



С. Я. ФРЕНКЕЛЬ, В. А. ЗАГОРЦЕВ

**ТЯГОВЫЕ РАСЧЁТЫ
для грузового поезда**

ISBN 978-985-891-254-3



9 789858 912543

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра локомотивов

С. Я. ФРЕНКЕЛЬ, В. А. ЗАГОРЦЕВ

ТЯГОВЫЕ РАСЧЁТЫ ДЛЯ ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА

Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию в области транспорта и транспортной деятельности для студентов специальности 6-05-0715-08 «Подвижной состав железнодорожного транспорта» по учебной дисциплине «Теория локомотивной тяги» и специальности 6-05-0715-10 «Технологии транспортных процессов» по учебной дисциплине «Локомотивы и тяга поездов» и учебно-методическим объединением по образованию в области энергетики и энергетического оборудования для студентов специальности 7-07-0712-01 «Электроэнергетика и электротехника» в качестве пособия

Гомель 2026

УДК 629.4.016.12(075.8)
ББК 39.15
Ф87

Рецензенты: профессор кафедры локомотивов и локомотивного хозяйства д-р техн. наук, профессор *В. В. Грачёв* (ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I»); кафедра тягового подвижного состава Российской открытой академии транспорта (заведующий кафедрой – д-р техн. наук, профессор *А. С. Космодамианский*)

Френкель, С. Я.

Ф87 Тяговые расчёты для грузового поезда : пособие / С. Я. Френкель, В. А. Загорцев ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2026. – 98 с.
ISBN 978-985-891-256-7

Изложены методы производства тяговых расчётов для грузового поезда применительно к тепловозной и электрической тяге. Приведены примеры решения задач.

Предназначено для студентов специальности 6-05-0715-08 «Подвижной состав железнодорожного транспорта», 7-07-0712-01 «Электроэнергетика и электротехника», 6-05-0715-10 «Технологии транспортных процессов» при изучении дисциплин «Теория локомотивной тяги» и «Локомотивы и тяга поездов». Может быть полезно магистрантам, слушателям института повышения квалификации и специалистам железнодорожного транспорта.

УДК 629.4.016.12(075.8)
ББК 39.15

ISBN 978-985-891-256-7

© Френкель С. Я., Загорцев В. А., 2026
© Оформление. БелГУТ, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Перечень условных обозначений и сокращений.....	4
Введение.....	8
Общие положения.....	9
1 Расчёт и проверка массы состава грузового поезда.....	10
2 Расчёт и построение диаграммы удельных равнодействующих сил	20
3 Подготовка профиля пути для выполнения тяговых расчётов	26
4 Решение тормозных задач.....	31
5 Расчёт времени хода поезда способом равновесных скоростей	40
6 Расчёт и построение кривой скорости движения поезда.....	44
7 Расчёт и построение кривой времени движения поезда.....	51
8 Расчёт расхода энергоресурсов на перемещение поезда.....	54
Заключение	60
Список литературы.....	61
Приложения	
А. Характеристики локомотивов и вагонов.....	62
Б. Расчётные выражения для вычисления основного удельного сопротивления движению.....	65
В. Тяговые характеристики локомотивов.....	67
Г. Токовые характеристики электровозов.....	86
Д. Расходные характеристики тепловозов.....	91
Е. Пример построения кривых скорости, времени, тока.....	вкл.

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

- A – полный расход электроэнергии на токоприёмнике, кВт·ч.
 A_d – расход электроэнергии в режиме тяги, кВт·ч.
 A_p – расход электроэнергии в режиме рекуперации, кВт·ч.
 a – удельный расход электроэнергии на токоприёмнике на 1 т·км (брутто), кВт·ч/(т·км).
 b_t – удельная тормозная сила поезда, Н/т.
 E – общий расход натурального топлива, кг.
 E_y – общий расход условного топлива, кг.
 e – расход натурального топлива на измеритель 10^4 т·км (брутто), кг/(10^4 т·км).
 e_y – расход условного топлива на измеритель 10^4 т·км (брутто), кг/(10^4 т·км).
 F_k – касательная сила тяги (на ободе движущих колёс) локомотива, кН.
 $F_{кр}$ – касательная сила тяги при расчётной скорости, кН.
 $F_{кр\ тр}$ – касательная сила тяги при трогании с места, кН.
 $F_{кч}$ – касательная сила тяги электровоза, соответствующая часовому току тяговых электродвигателей, кН.
 $F_{к\infty}$ – касательная сила тяги локомотива, соответствующая длительному току тяговых электродвигателей, кН.
 f_k – удельная касательная сила тяги (на 1 т массы поезда), Н/т.
 G – расход топлива дизелем тепловоза в режиме тяги, кг/мин.
 g – ускорение свободного падения, м/с².
 g_x – расход топлива дизелем тепловоза на холостом ходу, кг/мин.
 I – ток, А.
 I_d – выпрямленный ток электровоза переменного тока, приведённый к первичной обмотке трансформатора (для расчётов системы электроснабжения), А.
 I_{da} – действующее значение активного тока, потребляемого электровозом на тягу (для расчёта расхода электроэнергии), А.
 i – уклон (подъём или спуск); знак (+) ставится для подъёма, знак (–) ставится для спуска, ‰.
 i_p – расчётный подъём, ‰.
 i_k – приведённый уклон, т. е. с учётом влияния кривой, ‰.
 $i_{тр}$ – уклон участка пути, на котором происходит трогание поезда, ‰.
 i_c – уклон участка пути, спрямлённого в продольном профиле и плане, ‰.

i'_c – уклон участка пути, спрямлённого в профиле, ‰.
 i''_c – уклон участка пути, спрямлённого в плане, ‰.
 $i_{ск}$ – уклон пути для скоростного подъёма, ‰.
 i_p – уклон пути для расчётного подъёма, ‰.
 Δi – абсолютная разность между уклоном спрямлённого участка и уклоном любого элемента, входящего в спрямлённый участок, ‰.
 K – сила нажатия на одну тормозную колодку, кН.
 K_p – расчётная сила нажатия на одну тормозную колодку, кН.
 L – длина тягового участка, км.
 $l_{п}$ – длина поезда, м.
 l_c – длина состава, м.
 $l_{л}$ – длина локомотива, м.
 $l_{поп}$ – длина приёмоправочных путей, м.
 l_i – длина вагона данного типа по осям автосцепки, м.
 $m_{п}$ – число вагонов в пассажирском поезде, шт.
 n – частота вращения якоря тягового электродвигателя, об/мин.
 n_d – частота вращения коленчатого вала дизеля тепловоза, об/мин.
 P – расчётная масса локомотива, моторных вагонов, тепловозов и дизель-поездов при 2/3 запаса топлива и песка, т.
 $P_{сц}$ – сцепная масса локомотива (для тепловоза при 1/3 запаса топлива и песка), т.
 Q – масса состава (прицепных вагонов), т.
 $Q_{тр}$ – масса состава, рассчитанная по условиям трогания его локомотивом с места, т.
 q – масса одного вагона (брутто), т.
 q_o – масса, приходящаяся на ось колёсной пары, т.
 $R_{кр}$ – радиус кривой, м.
 $R_{кр i}$ – радиус кривой в пределах спрямлённого участка пути, м.
 S – расстояние, путь, длина элемента профиля, м.
 $S_{кр i}$ – длина кривой данного радиуса в пределах спрямляемого участка пути, м.
 $S_{кр}$ – длина кривого участка пути, м.
 S_c – длина спрямлённого участка профиля, м.
 S_d – действительный путь торможения, условная часть тормозного пути, которую проходит поезд при полном действии тормозов, м.
 $S_{п}$ – подготовительный тормозной путь, условная часть тормозного пути, которую проходит поезд за время подготовки тормозов к действию, м.

- S_T – тормозной путь поезда, расстояние, проходимое поездом за время от момента воздействия на приборы и устройства для управления тормозной системой до полной остановки, м.
- t – время, ч, мин, с.
- $t_{ст}$ – время стоянок, ч, мин.
- $t_{п}$ – время подготовки тормозов к действию (условное), с.
- t_x – время работы дизеля на холостом ходу, мин.
- Δt – интервал времени, мин, с.
- U_0 – номинальное напряжение на токоприёмнике электровоза, моторного вагона электропоезда, В.
- v – скорость движения, км/ч.
- v_0 – скорость поезда в начале торможения, км/ч.
- v_p – расчётная скорость, км/ч.
- w_i – дополнительное удельное сопротивление движению подвижного состава от уклона, Н/т.
- w'_0 – основное удельное сопротивление движению локомотива при движении в режиме тяги, Н/т.
- w''_0 – основное удельное сопротивление движению состава, Н/т.
- w_0 – основное удельное сопротивление движению поезда, Н/т.
- $w_{ох}$ – основное удельное сопротивление движению поезда при холостом ходе локомотива, Н/т.
- w_x – основное удельное сопротивление движению локомотива на холостом ходу, Н/т.
- $w_{тр}$ – удельное сопротивление движению состава при трогании с места (основное и дополнительное – суммарно), Н/т.
- w_r – дополнительное удельное сопротивление движению подвижного состава при движении по кривой, Н/т.
- w_c – дополнительное удельное сопротивление движению от спрямлённого профиля и плана пути, Н/т.
- α – центральный угол кривой участка пути, град.
- α_i – доля (по массе) состава, приходящаяся на данную группу однотипных вагонов.
- ζ – ускорение или замедление поезда при удельной силе 1 Н/т, (км/ч²)/(Н/т).
- ϑ – тормозной коэффициент поезда, кН/т.
- ϑ_p – расчётный тормозной коэффициент поезда, кН/т.
- μ – передаточное число зубчатой передачи на движущую ось.

φ_k – коэффициент трения тормозной колодки о колесо.

$\varphi_{кр}$ – расчётный коэффициент трения тормозной колодки о колесо.

ψ_k – расчётный коэффициент сцепления движущих колёс локомотива или моторного вагона с рельсами.

$\psi_{к кр}$ – расчётный коэффициент сцепления движущих колёс локомотива или моторного вагона с рельсами при движении его по кривым малого радиуса.

ЛЭП – линии электропередач.

НП – нормальное возбуждение – режим работы тяговых электродвигателей, при котором установлены их номинальные данные.

ОП1–ОП5 – ступени ослабления возбуждения тяговых электродвигателей.

П – параллельное соединение тяговых электродвигателей.

P_k – положение (позиция) контроллера машиниста.

ПП – полное возбуждение тяговых электродвигателей.

С – последовательное соединение тяговых электродвигателей.

СП – последовательно-параллельное соединение тяговых электродвигателей.

*На свете ни единому уму,
Имевшему учительскую прыть,
Глаза не удалось открыть тому,
Кто сам не собирался их открыть.
Игорь Губерман*

ВВЕДЕНИЕ

Целью выполнения тяговых расчётов являются определение массы состава, расчёт ограничений скорости движения поезда по тормозам или необходимой обеспеченности поезда тормозами, скорости и времени хода поезда по участку, расчёт расхода энергоресурсов на тягу поездов и др.

Большинство учебников и учебных пособий опираются на Правила тяговых расчётов 1985 г. В 2016 году в РАО «РЖД» утверждены новые Правила тяговых расчётов (ПТР), а на Белорусской железной дороге 11 ноября 2021 г. приказом главного инженера Белорусской железной дороги утверждены Методические указания по выполнению тяговых расчётов [1], в значительной степени согласующиеся с ПТР РАО «РЖД» [2].

Развитие вычислительной техники позволяет наряду с традиционными методами, опирающимися на графическое интегрирование уравнения движения поезда, широко применять современные персональные компьютеры. В настоящее время разработаны различные программные продукты (в том числе авторами), которые позволяют полностью автоматизировать тяговые расчёты. Однако при курсовом проектировании в процессе обучения будущих специалистов необходимо обеспечить не только приобретение навыков, но и понимание содержания тяговых расчётов. Поэтому программы для персональных компьютеров, описание которых приведено в пособии, облегчают процесс вычислений, но оставляют за обучающимся анализ результатов вычислений и принятие решений.

Данное пособие предназначено для изучения методов и практических приёмов выполнения тяговых расчётов при курсовом проектировании по дисциплинам «Теория локомотивной тяги» и «Локомотивы и тяга поездов», а также при переподготовке слушателей института повышения квалификации.

Авторы рассчитывают на то, что представляемое пособие поможет студентам осваивать науку о тяге поездов, одну из важнейших в их профессиональном образовании.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Точность расчётов. При тяговых расчётах принимать:

- расстояние для элементов профиля – в метрах, для перегонов – в километрах с одним знаком после запятой;
- уклоны – в промилле (‰) с одним знаком после запятой;
- силу тяги, сопротивления и тормозные силы – в килоньютонах с округлением до 0,5 кН;
- удельные силы – в ньютонах на тонну с одним знаком после запятой;
- ток – в амперах с округлением до 5 А;
- скорость – в километрах в час с одним знаком после запятой;
- массу составов – в тоннах, грузовых с округлением до 50 т, пассажирских – до 25 т;
- общий расход топлива на тяговом участке – в килограммах с округлением до 10 кг;
- общий расход электроэнергии на тяговом участке – в киловатт-часах с округлением до 10 кВт·ч;
- удельный расход топлива – в килограммах на тонно-километр с округлением до 0,1 кг/(10⁴ т·км);
- удельный расход электроэнергии – в киловатт-часах на тонно-километр с округлением до 0,1 кВт·ч/(10⁴ т·км);
- перегонное время хода – в минутах, расчётное до 0,1 мин, для графика движения грузовых и пассажирских поездов при скоростях до 140 км/ч с округлением до 1 мин, а для пассажирских поездов при скоростях движения более 140 км/ч и пригородных поездов – до 0,5 мин;
- температуру – в градусах Цельсия при проверке нагревания по отдельным элементам расчёта до 0,01 °С с округлением конечных результатов до 1 °С.

Буквенные обозначения. При выполнении тяговых расчётов руководствоваться условными обозначениями величин, сокращениями и единицами измерений, приведёнными в перечне условных обозначений и сокращений.

1 РАСЧЁТ И ПРОВЕРКА МАССЫ СОСТАВА ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА

В соответствии с действующими Методическими указаниями по выполнению тяговых расчётов на Белорусской железной дороге [1] массу грузового состава определяют исходя из условий полного использования мощности и тяговых качеств локомотива, а также кинетической энергии поезда.

Сведения из теории. Различают два типа профиля пути. На участке с профилем первого типа наиболее крутые подъёмы имеют большую протяжённость, достаточную для достижения равновесной скорости, т. е. скорости, при которой равнодействующая сил, приложенных к поезду, равна нулю. Второй тип профиля пути характерен тем, что длина наиболее крутых подъёмов относительно мала и равновесную скорость на таких подъёмах поезд, как правило, не достигает.

В зависимости от характера профиля пути массу состава грузового поезда рассчитывают, исходя из условия движения с равновесной скоростью по затяжному подъёму или из условия движения по наиболее крутым, но менее протяжённым подъёмам со снижающейся скоростью, используя кинетическую энергию поезда.

Расчёт массы состава при условии, что поезд движется с равновесной скоростью на расчётном подъёме. Наиболее трудный подъём, на котором в процессе движения поезда устанавливается постоянная (равновесная) скорость, называют *расчётным (руководящим) подъёмом* рассматриваемого участка.

Подъём наибольшей на рассматриваемом участке крутизны и относительно небольшой протяжённости, который поезд преодолевает за счёт кинетической энергии, накопленной до вступления на этот элемент профиля пути, называют *скоростным* или *инерционным*.

Максимальную массу грузового состава, которую заданный локомотив может перемещать по заданному участку, определяют из условия, что скорость движения поезда не должна опускаться ниже расчётной. Это условие вызвано тем, что продолжительное движение поезда в режиме тяги со скоростью ниже расчётной может привести к перегреву тяговых электродвигателей и выходу их из строя. Значения расчётной скорости v_p и соответствующей

этой скорости расчётной силы тяги $F_{кр}$ являются паспортными характеристиками локомотива и приводятся для каждой серии, например, в МУ. Чтобы обеспечить движение поезда со скоростью не ниже расчётной, массу состава выбирают таким образом, чтобы на расчётном подъёме равновесная скорость была равна расчётной. В этом случае, если скорость на таком элементе достигнет равновесной, а подъем в силу своей протяжённости ещё не закончился, скорость до конца элемента останется неизменной.

Сведения из теории. Условием определения массы состава является равенство нулю ускорения движения поезда при расчётной скорости v_p на расчётном подъёме i_p . Из уравнения движения поезда, $\frac{\text{км/ч}^2}{\text{Н/т}}$,

$$\frac{dv}{dt} = \zeta r \quad (1.1)$$

следует, что названное условие выполняется при равенстве нулю равнодействующей сил r , приложенных к поезду.

Здесь v – скорость движения поезда, км/ч;

t – время движения поезда, ч;

r – удельная равнодействующая сил, приложенных к поезду, Н/т;

ζ – ускорение (замедление) поезда при удельной силе $r = 1 \text{ Н/т}$ ($\zeta \neq 0$).

Поскольку на расчётном подъёме поезд движется в режиме тяги, равнодействующая сил, приложенных к поезду, складывается (с учётом знака) из сил тяги F_k и сопротивления движению поезда W_k

$$R = F_k - W_k = 0, \quad (1.2)$$

где F_k – значение касательной силы тяги при расчётной скорости ($F_k = F_{кр}$), Н;

W_k – общее сопротивление движению поезда на расчётном подъёме, Н.

Общее сопротивление движению поезда складывается из основного W_o и дополнительного W_d сопротивлений движению локомотива и состава ($W_k = W_o + W_d$).

Удельная равнодействующая сил, приложенных к поезду,

$$r = \frac{F_k - W_k}{P + Q}, \quad (1.3)$$

где P – масса локомотива, т;

Q – масса состава поезда, т.

Допустим, что дополнительное сопротивление движению поезда включает в себя только сопротивление от уклона ($W_d = Wi$), тогда при движении поезда на расчётном подъёме

$$W_k = P w'_o + Q w''_o + (P + Q) \cdot 9,81 i_p, \quad (1.4)$$

где w'_o – основное удельное сопротивление движению локомотива в режиме тяги;

w''_o – основное удельное сопротивление движению состава поезда.

Принимая, что поезд движется с расчётной скоростью v_p , а следовательно, значения основного сопротивления движению локомотива w'_0 и состава w''_0 соответствуют этой скорости, подставим (1.4) в (1.2)

$$F_{кр} - P w'_0 - Q w''_0 - (P + Q) \cdot 9,81 i_p = 0. \quad (1.5)$$

Из (1.5) масса состава поезда, т,

$$Q = \frac{F_{кр} - P(w'_0 + 9,81 i_p)}{w''_0 + 9,81 i_p}. \quad (1.6)$$

Выражение (1.6) позволяет рассчитать массу состава, который заданный локомотив может провести по расчётному подъёму любой протяжённости, не снижая скорость движения ниже расчётной.

Основные параметры локомотивов приведены в приложении А.

Эмпирические выражения для вычисления значений основного удельного сопротивления движению различных единиц подвижного состава приведены в приложении Б.

Если на рассматриваемом элементе профиля пути располагается кривая, то следует это учесть. Заменяв кривую фиктивным подъёмом, который вычисляют в соответствии с эмпирическим выражением, ‰,

$$i_{кр} = \frac{700}{R_{кр}}, \quad (1.7)$$

и просуммировав это значение с величиной действительного уклона на расчётном подъёме, получаем значение $i_p = i + i_{кр}$ расчётного подъёма для подстановки в выражение (1.6). Здесь $R_{кр}$ – радиус кривой в метрах.

Пример 1.1. Определить массу состава поезда, состоящего из четырёхосных вагонов массой $q_4 = 80$ т каждый, который тепловоз 2ТЭ10У может провести по участку с расчётным подъёмом $i = 7,5$ ‰, расположенному в кривой радиусом $R_{кр} = 1250$ м. Путь звеньевой.

Р е ш е н и е . Расчётная сила тяги, скорость и масса тепловоза 2ТЭ10У равны соответственно $v_p = 24,6$ км/ч, $F_{кр} = 496000$ Н, $P = 276$ т (таблица А.1). Следовательно, основное удельное сопротивление движению тепловоза на звеньевом пути при движении на расчётной скорости определяется выражением (таблица Б.1)

$$w'_0 = 18,6 + 0,1 v + 0,0029 v^2 = 18,6 + 0,1 \cdot 24,6 + 0,0029 \cdot 24,6^2 = 22,8 \text{ Н/т.}$$

Основное удельное сопротивление движению гружёных четырёхосных вагонов по звеньевому пути определяется в соответствии с выражением (см. таблицу Б.1)

$$w''_{o4} = 5,2 + \frac{35,4 + 0,785 v + 0,027 v^2}{q_o}.$$

Масса рассматриваемых в примере вагонов, приходящаяся на одну ось, $q_o = q_4/4 = 20$ т/ось. Подставляя значения расчётной скорости и нагрузки на ось в выражение для основного удельного сопротивления движению четырёхосных вагонов на звеньевом пути, получим

$$w''_{o4} = 5,2 + \frac{35,4 + 0,785 \cdot 24,6 + 0,027 \cdot 24,6^2}{20} = 8,8 \text{ Н/т.}$$

Величина расчётного подъёма с учётом кривизны пути

$$i_p = i + i_{кр} = 7,5 + \frac{700}{1250} = 8,1 \text{ ‰.}$$

Тогда в соответствии с выражением (1.6) расчётная масса состава поезда, округлённая до 50 т [1],

$$Q = \frac{496000 - 276 (22,8 + 9,81 \cdot 8,1)}{8,8 + 9,81 \cdot 8,1} = 5299,9169 \approx 5300 \text{ т.}$$

Пример 1.2. Определить массу состава для исходных данных примера 1.1 при условии, что состав поезда включает 60 % по массе четырёхосных вагонов массой $q_4 = 80$ т каждый и 40 % восьмиосных вагонов каждый массой $q_8 = 140$ т.

Р е ш е н и е . Нагрузка на ось восьмиосных вагонов $q_o = q_8/8 = 17,5$ т/ось. Основное удельное сопротивление восьмиосных вагонов (см. таблицу Б.1)

$$w''_{o8} = 6,9 + \frac{58,9 + 0,37 v + 0,021 v^2}{q_o},$$

$$w''_{o8} = 6,9 + \frac{58,9 + 0,37 \cdot 24,6 + 0,021 \cdot 24,6^2}{17,5} = 11,5 \text{ Н/т.}$$

Тогда основное удельное сопротивление состава поезда

$$w''_o = \alpha_4 w''_{o4} + \alpha_8 w''_{o8} = 0,6 \cdot 8,8 + 0,4 \cdot 11,5 = 9,9 \text{ Н/т,}$$

где α_4 и α_8 — доля массы соответственно четырёхосных и восьмиосных вагонов в общей массе состава, а значение для w''_{o4} принято из примера 1.1.

Резльтирующее значение массы состава поезда (с округлением до 50 т)

$$Q = \frac{496000 - 276 (22,8 + 9,81 \cdot 8,1)}{9,9 + 9,81 \cdot 8,1} = 5234,6769 \approx 5250 \text{ т.}$$

Проверка массы состава на прохождение наиболее крутого подъёма с учётом использования кинетической энергии поезда. Если за расчётный

принимают подъем с уклоном меньшим, чем самый крутой на участке, то после определения, в соответствии с выражением (1.6), массы состава проверяют, может ли принятый локомотив, перемещая состав рассчитанной массы, преодолеть элементы профиля большей крутизны, чем расчётный подъём. Проверка заключается в расчёте скорости движения поезда для всех подъёмов, крутизна которых превышает крутизну подъёма, для которого рассчитана масса состава. Расчёт зависимости $v(s)$ начинают от места, для которого скорость движения может быть известна. Например, это может быть остановочный пункт, где наверняка была остановка или протяжённый элемент профиля, на котором устанавливается равномерная скорость, место с ограничением скорости и т. п. Расчёт зависимости $v(s)$ можно выполнять графически, аналитически либо путём численного интегрирования уравнения движения поезда. При аналитическом интегрировании уравнения движения поезда вычисления выполняют в соответствии с выражением

$$\Delta s = s_1 - s_2 = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2\zeta r_{\text{ср}}}. \quad (1.8)$$

Здесь v_1 и v_2 соответственно значения скорости движения поезда в начале и в конце рассматриваемого отрезка пути от s_1 до s_2 ; $\zeta = 12,2$ [1], а $r_{\text{ср}}$ – среднее значение удельной равнодействующей сил, приложенных к поезду, при среднем на рассматриваемом интервале значении скорости движения. Для повышения точности расчёта интервалы изменения скорости движения следует принимать в пределах 10 км/ч.

Если скорость движения в конце проверяемого подъёма оказывается равной или большей, чем расчётная скорость для принятого локомотива, можно считать массу состава принятой. Рассмотрим пример.

Пример 1.3. Рассчитать массу состава, с которым локомотив серии ВЛ80^С может преодолеть участок пути, профиль которого приведён ниже в таблице 1.1. Исходные данные по составу поезда принять из примера 1.1.

Таблица 1.1 – Профиль участка

Номер эле- мента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$i, \%$	0	–3	–7	–8	0	9	0	7	0	6	0
$s, \text{м}$	1500	800	6000	1500	600	2000	500	5500	400	300	1900

Решение. Анализ профиля пути показывает, что к наиболее крутому подъёму, уклон которого 9 %, а длина 2000 м (6-й элемент), поезд может подойти с

предельно допустимой скоростью, поскольку ему предшествуют затяжные спуски. В то же время, очевидно, что после движения по рассмотренному выше элементу профиля пути к моменту вступления на подъём длиной 5500 м с уклоном 7 ‰ скорость движения поезда значительно упадёт и нет оснований полагать, что этот элемент может быть преодолен за счёт накопленной ранее кинетической энергии. Приняв этот элемент за расчётный, принимаем $v_p = 43,5$ км/ч, $F_{кр} = 502300$ Н, $P = 192$ т (см. приложение А). Основное удельное сопротивление движению локомотива при расчётной скорости

$$w'_0 = 18,6 + 0,1v + 0,0029v^2 = 18,6 + 0,1 \cdot 43,5 + 0,0029 \cdot 43,5^2 = 28,4 \text{ Н/т},$$

для состава из четырёхосных полувагонов

$$w''_{04} = 5,2 + \frac{35,4 + 0,785 \cdot 43,5 + 0,027 \cdot 43,5^2}{20} = 11,2 \text{ Н/т}.$$

Тогда масса состава в соответствии с выражением (1.6)

$$Q = \frac{502300 - 192(28,4 + 9,81 \cdot 7)}{11,2 + 9,81 \cdot 7} = 6055,6224 \approx 6050 \text{ т}.$$

Чтобы убедиться в том, что с таким составом принятый локомотив преодолеет и подъем 9 ‰, рассчитаем, как изменяется скорость по мере движения поезда по данному подъёму. Вычисления проведём путём аналитического интегрирования уравнения движения поезда в соответствии с выражением (1.8).

Допустим, что к моменту вступления на рассматриваемый подъём (элемент профиля пути № 6) скорость поезда достигнет предельно допустимого значения $v = 80$ км/ч. Чтобы рассчитать расстояние, которое поезд пройдёт при понижении скорости от 80 до 70 км/ч, необходимо определить значение удельной равнодействующей сил r_{cp} для средней на рассматриваемом интервале скорости $v = 75$ км/ч:

$$r_{cp} = \frac{F_{кр}^{cp} - W_{кр}^{cp}}{P + Q}.$$

Из тяговой характеристики электровоза ВЛ80^С, приведённой в приложении В, для скорости $v = 80$ км/ч значение касательной силы тяги $F_{кр} = 219100$ Н, а $F_{кр} = 294000$ Н – для скорости $v = 70$ км/ч. Тогда для средней на интервале скорости $v_{cp} = 75$ км/ч значение касательной силы тяги $F_{кр} = (219100 + 294000) / 2 = 256550$ Н.

