
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
СТАНДАРТ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р
*(проект, первая
редакция)*

**СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

Методика выбора основных параметров

Настоящий проект стандарта не подлежит применению до его утверждения



Москва
Стандартинформ
201_

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 45 «Железнодорожный транспорт»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от _____ 201__ г. № _____

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Национальный орган Российской Федерации по стандартизации не несет ответственности за патентную чистоту настоящего стандарта. Патентообладатель может заявить о своих правах и направить в национальный орган по стандартизации аргументированное предложение о внесении в настоящий стандарт поправки для указания информации о наличии в стандарте объектов патентного права и патентообладателе

Правила применения настоящего стандарта установлены в ГОСТ Р 1.0–2012 (раздел 8). Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в годовом (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок – в ежемесячно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования – на официальном сайте национального органа Российской Федерации по стандартизации в сети Интернет (www.gost.ru)

© Стандартиформ, 201_

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения	
2 Нормативные ссылки	
3 Термины и определения	
4 Общие положения	
5 Выполнение тяговых расчетов	
6 Выполнение электрических расчетов	
7 Выбор расстояния между смежными тяговыми подстанциями и мест их расположения	
8 Выбор мощности и количества силовых трансформаторов	
9 Выбор номинального тока на выходе и количества статических преобразователей	
10 Выбор номинального тока коммутационных аппаратов и трансформаторов тока	
11 Выбор номинального тока отключения выключателей	
12 Выбор марки, сечения и количества проводов контактной сети, проводов и кабелей питающих, отсасывающих и шунтирующих линий	
13 Выбор марки, сечения и количества проводов сборных и соединительных шин распределительных устройств тяговых подстанций и линейных устройств тягового электроснабжения	
Библиография	
Приложение А (рекомендуемое) Методика тяговых расчетов при выборе основных параметров систем тягового электроснабжения...	
Приложение Б (справочное) Схемы замещения элементов систем тягового электроснабжения и определение их параметров.....	
Приложение В (рекомендуемое) Определение параметров рабочего режима систем тягового электроснабжения на основе моделирования графика движения поездов.....	
Приложение Г (рекомендуемое) Методика расчета температуры нагрева и допустимого длительного тока проводов контактной сети и воздушных линий	

ГОСТ Р

проект, первая редакция

Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Методика выбора основных параметров

The railway track power supply systems.

The methods of fundamental parameters

Дата введения – _____

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на системы тягового электроснабжения железных дорог и устанавливает методику выбора основных параметров устройств электрификации.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 839 Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия

ГОСТ 2585–81 Выключатели автоматические быстродействующие постоянного тока. Общие технические условия

ГОСТ 7746–2001 Трансформаторы тока. Общие технические условия

ГОСТ 11677 Трансформаторы силовые. Общие технические условия

ГОСТ 14209–85 Трансформаторы силовые масляные общего назначения.

Допустимые нагрузки

ГОСТ 16772–77 Трансформаторы и реакторы преобразовательные. Общие технические условия

ГОСТ Р

проект, первая редакция

Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров

ГОСТ 32697 Тросы контактной сети железной дороги несущие.

Технические условия

ГОСТ 32895 Электрификация и электроснабжение железных дорог.

Термины и определения

ГОСТ Р 51559 Трансформаторы силовые масляные классов напряжения 110 и 220 кВ и автотрансформаторы напряжением 27,5 кВ для электрических железных дорог переменного тока. Общие технические условия

ГОСТ Р 52565–2006 Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия

ГОСТ Р 52719 Трансформаторы силовые. Общие технические условия

ГОСТ Р 52735–2007 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ

ГОСТ Р 54505 Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте

ГОСТ Р 55647 Провода контактные из меди и ее сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия

Примечание – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов (сводов правил и/или классификаторов) в информационной системе общего пользования - на официальном сайте национального органа Российской Федерации по стандартизации в сети Интернет или по ежегодно издаваемому информационному указателю "Национальные стандарты", который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячно издаваемого информационного указателя "Национальные стандарты" за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт (документ), на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта (документа) с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт (документ), на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта (документа) с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт (документ), на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт (документ) отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 32895, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 пакет поездов: Два и более следующих один за другим поезда с заданным наименьшим интервалом на электротяге.

3.2 час интенсивных перевозок: Период времени наиболее критический для устройств электроснабжения.

3.3 расчетная масса (поезда): Среднее арифметическое значение массы всех поездов, включая пассажирские, обращающихся на каждом пути участка за одни сутки.

3.4 участок с преимущественно грузовым движением: Участок, на котором число грузовых поездов превышает число пассажирских.

3.5 участок с преимущественно пассажирским движением: Участок, на котором число пассажирских поездов превышает число грузовых.

3.6 участок (железной дороги) с односторонним питанием: Электрифицированный участок железной дороги, включающий в себя как минимум один перегон и расположенный между последней тяговой подстанцией и концом электрифицированного участка.

3.7 "мёртвая зона" защиты тяговой сети: Зона тягового электроснабжения, не защищенная от коротких замыканий.

4 Общие положения

4.1 Основные требования

4.1.1 Настоящий стандарт устанавливает методику выбора следующих основных параметров систем тягового электроснабжения:

- расстояние между смежными тяговыми подстанциями и места их расположения;

- мощность и число силовых трансформаторов, а также

автотрансформаторов системы 2×25 кВ;

- номинальный ток на выходе и число преобразователей системы тягового электроснабжения постоянного тока;

- номинальный ток коммутационных аппаратов и трансформаторов тока;

- номинальный ток отключения выключателей;

- марка, сечение и число проводов контактной сети, проводов и кабелей питающих, отсасывающих и шунтирующих линий;

- марка, сечение и число проводов сборных и соединительных шин тяговых подстанций и линейных устройств тягового электроснабжения.

4.1.2 Значения основных параметров, кроме расстояний между подстанциями, необходимо выбирать из номинальных рядов, установленных стандартами на соответствующую продукцию.

4.1.3 В нормальном режиме работы системы тягового электроснабжения при размерах движения, соответствующих часу интенсивных перевозок, и без ввода в работу резервирующих трансформаторов и преобразователей должно быть обеспечено одновременное выполнение следующих условий:

- напряжение на токоприемнике электроподвижного состава без учета импульсов напряжения, вызванных переходными процессами и воздействием атмосферных перенапряжений, должно находиться в пределах, указанных в таблице 1;

- ток каждого из элементов системы тягового электроснабжения не должен превышать длительно допустимого значения для данного элемента с учетом установленных норм допустимых перегрузок по току и времени усреднения;

- температура нагрева контактных проводов и несущих тросов из меди и ее сплавов не должна превышать допустимых значений по ГОСТ Р 55647, ГОСТ 32697, а остальных проводов – значений, указанных в таблице 2;

- не должна образовываться "мертвая зона" защиты тяговой сети;

- не должны приниматься избыточные значения основных параметров.

Примечание – Для продукции, в отношении которой стандарты не разработаны, допустимые значения перегрузки по току и времени усреднения принимают по техническим условиям.

4.1.4 Допустимый ток проводов контактной сети следует определять при температуре окружающей среды 50°C и скорости ветра 1 м/с.

4.1.5 Проверку контактной сети по температуре нагрева проводов следует выполнять также при отдельном питании путей.

4.1.6 Параметры контактной сети системы тягового электроснабжения постоянного тока выбирают с учетом износа контактных проводов, равного 15 % площади полного сечения.

Таблица 1 — Допустимые значения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава

В киловольтах

Режим работы системы тягового электроснабжения	Напряжение	Система переменного тока (действующее значение)		Система постоянного тока	
		На шинах подстанции	В контактной сети и на токоприемнике ЭПС	На шинах подстанции	В контактной сети и на токоприемнике ЭПС
1 Все режимы	Номинальное	27,50	25,00	3,30	3,00
2 Нормальный При скорости до 160 км/ч	Наибольшее	28,00	28,00	3,80	3,80*
	Наименьшее среднее за 3 мин	—	21,00	—	2,70
3 Нормальный При скорости от 160 до 250 км/ч	Наименьшее среднее за 1 мин	—	24,00	—	2,90
4 Вынужденный	Наибольшее	29,00	29,00	3,85	3,85
	Наименьшее	—	19,00	—	2,20

* На участках железной дороги, где применяют рекуперативное торможение, допускается 4,0 кВ.

Т а б л и ц а 2 — Допустимая температура нагрева проводов

В градусах Цельсия

Тип провода	Допустимая температура нагрева:	
	среднее значение за 20 мин	наибольшее значение
Медные многопроволочные не в качестве несущего троса	90	110
Бронзовые, сталемедные, биметаллические контактные и многопроволочные	90	130
Алюминиевые и сталеалюминиевые многопроволочные, в том числе биметаллические	70	100

4.2 Исходные данные для выбора основных параметров

4.2.1 Основные параметры, перечисленные в 4.1.1, кроме мест расположения подстанций, должны быть выбраны исходя из условий эксплуатации на расчетный срок 5 лет без необходимости переустройства.

4.2.2 В качестве исходных данных для расчета основных параметров следует принимать:

а) число грузовых и пассажирских поездов, включая пригородные, в средние сутки месяца интенсивных перевозок по каждому пути двухпутных и многопутных участков и по обоим направлениям движения для однопутных участков;

б) масса поездов всех типов;

в) наименьший межпоездной интервал в пакетах поездов различных категорий;

г) число поездов или график движения поездов в час интенсивных перевозок;

д) распределение категорий поездов по путям для многопутных участков.

4.2.3 При отсутствии данных, указанных в перечислениях в), г) 4.2.2, на участках с преимущественно грузовым движением их следует принимать приближенно:

- на двухпутных участках с преимущественно грузовым движением интервалы – по таблице 3, при этом в направлении движения с наибольшим электропотреблением принимается пакет из поездов расчетной и наибольшей массы, а в обратном направлении – все поезда расчетной массы. Число поездов наибольшей массы в пакете, если оно составляет менее 5 % от общего числа поездов в сутки, следует принимать равным одному, если от 5 % до 25 % – два поезда, более 25 % – три поезда;

- на однопутных участках с преимущественно грузовым движением должен приниматься частично-пакетный график при пропуске пакета из трех поездов расчетной и наибольшей массы с интервалом в соответствии с таблицей 3 в направлении наибольшего электропотребления.

Т а б л и ц а 3 — Расчетные параметры движения поездов на участках преимущественно с грузовым движением

Расчетные размеры движения, пар в сутки		Интервал на одном пути в направлении с наибольшим электропотреблением, мин ¹	Число грузовых поездов на двухпутных и многопутных участках в направлении с наибольшим электропотреблением в час интенсивных перевозок ² , шт.
Грузовых	Пассажирских и пригородных		
Свыше 65	Свыше 20	7	8 ²
	До 20	8	7 ²
Св. 40 до 65 включ.	Свыше 20	8	7 ²
	До 20	9	6 ²
Св. 20 до 40 включ.	Свыше 20	9	6 ²
	До 20	10	5 ²
Св. 10 до 20 включ.	До 10	12	4
До 10 включ.	До 10	20	2
¹ Интервал на других путях больше в 1,4 раза, но не менее 11 мин.			
² Число поездов в час в обратном направлении в соответствии с увеличенным в 1,4 раза интервалом, но не менее 11 мин.			

4.2.4 При отсутствии данных, указанных в перечислениях в), г) 4.2.2, на участках с преимущественно пассажирским движением их следует принимать

приблизенно по таблице 4.

4.3 Порядок выбора основных параметров

4.3.1 Выбор основных параметров осуществляют по результатам тяговых и электрических расчетов. Параметры следует выбирать, как правило, без учета режима рекуперации за исключением случаев, когда рекуперативное торможение на участках с затяжными спусками применяют для обеспечения безопасности движения поездов.

Т а б л и ц а 4 – Расчетные параметры движения поездов на участках преимущественно с пассажирским движением

Расчетные размеры движения, пар в сутки		Интервал, мин*	Число пассажирских поездов на двухпутных и многопутных участках в час интенсивных перевозок**, шт.
пассажирских и пригородных	грузовых		
Свыше 65	Свыше 20	6	10
	До 20	7	8
Св. 40 до 65 включ.	Свыше 20	8	7
	До 20	10	6
Св. 20 до 40 включ.	10 - 20	12	4
	До 10	15	3
До 20 включ.	До 10	20	2
* Интервал на других путях больше в 1,4 раза, но не менее 11 мин.			
** Число поездов в час в обратном направлении в соответствии с увеличенным в 1,4 раза интервалом, но не менее 11 мин.			

4.3.2 Тяговые расчеты необходимо проводить для поездов, заданных в соответствии с 4.2.2, в обоих направлениях движения:

- пассажирских;
- грузовых наибольшей массы;
- грузовых расчетной массы.

4.3.3 Электрические расчеты следует выполнять с учетом изменения потребления тока из контактной сети электроподвижным составом при его

перемещении по участку на основе математического моделирования расчетного графика движения поездов, который формируют с использованием результатов тяговых расчетов.

4.3.4 При отсутствии данных, указанных в перечислениях в), г) 4.2.2, следует принимать следующие расчетные графики движения поездов:

а) на двухпутных и многопутных участках:

1) в направлении наибольшего электропотребления пакет из $N_{ич1}$ поездов, проложенный спустя не менее восьми часов от начала графика движения, с интервалом J_p в соответствии с таблицами 3 или 4, остальные поезда до и после пакета – расчетной массы в количестве $N_{с1} - N_{ич1}$ с интервалом, мин,

$$J_1 = \frac{1440 - T_{ич} - T_{тех}}{N_{с1} - N_{ич1}}, \quad (4.1)$$

где $T_{ич}$ – продолжительность периода интенсивных перевозок, мин;

$T_{тех}$ – продолжительность суточного бюджета времени, выделяемого для производства плановых ремонтно-строительных работ на сооружениях железнодорожной инфраструктуры: $T_{тех} = 120$ мин, если не задано иное значение;

$N_{с1}$ – число поездов в сутки на данном пути;

2) в обратном направлении все поезда расчетной массы в количестве $N_{с2}$, заданном в сутки для данного пути, с интервалом $J_2 = 1,4 J_p$, но не менее 11 мин;

б) на однопутных участках частично-пакетный график при пропуске пакета из трех поездов с интервалом согласно таблицам 3 или 4 в направлении наибольшего электропотребления и при скрещении этого пакета со встречными поездами расчетной массы на всех отдельных пунктах с путевым развитием.

В случае примерно одинакового электропотребления по путям или направлениям движения в расчетном графике движения следует рассматривать отдельно пакеты поездов по каждому пути или направлению движения.

На участках смешанного движения грузовых поездов и пассажирских поездов со скоростями свыше 160 км/ч в расчетном графике движения должны быть учтены пакеты поездов обеих указанных категорий поездов.

На участках с преимущественно пригородным движением расчетный график движения следует формировать с учетом числа пар пригородных поездов в час интенсивных перевозок.

4.3.5 Основные параметры должны выбираться по результатам проведения вариантных электрических расчетов. Исходный вариант параметров системы тягового электроснабжения должен быть согласован с владельцем инфраструктуры.

Окончательно должен быть выбран тот вариант, расчетные значения основных параметров при котором удовлетворяют требованиям 4.1.3.

4.3.6 При несоблюдении требований 4.1.3 следует рассматривать варианты с применением следующих технических решений в порядке возрастания стоимости:

а) на участках постоянного тока:

1) применение одного или двух усиливающих проводов контактной сети;

2) применение пунктов параллельного соединения контактных сетей путей;

3) применение на тяговых подстанциях управляемых преобразователей с регулированием постоянного напряжения, в том числе с вольтодобавочной схемой выпрямления;

4) применение системы тягового электроснабжения с дополнительным проводом напряжением 6 и выше кВ постоянного тока и пунктами преобразования напряжения;

5) применение тяговых подстанций, получающих электроэнергию от смежных тяговых подстанций по линиям электропередачи напряжением 20 кВ

переменного тока и выше;

б) применение дополнительных тяговых подстанций с питанием от системы внешнего электроснабжения;

7) перевод на систему тягового электроснабжения переменного тока;

б) на участках переменного тока:

1) применение усиливающего провода в контактной сети;

2) применение пунктов параллельного соединения контактных сетей путей;

3) применение устройств поперечной емкостной компенсации;

4) применение устройств продольной емкостной компенсации;

5) перевод отдельных межподстанционных зон на систему тягового электроснабжения с экранирующим и усиливающим проводами, кроме зон III и выше района по гололедообразованию;

б) перевод отдельных межподстанционных зон на систему тягового электроснабжения 2×25 кВ;

7) применение дополнительных тяговых подстанций.

