



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МИИ»

Институт ИЭТЭ  
Кафедра ЭКАОиЭТ

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
**(бакалаврская работа)**

Направление 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование)

Направленность (профиль) Электрический транспорт

Форма обучения очная  
(очная/очно-заочная/заочная)

Тема: Тяговый электропривод электропоезда постоянного тока

Студент ЭЛ-05-17 Смирнов А.М.  
группа подпись фамилия и инициалы

Научный  
руководитель к. т. н. Доцент Глушенков В.А.  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

Консультант Ассистент Рашек Ю.В.  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

Консультант \_\_\_\_\_  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

«Работа допущена к защите»

Зав. кафедрой к. т. н. с. н. с. Румянцев М.Ю.  
уч. степень звание подпись фамилия и инициалы

Дата \_\_\_\_\_

Москва, 2021



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**Институт** ИЭТЭ  
**Кафедра** ЭЖАОиЭТ

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ  
(бакалаврскую работу)**

**Направление** 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование)

**Направленность (профиль)** Электрический транспорт

**Форма обучения** Очная  
(очная/очно-заочная/заочная)

**Тема:** Тяговый электропривод электропоезда постоянного тока

**Студент** ЭЛ-05-17 Смирнов А.М.  
группа подпись фамилия и инициалы

**Научный  
руководитель** к. т. н. Доцент Глушенков В.А.  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

**Консультант** Ассистент Рашек Ю.В.  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

**Консультант** уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

**Зав. кафедрой** к. т. н. с. н. с. Румянцев М.Ю.  
уч. степень звание подпись фамилия и инициалы

**Место выполнения работы** ЭЖАОиЭТ

## СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ЗАДАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. Описание проблемы данной темы и способы ее решения.
2. Расчеты тяги при полном возбуждении тяговых двигателей и маневровом положении реостатного контроллера.
3. Расчеты тяги при ослабленном возбуждении тяговых двигателей и маневровом положении реостатного контроллера, с целью выявить возможность снижения пускового ускорения и уменьшить износ силовых контакторов при маневровых перемещениях.
4. Анализ циклов движения при маневрах, с использованием различных ступеней возбуждения тяговых двигателей, и расчеты мощности, потребляемой электроприводом.
5. Выводы.

## ПЕРЕЧЕНЬ ГРАФИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

**Количество листов** \_\_\_\_\_

**Количество слайдов в презентации** 10 \_\_\_\_\_

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Электропоезда постоянного тока с электрическим торможением / Просвирин Б.К., М: Трансиздат, 2000 г;
2. Локомотивы отечественных железных дорог (1845-1955) / В.А. Раков. – М.: Издательство «Транспорт» 1995 г.
3. Теория Электрической тяги / Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н., Транспорт 1983 г.
4. Основы электрического транспорта: учебник для студ. высш. учеб. Заведений / М.А. Слепцова, Г.П. Долаберидзе, А.П. Прокопович, Т.И. Савина, В.Д. Тулупов; Под ред. М.А. Слепцова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006 г.

### **Примечания:**

1. Задание брошюруется вместе с выпускной работой после титульного листа (страницы задания имеют номера 2, 3).
2. Отзыв руководителя, рецензия(и), отчет о проверке на объем заимствований и согласие студента на размещение работы в открытом доступе вкладываются в конверт (файловую папку) под обложкой работы.

## Оглавление

АННОТАЦИЯ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
Глава 1. Система электропривода ЭД4М. ....	8
1.1 Анализ исходного электропривода. ....	8
1.1.1 Технические данные тяговой машины. ....	8
1.1.2 Работа электропривода в режиме тяги. ....	8
Глава 2. Расчеты тяги при разных степенях возбуждения. ....	10
2.1. Алгоритм расчета тяговых характеристик при полном возбуждении. .	10
2.1.1 Расчет тяговых характеристик. ....	10
2.1.2 Пересчет пускового ускорения и анализ кривой движения при полном возбуждении. ....	18
2.1.3 Расчет переходного процесса при полном поле возбуждения. ....	20
2.2 Расчет тяги при ослаблении возбуждения. ....	24
2.2.1 Выбор степени ослабления возбуждения. ....	24
2.2.2 Расчет переходного процесса при ослабленном возбуждении. ....	25
2.2.3 Расчеты тяговых характеристик при ослабленном возбуждении. ....	31
2.2.4 Сравнение кривых движения при полном и ослабленном возбуждении. ....	37
Глава 3. Сравнение движения при полном и ослабленном возбуждении. ..	40
3.1 Расчет и анализ режимов движения. ....	40
3.2 Анализ нагревания электропривода и расчет мощности. ....	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	45
Список использованных источников. ....	46
Приложения. ....	47

## АННОТАЦИЯ

на выпускную квалификационную работу (бакалаврскую работу)

Тема: Электропривод электропоезда постоянного тока.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трех глав, списка используемых источников, приложения.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, поставлена цель и задачи исследования.

В первой главе «Система электропривода ЭД4М» приведены основные данные используемого электропривода, проанализирована его работа в режиме тяги, со ссылкой на электрическую схему.

Вторая глава «Расчеты тяги при разных ступенях возбуждения» посвящена расчетам тяговых характеристик, пускового ускорения, переходных процессов при пуске, построению кривых движения при полном и ослабленном возбуждении тяговых двигателей, а также приведено сравнение данных характеристик. Проанализировано влияние переходного процесса на ускорение подвижного состава при пуске.

В третьей главе «Сравнение движения при полном и ослабленном возбуждении» произведен анализ маневровых перемещений на примере движения электропоезда через мойку, с использованием различных ступеней ослабления возбуждения. Произведено сравнение износа контакторной аппаратуры для обоих случаев, а также проанализированы вероятные случаи перегрева тягового электропривода и рассчитана мощность, потребляемая электроприводом, и расходуемая на пусковые резисторы и резисторы ослабления поля.

В заключении приведены основные выводы, полученные в результате проведенного исследования.

Общий объем работы составляет 53 страницы.

## ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящего проекта состоит в расчете и проверке возможности использования ослабления поля для снижения пускового ускорения при маневровых перемещениях. Маневровое положение контроллера машиниста (КМ) используется для перемещений с малой скоростью, и при неисправностях схемы вывода пускового реостата. В настоящее время, в основном, маневровое положение КМ используется для медленной езды через мойку, перемещений по депо и при заезде в тупики станций (на вокзалах), где есть ограничение скорости. Маневровые перемещения описываются циклами движения «тяга-выбег». Алгоритм работы тягового электропривода в данном случае, следующий: собирается схема тяги с включенной в цепь якоря маневровой ступенью реостатного контроллера, возникающая сила тяги разгоняет поезд, разбирается схема тяги, поезд катится на выбеге, замедляясь под действием сил сопротивления движению, при наличии ограничения скорости и одновременно необходимости дальнейшего движения цикл повторяется. Таким образом происходит маневровое движение поезда и совершается многократная работа контакторной аппаратуры, которая изнашивается. Идея - снизить пусковую силу тяги. Ослабление возбуждения в тяговом электродвигателе постоянного тока последовательного возбуждения предполагает уменьшение тока возбуждения. Если осуществить это при малых скоростях движения, когда противоЭДС машины мала, то дальнейшее уменьшение ее не приведет к значительному росту тока якоря и его поля, но поле возбуждения при этом уменьшится значительно, в результате чего результирующее поле ослабевает, с ростом скорости при трогании сила тяги становится меньше, а следовательно, и ускорение, что уменьшает число срабатываний контакторной аппаратуры. Осуществляется этот способ с помощью подключения цепи резисторов параллельно обмотке возбуждения, тогда ток делится на две части. Преимущество в том, что для данного способа не требуется применение сложной аппаратуры, цепи не занимают большого

пространства, управление простое. Все необходимые элементы в составе схемы уже имеются, что используется далее при разгоне, необходимо лишь изменить порядок включения схемы для данного способа. Недостатки – небольшой диапазон регулирования, дискретность регулирования, при ослаблении возбуждения возрастает негативный эффект – реакция якоря.

Существуют и другие способы решения данной задачи, например плавное регулирование напряжения на обмотках якоря тяговой машины, для чего требуется отдельный преобразователь, в качестве которого может выступать импульсный регулятор на силовых полупроводниковых элементах. Диапазон регулирования от 1 до 0,2, что примерно схоже с диапазоном регулирования при ослаблении возбуждения. Преимущество в возможности плавного регулирования по сравнению с ослаблением возбуждения с помощью отдельных резисторов, обеспечивается дополнительная защита от радиопомех из-за наличия LC-фильтра. Преобразователь весьма габаритное устройство, он сложнее в конструкции, его применение усложняет расчет и соответственно решение поставленной задачи, он ограничен по мощности в работе, его работа сопровождается наличием пульсаций, в этом заключаются его недостатки. Данную задачу теоретически можно решить с помощью уменьшения числа включенных в работу витков обмотки возбуждения, однако этот способ практически неосуществим, поскольку в таком случае необходимы специальные выводы тяговой машины. Способ характеризуется дискретностью регулирования. Осложняется это возможным возникновением электрической дуги при переключении с одних витков обмотки возбуждения на другие, что является опасным явлением. Возможно использование статического возбудителя (тиристорного моста), т.е. применение независимого возбуждения (НВ) в тяге. Однако в таком случае необходимо изменить схемы силовых цепей и цепей управления, что усложняет решение задачи. В таком случае возникает вопрос о продолжении его использования в дальнейшем разгоне после плавного пуска. Это требует расчетов мощности на возбуждение, отбираемой

у преобразователя собственных нужд, а также разработку схем защиты при использовании НВ в тяге.

## **Глава 1. Система электропривода ЭД4М.**

### **1.1 Анализ исходного электропривода.**

#### **1.1.1 Технические данные тяговой машины.**

Исходные данные к задаче:  $U=3000$  В, тяговый электродвигатель постоянного тока 1ДТ.003.8, электропоезд серии ЭД4М.

Технические данные 1ДТ.003.8 [8]:

Номинальное напряжение:  $U_{ном}=750$  В.

Номинальная мощность:  $P=240$  кВт.

Сопротивление обмотки якоря:  $r_{я}=0,049$  Ом.

Сопротивление главных полюсов:  $r_{г.п.}=0,0965$  Ом.

Сопротивление дополнительных полюсов:  $r_{д.п.}=0,0143$  Ом.

Номинальный ток якоря (часовой):  $I_{ном}=350$  А.

Номинальная скорость вращения:  $n_{ном}=1250$  об/мин.

Технические данные электропоезда ЭД4М [3]:

Состав: 2Г+5М+4П.

Масса головного вагона:  $m_{г}=45$  тонн.

Масса моторного вагона:  $m_{м}=60,5$  тонн.

Масса прицепного вагона:  $m_{п}=41,5$  тонн.

Изобразим упрощенную силовую схему маневрового положения КМ в режиме тяги (Приложение 1).

#### **1.1.2 Работа электропривода в режиме тяги.**

Силовая схема электропривода обеспечивает работу двигателей в режиме тяги и электрического торможения (стр. 53) [1]. К крышевому оборудованию относятся: токоприемник ПК, разрядники Рр1 и Рр2, дроссель ДрФ и конденсатор С1 – в совокупности фильтр от радиопомех, пуско-тормозные резисторы R1-R8. Силовые контакторы ЛК, ЛКТ, Т, Ш и групповые переключатели - реверсор, реостатный контроллер, тормозной переключатель, необходимые для определенных переключений в силовой



схеме. Они расположены в подвагонных ящиках. Там же находятся аппараты защиты силовых цепей: быстродействующий выключатель БВ и контактор защиты КЗ. Четыре тяговых двигателя М1-М4 соединены последовательно. Защитные функции БВ дополнены дифференциальной защитой: герконным реле и трансформатором ТрД. Погасить мощную электрическую дугу при отключении контакторов ЛК и ЛКТ помогает контур из диодов Д30-Д37. Поскольку обмотки возбуждения ТЭД обладают большой индуктивностью, в момент отключения цепи за счет э.д.с самоиндукции напряжение на резисторах делителя R71, R73 повышается до уровня, при котором открывается стабилитрон ПП2. Подается сигнал на управляющий вход тиристора Тт9, и он открывается. Цепь резисторов R10-R15 подсоединяется контактором Ш параллельно обмоткам возбуждения.

Поезд приходит в движение с минимальной скоростью, так как собран маневровый режим. В маневровом положении вал реостатного контроллера не вращается и находится в позиции 1. Поэтому все семнадцать силовых контакторов выключены. В моторных вагонах реверсоры развернутся в заданное положение, тормозные переключатели перейдут в положение режима тяги. Включаются линейные контакторы ЛК и ЛКТ, и создается замкнутая цепь через тяговые двигатели при полностью введенных пусковых резисторах R1-R8: контактная сеть, токоприемник, главные контакты БВ, контактор ЛК, контакты тормозного переключателя ТП2, резисторы R1-R8, контактор ЛКТ, якоря двигателей М1-М4, контакты тормозного переключателя ТП6, контакты реверсора и обмотки возбуждения двигателей, заземляющие устройства на осях колесных пар, рельсы. При таком соединении  $I_{я}=I_{в}$  [1].

Сопротивление контура электрической цепи при маневровом положении КМ складывается из сопротивления якорей тяговых электродвигателей, сопротивления обмоток возбуждения и сопротивления пусковых резисторов  $R_{м}=R_1+R_2+R_3+R_4+R_5+R_6+R_7+R_8$ . Сопротивлениями датчиков и измерительных приборов можно пренебречь. Общее

сопротивление пусковых резисторов в маневровом положении КМ  $R_M=15,12$  Ом (Приложение 2) [1].

## Глава 2. Расчеты тяги при разных ступенях возбуждения.

### 2.1. Алгоритм расчета тяговых характеристик при полном возбуждении.

Последовательность действий для построения тяговой характеристики  $F(V)$ :

1) Задавая ряд значений тока  $I_1 \dots I_i$  [А] находим скорости  $V_1 \dots V_i$  [км/ч] и силы тяги одного тягового двигателя:  $F_1 \dots F_i$  [Н], приведенные к ободу колеса.

2) Рассчитываем общую силу тяги для поезда, учитывая количество двигателей и моторных вагонов в составе:  $F = F_i \cdot n_{дв}$ .

3) Рассчитываем линию ограничения силы тяги по сцеплению как  $F_{сц} = 1000 \cdot G_{сц} \cdot \Psi$ , где  $G_{сц} = m \cdot g$  – сцепной вес (вес моторных вагонов) [кН],  $g$  – ускорение свободного падения [м/с<sup>2</sup>].

4) Проверка условий нормальной тяги  $F \leq F_{сц}$ .

3) Строим тяговую характеристику  $F(V)$  [4].