Основное удельное сопротивление движению электровоза

$$w'_0 = 18,6 + 0,1 \cdot 75 + 0,0029 \cdot 75^2 = 42,4 \text{ Н/т}.$$

Основное удельное сопротивление движению гружёных четырёхосных вагонов по звеньевому пути при осевой нагрузке $q_0 = 80 / 4 = 20$ т/ось.

$$w''_{04} = 5,2 + \frac{35,4 + 0,785 \cdot 75 + 0,027 \cdot 75^2}{20} = 17,5 \text{ Н/т}.$$

Удельная равнодействующая сил при движении на подъёме $i = 9 \text{ ‰}$ со скоростью v_{cp}

$$r_{cp} = \frac{F_k - (Pw_o' + Qw_o'')}{P + Q} - 9,81i,$$

$$r_{cp} = \frac{256550 - (192 \cdot 42,4 + 6050 \cdot 17,5)}{192 + 6050} - 9,81 \cdot 9 = -65,5 \text{ Н/т.}$$

Расстояние, пройденное поездом при изменении скорости движения от 80 до 70 км/ч,

$$\Delta s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \zeta r_{cp}} = \frac{1000 (70^2 - 80^2)}{2 \cdot 12,2 (-65,5)} = 938,6 \text{ м.}$$

Здесь $\zeta = 12,2 \frac{\text{км/ч}^2}{\text{Н/т}}$ для грузовых поездов, а множитель «1000» переводит километры в метры.

Сведём расчёты в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Расчет движения поезда по подъёму с уклоном 9 ‰

v_1 , км/ч	v_2 , км/ч	v_{cp} , км/ч	F_k , Н	w_o' , Н/т	W_o' , Н	w_o'' , Н/т	W_o'' , Н	W_{ov} , Н	$F_k - W_{ov}$, Н	$f_k - w_{ov}$, Н/т	r_{cp} , Н/т	s_b , м	$\sum s_b$, м
80	70	75	256500	42,4	8000	17,5	106000	114000	142500	22,8	-65,5	939	939
70	60	65	358000	37,4	7000	15,2	92000	99000	259000	41,5	-46,8	1139	2078

Так как $2077,8 > 2000 \text{ м}$, электровоз ВЛ80^С, перемещая состав массой $Q = 6050 \text{ т}$, за счёт ранее накопленной кинетической энергии преодолеет подъем 9 ‰ длиной 2000 м. При этом скорость движения поезда не успеет опуститься ниже расчётной.

Если вычисления показывают, что расстояние, проходимое поездом по рассматриваемому подъёму при снижении скорости до расчётной, меньше, чем длина подъёма, то массу состава следует уменьшить. Например, массу уменьшают на 50 т и повторяют расчёты. Эту процедуру следует повторять, пока рассматриваемый поезд не пройдёт весь подъём со скоростью не ниже расчётной.

После расчёта массы состава по условиям прохождения наиболее трудного на рассматриваемом участке элемента профиля пути (расчётного подъёма) и проверки на прохождение наиболее крутого подъёма (скоростного) необходимо проверить полученную массу на возможность трогания поезда с места и на возможность его установки в пределах приёмоотправочных путей станции.

Проверка массы состава на трогание. При трогании поезда равнодействующая сил, приложенных к поезду, должна быть больше нуля. Только в этом случае (1.1) ускорение положительно, следовательно, скорость растёт.

Сведения из теории. Равнодействующая сил, приложенных к поезду при трогании,

$$R = F_{\text{к тр}} - P w_{\text{тр}}^{\text{л}} - Q w_{\text{тр}}^{\text{с}} - 9,81 i_{\text{тр}} (P + Q) > 0, \quad (1.9)$$

где $F_{\text{к тр}}$ – сила тяги локомотива при трогании поезда, Н;

$w_{\text{тр}}^{\text{л}}$ – удельное сопротивление троганию локомотива, Н/т;

$w_{\text{тр}}^{\text{с}}$ – удельное сопротивление троганию состава поезда, Н/т;

$i_{\text{тр}}$ – уклон элемента профиля пути, на котором происходит трогание поезда, ‰.

Упрощая расчёты, принимаем, что $w_{\text{тр}}^{\text{л}} = w_{\text{тр}}^{\text{с}} = w_{\text{тр}}$. Тогда

$$R = F_{\text{к тр}} - (P + Q)(w_{\text{тр}} + 9,81 i_{\text{тр}}) > 0. \quad (1.10)$$

Удельное сопротивление троганию для подвижного состава на роликовых подшпинниках принимают $w_{\text{тр}} = \frac{275}{q_o + 7}$ [1]. Здесь q_o – нагрузка на ось вагона, т/ось.

Рассчитав сопротивление троганию для каждой i -й группы вагонов, вычисляют значение удельного сопротивления троганию состава

$$w_{\text{тр}}^{\text{с}} = \sum \alpha_i \frac{275}{q_{oi} + 7},$$

где α_i – доля массы i -й группы однотипных вагонов в общей массе состава поезда;

q_{oi} – средняя осевая нагрузка i -й группы однотипных вагонов.

При допущении, что $w_{\text{тр}} = w_{\text{тр}}^{\text{с}}$, из (1.10) следует условие

$$Q \leq Q_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{к тр}}}{w_{\text{тр}} + 9,81 i_{\text{тр}}} - P. \quad (1.11)$$

Таким образом, масса состава Q не должна превышать значение $Q_{\text{тр}}$, определенное по условиям трогания поезда на подъёме с уклоном $i_{\text{тр}}$.

Пример 1.4. Проверить, может ли электровоз ВЛ80^С взять с места состав массой $Q = 6000$ т на расчётном подъёме $i_{\text{р}} = 4$ ‰ при условии, что состав поезда включает 70 % по массе четырёхосных вагонов массой 80 т каждый и 30 % восьмиосных вагонов каждый массой 140 т. Сила тяги при трогании и масса локомотива соответственно $F_{\text{к тр}} = 678100$ Н, $P = 192$ т (см. приложение А).

Р е ш е н и е . Нагрузка на ось четырёхосных вагонов $q_{o4} = 80 / 4 = 20$ т/ось, а восьмиосных $q_{o8} = 140 / 8 = 17,5$ т/ось.

Удельное сопротивление троганию четырёхосного вагона

$$w_{\text{тр}4} = \frac{275}{q_{\text{о}4} + 7} = \frac{275}{20 + 7} = 10,2 \text{ Н/т},$$

а восьмиосного вагона

$$w_{\text{тр}8} = \frac{275}{q_{\text{о}8} + 7} = \frac{275}{17,5 + 7} = 11,2 \text{ Н/т}.$$

Тогда

$$w_{\text{тр}} = \alpha_4 w_{\text{тр}4} + \alpha_8 w_{\text{тр}8} = 0,7 \cdot 10,2 + 0,3 \cdot 11,2 = 10,5 \text{ Н/т}.$$

$$Q_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{к тр}}}{w_{\text{тр}} + 9,81 i_p} - P = \frac{678100}{10,5 + 9,81 \cdot 4} - 192 = 13440,89 \approx 13450 \text{ т}.$$

Так как $13450 > 6000$ т, следовательно, трогание поезда на расчётном подъёме обеспечено.

Проверка массы состава по длине приёмоотправочных путей. Масса состава, рассчитанная по наиболее трудному элементу продольного профиля пути, прошедшая проверки на прохождение более крутого, чем расчётный, подъёма и на трогание поезда, может оказаться, тем не менее, слишком большой для того, чтобы поезд уместился в пределах приёмоотправочных путей.

Для проверки следует определить длину поезда

$$l_{\text{п}} = l_{\text{л}} + l_{\text{с}} + 10, \quad (1.12)$$

где $l_{\text{л}}$ – длина локомотива, м;

$l_{\text{с}}$ – длина состава, м;

10 – допуск на неточность установки поезда.

Для определения длины состава необходимо определить число вагонов. Число однотипных вагонов можно рассчитать, если известна, например, доля массы данной группы вагонов в общей массе состава,

$$n_i = \frac{\alpha_i Q}{q_i}, \quad (1.13)$$

где α_i – доля массы i -й группы однотипных вагонов в общей массе состава поезда;

q_i – средняя масса вагона (брутто) для i -й группы однотипных вагонов.

Округляя n_i до целого и принимая из таблицы А.2 длину одного вагона для рассматриваемой группы, определяют длину состава поезда.

Если вычисленная по формуле (1.12) длина поезда оказывается больше длины приёмоотправочных путей на участках обращения, то массу состава следует уменьшить.

Пример 1.5. Уместится ли поезд из примера 1.2 на станционных путях длиной 1050 м?

Решение. Рассчитаем в соответствии с выражением (1.13) число вагонов:

– четырёхосных

$$n_4 = \frac{\alpha_4 Q}{q_4} = \frac{0,6 \cdot 5250}{80} \approx 39 \text{ вагонов};$$

– восьмиосных

$$n_8 = \frac{\alpha_8 Q}{q_8} = \frac{0,4 \cdot 5250}{140} \approx 15 \text{ вагонов.}$$

Принимая, что все четырёхосные вагоны являются полувагонами длиной 13,9 м, а восьмиосные – цистерны длиной 21,1 м каждая, найдём в соответствии с выражением (1.12) длину поезда, зная, что длина локомотива ВЛ80^С 32,8 м (таблица А.1):

$$l_{\text{п}} = 32,8 + 38 \cdot 13,9 + 14 \cdot 21,1 + 10 = 866,4 \text{ м.}$$

Очевидно, что поезд длиной 866,4 м уместится на станционных путях длиной 1050 м.

2 РАСЧЁТ И ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ УДЕЛЬНЫХ РАВНОДЕЙСТВУЮЩИХ СИЛ

Для построения диаграммы удельных равнодействующих сил, необходимой для выполнения тяговых расчётов, выполняют вычисления, результаты которых сводят в таблицу 2.1. Вычисления обычно выполняют для трех режимов ведения поезда: режима тяги, режима холостого хода (выбега) и режима торможения (служебного и экстренного).

Порядок заполнения таблицы следующий: первые два столбца таблицы заполняются данными тяговых характеристик локомотива (см. приложение В). Шаг изменения скорости не должен превышать 10 км/ч. Кроме того, в таблицу необходимо внести значения, соответствующие характерным точкам тяговой характеристики. Такими значениями, например, являются скорость перехода от ограничения по сцеплению (по току) на автоматическую характеристику, расчётная скорость и значения скорости изменения режима работы тяговых электродвигателей. Так, в таблице 2.1 приведены данные, принятые по тяговой характеристике тепловоза ТЭ10М. Характерными значениями скорости для 15-й позиции контроллера машиниста являются: 19 км/ч – скорость выхода на автоматическую характеристику; 24,6 км/ч – расчётная скорость; 38 км/ч – переход от ПП к ОП1; 62,5 км/ч – переход от ОП1 к ОП2; 43 км/ч – переход от ОП2 к ОП1 и 27,5 км – переход от ОП1 к ПП.

В столбцах 3 и 4 помещают значения основного удельного и полного сопротивлений движению локомотива при движении *в режиме тяги* (см. приложение Б). Удельное сопротивление:

– для звеньёвого пути

$$w'_o = 18,6 + 0,1 v + 0,0029 v^2;$$

– бесстыкового пути

$$w'_o = 18,6 + 0,08 v + 0,0024 v^2.$$

Основное сопротивление движению локомотива $W'_o = w'_o P$.

Для вычисления основного удельного сопротивления движению состава предварительно рассчитывают основное удельное сопротивление движению каждой группы вагонов, из которых он сформирован, пользуясь выражениями из приложения Б. Если состав включает вагоны разных типов, то его основное удельное сопротивление движению определяют как средневзвешенное:

$$w_o'' = \alpha_4 w_{o4}'' + \alpha_6 w_{o6}'' + \alpha_8 w_{o8}'', \quad (2.1)$$

где α_4 , α_6 , α_8 – соответственно доля четырёх-, шести- и восьмиосных вагонов в общей массе состава поезда.

Вагоны, из которых сформирован состав поезда, можно разделить на группы не только по количеству осей в вагоне, но и по другим признакам, например по осевой нагрузке. Тогда число слагаемых в формуле (2.1) вырастет, но всегда при этом $\sum \alpha_i = 1$ (i – номер группы однотипных вагонов).

Основное сопротивление движению состава $W_o'' = w_o'' Q$ (столбец 6).

Столбцы 7–9 заполняют, выполняя вычисления в соответствии с выражениями:

$$W_o = W_o' + W_o'',$$

$$F_k - W_o,$$

$$f_k - w_o = \frac{F_k - W_o}{P + Q}.$$

Таким образом, в столбце 9 таблицы записывают значения равнодействующей сил, приходящейся на единицу массы поезда при движении в режиме тяги. Затем выполняют расчёты и заполняют столбцы 10–13 для режима холостого хода (выбега).

В столбце 10 помещают значения основного удельного сопротивления движению локомотива *на холостом ходу*, которое вычисляют в соответствии с выражениями (см. приложение Б):

– для звеньевого пути

$$w_x = 23,5 + 0,11v + 0,0034v^2;$$

– бесстыкового пути

$$w_x = 23,5 + 0,09v + 0,0034v^2.$$

Таблица 2.1 – Пример расчёта удельных равнодействующих сил

v , км/ч	Режим тяги								Режим холостого хода				Режим торможения			
	F_{ϕ} Н	$W'_{\phi'}$ Н/т	$W'_{\phi''}$ Н	$w'_{\phi'}$ Н/т	$W'_{\phi''}$ Н	W_{ϕ} Н	$F_{\phi} - W_{\phi}$ Н	$f_k - w_{\phi}$ Н/т	w_{ϕ} Н/т	W_{ϕ} Н	$W'_{\phi} + W'_{\phi''}$ Н	$w_{\phi\phi}$ Н/т	$\phi_{\text{пр}}$	b_{ϕ} Н/т	$w_{\text{ак}} + 0,5b_{\phi}$ Н/т	$w_{\text{ак}} + b_{\phi}$ Н/т
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	398500	18,6	2500	8,0	24500	27000	371500	116,5	23,5	3000	27500	8,6	0,270	856,7	437,0	865,3
5	361500	19,1	2500	8,2	25000	27500	334000	104,8	24	3500	28500	8,9	0,227	720,3	369,1	729,2
10	334000	19,6	2500	8,4	25500	28000	306000	96,0	24,7	3500	29000	9,1	0,198	628,3	323,3	637,4
15	313000	20,3	3000	8,7	26500	29500	283500	88,9	25,6	3500	30000	9,4	0,177	561,6	290,2	571,0
19	300000	21,0	3000	8,9	27000	30000	270000	84,7	26,4	3500	30500	9,6	0,165	523,5	271,5	533,2
20	288500	21,2	3000	9,0	27500	30500	258000	80,9	26,7	3500	31000	9,7	0,162	514,0	266,7	523,7
24,6	244000	22,0	3000	9,3	28500	31500	212500	66,7	27,8	4000	32500	10,2	0,151	479,1	249,8	489,3
27,5	223500	22,6	3000	9,5	29000	32000	191500	60,1	28,5	4000	33000	10,4	0,145	460,1	240,5	470,5
35	175000	24,3	3500	10,2	31000	34500	140500	44,1	30,8	4500	35500	11,1	0,133	422,0	222,1	433,1
38	160500	25,1	3500	10,5	32000	35500	125000	39,2	31,8	4500	36500	11,4	0,128	406,1	214,5	417,5
43	141500	26,5	3500	11,1	34000	37500	104000	32,6	33,7	4500	38500	12,1	0,123	390,3	207,3	402,4
50	122500	28,6	4000	12,0	36500	40500	82000	25,7	36,5	5000	41500	13,0	0,116	368,1	197,1	381,1
55	111500	30,3	4000	12,6	38500	42500	69000	21,6	38,7	5500	44000	13,8	0,112	355,4	191,5	369,2
62,5	98000	33,0	4500	13,7	42000	46500	51500	16,2	42,4	6000	48000	15,1	0,106	336,3	183,3	351,4
65	94000	33,9	4500	14,1	43000	47500	46500	14,6	43,7	6000	49000	15,4	0,105	333,2	182,0	348,6
70	87500	36,0	5000	14,9	45500	50500	37000	11,6	46,5	6500	52000	16,3	0,102	323,6	178,1	339,9
75	82500	38,1	5500	15,8	48000	53500	29000	9,1	49,4	7000	55000	17,3	0,099	314,1	174,4	331,4
80	78000	40,4	5500	16,7	51000	56500	21500	6,7	52,5	7000	58000	18,2	0,097	307,8	172,1	326,0
85	73500	42,7	6000	17,7	54000	60000	13500	4,2	55,7	7500	61500	19,3	0,095	301,4	170,0	320,7
90	68500	45,2	6000	18,7	57000	63000	5500	1,7	59,1	8000	65000	20,4	0,093	295,1	168,0	315,5
95	63500	47,9	6500	19,8	60500	67000	-3500	-1,1	62,7	8500	69000	21,6	0,092	291,9	167,6	313,5
100	59500	50,6	7000	20,9	63500	70500	-11000	-3,5	66,5	9000	72500	22,7	0,090	285,6	165,7	308,5

В столбце 11 записывают значения основного сопротивления движению локомотива на холостом ходу $W_x = w_x P$, в столбце 12 – значение основного сопротивления движению поезда на холостом ходу $W_{ox} = W_x + W''$, а в столбце 13 – значение основного удельного сопротивления движению поезда на холостом ходу $w_{ox} = \frac{W_{ox}}{P + Q}$.

Прежде чем перейти к расчёту и заполнению столбцов 14–17, соответствующих режиму торможения, определяют значение расчётного тормозного коэффициента

$$\vartheta_p = \frac{\Sigma K_p}{P + Q}. \quad (2.2)$$

Суммарное расчётное нажатие тормозных колодок вычисляют по числу вагонов каждого вида (n_4, n_6, n_8), входящих в состав поезда, и расчётному нажатию на одну тормозную ось для каждого вида вагонов и локомотива

$$\Sigma K_p = 4 n_4 K_{p4} + 6 n_6 K_{p6} + 8 n_8 K_{p8}. \quad (2.3)$$

Если не все оси в составе тормозные, то это следует учитывать при вычислении суммарного нажатия тормозных колодок. С этой целью суммарное тормозное нажатие для состава ΣK_p умножают на коэффициент σ , равный доле тормозных осей в составе. Если доля тормозных осей задана для каждого типа вагонов, то соответствующие коэффициенты умножают на каждое из слагаемых в выражении (2.3).

В предположении о том, что расчётное тормозное нажатие колодок у всех вагонов одинаковое и равное K_p , выражение (2.3) принимает вид

$$\vartheta_p = \frac{\sigma K_p (4 n_4 + 6 n_6 + 8 n_8)}{Q}. \quad (2.4)$$

Значение расчётного нажатия колодок на одну тормозную ось принимают по таблице 2.2. Для чугунных колодок следует выбирать «гружёный» режим, а для композиционных – «средний».

Таблица 2.2 – Расчётные нажатия тормозных колодок (накладок) грузовых вагонов

Режим	Нажатие тормозных колодок на ось, кН	
	чугунные колодки	композиционные колодки
Гружёный	70	34
Средний	50	28
Порожний	35	13

В столбце 14 записывают значения расчётного коэффициента трения колодок $\varphi_{кр}$ для значений скорости, приведённых в столбце 1:

– для стандартных чугунных колодок

$$\varphi_{кр} = 0,27 \frac{v + 100}{5v + 100}; \quad (2.5)$$

– композиционных колодок

$$\varphi_{кр} = 0,36 \frac{v + 150}{2v + 150}. \quad (2.6)$$

В столбце 15 записывают значения удельной тормозной силы

$$b_T = 1000 \varphi_{кр}. \quad (2.7)$$

В столбце 16 записывают значение удельной равнодействующей сил, приложенных к поезду, для режима служебного торможения

$$r = w_{ох} + 0,5 b_T, \quad (2.8)$$

а в столбце 17 – для экстренного торможения

$$r = w_{ох} + b_T. \quad (2.9)$$

По результатам вычислений, приведённым в таблице 2.1, строят диаграмму удельных равнодействующих сил, приложенных к поезду (рисунок 2.1).

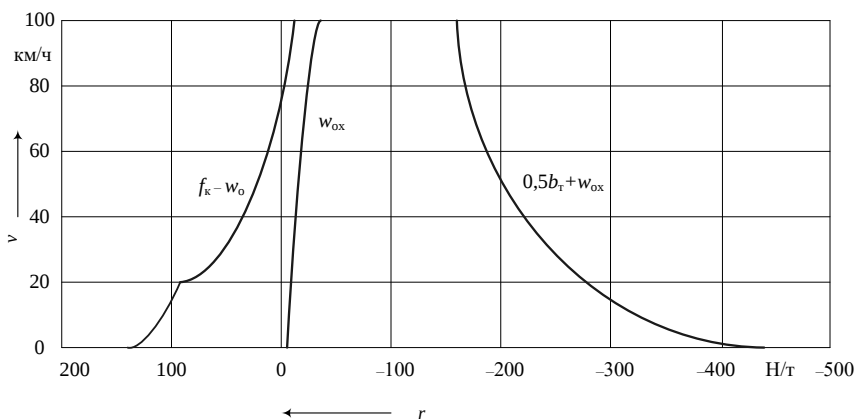


Рисунок 2.1 – Диаграмма удельных равнодействующих сил, приложенных к поезду

В таблице 2.3 приведены варианты рекомендуемых масштабов для графических построений. Масштабы даны в миллиметрах на единицу величины.

Таблица 2.3 – Масштабы для графических построений

Величина	Для грузовых и пассажирских поездов			Для электропоездов		Для тормозных и специальных расчётов	
	1,2	0,6	1,0	0,2	0,3	0,2	0,1
Сила, Н/т	2	1	2	1	1,5	2	1
Скорость, км/ч	40	20	48	60	90	240	120
Путь, км	30	30	25	50	50	–	–
Постоянная Δ	600	600	600	–	–	–	–
Время, ч	10	10	10	50	50	–	–
Время, мин							

Построенная диаграмма верна только для исходных данных, принятых при её расчёте и построении. При изменении характеристик состава или при построении диаграммы для движения в режиме тяги на промежуточных позициях контроллера машиниста необходимо выполнить расчёты для новых исходных данных. В то же время для использования диаграммы при движении на элементах профиля пути с уклонами, отличными от нуля, достаточно перенести начало координат влево для подъёмов или вправо для спусков на число единиц, равное уклону в промилле, умноженному на 9,81. Упрощая вычисления можно умножать на 10. При этом погрешность не превысит 2 %, что приемлемо в инженерных расчётах.

Диаграмма удельных равнодействующих сил позволяет анализировать характер движения поезда, для которого она построена. Зная, что **скорость движения поезда всегда стремится к равновесной** (при которой равнодействующая сил, приложенных к поезду, равна нулю), достаточно для текущего уклона профиля пути (на котором расположен поезд) и выбранного режима движения (режим тяги, выбег или торможение) *определить* равновесную скорость движения поезда, *сравнить* её с текущей скоростью и, если значение равновесной скорости больше текущей, скорость поезда будет увеличиваться, если меньше – снижаться, а при их равенстве скорость движения поезда не изменяется (остаётся постоянной, равной текущему значению).

3 ПОДГОТОВКА ПРОФИЛЯ ПУТИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЯГОВЫХ РАСЧЁТОВ

Продольный профиль железнодорожного пути состоит из отдельных элементов, каждый из которых характеризуется длиной и величиной уклона. В плане железнодорожный путь кроме прямолинейных включает и криволинейные участки, характеризуемые углом поворота, радиусом, длиной и направлением кривой. Влияние продольного профиля и кривизны пути на движение поезда учитывают величиной дополнительного сопротивления движению. Поскольку при производстве тяговых расчётов поезд обычно рассматривают как материальную точку, расчёт скорости движения выполняют для каждого элемента профиля в отдельности. При этом считают, что дополнительное сопротивление от уклона при переходе поезда на очередной элемент профиля пути изменяется мгновенно. На самом деле поезд, имеющий вполне определённую длину, может располагаться на нескольких элементах профиля, как это показано на рисунке 3.1.

Поэтому несколько мало отличающихся крутизной элементов в расчётах заменяют одним, длина которого S_c равна сумме длин этих элементов. Такую операцию называют **спрямлением профиля пути**. Следует выполнять спрямление профиля пути таким образом, чтобы механическая работа сил сопротивления на исходном и спрямлённом профиле отличалась как можно меньше.

Уклон элемента спрямлённого профиля пути, ‰,

$$i'_c = \frac{\sum i_j S_j}{S_c}, \quad (3.1)$$

где i_j – уклон j -го элемента профиля пути, ‰;

S_j – длина j -го элемента профиля пути, м;

S_c – длина элемента спрямлённого профиля пути ($S_c = \sum S_j$), м.

Спрямять можно только элементы с уклонами одного знака, мало отличающиеся по величине.

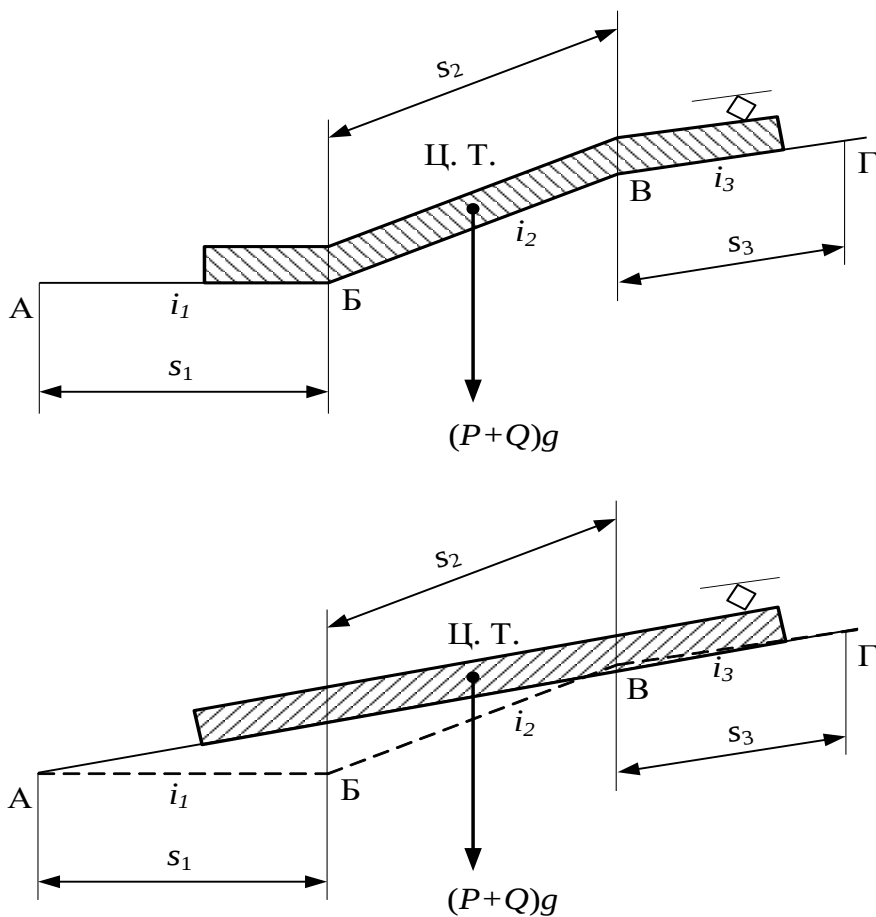


Рисунок 3.1 – Пример спрямления профиля пути

Для количественной оценки возможности спрямления профиля проверяют условие

$$S_j \leq \frac{2000}{\Delta i}, \quad (3.2)$$

где $\Delta i = |i'_c - i_j|$ – абсолютное значение разности между уклоном спрямлённого участка и действительным уклоном j -го элемента, входящего в спрямляемый участок.