Пункты параллельного соединения на участках как постоянного, так и переменного тока следует применять в межподстанционных зонах с горным профилем пути или при существенном (в два и более раза) различии токопотребления между поездами разных путей.

4.3.7 Выбранные в соответствии с 4.3.5 значения основных параметров должны быть проверены на выполнение тех же условий в вынужденном режиме работы системы тягового электроснабжения при отключении каждой из тяговых подстанций (по одной), а для системы тягового электроснабжения 2×25 кВ – еще и каждого из автотрансформаторных пунктов (по одному) при введенных в работу резервирующих трансформаторах и преобразователях на всех остальных тяговых подстанциях и автотрансформаторных пунктах при пропуске по прилегающим к отключенной тяговой подстанции межподстанционным зонам одного поезда расчетной массы.

В случае невыполнения указанных в 4.1.3 условий выбранные значения основных параметров системы тягового электроснабжения должны быть откорректированы.

5 Выполнение тяговых расчетов

5.1 Тяговые расчеты при выборе основных параметров систем тягового электроснабжения следует проводить для определения электрической нагрузки контактной сети в различных точках железнодорожного участка в зависимости от профиля и плана пути, характеристик электроподвижного состава, массы поезда и параметров состава вагонов, а также режима ведения поезда и др. условий.

5.2 В результате тяговых расчетов должны быть получены следующие основные параметры:

- расходы электроэнергии (при переменном токе полные и активные) и время хода по перегонам участка;

- зависимости токов (суммарно по всем токоприемникам электроподвижного состава) и координат положения поезда на участке от времени с равномерным шагом Δt по 6.1.4.

5.3 Результирующие параметры, перечисленные в 5.2, следует рассчитывать на основе решения системы дифференциальных уравнений движения поезда

$$dv / dt = \zeta (F_k(v) - B_T(v) - W_o(v) - W_i) / m_{п}, \quad (5.1)$$

$$dl / dt = \zeta_f v, \quad (5.2)$$

$$I_{кс} = I_{\Theta}(v), \quad (5.3)$$

где v – скорость движения поезда, км/ч;

ζ – ускорение или замедление поезда при удельной силе 1 Н/т;
 $\zeta = 0,2038 \text{ км}/(\text{ч} \cdot \text{мин}) / (\text{Н}/\text{т})$;

$F_k(v)$ – тяговая характеристика электроподвижного состава по данным завода-изготовителя, кН;

$B_T(v)$ – зависимость силы торможения поезда от скорости, кН;

$W_0(v)$ – основное сопротивление движению поезда, кН;

W_i – дополнительное сопротивление движению от уклона и от кривой, кН;

$m_{п}$ – масса поезда, т;

ζ_t – коэффициент, учитывающий размерность времени: $\zeta_t = 1 / 60$;

$I_{кС}$ – ток, потребляемый из контактной сети электроподвижным составом поезда, А;

$I_{\Theta}(v)$ – токовая характеристика электроподвижного состава по данным завода-изготовителя, А.

5.4 В расходах электроэнергии и в токовой нагрузке контактной сети должна быть учтена мощность собственных нужд электроподвижного состава, а для пассажирских поездов – также мощность, расходуемая на освещение и отопление вагонов или кондиционирования воздуха.

5.5 При расчетах необходимо учитывать:

- остановки на станциях, обусловленные технологией работы железнодорожного участка;
- постоянно действующие предупреждения об ограничении скорости движения поездов по состоянию сооружений инфраструктуры;
- наличие участков подталкивания и двойной (кратной) тяги.

5.6 Методика расчета результирующих параметров на основе интегрирования уравнений (5.1)–(5.3) в конечных приращениях приведена в приложении А.

Допускается использование других методов и способов интегрирования уравнений движения поезда при условии, что их результаты соответствуют 5.2.

6 Выполнение электрических расчетов

6.1 Общие положения

6.1.1 Основные параметры систем тягового электроснабжения выбирают по условиям соответствия показателей, характеризующих режимы работы устройств тягового электроснабжения, нормативным значениям согласно 4.1.3. К этим показателям относятся следующие параметры режима систем тягового электроснабжения:

- токи в силовом оборудовании, коммутационных аппаратах, шинах распределительных устройств тяговых подстанций и линейных устройств, в питающих, отсасывающих и шунтирующих линиях, проводах контактной сети;

- температуры нагрева элементов силовых трансформаторов и автотрансформаторов системы 2×25 кВ, проводов контактной сети;

- напряжения на шинах контактной сети тяговых подстанций и на токоприемниках электроподвижного состава.

6.1.2 Значения перечисленных в 6.1.1 показателей определяют по результатам электрических расчетов.

Расчеты наибольших, наименьших и усредненных за заданный период времени значений параметров режима необходимо проводить с учетом изменения во времени электрической нагрузки контактной сети в процессе перемещения электроподвижного состава по участку в соответствии с расчетным графиком движения поездов, удовлетворяющим требованиям 4.2.2, 4.3.4.

6.1.3 В результате расчетов должны быть получены:

- числовые ряды значений токов и напряжений в отдельные моменты времени с равномерным шагом Δt при фиксированном в эти моменты расположении поездов на участке;

- наибольшие, наименьшие и усредненные токи, напряжения и температуры на основе обработки данных числовых рядов.

6.1.4 Значение шага Δt следует выбирать не более:

- при системе постоянного тока 0,5 мин;
- при системах переменного тока 1,0 мин;
- при наличии поездов со скоростями движения свыше 160 км/ч при всех системах 0,25 мин.

6.1.5 Уравнения, связывающие параметры систем тягового электроснабжения с искомыми параметрами режима, необходимо составлять на основе расчетных электрических схем этих систем.

6.1.6 Расчетную схему системы тягового электроснабжения формируют из схем замещения отдельных ее элементов посредством совмещения их внешних узлов, к которым относятся:

- шины тяговых подстанций и постов секционирования;
- точки подключения к контактной сети пунктов параллельного соединения контактных сетей, автотрансформаторных пунктов системы 2×25 кВ и других устройств.

Схемы замещения тяговых подстанций и устройств тяговой сети, а также методика определения их параметров приведены в приложении Б.

6.1.7 В расчетной схеме участка, на котором осуществляют проверку основных параметров системы тягового электроснабжения, необходимо учитывать смежные межподстанционные зоны, при их наличии, на границах этого участка.

6.2 Порядок выполнения расчетов

6.2.1 Порядок действий при реализации модели графика движения поездов приведен в приложении В.

6.2.2 На каждом шаге моделирования формируют мгновенную расчетную схему с учетом дополнительных узлов в тяговой сети, к которым подключаются источники тока, соответствующие нагрузкам от электроподвижного состава в местах их расположения на участке, как показано

на рисунках Б.4, Б.5 (приложение Б).

6.2.3 Мгновенные схемы рекомендуется рассчитывать методом узловых потенциалов или контурных токов на ЭВМ.

Полученные в ходе расчета на каждом шаге моделирования токи ветвей и напряжения узлов должны быть сохранены в соответствующих массивах промежуточных результатов.

Допускается применять другие методы расчета, способы хранения и обработки промежуточных результатов, обеспечивающие рациональное использование ресурсов ЭВМ.

6.2.4 По завершении процесса моделирования графика движения поездов следует определить указанные в 6.1.1 показатели режима работы устройств тягового электроснабжения на основе обработки промежуточных результатов расчетов мгновенных схем.

Для определения показателя режима по любому параметру X из массивов промежуточных результатов расчетов необходимо выбрать числовой ряд $X(k)$, содержащий M_k значений параметра, рассчитанных за время T моделирования графика движения с шагом по времени Δt : $M_k = T / \Delta t$; $k = 1 \dots M_k$.

В ходе обработки числового ряда должны быть вычислены максимальные $X_{\max T_c}$ и (или) минимальные $X_{\min T_c}$ средние, а также наибольшие эффективные (средние квадратические) $X_{\text{эф} T_c}$ значения параметра за периоды времени T_c , установленные в 4.1.3, по методу скользящего среднего

$$X_{\max T_c} = \max_k [\text{sum}_i X(i) / M_c], \quad (6.1)$$

$$X_{\min T_c} = \min_k [\text{sum}_i X(i) / M_c], \quad (6.2)$$

$$X_{\text{эф} T_c} = \max_k [\text{sum}_i X^2(i) / M_c]^{1/2} \quad (6.3)$$

$$\text{при } M_c = T_c / \Delta t, \quad k = 1 \dots M_k - M_c, \quad i = k \dots k + M_c.$$

Абсолютное наибольшее X_{\max} и наименьшее X_{\min} значения параметра рассчитывают по (6.1), (6.2) при $T_c = \Delta t$, $M_c = 1$.

7 Выбор расстояния между смежными тяговыми подстанциями и мест их расположения

7.1 Расстояния между смежными тяговыми подстанциями следует определять при проектировании исходя из необходимости выполнения требований, установленных в разделе 4. Рекомендуется принимать эти расстояния не более:

а) для железнодорожных линий, электрифицированных на постоянном токе:

- 1) категории II и выше – 20 км;
- 2) III и IV категорий – 25 км;

б) для железнодорожных линий, электрифицированных на переменном токе:

- 1) по системе тягового электроснабжения 25 кВ – 50 км;
- 2) по системе тягового электроснабжения 2×25 кВ или системе тягового электроснабжения с экранирующими и усиливающими проводами – 70 км.

7.2 Вновь сооружаемые тяговые подстанции располагают, как правило, на станциях, закрытие (консервация) которых не планируется, или на перегонах не далее 1 км от границы станции. Исключения допускаются для тяговых подстанций постоянного тока, которые при длине перегонов свыше 20 км могут быть расположены на перегоне на расстоянии от границы станции, превышающем 1 км. В этом случае преимущество отдают варианту расположения тяговой подстанции вблизи пассажирского остановочного пункта.

8 Выбор мощности и количества силовых трансформаторов

8.1 Общие требования к трансформаторам

8.1.1 На вновь сооружаемых и реконструируемых тяговых подстанциях следует, как правило, применять силовые трансформаторы по ГОСТ 11677, ГОСТ Р 51559 или ГОСТ Р 52719:

- с высшим напряжением 110 и 220 кВ – масляные с устройствами регулирования напряжения под нагрузкой;

- с высшим напряжением от 15 до 35 кВ – масляные с устройствами переключения ответвлений без возбуждения;

- с высшим напряжением до 10 кВ включительно – сухие с устройствами переключения ответвлений без возбуждения.

Исключения допускаются по согласованию с владельцем инфраструктуры.

Примечание – В тексте настоящего пункта по отношению к силовым трансформаторам и автотрансформаторам, если не требуется специального разделения, применяется термин "трансформатор".

8.1.2 Резервирующие друг друга силовые трансформаторы должны иметь такое соотношение параметров, которое допускает возможность параллельной работы этих трансформаторов:

- группы соединений обмоток одинаковы, а соотношение между их номинальными мощностями не превышает 1:3;

- коэффициенты трансформации различаются не более чем на $\pm 0,5\%$;

- напряжения короткого замыкания различаются не более чем на $\pm 10\%$ среднего арифметического значения;

- произведена фазировка трансформаторов.

8.1.3 Мощность масляных трансформаторов и автотрансформаторов по ГОСТ 11677, ГОСТ Р 51559, ГОСТ Р 52719 должна соответствовать следующим требованиям:

- температура наиболее нагретой точки любой обмотки и температура масла в верхних слоях не должны превышать допустимых значений по ГОСТ 14209;

- наибольшая кратность систематической нагрузки любой обмотки относительно номинального тока не должна превышать значений за период усреднения нагрузки:

10 мин.....1,5;

1 мин.....2,0.

Проверочные расчеты температуры элементов трансформатора следует проводить для условий максимальной температуры окружающего воздуха 35°C.

8.1.4 Окончательный выбор номинальной мощности понижающих трансформаторов следует производить с учетом обеспечения среднего напряжения на шинах распределительных устройств (РУ) подстанций не менее:

10,0 (6,0) кВ.....на шинах РУ-10 (6) кВ подстанций постоянного тока

25,0 кВ..... » РУ-25 (2×25) кВ « переменного тока

(шины контактной сети).

8.2 Требования к количеству силовых трансформаторов

8.2.1 Общие требования

8.2.1.1 При выборе количества силовых трансформаторов следует соблюдать следующие общие требования:

- количество ступеней трансформации электроэнергии должно быть минимально возможным;

- не следует применять трех- и четырехобмоточные трансформаторы в тех случаях, когда их третья (четвертая) обмотка не будет использоваться.

8.2.1.2 В отдельных случаях, обусловленных наличием отходящих от тяговой подстанции линий электропередачи различных напряжений или специализированных для питания СЦБ, соотношением между мощностью на тягу поездов и питание нетяговых потребителей и другими обстоятельствами,

при наличии технико-экономического обоснования и по согласованию с владельцем инфраструктуры допускается увеличивать количество силовых трансформаторов и преобразовательных агрегатов по отношению к установленному настоящим стандартом.

8.2.1.3 На действующих подстанциях при их реконструкции количество (мощность) отдельных силовых трансформаторов, если они превышают требуемые по настоящему стандарту количество (мощность), могут быть по согласованию с владельцем инфраструктуры оставлены на прежнем уровне.

8.2.2 Требования к количеству силовых трансформаторов на подстанциях с высшим напряжением 110 кВ и выше

8.2.2.1 На тяговых подстанциях, которые являются одновременно основным и резервным источником питания для нетяговых потребителей первой или второй категории надежности, с учетом оценки риска, проводимой в соответствии с ГОСТ Р 54505, следует предусматривать два трехфазных трансформатора, мощность каждого должна быть достаточна для обеспечения питания всех нагрузок данной подстанции.

8.2.2.2 На тяговых подстанциях, расположенных на железнодорожных линиях категории II и выше, с учетом оценки риска, проводимой в соответствии с ГОСТ Р 54505, а также на тяговых подстанциях, питающих участки с односторонним питанием железнодорожных линий всех остальных категорий, предусматривают:

а) при системе тягового электроснабжения 2×25 кВ с однофазными трансформаторами – как правило, три однофазных трансформатора (два основных и один резервный, который должен иметь возможность включения взамен любого из основных), мощность каждого из которых удовлетворяет установленным в разделе 4 условиям, а при наличии нетяговых нагрузок – еще и трехфазные трансформаторы мощностью и количеством, удовлетворяющим требованиям 8.2.2.1;

б) при всех остальных системах тягового электроснабжения – не менее двух понижающих трансформаторов, мощность каждого из которых удовлетворяет установленным в разделе 4 условиям.

Исключения из требований перечисления а) допускаются в случаях, когда единичной мощности серийно выпускаемых трансформаторов недостаточно для выполнения установленных в разделе 4 условий. В этих случаях должны вместо одного или обоих основных трансформаторов следует предусматривать соответственно один или два трансформатора, соединенных параллельно, и один резервный, который должен иметь возможность включения взамен любого из основных.

8.2.2.3 На тяговых подстанциях, расположенных на железнодорожных линиях III и IV категории (кроме питающих участки железной дороги с односторонним питанием), должны быть предусмотрены:

а) при системе тягового электроснабжения 2×25 кВ с однофазными трансформаторами – два однофазных трансформатора, мощность каждого из которых удовлетворяет установленным в разделе 4 условиям, а при наличии нетяговых нагрузок – еще и трехфазные трансформаторы мощностью и количеством, удовлетворяющим требованиям 8.2.2.1;

б) при всех остальных системах тягового электроснабжения:

1) один трансформатор, мощность которого удовлетворяет установленным в разделе 4 условиям;

2) один трансформатор, мощность которого должна быть достаточна для обеспечения питания только нетяговых нагрузок (при наличии таких нагрузок) с учетом требований 8.1.2.

8.2.3 Требования к количеству и мощности силовых трансформаторов на подстанциях с высшим напряжением от 6 до 35 кВ

8.2.3.1 На тяговых подстанциях с высшим напряжением от 6 до 35 кВ, которые являются одновременно источником питания для нетяговых потребителей, требования к количеству и мощности трансформаторов аналогичны указанным в 8.2.2.1.

8.2.3.2 На тяговых подстанциях постоянного тока с высшим напряжением от 6 до 35 кВ следует, в дополнение к требованиям 8.2.3.1, предусматривать преобразовательные трансформаторы в соответствии с требованиями 8.2.4.