#### 2.1.1 Расчет тяговых характеристик.

Зависимость ЭДС (В) тяговой машины от СФ  $\left(\frac{В \cdot ч}{км}\right)$  и скорости (км/ч) выражается формулой (2.1) [4]:

$$E = C \cdot \Phi \cdot V \quad (2.1)$$

Рассчитаем пусковой ток в контуре, состоящем из последовательно соединенных четырех тяговых двигателей по формуле (2.2), описывающей закон Ома (учтем, что при пуске скорость  $V=0$  км/ч, тогда ЭДС тяговых двигателей  $E=0$  В по формуле (2.1)):

$$I_{я} = \frac{U - E}{R_M + 4 \cdot R_{я} + 4 \cdot R_{г.п} + 4 \cdot R_{д.п}} \quad (2.2)$$

$$I_{я} = \frac{3000 - 0}{15,12 + 4 \cdot 0,049 + 4 \cdot 0,0965 + 4 \cdot 0,0143} = 190,36 \text{ А}$$

Исходя из опытной нагрузочной характеристики для 1ДТ.003.5, аналогичной 1ДТ.003.8 току  $I_{я} = I_{в} = 190,36 \text{ А}$  соответствует  $C \cdot \Phi = 17,7 \left[ \frac{\text{В} \cdot \text{ч}}{\text{кМ}} \right]$  (Приложение 3).

Скорость на ободу колеса при маневровых перемещениях определяется формулой (2.3):

$$V = \frac{U - I \cdot (R_{м} + 4 \cdot R_{я} + 4 \cdot R_{г.п} + 4 \cdot R_{д.п})}{4 \cdot C \cdot \Phi} \quad (2.3)$$

Сила тяги, приведенная к ободу колеса от одного тягового двигателя, рассчитывается по формуле (2.4) [10]:

$$F = 3,6 \cdot (C \cdot \Phi \cdot I - \Delta F) = 3,6 \cdot \left( C \cdot \Phi \cdot I - \frac{\Delta P_{ст} + \Delta P_{м} + \Delta P_{зп}}{V} \right) \quad (2.4)$$

Здесь учитывается уменьшение тягового усилия из-за тормозящего действия, возникающего от потерь в зубчатой передаче, также из-за потерь в стали (на гистерезис и вихревые токи) и механических потерь, возникающих от трения в подшипниках и других движущихся частях (Приложение 4, 5) [5].

Потери в зубчатой передаче определяются по формуле (2.5):

$$\Delta P_{зп} = \frac{\Delta p_{зп} \cdot U_{дв} \cdot I_{я}}{100} \quad (2.5)$$

Величина  $\Delta p_{зп}$  берется из таблицы (Приложение 5) [6].

Напряжение на двигателе находится по формуле (2.6):

$$U_{дв} = \frac{U - I_{я} \cdot R_{м}}{4} \quad (2.6)$$

Для того, чтобы определять  $\Delta P_{ст} + \Delta P_{м}$  по графику (Приложение 6) [7], необходимо переводить полученные скорости  $V$  (км/ч) в  $n$  (об/мин). Выведем формулу (2.7):

$$w = \frac{V}{R_{к}}$$

$$3,6 \cdot \frac{w_{дв}}{\mu} = \frac{V}{D_k/2}$$

$$3,6 \cdot \frac{n_{дв} \cdot \pi}{\mu \cdot 30} = \frac{V}{D_k/2}$$

$$n_{дв} = \frac{V \cdot \mu \cdot 30}{1,8 \cdot D_k \cdot \pi} = 17,229 \cdot V \quad (2.7)$$

Найдем пусковую силу тяги, приведенную к ободу колеса по формуле (2.4) (при скорости, близкой к нулю потери в зубчатой передаче принимаются равными нулю, однако остаются потери в стали и механические потери):

$$F_M = 3,6 \cdot 17,7 \cdot 190,36 - 3,6 \cdot \frac{0,38}{0,0011} = 10886,1 \text{ Н}$$

Сила тяги на ободу колеса зависит также от размера бандажа колеса, передаточного числа редуктора и конструктивных особенностей тягового двигателя, что учитывается конструктивной постоянной С.

При маневровых перемещениях по депо, мойке подвижной состав не нагружен пассажирами и другим грузом, соответственно при расчете массы учитывается только масса тары 558,5 тонн.

Приведем массу тары подвижного состава (по формуле 2Г+5М+4П) к одной колесной паре, учитывая, что в каждом моторном вагоне по четыре тяговых двигателя и рассчитаем ее по формуле (2.8) [3]:

$$m = \frac{(2 \cdot m_{Г} + 5 \cdot m_{М} + 4 \cdot m_{П})}{n_{дв}} \quad (2.8)$$

$$m = \frac{(2 \cdot 45 + 5 \cdot 60,5 + 4 \cdot 41,5)}{20} = 27,925 \text{ тонн}$$

При рассмотрении движения транспортного средства необходимо учитывать инерцию вращающихся частей. Данное обстоятельство требует введения коэффициента инерции  $\gamma$ . Данный электропоезд состоит из разных типов вагонов, и каждый тип имеет свой коэффициент инерции (у моторных он больше, у остальных меньше, поскольку моторные вагоны имеют больше

вращающихся частей). Рассчитаем  $1+\gamma$  по формуле (2.9):

$$1 + \gamma = \frac{5 \cdot m_M \cdot (1 + \gamma_M) + (2 \cdot m_r + 4 \cdot m_{II}) \cdot (1 + \gamma_B)}{m} \quad (2.9)$$

$$1 + \gamma = \frac{5 \cdot 60,5 \cdot 1,1 + (2 \cdot 45 + 4 \cdot 41,5) \cdot 1,04}{558,5} = 1,07$$

Рассчитаем пусковое ускорение по формуле (2.10):

$$a_0 = \frac{F}{m \cdot (1 + \gamma)} \quad (2.10)$$

$$a_0 = \frac{10886,1}{27925 \cdot (1 + 0,07)} = 0,364 \text{ м/с}^2$$

По условию пусковое ускорение для пассажирского ПС не должно превышать  $0,4 \text{ м/с}^2$ . В данном случае условие соблюдается.

Построим маневровую электромеханическую характеристику  $F(I)$  на обode колеса (рис. 2.1) с помощью математического пакета Mathcad, учитывая, что с изменением  $I_a$  и соответственно  $V$  изменяются потери, также и СФ. Результаты расчета сведем в табл. 1:

Таблица 1

$I_a, \text{ А}$	190,36	185,9	177	168,5	151,5	136	119	102,5
$\frac{\text{СФ, В}\cdot\text{ч}}{\text{км}}$	17,7	17,55	17,2	16,85	16,1	15,4	14,8	13,8
$\Delta P_{\text{СТ}} + \Delta P_{\text{М}}, \text{ Вт}$	0,38	5	260	370	530	700	1050	1430
$\Delta P_{\text{ЗП}}, \text{ Вт}$	0	323,6	537,2	781,1	1303	1812,8	2393,3	3028,7
$F, \text{ Н}$	10886,1	10562,2	10000,3	9392,4	8086,3	6893,7	5687,9	4450,1
$V, \text{ км/ч}$	0,0011	1	3	5	9,5	14	19	25

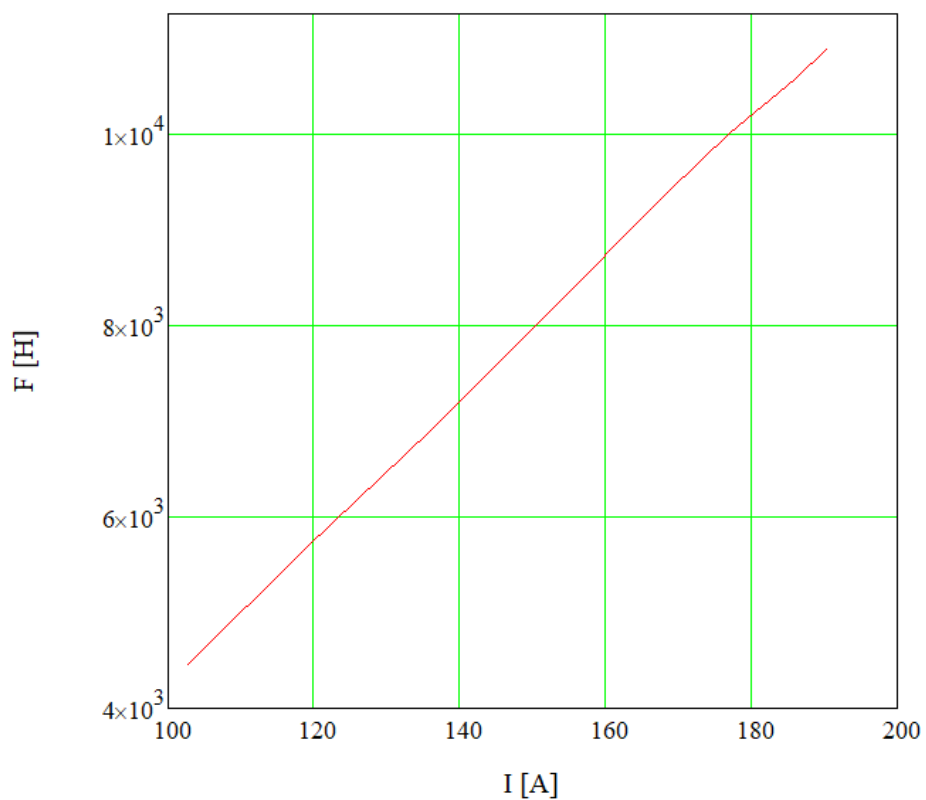


Рис. 2.1. Электромеханическая характеристика  $F(I)$  на ободе колеса.

Построим скоростную характеристику  $V(I)$  тяговой машины (рис. 2.2):

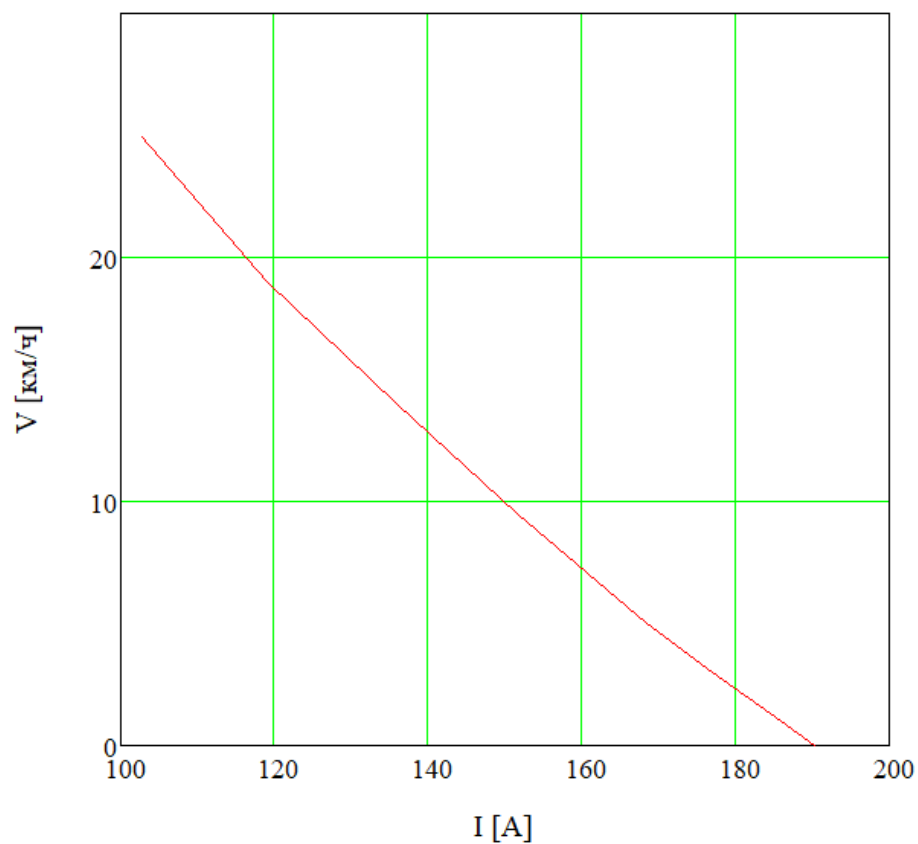


Рис. 2.2. Скоростная характеристика.

Очевидно, что с уменьшением тока якоря уменьшается сила тяги, но скорость увеличивается.

На основании электромеханической  $F(I)$  и скоростной  $V(I)$  характеристик построим тяговую характеристики  $F(V)$  электропоезда, учитывая, что подвижной состав в данном случае имеет пять моторных вагонов, в каждом из которых по четыре тяговых двигателя.

Таким образом, сила тяги электропоезда по формуле (2.11) составляет:

$$F_T = F_i \cdot n_{дв} \cdot n_{мв} \quad (2.11)$$

Возьмем пусковую силу (максимальную силу тяги электропоезда):

$$F_T = 10886,1 \cdot 4 \cdot 5 = 217722 \text{ Н}$$

Помимо этого, учтем ограничение по сцеплению. Рассчитаем сцепной вес моторных вагонов (масса моторного вагона составляет 60,5 тонн) по формуле (2.12):

$$G_{сц} = n_{мв} \cdot m_m \cdot g \quad (2.12)$$

$$G_{сц} = 5 \cdot 60,5 \cdot 9,81 = 2967,5 \text{ кН}$$

Рассчитаем силу сцепления колесной пары с рельсами, где  $\Psi$  – коэффициент сцепления (для электропоезда принимается равным 0,22) по формуле (2.13) [6]:

$$F_{сц} = 1000 \cdot G_{сц} \cdot \Psi \quad (2.13)$$

$$F_{сц} = 1000 \cdot 2967,5 \cdot 0,22 = 652856 \text{ Н}$$

По условию сцепления  $F \leq F_{сц}$ . Расчет удовлетворяет данному условию, т.е.  $217722 \text{ Н} \leq 652856 \text{ Н}$ .

Необходимо также учитывать, что на электропоезд воздействуют силы сопротивления движению, причем с увеличением скорости движения увеличивается сопротивление.

Для расчета сил сопротивления движению необходимо определить удельные сопротивления для разных типов вагонов поезда – моторных и

прицепных. Используемые для этого формулы получены эмпирическим путем. Первый и второй числовые коэффициенты характеризуют силы трения, определяемые конструкцией подвижного состава, третий – сопротивление воздушной среды (без ветра). Для моторных вагонов первый и второй коэффициенты меньше, чем для прицепных, поскольку механические потери в тяговых двигателях, тяговой передаче и моторно-осевых подшипниках, учтены в электромеханических характеристиках тяговых двигателей.