Такую проверку выполняют для каждого из элементов исходного профиля, входящих в группу спрямляемых. Если хотя бы один из элементов исходного профиля не удовлетворяет условию (3.2), то необходимо пересмотреть состав спрямляемых элементов. Нельзя объединять элементы исходного профиля пути, на которых расположены остановочные пункты, а также расчётный и скоростной подъёмы с прилегающими элементами профиля пути.

Чтобы при расчёте скорости движения поезда учесть влияние кривых, их спрямляют в плане, заменяя фиктивными подъёмами,

$$i_c'' = \frac{700}{S_c} \sum \frac{S_{кр\ n}}{R_{кр\ n}}, \quad (3.3)$$

где $S_{кр\ n}$ – длина n -й кривой, м;

$R_{кр\ n}$ – радиус n -й кривой, м.

Кривые могут быть заданы длиной или центральным углом α_n , задаваемым в градусах. В этом случае

$$i_c'' = \frac{12,2}{S_c} \sum \alpha_n. \quad (3.4)$$

Следует помнить, что знак i_c' при движении на подъёме положительный, а при движении на спуске – отрицательный. Значение i_c'' всегда положительно, поскольку сила дополнительного сопротивления от кривой всегда направлена против движения поезда.

Окончательно уклон спрямлённого участка, на котором расположены кривые, принимают

$$i_c = i_c' + i_c''. \quad (3.5)$$

Величину i_c часто называют **приведённым уклоном**. Очевидно, что при наличии кривых одни и те же участки приведённого профиля пути при движении в противоположных направлениях отличаются не только знаком, но и величиной.

Пример 3.1. Произвести подготовку профиля пути, заданного в первых шести столбцах таблицы 3.1, для проведения тяговых расчётов.

Решение. Анализ профиля пути показывает, что элементы 1, 11 и 21, на которых расположены остановочные пункты, нельзя объединять со смежными элементами. Нельзя также объединять с другими элементы 14 – скоростной подъём ($i_{ск}$) и 16 – расчётный подъём (i_p).

Поскольку элементы 2–7 одного знака и мало отличаются крутизной, можно попытаться их спрямить. В соответствии с выражением (3.1)

$$i'_c = \frac{2 \cdot 1400 + 0 \cdot 600 + 3 \cdot 1600 + 0 \cdot 800 + 4 \cdot 500 + 0 \cdot 700}{1400 + 600 + 1600 + 800 + 500 + 700} = \frac{9600}{5600} \approx 1,7 \text{ ‰}.$$

Проверим возможность спрямления для каждого элемента исходного профиля пути, для чего воспользуемся условием (3.2):

$$\text{– элемент 2: } 1400 < \frac{2000}{|1,7 - 2,0|} \approx 6667;$$

$$\text{– элемент 3: } 600 < \frac{2000}{|1,7 - 0,0|} \approx 1176;$$

$$\text{– элемент 4: } 1600 > \frac{2000}{|1,7 - 3,0|} \approx 1538.$$

Для четвертого элемента условие (3.2) не выполняется. Поэтому проверка для оставшихся 5, 6, и 7-го элементов теряет смысл. Необходимо пересмотреть состав группы спрямляемых элементов.

Выполним расчёты по спрямлению для 2–6-го элементов

$$i'_c = \frac{2 \cdot 1400 + 0 \cdot 600 + 3 \cdot 1600 + 0 \cdot 800 + 4 \cdot 500}{1400 + 600 + 1600 + 800 + 500} = \frac{9600}{4900} \approx 2,0 \text{ ‰}.$$

Проверим возможность спрямления:

$$\text{– элемент 2: } 1400 < \frac{2000}{|2,0 - 2,0|} \approx \infty;$$

$$\text{– элемент 3: } 600 < \frac{2000}{|2,0 - 0,0|} \approx 1000;$$

$$\text{– элемент 4: } 1600 < \frac{2000}{|2,0 - 3,0|} \approx 2000;$$

$$\text{– элемент 5: } 800 < \frac{2000}{|2,0 - 0,0|} \approx 1000;$$

$$\text{– элемент 6: } 500 < \frac{2000}{|2,0 - 4,0|} \approx 1000.$$

Условие для всех элементов выполняется, следовательно, спрямление возможно.

На рассматриваемом участке пути в плане расположены две кривые. В соответствии с выражением (3.4) рассчитаем фиктивный подъем от этих кривых:

$$i'_c = \frac{700}{4900} \left(\frac{400}{800} + \frac{500}{1000} \right) \approx 0,1 \text{ ‰}.$$

Приведённый уклон $i_c = i'_c + i''_c = 2,0 + 0,1 = 2,1 \text{ ‰}$.

Результаты расчёта для рассмотренных и оставшихся элементов исходного профиля сводятся в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Спрямление профиля пути

Номер элемента	Длина, м	Уклон, ‰	Кривые			S_c , м	i'_c , ‰	i''_c , ‰	i_c , ‰	2000 / $ \Delta i $	Номер приведённого элемента	Примечание
			$R_{кр}$, м	$S_{кр}$, м	α°							
1	2000	5	–	–	–	–	–	–	–	–	1	Станция А
2	1400	2	800	400	–	4900	2	0,1	2,1	∞	2	–
3	600	0	–	–	–					1000		
4	1600	3	1000	500	–					2000		
5	800	0	–	–	–					1000		
6	500	4	–	–	–					1000		
7	700	0	1200	–	15	2300	–1,3	0,2	–1,1	1538	3	–
8	1000	–3	900	300	–					1176		
9	600	0	–	–	–					1538		
10	4800	–8	1500	700	–	4800	–8	0,1	–7,9	–	4	–
11	2400	0	–	–	–	–	–	–	–	–	5	Станция В
12	1000	–10	–	–	–	–	–	–	–	–	6	–
13	500	0	850	250	–	500	0	0,4	0,4	–	7	–
14	1500	10	–	–	–	–	–	–	–	–	8	$i_{ск}$
15	400	0	–	–	–	–	–	–	–	–	9	–
16	5000	8	1500	–	28	5000	8	0,1	8,1	–	10	i_p
17	1500	5	–	–	–	3200	4,4	0,1	4,5	3333	11	–
18	300	0	–	–	–					455		
19	800	6	–	–	–					1250		
20	600	3	700	250	–					1429		
21	2000	0	–	–	–	–	–	–	–	–	12	Станция С

4 РЕШЕНИЕ ТОРМОЗНЫХ ЗАДАЧ

Для обеспечения безопасности движения поездов важнейшее значение имеет возможность ограничения скорости движения поезда или его остановка, выполняемые в штатной или экстраординарной ситуациях. Это означает, что при необходимости остановки или снижении скорости движения поезда (для выполнения требования по ограничению скорости при движении по участку) должна быть обеспечена эффективность действия тормозов.

Практика эксплуатации подвижного состава показала необходимость решения конкретных задач, связанных с торможением поездов. Первая из них – это задача по определению тормозных средств, которые могут обеспечить снижение скорости движения или полную остановку поезда на требуемом расстоянии. Вторая – задача по определению расстояния, на котором заданный поезд с известными тормозными средствами сможет остановиться или снизить скорость движения до заданного значения. Названные задачи называют *тормозными*, а для их решения применяют различные методы решения уравнения движения поезда (1.1).

Условимся под термином «**тормозной путь**» понимать расстояние, которое проходит поезд от момента поворота ручки крана машиниста в тормозное положение до заданного значения скорости движения или до полной остановки поезда. После поворота ручки крана машиниста в тормозное положение проходит некоторое время, прежде чем тормозные колодки соприкоснутся с колёсами (тормозными дисками).

В силу инерционности тормозной системы, включающей тормозную магистраль, воздухораспределители и рычажную передачу, нарастание тормозной силы до установившегося значения в разных вагонах происходит не одновременно. В расчётах обычно этой инерционностью пренебрегают и считают, что тормозная сила мгновенно вырастает до своего установившегося значения через некоторый отрезок времени после поворота крана машиниста в тормозное положение. Этот временной отрезок называют **временем подготовки тормозов к действию t_n** .

Расстояние, которое поезд проходит за время подготовки тормозов к действию, называют *подготовительным тормозным путём S_n* .

Расстояние, которое поезд проходит с прижатыми тормозными колодками, называют *действительным тормозным путём* S_d .

Таким образом, **тормозной путь** S_T складывается из подготовительного и действительного тормозных путей

$$S_T = S_{\pi} + S_d. \quad (4.1)$$

Допустив, что поезд проходит путь подготовки тормозов к действию с постоянной скоростью, найдём его значение, м,

$$S_{\pi} = 1000 v_0 \frac{t_{\pi}}{3600} \approx 0,278 v_0 t_{\pi}, \quad (4.2)$$

где v_0 – скорость поезда в момент начала торможения, км/ч;

t_{π} – время подготовки тормозов к действию, с.

Экспериментально установлено, что время подготовки тормозов к действию изменяется в зависимости от длины состава. Для расчётов обычно принимают значения t_{π} , приведённые в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Время подготовки тормозов

Длина состава	t_{π} , с
Грузовые составы длиной до 200 осей и одиночно следующие грузовые локомотивы	7
Грузовые составы длиной более 200 осей (до 300 осей)	10
Грузовые составы длиной более 300 осей (до 400 осей)	12
Грузовые составы длиной более 400 осей (до 500 осей)	17
Грузовые составы длиной более 500 осей	24

Учитывая, что в действительности скорость движения поезда за время подготовки тормозов не остаётся неизменной, вводится поправка, определяемая величиной и знаком уклона, а также величиной тормозной силы. С учётом поправки время подготовки тормозов к действию определяют по формулам:

– для грузовых составов длиной до 200 осей и для одиночно следующих грузовых локомотивов

$$t_{\pi} = 7 - \frac{10 i_c}{100 g_p \varphi_{кр}}; \quad (4.3)$$

– грузовых составов длиной более 200 осей (до 300 осей)

$$t_{\pi} = 10 - \frac{15 i_c}{100 g_p \varphi_{кр}}; \quad (4.4)$$

– грузовых составов длиной более 300 осей (до 400 осей)

$$t_{\text{п}} = 12 - \frac{18 i_{\text{с}}}{100 \vartheta_{\text{р}} \varphi_{\text{кр}}} ; \quad (4.5)$$

– грузовых составов длиной более 400 осей (до 500 осей)

$$t_{\text{п}} = 17 - \frac{23 i_{\text{с}}}{100 \vartheta_{\text{р}} \varphi_{\text{кр}}} ; \quad (4.6)$$

– грузовых составов длиной более 500 осей

$$t_{\text{п}} = 24 - \frac{35 i_{\text{с}}}{100 \vartheta_{\text{р}} \varphi_{\text{кр}}} , \quad (4.7)$$

где $i_{\text{с}}$ – приведённый уклон, ‰;

$\vartheta_{\text{р}}$ – расчётный тормозной коэффициент поезда, принятый для случая экстренного торможения;

$\varphi_{\text{кр}}$ – расчётный коэффициент трения тормозной колодки.

Процесс торможения поезда определяется длиной тормозного пути $S_{\text{т}}$, начальной v_0 и конечной $v_{\text{к}}$ скоростью торможения, уклоном пути i и тормозными средствами поезда, определяемыми расчётным тормозным коэффициентом $\vartheta_{\text{р}}$.

Рассмотрим задачу определения тормозного пути. Для нахождения длины тормозного пути необходимо решить уравнение движения поезда для режима торможения. Сначала необходимо найти путь подготовки тормозов, используя формулы (4.1)–(4.7). Затем, интегрируя уравнение движения поезда, находят действительный тормозной путь.

При аналитическом интегрировании уравнения движения поезда весь диапазон изменения скорости от начальной до конечной разбивают на интервалы. Для каждого из интервалов изменения скорости находят путь, который проходит поезд. Суммарное значение действительного тормозного пути, м,

$$S_{\text{д}} = \sum \frac{500(v_{\text{ки}}^2 - v_{\text{ни}}^2)}{\zeta r_{\text{иср}}} , \quad (4.8)$$

где $v_{\text{ки}}, v_{\text{ни}}$ – значения начальной и конечной скорости движения поезда на рассматриваемом i -м интервале, км/ч (интервал скоростей принимать не более 10 км/ч);

ζ – замедление поезда под действием удельной замедляющей силы 1 Н/т, принимать [1];

– для грузовых поездов $\zeta = 12,2$;

- одиночно следующих электровозов $\zeta = 10,9$;
- одиночно следующих грузовых тепловозов $\zeta = 11,4$;
- $r_{срi}$ – среднее значение удельной равнодействующей сил, приложенных к поезду, на i -м интервале изменения скорости, Н/т,

$$r_{срi} = \frac{Pw_o' + Qw_o''}{P + Q} - b_{тi} - 9,81i_c. \quad (4.9)$$

Графическое определение длины тормозного пути. В прямоугольных координатах (рисунок 4.1), выбрав масштабы из таблицы 2.3, строим диаграмму замедляющих сил для режима торможения и рядом откладываем по оси абсцисс расстояние, равное пути подготовки тормозов $S_{пi}$, вычисленное в соответствии с выражением (4.2).

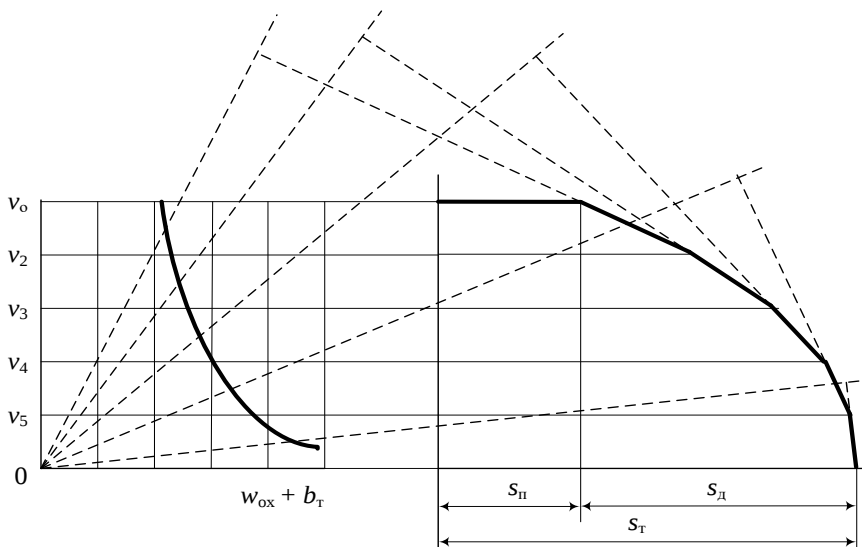


Рисунок 4.1 – Графическое определение длины тормозного пути

На уровне скорости начала торможения v_0 проводим горизонтальную линию, соответствующую постоянной скорости в пределах пути подготовки тормозов. Затем, разбив весь диапазон изменения скорости от v_0 до нуля на интервалы не более 10 км/ч, строим способом Липеца [4] кривую скорости от координаты окончания пути подготовки тормозов и до точки, в которой значение скорости становится равным нулю. Расстояние s_t и является искомой длиной тормозного

пути. Возможно выполнение расчётов тормозного пути и не до полной остановки ($v = 0$), а до заданного значения скорости, отличного от нуля.

Рассмотрим пример решения тормозной задачи.

Пример 4.1. Определить длину тормозного пути грузового поезда с составом массой $Q = 4950$ т, состоящего из четырёхосных вагонов, движущегося по звеньевому пути на спуске $i = -5$ ‰, начинающего экстренное торможение при скорости 70 км/ч. Средняя осевая нагрузка вагонов $q_o = 15$ т/ось. Тормозные колодки стандартные чугунные. Все оси тормозные. Массой и тормозными средствами локомотива пренебречь.

Решение. Полный тормозной путь складывается из пути подготовки тормозов и действительного тормозного пути.

Чтобы вычислить путь подготовки тормозов по формуле (4.2), необходимо найти время подготовки тормозов t_{Π} в соответствии с одним из выражений (4.3)–(4.7). Чтобы выбрать расчётное выражение, найдём число осей в составе

$$n_{\text{осей}} = \frac{Q}{q_o} = \frac{4950}{15} = 330 \text{ осей.}$$

Значение расчётного тормозного коэффициента при расчётном нажатии чугунных колодок на гружёном режиме $K_p = 70$ кН/ось (см. таблицу 2.2)

$$\vartheta_p = \frac{n_{\text{осей}} K_p}{Q} = \frac{330 \cdot 70}{4950} = 4,67.$$

Значение расчётного коэффициента трения чугунных тормозных колодок о колесо при скорости $v = 70$ км/ч

$$\varphi_{\text{кр}} = 0,27 \frac{v + 100}{5v + 100} = 0,27 \frac{70 + 100}{5 \cdot 70 + 100} = 0,102.$$

Поскольку количество осей в составе поезда $n_{\text{осей}} = 330 > 300$, время подготовки тормозов определяется по формуле (4.5)

$$t_{\Pi} = 12 - \frac{18 i_c}{100 \vartheta_p \varphi_{\text{кр}}} = 12 - \frac{18 (-5)}{100 \cdot 4,67 \cdot 0,102} = 13,9 \text{ с.}$$

Путь подготовки тормозов составит

$$S_{\Pi} = 0,278 v_o t_{\Pi} = 0,278 \cdot 70 \cdot 13,9 = 270,5 \text{ м.}$$

Действительный тормозной путь вычисляется по формуле (4.8) последовательно для каждого из интервалов изменения скорости, равных 10 км/ч.

Определим среднее значение удельной замедляющей силы при снижении скорости движения от 70 до 60 км/ч. Для этого найдём основное удельное сопротивление и удельную тормозную силу для средней на рассматриваемом интервале скорости движения $v_{\text{ср}} = 65$ км/ч:

$$w''_{04} = 5,2 + \frac{35,4 + 0,785 \cdot 65 + 0,027 \cdot 65^2}{15} = 18,6 \text{ Н/т};$$

$$\varphi_{кр} = 0,27 \frac{v + 100}{5v + 100} = 0,27 \frac{65 + 100}{5 \cdot 65 + 100} = 0,105;$$

$$b_T = 1000 \varphi_P \varphi_{кр} = 1000 \cdot 4,67 \cdot 0,105 = 490,4 \text{ Н/т}.$$

Тогда значение равнодействующей сил, приложенных к поезду, для средней (на интервале) скорости движения

$$r_{cp} = -w''_0 - w_i - b_T = -18,6 - 9,81 \cdot (-5) - 490,4 = -460,0 \text{ Н/т}.$$

Таким образом, при снижении скорости движения от 70 до 60 км/ч поезд пройдёт расстояние

$$S_d = \frac{500 (v_k^2 - v_n^2)}{\zeta r_{cp}} = \frac{500 (60^2 - 70^2)}{12,2 (-460)} \approx 115,8 \text{ м}.$$

Результаты расчётов для всех интервалов скорости приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Расчёт длины действительного тормозного пути

v_1 , км/ч	v_2 , км/ч	v_{cp} , км/ч	$\varphi_{кр}$	b_T , Н/т	w''_0 , Н/т	r_{cp} , Н/т	$S_{дi}$, м	$S_{д}$, м
70	60	65	0,105	490,4	18,6	-460,0	115,8	115,8
60	50	55	0,112	523,0	15,9	-489,9	92	207,8
50	40	45	0,12	560,4	13,6	-525,0	70,3	278,1
40	30	35	0,133	621,1	11,6	-583,7	49,2	327,3
30	20	25	0,15	700,5	10,0	-661,5	31	358,3
20	10	15	0,177	826,6	8,8	-786,4	15,6	373,9
10	0	5	0,227	1060,1	7,9	-1019,0	4	377,9

Таким образом, действительный путь торможения $S_d = 377,9$ м, а полный тормозной путь $S_T = S_{п} + S_d = 270,5 + 377,9 = 648,4$ м.

Пример 4.2. Определить наибольшую скорость, с которой поезд из примера 4.1 может осуществлять движение, чтобы при экстренном торможении остановиться на расстоянии не более 600 м от момента начала торможения.

Решение. Допустим, что путь подготовки тормозов зависит только от скорости движения и изменяется линейно. Тогда найдём две точки, которые определяют эту прямую. Первая точка соответствует скорости $v = 0$ км/ч, тогда путь подготовки тормозов составит $S_{п} = 0,278 v_0 t_{п} = 0$ м.

Вторую точку возьмём для скорости $v = 100$ км/ч:

$$\varphi_{кр} = 0,27 \frac{v + 100}{5v + 100} = 0,27 \frac{100 + 100}{5 \cdot 100 + 100} = 0,090;$$

$$t_{\Pi} = 12 - \frac{18 i_c}{100 \varphi_{\text{кр}}} = 12 - \frac{18 \cdot (-5)}{100 \cdot 4,67 \cdot 0,090} = 14,1 \text{ с};$$

$$S_{\Pi} = 0,278 v_0 t_{\Pi} = 0,278 \cdot 100 \cdot 14,1 = 392,0 \text{ м.}$$

Проводим по двум точкам линию 1 на рисунке 4.2.

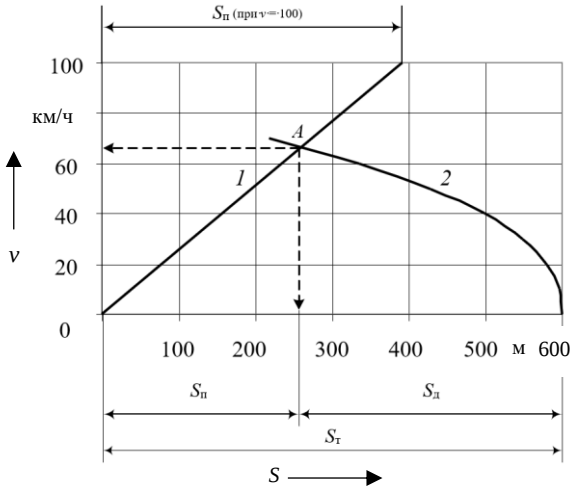


Рисунок 4.2 – Определение предельно допустимой по тормозам скорости движения поезда

Затем из точки на оси абсцисс, соответствующей расстоянию 600 м, в обратном направлении последовательно от $v = 0$ км/ч до пересечения с линией 1 строим кривую скорости 2, соответствующую режиму экстренного торможения.

Построение можно выполнить графическим методом Липца либо по результатам аналитического, либо численного интегрирования уравнения движения поезда. Точка A пересечения линий 1 и 2 соответствует началу отсчёта действительного тормозного пути $S_{\text{д}}$ и скорости начала торможения $v \approx 66$ км/ч.

Таким образом, если рассмотренный выше поезд на спуске крутизной -5% начнёт экстренное торможение при скорости $v = 66$ км/ч, то, пройдя путь подготовки тормозов $S_{\text{п}} \approx 260$ м и действительный тормозной путь $S_{\text{п}} \approx 340$ м, он остановится на расстоянии 600 м от места, в котором рукоятка тормозного крана машиниста была переведена в положение экстренного торможения.

Увеличение скорости начала торможения относительно точки A (см. рисунок 4.2) приведёт к увеличению длины тормозного пути ($S_{\text{т}} > 600$ м).

На практике часто требуется для каждого спуска на рассматриваемом участке определить предельно допустимое значение скорости движения

поезда, при котором длина тормозного пути не превысит некоторое заданное значение. Иначе говоря, требуется определить ограничение скорости по тормозным средствам для любого из спусков на рассматриваемом участке. В этом случае обычно решают задачу, аналогичную рассмотренной в примере 4.2, но для трех (двух) значений уклона. В качестве этих уклонов можно принять прямой горизонтальный участок пути ($i = 0 \%$), наиболее крутой спуск и средний по величине уклона спуск. По полученным трём (двум) значениям скорости строят графическую зависимость $v_{\text{доп}}(i)$. Пользуясь этой графической зависимостью, находят ограничение допустимой скорости движения поезда по тормозам для любого, встречающегося на рассматриваемом участке спуска.

Пример 4.3. Определить ограничение скорости движения поезда по тормозам на участке, где наибольший спуск $i = -12 \%$, а длина тормозного пути 1200 м. Масса состава $Q = 4450$ т. В составе 52 четырёхосных вагона. Тормозные колодки стандартные чугунные. Диаграмма удельных замедляющих сил для режима экстренного торможения приведена на рисунке 4.3.

Решение. Количество осей в составе

$$n_{\text{осей}} = 52 \cdot 4 = 208 \text{ осей.}$$

Значение расчётного тормозного коэффициента при расчётном нажатии чугунных колодок на гружёном режиме $K_p = 70$ кН/ось (см. таблицу 2.2)

$$\vartheta_p = \frac{n_{\text{осей}} K_p}{Q} = \frac{208 \cdot 70}{4450} = 3,27.$$

Значение расчётного коэффициента трения чугунных тормозных колодок о колесо при скорости $v = 70$ км/ч

$$\varphi_{\text{кр}} = 0,27 \frac{v + 100}{5v + 100} = 0,27 \cdot \frac{70 + 100}{5 \cdot 70 + 100} = 0,102.$$

Рассчитаем длину пути подготовки тормозов для уклонов 0, -6 и -12% . Принимая скорость начала торможения $v = 100$ км/ч и учитывая число осей в составе поезда, определим:

1) время подготовки тормозов (4.4):

– для $i = 0 \%$

$$t_{\text{п}} = 10 - \frac{15 i_c}{100 \vartheta_p \varphi_{\text{кр}}} = 10 - \frac{15 \cdot 0}{100 \cdot 3,27 \cdot 0,102} = 10,0 \text{ с;}$$

– для $i = -6 \%$

$$t_{\text{п}} = 10 - \frac{15 i_c}{100 \vartheta_p \varphi_{\text{кр}}} = 10 - \frac{15 \cdot (-6)}{100 \cdot 3,27 \cdot 0,102} = 12,7 \text{ с;}$$

– для $i = -12 \text{ ‰}$

$$t_{\Pi} = 10 - \frac{15 i_c}{100 \vartheta_p \varphi_{кр}} = 10 - \frac{15 \cdot (-12)}{100 \cdot 3,27 \cdot 0,102} = 15,4 \text{ с;}$$

2) значения пути подготовки тормозов:

– для $i = 0 \text{ ‰}$

$$S_{\Pi} = 0,278 v_0 t_{\Pi} = 0,278 \cdot 100 \cdot 10,0 = 278,0 \text{ м;}$$

– для $i = -6 \text{ ‰}$

$$S_{\Pi} = 0,278 v_0 t_{\Pi} = 0,278 \cdot 100 \cdot 12,7 = 353,1 \text{ м;}$$

– для $i = -12 \text{ ‰}$

$$S_{\Pi} = 0,278 v_0 t_{\Pi} = 0,278 \cdot 100 \cdot 15,4 = 428,1 \text{ м.}$$

Значения пути подготовки тормозов откладываются по горизонтали на уровне, соответствующем скорости начала торможения $v = 100 \text{ км/ч}$. Соединив полученные точки с началом координат, можно получить линии, по которым изменяется значение пути подготовки тормозов S_{Π} в зависимости для выбранных значений уклонов. Из точки, соответствующей заданному значению тормозного пути ($S = 1200 \text{ м}$), в обратном направлении строим кривые скорости для режима экстренного торможения на уклонах i , равных соответственно 0, -6 и -12 ‰ . Точки пересечения линий, соответствующих одинаковым уклонам, и дают значения предельно допустимой скорости движения для этих уклонов.