8.2.4 Требования к количеству и мощности преобразовательных агрегатов на тяговых подстанциях постоянного тока

8.2.4.1 На тяговых подстанциях, расположенных на железнодорожных линиях категории II и выше, на стыковых тяговых подстанциях, а также на тяговых подстанциях, питающих участки с односторонним питанием железнодорожных линий всех остальных категорий, следует предусматривать преобразовательный агрегат (преобразовательные агрегаты), номинальный ток на выходе и количество которых удовлетворяет установленным в разделе 4 условиям, и один резервный преобразовательный агрегат. На одной и той же тяговой подстанции следует применять преобразовательные агрегаты с одним и тем же номинальным током на выходе. Исключения из этого правила допускаются на период реконструкции тяговой подстанции.

8.2.4.2 На тяговых подстанциях, расположенных на железнодорожных линиях III и IV категории (кроме питающих участки с односторонним питанием контактной сети), следует предусматривать один преобразовательный агрегат.

8.2.4.3 Во всех случаях вариант установки трех либо четырех преобразовательных агрегатов меньшей единичной мощности следует рассматривать как более предпочтительный по отношению к варианту

установки соответственно двух либо трех преобразовательных агрегатов большей мощности.

8.2.4.4 На вновь сооружаемых и реконструируемых тяговых подстанциях следует применять преобразовательные трансформаторы с напряжением короткого замыкания коммутации, приведенным к номинальной мощности сетевой обмотки, не более 9 %, и преобразователи с эквивалентной двенадцатифазной мостовой схемой выпрямления по ГОСТ 16772.

8.2.4.5 Вместо одного из выпрямительных преобразователей допускается предусматривать выпрямительно-инверторный преобразователь. Технико-экономическая эффективность применения выпрямительно-инверторных преобразователей подлежит обоснованию на стадии проектирования в сравнении с вариантом применения выпрямительных преобразователей.

8.2.5 Требования к количеству и размещению автотрансформаторов

8.2.5.1 На вновь сооружаемых и реконструируемых автотрансформаторных пунктах следует применять масляные автотрансформаторы по ГОСТ Р 51559.

8.2.5.2 На вновь электрифицируемых по системе 2×25 кВ железнодорожных линиях категории II и выше следует предусматривать по одному автотрансформатору на каждый путь и устанавливать их на общем автотрансформаторном пункте.

На автотрансформаторных пунктах, расположенных на железнодорожных линиях всех остальных категорий, следует предусматривать один автотрансформатор.

8.2.5.3 Мощность автотрансформаторов и количество автотрансформаторных пунктов в межподстанционной зоне следует выбирать из условий соблюдения требований, указанных в разделе 4 и в 8.1.3.

На одном автотрансформаторном пункте целесообразно устанавливать все автотрансформаторы одинаковой номинальной мощности, которую

выбирают по нагрузке пути с наибольшим электропотреблением. Должна быть предусмотрена возможность параллельной работы автотрансформаторов при соблюдении условий, указанных в 8.1.2.

8.2.5.4 Расстояния между смежными автотрансформаторными пунктами и между подстанцией и ближайшим из них рекомендуется выбирать не менее 7 и не более 20 км.

При нечетном количестве автотрансформаторных пунктов рекомендуется средний из них совмещать с постом секционирования.

8.3 Проверочные расчеты при выборе мощности трансформаторов

8.3.1 Общие положения

8.3.1.1 Расчеты при проверке выбранной мощности трансформаторов необходимо проводить с использованием числового ряда значений $K(k)$ кратности нагрузки по отношению к номинальному току проверяемой обмотки или номинальной мощности трансформатора:

$$K(k) = I(k) / I_{\text{ном}}, \quad K(k) = U_{\text{ном}} I(k) / S_{\text{ном}}, \quad (8.1)$$

где $I(k)$ – числовой ряд значений токов обмотки, полученный в результате электрических расчетов (см. 6.1.3), А;

$I_{\text{ном}}$ – номинальный ток обмотки, А;

$S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение обмотки, кВ.

8.3.1.2 Для масляных трансформаторов и автотрансформаторов, кроме преобразовательных, по каждому значению $K(k)$ должны быть рассчитаны температуры масла в верхних слоях $\tau_{\text{м}}(k)$ и наиболее нагретой точки обмотки $\tau_{\text{ннт}}(k)$, °С:

$$\tau_{\text{м}}(k) = \Theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.н}}, \quad (8.2)$$

$$\tau_{\text{ннт}}(k) = \tau_{\text{м}}(k) + \theta_{\text{ннт.м.н}}, \quad (8.3)$$

где $\Theta_{\text{охл}}$ – температура окружающего воздуха, °С;

$\theta_{\text{м.н}}$ – превышение температуры масла над температурой окружающего

воздуха, °С;

$\theta_{\text{ннт.м.}h}$ – превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой масла, °С.

Превышения температур $\theta_{\text{м.}h}$ и $\theta_{\text{ннт.м.}h}$ необходимо рассчитывать по ГОСТ 14209–85 (пункт 2.3) для условий переходного теплового режима нагрева и охлаждения элементов трансформатора при следующих значениях расчетных параметров:

- температура окружающего воздуха $\Theta_{\text{охл}}$ по 8.1.3;
- продолжительность нагрузки на каждом шаге $h = \Delta t / 60$ ч;
- значения относительных нагрузок $K = K(k)$.

По формулам, приведенным в 6.2.4, должны быть вычислены следующие показатели режима работы трансформатора:

- абсолютные наибольшие температуры масла в верхних слоях $\tau_{\text{м max}}$ и наиболее нагретой точки обмотки $\tau_{\text{ннт max}}$;
- максимальные средние значения относительной нагрузки обмотки $K_{\text{max 1}}$, $K_{\text{max 10}}$ за периоды T_c соответственно 1 и 10 мин.

Вычисленные показатели одновременно должны удовлетворять условиям в соответствии с 8.1.3:

$$K_{\text{max 1}} \leq 2,0; \quad K_{\text{max 10}} \leq 1,5, \quad (8.4)$$

$$\tau_{\text{м max}} \leq \Theta_{\text{м.max}}; \quad \tau_{\text{ннт max}} \leq \Theta_{\text{ннт.max}}, \quad (8.5)$$

где $\Theta_{\text{м.max}}$, $\Theta_{\text{ннт.max}}$ – максимально допустимые значения температуры по ГОСТ 14209.

8.3.1.3 Методика расчета показателей режима преобразовательных трансформаторов приведена в 8.3.2.

8.3.2 Проверка нагрузочной способности преобразовательных трансформаторов подстанций системы постоянного тока

Показатели рабочего режима преобразовательных трансформаторов тяговых подстанций системы постоянного тока должны быть рассчитаны по

данным числового ряда токов $I_d(k)$ на стороне выпрямленного напряжения, как показано рисунке Б.1 приложения Б, суммарно по всем преобразователям, получающим питание от проверяемого трансформатора, по формуле

$$K_{\text{ТТ}}(k) = U_{d0\text{T}} I_d(k) / (n_{\text{ТТ}} S_{\text{ТТ ном}}), \quad (8.6)$$

где $U_{d0\text{T}}$ – номинальное напряжение сетевой обмотки трансформатора, приведенное к стороне выпрямленного тока, кВ;

$S_{\text{ТТ ном}}$ – номинальная мощность сетевой обмотки трансформатора, кВ·А;

$n_{\text{ТТ}}$ – число параллельно работающих трансформаторов.

Значение напряжения $U_{d0\text{T}}$ необходимо принимать в зависимости от схемы преобразования:

3,7 кВ.....трехфазной мостовой;

3,6 кВ.....эквивалентной двенадцатифазной мостовой.

На основе ряда $K_{\text{ТТ}}(k)$ по формулам в 6.2.4 необходимо вычислить следующие показатели:

- наибольшее эффективное значение $K_{\text{ТТ эф 30}}$ за период $T_c = 30$ мин;

- наибольшие средние значения $K_{\text{ТТ max } T_{cj}}$ за периоды продолжительности нагрузки T_{cj} в соответствии с ГОСТ 16772–77 (таблица 6).

Эти показатели должны удовлетворять условиям

$$K_{\text{ТТ эф 30}} \leq 1, \quad 100 K_{\text{ТТ max } T_{cj}} \leq K_{\text{ТТ доп } T_{cj}}, \quad (8.7)$$

где $K_{\text{ТТ доп } T_{cj}}$ – допустимые значения выходного тока, %, по ГОСТ 16772–77 (таблица 6) для соответствующих периодов продолжительности нагрузки T_{cj} .

8.3.3 Проверка нагрузочной способности понижающих трансформаторов тяговых подстанций переменного тока

При расчете относительной нагрузки понижающего трансформатора подстанции постоянного тока необходимо учитывать, наряду с мощностью на тягу поездов, также и нагрузку нетяговых потребителей:

$$K_{\text{ПТ}}(k) = [U_{d0\text{T}} I_d(k) + S_{\text{Н}} k_{\text{Н}}] / (n_{\text{ПТ}} S_{\text{ПТ ном}}), \quad (8.8)$$

где $I_d(k)$ – числовой ряд токов на стороне выпрямленного напряжения суммарно

по всем преобразователям, работающим параллельно, А;

S_H – мощность нетяговых потребителей, получающих питание от данного трансформатора, кВ·А;

k_H – коэффициент, учитывающий несовпадение максимумов нагрузки на тягу поездов и нетяговых потребителей: $k_H = 0,7$;

$S_{\text{ПТ ном}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

$n_{\text{ПТ}}$ – число параллельно работающих трансформаторов.

Определение напряжения U_{d0T} приведено в 8.3.2.

Показатели режима работы понижающего трансформатора, рассчитанные в соответствии с 8.3.1.2, должны удовлетворять условиям (8.4), (8.5).

8.3.4 Проверка нагрузочной способности трехфазных трансформаторов тяговых подстанций переменного тока

Проверочные расчеты для трехфазных трансформаторов подстанций систем переменного тока необходимо производить по токам наиболее нагруженных обмоток фаз ac и bc , показанных на рисунке Б.2 в приложении Б, с учетом нагрузки нетяговых потребителей. Относительные значения этих токов следует рассчитывать по формулам:

$$K_{o1}(k) = (|0,667 \dot{I}_{\text{опер}}(k) + 0,333 \dot{I}_{\text{отст}}(k) e^{+j60^\circ}| + I_H) / I_{o \text{ ном}}, \quad (8.9)$$

$$K_{o2}(k) = (|0,667 \dot{I}_{\text{отст}}(k) + 0,333 \dot{I}_{\text{опер}}(k) e^{-j60^\circ}| + I_H) / I_{o \text{ ном}}. \quad (8.10)$$

В этих формулах использованы следующие параметры:

- числовые ряды токов в плечах подстанции, которые получают питание от опережающего и отстающего векторов напряжения системы внешнего электроснабжения соответственно $\dot{I}_{\text{опер}}(k)$, $\dot{I}_{\text{отст}}(k)$, А;

- ток нагрузки нетяговых потребителей I_H , А:

$$I_H = S_H k_H / (3 U_{\text{ном}}), \quad (8.11)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение обмоток, $U_{\text{ном}} = 27,5$ кВ;

- номинальный ток обмотки $I_{o \text{ ном}}$, А:

$$I_{o \text{ ном}} = n_T S_{T \text{ ном}} / (3 U_{\text{ном}}), \quad (8.12)$$

где n_T – число параллельно работающих трансформаторов, шт.;

$S_{T \text{ ном}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

Параметры S_H и k_H определены в 8.3.3.

На основе числовых рядов $K_{O1}(k)$, $K_{O2}(k)$ в соответствии с 8.3.1.2 для каждой из обмоток необходимо рассчитать следующие величины:

максимальные значения нагрузок за период 1 мин $K_{O1 \text{ max } 1}$, $K_{O2 \text{ max } 1}$;

то же за период 10 мин $K_{O1 \text{ max } 10}$, $K_{O2 \text{ max } 10}$;

наибольшие температуры масла $\tau_{O1 \text{ м max}}$, $\tau_{O2 \text{ м max}}$;

наибольшие температуры обмоток $\tau_{O1 \text{ ннт max}}$, $\tau_{O2 \text{ ннт max}}$.

Из каждой пары указанных величин необходимо выбрать максимальные значения $K_{\text{max } 1}$, $K_{\text{max } 10}$, $\tau_{\text{м max}}$, $\tau_{\text{ннт max}}$ и проверить их на соответствие условиям (8.4), (8.5).

8.3.5 Проверка нагрузочной способности однофазных трансформаторов тяговых подстанций и автотрансформаторов системы 2×25 кВ

8.3.5.1 Проверку выбранной мощности однофазных трансформаторов тяговых подстанций системы 2×25 кВ необходимо осуществлять по токам \dot{I}_{TK1} , \dot{I}_{TK2} секций расщепленной вторичной обмотки трансформаторов, подключенных к шинам контактной сети, как показано на рисунке Б.3 (приложение Б).

Относительные значения нагрузки каждого трансформатора должны быть вычислены по значениям числового ряда $\dot{I}_{\text{TK}}(k)$ комплексных токов в указанной секции обмотки:

$$K_o(k) = 2 U_{\text{ном}} | \dot{I}_{\text{TK}}(k) | / (n_{\text{от}} S_{\text{от ном}}), \quad (8.13)$$

где $n_{\text{от}}$ – число параллельно работающих трансформаторов в данном плече подстанции, шт.;

$S_{\text{от ном}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение секции обмотки: $U_{\text{ном}} = 27,5$ кВ.

8.3.5.2 Относительную нагрузку любого автотрансформатора необходимо определять по числовому ряду токов $I_A(k)$ соответствующей ветви с сопротивлением Z_{AT} в расчетной схеме тяговой сети системы 2×25 кВ, изображенной на рисунке Б.5 (приложение Б):

$$K_A(k) = 2 U_{\text{ном}} | I_A(k) | / S_{AT \text{ ном}}, \quad (8.14)$$

где $S_{AT \text{ ном}}$ – номинальная мощность автотрансформатора, кВ·А.

8.3.5.3 Проверку выбранной мощности однофазного трансформатора и автотрансформатора необходимо осуществлять по 8.3.1.2 с использованием числовых рядов относительной нагрузки соответственно $K_0(k)$ и $K_A(k)$.

9 Выбор номинального тока на выходе и количества статических преобразователей

9.1 При выборе параметров статических преобразователей тяговых подстанций системы постоянного тока необходимо определять показатели их рабочего режима по данным числового ряда суммарных токов $I_d(k)$ на выходе преобразователей (см. рисунок Б.1, приложение Б).

9.2 По формулам в 6.2.4 должны быть рассчитаны следующие показатели:

- наибольшее эффективное значение тока $I_{d \text{ эф } 30}$ за время усреднения $T_c = 30$ мин;

- максимальные средние значения тока $I_{d \text{ max } T_{cj}}$ для периодов длительности T_{cj} , $j = 1 \dots M_j$ соответствующих допустимых нагрузок $K_{d \text{ доп } T_{cj}}$ относительно номинального тока $I_{d \text{ ном}}$, установленных в технических условиях завода-изготовителя преобразователей.

9.3 По каждому показателю, рассчитанному по 9.2, необходимо определить требуемое количество преобразователей

$$n_{\text{п эф } 30} = I_{d \text{ эф } 30} / I_{d \text{ ном}}, \quad n_{\text{п max } T_{cj}} = I_{d \text{ max } T_{cj}} / (K_{d \text{ доп } T_{cj}} I_{d \text{ ном}}) \quad (8.15)$$

и выбрать из них наибольшее значение $n_{\text{п max}}$.

Это значение должно удовлетворять условию

$$n_{\text{п max}} \leq 1. \quad (8.16)$$

9.4 При несоблюдении условия (8.16) необходимо выбрать один из следующих вариантов повышения нагрузочной способности подстанции:

- выбрать преобразователь с бóльшим номинальным током;
- увеличить количество преобразователей того же номинального тока.

Для выбранного варианта необходимо выполнить вновь электрические расчеты в соответствии с 6.2 и провести проверку нагрузочной способности преобразовательных трансформаторов по 8.3.2.

10 Выбор номинального тока коммутационных аппаратов и трансформаторов тока

10.1 Номинальный ток коммутационного аппарата и трансформатора тока должен быть выбран по максимальному значению рабочего тока при его длительности 20 мин.

10.2 Для определения максимального рабочего тока в качестве первичного показателя режима коммутационного аппарата и трансформатора тока необходимо из массивов промежуточных результатов электрических расчетов выбрать числовой ряд токов $I_b(k)$ ветви расчетной схемы, соответствующей электрической цепи данного устройства:

- питающей линии соответствующего фидера $I_{\text{фf}}(k)$;
- выпрямленного напряжения подстанции постоянного тока $I_d(k)$;
- на выводах a, b трехфазного трансформатора подстанции переменного тока 25 кВ соответственно $I_a(k), I_b(k)$ (см. рисунок Б.2);
- на выводе секции расщепленной обмотки однофазного трансформатора, подключенной к шинам контактной сети $I_{\text{тк1}}(k), I_{\text{тк2}}(k)$ (см. рисунок Б.3).