Удельное сопротивление движению моторных вагонов определяется по формуле (2.14) [6]:

$$w_0' = 1,1 + 0,012 \cdot V + 0,000267 \cdot V^2 \quad (2.14)$$

Сила сопротивления движению, действующая на моторные вагоны, определяется по формуле (2.15) [6]:

$$W_0' = m_M \cdot g \cdot w_0' \quad (2.15)$$

Удельное сопротивление движению остальных вагонов определяется по формуле (2.16):

$$w_0'' = 1,24 + 0,02 \cdot V + 0,000267 \cdot V^2 \quad (2.16)$$

Сила сопротивления движению, действующая на моторные вагоны, определяется по формуле (2.17):

$$W_0'' = m_B \cdot g \cdot w_0'' \quad (2.17)$$

Общее сопротивление движению определяется по формуле (2.18):

$$W_0 = W_0' + W_0'' \quad (2.18)$$

Результирующая сила тяги электропоезда получается за вычетом силы сопротивления движению из силы тяги двигателей, и определяется по



формуле (2.19):

$$F_{рез} = F_T - W_0 \quad (2.19)$$

Результаты расчета сил тяги электропоезда, сопротивления движению и результирующей силы сведем в табл. 2:

Таблица 2

$F_T$ , кН	217,7	211,2	200,1	187,8	161,7	137,9	113,8	89
$W_0$ , кН	6,378	6,466	6,649	6,844	7,326	7,867	8,537	9,439
$F_{рез}$ , кН	211,3	204,8	193,4	181	154,4	130	105,2	79,56
$V$ , км/ч	0,0011	1	3	5	9,5	14	19	25

Построим тяговую характеристику  $F_{рез}(V)$  с ограничениями по максимальной маневровой скорости и по сцеплению (рис. 2.3). Также покажем изменение сопротивления движению и его влияние на силу тяги:

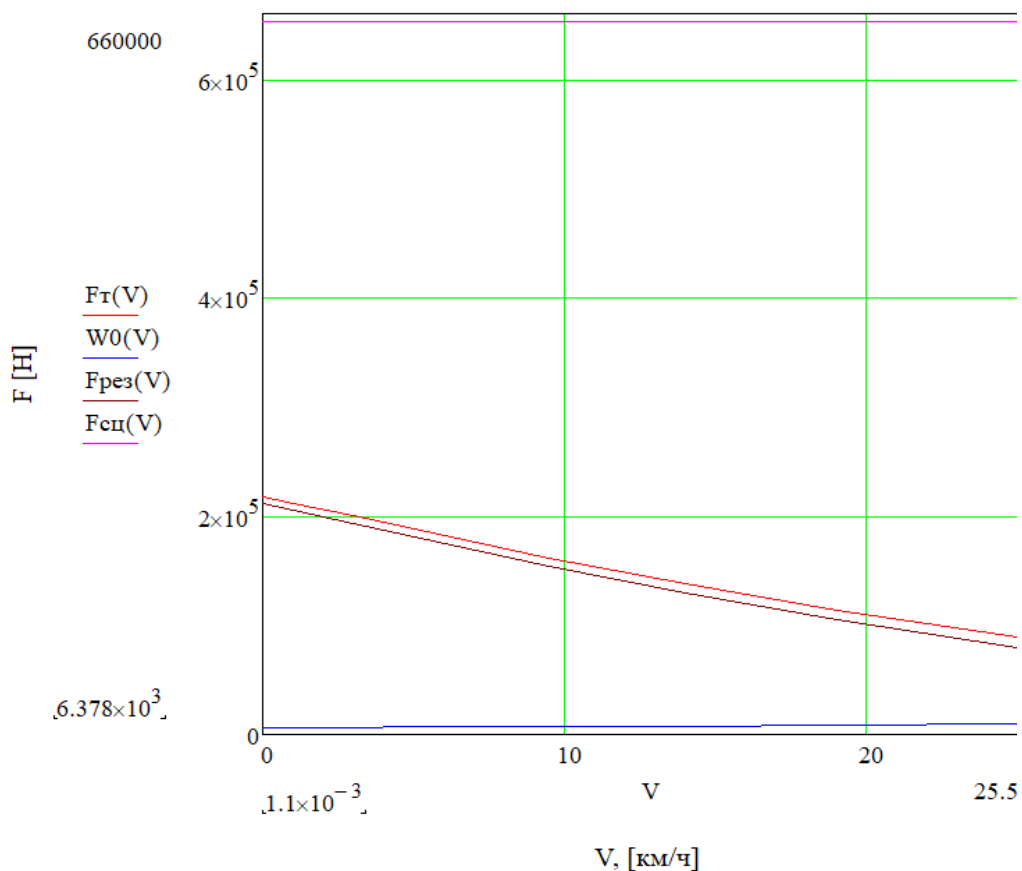


Рис. 2.3. Тяговая характеристика для всего ЭПС.

Данная характеристика является относительно мягкой по жесткости,

т.к. сила тяги уменьшается незначительно с увеличением скорости движения электропоезда.

### **2.1.2 Пересчет пускового ускорения и анализ кривой движения при полном возбуждении.**

Пересчитаем пусковое ускорение с учетом сил сопротивления движению (принимая результирующую силу тяги подвижного состава и полную массу тары) по формуле (2.20):

$$a_0 = \frac{F_{\text{рез}}}{m \cdot (1 + \gamma)} \quad (2.20)$$

$$a_0 = \frac{211344}{558500 \cdot (1 + 0,07)} = 0,354 \text{ м/с}^2$$

В данном случае видно, что пусковое ускорение при учете сил сопротивления движению, меньше рассчитанного ранее, т.е.  $0,354 < 0,364 \text{ м/с}^2$ .

При заезде в тупик конечной станции электропоезд загружен пассажирами. В головном вагоне всего 80 мест для сидения, а в прицепном (и моторном) вагоне 110. Примем, что все места для сидения заняты, нет стоячих пассажиров, а средняя масса пассажира 70 кг.

Рассчитаем общую массу пассажиров по формуле (2.21):

$$m_{\text{общ.пас}} = (2 \cdot k_{\text{Г}} + 5 \cdot k_{\text{П}} + 4 \cdot k_{\text{М}}) \cdot m_{\text{пас}} \quad (2.21)$$

$$m_{\text{общ.пас}} = (2 \cdot 80 + 5 \cdot 110 + 4 \cdot 110) \cdot 70 = 80500 \text{ кг}$$

Тогда общая масса  $m$  будет включать массу тары и общую массу пассажиров. Рассчитаем пусковое ускорение для заезда в тупик конечной станции по формуле (2.20):

$$a_0 = \frac{211344}{(558500 + 80500) \cdot (1 + 0,07)} = 0,31 \text{ м/с}^2$$

Проанализируем как меняется скорость от времени в режиме тяги. Для этого рассмотрим дифференциальное уравнение движения, соответствующее 2ому закону Ньютона по формуле (2.22) [10]:

$$\frac{dV}{dt} \cdot m \cdot (1 + \gamma) = F_T(V) - W_0(V) \quad (2.22)$$

Характеристика  $F_T(V)$  помимо всего прочего зависит от СФ, которое зависит от тока возбуждения, и соответственно уменьшается при увеличении скорости в режиме тяги. Для того, чтобы проводить вычисления аналитически необходимо линеаризовать опытную характеристику  $СФ(I_B)$  (Приложение 3). Учитывая изменение приращения функции на рассматриваемом интервале токов – от 102,5 до 190,36 А, а соответственно скоростей – от 0,0011 до 25 км/ч получим по формуле (2.23):

$$СФ(V) = 17,7 - 0,158 \cdot V \quad (2.23)$$

Потери силы тяги представим также зависимостью от скорости и выразим аналитически формулой (2.24):

$$\Delta F(V) = 170 + 180 \cdot e^{-0,22 \cdot V} \quad (2.24)$$

Подставим известные значения величин в дифференциальное уравнение. Расчет проведем в математическом пакете MATLAB, для этого напишем код, который решает уравнение численным методом:

```
Clear
[t1,V1]=ode45(@(t1,V1)1.2048*10^(-4)*((190.36-0.06345*V1*(17.7-
0.158*V1))*(17.7-0.158*V1)-(170+180*2.71828^(-0.22*V1)))-
(0.01067+0.0001436*(V1)+2.4478*10^(-6)*(V1)^2),[0 85],0,odeset('Stats','on'));
plot(t1,V1)
```

Получим характеристику движения  $V(t)$  электропоезда в тяговом режиме (рис. 2.4), с маневровой ступенью пускового реостата и при полном возбуждении тяговых двигателей:

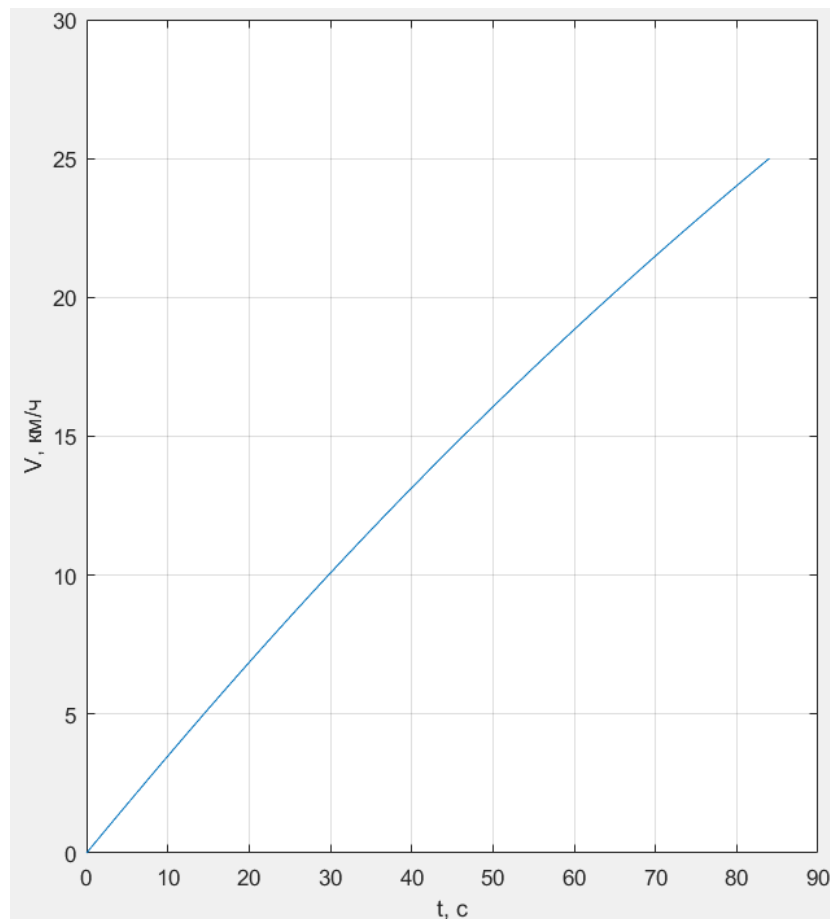


Рис. 2.4. Кривая движения подвижного состава в режиме тяги.

Из данного графика видно, что со временем приращение скорости за один и тот же промежуток времени уменьшается, т.е. уменьшается ускорение, т.к. уменьшается сила тяги и увеличивается сила сопротивления движению.

### **2.1.3 Расчет переходного процесса при полном поле возбуждения.**

При пуске ток, протекающий через тяговые двигатели и резисторы достигает установившегося значения не сразу, из-за наличия индуктивности. Чтобы оценить длительность переходного процесса и его влияние на работу ЭПС, в частности на пусковое ускорение необходимо решить дифференциальное уравнение.

В данном случае индуктивность складывается из индуктивности обмотки возбуждения и якоря, а также индуктивности, связанной с рассеянием магнитного потока.

Число полюсов тяговой машины 1ДТ.003.8:  $2p=4$ .

Число параллельных ветвей обмотки якоря:  $2a=4$ .

Число проводников обмотки якоря:  $N=700$ .

Передаточное число редуктора:  $i=3,41$ .

Диаметр колеса:  $D_k=1050$  мм.

Коэффициент рассеяния главных полюсов:  $\sigma_r=1,2$ .

Количество витков обмотки возбуждения:  $w_{ов}=58$  [8].

Конструктивную постоянную найдем по формуле (2.25):

$$C_e = \frac{278 \cdot p \cdot N \cdot i}{a \cdot \pi \cdot D_k} \quad (2.25)$$

$$C_e = \frac{278 \cdot 2 \cdot 700 \cdot 3,41}{2 \cdot \pi \cdot 1050} = 201,27$$

При пуске ток якоря нарастает от 0 до 190,36 А, при этом индуктивность цепи изменяется нелинейно. Найдем ее среднее значение за пуск. По нагрузочной характеристике определим приращение  $E/n$ , соответствующее приращению  $I_v$ .

Определим изменение магнитного потока по формуле (2.26), для чего воспользуемся формулой (2.7), чтобы перевести  $E/V=C_v\Phi$ , соответствующее опытной нагрузочной характеристики, в  $E/n=C_e\Phi$  (Приложение 3):

$$\Delta\Phi = \Delta\left(\frac{E}{n}\right) / C_e \quad (2.26)$$

$$\Delta\Phi = \frac{\Delta(17,7/17,229)}{201,27} = 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

Определим индуктивность обмотки возбуждения по формуле (2.27):

$$L_{ов} = 2 \cdot p \cdot \sigma_r \cdot w_{ов} \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta I} \quad (2.27)$$

$$L_{ов} = 4 \cdot 1,2 \cdot 58 \cdot \frac{5,1 \cdot 10^{-3}}{190,36} = 7,46 \text{ мГн}$$

Индуктивность рассеяния, обусловленную потоками рассеяния, замыкающимися по воздуху вокруг витков, определим по формуле (2.28):

$$L_{\sigma} = 0,1 \cdot L_{\text{ОВ}} \quad (2.28)$$

$$L_{\sigma} = 0,1 \cdot 7,46 = 0,746 \text{ мГн}$$

Тогда общая индуктивность по формуле (2.29) системы составит:

$$L_{\text{В}} = 4 \cdot (L_{\text{ОВ}} + L_{\sigma}) \quad (2.29)$$

$$L_{\text{В}} = 4 \cdot (7,46 + 0,746) = 32,82 \text{ мГн}$$

Полное активное сопротивление  $R=15,12+4 \cdot 0,049+4 \cdot 0,0965 + 4 \cdot 0,0143 = 15,76 \text{ Ом}$ .

Общую индуктивность якорей тяговых машин определим по формуле (2.30) ( $\beta=0,25$  поскольку тяговая машина имеет компенсационную обмотку,  $U_{\text{я}}=0,95 \cdot U_{\text{ДВ}}=28,92 \text{ В}$ ):

$$L_{\text{я}} = 4 \cdot \beta \cdot \frac{U_{\text{я}}}{I_{\text{я}} \cdot p \cdot w} \quad (2.30)$$

$$L_{\text{я}} = 4 \cdot 0,25 \cdot \frac{28,92}{190,36 \cdot 2 \cdot 2,62} = 29 \text{ мГн}$$

Дифференциальное уравнение переходного процесса выразим формулой (2.31):

$$L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot R = U \quad (2.31)$$

Решим его классическим методом, представив решение суммой установившейся и преходящей составляющих по формуле (2.32):

$$i(t) = i_{\text{уст}} + i_{\text{прех}}(t) = i_{\text{уст}} + A \cdot e^{p \cdot t} \quad (2.32)$$

Установившаяся составляющая была рассчитана ранее  $i_{\text{уст}} = 190,36 \text{ А}$ .