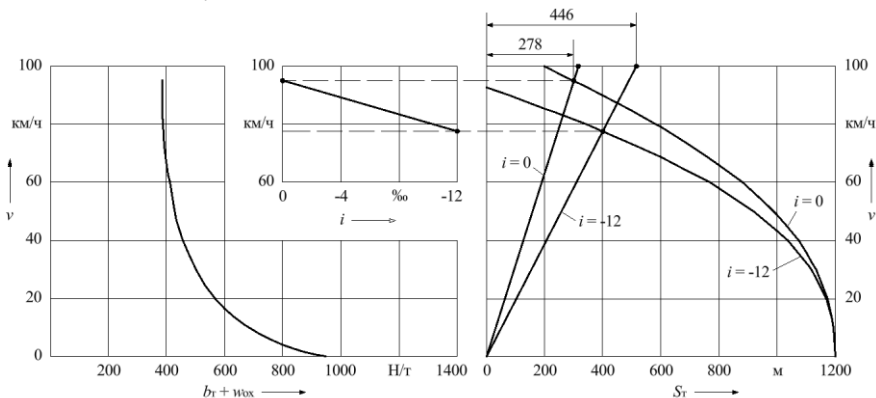


Рисунок 4.3 – Графическое определение предельно допустимых по тормозам значений скорости движения поезда

5 РАСЧЁТ ВРЕМЕНИ ХОДА ПОЕЗДА СПОСОБОМ РАВНОВЕСНЫХ СКОРОСТЕЙ

Расчёт времени хода поезда путём аналитического интегрирования уравнения движения поезда или одним из графических способов – процедура достаточно трудоёмкая. Когда необходимо быстро рассчитать время хода, и при этом приемлема бóльшая, чем в более точных, но трудоёмких методах, погрешность, используют способ равновесных скоростей. Способ равновесных скоростей предполагает следующие допущения:

- скорость движения в пределах элемента спрямлённого профиля пути постоянна и равна равновесной (под равновесной понимают скорость, при которой равнодействующая сил, приложенных к поезду, равна нулю);
- при переходе с одного элемента профиля на другой скорость движения поезда меняется мгновенно.

Равновесную скорость определяют по диаграмме удельных равнодействующих сил, восстанавливая вертикальную линию из точки на оси абсцисс, соответствующей величине приведённого уклона, ‰, умноженного на $9,81 \approx 10$ (для подъёмов – влево от начала координат, а для спусков – вправо). **Координата на оси v** точки пересечения этой линии и кривой ускоряющих (замедляющих) сил, построенной для соответствующего режима движения и **является значением равновесной скорости**.

Если ограничения *по конструкционной скорости* подвижного состава, *по тормозам* или *по состоянию пути* оказываются меньше равновесной скорости, то для дальнейшего рассмотрения в качестве допустимой скорости движения по элементу принимают наименьшее из названных значений.

Для подъёмов, у которых величина уклона элемента профиля пути больше, чем у расчётного уклона, значение равновесной скорости движения принимают равным расчётной скорости v_r , **поскольку выполненная ранее проверка на прохождение подъёмов большей крутизны (см. пример 1.3) показывает, что скорость поезда не успевает опуститься ниже расчётной**.

Кривая скорости движения поезда, построенная при таких допущениях для диаграммы удельных равнодействующих сил (рисунок 5.1), приведена на рисунке 5.2.

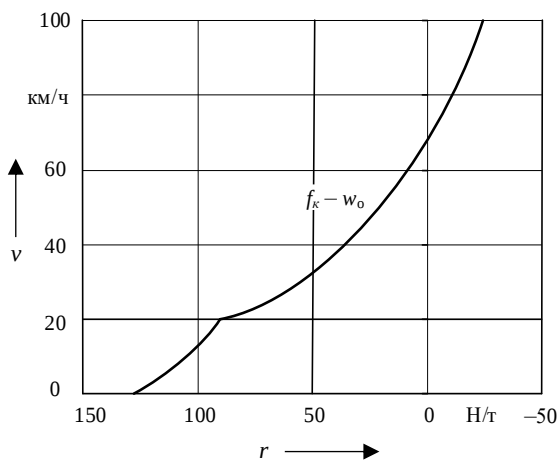


Рисунок 5.1 – Диаграмма удельной равнодействующей силы, действующей на поезд в режиме тяги

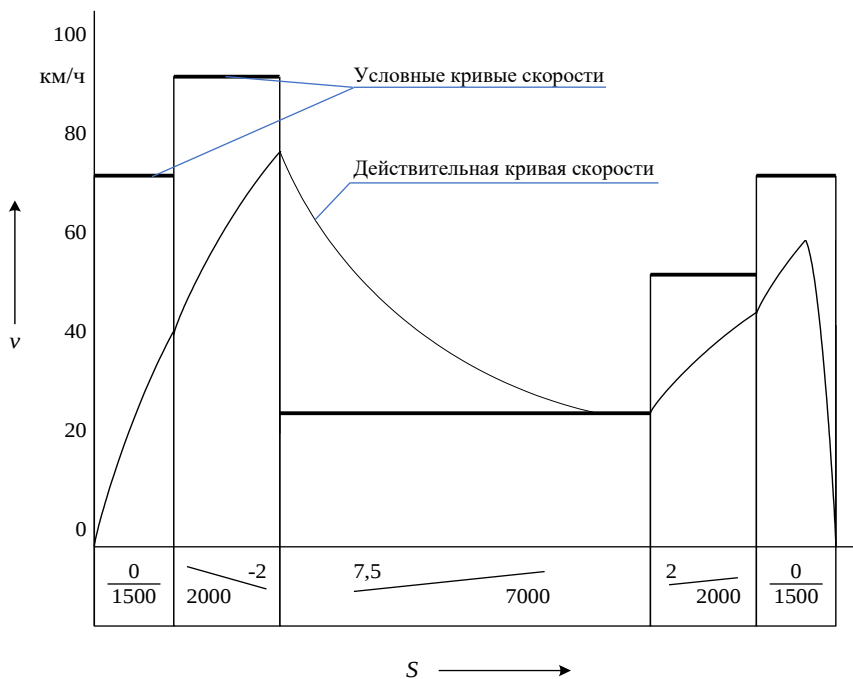


Рисунок 5.2 – Построения, поясняющие суть метода равновесных скоростей

Время движения по элементу профиля пути длиной S_1 , км, при постоянной скорости движения, равной равновесной v_1 , км/ч, определяют как $t = 60 \frac{S_1}{v_1}$, мин. Тогда рассматриваемый участок поезд пройдёт за время

$$t = 60 \frac{S_1}{v_1} + 60 \frac{S_2}{v_2} + 60 \frac{S_3}{v_3} + 60 \frac{S_4}{v_4} + 60 \frac{S_5}{v_5} = 60 \sum \frac{S_i}{v_i}. \quad (5.1)$$

Сравним условную кривую скорости, состоящую из участков движения с постоянной скоростью (горизонтальные жирные линии), с нанесённой на том же рисунке действительной кривой скорости движения (см. рисунок 5.2).

На одних элементах действительная скорость ниже равновесной, а на других выше. Даже там, где скорость достигает равновесное значение, она постоянна не на всем элементе, как это видно на подъёме крутизной 7,5 ‰ и длиной 7000 м.

Так, на втором элементе действительное время хода поезда меньше, чем подсчитанное по равновесной скорости, а третий элемент – затяжной подъём – поезд пройдёт быстрее, чем если бы он двигался с равновесной скоростью на всем этом элементе. Так как мгновенный переход от одного значения скорости движения к другому невозможен, то при определении времени хода поезда методом равновесных скоростей следует внести поправки по времени: на одних элементах следует внести положительную поправку по времени, а на других – отрицательную.

Сделаем два допущения, связанные с вносимыми поправками:

- положительная поправка, которую следует внести при увеличении скорости от v_n до v_m , равна по величине отрицательной поправке, вносимой при снижении скорости от v_m до v_n ($v_m > v_n$);
- величина поправки, вносимой при переходе от скорости v_n к v_m , не зависит от того, совершается этот переход за один раз или через несколько промежуточных скоростей.

Следствием принятых допущений является то, что сумма поправок на рассматриваемом участке равна поправке на переход от равновесной скорости на первом элементе к равновесной скорости на последнем элементе. Если, как это показано на рисунке 5.2, уклоны первого и последнего элементов профиля пути одинаковы (в данном случае равны нулю), что верно для большинства остановочных пунктов, то суммарную поправку следует принять равной нулю.

Поскольку при разгоне и остановке поезда его действительная скорость всегда значительно отличается от равновесной, необходимо внести **поправки на разгон Δt_r и замедление Δt_z .**

Тогда время хода по рассматриваемому участку определим как

$$t = 60 \sum \frac{S_i}{v_i} + \Delta t_p + \Delta t_3. \quad (5.2)$$

Обычно для грузовых и пассажирских поездов принимают поправку по времени на разгон поезда 2 мин, а на замедление – 1 мин.

Расчёты, выполненные способом равновесных скоростей, целесообразно приводить в табличной форме. Например, для рассмотренного выше участка (см. рисунок 5.2) расчёт времени хода поезда способом равновесных скоростей приведён в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Определение времени хода поезда методом равновесных скоростей

Номер элемента спрям- лённого профиля пути	S, км	i, ‰	Скорость движе- ния по элементу, км/ч	Время прохождения элемента, мин	Поправка на разгон и замедление, мин
1	1,5	0,0	70	1,3	2
2	2,0	–2,0	90	1,3	–
3	7,0	7,5	24	17,5	–
4	2,0	2,0	50	2,4	–
5	1,5	0,0	70	1,3	1
С у м м а				23,8	3

Общее время хода по участку $t = 23,8 + 3 = 26,8$ мин.

6 РАСЧЁТ И ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА

Кривой скорости движения принято называть графическую зависимость $v(s)$ скорости движения поезда от пройденного пути. Её строят обычно на листе миллиметровой бумаги справа от диаграммы удельных равнодействующих (ускоряющих/замедляющих) сил. Ниже оси абсцисс, на которой откладывают пройденное поездом расстояние, условно изображают профиль пути (приложение Е).

Расчёт кривой скорости можно выполнять аналитическими, графическими или численными методами. Построение кривой скорости для расчётной массы состава обычно выполняют с целью определения наименьшего времени хода поезда по заданному участку. Результаты расчёта используют при составлении графика движения поездов. Поэтому *при выборе режима движения поезда руководствуются требованием обеспечения движения с максимально возможной скоростью.*

Графический метод. Рекомендуются строить кривую скорости движения поезда способом Липеца (способ МПС). При этом для обеспечения приемлемой точности значения приращения скорости на каждом шаге построения принимают не более 10 км/ч.

Построение обычно начинают с момента начала движения – трогания поезда на станции отправления. На рисунке 6.1 проведён пример построения фрагмента кривой скорости при разгоне на прямом горизонтальном участке пути.

При построении кривой скорости необходимо руководствоваться тем, что **скорость движения поезда всегда стремится к равновесной.** Поэтому при вступлении поезда на очередной элемент профиля пути по диаграмме удельных равнодействующих сил определяют значение равновесной скорости на текущем элементе профиля пути для выбранного режима движения.

Если режим движения поезда (тяга, выбег или торможение) в пределах элемента профиля пути не меняется, то скорость поезда через некоторое время может принять равновесное значение. Поскольку **равновесной**

называют скоростью движения поезда, при которой равнодействующая сил, приложенных к поезду, равна нулю, то, как видно из уравнения движения поезда (1.1), после достижения равновесного значения скорость остаётся постоянной до конца элемента профиля пути или до изменения режима движения.

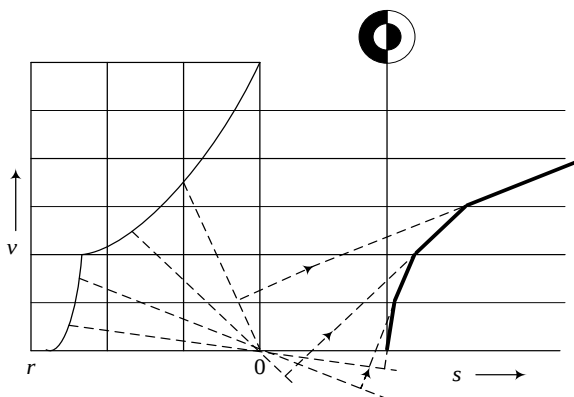


Рисунок 6.1 – Пример построения кривой скорости при разгоне на прямом горизонтальном участке пути

На рисунке 6.2 проведён фрагмент построения кривой скорости при движении поезда в режиме тяги на спуске. Скорость движения при этом значительно меньше, чем равновесная, а следовательно, стремясь к равновесной, она будет увеличиваться.

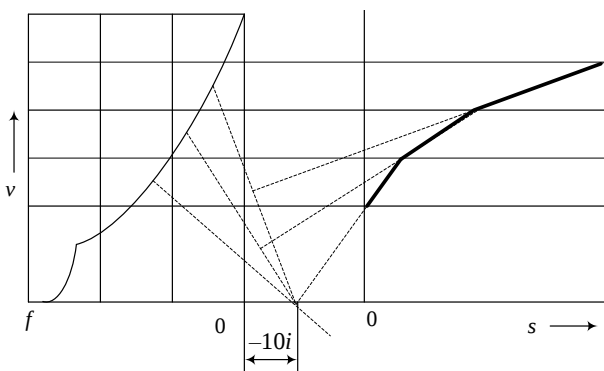


Рисунок 6.2 – Пример построения кривой скорости при движении поезда на спуске в режиме тяги

Если равновесная скорость меньше текущего значения скорости движения поезда (например на расчётном или скоростном подъёмах), то, как это показано на рисунке 6.3, скорость, стремясь к равновесной, будет снижаться, а после её достижения останется постоянной до конца текущего элемента профиля пути.

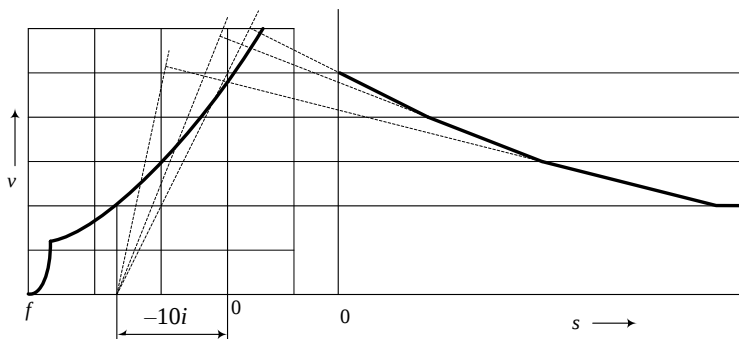


Рисунок 6.3 – Пример построения кривой скорости движения поезда в режиме тяги на расчётном или скоростном подъёмах

При достижении предельно допустимой (по тормозам, состоянию пути и др.) скорости необходимо перейти на режим холостого хода. Если при этом фактическое значение скорости движения больше равновесной скорости, то, как это показано на рисунке 6.4, начнётся снижение скорости движения поезда. Точка отключения контроллера машиниста (переход на режим холостого хода) условно обозначена буквами «КО».

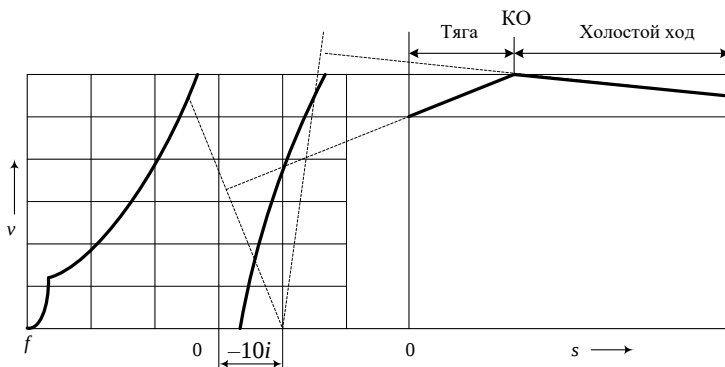


Рисунок 6.4 – Построение кривой скорости при движении на спуске с переходом от режима тяги к режиму холостого хода

Возможны ситуации, когда при переходе на режим холостого хода скорость поезда всё равно будет увеличиваться (равновесная скорость на текущем элементе профиля для режима холостого хода выше предельно допустимой). В этом случае необходимо применять регулировочное торможение.

При механическом торможении под регулировочным торможением понимают сочетание режима служебного торможения и выбега. При регулировочном торможении на затяжных спусках длиной до 10 км допускается изображение кривой скорости в виде горизонтальной линии, проведённой ниже предельно допустимого значения (ограничения) скорости на величину поправки Δv . Значение Δv определяют в зависимости от величины спуска, на котором выполняется регулировочное торможение, в соответствии с таблицей 6.1. На спусках до 4 ‰ значение Δv принимают равным нулю (т. е. значение текущей скорости движения будет равным ограничению скорости без поправки).

Таблица 6.1 – Значения поправки к скорости при движении поезда в режиме регулировочного торможения

$i_{\text{к}}, ‰$	–4	–6	–8	–10	–12	–14	–16	–18
$\Delta v, \text{ км/ч}$	4	4	4	4	5	6	7	8

На рисунке 6.5 приведён вариант построения кривой скорости для случая, когда равновесная скорость на режиме холостого хода выше предельно допустимой; кроме условного обозначения отключения контроллера машиниста – «КО», буквами «РТ» обозначен переход в режим регулировочного торможения.

На затяжных спусках длиной более 10 км или крутизной более 18 ‰ кривую скорости строят, пользуясь соответствующими диаграммами удельных замедляющих сил.

При построении кривой скорости следует предусматривать проверку действия тормозов. Снижение скорости при торможении с целью проверки тормозов для грузовых поездов составляет 20 км/ч.

Поскольку поезд рассматривается как материальная точка, кривая скорости движения поезда строится для его центра тяжести. В связи с этим необходимо

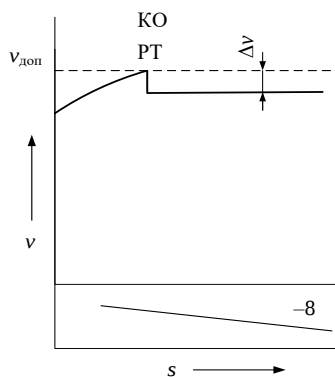


Рисунок 6.5 – Пример построения кривой скорости при движении поезда в режиме регулировочного торможения

учитывать, что ограничение, накладываемое на скорость движения, должно выполняться и головой, и хвостом поезда.

При остановке поезда следует учитывать ограничение скорости движения $v_{огр}^{стр}$ на входной стрелке при приёме на боковой путь, а поэтому **построение кривой скорости при остановке поезда следует выполнять начиная с точки, лежащей на расстоянии, равном половине длины поезда, от места начала действия ограничения ($l_n/2 + l_{стр}$)**.

На рисунке 6.6 даны примеры построения кривой скорости при остановке поезда. Здесь на расстоянии $l_{стр}$ от оси станции обозначено место положения входной стрелки. При выполнении курсового проекта (работы) следует принимать значение $l_{стр}$ равным половине заданной длины приёмоотправочных путей $l_{стр} = l_{поп}/2$. На расстоянии, равном половине длины поезда ($l_n/2$), от входной стрелки находится точка, где располагается центр тяжести поезда в момент, когда его голова должна двигаться со скоростью не выше $v_{огр}^{стр}$. Иначе говоря, скорость движения поезда в этой точке при построении кривой скорости не должна быть выше ограничения на входной стрелке.

Возможны варианты подхода поезда к входной стрелке со скоростью большей (см. рисунок 6.6 а, в) или меньшей (см. рисунок 6.6, б) ограничения $v_{огр}^{стр}$.

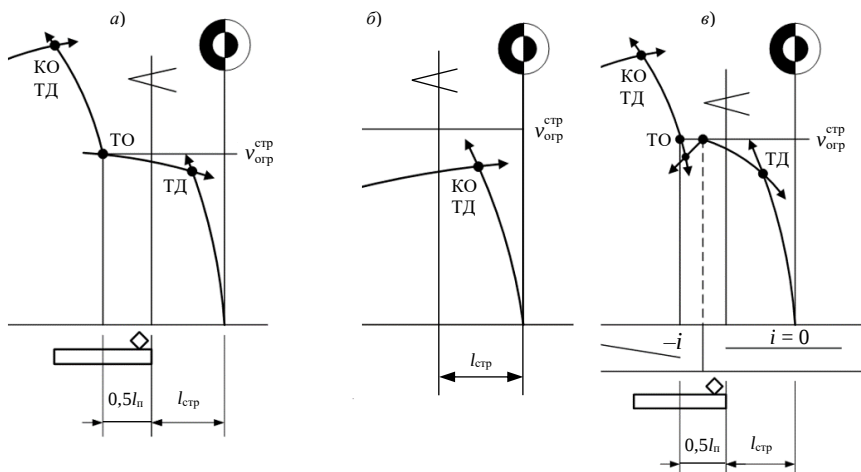
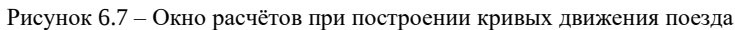


Рисунок 6.6 – Примеры построения кривой скорости при остановке поезда:

а – со скоростью большей $v_{огр}^{стр}$, б – со скоростью меньшей $v_{огр}^{стр}$,
в – со скоростью большей $v_{огр}^{стр}$ на спуске (когда скорость поезда на выбеге увеличивается)

Аналитическое интегрирование уравнения движения поезда. Графические построения с помощью треугольника и линейки можно заменить расчётами на калькуляторе или, что гораздо эффективнее, на персональном компьютере. При этом, поскольку расчёты могут быть представлены в табличной форме, эффективно применение табличного процессора Microsoft Excel. На рисунке 6.7 приведён пример организации тяговых расчётов, необходимых для построения кривых скорости и времени в Microsoft Excel.



49

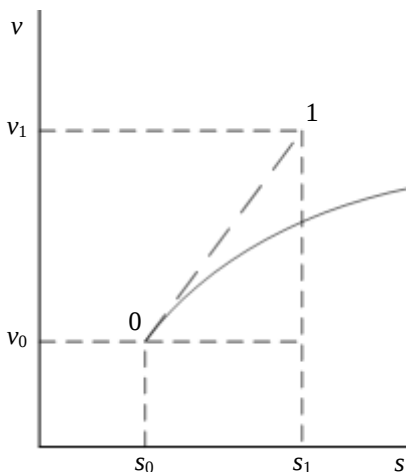
После окончания ввода исходных данных в обозначенные на рисунке ячейки появляются значения приращений пути Δs и времени Δt , соответствующие заданному изменению скорости движения поезда. В случае ошибки при выборе направления изменения скорости (например, задано увеличение скорости, а её значение в начале рассматриваемого интервала выше равновесной скорости) в ячейке под значениями скорости движения появляется надпись «ошибка ввода».

Численное интегрирование уравнения движения поезда. При выполнении тяговых расчётов обычно нет необходимости в нахождении общего решения дифференциального уравнения движения поезда. Достаточно найти частное решение, удовлетворяющее начальным условиям. Решение может быть представлено в виде таблицы или графической зависимости. Рассмотрим, например, расчёт **численным методом Эйлера** (рисунок 6.8).

Уравнение движения поезда

$$v \frac{dv}{ds} = \zeta r \quad \text{или} \quad \frac{dv}{ds} = \zeta \frac{r}{v}.$$

Пусть кривая скорости построена, тогда



$$v_1 = v_0 + (s_1 - s_0) \operatorname{tg} \alpha;$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dv}{ds};$$

$$v_1 = v_0 + (s_1 - s_0);$$

$$v_2 = v_1 + (s_2 - s_1);$$

$$v_{i+1} = v_i + \zeta \frac{r_i}{v_i} \Delta s;$$

$$\Delta s = (s_{i+1} - s_i).$$

Рисунок 6.8 – Интегрирование уравнения движения поезда по методу Эйлера

Таким образом для каждого выбираемого интервала изменения пути Δs_i рассчитывается изменение скорости движения Δv_i .

7 РАСЧЁТ И ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ ВРЕМЕНИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА

Кривой времени называют графическую зависимость $t(S)$ времени движения поезда от пройденного пути. Её строят по имеющейся кривой скорости на том же листе миллиметровой бумаги. Результаты построения кривой времени в дальнейшем используют для составления графика движения поездов, расчёта нагрева тяговых электрических машин и расхода энергоресурсов на поездку.

Рассмотрим построение кривой времени графическим способом Лебедева (способ МПС). Для этого слева от начала координат на расстоянии $\Delta = 30$ мм (см. таблицу 2.3) проводят вертикальную линию $O'O''$, как это показано на рисунке 7.1.

Затем кривая скорости разбивается на отрезки OA , AB , BC и т. д. Это могут быть, например, отрезки, полученные при построении кривой скорости методом Липеца. Середины отрезков проецируют на линию $O'O''$, получая точки a' , b' и т. д. К линии Oa' проводят перпендикуляр OA' , проходящий через начало координат. Этот отрезок представляет собой фрагмент кривой времени, соответствующий изменению скорости движения поезда на расстоянии ΔS_1 .

Для второго отрезка пути ΔS_2 фрагмент кривой времени строится как перпендикуляр к отрезку Ob' , проходящий через A' – последнюю точку предыдущего отрезка кривой времени. Построения для последующих отрезков пути выполняются аналогично.

Из рисунка 7.1 видно, что построение кривой времени не зависит от направления изменения скорости движения, поскольку время изменяется только в сторону увеличения. Чтобы не выходить за пределы выбранного формата, кривую времени можно строить, например, в пределах 10 мин. После достижения этого значения (точка 1) продолжение кривой времени строят от нулевого значения (точка 2).

Таким образом, легко посчитать время хода, включающее на рассматриваемом участке пути полные интервалы времени по 10 мин. Прибавив к

полученному значению время, определяемое отрезком $F'F''$, получают время хода по участку.

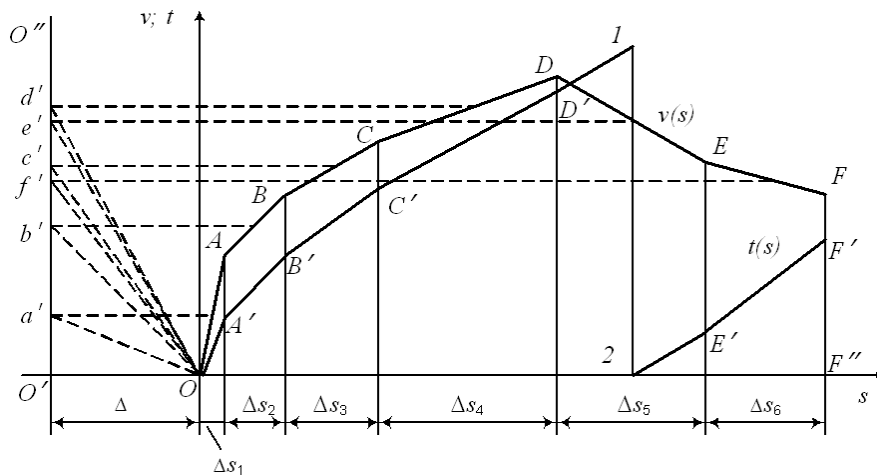


Рисунок 7.1 – Пример построения кривой времени способом Лебедева (способ МПС)

Время хода поезда по каждому из отрезков пути ΔS_i можно рассчитать также по средней скорости движения поезда на этих отрезках

$$\Delta t_i = 60 \frac{\Delta S_i}{v_{ср i}}, \quad (7.1)$$

где Δt_i – время хода поезда на i -м отрезке пути длиной ΔS_i , мин;

ΔS_i – отрезок пути, для которого определяется время хода, км;

$v_{ср i}$ – средняя скорость поезда на i -м отрезке пути длиной ΔS_i , км/ч.

