http://tehnos.su/ВБ-11_1-400_6-У1.html, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
27. Трамваи. Требования к техническому состоянию. Методы проверки: СТБ 1841-2009. – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2009. – 14 с.
28. Приборы контроля тока утечки ПКТУ-1. [Электронный ресурс]. – 30.05.2019. – Режим доступа: http://www.amkodor-belvar.by/catalog/products_for_industrial_purposes/pktu_1, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.

29. Провода типа ПВ2. [Электронный ресурс]. – 25.05.2019. – Режим доступа: <https://www.avtoprovod.com/production/catalog/type89>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.

30. Лазаренков, А.М. Охрана труда в энергетической отрасли: учебник / А.М. Лазаренков, Л.П.Филянович, В.П. Бубнов.– Минск: ИВЦ Минфина, 2010.–655с.

31. ТКП 181-2009 Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Мн.: Министерство энергетики Республики Беларусь, 2009. – 332с.

32. Система технического обслуживания и планово-предупредительного ремонта общепромышленного оборудования / Коллект. автор, авт.-сост. Овчинников, Л.С. ; . - Минск : Дизайн ПРО.

33. Бабук И.М. Экономика предприятия: Учебное пособие для студентов технических специальностей / И.М.Бабук. – Мн.: ИВЦ Минфина, 2006. – 323с.