Составим уравнение для сопротивлений (2.33), заменив их величины на изображения, при условии  $Z_{\text{вх}}(p)=0$ :

$$R + p \cdot (L_{\text{В}} + L_{\text{я}}) = 0 \quad (2.33)$$

Определим составляющую  $p$ , зависящую от соотношений параметров электрического контура:

$$p = \frac{-R}{(L_B + L_A)}$$

$$p = \frac{-15,76}{(32,82 + 29) \cdot 10^{-3}} = -254,93 \text{ с}^{-1}$$

Подставим найденные величины в решение дифференциального уравнения:

$$i(t) = 190,36 + A \cdot e^{-254,93 \cdot t}$$

Отсюда найдем постоянную  $A$ , подставив независимые начальные условия  $i(0)=0$  (ток не меняется скачком):

$$190,36 + A \cdot e^0 = 0$$

$$A = -190,36$$

Представим найденное решение:

$$i(t) = 190,36 - 190,36 \cdot e^{-254,93 \cdot t}$$

Представим график переходного процесса  $i(t)$  (рис. 2.5):

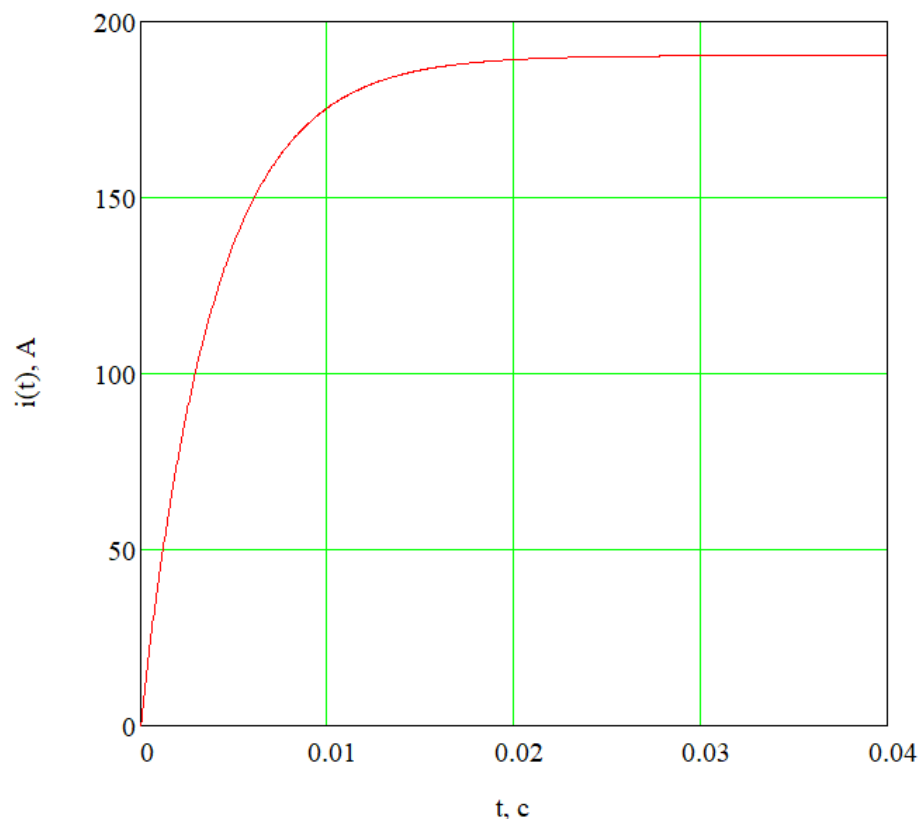


Рис. 2.5. Переходной процесс при пуске.

Из графика видно, что установившийся ток 190,36 А достигается примерно за 30 мс, соответственно влиянием переходного процесса на

пусковое ускорение и пусковую силу можно пренебречь.

## **2.2 Расчет тяги при ослаблении возбуждения.**

### **2.2.1 Выбор ступени ослабления возбуждения.**

При осуществлении шунтирования обмотки возбуждения с помощью контактора снижается ток возбуждения. Степень уменьшения его зависит от соотношений между активным сопротивлением обмотки возбуждения  $r_B$  в тяговом двигателе и шунтирующим сопротивлением  $R_{ш}$ . Можно использовать в качестве шунтирования несколько цепей с различными резисторами или же реостат, благодаря регулированию которого можно получить несколько ступеней скорости.

Ранее, в режиме тяги с маневровой ступенью пускового реостата использовалось полное возбуждение тяговых двигателей (100%), при котором ток якоря был равен току возбуждения. Теперь эти токи будут различаться. Выберем степень ослабления возбуждения из имеющихся у ЭД4М (Приложение 2). Выберем крайний случай, т.е. глубокое ослабление возбуждения, составляющее 18,5%, с целью выявить максимально возможное уменьшение пускового ускорения, определив тем самым границу применения ослабления возбуждения для маневровых перемещений.

Изменение МДС при ослаблении возбуждения характеризует коэффициент регулирования возбуждения  $\beta$ . Это отношение новой МДС, созданной током возбуждения к МДС, которая создана током якоря, равным току возбуждения. В данном случае  $\beta = 0,185$ .

Данный коэффициент можно выразить через отношение тока якоря к току возбуждения по формуле (2.34) [10]:

$$\beta = \frac{I_B}{I_A} = \frac{R_{ш} + R_{иш}}{R_{ш} + R_{иш} + r_B} \quad (2.34)$$

Отсюда найдем  $R_{ш}$ :



$$R_{ш} = \frac{0,185 \cdot (0,045 + 0,386) - 0,045}{1 - 0,185} = 0,042 \text{ Ом}$$

Цепь содержит  $r_b=0,386$  Ом – полное активное сопротивление всех обмоток возбуждения тяговых двигателей, включенных последовательно,  $R_{иш} = 0,045$  Ом – активное сопротивление индуктивного шунта и  $R_{ш}=0,042$  Ом – активное сопротивление шунтирующего резистора последней ступени ослабления возбуждения.

При шунтировании данным сопротивлением, общее сопротивление параллельных ветвей уменьшится, в соответствии с этим увеличится ток якоря, который можно определить по закону Ома (2.35):

$$I' = \frac{U}{R_M + 4 \cdot (R_{я} + R_{д.п.}) + \frac{(R_{ш} + R_{иш}) \cdot r_B}{R_{ш} + R_{иш} + r_B}} \quad (2.35)$$

$$I' = \frac{3000}{15,12 + 4 \cdot (0,049 + 0,0143) + \frac{(0,042 + 0,045) \cdot 0,386}{0,042 + 0,045 + 0,386}} = 194,25 \text{ А}$$

### **2.2.2 Расчет переходного процесса при ослабленном возбуждении.**

Рассмотрим течение переходного процесса, который будет отличаться от рассмотренного ранее в силу изменения конфигурации электрической схемы. К источнику напряжения последовательно включен резистор  $R_1=15,373$  Ом – активное сопротивление маневровой ступени пускового реостата, обмоток якорей и дополнительных полюсов тяговых двигателей, к нему последовательно подключены две ветви, параллельные между собой. В одной из них  $R_2=0,386$  Ом - активное сопротивление обмоток возбуждения и их индуктивность  $L_b$ . В другой ветви  $R_3=0,087$  Ом – активное сопротивление шунтирующего резистора и индуктивного шунта (из технических данных 0,045 Ом), и индуктивный шунт ИШ, с индуктивностью  $L_{иш}$ , который необходим при пуске [1]. Без его наличия большой ток начнет протекать по

шунтирующим резисторам в обход обмотки возбуждения, поскольку она обладает большой индуктивностью, в связи с этим ток потечет по пути наименьшего сопротивления. Поэтому во избежание такого процесса необходим ИШ, обладающий большой индуктивностью, подключенный последовательно шунтирующим резисторам.

Из технических данных 1ШИ.001 известно, что  $L_{\text{иш}}=120$  мГн при номинальном токе 165 А. Ток, протекающий через шунт, составляет  $194,25-35,93=158,32$  А. Зависимость индуктивности ИШ от тока в шунтирующей цепи (Приложение 6) [1]. Зная эту зависимость, найдем среднее значение индуктивности за пуск, т.е.  $L_{\text{иш}}=(145-125)/2=135$  мГн.

По нагрузочной характеристике определим приращение  $(E/n)'$  соответствующее приращению  $I_B'$  (Приложение 3).

Определим изменение магнитного потока по выражению (2.26):

$$\Delta\Phi' = \frac{\Delta(5,2/17,229)}{201,27} = 1,49 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

Определим индуктивность обмотки возбуждения по выражению (2.27):

$$L_{\text{об}}' = 4 \cdot 1,2 \cdot 58 \cdot \frac{1,49 \cdot 10^{-3}}{36,1} = 11,55 \text{ мГн}$$

Индуктивность рассеяния по выражению (2.28):

$$L_{\sigma}' = 0,1 \cdot 11,55 = 1,155 \text{ мГн}$$

Тогда общая индуктивность по выражению (2.29) системы составит:

$$L_B' = 4 \cdot (11,55 + 1,155) = 50,82 \text{ мГн}$$

Общая индуктивность якорей по выражению (2.30):

$$L_{\text{я}}' = 4 \cdot 0,25 \cdot \frac{14,95}{194,25 \cdot 2 \cdot 2,62} = 14,7 \text{ мГн}$$

Найдем  $p$  из уравнения (2.36), описывающего  $Z_{\text{вх}}(p)=0$ :

$$p \cdot L_{\text{я}}' + R_1 + \frac{(R_2 + p \cdot L_B') \cdot (R_3 + p \cdot L_{\text{иш}})}{R_2 + R_3 + p \cdot L_{\text{иш}} + p \cdot L_B'} = 0 \quad (2.36)$$

ОДЗ:

$$R_2 + R_3 + p \cdot L_{\text{иш}} + p \cdot L_B' \neq 0$$

$$p \neq \frac{-R_2 - R_3}{L_{\text{иш}} + L_B'}$$

$$p \neq \frac{-0,386 - 0,087}{(135 + 50,82) \cdot 10^{-3}} = -2,545 \text{ c}^{-1}$$

Найдем решение:

$$p_1 = -301,9 \text{ c}^{-1}$$

$$p_2 = -2,545 \text{ c}^{-1}$$

Корень характеристического уравнения  $p_2$  не входит в ОДЗ, соответственно исключается из рассмотрения.

Решение дифференциального уравнения (2.37) в классическом виде:

$$i_{\text{я}}(t) = i_{\text{уст}} + i_{\text{прех}}(t) = i_{\text{уст}} + A_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} \quad (2.37)$$

Установившаяся составляющая тока якоря была рассчитана ранее и составляет 194,25 А. Подставим найденные значения в дифференциальное уравнение и получим:

$$i_{\text{я}}(t) = i_{\text{уст}} + i_{\text{прех}}(t) = 194,25 + A_1 \cdot e^{p_1 \cdot t}$$

Подставив в уравнение начальные условия  $i_{\text{я}}(0)=0$ :

$$194,25 + A_1 = 0$$

Представим найденное решение:

$$i_{\text{я}}(t) = 194,25 - 194,25 \cdot e^{-301,9 \cdot t}$$

Найдем изображение тока якоря, применив преобразование Лапласа, формула (2.38):

$$I_{\text{я}}(p) = \left( \frac{194,25}{p} - \frac{1}{p + 301,9} \right) \quad (2.38)$$

Найдем временную зависимость тока возбуждения. Для этого найдем его изображение  $I_{\text{в}}(p)$ , воспользовавшись формулой разброса (2.39), учитывающей индуктивности в цепи:

$$I_B(p) = I_A(p) \cdot \left( \frac{R_3 + p \cdot L_{\text{иш}}}{R_3 + p \cdot L_{\text{иш}} + R_2 + p \cdot L_B} \right) \quad (2.39)$$

$$I_B(p) = \left( \frac{194,25}{p} - \frac{1}{p + 301,9} \right) \cdot \left( \frac{0,087 + p \cdot 0,135}{0,087 + p \cdot 0,135 + 0,386 + p \cdot 0,05082} \right)$$

С помощью математического пакета Mathcad найдем временную зависимость тока возбуждения, применив обратное преобразование Лапласа, формула (2.40):

$$i_B(t) = 35,73 + 106,3 \cdot e^{-2,545 \cdot t} - 142 \cdot e^{-301,9 \cdot t} \quad (2.40)$$

Тогда найдем по 1ому закону Кирхгофа временную зависимость тока, протекающего в шунтирующей цепи, формула (2.41):

$$i_{\text{ш}}(t) = i_A(t) - i_B(t) \quad (2.41)$$

$$i_{\text{ш}}(t) = 158,52 - 106,3 \cdot e^{-2,545 \cdot t} - 52,25 \cdot e^{-301,9 \cdot t}$$

Изобразим течение переходного процесса (рис. 2.6):

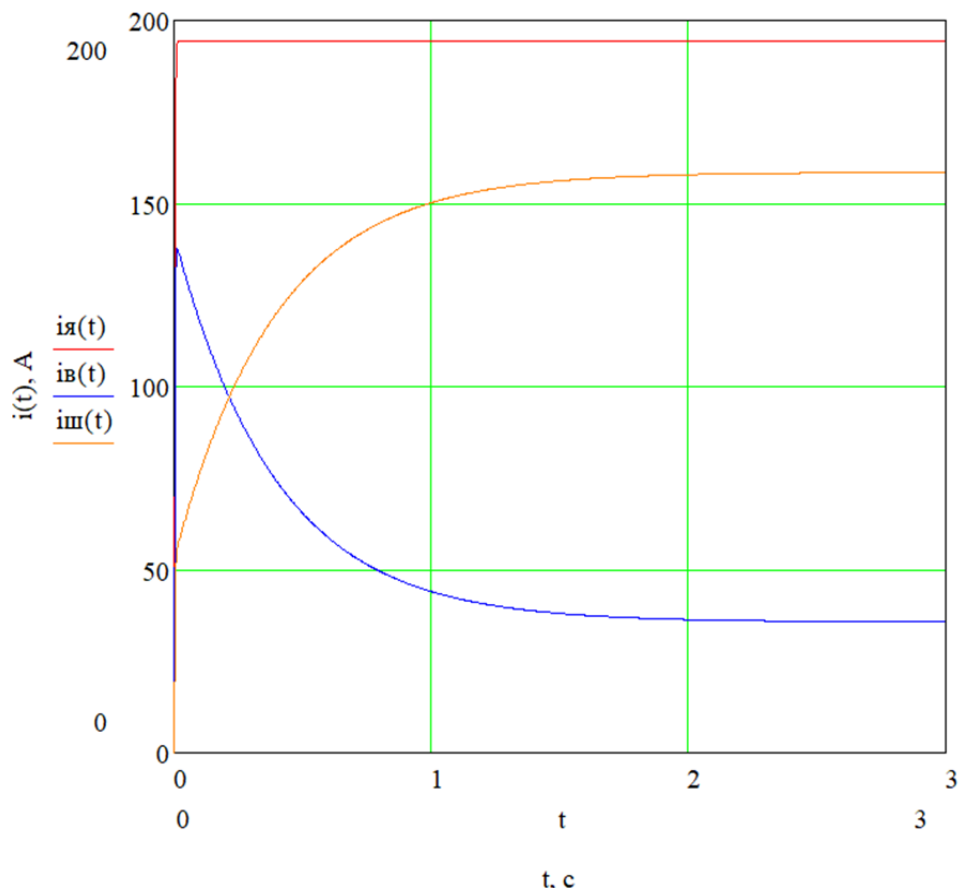


Рис. 2.6. Переходной процесс при пуске.