После построения кривой времени следует определить время хода поезда по перегонам и техническую скорость v_t на участке. Результаты расчётов сводят в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Времена хода поезда по перегонам участка

Перегоны	Длина, км	Время хода, мин	
		по расчёту	принято для графика движения
$A-B$	S_1	t_{p1}	t_{r1}
$B-C$	S_2	t_{p2}	t_{r2}
$C-D$	S_3	t_{p3}	t_{r3}
Итого $A-D$	$S = S_1 + S_2 + S_3$	$t_p = t_{p1} + t_{p2} + t_{p3}$	$t_r = t_{r1} + t_{r2} + t_{r3}$

Значения времени хода поезда **по расчёту** ($t_{p1}, t_{p2}, \dots, t_{pi}$) принимают по кривой времени с точностью до 0,1 мин, а **принятые для графика движения** получают путём округления в большую сторону соответствующих значений времени $t_{p1}, t_{p2}, \dots, t_{pi}$ (по расчёту) с точностью до 1 мин.

Длину участков, на которых расположены станции отправления S_1 и прибытия S_3 (см. таблицу 7.1), определяют как половину длины соответствующего элемента профиля пути. Это объясняется тем, что отправление и остановка поезда выполняются *по осям станций*: от середины элемента профиля пути, а не от его начала.

Техническая скорость движения поезда по участку, км/ч,

$$v_T = \frac{60 S}{t_p}, \quad (7.2)$$

где S – суммарная длина участка, определяемая как расстояние между осями станций отправления и прибытия, км;

t_p – суммарное время хода поезда по участку, мин.

После определения времени хода поезда графическим способом Лебедева (способ МПС) следует определить относительную погрешность метода равновесных скоростей

$$\delta = \left| \frac{t_r - t_p}{t_r} \right| \cdot 100 \%. \quad (7.3)$$

8 РАСЧЁТ РАСХОДА ЭНЕРГОРЕСУРСОВ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПОЕЗДА

Расход дизельного топлива. Расчёт расхода топлива тепловозом выполняют по имеющимся кривым скорости и времени, построенным любым из рассмотренных выше способов. На кривой скорости в процессе её построения должна быть выполнена разметка режимов работы локомотива, заключающаяся в обозначении участков движения поезда в режимах тяги, холостого хода (выбега), регулировочного или служебного торможений.

Для расчёта расхода топлива весь участок разбивают на отдельные отрезки, в пределах которых режим работы локомотива не меняется. Общий расход топлива тепловозом за поездку вычисляют в соответствии с выражением

$$E = \sum G_i \Delta t_i + g_x t_x + g_{ст} t_{ст}, \quad (8.1)$$

где G_i – расход топлива, соответствующий скорости движения поезда при используемой позиции контроллера машиниста на i -м отрезке пути, кг/мин;

Δt_i – время движения поезда по i -му отрезку пути, мин;

g_x – расход топлива тепловозом на холостом ходу, кг/мин;

t_x – время работы дизеля на холостом ходу; мин;

$g_{ст}$ – расход топлива тепловозом на стоянках и при движении по станционным путям, кг/мин;

$t_{ст}$ – время работы дизеля на стоянках и при движении по станционным путям, мин.

Значения Δt_i и t_x определяют по кривой времени с учётом разметки режимов работы локомотивов. Значения G_i принимают по расходным характеристикам тепловозов, полученным экспериментально и приведённым в приложении Д.

В качестве примера на рисунке 8.1 приведена расходная характеристика для тепловоза 2ТЭ10М. Как видно из рисунка, у современных тепловозов при

неизменной позиции контроллера машиниста расход топлива мало зависит от скорости движения, поэтому выражение (8.1) принимает вид

$$E = G_{\text{т}} \Delta t_{\text{т}} + g_{\text{x}} t_{\text{x}} + g_{\text{ст}} t_{\text{ст}}, \quad (8.2)$$

где $G_{\text{т}}$ – расход топлива в режиме тяги, кг/мин;

$\Delta t_{\text{т}}$ – время движения в режиме тяги, мин.

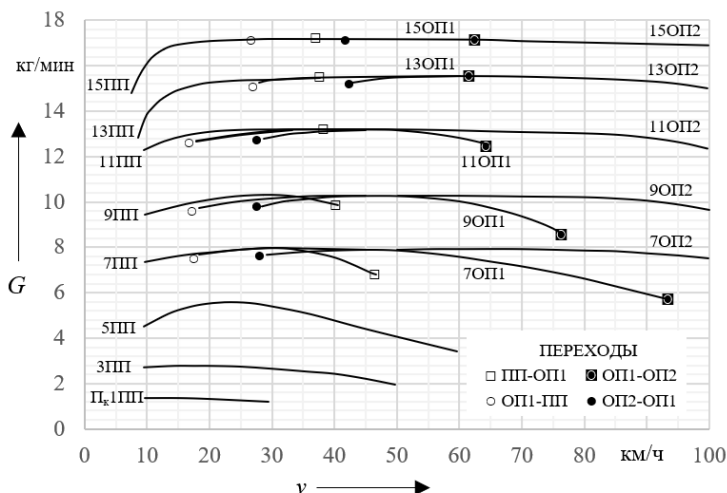


Рисунок 8.1 – Расход топлива в режиме тяги тепловозом 2ТЭ10М

Значение расхода топлива тепловозом на холостом ходу g_{x} принимают в соответствии с таблицей 8.1.

Таблица 8.1 – Частота вращения коленчатого вала дизелей и соответствующий расход топлива на холостом ходу

Серия тепловоза	Частота вращения коленчатого вала дизеля, об/мин	Удельный расход топлива, кг/мин	
		одной секцией	тепловозом
М62, ДМ62	400	0,31	0,31
2М62, 2М62К, 2М62У	400	0,31	0,62
2М62УК	350	0,18	0,36
2М62УМК	350	0,18	0,36
2ТЭ10М, 2ТЭ10У	400	0,38	0,76
2ТЭ10МК, 2ТЭ10УК	400	0,35	0,70

Для возможности сравнения расхода топлива при работе локомотивов в различных видах движения и направлениях общий расход топлива локомотивом за поездку относят к измерителю выполненной перевозочной работы,

получая удельный расход топлива, $\frac{\text{кг}}{10^4 \text{ т} \cdot \text{км}}$,

$$e = \frac{E}{QS} \cdot 10^4, \quad (8.3)$$

где Q – масса состава, т;

S – длина участка, км.

Для сравнения различных видов тяги и разных сортов топлива введено понятие «условное топливо», под которым понимают топливо с удельной теплотой сгорания 29,3 МДж/кг. Удельная теплота сгорания дизельного топлива – 41,9 МДж/кг. Следовательно, чтобы пересчитать расход дизельного топлива в расход условного топлива, вводится эквивалент $\mathcal{E} = 41,9 / 29,3 = 1,43$, получаем выражение для расчёта удельного расхода условного топлива, $\frac{\text{кг}}{10^4 \text{ т} \cdot \text{км}}$,

$$e_y = e \mathcal{E}. \quad (8.4)$$

Пример 8.1. Определить расход топлива тепловозом 2ТЭ10М при движении с составом массой 5250 т по участку длиной 47,6 км. Поезд разогнался до скорости 15 км/ч за 0,7 мин, после чего двигался в режиме тяги 35,9 мин и в режиме холостого хода, включая торможение при остановке – 12,8 мин.

Решение. Поскольку время разгона до скорости 15 км/ч в рассматриваемом примере составляет менее 1,5 % от общего времени хода и при дальнейшем её увеличении расход топлива в режиме тяги практически не изменяется (см. рисунок 8.1), принимаем значение расхода топлива $G = 17,1$ кг/мин. Для режима холостого хода и торможения расход топлива принимаем $g_x = 0,76$ кг/мин (таблица 8.1). Таким образом, в соответствии с выражением (8.1) общий расход дизельного топлива за поездку составит

$$E = G_t \Delta t_t + g_x t_x = 17,1(0,7 + 35,9) + 0,76 \cdot 12,8 = 636 \text{ кг}.$$

Удельный расход дизельного топлива в соответствии с выражением (8.3)

$$e = \frac{E}{Qs} \cdot 10^4 = \frac{640}{5250 \cdot 47,6} \cdot 10^4 = 25,6 \frac{\text{кг}}{10^4 \text{ т} \cdot \text{км}}.$$

Удельный расход условного топлива в соответствии с выражением (8.4)

$$e_y = e \mathcal{E} = 25,6 \cdot 1,43 = 36,6 \frac{\text{кг}}{10^4 \text{ т} \cdot \text{км}}.$$

Расход электроэнергии на движение поезда, Вт·ч, определяется выражением

$$A_d = \int_t^0 U_{\text{кc}} I_{\text{э}} dt, \quad (8.5)$$

где $U_{\text{кc}}$ – напряжение в контактной сети, В;

$I_{\text{э}}$ – ток нагрузки электровоза (потребляемый из контактной сети), А;

dt – длительность потребления тока, ч.

В качестве тока нагрузки для электровозов переменного тока принимают действующее значение активного тока I_{da} . При рекуперативном торможении ток нагрузки принимают равным току рекуперации I_p , взятому со знаком минус.

Разделяя режимы тяги и рекуперативного торможения, полный расход электроэнергии электровозом, Вт·ч, отнесённый к токоприёмнику, определяют в соответствии с выражением

$$A = A_d - A_p, \quad (8.6)$$

где A_d – расход электроэнергии на движение поезда в режиме тяги, Вт·ч;

A_p – возврат электроэнергии в контактную сеть в режиме рекуперативного торможения, Вт·ч.

Расчёт расхода электроэнергии за поездку выполняют на основе построенных ранее кривых скорости $v(s)$, времени $t(s)$ и тока нагрузки электровоза:

– $I_{\text{э}}(v)$ – для электровозов постоянного тока;

– $I_{da}(v)$ – для электровозов переменного тока;

– $I_p(v)$ – при рекуперативном торможении.

Разбивая время хода поезда на отдельные интервалы времени, запишем в конечных приращениях расчётные выражения для определения расхода электроэнергии на тягу.

Для электровозов переменного тока, кВт·ч,

$$A_d = \frac{U_{\text{кc}} \sum I_{dai} \Delta t_i}{60 \cdot 1000}, \quad (8.7)$$

где $U_{\text{кc}}$ – номинальное напряжение в контактной сети ($U_{\text{кc}} = 25000$ В);

I_{dai} – средняя величина действующего значения активного тока электровоза на i -м интервале времени, А.

Количество электроэнергии, возвращаемой в контактную сеть при рекуперации, кВт·ч,

$$A_p = \frac{U_p \sum I_{pi} \Delta t_i}{60 \cdot 1000}, \quad (8.8)$$

где U_p – напряжение на токоприёмнике электровоза в режиме рекуперативного торможения ($U_p = 3300$ В на постоянном токе и $U_p = 25000$ В на переменном токе);

I_{pi} – среднее на i -м интервале значение тока рекуперации, А.

Расход электроэнергии на собственные нужды электровоза (вспомогательные электрические машины, отопление, освещение) определяют по средним значениям электроэнергии, потребляемой вспомогательными машинами одного электровоза, приведёнными в таблице 8.2.

Таблица 8.2 – Средние значения электроэнергии и тока, потребляемые на собственные нужды электровозом

Серия электровоза	Потребление электроэнергии на собственные нужды, кВт·ч/мин	Ток, потребляемый на собственные нужды, А
ВЛ80 ^С	5,55	16
1,5ВЛ80 ^С	8,33	24
БКГ1	2,54	4,7
БКГ2	1,82	3,4
2БКГ2	3,65	6,77

В отопительный сезон рекомендуют учитывать расход электроэнергии на отопление электровоза, исходя из полного времени его работы и среднего рекомендуемого значения потребления энергии 0,07–0,14 кВт·ч/мин на один электровоз.

Удельный расход электроэнергии, $\frac{\text{кВт}}{10^4 \text{ т} \cdot \text{км}}$,

$$a = \frac{10^4 A}{Q_s}. \quad (8.9)$$

При определении удельного расхода электрической энергии (8.9) не учитывается КПД электрической тяги, который включает в себя КПД всех промежуточных звеньев в цепи передачи электрической энергии от электростанций к токоприёмнику локомотива [2, с. 24–25],

$$\eta_{эл.т} = \eta_{эс} \eta_{птп} \eta_{лэп} \eta_{тп} \eta_{кс}, \quad (8.10)$$

где $\eta_{эс}$ – коэффициент полезного действия электростанции ($\eta_{эс} = 0,25 \dots 0,40$);

$\eta_{птп}$ – коэффициент полезного действия повышающей трансформаторной подстанции ($\eta_{птп} = 0,97 \dots 0,98$);

$\eta_{\text{лэп}}$ – коэффициент полезного действия для линий электропередач ($\eta_{\text{лэп}} = 0,95 \dots 0,98$);

$\eta_{\text{тп}}$ – коэффициент полезного действия тяговой подстанции ($\eta_{\text{тп}} = 0,90 \dots 0,92$);

$\eta_{\text{кс}}$ – коэффициент полезного действия контактной сети ($\eta_{\text{тп}} = 0,91 \dots 0,94$).

Тогда удельный расход электрической энергии с учётом КПД электрической тяги, $\frac{\text{кВт}}{10^4 \text{ т} \cdot \text{км}}$,

$$a_{\eta} = \frac{a}{\eta_{\text{эл.т}}}. \quad (8.11)$$

Для пересчёта удельного расхода электрической энергии в расход условного топлива используют эквивалент $\mathcal{E} = 0,123$. Тогда выражение для расчёта удельного расхода условного топлива электровозом, $\frac{\text{кВт}}{10^4 \text{ т} \cdot \text{км}}$,

$$e_y = a \mathcal{E}. \quad (8.12)$$

*Ты никогда не будешь знать достаточно,
если не будешь знать больше, чем достаточно.*

*С. Я. Маршак
(из афоризмов Вильяма Блейка)*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы надеются, что читатель, который, разбирая примеры и выполняя курсовую работу, прочитал пособие и добрался до этой страницы, приобрёл необходимые знания и навыки для того, чтобы применять их в будущем в своей профессиональной деятельности.

Многое из того, что есть в литературе по тяговым расчётам, не вошло в данное пособие. Теория локомотивной тяги развивается, появляются новые методы, приёмы и инструменты выполнения тяговых расчётов. Поэтому для успешной и эффективной трудовой деятельности необходимо постоянно учиться, пополняя свои знания и умения.

Все известные методы тяговых расчётов не могут вписаться в рамках одного пособия или одного учебника. Специалисту, заботящемуся о своём профессиональном росте, следует пополнять свои знания информацией и из других источников: учебников, статей в профессиональных журналах и сборниках научных трудов, материалов научных конференций. Желаем успехов в этой нелёгкой, но увлекательной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Методические указания по выполнению тяговых расчётов. – Введ. 11.11.2021, приказ № 949 НЗ. – Минск: БЖД, 2021. – 254 с.

2 Правила тяговых расчётов для поездной работы. Нормативное производственно-практическое издание. – Введ. 12.05.16 распоряжением РЖД № 867р. – М. : РЖД, 2016. – 515 с.

3 **Фролов, Н. О.** Электрические железные дороги. : метод. Рекомендации / Н. О. Фролов, Н. Г. Фетисова. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. – 93 с.

4 **Кузьмич, В. Д.** Теория локомотивной тяги : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / В. Д. Кузьмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель ; под ред. В. Д. Кузьмича. – М. : Маршрут, 2005. – 448 с.

5 **Френкель, С. Я.** Техника тяговых расчётов : учеб.-метод. пособие / С. Я. Френкель ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 73 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Характеристики локомотивов и вагонов

Таблица А.1 – Характеристики локомотивов

Серия локомотива	Учётная масса, т		Длина, м	Конструкционная скорость v_k , км/ч	Режим работы при полном возбуждении ТЭД	$F_{кр}$, кН	$v_{пр}$, км/ч	$F_{к пр}$, кН	Число тормозных осей	Нажатие тормозных колодок, кН/ось
	максимальная	в порожнем состоянии								
ВЛ80 ^С	192	188	32,8	110	29П 25П	502,3 512,7	43,5 37,3	678,1	8	140
1,5ВЛ80 ^С	288	282	49,3	110	29П 25П	753,4 769,0	43,5 37,3	1017,1	12	140
БКГ1	200	192,5	38,15	120	–	533,0	65,0	760,0	8	160
БКГ2	150	144	22,96	120	–	400	65,0	570,0	6	160
2БКГ2	300	288	45,92	120	–	800	65,0	1140,0	12	160
М62УК	128	120	17,4	100	–	196	20,9	370	6	120
М62К	118	113	17,4	100	–	196	20,9	350	6	120
М62, ДМ62	120	116	17,4	100	–	196	20,9	350	6	120

Окончание таблицы А.1

Серия локомотива	Учётная масса, т		Длина, м	Конструкционная скорость v_k , км/ч	Режим работы при полном возбуждении ТЭД	$F_{кр}$, кН	v_p , км/ч	$F_{кр}$, кН	Число тормозных осей	Нажатие тормозных колодок, кН/ось
	максимальная	в порожнем состоянии								
2М62	240	232	34,8	100	—	392	20,9	705	12	120
2М62М	240	229	34,8	100	—	392	20,9	741	12	120
2М62К	245	234	34,8	100	—	392	20,9	710	12	120
2М62У	252	240	34,8	100	—	392	20,9	741	12	120
2М62УК	257	239	34,8	100	—	392	20,9	741	12	120
2М62УМК	257	239	34,8	100	—	392	20,9	741	12	120
2ТЭ116	281	266	36,3	100	—	510	24,0	797	12	120
2ТЭ10М, 2ТЭ10У, 2ТЭ10МК, 2ТЭ10УК	276	260	33,9	100	—	496	24,6	928	12	120

Таблица А.2 – Длина вагонов (для определения длины поезда)

Тип подвижного состава	Число осей	Грузоподъёмность, т	Длина, м
<i>Вагоны</i>			
Почтовый	4	22	24,5
Багажный	4	26	24,5
Крытый	4	60	11,6
		68	14,7
		54	15,4
		22	17,5
		20	18,1
		42	24,7
		42	25,5
Хоппер	4	65	10,8
		63	10,9
		67	11,9
		64	12,0
		67	12,2
		64	13,2
		65	14,7
Полувагон	4	69	12,7
		69	13,9
		64	13,9
		69	14,4
		58	17,8
	6	94	15,4
	8	225	20,2
Платформа	4	60	14,2
		70	14,6
		60	19,6
		20	21,7
	6	93	15,2
		92	25,2
Цистерна	4	60	12,0
		52	12,1
		50	12,2
		50	12,4
		62	13,6
		52	15,1
		54	15,7
	8	125	18,7
		120	21,1
		92	24,0

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Расчётные выражения для вычисления основного удельного сопротивления движению

Таблица Б.1 – На звеньевом пути

Подвижной состав	Расчётное выражение
Электровозы и тепловозы: – в режиме тяги – на выбеге (холостой ход)	$w'_o = 18,6 + 0,1 v + 0,0029 v^2$ $w_x = 23,5 + 0,11 v + 0,0034 v^2$
Четырёхосные вагоны: – при осевой нагрузке $q_o \leq 6$ т/ось – при осевой нагрузке $q_o > 6$ т/ось	$w''_{o4} = 9,81 + 0,432 v + 0,0024 v^2$ $w''_{o4} = 5,2 + \frac{35,4 + 0,785 v + 0,027 v^2}{q_o}$
Четырёхосные цистерны	$w''_{o4} = 6,3 + \frac{28,7 + 0,464 v + 0,027 v^2}{q_o}$
Шестиосные вагоны: – при осевой нагрузке $q_o \leq 6$ т/ось – при осевой нагрузке $q_o > 6$ т/ось	$w''_{o6} = 9,81 + 0,43 v + 0,002 v^2$ $w''_{o6} = 6,9 + \frac{78,5 + 0,98 v + 0,024 v^2}{q_o}$
Восьмиосные вагоны при любой осевой нагрузке	$w''_{o8} = 6,9 + \frac{58,9 + 0,37 v + 0,021 v^2}{q_o}$
Вагоны рефрижераторных поездов ($q_o > 6$ т/ось)	$w''_{o\text{ реф}} = 6,7 + \frac{29,4 + 0,98 v + 0,025 v^2}{q_o}$

Таблица Б.2 – На бесстыковом пути

Подвижной состав	Расчётное выражение
Электровозы и тепловозы: – в режиме тяги – на выбеге (холостой ход)	$w'_o = 18,6 + 0,08 v + 0,0024 v^2$ $w_x = 23,5 + 0,09 v + 0,0034 v^2$
Четырёхосные вагоны: – при осевой нагрузке $q_o \leq 6$ т/ось – при осевой нагрузке $q_o > 6$ т/ось	$w''_{o4} = 9,81 + 0,412 v + 0,0016 v^2$ $w''_{o4} = 5,2 + \frac{34,2 + 0,732 v + 0,022 v^2}{q_o}$
Четырёхосные цистерны	$w''_{o4} = 6,3 + \frac{27,9 + 0,436 v + 0,022 v^2}{q_o}$
Шестиосные вагоны: – при осевой нагрузке $q_o \leq 6$ т/ось – при осевой нагрузке $q_o > 6$ т/ось	$w''_{o6} = 9,8 + 0,41 v + 0,0016 v^2$ $w''_{o6} = 6,9 + \frac{78,5 + 0,78 v + 0,02 v^2}{q_o}$
Восьмиосные вагоны при любой осевой нагрузке	$w''_{o8} = 6,9 + \frac{58,9 + 0,26 v + 0,017 v^2}{q_o}$
Вагоны рефрижераторных поездов ($q_o > 6$ т/ось)	$w''_{o \text{ реф}} = 6,9 + \frac{29,5 + 0,88 v + 0,02 v^2}{q_o}$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

Тяговые характеристики локомотивов

Таблица В.1 – Тяговые характеристики электровоза БКГ1

v, км/ч	F _{кз} кН												
	1Т	2Т	3Т	4Т	5Т	6Т	7Т	8Т	9Т	10Т	11Т	12Т	13Т
0,0	128	250	375	500	620	760	760	760	760	760	760	760	760
7,5	128	250	375	500	620	760	760	760	760	760	760	760	760
10,0	0	250	375	500	620	760	760	760	760	760	760	760	760
15,0	–	250	375	500	620	739	739	739	739	739	739	739	739
20,0	–	0	375	500	620	719	719	719	719	719	719	719	719
22,0	–	–	375	500	620	710	710	710	710	710	710	710	710
25,0	–	–	234	500	620	698	698	698	698	698	698	698	698
30,0	–	–	0	500	620	677	677	677	677	677	677	677	677
35,0	–	–	–	250	620	657	657	657	657	657	657	657	657
37,5	–	–	–	123	620	646	646	646	646	646	646	646	646
40,0	–	–	–	0	498	636	636	636	636	636	636	636	636
45,0	–	–	–	–	249	616	616	616	616	616	616	616	616
47,5	–	–	–	–	125	606	605	605	605	605	605	605	605
50,0	–	–	–	–	0	500	595	595	595	595	595	595	595
55,0	–	–	–	–	–	250	574	574	574	574	574	574	574
58,5	–	–	–	–	–	75	560	560	560	560	560	560	560
60,0	–	–	–	–	–	0	490	554	554	554	554	554	554
65,0	–	–	–	–	–	–	245	533	533	533	533	533	533
70,0	–	–	–	–	–	–	0	494	494	494	494	494	494
80,0	–	–	–	–	–	–	–	0	432	432	432	432	432
90,0	–	–	–	–	–	–	–	–	0	384	384	384	384
100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	346	346	346
110	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	314	314
120	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	288

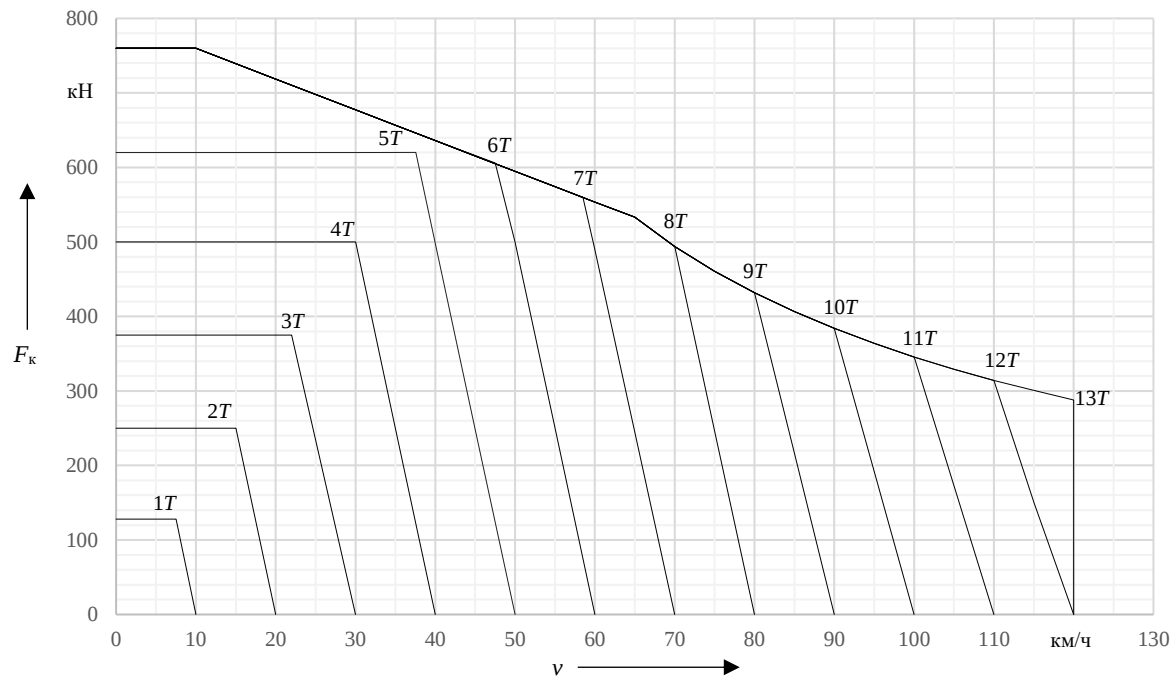


Рисунок В.1 – Тяговые характеристики электровоза БКГ1

Таблица В.2 – Тяговые характеристики электровоза БКГ2

v, км/ч	F _{кз} кН												
	1T	2T	3T	4T	5T	6T	7T	8T	9T	10T	11T	12T	13T
0,0	70	160	240	320	400	480	570	570	560	570	570	570	570
9,0	70	160	240	320	400	480	570	570	561	570	570	570	570
10,0	0	160	240	320	400	480	570	570	561	570	570	570	570
18,0	–	160	240	320	400	480	545	545	545	545	545	545	545
20,0	–	0	240	320	400	480	539	539	539	539	539	539	539
27,0	–	–	240	320	400	480	517	517	517	517	517	517	517
30,0	–	–	0	320	400	480	508	508	508	508	508	508	508
36,0	–	–	–	320	400	480	490	490	490	490	490	490	490
40,0	–	–	–	0	400	477	477	477	477	477	477	477	477
45,0	–	–	–	–	400	462	462	462	462	462	462	462	462
50,0	–	–	–	–	0	446	446	446	446	446	446	446	446
55,0	–	–	–	–	–	431	431	431	431	431	431	431	431
60,0	–	–	–	–	–	0	415	415	415	415	415	415	415
65,0	–	–	–	–	–	–	400	400	400	400	400	400	400
70,0	–	–	–	–	–	–	0	374	374	374	374	374	374
75,0	–	–	–	–	–	–	–	350	350	350	350	350	350
80,0	–	–	–	–	–	–	–	0	328	328	328	328	328
85,0	–	–	–	–	–	–	–	–	308	308	308	308	308
90,0	–	–	–	–	–	–	–	–	0	290	290	290	290
95,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	273	273	273	273
100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	258	258	258
105	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	245	245	245
110	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	234	234
115	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	225	225
120	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	217