10.3 Для выбранного числового ряда токов необходимо в соответствии с 6.2.4 рассчитать наибольшее за период $T_c = 20$ мин значение рабочего тока коммутационного аппарата и трансформатора тока $I_{\text{в max } 20}, \text{ A}$.

Для токов $I_a(k)$, $I_b(k)$ должны быть рассчитаны соответствующие токи $I_{a \max 20}$, $I_{b \max 20}$, из которых необходимо выбрать наибольшее значение $I_{в \max 20}$.

10.4 По соответствующему стандарту на коммутационный аппарат необходимо выбрать номинальное значение тока $I_{\text{ном}}$, при котором выполняется условие

$$I_{\text{ном}} \geq I_{в \max 20}. \quad (10.1)$$

10.5 Для трансформаторов тока необходимо выбрать то значение номинального тока первичной обмотки $I_{1 \text{ ном}}$, которому соответствует условие

$$I_{1 \text{ нр}} \geq I_{в \max 20}, \quad (10.2)$$

где $I_{1 \text{ нр}}$ – наибольший рабочий первичный ток по ГОСТ 7746–2001 (пункт 6.6.2), А.

11 Выбор номинального тока отключения выключателей

11.1 Номинальный ток отключения выключателя должен быть выбран исходя из максимального значения тока короткого замыкания в главной цепи выключателя с учетом подпитки места повреждения от соседних подстанций.

11.2 Для определения тока короткого замыкания необходимо в расчетной схеме системы тягового электроснабжения (без нагрузок от электроподвижного состава) соединить накоротко с нулевой шиной узел, с которым соединена цепь данного выключателя:

- шины контактной сети ШК для выключателя в цепи преобразователей тяговых подстанций постоянного тока (см. рисунок Б.1);
- шины контактной сети ШК лев, ШК прав для выключателей на выводах трансформаторов тяговых подстанций переменного тока (см. рисунки Б.2, Б.3);
- узел, в котором соединена ветвь сопротивления, обозначенного индексом «ф», с эквивалентным проводом контактной сети для выключателя в цепи соответствующей питающей линии (см. рисунки Б.4, Б.5).

11.3 Схему при коротком замыкании рекомендуется рассчитать методом узловых напряжений или контурных токов по ГОСТ Р 52735–2007

(подпункт 4.4.2).

11.4 С использованием полученного в результате расчета максимального тока короткого замыкания $I_{кз\ макс}$, А, необходимо по соответствующим стандартам выбрать номинальный ток отключения, который должен удовлетворять условиям:

- для быстродействующих автоматических выключателей постоянного тока

$$I_{а\ макс} \geq I_{кз\ макс}, \quad (11.1)$$

где $I_{а\ макс}$ – максимальное значение аварийного тока по ГОСТ 2585–81 (подраздел 2.3), А;

- для выключателей переменного тока

$$I_{о.ном} > 10^{-3} I_{кз\ макс}, \quad (11.2)$$

$I_{о.ном}$ – номинальный ток отключения выключателя по ГОСТ Р 52565–2006 (пункт 5.1), кА.

12 Выбор марки, сечения и количества проводов контактной сети, проводов и кабелей питающих, отсасывающих и шунтирующих линий

12.1 Выбор сечения и количества проводов контактной сети

12.1.1 Выбор сечения и количества проводов, включая несущие тросы, необходимо производить с учетом требований, установленных в 4.1.3, перечисления а), в), на основе результатов электрических расчетов.

12.1.2 При проверке параметров контактной сети по допустимому наименьшему напряжению на токоприемниках электроподвижного состава необходимые показатели рабочего режима системы тягового электроснабжения должны быть определены на основе числовых рядов напряжений $U_{mgz}(k)$, полученных в соответствии с 6.2 при моделировании графика движения каждого поезда m за время его хода T_{mgz} по пути g межподстанционной зоны z .

По данным каждого числового ряда $U_{mgz}(k)$ по формулам в 6.2.4, приняв $M_k = T_{mgz} / \Delta t$, необходимо рассчитать следующие величины:

- абсолютное наименьшее значение напряжения $U_{mgz \min}$;
- минимальное среднее напряжение $U_{mgz \min T_c}$ за период T_c в соответствии с показателями 2 или 3 таблицы 1.

По каждой межподстанционной зоне z из рассчитанных величин для всех поездов и путей необходимо выбрать минимальные значения напряжений в контактной сети:

$$U_{z \min} = \min_{mg} (U_{mgz \min}), \quad U_{z \min T_c} = \min_{mg} (U_{mgz \min T_c}). \quad (12.1)$$

Эти значения должны быть не меньше соответствующих величин по показателям таблицы 1:

$U_{z \min T_c}$ – по показателю 2 или 3;

$U_{z \min}$ – по показателю 4.

На тех межподстанционных зонах, для которых хотя бы одно из указанных условий не выполнено, необходимо выбрать контактную сеть с проводами большего сечения и (или) с большим количеством проводов в соответствии с вариантами технических решений, перечисленными в 4.3.6.

12.1.3 Проверка проводов контактной сети по нагреванию должна быть проведена для каждой межподстанционной зоны, которая получает питание от тяговых подстанций, обозначенных в данном подпункте как А и Б.

В качестве первичных показателей рабочего режима контактной сети необходимо выбрать числовые ряды токов $I_{\phi A_f}(k)$, $I_{\phi B_f}(k)$ каждого фидера f подстанций. В расчетной схеме тяговой сети эти фидеры соответствуют ветвям с сопротивлениями, имеющими индекс «ф», как показано на рисунках Б.4 и Б.5 приложения Б.

По значениям каждого числового ряда токов $I_{\phi A_f}(k)$, $I_{\phi B_f}(k)$ должен быть сформирован соответствующий числовой ряд $\tau_{пA_f}(k)$, $\tau_{пB_f}(k)$ температур нагрева проводов на проверяемом участке контактной сети, подключенном к данному фидеру f .

Расчеты температуры проводов должны быть выполнены в следующем порядке:

- для каждого провода i в проверяемом участке контактной сети необходимо по методике, приведенной в подпункте Г.4 приложения Г, рассчитать допустимый ток $I_{\text{доп } i}$;

- для контактной сети следует вычислить результирующий допустимый ток

$$I_{\text{доп кс}} = \min_i (I_{\text{доп } i} / \alpha_i), \quad i = 1 \dots M_{\text{п}}, \quad (12.2)$$

где α_i – доля тока в проводе i , методика расчета которой приведена в Б.2.1 и Б.2.2 приложения Б;

$M_{\text{п}}$ – количество проводов в проверяемой контактной сети;

- необходимо определить лимитирующий провод, которым является тот, для которого отношение $I_{\text{доп } i} / \alpha_i$ имеет наименьшее значение;

- для каждого значения из ряда $I_{\text{фАф}}(k)$ необходимо вычислить ток лимитирующего провода

$$I(k) = \alpha_{\text{ил}} I_{\text{фАф}}(k), \quad (12.3)$$

где $\alpha_{\text{ил}}$ – доля тока в лимитирующем проводе;

- по каждому значению из ряда $I(k)$ по методике, приведенной в Г.3 приложения Г, должна быть рассчитана искомая температура $\tau_{\text{пАф}}(k)$ лимитирующего провода.

Те же расчеты должны быть проведены для фидеров подстанции Б, в результате чего должны быть получены числовые ряды температур лимитирующих проводов $\tau_{\text{пБф}}(k)$.

В качестве проверяемых показателей режима работы контактной сети необходимо на основе числовых рядов $\tau_{\text{пАф}}(k)$ и $\tau_{\text{пБф}}(k)$ в соответствии с 6.2.4 рассчитать абсолютные максимальные и (или) наибольшие за период $T_c = 20$ мин температуры $\tau_{\text{пАф max}}$, $\tau_{\text{пБф max}}$.

Из этих температур по всем фидерам обеих подстанций необходимо

выбрать максимальные значения $\tau_{п\ max}$, $\tau_{п\ max\ 20}$.

Полученные в итоге расчетов эти максимальные температуры должны быть не больше допустимых значений, установленных в 4.1.3, перечисление в).

Если указанное условие не выполнено, то для данной межподстанционной зоны необходимо выбрать контактную сеть с проводами большего сечения и (или) с большим количеством проводов в соответствии с вариантами технических решений, перечисленными в 4.3.6.

12.1.4 На вновь электрифицируемом участке железной дороги в пределах одной и той же межподстанционной зоны следует на всех путях применять одинаковое количество и сечение проводов контактной сети, выбранные по наиболее нагруженному пути.

12.1.5 При реконструкции контактной сети электрическое сопротивление разных ее участков пределах одной и той же межподстанционной зоны должно отличаться не более, чем на 5 %.

12.2 Выбор сечения и количества проводов питающих, отсасывающих и шунтирующих линий

12.2.1 Количество и сечение проводов в питающих, шунтирующих и отсасывающих линиях должны быть выбраны по условию допустимого нагрева в соответствии с требованиями 4.1.3, перечисление в).

12.2.2 Расчет температуры нагрева проводов шунтирующих линий и питающих проводов системы 2×25 кВ должен проводиться по методике, приведенной в 12.1.3 для проводов контактной сети, с использованием тех же числовых рядов токов фидеров.

При этом в формуле (12.3) доля тока в отдельном проводе многопроводной линии должна быть определена по выражению

$$\alpha_{ил} = 1 / M_{п}, \quad (12.4)$$

где $M_{п}$ – количество проводов в линии.

12.2.3 Сечение и количество проводов питающих линий допускается

выбирать без выполнения расчетов температуры нагрева. Суммарное сечение проводов питающей линии должно быть равно или несколько больше суммарного сечения проводов подключенного к ней участка контактной сети в медном эквиваленте, полагая сечение алюминиевых проводов равным 54 % номинального сечения.

12.2.4 Расчет температуры нагрева проводов отсасывающих линий тяговых подстанций необходимо выполнять по методике 12.1.3 при следующих значениях тока:

- для подстанций постоянного тока по числовому ряду $I_d(k)$ токов на стороне выпрямленного напряжения суммарно на выходе всех преобразователей;

- для подстанций переменного тока 25 кВ по числовому ряду токов $I_c(k)$ в цепи отсоса (см. рисунок Б.2 в приложении Б)

$$I_c(k) = | \dot{I}_a(k) + \dot{I}_b(k) e^{j60^\circ} |, \quad (12.5)$$

где $\dot{I}_a(k)$, $\dot{I}_b(k)$ – токи в плечах подстанции, А.

- для подстанций переменного тока 2×25 кВ по числовому ряду токов $I_{тр}(k)$ в цепи отсоса в вынужденном режиме при отключении секции вторичной обмотки одного трансформатора от шин питающего провода, что на схеме замещения соответствует отсутствию тока $\dot{I}_{тп1}$ (см. рисунок Б.3, приложение Б), А:

$$I_{тр}(k) = | \dot{I}_{тк1}(k) + [\dot{I}_{тк2}(k) - \dot{I}_{тп2}(k)] e^{j60^\circ} |. \quad (12.6)$$

12.2.5 В качестве проверяемых показателей режима работы рассматриваемых линий необходимо на основе числового ряда температур отдельного провода $\tau_n(k)$ в соответствии с 6.2.4 рассчитать абсолютные максимальные и наибольшие за период $T_c = 20$ мин значения температуры $\tau_{п \max}$, $\tau_{п \max 20}$.

Эти максимальные температуры должны быть не больше допустимых значений, установленных в таблице 2.

Если указанное условие не выполнено, то для данной линии необходимо выбрать провода большего сечения и (или) увеличить количество проводов.

12.2.6 Суммарное сечение проводов отсасывающей линии автотрансформаторного пункта должно быть выбрано из условия

$$M_{оА} I_{доп оА} \geq (n_A S_{АТ ном} / 27,5), \quad (12.7)$$

где $M_{оА}$ – число проводов в отсасывающей линии, шт.;

$I_{доп оА}$ – допустимый ток провода, который необходимо вычислить в соответствии с Г.4, приложение Г, А;

n_A – число автотрансформаторов на автотрансформаторном пункте, шт.;

$S_{АТ ном}$ – номинальная мощность автотрансформатора, кВ·А

12.2.7 Число проводов отсасывающей линии тяговой подстанций и автотрансформаторных пунктов во всех случаях должно быть не менее двух.

12.3 Выбор сечения и количества кабелей питающих и отсасывающих линий

12.3.1 В качестве первичного показателя рабочего режима кабеля необходимо из массивов промежуточных результатов электрических расчетов выбрать числовой ряд токов:

- для питающей линии – соответствующего фидера $I_{фf}(k)$;
- для отсасывающей линии подстанции постоянного тока – на выходе всех преобразователей $I_d(k)$;
- для отсасывающей линии подстанций переменного тока 25 и 2×25 кВ – по формулам соответственно (12.5) или (12.6).

12.3.2 Для выбранного числового ряда токов необходимо в соответствии с 6.2.4 рассчитать наибольшее за период $T_c = 20$ мин значение тока $I_{каб max 20}$, А.

12.3.3 Сечение и количество кабелей питающей и отсасывающей линии должны удовлетворять условию:

$$M_{каб} I_{доп каб} \geq I_{каб max 20}, \quad (12.8)$$

где $M_{каб}$ – количество кабелей, шт.;

$I_{\text{доп каб}}$ – допустимый ток одного кабеля, А.

13 Выбор марки, сечения и количества проводов сборных и соединительных шин распределительных устройств тяговых подстанций и линейных устройств тягового электроснабжения

13.1 Марки, сечение и количество проводов сборных и соединительных шин распределительных устройств должны быть выбраны по максимальному рабочему току, равному наибольшему суммарному току всех присоединенных к этим шинам питающих линий.

13.2 Для определения максимального рабочего тока необходимо из массивов промежуточных результатов электрических расчетов выбрать числовые ряды токов $I_{\text{ф}f}(k)$ в ветвях расчетной схемы с сопротивлениями, обозначенными индексом «ф» и подключенными к соответствующим шинам подстанции или поста секционирования (см. рисунок Б.5 приложения Б).

По данным числовым рядам необходимо составить числовой ряд из сумм значений $I_{\text{ф}f}(k)$, А

$$I_{\text{ш}}(k) = \text{sum}_f [I_{\text{ф}f}(k)]. \quad (13.1)$$

13.3 Для составленного числового ряда $I_{\text{ш}}(k)$ необходимо в соответствии с 6.2.4 рассчитать наибольшее за период $T_c = 20$ мин значение рабочего тока $I_{\text{ш max } 20}$, А.

13.4 Сечение и количество проводов шин должны удовлетворять условию

$$M_{\text{п}} I_{\text{доп ш}} \geq I_{\text{ш max } 20}, \quad (13.2)$$

где $M_{\text{п}}$ – количество проводов, шт;

$I_{\text{доп ш}}$ – допустимый ток провода, А (таблица 5).

Таблица 5 – Допустимый длительный ток для неизолированных проводов по ГОСТ 839

В амперах

Номинальное сечение, мм ²	Марка провода	
	АС	М
95	330	420
120	390	485
150	450	570
185	520	650
240	610	760
300	710	880

Приложение А

(рекомендуемое)

Методика тяговых расчетов при выборе основных параметров систем тягового электроснабжения

А.1 Исходные данные

А.1.1 Параметры участка

Тяговые расчеты выполняют на основе заданных параметров участка, характеристик электроподвижного состава и параметров состава поезда.

Перечень станций при их количестве M_s на участке представляют в виде массива $Stans(N_s)$, элементами которого являются:

- наименование $Stans(N_s).StName$;
- координата оси $Stans(N_s).L_s$ в километрах;
- признак $Stans(N_s).Stp$ наличия (единица) или отсутствия (ноль)

остановки поезда.

Элементы профиля и плана пути между граничными станциями участка в массиве $Prof(N_{pr})$, содержащем:

- длину элемента $Prof(N_{pr}).L_{pr}$ в километрах;
- уклон $Prof(N_{pr}).i_{пр}$ в промилле (отрицательное значение – спуск);
- эквивалентный уклон от кривых $Prof(N_{pr}).i_{кр}$.

Допустимые скорости движения:

- начальная координата отрезка пути по ходу движения поезда $Vogr(N_{vo}).L_{vo}$, км;

- максимальная разрешенная скорость на этом отрезке $Vogr(N_{vo}).V_o$, км/ч.

