

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ЕДИНАЯ ДИРЕКЦИЯ СТРОЯЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ»**

В реестре членов саморегулируемых организаций:
СРО-П-025-15092009; СРО-И-046-23072019

Заказчик: ООО «МОВИСТА РЕГИОНЫ Ярославль»

**«О создании и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры
и технологически связанных с ними транспортных средств,
обеспечивающих деятельность, связанную с перевозками
пассажиров транспортом общего пользования, в муниципальном
образовании городской округ город Ярославль в Ярославской области»**

**5 этап: «Реконструкция зданий и сооружений трамвайного депо
по адресу: г. Ярославль, Ленинградский пр-кт, дом № 37»**

ПРОЕКТНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Раздел 5 Сведения об инженерном оборудовании, о сетях и системах инженерно-
технического обеспечения

Подраздел 1 Система электроснабжения

Часть 10 Тяговый электрический расчет депо

0484ГП.09-5-ИОС1.10

Том 5.1.10

(1 пусковой этап, 2 пусковой этап)

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	№ док	Подп.	Дата

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ЕДИНАЯ ДИРЕКЦИЯ СТРОЯЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ»**

В реестре членов саморегулируемых организаций:
СРО-П-025-15092009; СРО-И-046-23072019

Заказчик: ООО «МОВИСТА РЕГИОНЫ Ярославль»

«О создании и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры и технологически связанных с ними транспортных средств, обеспечивающих деятельность, связанную с перевозками пассажиров транспортом общего пользования, в муниципальном образовании городской округ город Ярославль в Ярославской области»

5 этап: «Реконструкция зданий и сооружений трамвайного депо по адресу: г. Ярославль, Ленинградский пр-кт, дом № 37»

ПРОЕКТНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Раздел 5 Сведения об инженерном оборудовании, о сетях и системах инженерно-технического обеспечения

Подраздел 1 Система электроснабжения

Часть 10 Тяговый электрический расчет депо

0484ГП.09-5-ИОС1.10

Том 5.1.10

(1 пусковой этап, 2 пусковой этап)

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	№ док	Подп.	Дата

Директор по проектированию

Ю.В. Трунов

Главный инженер проекта

Д.А. Ладыгин



АО "ГИПРОТЯЖМАШ"

Акционерное общество

"Институт по генеральному проектированию заводов тяжелого
и транспортного машиностроения"

Регистрационный номер от 07.12.2009 №01-П N150

в реестре членов саморегулируемой организации СРО Союз «МОПОСС» СРО-П-001-13012009

Регистрационный номер от 08.08.2018 №56

в реестре членов саморегулируемой организации Ассоциация «Межрегиональное ОПИ» СРО-И-044-23052018

**«О создании и эксплуатации объектов транспортной
инфраструктуры и технологически связанных с ними
транспортных средств, обеспечивающих деятельность,
связанную с перевозками пассажиров транспортом общего
пользования, в муниципальном образовании городской округ
город Ярославль в Ярославской области»**

**5 этап: «Реконструкция зданий и сооружений трамвайного
депо по адресу: г. Ярославль, Ленинградский пр-кт, дом № 37»**

ПРОЕКТНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

**Раздел 5 Сведения об инженерном оборудовании, о сетях и ситемах
инженерно-технического обеспечения**

Подраздел 1 Система электроснабжения

Часть 10 Тяговый электрический расчет депо

0484ГП.09-5-ИОС1.10

Том 5.1.10

(1 лист из 2, 2 листа из 2)

Генеральный директор

А.В. Захаров

Главный инженер проекта

О.А. Богданов

2024

Взам. инв.№	
Подп. и дата	
Инв. №подл.	



Общество с ограниченной ответственностью
«КомплектЭнергоСнаб»
Регистрационный номер члена СРО
9705082922-20230530-1152,
дата регистрации от 30 мая 2023г.

Заказчик: ООО «МОВИСТА РЕГИОНЫ Ярославль»

«О создании и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры
и технологически связанных с ними транспортных средств,
обеспечивающих деятельность, связанную с перевозками
пассажиров транспортом общего пользования, в муниципальном
образовании городской округ город Ярославль в Ярославской области»

**5 этап: «Реконструкция зданий и сооружений трамвайного депо
по адресу: г. Ярославль, Ленинградский пр-кт, дом № 37»**

ПРОЕКТНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Раздел 5 Сведения об инженерном оборудовании, о сетях и системах инженерно-технического обеспечения

Подраздел 1 Система электроснабжения

Часть 10 Тяговый электрический расчет депо

0484ГП.09-5-ИОС1.10

Том 5.1.10

(1 пусковой этап, 2 пусковой этап)

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Москва 2024 г.



Общество с ограниченной ответственностью
«КомплектЭнергоСнаб»
Регистрационный номер члена СРО
9705082922-20230530-1152,
дата регистрации от 30 мая 2023г.

Заказчик: ООО «МОВИСТА РЕГИОНЫ Ярославль»

«О создании и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры
и технологически связанных с ними транспортных средств,
обеспечивающих деятельность, связанную с перевозками
пассажиров транспортом общего пользования, в муниципальном
образовании городской округ город Ярославль в Ярославской области»

**5 этап: «Реконструкция зданий и сооружений трамвайного депо
по адресу: г. Ярославль, Ленинградский пр-кт, дом № 37»**

ПРОЕКТНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Раздел 5 Сведения об инженерном оборудовании, о сетях и системах инженерно-технического обеспечения

Подраздел 1 Система электроснабжения

Часть 10 Тяговый электрический расчет депо

0484ГП.09-5-ИОС1.10

Том 5.1.10

(1 пусковой этап, 2 пусковой этап)

Изм.	№ док	Подп.	Дата

Генеральный директор

Главный инженер проекта

А.Г. Васильев

В.Н. Бурда

Москва 2024 г.

