Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени Горного института том XXV, выпуск I, 1951 г.

НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИЖЕНИЯ РУДНИЧНОЙ ЭЛЕКТРОВОЗНОЙ ОТКАТКИ

Доц. *А. В. Рысьев*

В существующих методах расчетов рудничной электровозной откатки по определению элементов движения — силы тяги, скорости и времени движения, расхода энергии — принимается обычно средний или эквивалентный уклон откаточных путей.

Эквивалентным уклоном называют такой постоянный по величине уклон, который в отношении работы тяговых двигателей равноценен действительному профилю.

Для вновь проектируемых угольных и рудных шахт в расчетах рудничной электровозной тяги часто принимается уклон равного сопротивления или близкий к нему, обеспечивающий нормальный сток воды из выработок.

Под уклоном равного сопротивления понимают такой постоянный по величине уклон, при котором сила тяги электровоза при движении с грузом под уклон и сила тяги при движении с порожняком на подъем будут одинаковы. В расчетах подразумевается, что работа электровозов с установившейся скоростью движения происходит без ускорений, с силой тяги и соответственно с величиной тока, отвечающими равномерному движению поезда на принятом постоянном уклоне.

Практически на существующих шахтах профили откаточных путей значительно отличаются от среднерасчетных. При мульдообразном залегании полезного ископаемого, а также при пологом падении пластов, когда откаточные выработки пройдены по почве пластов, профиль откаточных путей характеризуется особенно резкими изменениями уклонов, иногда достигающими $\pm 30‰$.

Значительные отклонения фактически существующих уклонов откаточных путей от принимаемых в расчетах, естественно, вызывают соответствующие отклонения величин, получаемых по расчету, от истинных параметров движения. Расхождения расчетных величин с истинными значениями резко увеличиваются при откаточных путях, имеющих отрицательные уклоны. Отрицательный уклон, даже близкий по величине к наиболее распространенным уклонам равного сопротивления, при существующих тяговых двигателях электровозов приводит к недопустимо высоким скоростям движения, выходящим за пределы расчетных характеристик тяговых двигателей. В таких случаях существующие методы расчетов лишают возможности определения элементов движения состава поезда или дают при расчетах результаты, не совпадающие с фактическими данными.

При малой величине состава поезда, при отрицательных уклонах или при плохом состоянии откаточных путей ограничение скорости движения поезда производится искусственным отключением тяговых

двигателей от сети или торможением. Во многих случаях включение и выключение двигателей повторяется в течение всего периода движения. Движение поезда происходит непрерывно на переходных режимах «разгон — замедление». Разгон происходит с потреблением энергии из сети, замедление — на свободном выбеге.

На основании большого числа наблюдений за работой электровозов на рудниках и шахтах по хронометражным данным [4] нам представляется возможными в расчетах принимать режим работы электровоза не на установившемся режиме, а на переходных режимах при разгоне и замедлении.

Переходный режим работы электровоза больше соответствует истинному режиму, фактически наблюдаемому на откаточных путях рудников и шахт. Установившийся режим работы тяговых двигателей практически можно получить весьма редко. Он имеет место лишь на выездных путях траншей из карьера на открытых горных разработках и иногда на сравнительно длинном перегоне спокойного профиля пути угольных и рудных шахт. Во всех же остальных случаях, как правило, имеет место переходный режим работы тяговых двигателей (в том числе и в карьере).

В расчете принято условие — разгон и замедление электровоза предполагает заданными интервалы скоростей и величину максимальной скорости движения. Замедление в нормальном случае предполагается на свободном выбеге, т. е. при выключенных тяговых двигателях.

Применение торможения на *вредных уклонах* (на уклонах по величине больших самокатного) учитывается особо.