Концом любого отрезка пути N_{vo} является начало следующего отрезка $N_{vo} + 1$.

А.1.2 Параметры подвижного состава

К основным параметрам электроподвижного состава относятся:

- род службы $Rods$: 0 – электровоз грузовой, 1 – электровоз пассажирский, 2 – электропоезд;
- номинальное напряжение на токоприемнике $U_э$, В;
- конструкционная скорость $V_{констр}$, км/ч;
- расчетная масса одного электровоза или моторного вагона электропоезда $m_л$, т;
- мощность собственных нужд $P_{сн}$, кВт;
- ток собственных нужд $I_{сн}$, А.

Характеристики электровозов и электропоездов для тягового режима представляют табличными зависимостями от скорости следующих параметров:

- а) сила тяги $TGxp(Poz, N_v) \cdot F_k$, кН;
- б) ток электровоза или электропоезда, А:
 - 1) постоянного тока $TGxp(Poz, N_v) \cdot I_э$;
 - 2) переменного тока:
 - модуль полного тока $TGxp(Poz, N_v) \cdot I_d$;
 - активный ток $TGxp(Poz, N_v) \cdot I_{da}$,

где Poz – номер характеристики, соответствующий позиции регулирования силы тяги;

N_v – номер строки в таблице при данном значении скорости $TGxp(Poz, N_v) \cdot V$.

Значение Poz может изменяться от нуля до $MxPoz$. При $Poz = 0$ характеристика соответствует ограничениям по сцеплению движущих колес электроподвижного состава с рельсами и (или) по допустимому току.

Максимальная величина $MxPoz$ целочисленного значения Poz для электровозов (электропоездов) со ступенчатым регулированием силы тяги равна количеству характеристик, соответствующих каждой ступени.

Для электроподвижного состава с плавным регулированием силы тяги

ГОСТ Р

проект, первая редакция

Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров

(при независимом возбуждении двигателей, зонно-фазовом регулировании напряжения, с асинхронным приводом) $MxPoz = 1$. Этому значению соответствует предельная характеристика по мощности, току и (или) напряжению. В таком случае условный номер позиции Poz имеет дробное значение в диапазоне от нуля до единицы.

Характеристики электроподвижного состава для режима рекуперации:

- сила торможения $RCxp(Pozr, N_v) \cdot B_k$, кН;

- токи электровоза или электропоезда имеют те же обозначения, что и для характеристик тягового режима: $RCxp(Pozr, N_v) \cdot I_3$ или $RCxp(Pozr, N_v) \cdot I_d$, $RCxp(Pozr, N_v) \cdot I_{da}$.

Характеристики режима рекуперации задают для двух значений $Pozr$:

0.....ограничивающая по сцеплению (току);

1.....предельная по мощности, току и (или) напряжению.

Поезд в целом с учетом электровоза и состава или моторных и прицепных вагонов электропоезда характеризуется следующими параметрами:

- масса поезда $m_{п}$, Т;

- длина $L_{п}$, м;

- массив коэффициентов в формулах для расчетов основного удельного сопротивления движению $Wotr(N, N_x)$,

где N – номер коэффициента и показатель степени при скорости:

$N = 0, 1, 2$;

N_x – признак режима движения электровоза и электропоезда:

0.....с тягой;

1.....на холостом ходу.

А.2 Основные уравнения

А.2.1 Интегрирование уравнения движения поезда

Расчеты зависимостей тока, скорости движения и координаты расположения поезда на участке от времени проводят в пошаговом режиме при постоянном приращении времени $\Delta t_{\text{тр}}$, с. Значение $\Delta t_{\text{тр}}$ должно быть не более 0,025 мин (1,5 с).

Значения скорости v_k , км/ч, и координаты поезда L_k , км, в дискретные моменты времени t_k , мин, на каждом шаге k вычисляют по формулам

$$\Delta v_k = \zeta f_y(v_{k-1}) \Delta t_{\text{тр}}, \quad (\text{A.1})$$

$$v_k = v_{k-1} + \Delta v_k, \quad (\text{A.2})$$

$$L_k = L_{k-1} + \zeta_t (v_{k-1} + 0,5 \Delta v_k) \Delta t_{\text{тр}}, \quad (\text{A.3})$$

$$t_{k-1} = t_k + \Delta t_{\text{тр}}, \quad (\text{A.4})$$

где Δv_k – приращение скорости, км/ч;

ζ – ускорение или замедление поезда при удельной силе 1 Н/т:
 $\zeta = 0,2038 \text{ км}/(\text{ч} \cdot \text{мин}) / (\text{Н}/\text{т})$;

ζ_t – коэффициент, учитывающий размерность времени: $\zeta_t = 1 / 60$;

f_y – результирующая удельная сила, действующая на поезд, Н/т.

На каждом k -м шаге удельную силу $f_y(v_{k-1})$ определяют по значению скорости в конце предыдущего шага:

$$f_y = 1000 (F_k - B_T) / m_{\text{п}} - f_{w_0} - w_i, \quad (\text{A.5})$$

где F_k – сила тяги на ободах движущих колес, кН;

B_T – сила торможения, кН. Учитывается, если $F_k = 0$;

f_{w_0} – основное удельное сопротивление движению поезда, Н/т;

w_i – дополнительное удельное сопротивление движению от уклона и от кривой, Н/т.

А.2.2 Определение силы тяги и токов электроподвижного состава

Методика расчета силы тяги $F_x(v_x)$ при любой скорости v_x и позиции Poz состоит в следующем.

В массиве характеристик $TGxp(Poz, n)$ выбирается звено n , в которое попадает скорость v_x , т. е. выполняется условие, км/ч

$$v'_n \leq v_x < v'_{n+1} \quad (A.6)$$

при

$$v'_n = v_n K_{Uд} K_{Uкc}, \quad v'_{n+1} = v_{n+1} K_{Uд} K_{Uкc}, \quad (A.7)$$

$$v_n = TGxp(Poz, n) \cdot V, \quad v_{n+1} = TGxp(Poz, n+1) \cdot V, \quad (A.8)$$

где $K_{Uд}$ – отношение расчетного напряжения на тяговом двигателе к номинальному напряжению, при котором построена характеристика $TGxp(Poz, n)$;

$K_{Uкc}$ – отношение фактического напряжения $U_{кc}$ в контактной сети к номинальному U_0 на токоприемниках электроподвижного состава.

Значение F_x определяют линейной интерполяцией по точкам характеристики данного звена $F_{кn}(v'_n), F_{кn+1}(v'_{n+1})$, кН

$$F_{кn} = TGxp(Poz, n) \cdot F_{к}, \quad F_{кn+1} = TGxp(Poz, n+1) \cdot F_{к}. \quad (A.9)$$

Если характеристика относится к электроподвижному составу с плавным регулированием силы тяги ($Poz \leq 1$), то в формуле (A.7) параметр $K_{Uд}$ равен Poz . В противном случае принимают $K_{Uд} = 1$.

Полученное значение F_x сопоставляют с ограничивающей величиной F_{xs} по сцеплению или току, которая вычисляют при $Poz = 0, K_{Uд} = 1, K_{Uкc} = 1$. Если F_x превышает F_{xs} , то принимают $F_x = F_{xs}$.

Эту же методику используют для определения токов $I(v_x)$ посредством интерполяции значений $I_n(v'_n), I_{n+1}(v'_{n+1})$, А

$$I_n = TGxp(Poz, n) \cdot I, \quad I_{n+1} = TGxp(Poz, n+1) \cdot I. \quad (A.10)$$

Здесь и далее под величиной I подразумевают токи I_0 или I_d и I_{da} по А.1.2.

Окончательное значение токов для электроподвижного состава с

плавным регулированием силы тяги ($Poz \leq 1$), А

$$I(v_x) = I(v_x) Poz. \quad (A.11)$$

С помощью описанной выше методики так же рассчитывают силы торможения и токи в режиме рекуперации по заданным характеристикам в массиве $RCxp(Pozr, n)$.

А.2.3 Силы сопротивления движению и механического торможения

Основное удельное сопротивление движению поезда в зависимости от текущего значения скорости v_k , км/ч, и признака N_x режима работы электроподвижного состава (0 – с тягой, 1 – на холостом ходу) рассчитывают по данным массива $Wotr(N, N_x)$, Н/т

$$f_{w_0}(v_k, N_x) = \text{sum}_N [Wotr(N, N_x) v_k^N], \quad N = 0, 1, 2. \quad (A.12)$$

Дополнительное удельное сопротивление движению w_i от уклона и от кривой на любом элементе профиля пути с индексом N_{pr} , Н/т

$$w_i = g [Prof(N_{pr}) \cdot i_{пр} + Prof(N_{pr}) \cdot i_{кр}], \quad (A.13)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

При тяговых расчетах для определения электрической нагрузки контактной сети допускается принимать сумму удельных сил механического торможения и сопротивления движению поезда не зависящими от скорости

$$1000 B_T / m_{п} + f_{w_0} = Btrm. \quad (A.14)$$

Удельную суммарную силу $Btrm$ следует принимать для типов поездов в зависимости от признака $Rods$ рода службы электроподвижного состава, Н/т:

грузовых ($Rods = 0$)	$Btrm = 200$;
пассажирских ($Rods = 1$)	$Btrm = 450$;
электропоездов ($Rods = 2$)	$Btrm = 600$.

А.3 Порядок выполнения расчетов

На предварительном этапе в соответствии с рисунком А.1 проводят инициализацию расчетных параметров и массивов результатов расчета.

Должны быть заданы начальные условия, соответствующие $k = 0$ и $t_0 = 0$ мин:

- начальная скорость движения поезда v_0 , км/ч;
- исходная координата положения поезда на участке $L_0 = Stans(1).L_s$, км;
- конечная координата участка движения поезда $L_{end} = Stans(M_s).L_s$, км.

Если поезд движется от конечной к начальной станции, то значения L_0 и L_{end} взаимно меняются.

При входе I в главный цикл расчета осуществляют выбор следующего элемента N_{pr} профиля участка, если текущая координата L_k поезда вышла за пределы предыдущего элемента $Prof(N_{pr}).L_{pr}$. При движении поезда от конечной к начальной станции знак уклона $Prof(N_{pr}).i_{пр}$ необходимо поменять на противоположный.

Затем определяют ближайшую предстоящую координату L_v (если поезд прошел предыдущую) изменения целевой скорости движения: будет ли это остановка на станции $Stans(N_s)$ или начало следующего отрезка пути с допустимой скоростью $V_{огр} = Vogr(N_{vo}).V_o$.

Если предстоящая допустимая скорость меньше предыдущей (например, равна нулю на остановке), то от координаты L_v по формулам (А.1)–(А.3) осуществляют расчет скорости и координат поезда в обратном направлении (со сменой знака уклонов), по результатам которого заполняют массив $V_{bтс}()$, содержащий следующие элементы:

- $V_{bтс}(N_{co}).L_{co}$, $V_{bтс}(N_{co}).V_{co}$ – координата и скорость движения при подходе к L_v на выбеге;
- $V_{bтс}(N_{bo}).L_{bo}$, $V_{bтс}(N_{bo}).V_{bo}$ – то же при торможении. Если применяется рекуперативное торможение, то рассчитывают также токи $V_{bтс}(N_{bo}).I_{bo}$.

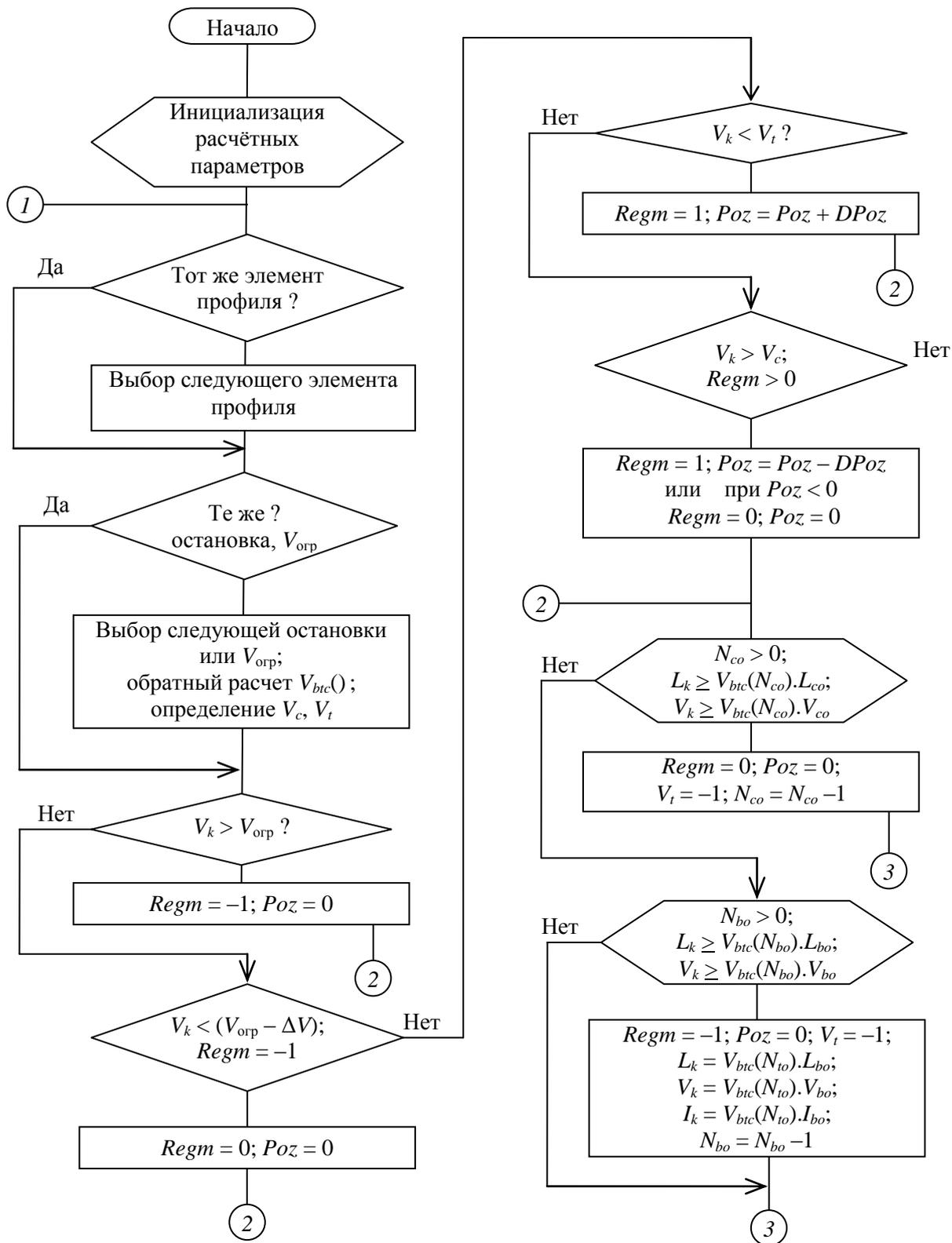


Рисунок А.1 – Схема алгоритма выбора режима ведения поезда

Кроме того, для нового отрезка пути определяют границы коридора регулирования скорости: нижняя V_t и верхняя V_c . Верхнюю границу принимают меньше допустимой скорости $V_{огр}$ на 1 км/ч. Для грузовых поездов на спусках крутизной по абсолютному значению более 4 ‰ верхнюю границу рекомендуется принимать $V_c = 20$ км/ч.

Нижняя граница коридора регулирования скорости V_t , км/ч

$$V_t = V_c - DV_{zn}, \quad (\text{A.15})$$

где DV_{zn} – зона нечувствительности регулирования скорости, км/ч.

Величину зоны DV_{zn} , км/ч следует выбирать в зависимости от типа поезда, км/ч:

- для грузовых поездов до 15;
- для пассажирских и пригородных поездов от 5 до 10;
- для скоростных пассажирских поездов от 1 до 2.

С использованием рассчитанных параметров выбирают режим управления движением поезда посредством изменения позиции контроллера Poz и фиксации команды $Regm$:

- 1.....тяга;
- 0.....выбег;
- минус 1.....торможение.

Если текущая скорость V_k превышает допустимое значение $V_{огр}$, то включается режим торможения, и позиция сбрасывается в ноль ($Poz = 0$). Когда в этом режиме скорость падает ниже величины $(V_{огр} - \Delta V)$, осуществляется переход на выбег. Значение ΔV выбирают таким, чтобы выполнялись требования владельца инфраструктуры в части обеспечения допустимой скорости на затяжных спусках.