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

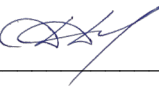
Главный инженер проекта



подпись, дата

В.Н. Бурда

Проверил



подпись, дата

Д.В. Дульский

Разработал



подпись, дата

А.В. Лепкин

Содержание тома

Обозначение	Наименование	Примечание
	<u>Текстовая часть</u>	
	Список исполнителей	1
	Содержание тома	2
	1 Исходные данные и нормативная документация	3
	2 Тяговые расчёты	4
	3 Схема питания и секционирования	8
	4 Электрические расчеты	10
	Выводы	16

1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И НОРМАТИВНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Нормативная документация, использованная при разработке, раздела

- ПУЭ 7-е издание.
 - СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89».
 - СП 98.13330.2018 «Трамвайные и троллейбусные линии. Актуализированная редакция СНиП 2.05.09-90»
 - ГОСТ Р 55647-2018 «Провода контактные из меди и её сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия».
 - ГОСТ 839-2019 «Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия».
 - ГОСТ 31996-2012 «Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия».
 - ГОСТ 16772-77 «Трансформаторы и реакторы преобразовательные. Общие технические условия».
 - ГОСТ 18142.1-85 «Выпрямители полупроводниковые мощностью свыше 5 кВт».
 - «Нормы и правила проектирования систем электроснабжения трамваев и троллейбусов».
- Утв. министерством жилищно-коммунального хозяйства РСФСР 12.01.1983

Методика расчёта

СП 98.13330.2018 для расчёта систем тягового электроснабжения городского транспорта рекомендует метод равномерно распределённой нагрузки или обобщённый аналитический метод. Эти методы предполагают использование для расчётов нескольких коэффициентов, которые определялись опытным путём. Для современного подвижного состава эти коэффициенты отсутствуют. Кроме того, современный подвижной состав обладает в 1,3 – 1,5 раза большей удельной мощностью. Из-за этого его электропотребление становится очень неравномерным, что также осложняет использование аналитических методов. С учётом вышесказанного расчёт системы тягового электроснабжения 600 В выполнен методом сечения графика движения, т.е. фактически методом математического моделирования.

Моделирование выполнено в два этапа. На первом этапе производится тяговый расчёт, в ходе которого определяется время хода вагона, а также зависимость потребляемого вагоном тока и пути от времени. Тяговый расчёт позволяет определить электропотребление вагона с учётом фактического влияния профиля пути, заданной скорости сообщения, ограничений скорости, длин перегонов.

На втором этапе по заданному графику движения вагонов производится непосредственный расчёт системы тягового электроснабжения: токов секций, уровней напряжения на токоприёмнике и т.д.

Исходные данные для тягового и электрического расчёта

В качестве основных исходных данных для тяговых и электрических расчётов использованы:

- схема путевого развития депо;
- план и профиль путей;
- тяговые характеристики и расчётная масса трамвайного вагона;
- максимальные скорости движения вагонов на деповских путях;
- интервал утреннего выпуска вагонов из депо на линию;

2 ТЯГОВЫЕ РАСЧЁТЫ

Целью тягового расчета при расчетах системы тягового электроснабжения является определение зависимости тока вагона, его координаты и скорости от времени. Тяговый расчёт представляет собой решение уравнения движения вагона, записанного в относительных единицах:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A}{1 + \gamma} \cdot (f_k - w - b_t),$$

где V - скорость движения вагона, км/ч.

A - переводной коэффициент, км/ч·с;

γ - коэффициент инерции вращающихся частей (для трамвайных вагонов $\gamma = 1,05 \div 1,15$);

f_k - удельная сила тяги вагона, Н/кН;

w - удельное сопротивление движению, Н/кН;

b_t - удельная тормозная сила, Н/кН.

План и профиль пути, разрешенная скорость движения, а также масса вагона определяют сопротивление движению и, соответственно, средний потребляемый ток вагона. Значительное влияние на расход энергии также оказывают остановки. Максимальная реализуемая мощность двигателей вагона определяет максимальный потребляемый ток.

Продольный профиль, план линии, а также расположение остановочных пунктов приняты в соответствии с чертежом расположения осей трамвайных путей от 27.11.2023. В соответствии с указаниями письма №164 от 05.06.2023 качестве расчётного вагона выбран четырёхосный

вагон 71-628, с мощностью. двигателей 4×72 кВт. Основные технические характеристики вагона приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные характеристики расчётного вагона

Наименование параметра	Значение
Порожняя масса (масса тары вагона), т	24,0
Пассажировместимость, чел, при плотности 5 / 8 чел./м ²	119 / 170
Масса вагона с пассажирами при плотности 5 / 8 чел./м ² , т	32,3 / 35,9
Длина вагона, м	16,50
Количество осей (из них моторных)	4 (4)
Коэффициент инерции вращающихся частей	1,10
Часовая мощность тяговых двигателей, кВт	4×62
Максимальная мощность тяговых двигателей в режиме тяги, кВт	4×82
Максимальная мощность тяговых двигателей в режиме торможения, кВт	4×90
КПД тягового редуктора, о.е.	0,970
КПД тягового электродвигателя / тягового преобразователя, о.е.	0,920 / 0,970
Максимальный расчётный коэффициент сцепления, о.е.	0,15
Среднеэксплуатационная мощность нагрузки собственных нужд, кВт	24
КПД нагрузки собственных нужд, о.е.	0,95
Номинальное напряжение в контактной сети, В	550
Рабочий диапазон питающего напряжения, В	400 – 720
Максимальная скорость движения, км/ч	75

В тяговых расчётах масса вагона была принята равной 24,2 т, что соответствует порожней нагрузке плюс 200 кг. Максимальная сила тяги (44,1 кН) принята исходя из ограничения максимального ускорения при пуске. Характеристики приведены для номинального напряжения на токоприёмнике, равного 550 В. Связь потребляемого тока и мощности вагона с учётом КПД тягового электропривода описывается выражением, А:

$$I_{\text{т}} = \frac{P_{\text{max}}}{U_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{тпр}}} \cdot n_{\text{д}},$$

где P_{max} - максимальная мощность тяговых двигателей вагона, кВт;

$U_{\text{ном}}$ - номинальное напряжение, кВ;

$\eta_{\text{д}}$ - КПД тягового электродвигателя вагона, о.е.;

$\eta_{\text{тпр}}$ - КПД тягового преобразователя вагона, о.е.

Это выражение использовано для построения токовых характеристик вагона. Предельные тяговая и токовая (при напряжении 550 В) характеристики вагона (без учёта нагрузки собственных нужд) приведены на рисунке 2.1.