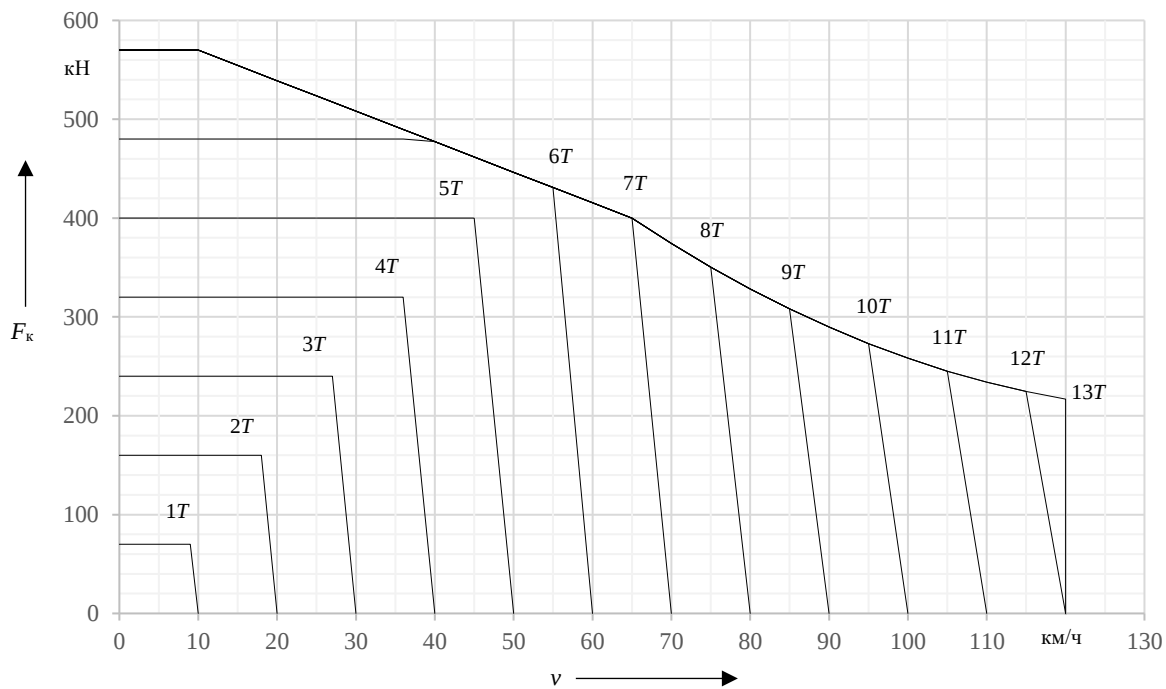


Рисунок В.2 – Тяговые характеристики электровоза БКГ2

Таблица В.3 – Тяговые характеристики электровоза 2БКГ2

v, км/ч	F _{кз} кН												
	1T	2T	3T	4T	5T	6T	7T	8T	9T	10T	11T	12T	13T
0,0	140	320	480	640	800	960	1140	1140	1120	1140	1140	1140	1140
9,0	140	320	480	640	800	960	1140	1140	1122	1140	1140	1140	1140
10,0	0	320	480	640	800	960	1140	1140	1122	1140	1140	1140	1140
18,0	—	320	480	640	800	960	1090	1090	1090	1090	1090	1090	1090
20,0	—	0	480	640	800	960	1078	1078	1078	1078	1078	1078	1078
27,0	—	—	480	640	800	960	1034	1034	1034	1034	1034	1034	1034
30,0	—	—	0	640	800	960	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016
36,0	—	—	—	640	800	960	980	980	980	980	980	980	980
40,0	—	—	—	0	800	954	954	954	954	954	954	954	954
45,0	—	—	—	—	800	924	924	924	924	924	924	924	924
50,0	—	—	—	—	0	892	892	892	892	892	892	892	892
55,0	—	—	—	—	—	862	862	862	862	862	862	862	862
60,0	—	—	—	—	—	0	830	830	830	830	830	830	830
65,0	—	—	—	—	—	—	800	800	800	800	800	800	800
70,0	—	—	—	—	—	—	0	748	748	748	748	748	748
75,0	—	—	—	—	—	—	—	700	700	700	700	700	700
80,0	—	—	—	—	—	—	—	0	656	656	656	656	656
85,0	—	—	—	—	—	—	—	—	616	616	616	616	616
90,0	—	—	—	—	—	—	—	—	0	580	580	580	580
95,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	546	546	546	546
100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	516	516	516
105	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	490	490	490
110	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	468	468
115	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	450	450
120	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	434

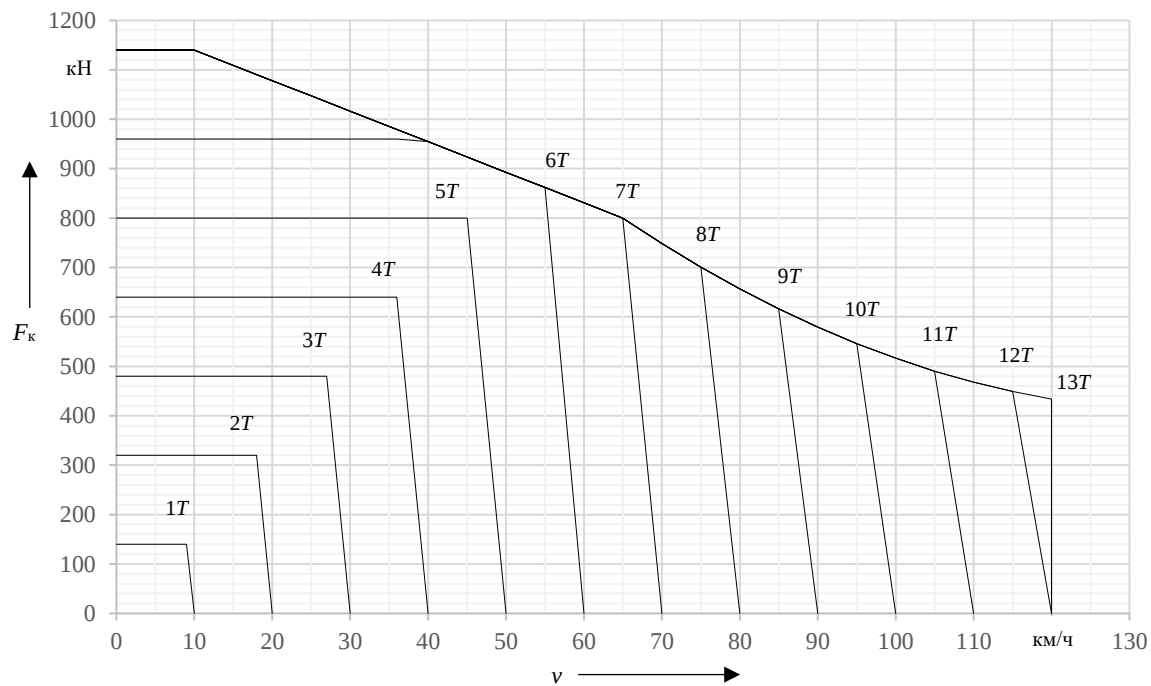


Рисунок В.3 – Тяговые характеристики электровоза 2БКГ2

Таблица В.4 – Тяговые характеристики электровоза ВЛ80^С

v, км/ч	F _к , кН										
	5П	9П	13П	17П	21П	25П	29П	33П	33П		
									ОП1	ОП2	ОП3
1,0	677,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,5	469,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,0	265,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7,5	168,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	116,5	482,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	80,4	338,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15,0	57,2	239,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17,5	—	174,5	468,0	—	—	—	—	—	—	—	—
20,0	—	131,2	351,1	—	—	—	—	—	—	—	—
22,5	—	101,8	266,2	—	—	—	—	—	—	—	—
25,0	—	80,8	205,7	455,6	—	—	—	—	—	—	—
30,0	—	53,4	132,8	297,5	—	—	—	—	—	—	—
35,0	—	—	93,7	196,7	367,5	—	—	—	—	—	—
40,0	—	—	67,8	135,4	250,6	423,9	—	—	—	—	—
45,0	—	—	52,4	99,1	179,3	300,4	459,5	—	—	—	—
50,0	—	—	—	77,2	136,1	218,9	341,2	491,0	—	—	—
55,0	—	—	—	62,9	108,4	166,3	256,2	374,7	441,5	517,4	—
60,0	—	—	—	52,9	87,8	132,0	196,5	288,7	353,9	422,1	469,9
70,0	—	—	—	—	57,7	90,1	127,1	186,8	243,6	294,0	340,3
80,0	—	—	—	—	—	63,1	91,9	129,7	181,3	219,1	259,3
90,0	—	—	—	—	—	—	68,4	95,6	140,3	171,6	209,5
100	—	—	—	—	—	—	52,0	73,7	110,1	136,7	174,3
110	—	—	—	—	—	—	—	58,7	89,7	111,2	149,1

Ограничение по сцеплению:

v, км/ч	v	0	8,6	15,9	23,0	30,6	37,3	43,5	50,0	52,9	56,7
F _к , кН	F _к	678,1	591,8	561,0	541,9	525,4	512,7	502,2	492,1	488,0	482,2

Ограничение по ослаблению возбуждения:

v, км/ч	v	56,7	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0	110,0
F _к , кН	F _к	482,5	422,1	294,0	219,1	171,6	136,7	111,2

Максимальные тяговые усилия электровоза ВЛ80^С при движении:

- в продолжительном режиме $F_{к\infty} = 404,4$ кН, $v_{\infty} = 53,6$ км/ч;
- в часовом режиме $F_{кч} = 442,8$ кН, $v_{ч} = 51,9$ км/ч;
- на 29-й позиции $F_{кр29п} = 502,3$ кН, $v_{р29п} = 43,5$ км/ч;
- на 25-й позиции $F_{кр25п} = 512,7$ кН, $v_{р25п} = 37,3$ км/ч.

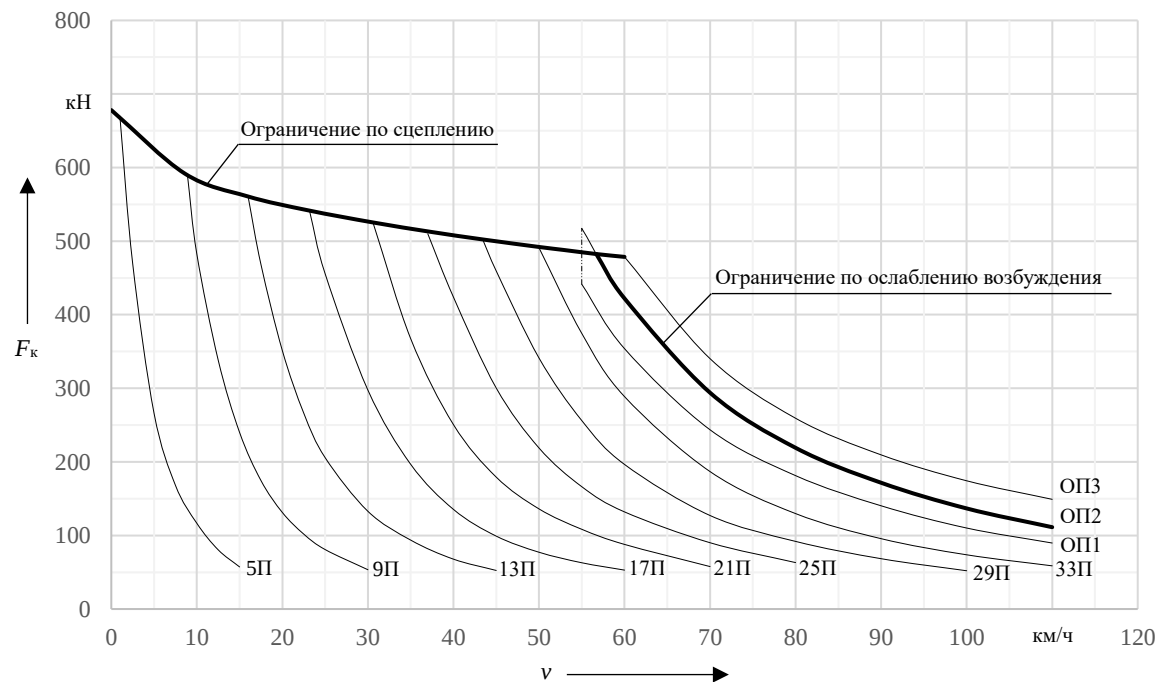


Рисунок В.4 – Тяговые характеристики электровоза ВЛ80^С

Таблица В.5 – Тяговые характеристики электровоза 1,5ВЛ80^С

v, км/ч	F _{кв} кН										
	5П	9П	13П	17П	21П	25П	29П	33П	33П		
									ОП1	ОП2	ОП3
1,0	1016,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,5	704,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,0	389,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7,5	252,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	174,8	723,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	120,6	507,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15,0	85,7	359,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17,5	—	261,7	702,0	—	—	—	—	—	—	—	—
20,0	—	196,7	526,6	—	—	—	—	—	—	—	—
22,5	—	152,7	399,3	—	—	—	—	—	—	—	—
25,0	—	121,2	308,5	683,4	—	—	—	—	—	—	—
30,0	—	80,2	199,2	446,2	—	—	—	—	—	—	—
35,0	—	—	140,5	295,1	551,2	—	—	—	—	—	—
40,0	—	—	101,6	203,1	375,9	635,8	—	—	—	—	—
45,0	—	—	78,6	148,6	268,9	450,7	689,3	—	—	—	—
50,0	—	—	—	115,8	204,2	328,4	511,8	736,6	—	—	—
55,0	—	—	—	94,3	162,6	249,4	384,3	562,1	662,2	776,1	—
60,0	—	—	—	79,4	131,7	198,0	294,8	433,0	530,9	633,2	704,8
70,0	—	—	—	—	86,6	135,2	190,6	280,2	365,4	441,0	510,5
80,0	—	—	—	—	—	94,6	137,9	194,6	272,0	328,7	389,0
90,0	—	—	—	—	—	—	102,6	143,4	210,4	254,7	314,2
100,0	—	—	—	—	—	—	78,0	110,6	165,2	205,1	261,4
110,0	—	—	—	—	—	—	—	88,0	134,5	166,7	223,6

Ограничение по сцеплению:

v, км/ч	0	8,6	15,9	23,0	30,6	37,3	43,5	50,0	52,9	56,7
F _{кв} кН	1017,1	887,7	841,5	812,9	788,0	769,0	753,3	738,2	732,0	723,8

Ограничение по ослаблению возбуждения:

v, км/ч	56,7	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0	110,0
F _{кв} кН	723,8	633,2	441,0	328,7	257,4	205,1	166,7

Максимальные тяговые усилия электровоза 1,5ВЛ80^С при движении:

- в продолжительном режиме $F_{к\infty} = 606,6$ кН, $v_{\infty} = 53,6$ км/ч;
- в часовом режиме $F_{кч} = 664,2$ кН, $v_{ч} = 51,9$ км/ч;
- на 29-й позиции $F_{кр29п} = 753,4$ кН, $v_{р29п} = 43,5$ км/ч;
- на 25-й позиции $F_{кр25п} = 769,0$ кН, $v_{р25п} = 37,3$ км/ч.

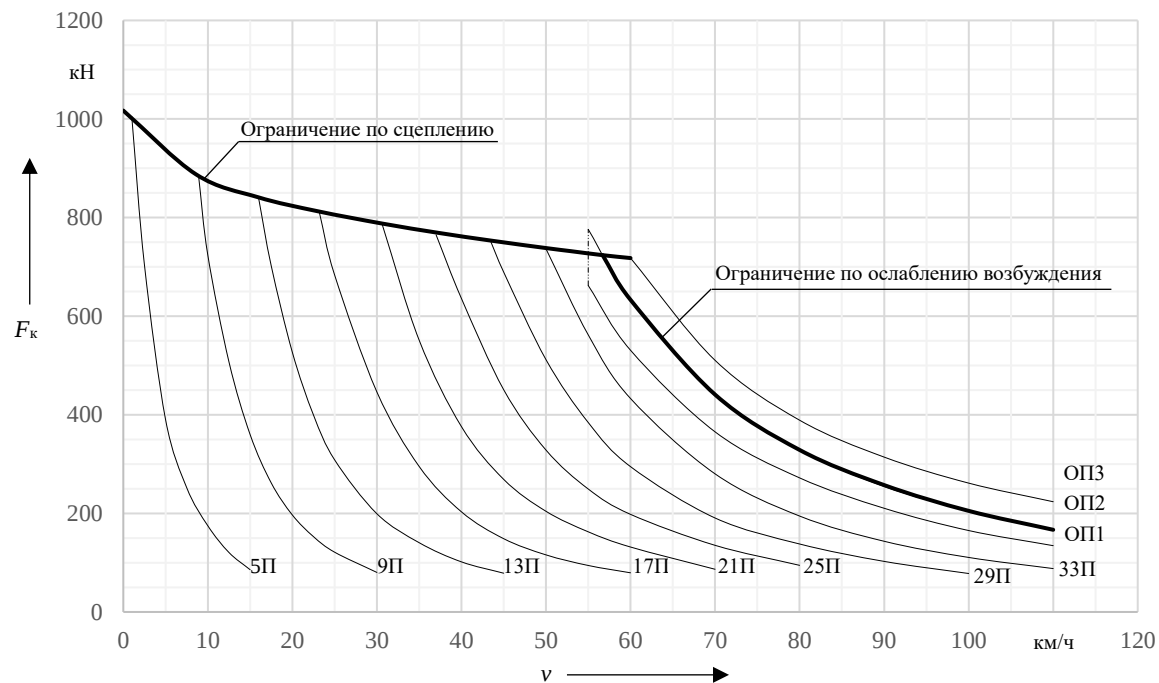
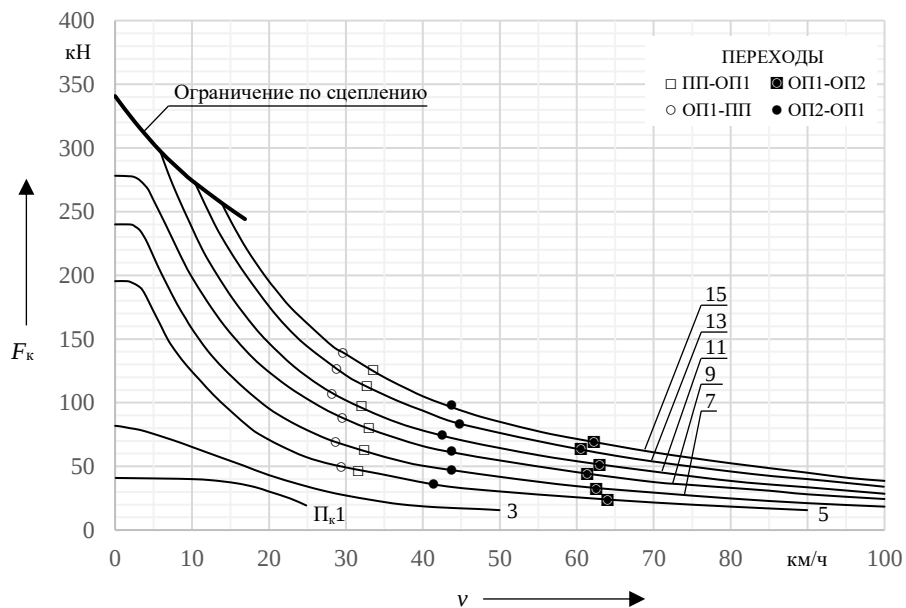


Рисунок В.5 – Тяговые характеристики электровоза 1,5ВЛ80С

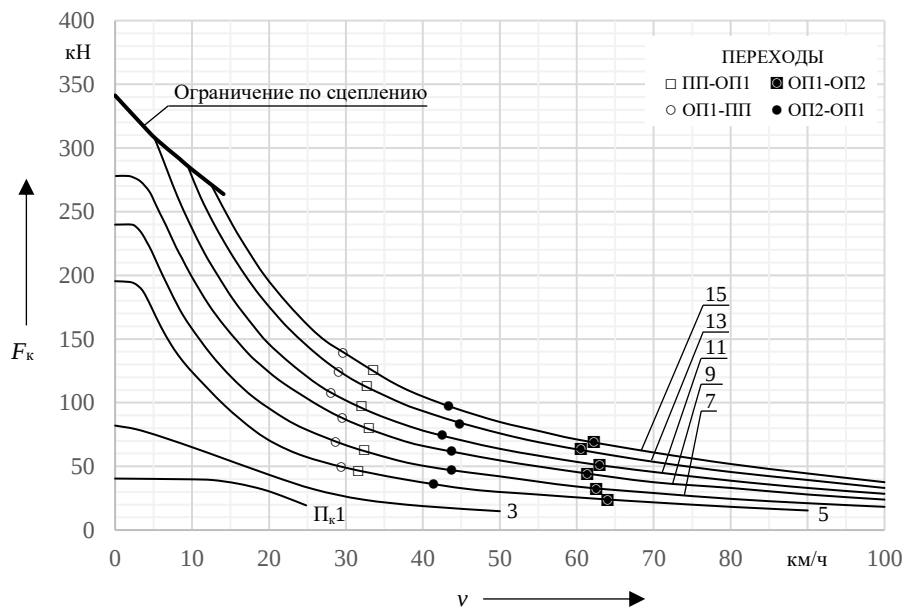


Параметры тепловоза М62:

- сцепной вес $P_{\text{сч}} = 115$ т;
- диаметр колёсных пар $D = 1050$ мм;
- передаточное отношение редуктора $\mu = 4,41$.

v, км/ч	ПП	ОП1	ОП2
	F_k , кН		
0	338	–	–
5	300	–	–
10	274	–	–
15	255	–	–
При Π_{k15}			
20	196	–	–
25	160	–	–
29	141	141	–
30	139	139	–
33,5	124	124	–
40	–	104	–
43,5	–	96	96
50	–	85	85
60	–	71	71
61	–	70	70
70	–	–	61
80	–	–	52
90	–	–	44
100	–	–	38

Рисунок В.6 – Тяговые характеристики тепловоза М62

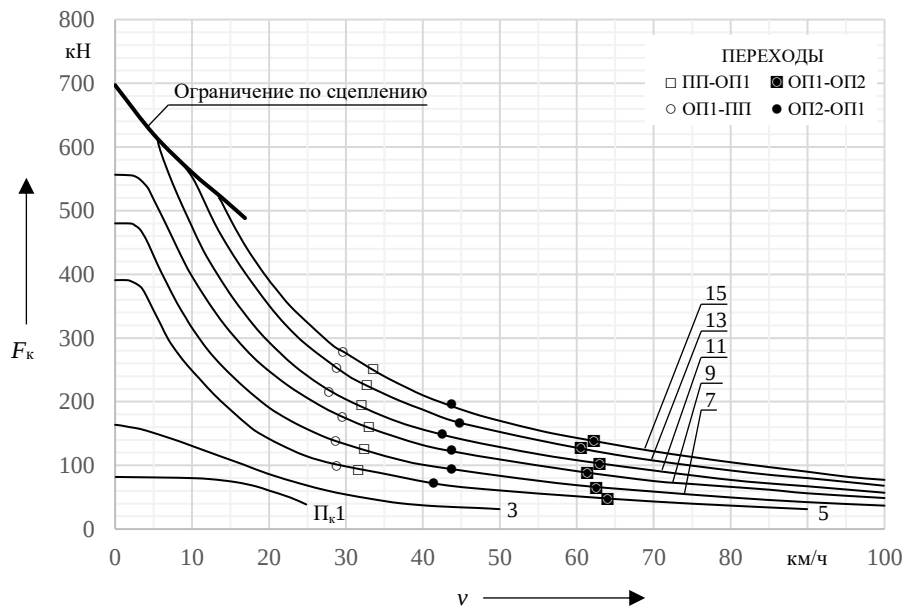


Параметры тепловоза ДМ62:

- сцепной вес $P_{\text{сч}} = 115$ т;
- диаметр колёсных пар $D = 1050$ мм;
- передаточное отношение редуктора $\mu = 4,41$.

v, км/ч	ПП	ОП1	ОП2
	F_k , кН		
0	338	–	–
5	307	–	–
10	284	–	–
При $\Pi_{к15}$			
15	260	–	–
20	196	–	–
25	160	–	–
29	141	141	–
30	139	139	–
33,5	124	124	–
40	–	104	–
43,5	–	96	96
50	–	85	85
60	–	71	71
61	–	70	70
70	–	–	61
80	–	–	52
90	–	–	44
100	–	–	38

Рисунок В.7 – Тяговые характеристики тепловоза ДМ62

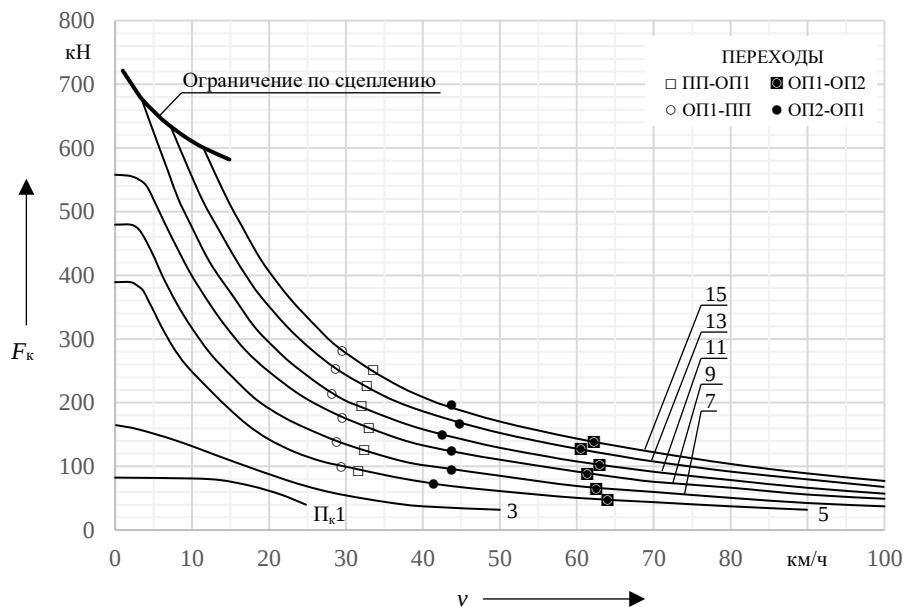


Параметры тепловоза 2М62:

- сцепной вес $P_{сч} = 237$ т;
- диаметр колёсных пар $D = 1050$ мм;
- передаточное отношение редуктора $\mu = 4,41$.

v , км/ч	ПП	ОП1	ОП2
	F_k , кН		
0	697	–	–
5	620	–	–
10	566	–	–
При Пк15			
15	525	–	–
20	382	–	–
25	320	–	–
29	282	282	–
30	278	278	–
33,5	248	248	–
40	–	209	–
43,5	–	193	193
50	–	170	170
60	–	143	143
61	–	141	141
70	–	–	122
80	–	–	104
90	–	–	89
100	–	–	76