Если скорость поезда ниже границы V_t (или выше V_c), то происходит набор (сброс) позиций: Poz изменяется на величину ступени $DPoz$. При ступенчатом управлении силой тяги $DPoz = 1$. При плавном управлении $DPoz$ является ступенью грубого регулирования и принимается равной 0,1.

В случае пересечения траектории движения поезда L_k , V_k и траектории

$V_{btc}(N_{co}).L_{co}$, $V_{btc}(N_{co}).V_{co}$ осуществляется переход на выбег. Если же поездом пересекается траектория $V_{btc}(N_{bo}).L_{bo}$, $V_{btc}(N_{bo}).V_{bo}$, то включается режим торможения, и параметры движения поезда – координата, скорость, токи рекуперации – берутся из массива $V_{btc}(N_{bo})$.

В зависимости от выбранных параметров режима движения поезда рассчитывают результирующую удельную силу f_y , как показано на рисунке А.2.

Если расчеты производят для электроподвижного состава с плавным регулированием силы тяги, то грубо определенное ранее значение позиции Poz уточняют с помощью процедуры AdjPoz в соответствии с рисунком А.3. При ее циклическом выполнении на основе предварительного расчета по формулам (А.1), (А.2) подбирают такое значение Poz , чтобы наиболее точно реализовывались задания по скорости и силе тяги.

В процессе расчетов по формулам (А.1)–(А.4) в главном цикле (см. рисунок А.2, точка входа 4) вычисляют новые значения скорости V_k и координаты L_k поезда. Если скорость близка к нулю и координата поезда не совпадает с местом запланированной остановки, это означает, что мощность электроподвижного состава недостаточна для движения поезда в заданных условиях профиля пути и ограничений скорости, и расчет прекращают досрочно.

В финальной части главного цикла заполняют массив текущих результатов расчета. Перед этим к значениям токов прибавляют токи собственных нужд

$$I_{k \text{ э}(d)} = I_{k \text{ э}(d)} + M_{\text{л}} I_{\text{сн}}, \quad I_{k \text{ да}} = I_{k \text{ да}} + 10^3 M_{\text{л}} P_{\text{сн}} / U_{\text{э}}. \quad (\text{А.16})$$

где $M_{\text{л}}$ – число электровозов в поезде.

Условием завершения главного цикла является выход координаты поезда за пределы L_{end} расчетного участка.

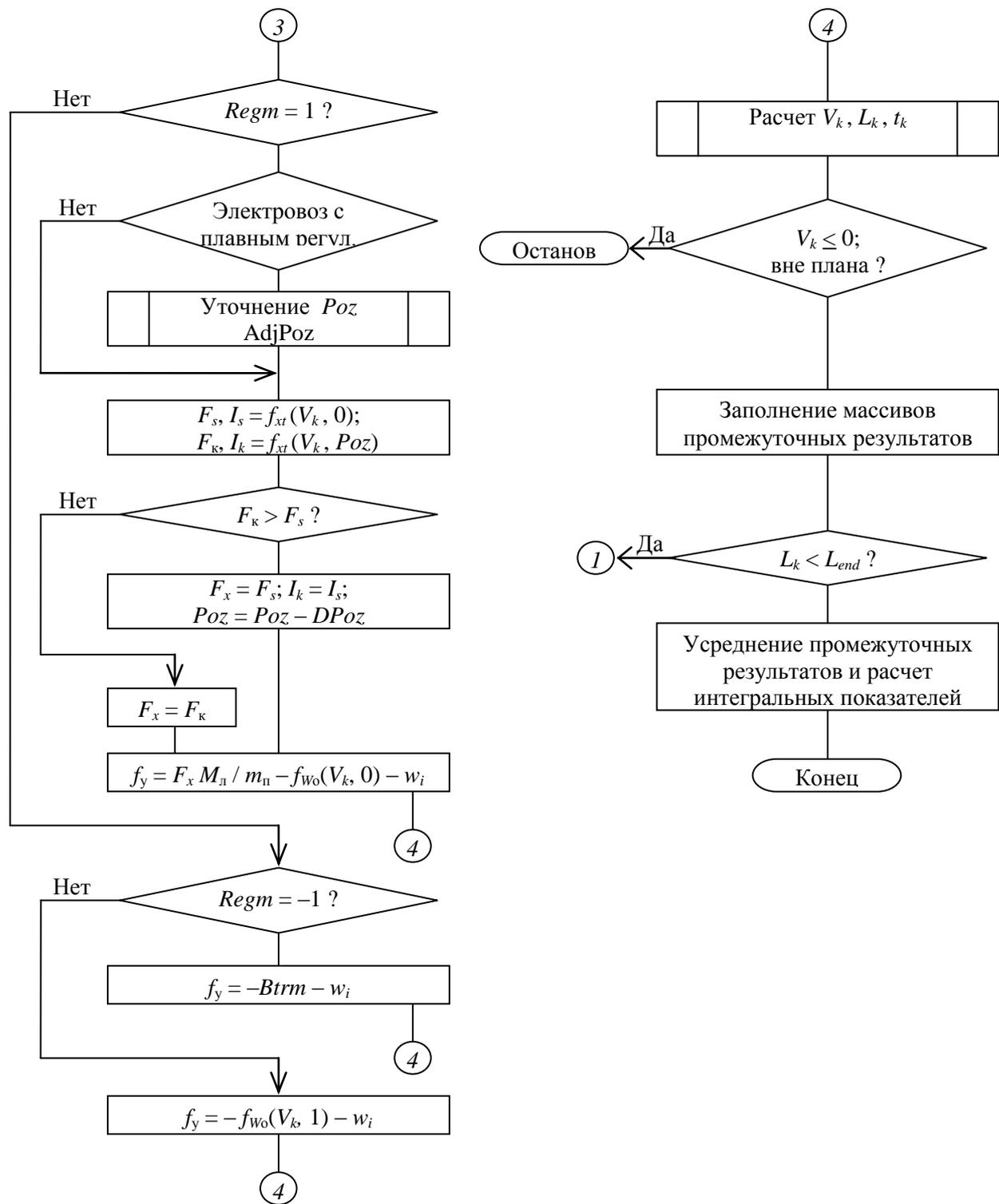


Рисунок А.2 – Схема алгоритма определения основных параметров движения поезда

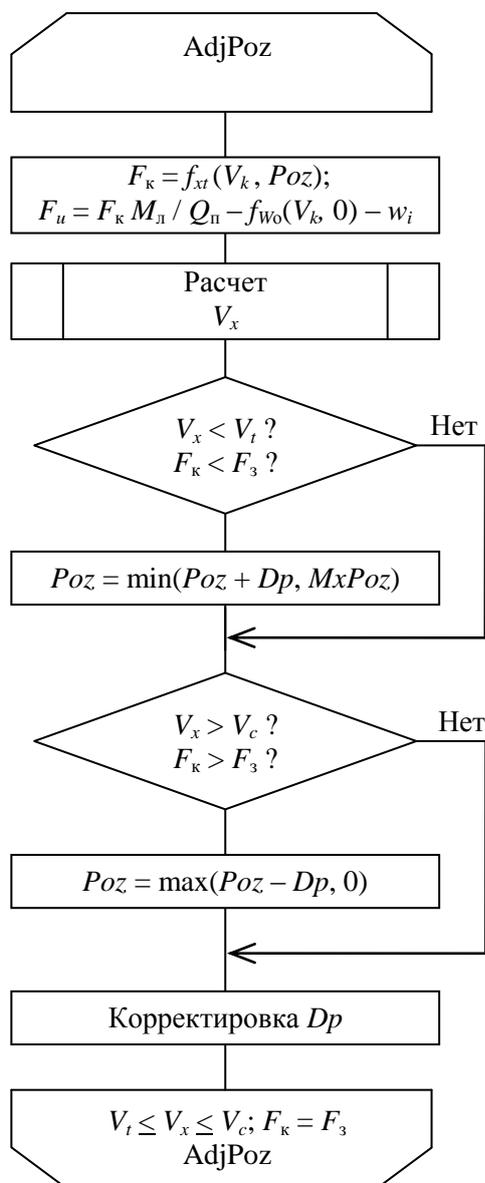


Рисунок А.3 – Схема алгоритма уточнения позиции управления силой тяги

На заключительном этапе определяют целевые результаты расчета.

Формируют массив усредненных с заданным шагом Δt по времени значений координат L_k поезда и токов I_k электроподвижного состава:

$$Tcb(h, c, d).L_b = [\text{sum}_k(L_k) / M_c], \quad (\text{A.17})$$

$$Tcb(h, c, d).I_b = [\text{sum}_k(I_k) / M_c], \quad k = (h-1)M_c \dots hM_c, \quad (\text{A.18})$$

$$M_c = \Delta t / \Delta t_{\text{тр}}, \quad (\text{A.19})$$

ГОСТ Р

проект, первая редакция

Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров

где c – тип поезда;

d – направление движения (0 – нечетное, 1 – четное).

Вычисляют расходы электроэнергии по перегонам:

$$W_{N_s, N_{s+1}}(c, d) = \sum_k (U_{kc} I_k) \text{ при } Stans(N_s) \cdot L_s \leq L_k < Stans(N_s + 1) \cdot L_s. \quad (\text{A.20})$$

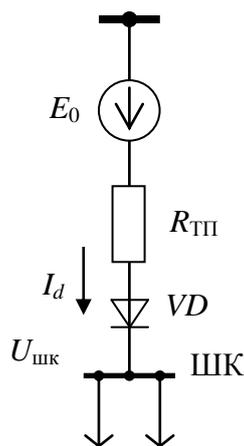
Приложение Б (справочное)

Схемы замещения элементов систем тягового электроснабжения и определение их параметров

Б.1 Схемы замещения тяговых подстанций

Б.1.1 Тяговые подстанции системы постоянного тока

Схема замещения тяговой подстанции постоянного тока представлена на рисунке Б.1 и представляет собой ветвь, содержащую ЭДС E_0 , эквивалентное сопротивление $R_{ТП}$ подстанции и идеальный вентиль VD .



Фидеры контактной сети

ШК – шины контактной сети

Рисунок Б.1 – Схема замещения тяговой подстанции постоянного тока

Значение E_0 соответствует напряжению холостого хода на шинах контактной сети ШК.

Сопротивление $R_{ТП}$, Ом является эквивалентным в отношении потери напряжения между источником питания в системе внешнего электроснабжения и шинами ШК. При приближенном учете активного сопротивления в цепи

переменного тока подстанции

$$R_{\text{ТП}} = K_R \left(\frac{1}{S_{\text{кз}}} + \frac{0,01u_{\text{к.пт}}}{n_{\text{пт}} S_{\text{пт ном}}} + \frac{0,01u_{\text{к.к}}}{n_{\text{тт}} S_{\text{тт ном}}} \right), \quad (\text{Б.1})$$

где $S_{\text{кз}}$ – мощность трехфазного короткого замыкания на вводе тяговой подстанции, МВ·А;

K_R – коэффициент, зависящий от схемы преобразования: при трехфазной мостовой $K_R = 7,41$; при эквивалентной двенадцатифазной мостовой $K_R = 3,67$;

$u_{\text{к.пт}}$ – напряжение короткого замыкания понижающего трансформатора, %;

$S_{\text{пт ном}}$, $S_{\text{тт ном}}$ – номинальная мощность соответственно понижающего и преобразовательного трансформаторов, МВ·А;

$n_{\text{пт}}$, $n_{\text{тт}}$ – число параллельно работающих трансформаторов;

$u_{\text{к.к}}$ – напряжение короткого замыкания коммутации преобразовательного трансформатора по ГОСТ 16772–77, приведенное к мощности $S_{\text{тт ном}}$, %.

Вентиль VD обуславливает при расчетах необходимость отключения ветви подстанции при изменении направления выпрямленного тока I_d .

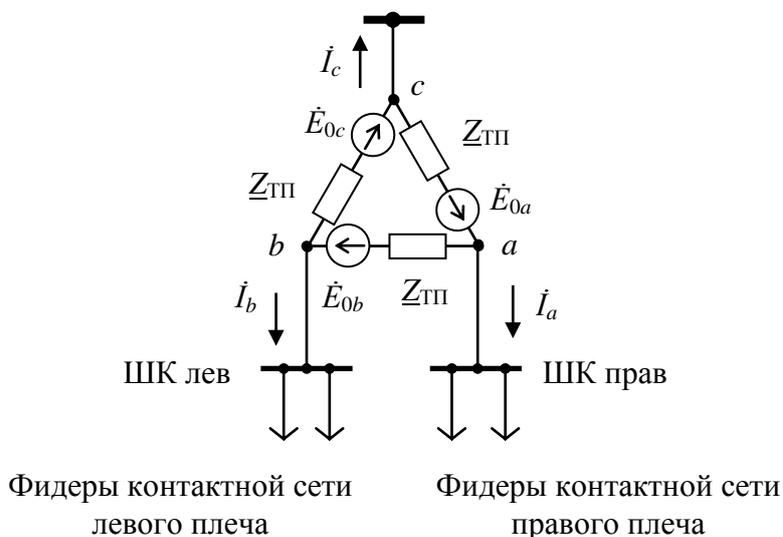
Б.1.2 Тяговые подстанции системы переменного тока 25 кВ

Схема замещения тяговой подстанции системы переменного тока 25 кВ в соответствии с рисунком Б.2 имеет следующие параметры:

- система трехфазных симметричных ЭДС \dot{E}_{0a} , \dot{E}_{0b} , \dot{E}_{0c} , равных по модулю напряжению холостого хода на шинах контактной сети ШК лев и ШК прав соответственно левого и правого плеча подстанции;

- эквивалентное сопротивление $Z_{\text{ТП}}$ фазы трансформатора на стороне номинального напряжения $U_{\text{ном}} = 27,5$ кВ.

Составляющие сопротивления $Z_{\text{ТП}} = R_{\text{ТП}} + j X_{\text{ТП}}$ вычисляются по формулам



ШК лев, ШК прав – шины контактной сети левого и правого плеча

Рисунок Б.2 – Схема замещения тяговой подстанции переменного тока

$$Z_{ТП} = K_S [0,01 u_k U_{НОМ}^2 / (n_T S_{ТНОМ}) + U_{НОМ}^2 / S_{КЗ}], \quad (\text{Б.2})$$

$$R_{ТП} = K_S (10^{-3} P_K U_{НОМ}^2 / S_{ТНОМ}^2) / n_T, \quad (\text{Б.3})$$

$$X_{ТП} = \sqrt{Z_{ТП}^2 - R_{ТП}^2}, \quad (\text{Б.4})$$

где K_S – отношение номинальных мощностей трансформатора и обмотки, к которой приводится сопротивление. Для трансформаторов подстанции системы 25 кВ $K_S = 3$;

u_k – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

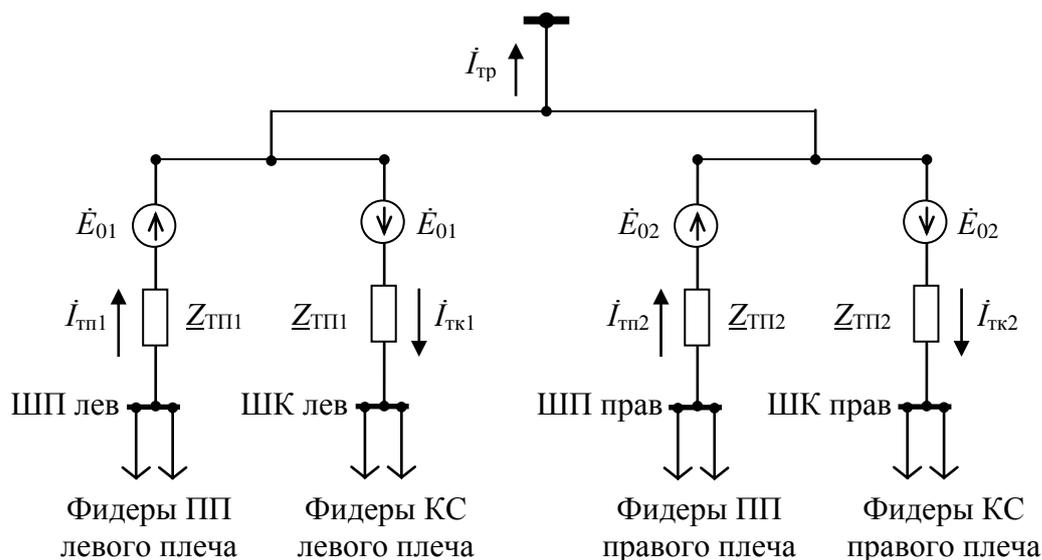
$S_{ТНОМ}$ – номинальная мощность трансформатора, МВ·А;

n_T – число параллельно работающих трансформаторов;

P_K – потери короткого замыкания в номинальном режиме, кВт.