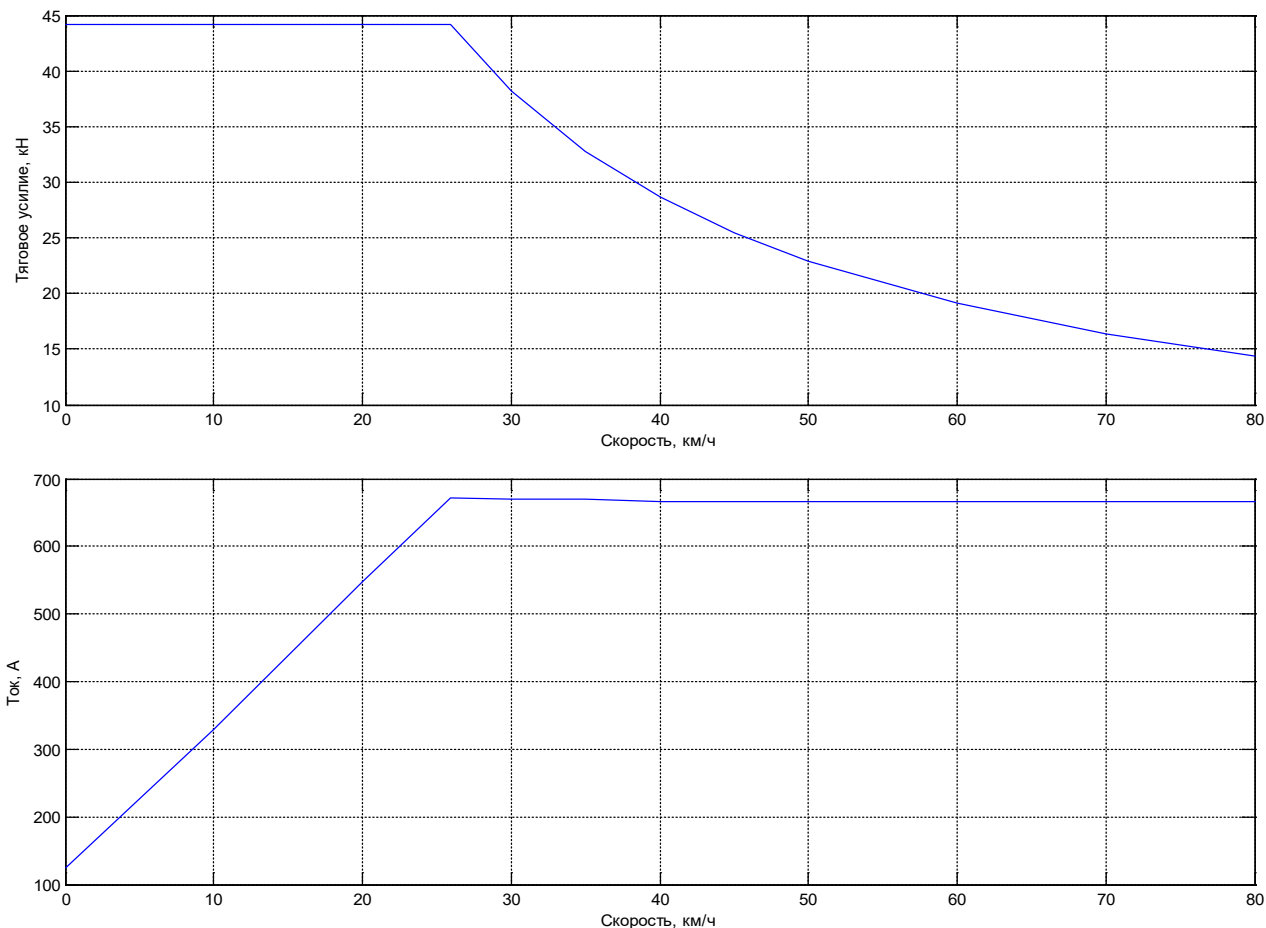


Рисунок 2.1 – Предельные тяговая и токовая характеристики вагона

Для определения основного удельного сопротивления движению вагона, Н/кН, под током (w'_o) и на выбеге (w'_{ox}) в тяговом расчёте использованы типовые формулы:

$$w'_o = 4,5 + 0,00278 \cdot V^2;$$

$$w'_{ox} = 5,0 + 0,0031 \cdot V^2,$$

Дополнительное сопротивление движению от кривых, Н/кН, определено по формуле:

$$w'_k = \frac{500}{R},$$

где R – радиус кривой, м;

Ток собственных нужд вагона с учётом мощности собственных нужд принят равным 46 А. Это значение определено для среднеексплуатационной нагрузки отопления (кондиционирования).

Максимальная скорость движения в тяговых расчётах для прямых и кривых участков депокских путей принята равной 15 км/ч. При следовании по стрелочным переводам принята скорость 10 км/ч. Масса вагона в тяговых расчётах принята равной увеличенной на 200 кг порожней массе (см. таблицу 2.1). В ходе тяговых расчётов рассмотрен проезд вагонов через депо «напроход», а также вариант отправления вагонов с путей ночного отстоя. Для варианта

проезда выбран маршрут, содержащий максимальное количество кривых, что, соответственно, даст наибольший расход энергии на тягу.

Результаты тяговых расчётов представлены в таблице 2.2. Кривые потребляемого тока и скорости для четырёхосного при выезде из депо и при перемещении по деповским путям представлены на рисунках 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2 – Результаты тягового расчёта по вариантам

Участок	Длина, км	Время хода, мин	Расход ЭЭ, кВт·ч	
			Потребл.	Рекуп.
Выезд с парковых путей отстоя	0,333	1,767	1,046	-0,002
Депо «по кругу»	0,763	3,854	2,469	-0,009

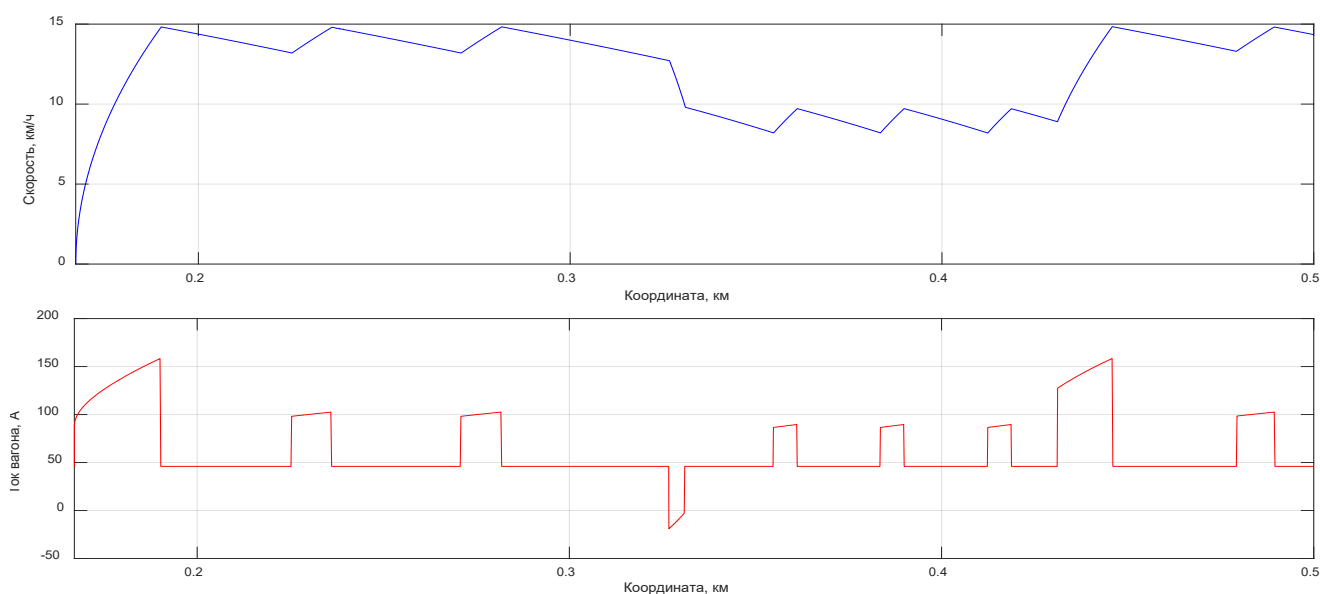


Рисунок 2.2 – Результаты тягового расчёта для режима выезда с парковых путей депо