Из графика видно, что переходной процесс длится примерно 2,5 с для тока возбуждения и тока в шунтирующей ветви. За это время вал двигателя начинает вращение. Переходной процесс значительно сказывается на пусковом ускорении. Ток возбуждения имеет максимум в начальный момент времени, поэтому в начале ускорение велико, но затем резко снижается, поскольку ток возбуждения уменьшается до установившегося значения. Собранный для этого режима силовая схема характеризуется большой индуктивностью и активным сопротивлением, что обеспечивает длинный переходной процесс. При этом необходимо учитывать, что изначально применение ИШ при пуске не было предусмотрено для силовых схем данного электропоезда.

Проведем моделирование переходного процесса в MATLAB, для проверки расчета (рис. 2.7):

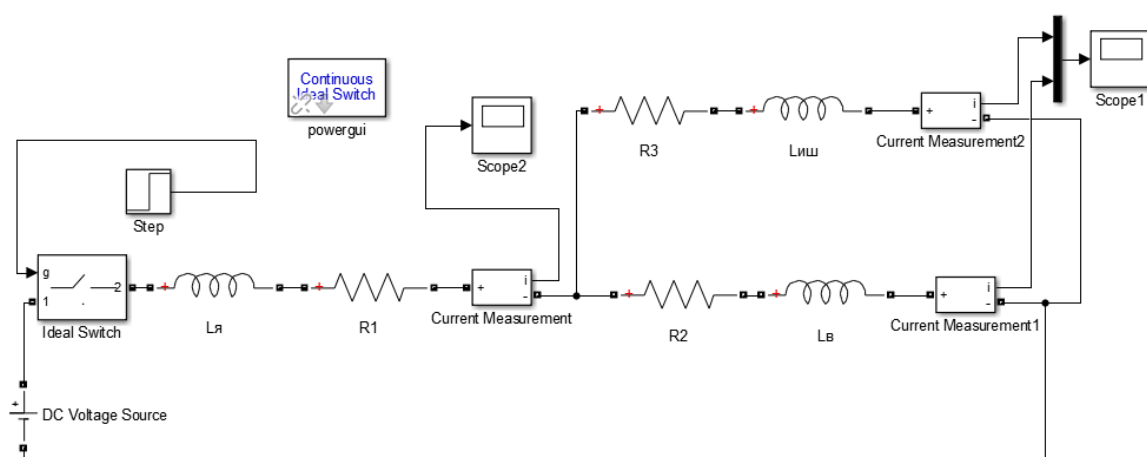


Рис. 2.7. Схема замещения тяговых двигателей с маневровой ступенью пускового реостата.

Получим кривую изменения тока якоря (рис. 2.8):

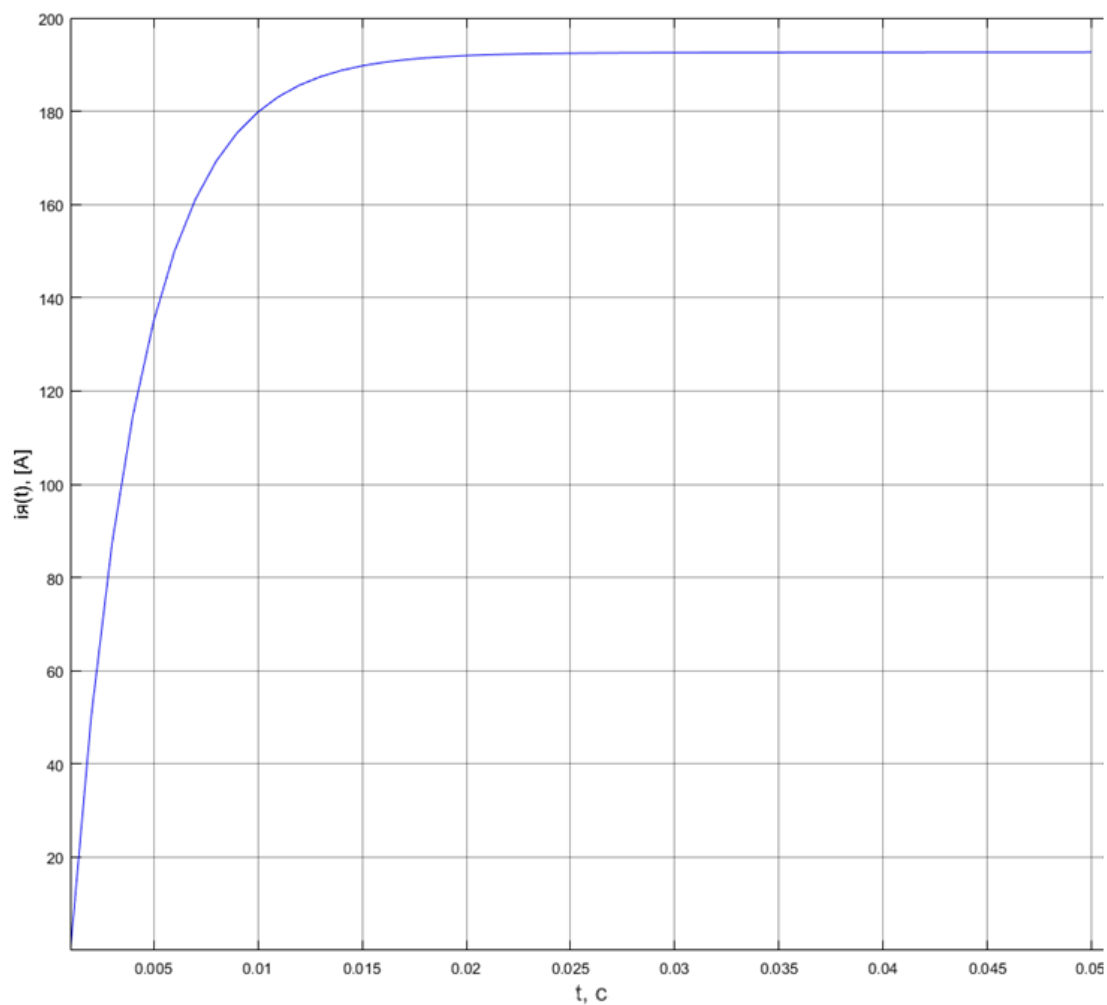


Рис. 2.8. Переходной процесс в цепи якоря.

Получим кривые изменения тока в цепи возбуждения и шунтирующей ветви (рис. 2.9):

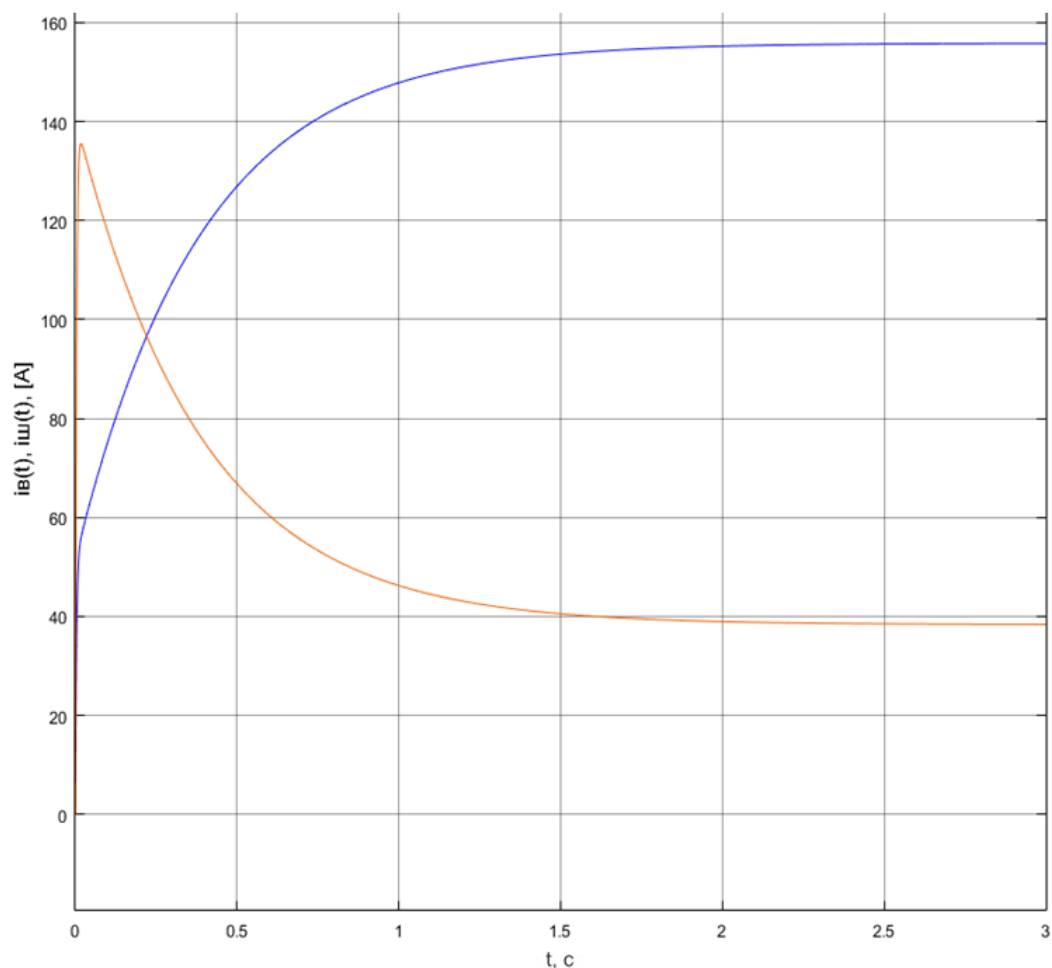


Рис. 2.9. Переходной процесс в цепи возбуждения (красная кривая) и в шунтирующей ветви (синяя кривая).

### 2.2.3 Расчеты тяговых характеристик при ослабленном возбуждении.

Скорость движения электропоезда определяется по формуле (2.42):

$$V' = \frac{U - I' \cdot \left( R_M + 4 \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д.п.}}) + \frac{(R_{\text{ш}} + R_{\text{иш}}) \cdot r_{\text{в}}}{R_{\text{ш}} + R_{\text{иш}} + r_{\text{в}}} \right)}{4 \cdot C \cdot \Phi'} \quad (2.42)$$

Найдем пусковую силу тяги от всех тяговых двигателей в подвижном составе, приведенную к ободу колеса при ослаблении возбуждения, по-прежнему учитывая потери в стали, в зубчатой передаче и механические потери в движущихся частях, а также учитывая переходной процесс в обмотке возбуждения по формуле (2.43):

$$F' = 20 \cdot \left( 3,6 \cdot C \cdot \Phi' \cdot I' - 3,6 \cdot \frac{\Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{зп}}}{V} \right) \quad (2.43)$$

$$F' = 20 \cdot \left( 3,6 \cdot 15,1 \cdot 194,25 - 3,6 \cdot \frac{0,013}{5 \cdot 10^{-5}} \right) = 192468,6 \text{ Н}$$

Силы сопротивления движению находится аналогично рассмотренному ранее режиму (см. табл. 4).

Сила сцепления колеса с рельсом зависит от нагрузки подвижного состава, соответственно также остается прежней для данного случая.

Результирующая сила при пуске, таким образом, по формуле (2.44) составит:

$$F'_{\text{рез}} = F' - W_0 \quad (2.44)$$

$$F'_{\text{рез}} = 192468,6 - 6378 = 186090,6 \text{ Н}$$

Определим пусковое ускорение при маневровых перемещениях по депо, мойке по формуле (2.45):

$$a'_{0} = \frac{F'_{\text{рез}}}{m \cdot (1 + \gamma)} \quad (2.45)$$

$$a'_{0} = \frac{186090,6}{558500 \cdot (1 + 0,07)} = 0,31 \text{ м/с}^2$$

Пусковое ускорение при ослабленном возбуждении  $a'_{0}$  меньше, чем пусковое ускорение при полном поле возбуждения  $a_{0}$ , даже не смотря на нежелательное действие переходного процесса в обмотке возбуждения. Найдем относительное уменьшение пускового ускорения по сравнению с применением полного возбуждения по формуле (2.46):

$$1 - \frac{a'_{0}}{a_{0}} = 1 - \frac{0,31}{0,354} = 12,4 \% \quad (2.46)$$

Однако, в данном случае важнее оценивать установившееся ускорение после переходного процесса, поскольку оно в дальнейшем играет ключевую роль при разгоне.

Для того, чтобы оценить установившееся ускорение найдем



установившуюся силу тяги по формуле (2.42):

$$F' = 20 \cdot \left( 3,6 \cdot 5,3 \cdot 194,25 - 3,6 \cdot \frac{0,065}{4 \cdot 10^{-4}} \right) = 62426 \text{ Н}$$

Тогда результирующая сила по формуле (2.43):

$$F'_{\text{рез}} = 62426 - 6378 = 56048 \text{ Н}$$

Установившееся ускорение (когда переходной процесс закончен) при движении по депо или мойке определим по формуле (2.44):

$$a'_{0} = \frac{56048}{558500 \cdot (1 + 0,07)} = 0,094 \text{ м/с}^2$$

А при заезде в тупик станции установившееся ускорение определим по формуле (2.44):

$$a'_{0} = \frac{56048}{(558500 + 80500) \cdot (1 + 0,07)} = 0,082 \text{ м/с}^2$$

Определим во сколько раз ускорение меньше при ослабленном возбуждении по сравнению ускорением при применении полного возбуждения по формуле (2.47):

$$k = \frac{a}{a'} \quad (2.47)$$

$$k = \frac{0,354}{0,094} = 3,8$$

Таким образом, выбрав глубокую ступень ослабления возбуждения 18,5 %, можно добиться уменьшения ускорения почти в 4 раза. Это максимально возможное уменьшение ускорения и пусковой силы тяги в данном случае. Если выбирать промежуточные ступени ослабления возбуждения, то возможно уменьшение пускового ускорения в 2-3 раза.

Построим электромеханические характеристики  $F'(I)$  и  $F(I)$  на обode колеса в одних осях (рис. 2.10), с помощью математического пакета Mathcad, учитывая, что с изменением  $I'_я$  изменяются потери в ТМ, также и СФ'. Результаты расчета сведем в табл. 3:

Таблица 3.