Б.1.3 Тяговые подстанции системы переменного тока 2×25 кВ

Схема замещения тяговой подстанции системы переменного тока 2×25 кВ с двумя однофазными трансформаторами представлена на рисунке Б.3.



ШК лев, ШК прав – шины контактной сети левого и правого плеча;

ШП лев, ШП прав – шины питающего провода левого и правого плеча

ПП – питающий провод; КС – контактная сеть

Рисунок Б.3 – Схема замещения тяговой подстанции системы 2×25 кВ

Источник напряжения \dot{E}_{01} и сопротивление $Z_{ТП1}$ первого трансформатора, так же, как \dot{E}_{02} и $Z_{ТП2}$ второго трансформатора, имитируют напряжение холостого хода, равное в номинальном режиме 27,5 кВ, и падение напряжения в каждой секции расщепленной вторичной обмотки.

Сопротивления $Z_{ТП1}$ и $Z_{ТП2}$ рассчитывают по формулам (Б.2)–(Б.4) при $K_S = 2$.

Б.2 Схемы замещения тяговой сети

Б.2.1 Тяговая сеть системы постоянного тока

Расчетными параметрами тяговой сети системы тягового электроснабжения постоянного тока являются:

- погонное сопротивление параллельно соединенных проводов одного пути – контактных, усиливающих, несущих тросов – r_k , Ом/км;
- доля тока в каждом i -м проводе α_i ;
- погонное сопротивление рельсовой сети участка r_p , Ом/км.

Сопротивление контактной сети r_k , Ом/км, рассчитывают по формуле

$$r_k = 1 / \sum (1 / r_{wi}), \quad i = 1, \dots, M_{\text{п}}, \quad (\text{Б.5})$$

где r_{wi} – электрическое сопротивление i -го провода по стандартам для проводов соответствующих марок, Ом/км;

$M_{\text{п}}$ – число проводов в контактной сети одного пути.

Доля тока в каждом i -м проводе

$$\alpha_i = r_k / r_{wi}. \quad (\text{Б.6})$$

Сопротивление рельсовой сети определяют приближенно из выражения:

$$r_p = 0,5 r_{\text{ро}} / M_{\text{пут}}, \quad (\text{Б.7})$$

где $r_{\text{ро}}$ – погонное сопротивление одной рельсовой нити, Ом/км;

$M_{\text{пут}}$ – число путей на участке.

Сопротивление $r_{\text{ро}}$, Ом/км, рекомендуется принимать:

0,0254.....для рельсов типа Р65;

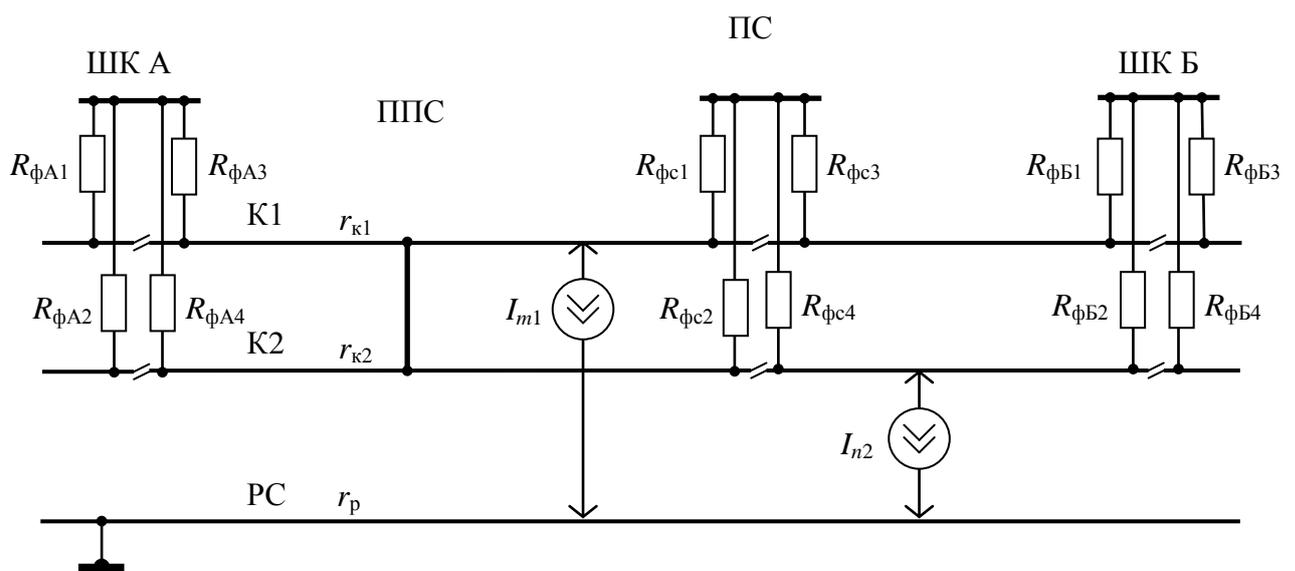
0,0218.....».....».....»... Р75.

Расчетная схема тяговой сети системы постоянного тока, приведенная на рисунке Б.4, при любом числе $M_{\text{пут}}$ путей содержит эквивалентные провода, соответствующие контактным сетям с погонными сопротивлениями r_{k1} , r_{k2} ..., $r_{kM_{\text{пут}}}$, и провод эквивалентной рельсовой сети с сопротивлением r_p . Этот провод соединяют с “нулевой” шиной, которая является общей для схем тяговой сети и подстанций и относительно которой задают ЭДС E_0 (см. рисунок

Б.1).

Погонные сопротивления эквивалентных проводов тяговой сети используют для расчета сосредоточенных сопротивлений между узлами схемы замещения, соответствующих расположению устройств и нагрузок в межподстанционной зоне.

Эквивалентные провода контактной сети соединены с шинами подстанций и поста секционирования через сопротивления R_{ϕ} фидерных линий. Расчетную схему питания и секционирования контактной сети формируют исключением (или бесконечным значением) сопротивлений R_{ϕ} линий с отключенными быстродействующими автоматами.



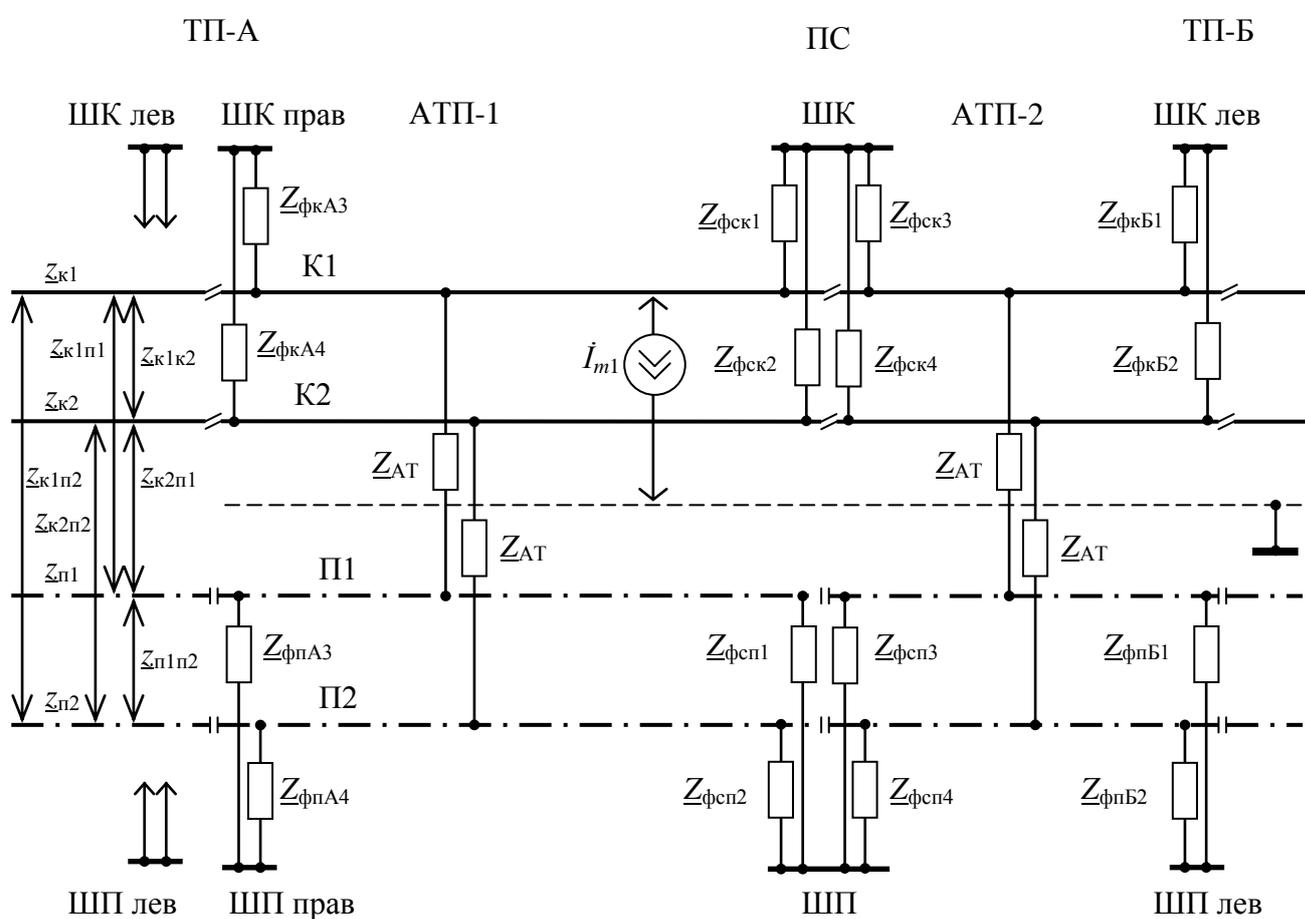
ШК А, ШК Б – шины контактной сети подстанций соответственно А и Б;
 ППС – пункт параллельного соединения контактных сетей; ПС – пост секционирования
 К1, К2 – эквивалентные провода контактной сети 1-го и 2-го путей; РС – рельсовая сеть

Рисунок Б.4 – Схема замещения тяговой сети системы постоянного тока

Б.2.2 Тяговая сеть систем переменного тока

Параметрами обобщенной расчетной схемы тяговой сети, представленной на рисунке Б.5, для системы 2×25 кВ, являются:

- собственные погонные сопротивления эквивалентных контактных сетей путей $z_{к1}, z_{к2}, \dots, z_{кМпут}$, Ом/км;
- то же питающих проводов $z_{п1}, z_{п2}, \dots, z_{пМпут}$;
- взаимные индуктивные сопротивления между эквивалентными проводами $z_{к1к2}, z_{п1п2}, z_{к1п1}, \dots$;
- доли токов (коэффициенты токораспределения) в каждом эквивалентном проводе от общей нагрузки сети α_i .



ТП-А, ТП-Б – тяговые подстанции; АТП-1, АТП-2 автотрансформаторные пункты;

ШП – шины питающего провода (левого, правого плеча)

П1, П2 – эквивалентные питающие провода 1-го и 2-го путей;

Рисунок Б.5 – Схема замещения тяговой сети системы 2×25 кВ

Перечисленные параметры определяют из решения матричного уравнения

$$\begin{array}{c|cccc|c|c}
 & -1 & -1 & 0 & 0 & \underline{Z}_{гс} & -1 \\
 -1 & \mathbf{Z}_{ff} & \mathbf{Z}_{fg} & \mathbf{Z}_{fэ} & \mathbf{Z}_{fp} & \mathbf{\alpha}_f & 0 \\
 -1 & \mathbf{Z}_{gf} & \mathbf{Z}_{gg} & \mathbf{Z}_{gэ} & \mathbf{Z}_{gp} & \mathbf{\alpha}_g & 0 \\
 0 & \mathbf{Z}_{эf} & \mathbf{Z}_{эg} & \mathbf{Z}_{ээ} & \mathbf{Z}_{эp} & \mathbf{\alpha}_э & 0 \\
 0 & \mathbf{Z}_{pf} & \mathbf{Z}_{pg} & \mathbf{Z}_{pэ} & \mathbf{Z}_{pp} & \mathbf{\alpha}_p & 0
 \end{array} = \begin{array}{c} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \quad (\text{Б.8})$$

Уравнение (Б.8) описывает универсальную модель тяговой сети, содержащую в общем случае N_f параллельно соединенных проводов в группе f (например, контактный провод, несущий трос, усиливающий провод одного пути), N_g проводов в группе g (питающих проводов, связанных с проводами группы f автотрансформаторами), $N_э$ экранирующих проводов и N_p рельсовых нитей.

На главной диагонали матрицы коэффициентов уравнения, начиная со второй строки, расположены квадратные подматрицы собственных и взаимных сопротивлений контуров с землей в группе соответствующих проводов и рельсов, а вне диагонали – прямоугольные подматрицы взаимных сопротивлений между контурами разных групп.

Полные сопротивления, Ом/км, любого контура “провод w_i – земля”, “рельсовая нить p_k – земля” и взаимные сопротивления между этими контурами рассчитывают по формулам

$$\underline{z}_{wi} = r_{wi} + 0,05 + j 0,145 [4,08 - \lg (R_{wi} \sqrt{\sigma_3})], \quad (\text{Б.9})$$

$$\underline{z}_{pk} = r_{pka} + 0,05 + j 0,145 [3,97 + 5,2 r_{pka} - \lg (R_{pk} \sqrt{\sigma_3})], \quad (\text{Б.10})$$

$$\underline{z}_{wij} = 0,05 + j 0,145 [3,97 - \lg (a_{wij} \sqrt{\sigma_3})], \quad (\text{Б.11})$$

где r_{wi} – активное сопротивление провода по соответствующим стандартам, Ом/км;

R_{wi} – радиус провода, см;

σ_3 – проводимость земли, См/м;

r_{pka} – активное сопротивление рельсовой нити, Ом/км;

R_{pk} – эквивалентный радиус рельса, см;

a_{wij} – расстояние между проводами или осями рельсовых нитей, см.

Собственное сопротивление любого эквивалентного провода расчетной схемы, например, $z_{к1}$ определяют из уравнения (Б.8), как значение $Z_{тс}$ при учете проводов контактной сети (или питающего провода) только данного, 1-го пути, а также рельсовых нитей и экранирующих проводов всех путей. Для определения взаимного сопротивления между двумя эквивалентными проводами, например, $z_{к1п2}$ сначала находят сопротивление $z_{к1п2 \text{ прл}}$ параллельно соединённых проводов в группах К1, П2 (при учете всех рельсовых нитей и экранирующих проводов). Затем взаимное сопротивление определяют из выражения

$$z_{к1п2} = z_{к1п2 \text{ прл}} - [(z_{к1} - z_{к1п2 \text{ прл}}) (z_{п2} - z_{к1п2 \text{ прл}})]^{1/2}. \quad (\text{Б.12})$$

Эквивалентные провода тяговой сети присоединяют к соответствующим шинам ШК, ШП схем замещения подстанций и поста секционирования посредством сопротивлений $Z_{ф}$ фидерных линий. Ток I_m нагрузки замыкается непосредственно на “нулевую” шину, так как сопротивление рельсовой сети учтено в параметрах эквивалентных проводов.

Падение напряжения в автотрансформаторах системы 2×25 кВ учитывают сопротивлениями $Z_{ат}$, которые вычисляют по (Б.2)–(Б.4) при $K_S = 4$ и без учета мощности $S_{кз}$.

Расчетная схема тяговой сети системы 25 кВ имеет тот же вид и те же параметры, что на рисунке 5, но без эквивалентных питающих проводов и всех присоединенных к ним элементов.

Приложение В (рекомендуемое)

Определение параметров рабочего режима систем тягового электроснабжения на основе моделирования графика движения поездов

В.1 Исходные данные

В.1.1 Состав исходных данных, необходимых при моделировании графика движения поездов, указан ниже.

В.1.2 Массив усредненных по времени с шагом Δt результатов тяговых расчетов (см. приложение А):

- координата положения поезда в любой момент времени $t_b = N_b \Delta t$, $Tcb(N_b, c, d).L_b$;

- ток поезда в этот момент (для электроподвижного состава переменного тока комплексное значение) $Tcb(N_b, c, d).I_b$,

где c – индекс типа поезда. Меньшие значения индекса соответствуют поездам с более высоким приоритетом при прокладке в графике движения;

d – направление движения: 0 – нечетное, 1 – четное.