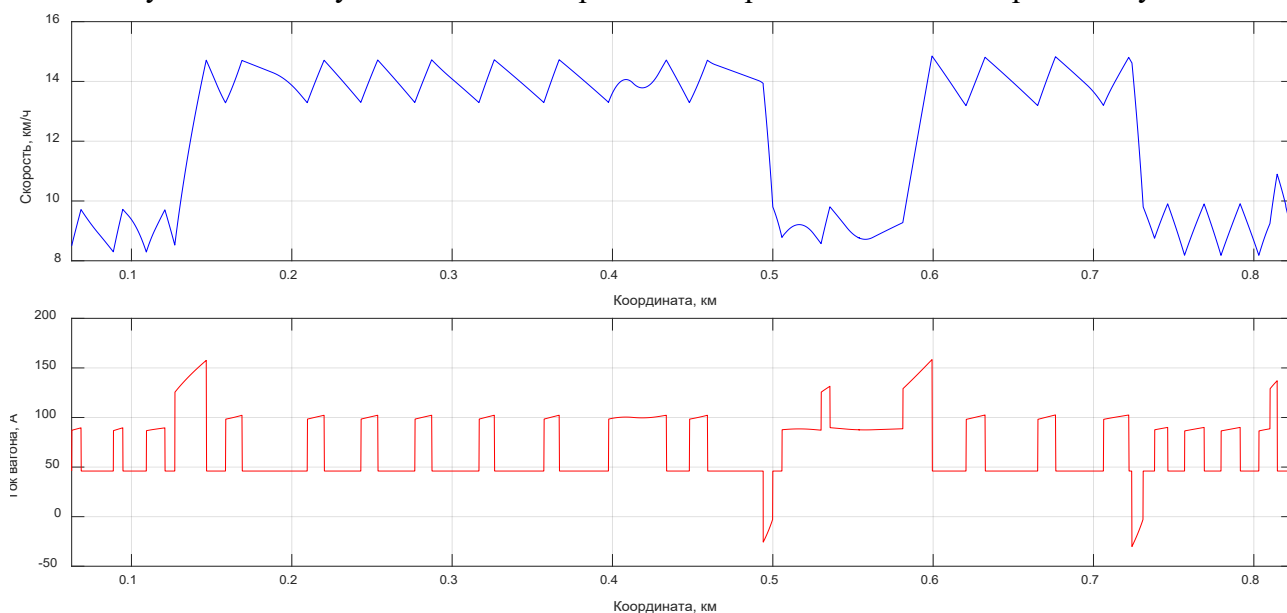


Рисунок 2.3 – Результаты тягового расчёта для режима маневровой работы в депо (депо «по кругу»)

3 СХЕМА ПИТАНИЯ И СЕКЦИОНИРОВАНИЯ

Питание тяговой сети депо планируется осуществить от новой модульной тяговой подстанции ТПмЗ которую планируется разместить на территории самого депо. Для питания депо предполагается сооружение двух дополнительных питающих линий. Ещё одна питающая линия предусматривается для питания ремонтного цеха. Схема питания и секционирования представлена на рисунке 3.1.

Контактный провод на всех путях принят МФ-100. Питание сети депо осуществляется по двум питающим линиям. Питающие линии выполнены кабелем сечением 800 мм², длина кабельных линий принята равной 130 м.

В расчётах было принято следующие сопротивления элементов тяговой сети согласно ГОСТ Р 55647-2018, ГОСТ 839-2019, ГОСТ 22483-2012:

- тяговая сеть МФ-100 и рельсы (один путь) Т-62 – 0,2152 Ом/км;
- тяговая сеть 2МФ-100 и рельсы (два пути) Т-62 – 0,1106 Ом/км;
- тяговая сеть 3МФ-100 и рельсы (три пути) Т-62 – 0,0741 Ом/км;
- алюминиевый питающий кабель сечением 800 мм² – 0,0367 Ом/км.

При расчёте сопротивлений для контактных проводов учтён средний износ 15 % как того требует СП 98.13330.2018. Сопротивление тяговой подстанции принято по данным раздела 0484ГП.09-7-ТКР2 и представлено в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Эквивалентные параметры тяговых подстанций

Подстанция	Полное сопр. пит. сети, Ом	U_c , В	Кол-во агрегатов в работе	Мощность преобр. тр-ра, кВА	Экв. сопр. ТПС ρ , Ом
ТПмЗ	0,095+j0,333	6,3	1	1342	0,0154