$I'_{я}, A$	194,25	194,25	192,9	190,3	187,75	182,8	175,6	169,9	164,45
$I'_{в}, A$	137,7	35,94	35,69	35,2	34,73	33,82	32,49	31,43	30,42
$C\Phi',$ $\frac{В\cdotч}{км}$	15,1	5,3	5,2	5,1	5	4,85	4,75	4,7	4,65
$\Delta P_{ст} +$ $\Delta P_{м},$ Вт	0,013	0,065	5	170	280	400	560	730	890
$\Delta P_{эл},$ Вт	0	0	140	213	272,4	400	575,4	732,5	886,7
$F', H$	9650	3121,3	3089	3034	2982	2872	2730,3	2611,5	2497
$V',$ км/ч	$5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$	1	3	5	9	15	20	25

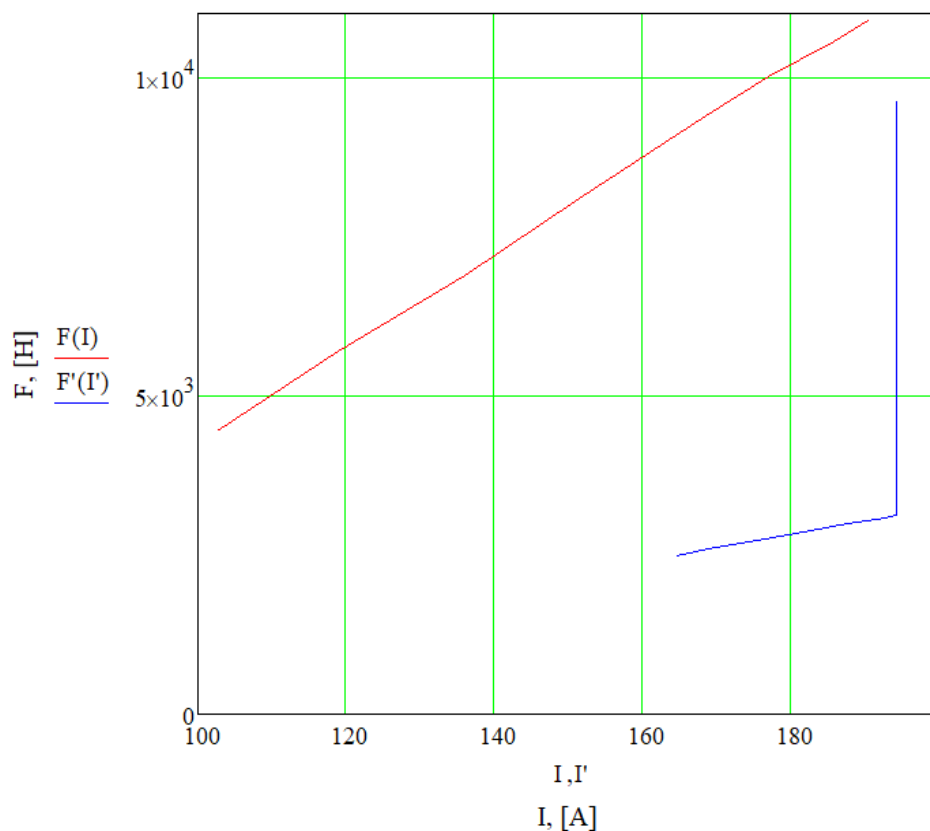


Рис. 2.10. Электромеханические характеристики на ободу колеса, при различном возбуждении ТЭД (красная – полное возбуждение, синяя-ослабленное возбуждение).

На характеристике ослабленного возбуждения ТЭД присутствует резкое падение силы тяги, поскольку в начале переходного процесса ток возбуждения велик, и составляет 137,7 А, из-за чего  $C\Phi=15,1$ . Но, т.к. ток возбуждения резко снижается по экспоненциальной зависимости, сила тяги также снижается, и далее, после переходного процесса ускорение уменьшается незначительно. Также, в данном случае, с ростом скорости приращение силы тяги значительно меньше, чем при полном поле возбуждения.

Также построим скоростные характеристики  $V'(I')$  и  $V(I)$  (рис. 2.11):

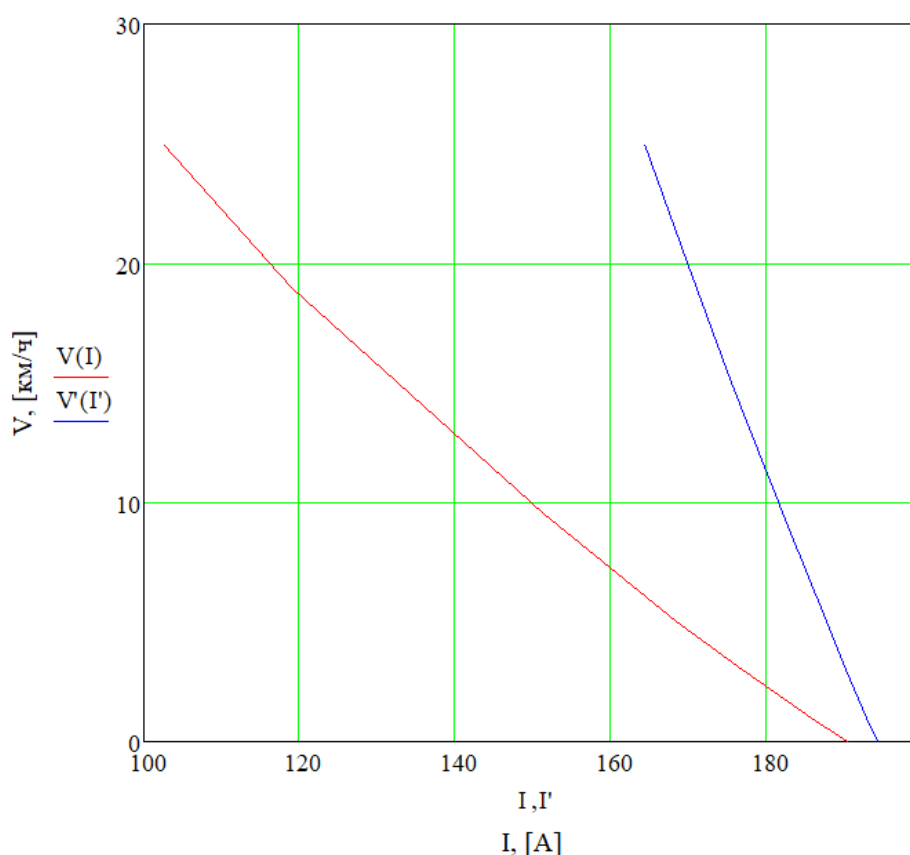


Рис. 2.11. Скоростные характеристики (красная – полное возбуждение, синяя- ослабленное возбуждение).

Таким образом, при ослабленном возбуждении уменьшается диапазон токов якоря.

Результирующая сила тяги электропоезда получается за вычетом силы сопротивления движению из силы тяги двигателей по формуле (2.48):

$$F'_{\text{рез}} = F' - W_0 \quad (2.48)$$

Результаты расчета сил тяги электропоезда, сопротивления движению и результирующей силы сведем в табл. 4:

Таблица 4.

$F'$ , кН	192,5	62,43	61,78	60,69	59,64	57,43	54,61	52,23	49,94
$W'_0$ , кН	6,378	6,378	6,466	6,649	6,844	7,269	7,995	8,68	9,439
$F'_{рез}$ , кН	186,1	56,05	55,32	54,04	52,79	50,16	46,61	43,55	40,5
$V'$ , км/ч	$5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$	1	3	5	9	15	20	25

Построим тяговые характеристики: при полном  $F_{рез}(V)$  и при ослабленном возбуждении  $F_{рез}'(V)$  в одних осях (рис. 2.12), не нанося ограничение по сцеплению для удобства рассмотрения:

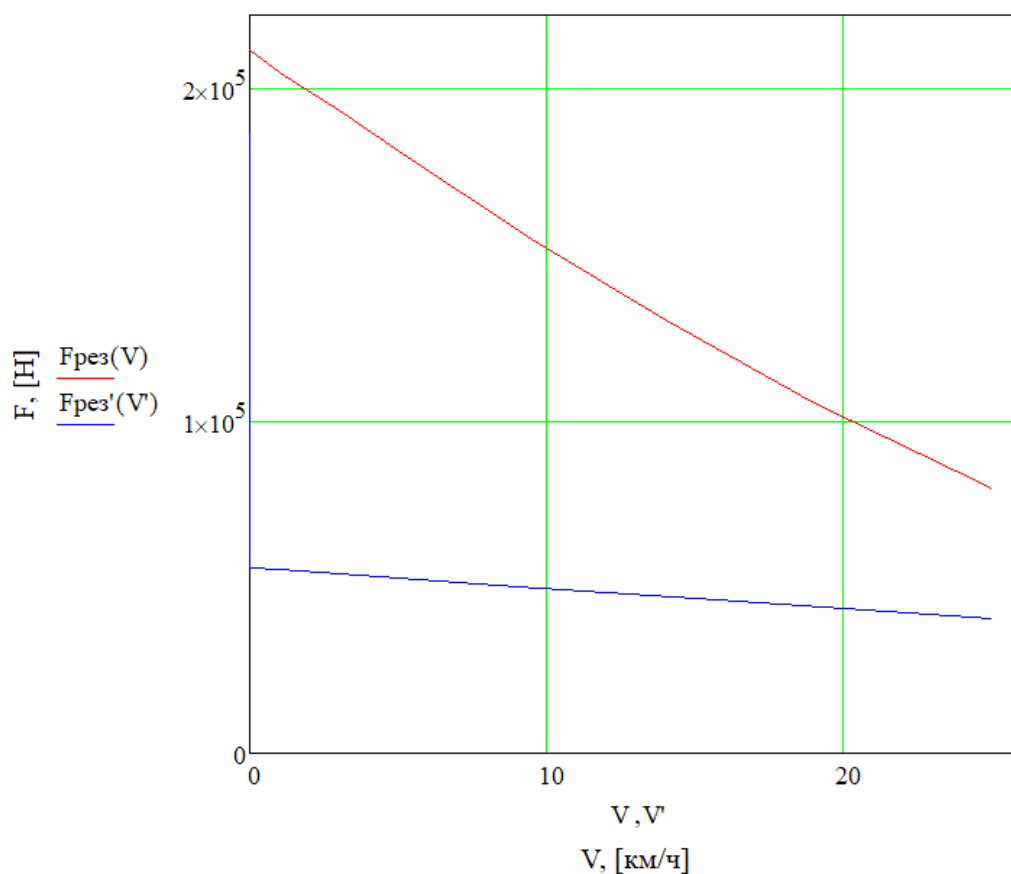


Рис. 2.12. Тяговые характеристики для всего ЭПС, при различном возбуждении ТЭД (красная – полное возбуждение, синяя- ослабленное возбуждение).

Таким образом, сравнивая тяговые характеристики при полном и

ослабленном возбуждении можно заметить, что с ростом скорости снижение силы тяги мало при ослабленном возбуждении, характеристика является более мягкой, чем при полном возбуждении тяговых двигателей.

#### **2.2.4 Сравнение кривых движения при полном и ослабленном возбуждении.**

Проанализируем как меняется скорость от времени в режиме тяги при ослабленном возбуждении, используя дифференциальное уравнение движения, соответствующее 2ому закону Ньютона.

Характеристика  $F'(V)$  помимо всего прочего зависит от  $C\Phi'$ , которое зависит главным образом от тока возбуждения. Здесь необходимо учитывать, что переходной процесс в обмотке возбуждения значительно влияет на пусковое ускорение, увеличивая его. Однако, в течение первых нескольких секунд оно резко снижается по экспоненциальной зависимости. Для того, чтобы проводить вычисления аналитически, необходимо линеаризовать опытную характеристику  $C\Phi'(I)$ . Учитывая изменение приращения функции на рассматриваемом интервале токов – от 164,45 до 194,25 А, а соответственно скоростей – от 0 до 25 км/ч, а по формуле (2.49) получим:

$$C\Phi'(t) = 17 - 25 \cdot e^{-0.0196 \cdot i_b(t)} \quad (2.49)$$

Потери силы тяги представим аналитической зависимостью от скорости (2.50):

$$\Delta F(V') = 68,69 + 100 \cdot e^{-0,18 \cdot V'} \quad (2.50)$$

Для наглядности сравнения движений при полном и ослабленном возбуждении изобразим обе характеристики в одних и тех же осях.

Подставим известные значения величин в дифференциальное уравнение. Расчет проведем в математическом пакете MATLAB. Для этого запишем код, с помощью которого уравнение решается численным методом:

Clear

```
[t1,V1]=ode45(@(t1,V1)1.2048*10^(-4)*((190.36-0.06345*V1*(17.7-0.158*V1))*(17.7-0.158*V1)-(170+180*2.71828^(-0.22*V1)))-  
(0.01067+0.0001436*(V1)+2.4478*10^(-6)*(V1)^2),[0 20],0,odeset('Stats','on'));
```

```
[t2,V2]=ode45(@(t2,V2)1.2048*10^(-4)*((194.25-0.06475*V2*(17-25*2.7128^(-0.0196*(35.73+106.035*2.71828^(-2.545*t2))))*(17-25*2.7128^(-0.0196*(35.73+106.035*2.71828^(-2.545*t2))))-(68.69+100*2.71828^(-0.18*V2)))-  
(0.01067+0.0001436*(V2)+2.4478*10^(-6)*(V2)^2),[0 20],0,odeset('Stats','on'));
```

```
plot(t1,V1)
```

```
hold on
```

```
plot(t2,V2)
```

Получим характеристики движения  $V(t)$  (рис. 2.13):

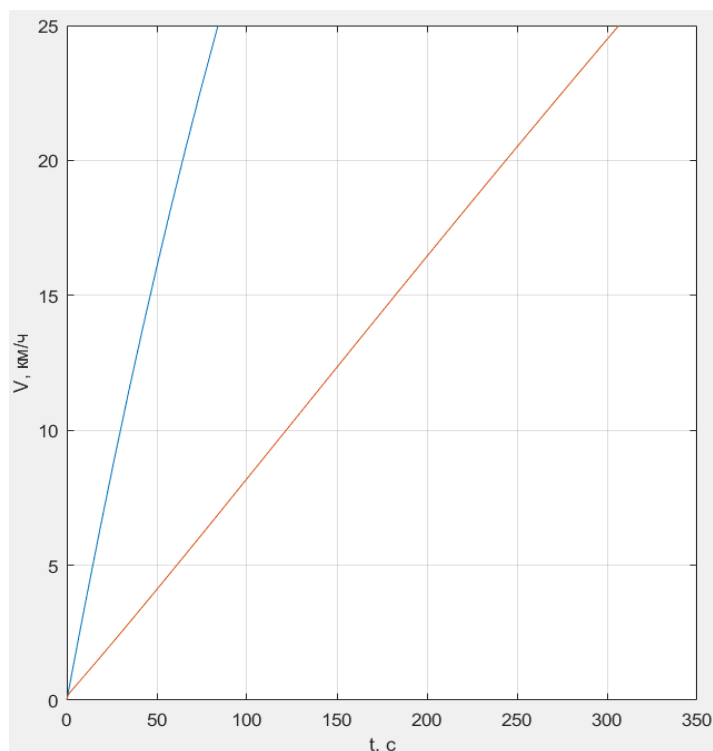


Рис. 2.13. Кривые движения при полном (синяя) и ослабленном возбуждении (красная).