Рисунок В.8 – Тяговые характеристики тепловоза 2М62

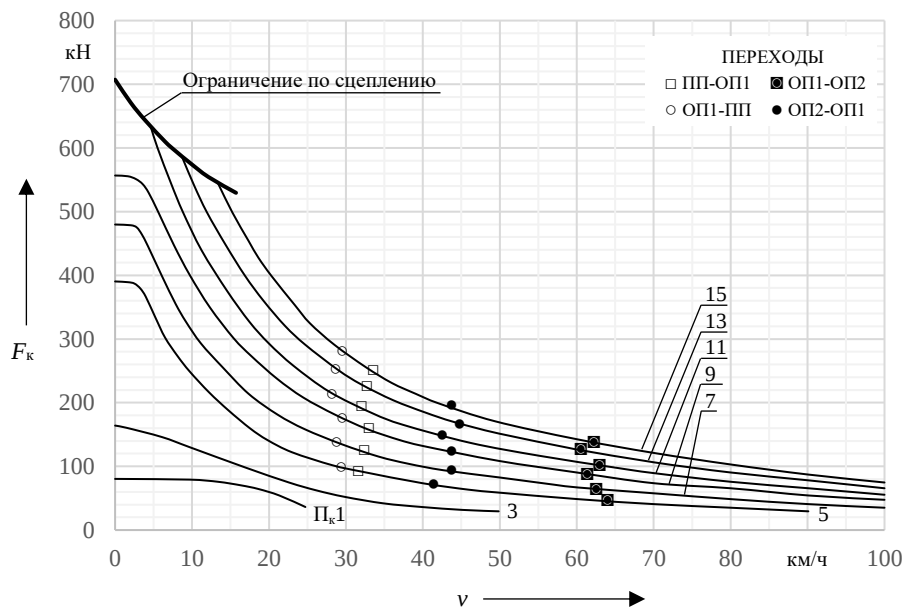


Параметры тепловоза 2М62У:

- сцепной вес $P_{\text{сч}} = 247$ т;
- диаметр колёсных пар $D = 1050$ мм;
- передаточное отношение редуктора $\mu = 4,41$.

v, км/ч	ПП	ОП1	ОП2
	F_k , кН		
0	727	–	–
5	659	–	–
10	609	–	–
При $\Pi_{к15}$			
15	520	–	–
20	392	–	–
25	331	–	–
29	287	287	–
30	248	278	–
33,5	124	248	–
40	–	209	–
43,5	–	193	193
50	–	170	170
60	–	143	143
61	–	141	141
70	–	–	122
80	–	–	104
90	–	–	89
100	–	–	76

Рисунок В.9 – Тяговые характеристики тепловоза 2М62У

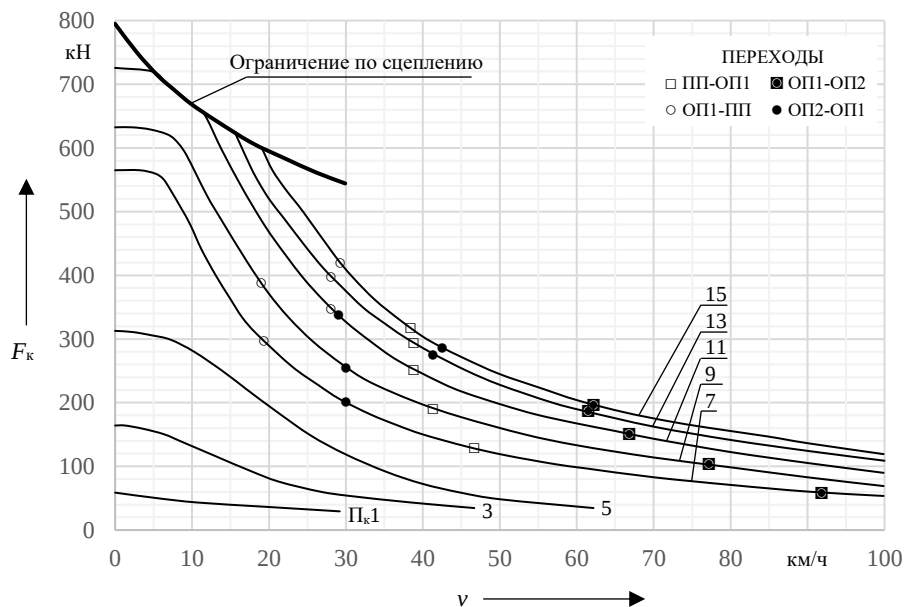


Параметры тепловоза 2М62К:

- сцепной вес $P_{сч} = 238$ т;
- диаметр колёсных пар $D = 1050$ мм;
- передаточное отношение редуктора $\mu = 4,41$.

v , км/ч	ПП	ОП1	ОП2
	F_k , кН		
0	703	–	–
5	621	–	–
10	567	–	–
15	506	–	–
При Пк15			
20	400	–	–
25	331	–	–
29	287	287	–
30	278	278	–
33,5	248	248	–
40	–	209	–
43,5	–	193	193
50	–	170	170
60	–	143	143
61	–	141	141
70	–	–	122
80	–	–	104
90	–	–	89
100	–	–	76

Рисунок В.10 – Тяговые характеристики тепловоза 2М62К

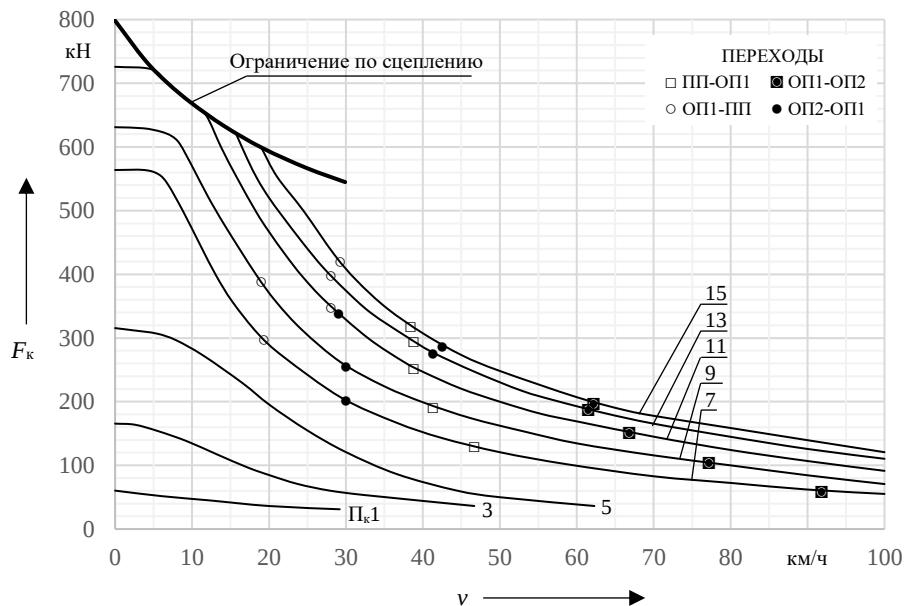


Параметры тепловоза 2ТЭ10М:

- сцепной вес $P_{сч} = 271$ т;
- диаметр колёсных пар $D = 1050$ мм;
- передаточное отношение редуктора $\mu = 4,41$.

v, км/ч	ПП	ОП1	ОП2
	F_k , кН		
0	797	–	–
5	723	–	–
10	668	–	–
15	626	–	–
19	600	–	–
При $P_{к15}$			
20	577	–	–
24,6	488	–	–
27,5	447	447	–
35	350	350	–
38	321	321	–
43	–	283	283
50	–	245	245
55	–	223	223
62,5	–	196	196
65	–	–	188
70	–	–	175
80	–	–	156
90	–	–	137
100	–	–	119

Рисунок В.11 – Тяговые характеристики тепловоза 2ТЭ10М

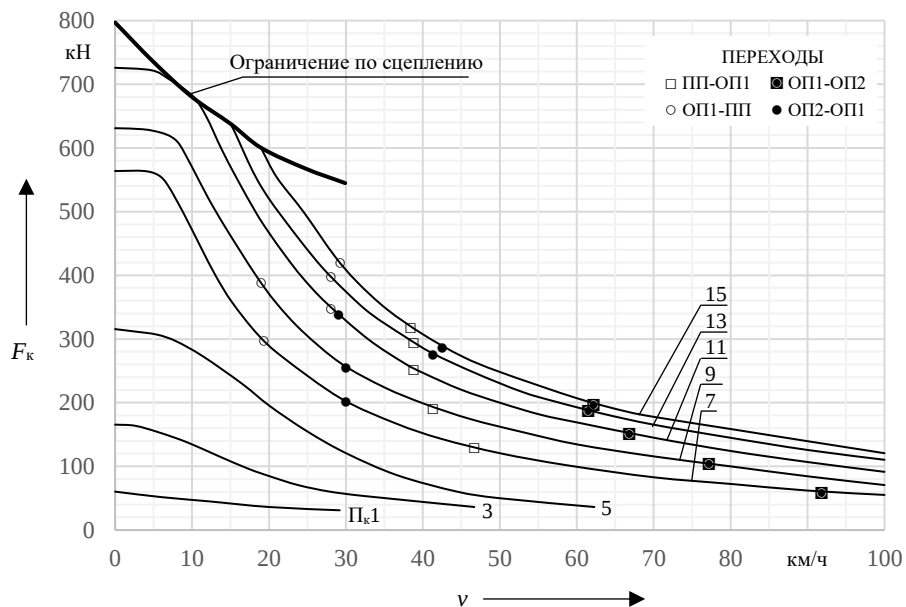


Параметры тепловоза 2ТЭ10МК:

- сцепной вес $P_{сч} = 271$ т;
- диаметр колёсных пар $D = 1050$ мм;
- передаточное отношение редуктора $\mu = 4,41$.

v , км/ч	ПП	ОП1	ОП2
	F_k , кН		
0	797	–	–
5	735	–	–
10	680	–	–
15	638	–	–
19	600	–	–
При $P_{к15}$			
20	577	–	–
24,6	496	–	–
27,5	447	447	–
35	350	350	–
38	321	321	–
43	–	283	283
50	–	245	245
55	–	223	223
62,5	–	196	196
65	–	–	188
70	–	–	175
80	–	–	156
90	–	–	137
100	–	–	119

Рисунок В.12 – Тяговые характеристики тепловоза 2ТЭ10МК

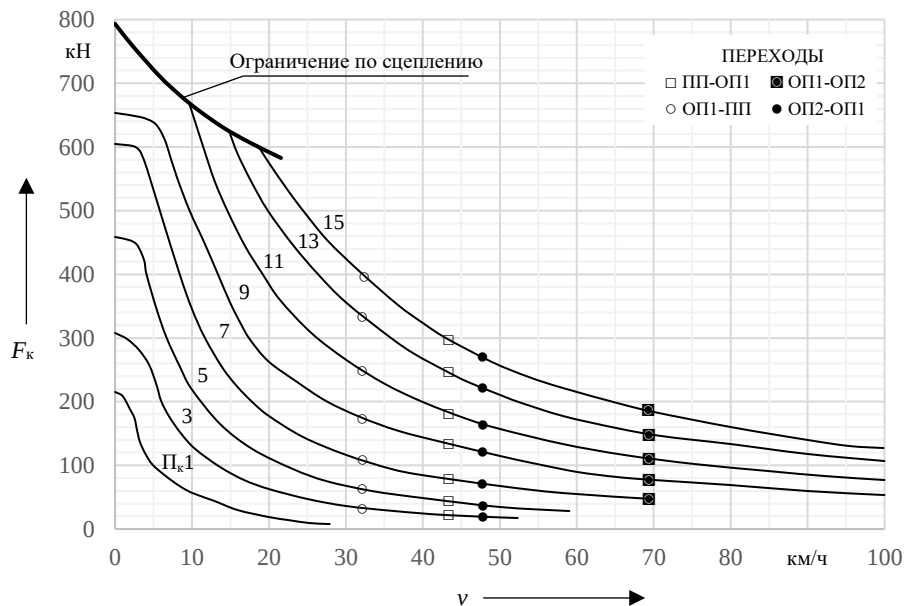


Параметры тепловоза 2ТЭ10У:

- сцепной вес $P_{сч} = 271$ т;
- диаметр колёсных пар $D = 1050$ мм;
- передаточное отношение редуктора $\mu = 4,41$.

v , км/ч	ПП	ОП1	ОП2
	F_k , кН		
0	797	–	–
5	735	–	–
10	680	–	–
15	638	–	–
19	600	–	–
При $P_{к15}$			
20	577	–	–
24,6	496	–	–
27,5	447	447	–
35	350	350	–
38	321	321	–
43	–	283	283
50	–	245	245
55	–	223	223
62,5	–	196	196
65	–	–	188
70	–	–	175
80	–	–	156
90	–	–	137
100	–	–	119

Рисунок В.13 – Тяговые характеристики тепловоза 2ТЭ10У



Параметры тепловоза 2ТЭ116

- сцепной вес $P_{сч} = 271$ т;
- диаметр колёсных пар $D = 1050$ мм;
- передаточное отношение редуктора $\mu = 4,41$.

v , км/ч	ПП	ОП1	ОП2
	F_k , кН		
0	797	–	–
5	723	–	–
10	668	–	–
15	626	–	–
19,5	596	–	–
При $\Pi_{к15}$			
24	510	–	–
30	424	–	–
32	400	400	–
40	322	322	–
43,5	295	295	–
46	–	279	279
50	–	256	256
58,5	–	219	219
70	–	–	184
80	–	–	159
90	–	–	139
100	–	–	126

Рисунок В.14 – Тяговые характеристики тепловоза 2ТЭ116

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(справочное)

Токовые характеристики электровозов

Таблица Г.1 – Токовые характеристики электровоза БКГ1 (активный ток)

v , км/ч	I_{da} , А												
	1T	2T	3T	4T	5T	6T	7T	8T	9T	10T	11T	12T	13T
0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,0	32	42	63	84	104	128	128	128	128	128	128	128	128
10,0	0	42	63	84	104	128	128	128	128	128	128	128	128
15,0	—	54	81	107	133	159	159	159	159	159	159	159	159
20,0	—	0	103	137	170	197	197	197	197	197	197	197	197
25,0	—	—	68	165	205	231	231	231	231	231	231	231	231
30,0	—	—	0	198	245	268	268	268	268	268	268	268	268
35,0	—	—	—	115	285	302	302	302	302	302	302	302	302
40,0	—	—	—	0	260	333	333	333	333	333	333	333	333
45,0	—	—	—	—	146	361	361	361	361	361	361	361	361
50,0	—	—	—	—	0	325	387	387	387	387	387	387	387
55,0	—	—	—	—	—	178	409	410	410	410	410	410	410
58,5	—	—	—	—	—	54	425	424	424	424	424	424	424
60,0	—	—	—	—	—	0	381	430	430	430	430	430	430
65,0	—	—	—	—	—	—	206	448	448	448	448	448	448
70,0	—	—	—	—	—	—	0	447	447	447	447	447	447
80,0	—	—	—	—	—	—	—	0	447	447	447	447	447
90,0	—	—	—	—	—	—	—	—	0	447	447	447	447
100,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	447	447	447
110,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	447	447
120,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	447

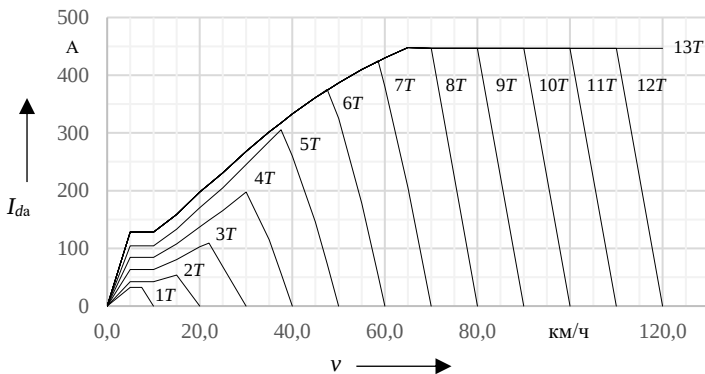


Рисунок Г.1 – Токовые характеристики электровоза БКГ1 (активный ток)

Таблица Г.2 – Токовые характеристики электровоза БКГ2 (активный ток)

v, км/ч	I _{da} , А												
	1T	2T	3T	4T	5T	6T	7T	8T	9T	10T	11T	12T	13T
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	21	24	36	49	61	73	86	86	86	86	86	86	86
10	0	27	40	54	67	81	96	96	96	96	96	96	96
18	–	41	61	81	101	122	138	138	138	138	138	138	138
20	–	0	66	88	110	132	148	148	148	148	148	148	148
27	–	–	86	115	144	172	185	185	185	185	185	185	185
30	–	–	0	126	158	190	201	201	201	201	201	201	201
36	–	–	–	151	189	227	231	231	231	231	231	231	231
40	–	–	–	0	209	250	250	250	250	250	250	250	250
45	–	–	–	–	235	270	271	271	271	271	271	271	271
50	–	–	–	–	0	290	290	290	290	290	290	290	290
55	–	–	–	–	–	307	306	307	307	307	307	307	307
60	–	–	–	–	–	0	323	323	323	323	323	323	323
65	–	–	–	–	–	–	336	336	336	336	336	336	336
70	–	–	–	–	–	–	0	339	339	339	339	339	339
75	–	–	–	–	–	–	–	340	340	340	340	340	340
80	–	–	–	–	–	–	–	0	339	339	339	339	339
85	–	–	–	–	–	–	–	–	338	338	338	338	338
90	–	–	–	–	–	–	–	–	0	337	337	337	337
95	–	–	–	–	–	–	–	–	–	335	335	335	335
100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	334	334	334
105	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	333	333	333
110	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	332	332
115	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	334	334
120	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	336

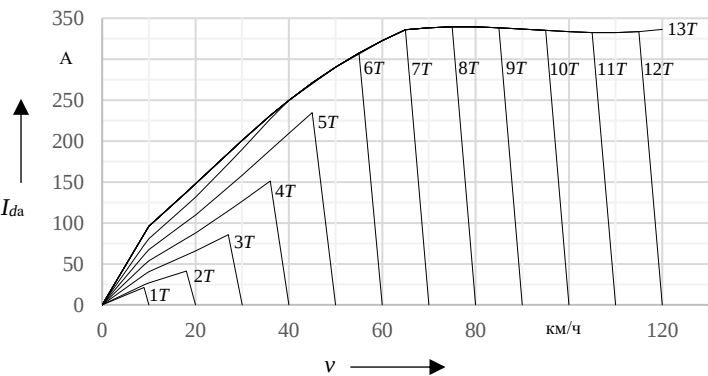


Рисунок Г.2 – Токовые характеристики электровоза БКГ2 (активный ток)

Таблица Г.3 – Токовые характеристики электровоза 2БКГ2 (активный ток)

v, км/ч	I _{da} , А												
	1T	2T	3T	4T	5T	6T	7T	8T	9T	10T	11T	12T	13T
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	42	49	73	97	121	146	173	173	173	173	173	173	173
10	0	54	81	108	135	162	192	192	192	192	192	192	192
18	–	83	122	162	203	243	275	275	275	275	275	275	275
20	–	0	132	176	220	263	296	296	296	296	296	296	296
27	–	–	171	230	287	345	370	370	370	370	370	370	370
30	–	–	0	253	316	379	402	402	402	402	402	402	402
36	–	–	–	302	378	454	463	463	463	463	463	463	463
40	–	–	–	0	419	499	499	499	499	499	499	499	499
45	–	–	–	–	469	540	542	542	542	542	542	542	542
50	–	–	–	–	0	580	580	580	580	580	580	580	580
55	–	–	–	–	–	615	613	615	615	615	615	615	615
60	–	–	–	–	–	0	645	645	645	645	645	645	645
65	–	–	–	–	–	–	672	672	672	672	672	672	672
70	–	–	–	–	–	–	0	677	677	677	677	677	677
75	–	–	–	–	–	–	–	679	679	679	679	679	679
80	–	–	–	–	–	–	–	0	679	679	679	679	679
85	–	–	–	–	–	–	–	–	677	677	677	677	677
90	–	–	–	–	–	–	–	–	0	674	674	674	674
95	–	–	–	–	–	–	–	–	–	670	670	670	670
100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	667	667	667
105	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	665	665	665
110	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	665	665
115	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	667	667
120	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	673

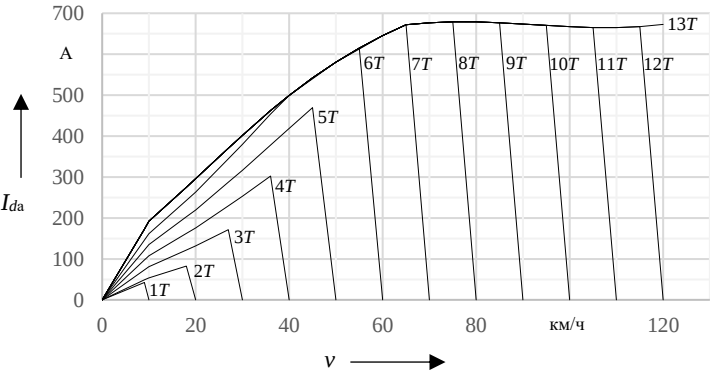


Рисунок Г.3 – Токовые характеристики электровоза 2БКГ2 (активный ток)

Таблица Г.4 – Токовые характеристики электровоза ВЛ80^С (активный ток)

v, км/ч	I _{da} , А											
	5П	9П	13П	17П	21П	25П	29П	33П	33П			
									ОП1	ОП2	ОП3	
0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
5	28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
10	19	77	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
15	14	53	140	—	—	—	—	—	—	—	—	
20	—	36	95	211	—	—	—	—	—	—	—	
30	—	24	52	110	214	335	—	—	—	—	—	
40	—	—	37	68	122	205	308	429	—	—	—	
50	—	—	—	51	85	133	206	300	348	408	460	
60	—	—	—	43	66	96	140	206	254	312	356	
70	—	—	—	—	55	78	108	155	200	247	287	
80	—	—	—	—	—	68	90	125	165	206	246	
90	—	—	—	—	—	—	79	107	140	178	218	
100	—	—	—	—	—	—	71	94	122	158	196	
110	—	—	—	—	—	—	—	85	113	145	184	

Ограничение по сцеплению:

v, км/ч	0	8,6	15,9	23,0	30,6	37,3	43,5	50,0	52,9	56,7
I _{da} , А	46	89	126	161	200	234	265	297	316	341

Ограничение по ослаблению возбуждения:

v, км/ч	56,7	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0	110,0
I _{da} , А	339	312	248	206	178	158	145

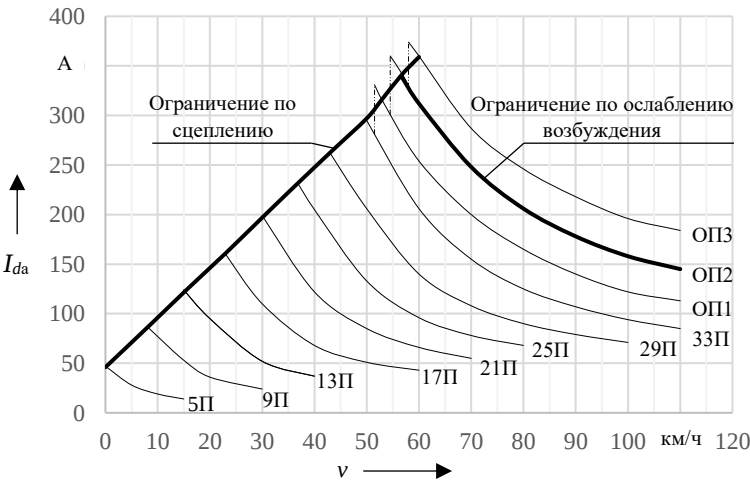


Рисунок Г.4 – Токовые характеристики электровоза ВЛ80^С (активный ток)

Таблица Г.5 – Токовые характеристики электровоза 1,5ВЛ80^С (активный ток)

v, км/ч	I _{da} , А											
	5П	9П	13П	17П	21П	25П	29П	33П	33П			
0	—	—	—	—	—	—	—	—	ОП1	ОП2	ОП3	
5	42	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
10	29	116	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
15	21	80	210	—	—	—	—	—	—	—	—	
20	—	54	143	317	—	—	—	—	—	—	—	
30	—	36	78	165	321	503	—	—	—	—	—	
40	—	—	56	102	183	308	462	644	—	—	—	
50	—	—	—	77	128	200	309	450	522	612	690	
60	—	—	—	65	99	144	210	309	381	468	534	
70	—	—	—	—	83	117	162	233	300	371	431	
80	—	—	—	—	—	102	135	188	248	309	369	
90	—	—	—	—	—	—	119	161	210	267	327	
100	—	—	—	—	—	—	107	141	183	237	294	
110	—	—	—	—	—	—	—	128	170	218	276	

Ограничение по сцеплению:

v, км/ч	v	0	8,6	15,9	23,0	30,6	37,3	43,5	50,0	52,9	56,7
I _{da} , А	I _{da}	69	134	189	242	300	350	397	446	474	511

Ограничение по ослаблению возбуждения:

v, км/ч	v	56,7	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0	110,0
I _{da} , А	I _{da}	509	467	372	309	267	237	217

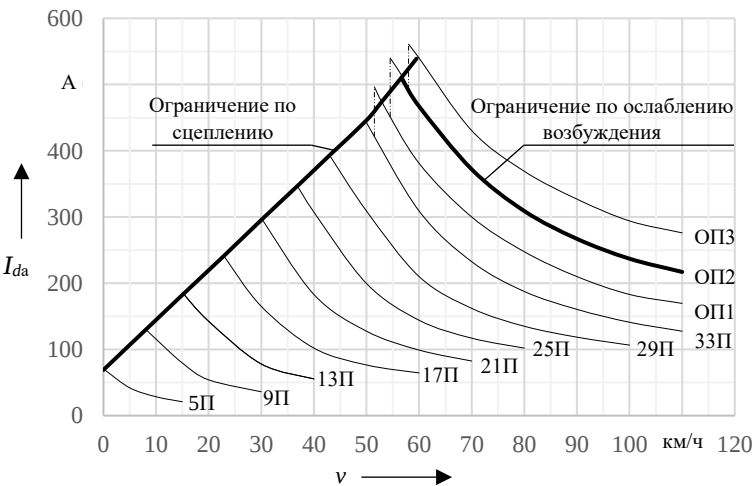


Рисунок Г.5 – Токовые характеристики электровоза 1,5ВЛ80^С (активный ток)

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(справочное)
Расходные характеристики тепловозов

Тепловоз М62

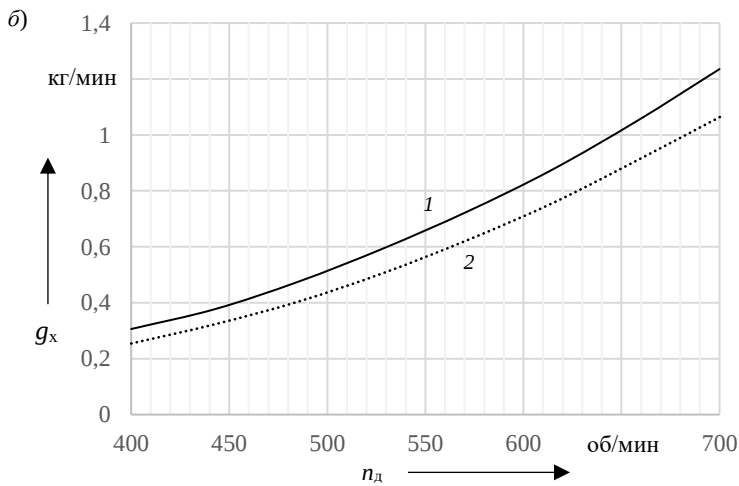
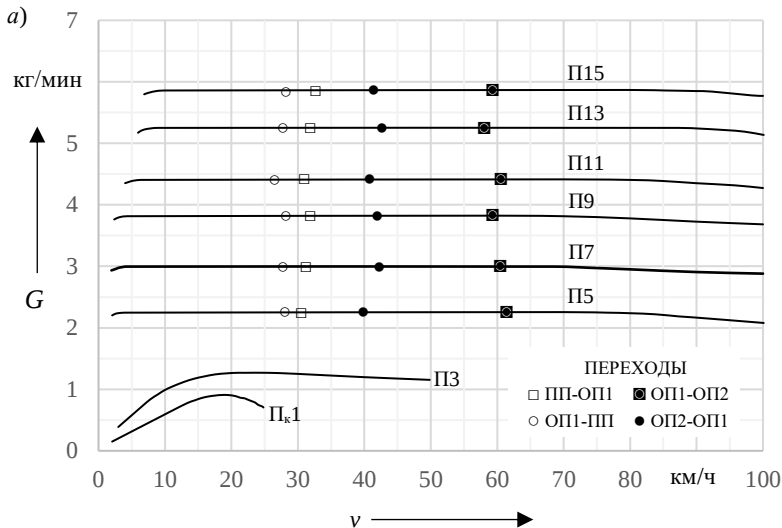