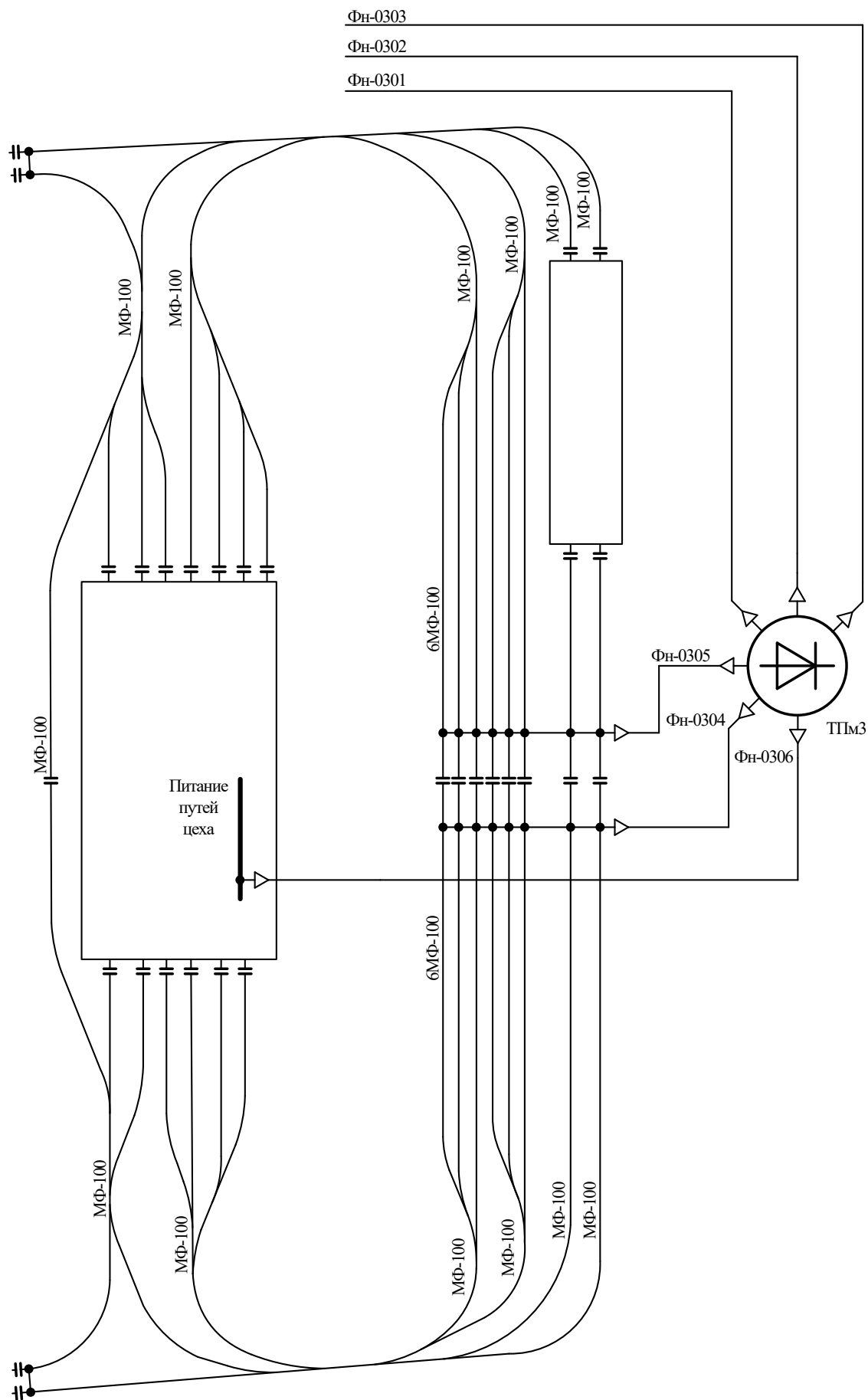


Рисунок 3.1 – Схема питания и секционирования тяговой сети депо

4 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ

Расчёт системы тягового электроснабжения методом имитационного моделирования требует предварительного выбора параметров системы. Фактически расчёт производится методом подбора ключевых параметров системы: схемы питания контактной сети, мест расположения тяговых подстанций и мощности их оборудования. После предварительного выбора указанных параметров их проверяют на модели и, в случае необходимости, корректируют.

Согласно техническому заданию расчёты выполнены для двух режимов:

- режим утреннего выпуска вагонов на линию;
- режим маневровой работы в депо.

Для режима утреннего выпуска принят режим, когда все вагоны начинают готовиться к рейсу, после чего с интервалом 3,0 минуты выпускаются на линию. Длительность подготовки к рейсу принята равной 15 минут. Таким образом, одновременно к рейсу готовятся 5 вагонов. Каждый вагон при этом потребляет средний ток собственных нужд. В парке на отстое могут находиться 44 четырехосных вагона. Суммарный ток собственных нужд в результате получится $5 \cdot 46 = 230$ А. Для создания несколько более тяжелых условий принято, что по участку в зоне питания ТПм3 уже осуществляется нормальное движение с интервалами, представленными в разделе 3 тома 0484ГП.09-7-ТКР2.

В режиме маневровой работы по территории депо перемещаются 2 вагона по случайному графику. На участках питания ТПм3 при этом сохраняется нормальное движение вагонов по с интервалами, принятыми в разделе 0484ГП.09-7-ТКР2. Расчёт системы тягового электроснабжения методом имитационного моделирования требует предварительного выбора параметров системы. Фактически расчёт производится методом подбора ключевых параметров системы: схемы питания контактной сети, мест расположения тяговых подстанций и мощности их оборудования. После предварительного выбора указанных параметров их проверяют на модели и, в случае необходимости, корректируют.

4.1 Электрические расчёты в режиме утреннего выпуска

Как уже было сказано выше, для расчёта принят режим, когда в среднем каждые три минуты из парка выезжает один вагон. Расчёт выполнялся методом сечения случайного графика движения вагонов с шагом 3 секунды. Одновременно с этим 5 вагонов постоянно находятся в режиме подготовки к рейсу с нагрузкой собственных нужд. Минимальное мгновенное напряжение при нормальной схеме составляет 590 В, в вынужденном режиме – 588 В. На рисунке 4.1 представлены результаты расчёта напряжений на токоприёмнике вагонов, выезжающих из парка при вынужденном режиме питания.