Из сравнения кривых движения видно, что при полном возбуждении различные маневровые скорости достигаются за небольшое время, в связи с чем необходимо вовремя отключать тягу. Таким образом, совершается

многократная работа контакторной аппаратуры. Также видно, что при ослабленном возбуждении время разгона до выхода на те же самые маневровые скорости больше, соответственно увеличивается цикл времени тяга – выбег, и таким образом, уменьшается число срабатываний контакторной аппаратуры за все время маневровых перемещений. При движении с ослабленным возбуждением в начале ускорение велико, поскольку велика сила тяги (из-за максимума тока возбуждения при переходном процессе), но затем оно резко снижается до определенного значения, и в дальнейшем изменяется незначительно с течением времени.

При ослаблении возбуждения тяговых двигателей важным критерием нормальной работы является устойчивость коммутации, определяемая уровнем напряжения между коллекторными пластинами, при переходе щетки с пластины на пластину, то есть межламельным напряжением. При значениях 35-40 [В] возможно зажигание дуги, которая будет устойчиво гореть даже после дальнейшего снижения межламельного напряжения до 25 В. Возникшая дуга вызывает круговой огонь на коллекторе, что является недопустимым режимом работы. Все это является нежелательными последствиями усилившейся реакции якоря при ослаблении возбуждения.

Найдем максимальное напряжение на коллекторе при ослаблении возбуждения, которое соответствует наименьшему току якоря (при скорости движения 25 км/ч) по формуле (2.51):

$$U_k = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{м}}}{4} \quad (2.51)$$

$$U_k = \frac{3000 - 164,45 \cdot 15,12}{4} = 128,4 \text{ В}$$

Рассчитаем межламельное напряжение ( $n_{\text{л}}$  - число коллекторных пластин,  $\alpha$ - коэффициент перекрытия коллекторных пластин) по формуле (2.52) [9]:

$$e_m = \frac{2 \cdot p \cdot U_{kmax}}{n_d \cdot \alpha} \quad (2.52)$$

$$e_m = \frac{4 \cdot 128,4}{343 \cdot 0,67} = 2,23 \text{ В}$$

В данном случае видно, что межламельное напряжение гораздо меньше максимально допустимых значений (35-40 В), поскольку основная часть напряжения приходится на пусковые резисторы. Опасность возникновения дуги исключается. При коммутации также возникает реактивная ЭДС, состоящая из суммы ЭДС самоиндукции, возникающей при изменении тока в коммутируемой секции и ЭДС взаимной индукции соседних коммутируемых секций. Она препятствует изменению тока в коммутируемой секции, тем самым затрудняя коммутацию. Реактивная ЭДС примерно равна межламельному напряжению при низких скоростях вращения вала двигателя. Она ограничивается величиной 6-8 В. В соответствии с этим, в данном случае обеспечивается нормальная коммутация тяговых двигателей. Для маневровых перемещений данные напряжения не являются ограничивающим фактором.

### **Глава 3. Сравнение движения при полном и ослабленном возбуждении.**

#### **3.1 Расчет и анализ режимов движения.**

Длина состава ЭД4М, состоящего из 11 вагонов с учетом автосцепок, составляет 242,7 м. Известно, что электропоезд проходит помывочные работы в среднем за  $t_m=30$  мин с маневровой средней скоростью  $V_M=0,7$  км/ч. При маневровых перемещениях стремятся увеличить выбег, поддерживая заданное время движения. В связи с этим, в данном цикле движения принимается полное время выбега со снижением скорости движения до 0 км/ч. Таким образом, изначально обеспечивается минимальное число замыканий и размыканий контакторов и заданная средняя скорость движения. Максимальная скорость, развиваемая составом по истечению режима тяги, составляет 1,4 км/ч, что соответствует критерию – маневровые



скорости при движении через мойку не должны превышать 2 км/ч.

Полное перемещение (в метрах), которое совершает электропоезд складывается из длины самого состава и длины мойки, и находится по формуле (3.1):

$$S_M = V_M \cdot t_M \quad (3.1)$$

$$S_M = \frac{0,7}{3,6} \cdot 30 \cdot 60 = 350 \text{ м}$$

Подвижной состав совершает многократный цикл движения «тяга-выбег». Рассмотрим движение подвижного состава при выбеге ( $F_T=0$ ). Для этого воспользуемся формулой (2.22):

$$\frac{dV}{dt} \cdot m \cdot (1 + \gamma) = -W_0(V)$$

Подставим известные величины в дифференциальное уравнение и запишем код в MATLAB:

```
clear
[t,V]=ode45(@(t,V) -(0.0116+0.0001834*(V)+2.448*10^(-6)*(V)^2),[0
140],1.4,odeset('Stats','on'));
plot(t,V)
```

Получим кривую движения  $V(t)$  электропоезда при выбеге (рис. 3.1):

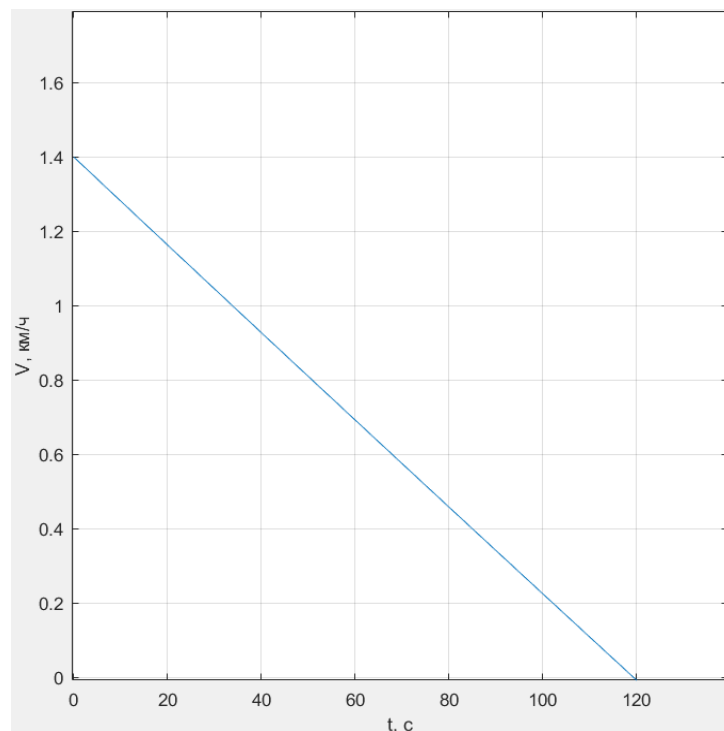


Рис. 3.1 Кривая движения  $V(t)$  при выбеге.

Рассмотрим движение при полном возбуждении тяговых двигателей. Временем включения и отключения контакторов ЛК и ЛКТ можно пренебречь, т.к. оно составляет миллисекунды. Определим время цикла по формуле (3.2):

$$t_{ц(пп)} = t_{раз(пп)} + t_{выбега} \quad (3.2)$$

$$t_{ц(пп)} = 3,9 + 120 = 123,9 \text{ с}$$

Найдем количество циклов движения, совершенных на протяжении всего времени маневрового движения при полном возбуждении по формуле (3.3):

$$n_{ц(пп)} = \frac{t_M}{t_{ц(пп)}} \quad (3.3)$$

$$n_{ц(пп)} = \frac{1800}{123,9} = 14,53 \approx 15$$

Поскольку в цикле происходит включение и отключение режима тяги, следовательно количество замыканий и размыканий контакторов по формуле (3.4) составит:

$$n_{зм/раз} = 2 \cdot n_{ц(пп)} \quad (3.4)$$

$$n_{зм/раз} = 2 \cdot 15 = 30$$

У силовых контакторов ЛК и ЛКТ (1КП.005) быстрее всего изнашиваются главные контакты, по техническим данным [11] их коммутационная износостойкость составляет 25000 циклов (включения – отключения). Мы видим, что за одну мойку электропоезда данные контакторы изнашиваются примерно на  $30/25000=0,12$  % от полного износа. Эти контакторы являются ответственными элементами силовой цепи, они дороги и нуждаются в техническом обслуживании.

Определим время цикла при ослабленном возбуждении по формуле (3.5):

$$t_{ц(оп)} = t_{раз(оп)} + t_{выбега} \quad (3.5)$$

$$t_{ц(оп)} = 16,1 + 120 = 136,1 \text{ с}$$

Найдем количество циклов движения, совершенных на протяжении всего маневрового времени движения при ослабленном возбуждении по формуле (3.6):

$$n_{ц(оп)} = \frac{t_m}{t_{ц(оп)}} \quad (3.6)$$

$$n_{ц(оп)} = \frac{1800}{136,1} = 13$$

Количество замыканий и размыканий контакторов составит в данном случае составит по формуле (3.7):

$$n'_{зм/раз} = 2 \cdot n_{ц(пп)} \quad (3.7)$$

$$n'_{зм/раз} = 2 \cdot 13 = 26$$

Мы видим, что при использовании данной ступени ослабления возбуждения износ контакторов составляет  $26/25000=0,104\%$  от полного износа. Таким образом, используя данную систему, можно снизить полный износ контакторной аппаратуры на  $0,12-0,104=0,016\%$ .

Сравним изнашиваемость контакторной аппаратуры для обоих режимов движения. Для этого найдем относительный износ по формуле (3.8):

$$\alpha = 1 - \frac{n'_{зм/раз}}{n_{зм/раз}} \quad (3.8)$$

$$\alpha = 1 - \frac{26}{30} = 13,3\%$$

Таким образом, по отношению к обычному режиму движения через мойку (при полном возбуждении тяговых двигателей), используя ослабление возбуждения можно снизить износ контакторов на  $13,3\%$ , что увеличивает их срок работы.

### **3.2 Анализ нагревания электропривода и расчет мощности.**

Расчет нагревания выполняется с целью определения возможного

перегрева тягового электропривода (в частности, тяговых двигателей и резисторов ослабления возбуждения). В данном случае максимальный ток двигателя 194,25 А гораздо меньше часового, составляющего 350 А. Длительно-допустимый ток для шунтирующего резистора составляет 240 А, но максимальный ток по расчету составил 158,52 А, поэтому возможность перегрева в данном случае исключается. Существует ограничение маневровой работы по времени. Для езды через мойку она длится менее 5 минут (300 с) как для режима полного поля ТЭД, так и для ослабленного поля. Для заезда в тупик вокзала с ограничением по скорости 25 км/ч в режиме полного поля ТЭД, электропоезд движется 84 с, а при ослабленном поле 306 с, однако на практике до достижения данной скорости чаще всего выводят пуско-тормозные резисторы из цепи якорей, поэтому возможность перегрева исключается.

Рассчитаем максимальную мощность, выделяемую в блоке пуско-тормозных резисторов при полном поле ТЭД по формуле (3.9):

$$P = I_{\Pi}^2 \cdot R_{\text{м}} \quad (3.9)$$

$$P = 190,36^2 \cdot 15,12 = 547,9 \text{ кВт}$$

А при ослабленном поле максимальная мощность, выделяемая в пуско-тормозных резисторах по формуле (3.9), составит:

$$P' = 194,25^2 \cdot 15,12 = 570,5 \text{ кВт}$$

Максимальную мощность шунтирующего резистора для ослабления поля найдем по формуле (3.10):

$$P' = I'_{\Pi}{}^2 \cdot R_{\text{ш}} \quad (3.10)$$

$$P' = 158,52^2 \cdot 0,042 = 1055,4 \text{ Вт}$$

Найдем полную мощность, потребляемую электроприводом при полном поле по формуле (3.11):

$$P = U_{\text{к.с.}} \cdot I_{\Pi} \quad (3.11)$$

$$P = 3000 \cdot 190,36 = 571 \text{ кВт}$$

Также по формуле (3.11) найдем полную мощность, потребляемую

электроприводом при ослабленном поле:

$$P' = 3000 \cdot 194,25 = 582,8 \text{ кВт}$$

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

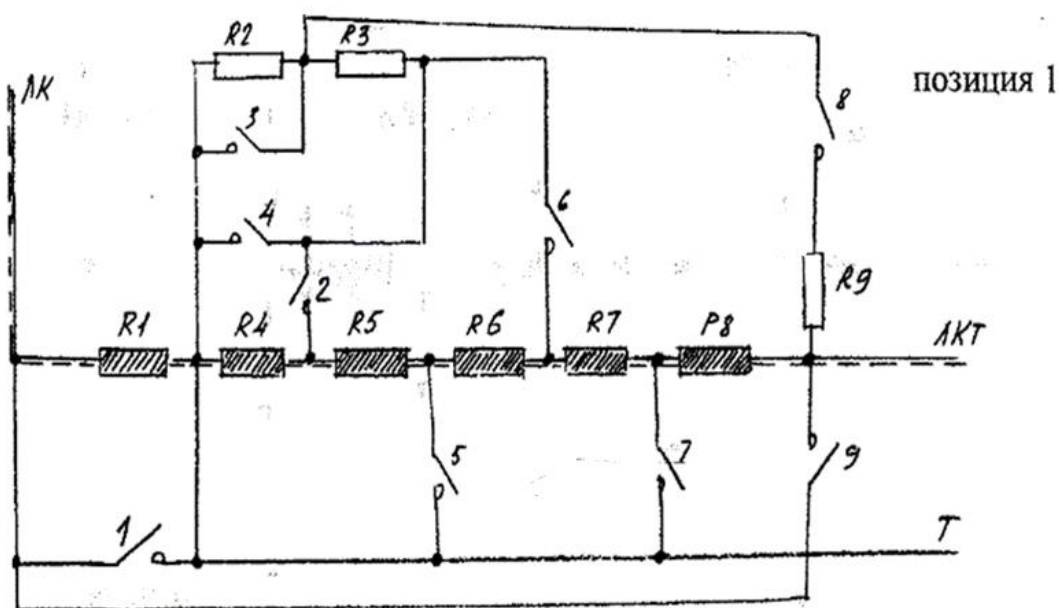
Таким образом, при выборе ступени с наибольшей степенью ослабления возбуждения можно добиться уменьшения пускового ускорения и пусковой силы тяги на 12,4%. Однако было установлено, что при движении в режиме тяги, через 2,5 с ускорение уменьшилось в 3,8 раза вследствие переходного процесса в цепи возбуждения тяговых двигателей, обусловленного их большой индуктивностью, а также индуктивностью ИШ. В дальнейшем ускорение уменьшалось незначительно. Рассмотренная ступень ослабления возбуждения подходит для разного рода маневровых перемещений. Мощность, потребляемая блоками резисторов при ослабленном поле, как и полная мощность электропривода в данном случае больше, чем при полном поле. Негативный эффект реакции якоря незначителен при столь малых скоростях движения. При езде через мойку, с применением рассмотренной ступени ослабления возбуждения можно достигнуть уменьшения числа срабатываний контакторной аппаратуры на 13,3 % по сравнению с ее работой при полном возбуждении тяговых двигателей, таким образом достигается уменьшение износа контакторной аппаратуры.