В.1.3 Координаты осей станций при их числе M_s на участке $Stans(N_s).L_s$, $N_s = 1 \dots M_s$.

В.1.4 Число поездов M_{nf} на каждом пути f M_f -путного участка.

В.1.5 Для каждого поезда n должны быть заданы:

- индексы начальной N_{sh} и конечной N_{se} станции движения;

- время отправления от начальной станции t_{nf} , мин;

- минимальная продолжительность $T_{ct}(N_s)$ стоянок (возможно нулевая) на всех станциях, кроме начальной и конечной $T_{ct}(N_s)$, мин.

В.2 Математическое описание графика движения

На основе исходных данных формируют таблицу $Ts(N_s, c, d)$, которая содержит индексы N_{bs} , соответствующие координатам осей станций в массиве $Tcb(N_b, c, d)$ (ближайшие значения)

$$N_{bs} = Ts(N_s, c, d) \text{ при } Tcb(N_{bs}, c, d) \cdot L_b = Stans(N_s) \cdot L_s. \quad (\text{B.1})$$

С использованием этой таблицы определяют времена хода поезда между любыми станциями N_{s-Nd} и N_s :

$$T_{s-Nd, s} = [Ts(N_s, c, d) - Ts(N_{s-Nd}, c, d)] / \Delta t, \quad (\text{B.2})$$

где N_d – индекс направление движения поездов: $N_d = 1$ для нечетных поездов, $N_d = -1$ для четных.

Расчетный график движения поездов по каждому пути f M_f -путного участка описывается массивом линий хода (ниток графика) при их числе M_{nf} $LinTr(n, f)$, $n = 1 \dots M_{nf}$, $f = 1 \dots M_f$.

Этот массив содержит следующие элементы:

- индекс типа поезда $LinTr(n, f).c$;
- указатель направления движения $LinTr(n, f).d$;
- индекс начальной станции движения $LinTr(n, f).N_{sh}$;
- индекс конечной станции $LinTr(n, f).N_{se}$;
- таблица моментов прибытия ($N_{по} = 0$) и отправления ($N_{по} = 1$) поезда по каждой станции N_s $LinTr(n, f).Shed(N_s, N_{по})$.

С использованием приведенных выше данных математическое построение линии хода на графике осуществляют в такой последовательности:

$$Shed(N_{sh}, 0) = Shed(N_{sh}, 1) = t_{f} / \Delta t, \quad (\text{B.3})$$

$$Shed(N_s, 0) = Shed(N_{s-Nd}, 1) + Ts(N_s, c, d) - Ts(N_{s-Nd}, c, d), \quad (\text{B.4})$$

$$Shed(N_s, 1) = Shed(N_s, 0) + T_{ct}(N_s) / \Delta t \quad (\text{B.5})$$

при $N_s = N_{sh+Nd} \dots N_{se}$.

Во избежание конфликтных ситуаций, таких, как недопустимое сближение или пересечение на перегоне линий хода поездов на одном пути, в графике следует соблюдать заданные интервалы между поездами.

Корректность графика проверяют по следующим условиям (значения разностей предполагаются положительными):

- для любых соседних попутных поездов

$$LinTr(n+1, f).Shed(N_s, 1) - LinTr(n, f).Shed(N_s, 1) \geq J_p; \quad (B.6)$$

- для встречных поездов n_1, n_2 при двустороннем движении

$$LinTr(n_2, f).Shed(N_s, 0) - LinTr(n_1, f).Shed(N_s, 0) \geq \tau_{\text{нп}}, \quad (B.7)$$

$$LinTr(n_1, f).Shed(N_s, 1) - LinTr(n_2, f).Shed(N_s, 0) \geq \tau_c, \quad (B.8)$$

где J_p – минимальный интервал между поездами в пакете, мин;

$\tau_{\text{нп}}, \tau_c$ – станционные интервалы для однопутных участков соответственно неодновременного прибытия встречных поездов с остановкой и скрещения поездов. При проектных расчетах допускается принимать: $\tau_{\text{нп}} = 3, \tau_c = 0,5$ мин.

При несоблюдении этих условий необходимо увеличить время отправления того поезда в проверяемой паре, индекс типа $LinTr(n, f).c$ которого больше, т. е. приоритет ниже.

Каждой нитке графика ставят в соответствие элементы массива поездов $Trns(n, f)$, содержащие следующие параметры:

- текущая координата расположения на участке $Trns(n, f).L_m$;
- ток электроподвижного состава поезда (при переменном токе комплексное значение) $Trns(n, f).I_m$;
- напряжение на токоприемнике (то же) $Trns(n, f).U_m$;
- индекс следующей станции по ходу движения $Trns(n, f).N_{sx}$;
- счетчик времени стоянок $Trns(n, f).C_{st}$;
- признак стоянки поезда $Trns(n, f).ost$.

В.3 Порядок действий при моделировании

Формирование графика движения поездов согласно В.2 проводят на подготовительном этапе расчета параметров режима систем тягового электроснабжения, как показано на рисунке В.1. На этом же этапе

инициализируют массивы промежуточных результатов расчета – токов в ветвях и напряжений узлов расчетной схемы, необходимых для дальнейшего анализа.



Рисунок В.1

График движения поездов моделируют в заданном интервале времени от $t_{\text{нач}}$ до $t_{\text{кон}}$, причем значение $t_{\text{нач}}$ может соответствовать любому сечению графика. В каждый текущий момент времени t_c , который в этом интервале изменяется с шагом Δt , реализуется процедура перемещения поездов согласно графику движения. Текущему моменту времени соответствует номер такта моделирования $N_t = t_c / \Delta t$.

В указанной процедуре согласно рисунку В.2 циклически просматривают все нитки графика $LinTr(n, f)$ от $n = 1$ до M_{nf} по всем путям участка от $f = 1$ до M_f .

На первом шаге цикла из элемента массива $LinTr(n, f)$ извлекают значения локальных переменных c, d, N_{sh}, N_{se} соответственно типа поезда, направления движения, индексов начальной и конечной станции.

В начальный момент времени $t_c = t_{\text{нач}}$ проводят инициализацию массива поездов $Trns(n, f)$ (шаги 2, 3), в частности, обнуляют счетчик C_{st} времени стоянок, в качестве следующей станции N_{sx} принимают станцию отправления N_{sh} .

На шаге 4 определяют индекс N_b положения данного поезда в массиве Tcb (для краткости индексы c, d в Ts опущены). Если N_b находится за пределами конечной станции, то признаку $Trns(n, f).ost$ присваивают значение 2, и поезд в дальнейших расчетах не учитывают (шаги 5, 6).

На шаге 7 из массива Tcb извлекают значения координаты L_m расположения поезда и его тока I_m .

Дальнейшие действия выполняют, если поезд еще не достиг следующей по ходу движения станции N_{sx} (проверяют на шаге 8).

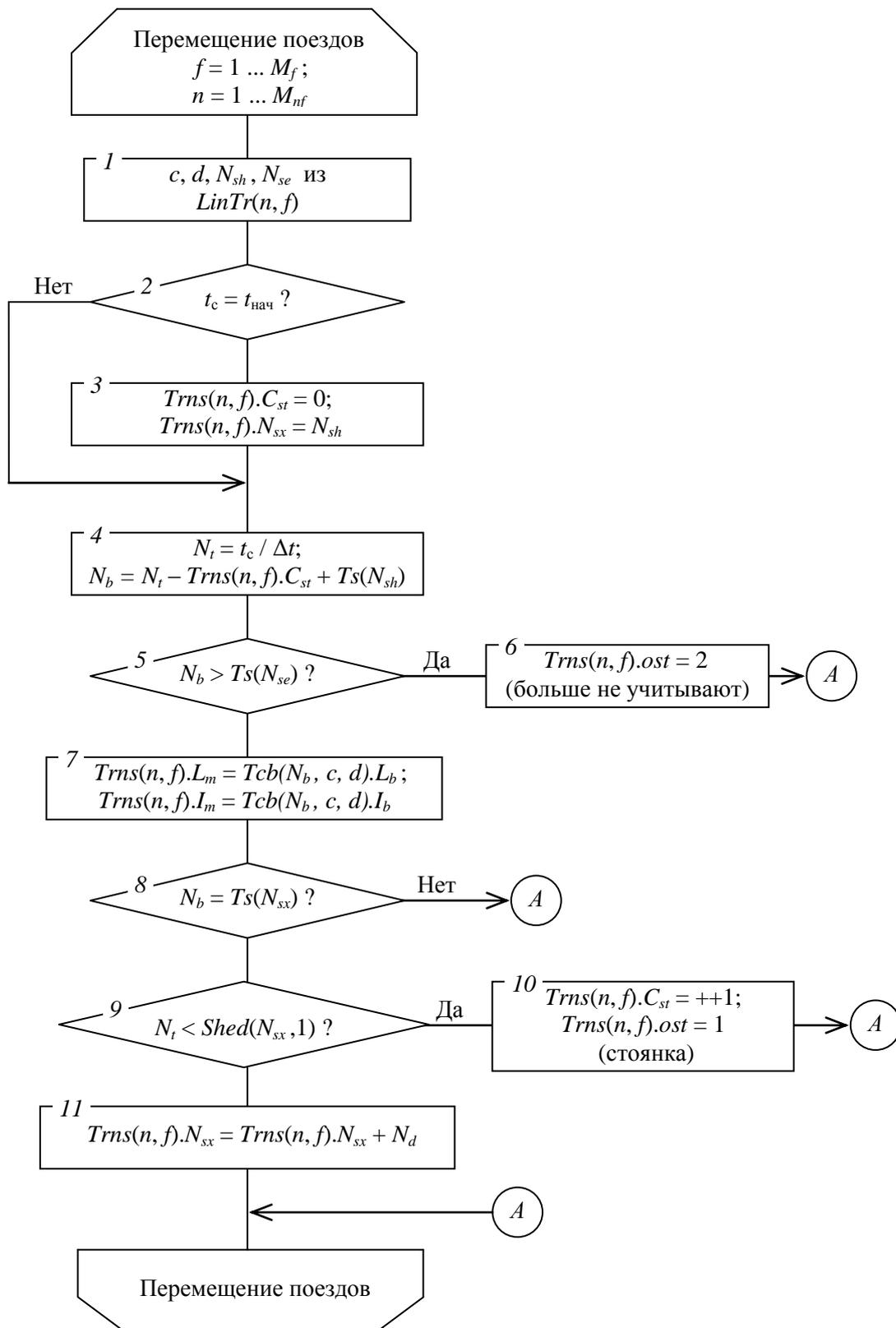


Рисунок В.2 – Схема алгоритма перемещения поездов в модели графика движения

Если текущее тактовое время N_t меньше момента $Trns(n, f).Shed(N_{sx}, 1)$ отправления от станции N_{sx} , то счетчик $Trns(n, f).C_{st}$ увеличивают на единицу и признаку $Trns(n, f).ost$ присваивают значение 1, что соответствует стоянке поезда или ожиданию входа на участок (шаг 10). В противном случае на шаге 11 устанавливают следующую станцию N_{sx} по направлению движения.

По завершении описанной процедуры формируют массив координат и токов поездов, находящихся в движении [с признаком $Trns(n, f).ost = 0$] на каждой межподстанционной зоне участка, и проводят расчет мгновенной схемы (см. рисунок В.1).

Приложение Г (рекомендуемое)

Методика расчета температуры нагрева и допустимого длительного тока проводов контактной сети и воздушных линий

Г.1 Исходные данные

Данная методика распространяется на провода контактной сети и неизолированные провода воздушных линий для условий их работы, указанных в 4.1.4.

При тепловых расчетах проводов используют следующие исходные параметры:

- электрическое сопротивление $r_{п 20}$ постоянному току при 20 °С по стандарту на провод соответствующей марки, Ом/км;

- диаметр $d_{п}$ по стандарту на провод соответствующей марки, мм;

- температурный коэффициент электрического сопротивления α_r :
 $\alpha_r = 0,0039 \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$;

- теплоемкость участка провода длиной 1 м $C_{п}$, Вт·с/(м·°С):

910 для контактных проводов;

826 для медных и бронзовых многопроволочных « ;

578 для алюминиевых « ;

- степень черноты (излучающая способность) поверхности провода $\epsilon_{и}$.

При проектных расчетах допускается для всех марок проводов принять $\epsilon_{и} = 0,4$;

- температура окружающей среды $\tau_{в}$ в соответствии с 4.1.4, °С;

- температура дополнительного нагрева провода вследствие солнечной радиации $\tau_{с}$ в соответствии с 4.1.4, °С.

Г.2 Подготовка расчетных параметров

Перед выполнением расчетов необходимо:

- принять начальную температуру перегрева провода $\theta(0) = 0$ °С;
- вычислить сопротивление провода при температуре окружающей среды,

Ом/м

$$r_B = 10^{-3} k_M r_{20} [1 + \alpha_r (\tau_B + \tau_c - 20)], \quad (\text{Г.1})$$

где k_M – коэффициент увеличения сопротивления провода за счет поверхностного эффекта и магнитных потерь в стальном сердечнике.

Для проводов по ГОСТ 4775 при переменном токе $k_M = 1,25$. Во всех остальных случаях $k_M = 1$.

Г.3 Расчет температуры провода

При расчетах температуры нагрева провода необходимо использовать числовой ряд значений тока $I(k)$ в проводе, полученный в результате электрических расчетов.

Соответствующий этому току числовой ряд значений температуры провода на каждом шаге k рассчитывают по формулам

$$\tau_{\text{п}}(k) = \tau_B + \tau_c + \theta(k), \quad (\text{Г.2})$$

$$\theta(k) = \theta_{\text{дл}} + [(\theta(k-1) - \theta_{\text{дл}})] \exp(-\Delta t / T_{\text{пн}}), \quad (\text{Г.3})$$

где $\theta(k)$, $\theta(k-1)$ – температура перегрева провода соответственно на данном и предшествующем шаге расчета, °С;

$\theta_{\text{дл}}$ – установившаяся температура перегрева провода в стационарном режиме, °С;

$T_{\text{пн}}$ – постоянная нагревания провода, мин.

Установившуюся температуру перегрева и постоянную нагревания на каждом шаге вычисляют по значению тока $I(k)$:

$$\theta_{\text{дл}} = I^2(k) r_B / (h_T - I^2(k) r_B \alpha_r); \quad (\text{Г.4})$$

$$T_{\text{пн}} = C_{\text{п}} / (h_T - I^2(k) r_B \alpha_r) / 60. \quad (\text{Г.5})$$

где h_T – линейный коэффициент теплоотдачи с поверхности участка провода, Вт/(м·°С):

$$h_T = A (58 d_{\text{п}})^b + 0,0209 d_{\text{п}} \varepsilon_{\text{и}} [0,9 + 0,0074 \tau_{\text{п}}(k-1)]. \quad (\text{Г.6})$$

В выражении (Г.6) принимают значения параметров:

$A = 0,0374$, $b = 0,500$ для контактных проводов;

$A = 0,0545$, $b = 0,471$ для многопроволочных « .

Г.4 Определение допустимого длительного тока провода

Допустимый длительный ток провода для условий, указанных в 4.1.4, рекомендуется вычислять приближенно по формуле, А

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{h_T \theta_{\text{доп}}}{r_{\text{в}} (1 + \alpha_r \theta_{\text{доп}})}}, \quad (\text{Г.7})$$

где $\theta_{\text{доп}}$ – допустимая температура перегрева провода, °С:

$$\theta_{\text{доп}} = \tau_{\text{доп}} - \tau_{\text{в}} - \tau_{\text{с}}. \quad (\text{Г.8})$$

Здесь $\tau_{\text{доп}}$ – допустимая температура провода по 4.1.3, перечисление в).

ГОСТ Р

проект, первая редакция

Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров

УДК 621.331.006.013

ОКС29.280

ОКП 318531

Ключевые слова: системы тягового электроснабжения, контактная сеть, тяговые подстанции, силовые трансформаторы, статические преобразователи, электроподвижной состав.

Заместитель генерального директора
ОАО «ВНИИЖТ»



А.Б. Косарев

Руководитель центра «Стандартизация и
методология технического регулирования»



Л.И. Копчугова

Заведующий отделом «Системы тягового
электроснабжения ж. д.»



Ю.Г. Чепелев

Старший научный сотрудник центра
«Стандартизация и методология
технического регулирования»



В.Ф. Балацкий

Руководитель работы, ведущий научный
сотрудник отдела «Системы тягового
электроснабжения ж. д.»



В.Е. Марский