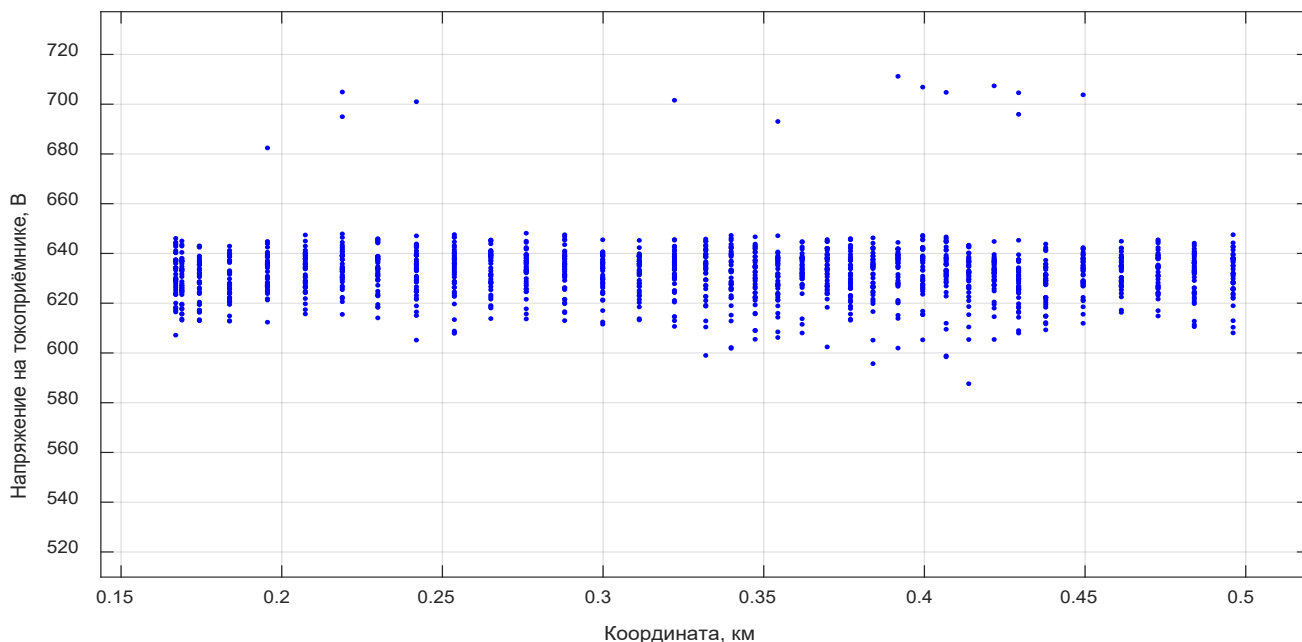


Рисунок 4.1 – Результаты расчёта напряжений в вынужденном режиме

Таким образом, требования по потерям напряжения выполняются со значительным запасом. Это объясняется небольшой длиной питающих линий и самих секций.

Пример результата расчёта тока питающей линии Фм-0304 представлен на рисунке 4.2.

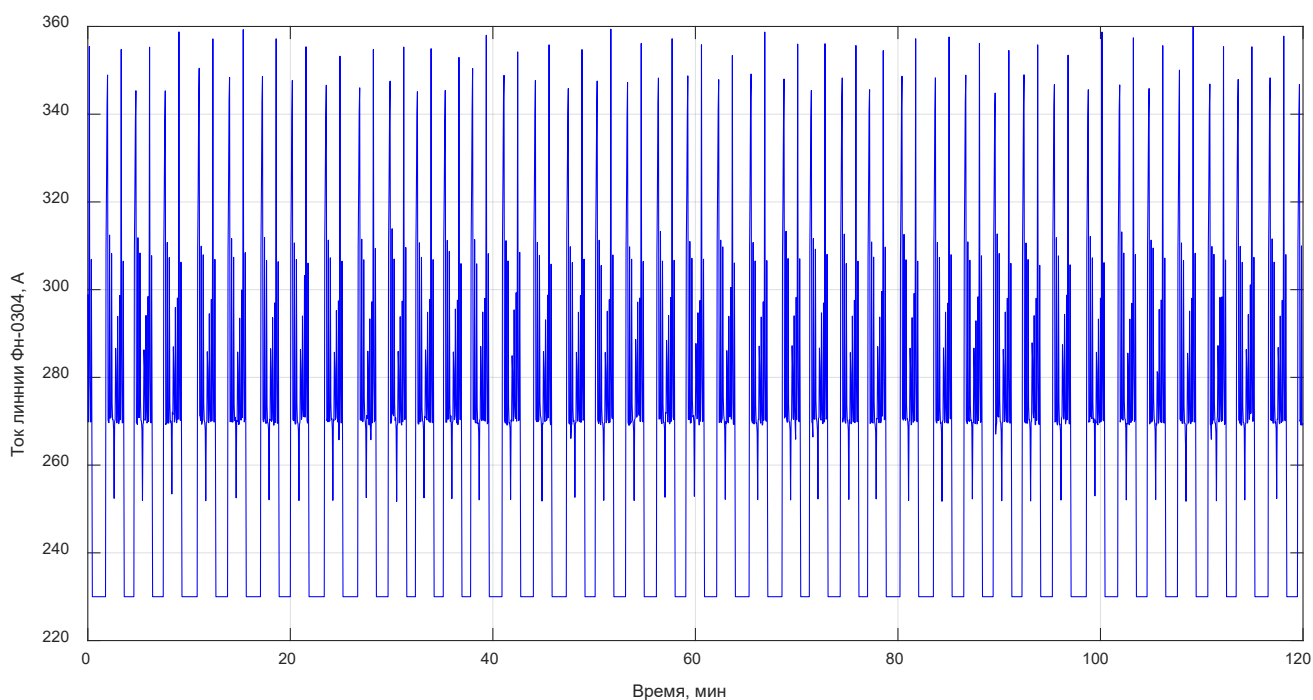


Рисунок 4.2 – Результаты расчёта тока питающей линии Фм-0304 в вынужденном режиме (Фм-0305 отключена)

Эффективные токи проводов контактной сети и также плотность тока в проводах контактной подвески для нормального и вынужденного режима представлены в таблицах 4.1 – 4.2. При расчёте плотности тока для контактных проводов учтён 20 % их износ. Для контактных

проводов период усреднения эффективного тока принят равным 20 минут, что соответствует ~6 постоянным времени нагрева (постоянная времени нагрева провода МФ-100 – 210 с). При расчете токов в проводах контактной подвески учтено растекание тока по нескольким параллельно соединённым путям. Поэтому в таблицах условно указан тип контактной подвески 2МФ-100. Результаты расчёта токов питающих кабелей в вынужденном режиме представлены в таблице 4.3. Расчёты выполнены применительно к кабелям с бумажной изоляцией типа АСБ2к-800 или аналогичных.

Таблица 4.1 – Результаты расчёта эффективных токов и плотности длительного тока в контактном проводе для нормального режима.

Секция	Тип конт. подвески	Эфф. ток, А, усредненный за период		Плотность тока в КП, А/мм ²
		1 минута	20 минут	
ТПМЗ ФН-0304	2МФ-100	169	142	0,89
ТПМЗ ФН-0305	2МФ-100	155	130	0,81

Таблица 4.2 – Результаты расчёта эффективных токов и плотности длительного тока в контактном проводе для вынужденного режима.

Секция	Тип конт. подвески	Режим	Эфф. ток, А, усредненный за период		Плотность тока в КП, А/мм ²
			1 минута	20 минут	
ТПМЗ ФН-0304	2МФ-100	Пит. ФН-0305 от ФН-0304	289	268	1,68
ТПМЗ ФН-0305	2МФ-100	Пит. ФН-0304 от ФН-0305	289	268	1,68

Таблица 4.3 – Результаты расчёта эффективных токов питающих кабелей для вынужденного режима.

Секция	Сечение кабеля, мм ²	Режим	Эфф. ток, А, усредненный за период		Температура кабеля, °С
			1 минута	20 минут	
ТПМЗ ФН-0304	800	Пит. ФН-0305 от ФН-0304	289	268	28,5
ТПМЗ ФН-0305	800	Пит. ФН-0304 от ФН-0305	289	268	28,5

Согласно ГОСТ 16772-77 преобразовательные агрегаты для городского электрического транспорта должны выдерживать следующие перегрузки:

200 % в течении 1 минуты не чаще 1 раз в 30 минут;

150 % в течении 5 минут не чаще 1 раз в 30 минут;

125 % в течении 120 минут не чаще 2 раз в сутки.