Рисунок Д.1 – Расход топлива в режиме тяги (а) и на холостом ходу (б):
1 – вентиляторы включены; 2 – вентиляторы выключены

Тепловоз ДМ62

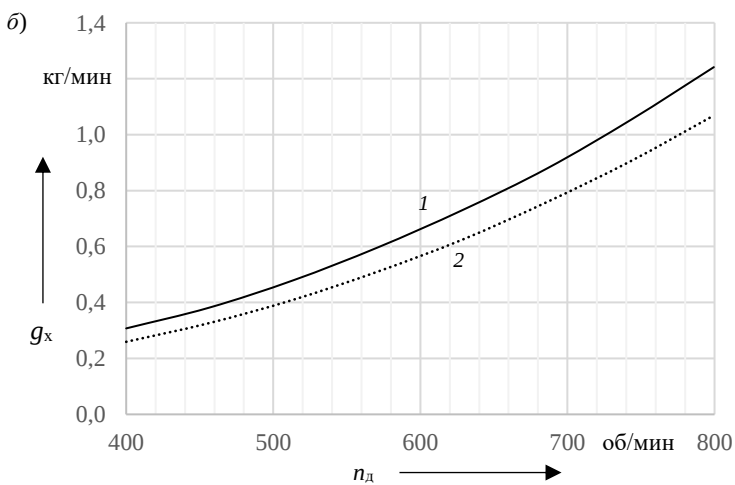
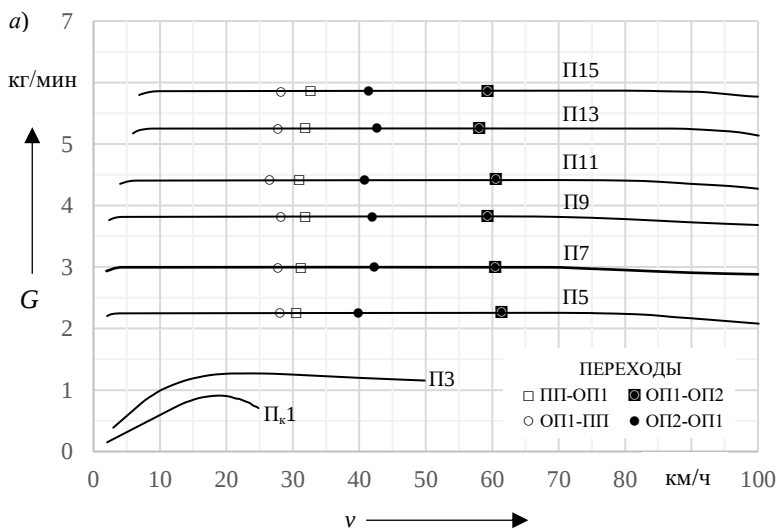


Рисунок Д.2 – Расход топлива в режиме тяги (а) и на холостом ходу (б):
1 – вентиляторы включены; 2 – вентиляторы выключены

Тепловоз 2М62У

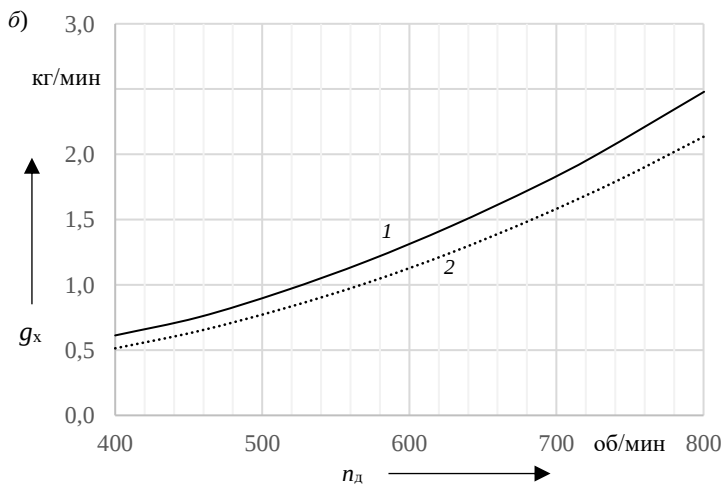
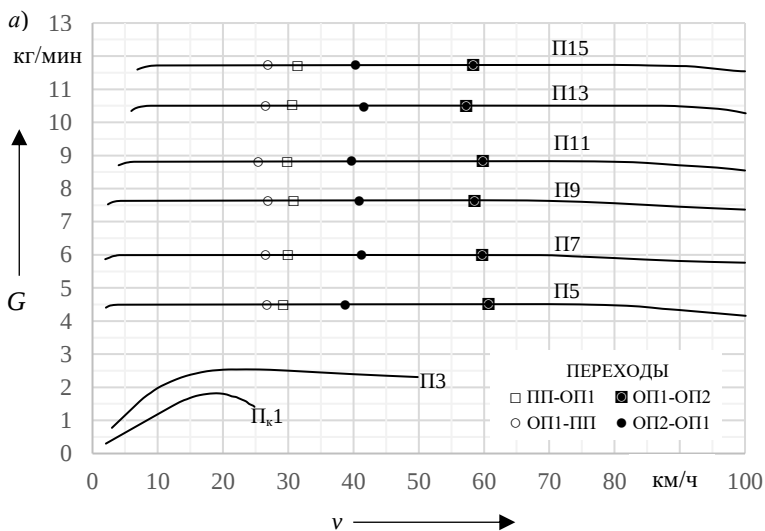


Рисунок Д.3 – Расход топлива в режиме тяги (а) и на холостом ходу (б):
1 – вентиляторы включены; 2 – вентиляторы выключены

Тепловоз 2М62К

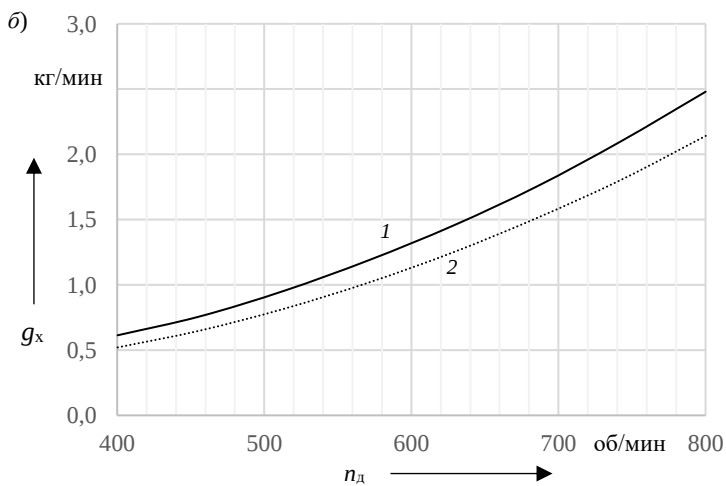
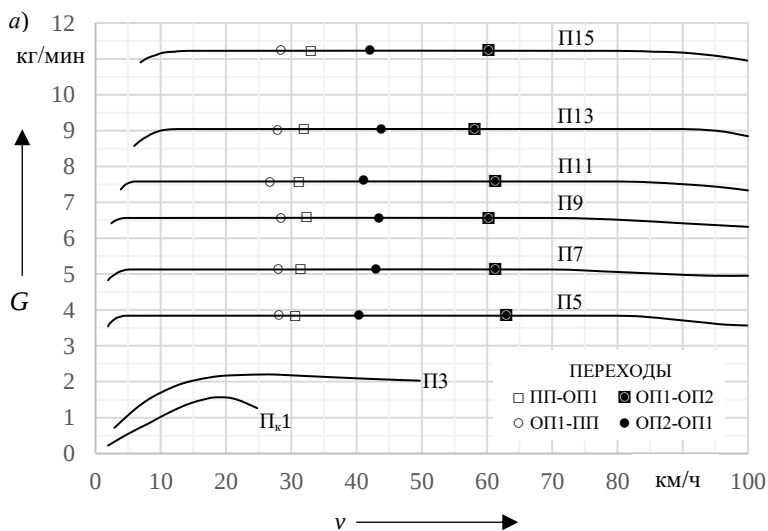


Рисунок Д.4 – Расход топлива в режиме тяги (а) и на холостом ходу (б):
1 – вентиляторы включены; 2 – вентиляторы выключены

Тепловоз 2ТЭ10М

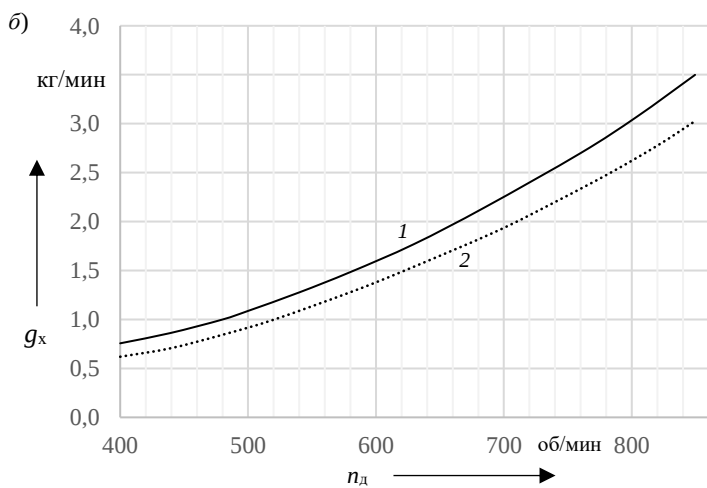
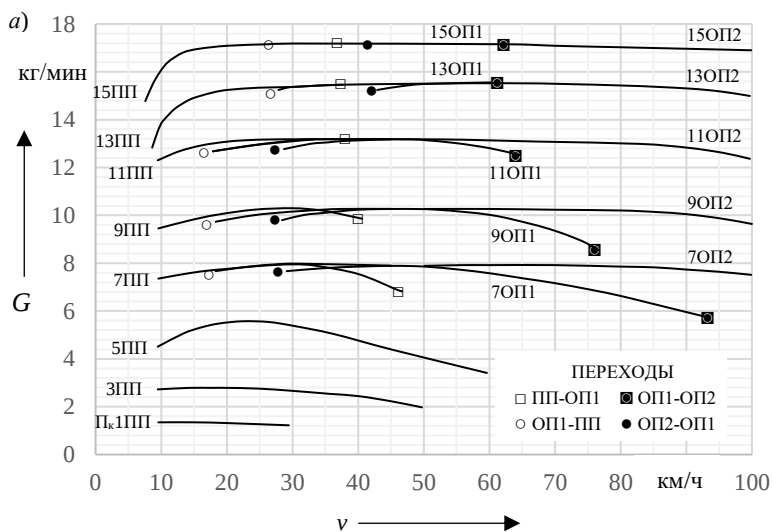


Рисунок Д.5 – Расход топлива в режиме тяги (а) и на холостом ходу (б):
1 – вентиляторы включены; 2 – вентиляторы выключены

Тепловоз 2ТЭ10МК

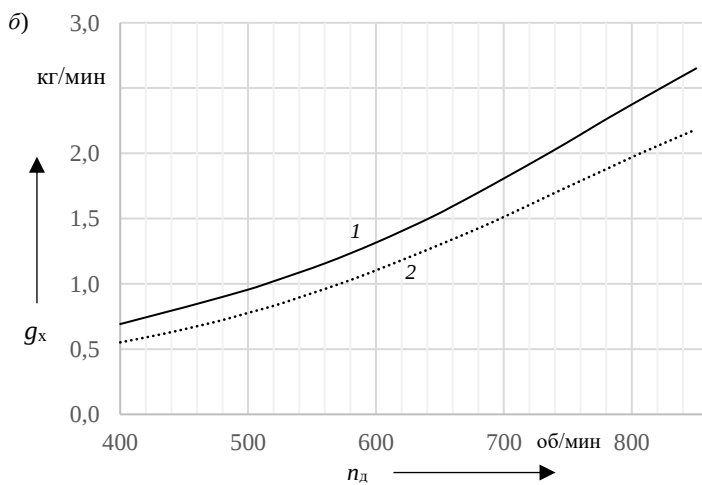
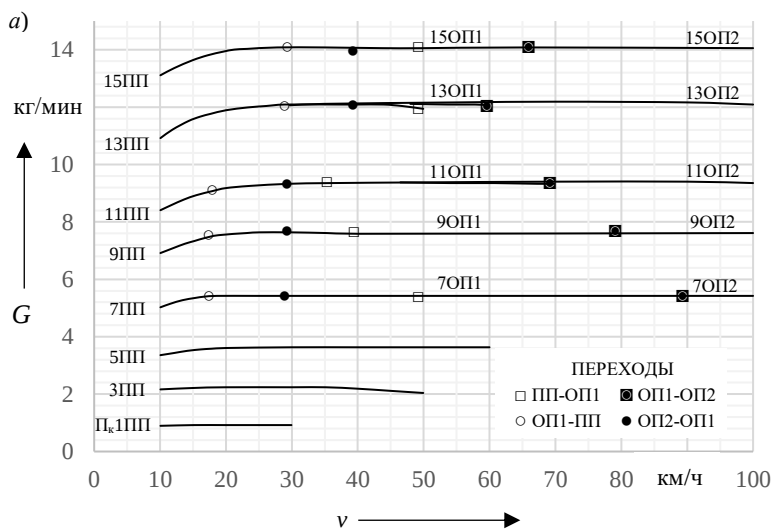


Рисунок Д.6 – Расход топлива в режиме тяги (а) и на холостом ходу (б):
1 – вентиляторы включены; 2 – вентиляторы выключены

Тепловоз 2ТЭ10У

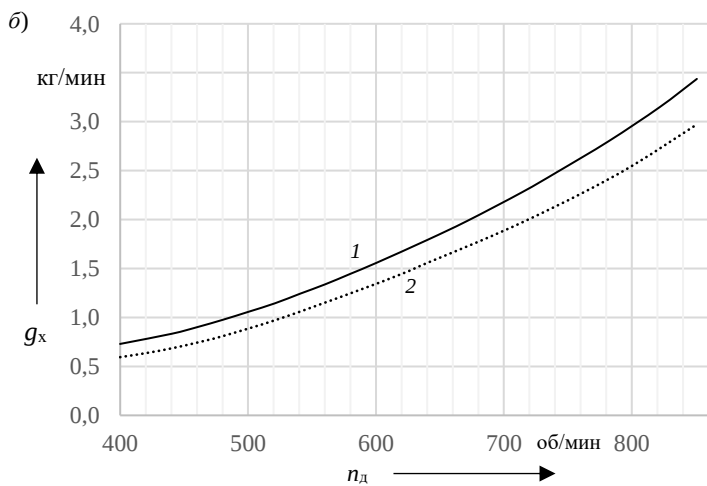
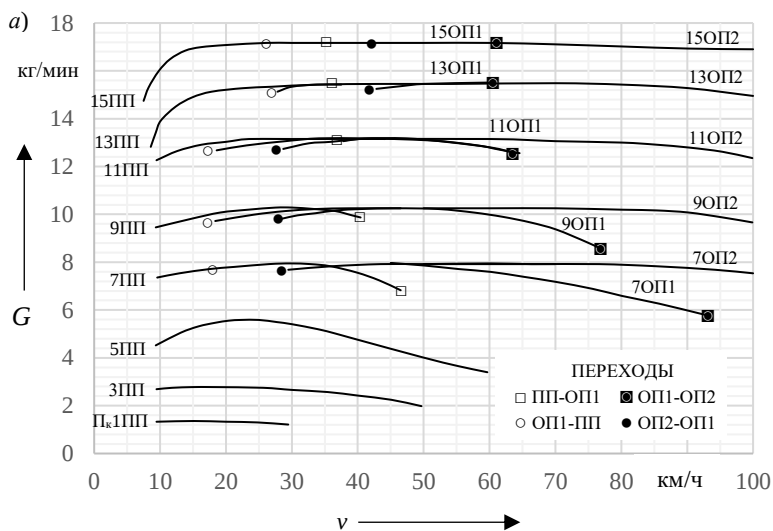


Рисунок Д.7 – Расход топлива в режиме тяги (а) и на холостом ходу (б):
1 – вентиляторы включены; 2 – вентиляторы выключены

Тепловоз 2ТЭ116

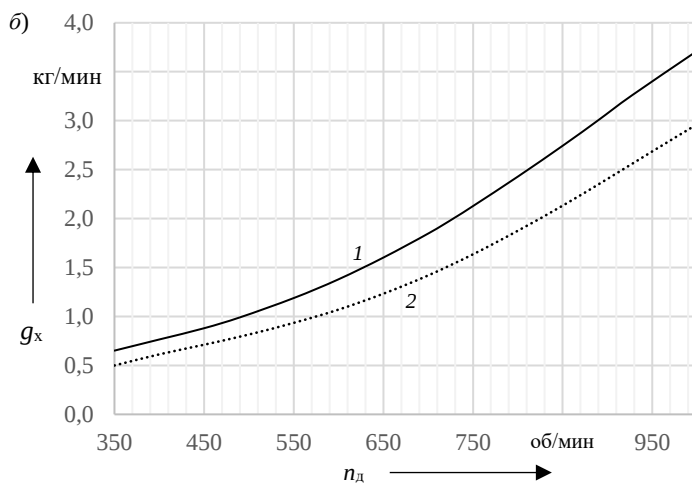
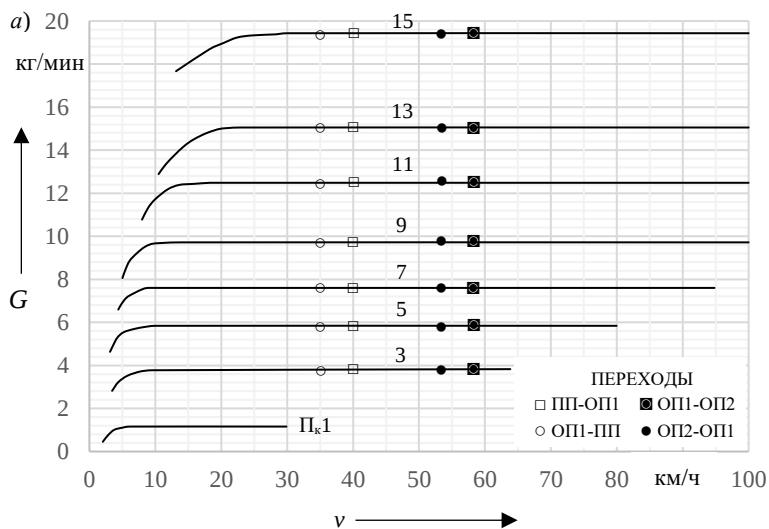


Рисунок Д.8 – Расход топлива в режиме тяги (а) и на холостом ходу (б):
1 – вентиляторы включены; 2 – вентиляторы выключены

Учебное издание
ФРЕНКЕЛЬ Семён Яковлевич
ЗАГОРЦЕВ Вадим Александрович

ТЯГОВЫЕ РАСЧЁТЫ ДЛЯ ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА
Пособие

Редактор Д. В. Марцинкевич
Технический редактор В. Н. Кучерова

Подписано в печать 23.04.2026 г. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 5,81. Уч.-изд. л. 5,46. Тираж 120 экз.
Зак. № 550 Изд. № 10.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя
и распространителя печатных изданий

№ 1/361 от 13.06.2014.
№ 2/104 от 01.04.2014.
№ 3/1583 от 14.11.2017.
Ул. Кирова, 34, 246653, Гомель.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е
(справочное)
Пример построения кривых скорости, времени и тока

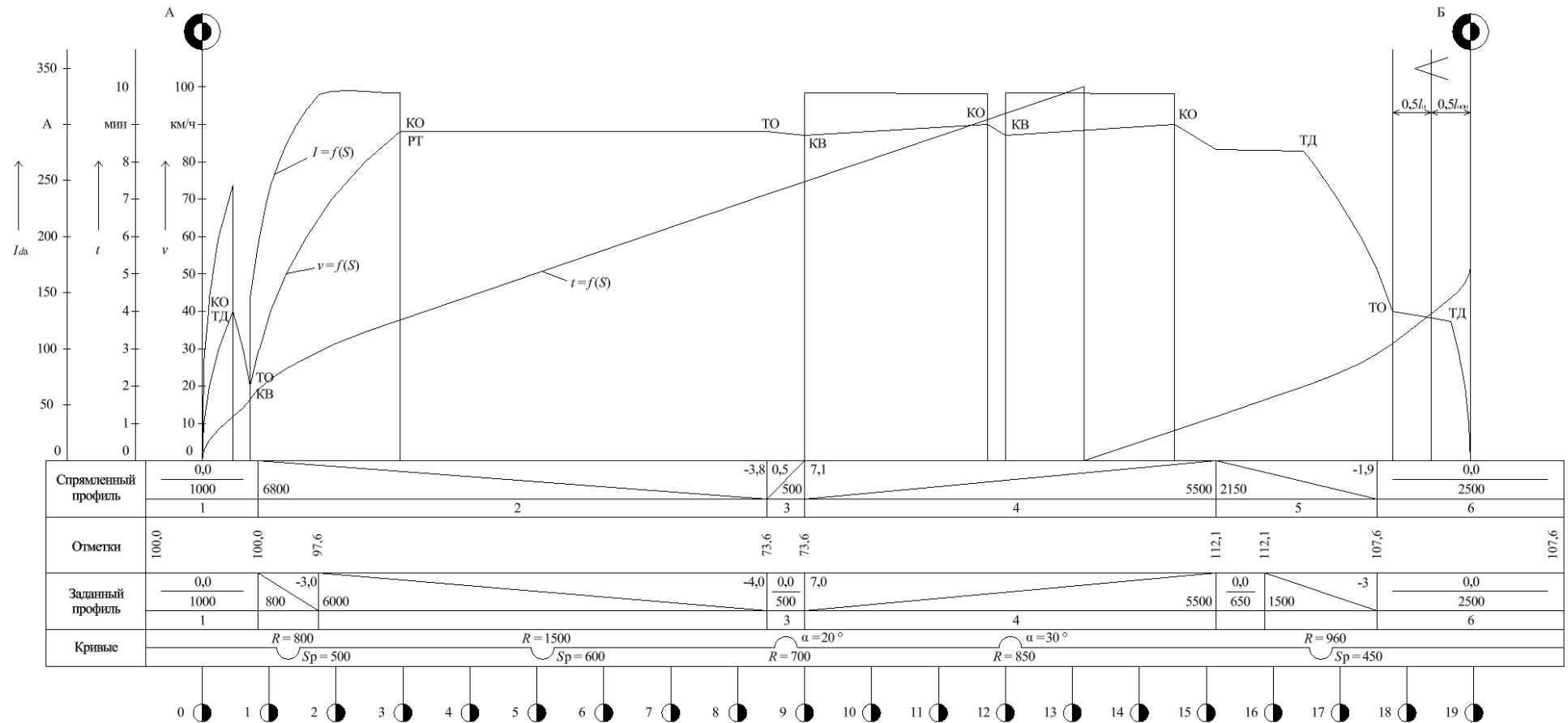


Рисунок Е.1 – Пример построения кривых скорости, времени и тока электровозов переменного тока

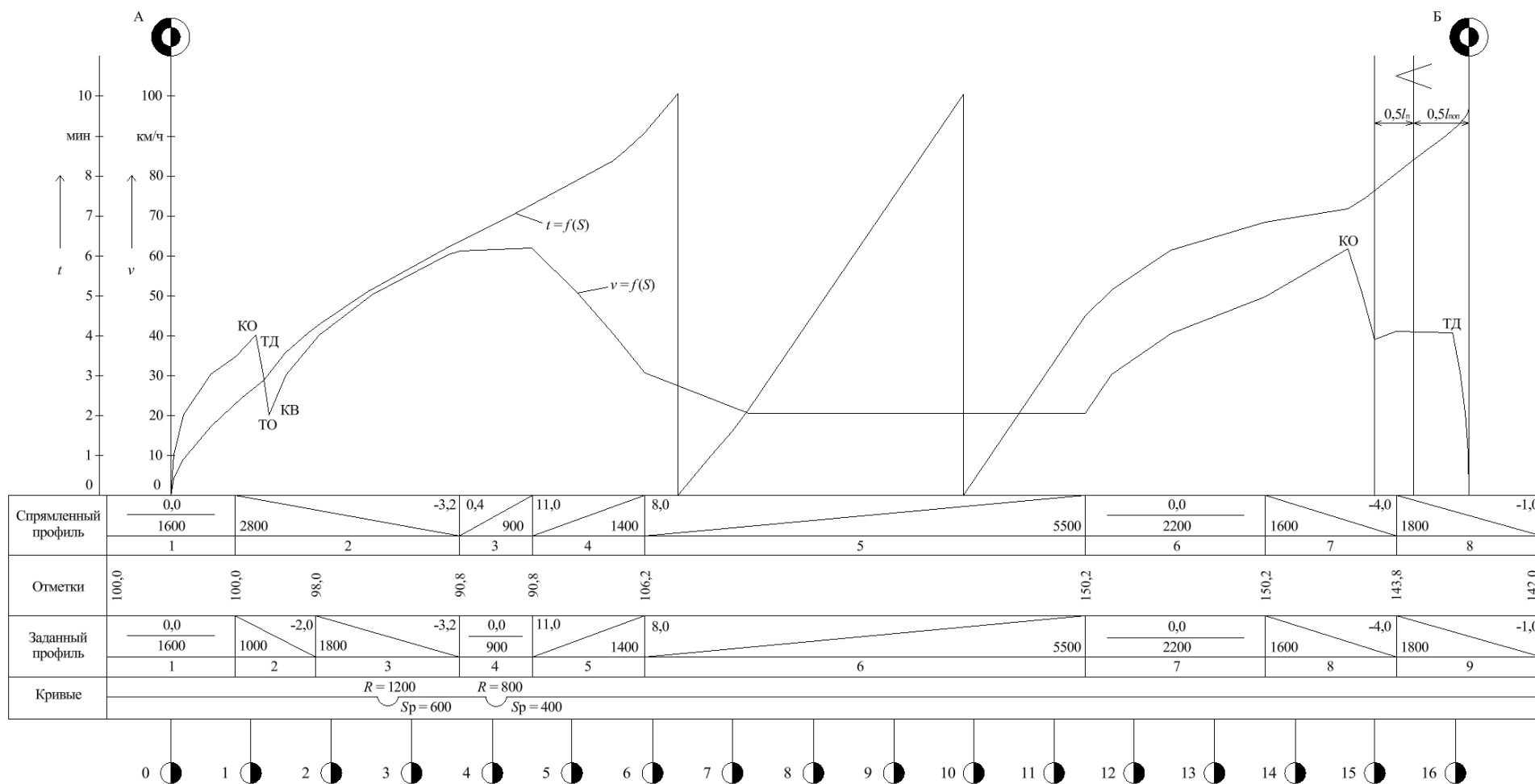


Рисунок Е.2 – Пример построения кривых скорости и времени для тепловозов