### **Список использованных источников.**

1. Электропоезда постоянного тока с электрическим торможением / Просвирина Б.К., М: Трансиздат, 2000 г;
2. Интернет ресурс:  
<http://emupages.ru/trains-ed4.htm>
3. Интернет ресурс:  
<https://railtrain.pro/yed4m>
4. Интернет ресурс:  
<https://present5.com/1-spisok-literatury-po-discipline-elektricheskie-zheleznye-dorogi/>
5. Интернет ресурс:  
<https://present5.com/lekciya-8-elektromagnitnye-mashiny-postoyannogo-toka-konstrukciya/>
6. Н.И. Щуров Щ 984 Теория электрической тяги: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 100 с.
7. Интернет ресурс:  
<http://scbist.com/xx2/42900-08-1999-rabochie-harakteristiki-tyagovyh-dvigateli-elektropoezdov-ed4m-print.html>
8. Интернет ресурс:  
[https://zinref.ru/000\\_uchebniki/05301\\_transport\\_jd\\_elektrovozi/006\\_00\\_00\\_Tyagovy\\_dvigatel\\_1DT003/000.htm](https://zinref.ru/000_uchebniki/05301_transport_jd_elektrovozi/006_00_00_Tyagovy_dvigatel_1DT003/000.htm)
9. Основы электрического транспорта: учебник для студ. высш. учеб. Заведений / М.А. Слепцова, Г.П. Долаберидзе, А.П. Прокопович, Т.И. Савина, В.Д. Тулупов; Под ред. М.А. Слепцова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006 г.
10. Теория Электрической тяги / Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н., Транспорт 1983 г.
11. Интернет ресурс:  
<https://studfile.net/preview/10048693/page:21/>

Приложения.

Приложение № 1



Замыкание контакторных элементов в моторном режиме и реостатном торможении

Позиции КМ	% ОП в мот. режиме	Сопротивление, Ом	Позиция РК	Контактные элементы, замыкаемые в моторном режиме и реостатном торможении с самовозбуждением до 11 позиции																
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
М	100	15,12	1																	
	"	9,97	2	●															●	●
	"	8,01	3	●	●														●	●
	"	6,84	4	●	●	●													●	●
	"	6,08	5	●	●	●	●												●	●
	"	5,97	6	●	●		●	●											●	●
	"	4,15	7	●				●	●										●	●
	"	3,35	8	●		●		●	●										●	●
	"	2,67	9	●		●	●	●	●										●	●
	"	2,07	10	●			●		●	●									●	●
	"	1,3	11	●					●	●									●	●
	"	0,79	12	●			●		●	●									●	●
	"	0,45	13	●		●	●		●	●									●	●
	"	0	14	●		●			●	●	●								●	●
2	59,2		15	●						●	●	●	●						●	●
	43,4		16	●							●	●	●	●					●	●
3	34,3		17	●								●	●	●					●	●
	28,1		18	●								●	●	●	●				●	●
4	22,9		19	●								●	●	●	●	●			●	●
	18,5		20									●	●	●	●	●	●		●	●



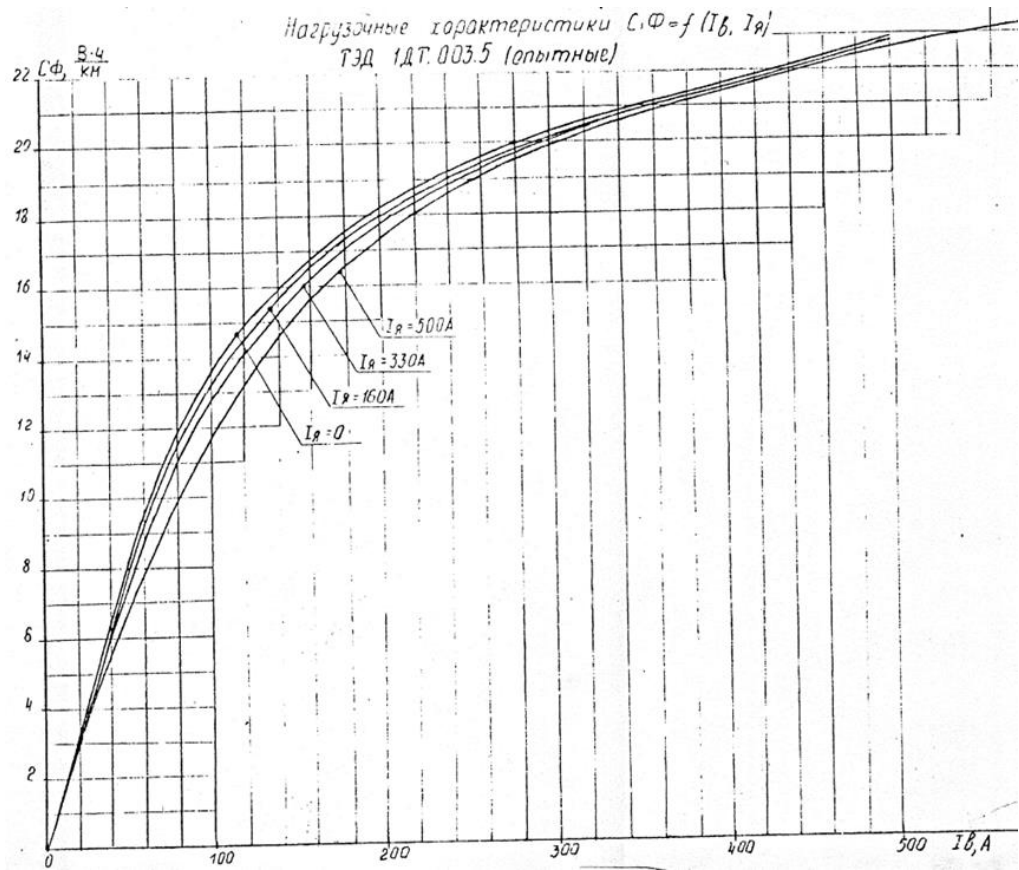
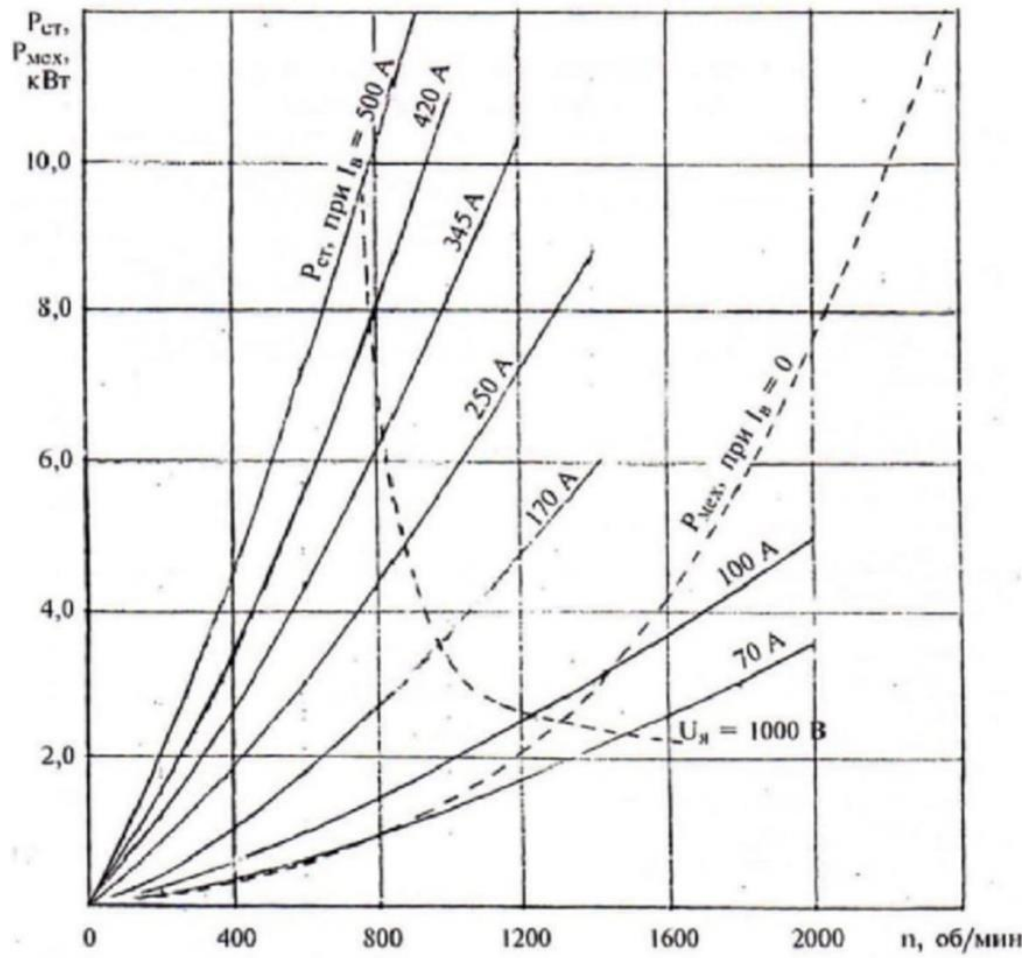


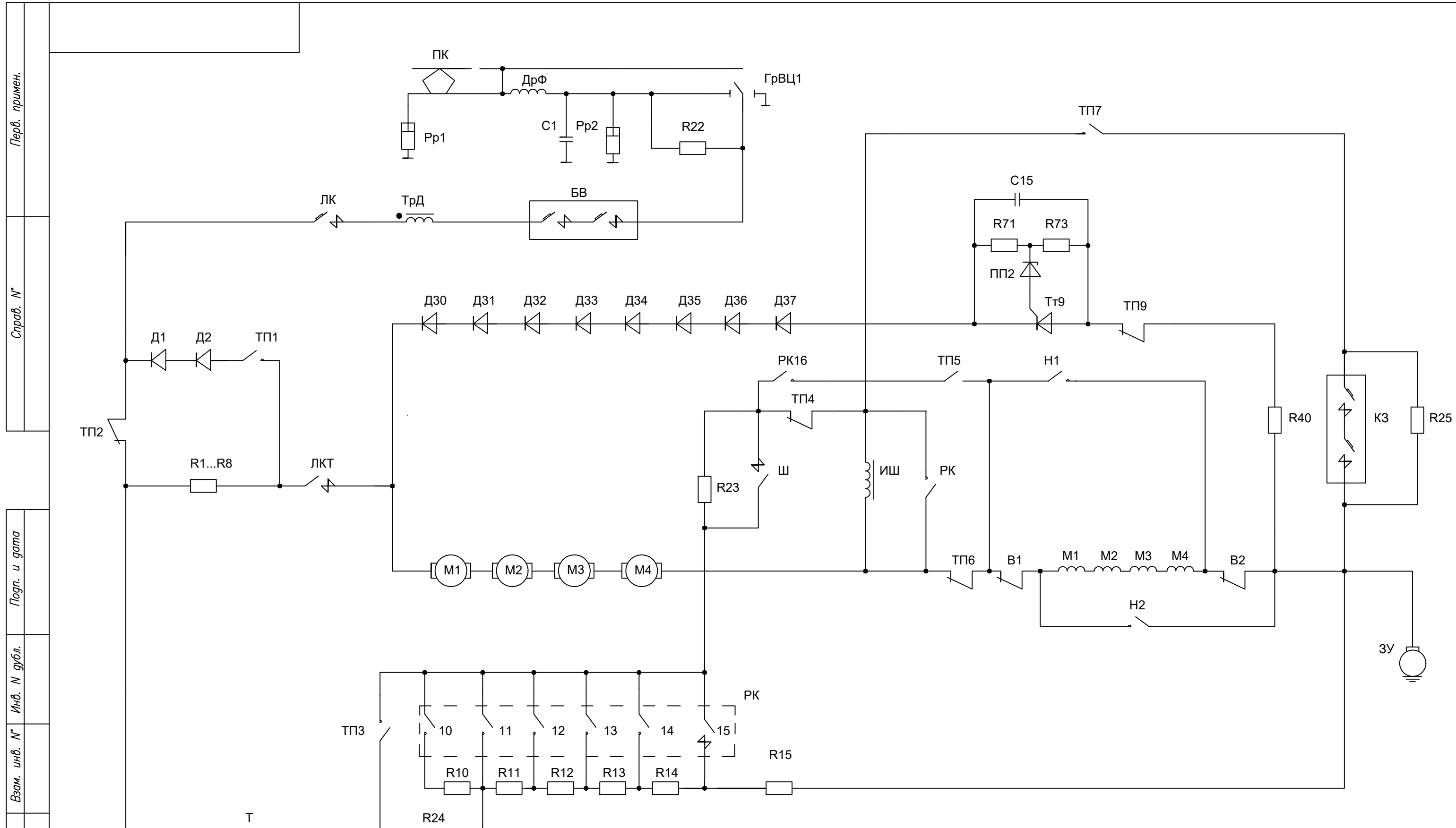
Таблица 1. Относительные потери мощности в механической передаче

Тип механической передачи	Относительные потери $\Delta p_3$ в механической передаче при относительных токах $I/I_q$ , %									
	200	150	125	100	75	60	50	40	30	25
Осевая одноступенчатая, зубчатая передача с карданным валом или муфтой	4.2	3.6	3.25	3.0	3.0	3.25	3.8	5.3	8.0	10.1
Двухступенчатая зубчатая передача с карданным валом или муфтой	6.5	6.3	6.1	6.0	6.1	6.4	6.9	7.5	10.0	11.5
Простая червячная передача с карданным валом и дифференциалом	18.5	15.4	14.0	12.4	11.4	12.5	14.9	20.2	30.0	37.0



## Технические данные шунта 1ШИ.001

Параметр	Величина
Номинальное напряжение, В	3000
Номинальный ток, А	165
Индуктивность, мГн	120 <sup>+12</sup>
при токе 200 А	75 <sup>+7,5</sup>
при токе 330 А	65 <sup>+6,5</sup>
Электрическое сопротивление, Ом	0,045
Сечение сердечника, см <sup>2</sup>	746
Марка стали	Ст3
Число катушек	3
Материал катушки	ЛММ 2,26x25



Перв. примен.  
Справ. №  
Погн. и дата  
Инв. № дубл.  
Взам. инв. №  
Погн. и дата  
Инв. № подл.

					МИФТ.ХХХ.ХХХХХХ			
Изм	Лист	№ докум.	Погн.	Дата	УПРОЩЕННАЯ СИЛОВАЯ СХЕМА РЕЖИМА ТЯГИ МОТОРНОГО ВАГОНА ЭД4М	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Смирнов А.М.	<i>Смирнов</i>	29.04	у		-	-	
Пров.	Рашек Ю.В.							
Т.контр.						Лист 1	Листов 1	
Н.контр.						Группа ЭЛ-05-17		
Утв.	Рашек Ю.В.							