При перегрузках свыше 125 % 30-минутная среднеквадратичная нагрузка не должна превышать номинальной. Для расчёта загрузки преобразовательного агрегата использован суммарный ток тяговой подстанции. По этому току рассчитываются среднеквадратичные его значения при усреднении за 1, 5 и 30 минут. Результаты расчёта суммарного тока тяговой подстанции представлены на рисунке 4.3.

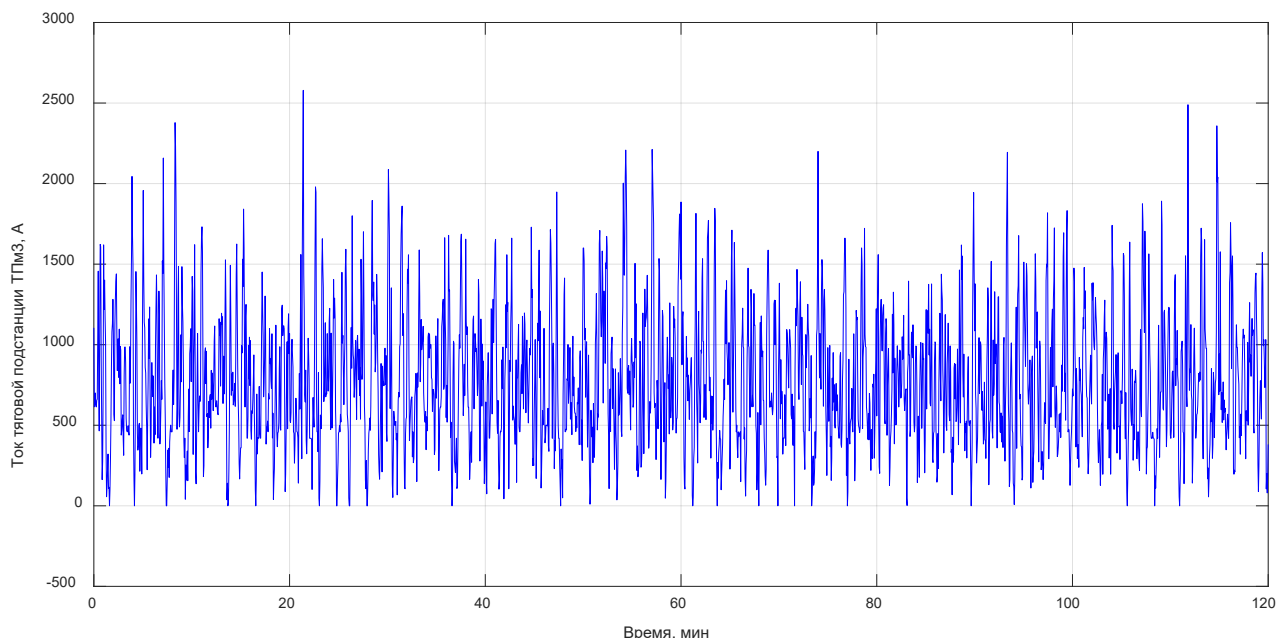


Рисунок 4.3 – Суммарный выпрямленный ток тяговой подстанции ТПм3

Результаты расчёта токов преобразовательного агрегата тяговой подстанции представлены в таблице 4.4. На тяговой подстанции ТПм3 установлено два преобразовательных агрегата с номинальным током 2000 А каждый. Очевидно, что нагрузка преобразовательных агрегатов не превышает допустимой.

Таблица 4.4 – Результаты расчёта загрузки преобразовательных агрегатов в нормальном режиме

Тяговая подстанция	$I_{d\text{ ном}}, \text{ А}$	Ток, А, усредненный за время				Коэфф. загрузки, усреднённые за время		
		мгнов.	1 мин.	5 мин.	30 мин.	1 мин. ($\leq 2,0$)	5 мин. ($\leq 1,5$)	30 мин. ($\leq 1,0$)
ТПм3	2000	2585	1355	1035	922	0,68	0,52	0,46

4.2 Электрические расчёты в режиме маневровой работы в депо

Расчётный график предусматривает, что по депо со случайным интервалом движутся 1 – 2 вагона. При этом на участках питания Фн-0301, Фн-0302, Фн-0303 происходит нормальное движение трамваев и троллейбусов.

Минимальное мгновенное напряжение при нормальной схеме составляет 591 В, в вынужденном режиме – 590 В. Таким образом, требования по потерям напряжения выполняются со значительным запасом.

Эффективные токи проводов контактной сети и также плотность тока в проводах контактной подвески для нормального и вынужденного режима представлены в таблицах 4.5 – 4.6.

Таблица 4.5 – Результаты расчёта эффективных токов и плотности длительного тока в контактном проводе для нормального режима.

Секция	Тип конт. подвески	Режим	Эфф. ток, А, усредненный за период		Плотность тока в КП, А/мм ²
			1 минута	20 минут	
ТПМЗ ФН-0304	2МФ-100	Пит. ФН-0305 от ФН-0304	84	69	0,43
ТПМЗ ФН-0305	2МФ-100	Пит. ФН-0304 от ФН-0305	137	114	0,72

Таблица 4.6 – Результаты расчёта эффективных токов и плотности длительного тока в контактном проводе для вынужденного режима.

Секция	Тип конт. подвески	Режим	Эфф. ток, А, усредненный за период		Плотность тока в КП, А/мм ²
			1 минута	20 минут	
ТПМЗ ФН-0304	2МФ-100	Пит. ФН-0305 от ФН-0304	206	177	1,11
ТПМЗ ФН-0305	2МФ-100	Пит. ФН-0304 от ФН-0305	206	177	1,11

Результаты расчёта загрузки кабельных линий представлены в таблице 4.7

Таблица 4.7 – Результаты расчёта эффективных токов питающих кабелей для вынужденного режима.

Секция	Сечение кабеля, мм ²	Режим	Эфф. ток, А, усредненный за период		Температура кабеля, °С
			1 минута	20 минут	
ТПМЗ ФН-0304	800	Пит. ФН-0305 от ФН-0304	206	177	26,6
ТПМЗ ФН-0305	800	Пит. ФН-0304 от ФН-0305	206	177	26,6

Результаты расчёта токов преобразовательного агрегата тяговой подстанции представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты расчёта загрузки преобразовательных агрегатов в нормальном режиме

Тяговая подстанция	I _{d ном} , А	Ток, А, усредненный за время				Коэфф. загрузки, усреднённые за время		
		мгнов.	1 мин.	5 мин.	30 мин.	1 мин. (≤2,0)	5 мин. (≤1,5)	30 мин. (≤1,0)
ТПМЗ	2000	2425	1254	952	838	0,63	0,48	0,42

Загрузка преобразовательного агрегата находится в допустимых пределах.

4.4 Расчёт уставок токовых защит

Уставка быстродействующей токовой защиты тяговой сети трамвайной линии, А, должна согласно п. 8.3 СП 98.13330.2018 должна удовлетворять условию (при обращении одиночных вагонов):

$$2 \cdot I_{cp} + 1000 \leq I_{уст} \leq 0,9 \cdot I_{к.мин} ,$$

где I_{cp} - средний расчётный ток участка контактной сети, А;

$I_{к.мин}$ - минимальный ток короткого замыкания в наиболее удалённой точке, А.

Так как по результатам электрического расчёта доступны значения максимальных токов питающих линий, то принято решение использовать для расчётов эти значения. В результате, формула для выбора уставки приобретает следующий вид:

$$I_{p.max} + 300 \leq I_{уст} \leq 0,9 \cdot I_{к.min},$$

где $I_{p.max}$ - максимальный рабочий ток фидера, А;

Так как максимальные рабочие токи всех фидеров обычно больше, чем их удвоенный средний ток плюс 1000 А, то требования п. 8.3 СП 98.13330.2018 при этом выполняются.

Минимальный ток короткого замыкания, А:

$$I_{к.min} = \frac{U_{xx.пс} \cdot (1 - 0,05) - U_d}{\rho + R_{п} + R_o + (r_{кc} + r_{п}) \cdot l_{к}},$$

где $U_{xx.пс}$ - напряжение холостого хода на шинах подстанции, $U_{xx.пс} = 650$ В;

0,05 - коэффициент, учитывающий возможное снижение питающего напряжения;

U_d - падение напряжение на дуге в месте КЗ, принято равным 60 В;

ρ - эквивалентное внутреннее сопротивление тяговой подстанции, Ом;

$R_{п}$, R_o - сопротивление питающей и отсасывающей линии, Ом;

$r_{кc}$, $r_{п}$ - удельное сопротивление тяговой сети и рельсового пути, Ом/км;

$l_{к}$ - расстояние до точки короткого замыкания, км.

Сопротивление тяговой подстанции принято равным 0,0154 Ом (см. таблицу 3.1) Сопротивление питающих и отсасывающей линии приняты по максимальной длине питающих линий – 0,13 м. Сопротивление тяговой сети принято для двух проводов МФ-100 – 0,1106 Ом/км (длина участка 0,3 км), для одного провода МФ-100 – 0,2152 Ом/км (длина участка тяговой 0,11 км от СП №22 до секционного изолятора на пути №16). Данные по длине представлены для наиболее удалённой от места подключения питающих линий точки. В результате минимальный ток короткого замыкания составляет:

$$I_{к.min} = \frac{650 \cdot (1 - 0,05) - 60}{0,0154 + 0,0048 + 0,0048 + 0,1115 \cdot 0,3 + 0,2152 \cdot 0,11} = 6788 \text{ (А)}.$$

Максимальный ток нагрузки двух фидеров в вынужденном режиме составляет 360 А (см. рисунок 4.2). В результате ток уставки должен находиться в диапазоне, А:

$$360 + 300 = 660 \leq I_{уст} \leq 0,9 \cdot 6788 = 6110.$$

Для питающих линий Фн-0304 и Фн-0305 принимаем ток уставки 2000 А. Для питающей линии Фн-0306 рекомендуется уменьшенная уставка – 1000 А. Это позволит снизить вероятность повреждений при испытаниях электрооборудования вагонов.

4.5 Расчёт потребной мощности на тягу

Мощность на тягу определяется произведением выпрямленного тока (пример кривой выпрямленного тока представлен на рисунке 4.3) на напряжение на шинах тяговой подстанции. Исходя из сравнения данных таблиц 4.4 и 4.8, видно, что наибольшая мощность тяговой подстанции будет в режиме утреннего выпуска вагонов. В этом режиме средняя активная мощность на тягу будет составлять 518,5 кВт. Активная мощность собственных нужд тяговой подстанции составит приблизительно 20 кВт. Итого, суммарная мощность активная мощность тяговой подстанции 539 кВт. Коэффициент мощности преобразователей на каждом шаге моделирования может быть определён через значение выпрямленного тока I_d по формуле:

$$\kappa_m = \kappa_n \cdot \sqrt{1 - \frac{I_d \cdot X_a}{\sqrt{2} \cdot U_2}},$$

где U_2 - линейное напряжение вторичной обмотки преобразовательного трансформатора, В;

κ_n - коэффициент искажения формы кривой тока выпрямителя, для шестипульсового выпрямителя $\kappa_n = 0,955$;

X_a - приведенное к вторичной обмотке индуктивное сопротивление питающей энергосистемы и преобразовательного трансформатора, Ом.

В результате реактивная мощность на тягу составит 194,9 квар. Реактивная мощность собственных нужд приблизительно составляет 12 квар. Итого, суммарная реактивная мощность будет 207 квар.

ВЫВОДЫ

Питание тяговой сети трамвайного депо следует выполнить от проектируемой тяговой подстанции ТПм3 по трём питающим линиям. Две из них питают парковые пути, ещё одна линия идёт на питание путей цеха ремонта. Схему секционирования тяговой сети принять в соответствии с рисунком 3.1 данной записки. Питающие и отсасывающие линии выполнить кабелем с алюминиевой жилой сечением не менее 800 мм² и двумя контрольными жилами. Кабель может иметь как бумажную так и СПЭ-изоляцию. Номинальный ток питающих шкафов или настенных коробов должен быть не менее 1300 А.

Мощность преобразовательного оборудования тяговой подстанции, принятая в разделе 0484ГП.09-7-ТКР2 (два агрегата с номинальным выпрямленным током 2000 А, и мощностью первичной обмотки преобразовательных трансформаторов не менее 1342 кВА) достаточна для питания нагрузки трамвайного депо.

Контактную подвеску на всех путях депо выполнить одиночным проводом типа МФ-100. Для снижения потерь энергии, исключения термического повреждения проводов на всех параллельно проходящих путях необходимо предусмотреть междупутные перемычки. Перемычки следует располагать так, все параллельно идущие пути имели соединение минимум в двух точках (включая соединители на стрелочных переводах). Расстояние между точками соединения не должно превышать 200 м.