Естественно, в принятых пределах скоростей разгон будет протекать тем дольше, чем тяжелее профиль пути, т. е. чем больше сила тяги при данном составе поезда. Очевидно, при этом путь замедления будет меньше. Количество циклов «разгон—замедление» на данном отрезке пути будет тем больше, чем меньше интервалы принятых скоростей. Особенно большую роль здесь играет максимальная скорость движения. Чем больше максимально допустимая скорость движения, тем длиннее цикл «разгон—замедление». В тех случаях, когда профиль пути является сравнительно тяжелым, не требующим выключения тяговых двигателей при заданной максимальной скорости движения, весь полурейс данного направления в нашем расчете может быть принят за один цикл «разгон—замедление». Такой случай работы электровоза может рассматриваться как частный случай общего режима работы тяговых двигателей при предельно длинном цикле «разгон — замедление».

Таким образом, условие, принятое в данном методе определения элементов движения, не исключает старый метод расчета, а является более общим, охватывающим все случаи и пригодным для любого профиля пути и любой скорости движения.

Рудничные откаточные пути имеют десятки (иногда выше сотни) отдельных отрезков пути, отличающихся друг от друга уклонами. Неспокойный *«пилообразный»* профиль путей, естественно, вызывает неустановившийся режим работы тяговых двигателей, состоящий из разгонов и замедлений, а на некоторых вредных уклонах и из торможений.

Удовлетворительное решение задачи по определению элементов движения на таком уклоне безусловно могло бы быть получено при детальном методе интегрирования уравнений движения. Однако, существующие графо-аналитические методы интегрирования уравнений движения представляют весьма сложные и трудоемкие операции, требующие много времени. Все существующие методы интегрирования уравнений

движения основаны на принципе деления трассы сложного профиля пути на большое число отдельных элементов и решения задачи по каждому элементу отдельно. Точность расчета зависит от числа этих элементов: чем больше их число, при прочих равных условиях, тем точнее расчет, т. к. истинный профиль пути в данной точке в меньшей степени отличается от принятого среднего уклона по элементу. Следовательно, чем точнее расчет, тем он сложнее. Расчет получается особенно сложным и трудоемким при наличии неспокойного, *«пилообразного»*, профиля пути по трассе. В связи с этим детальные методы расчетов могут быть применены лишь при проектировании электровозной откатки, но не могут быть рекомендованы для определения элементов движения электровозной тяги в эксплоатационных расчетах.

С целью максимального упрощения методов определения элементов движения по любому сложному профилю пути рекомендуется привести последний к некоторому эквивалентному постоянному уклону, учитывающему все особенности фактического профиля пути, приведенному к заданному интервалу скоростей $v_{макс}$ и $v_{мин}$.

Идея нового метода расчета заключается и в том, чтобы на найденном приведенном эквивалентном уклоне определить элементы движения одного цикла «разгон—замедление» поезда в принятых пределах скоростей $v_{макс}$ и $v_{мин}$.

Затем общие значения времени движения и расхода энергии определяются произведением соответствующих элементов движения одного цикла на количество их в данном перегоне или направлении.

Как известно, эквивалентный уклон в тысячных определяется [2] по формуле:

$$i_{в} = \frac{1}{\Sigma l}\left(\Sigma i_{под}\, l_{под} + \Sigma w_{к}\, l_{к} - \Sigma i_{б.\,в.\,у.}\, l_{б.\,в.} - \Sigma w_{о}\, l_{в.\,у.} - \Sigma w_{к}\, l_{к.\,в.\,у.}\right), \qquad (1)$$

где

$\Sigma i_{под} l_{под}$ — сумма произведений всех имеющихся на пути подъемов тысячных на их длины, *м*;

$\Sigma w_{к}\, l_{к}$ — сумма произведений удельных сопротивлений движению на кривых участках пути, расположенных на подъемах и безвредных уклонах, на их длины;

$\ldots l_{б.в.}$ — сумма произведений всех имеющихся на пути безвредных уклонов на их длины;

$\Sigma w_{о} l_{в.у.}$ — сумма произведений основного удельного сопротивления движению на длины вредных уклонов;

$\Sigma w_{к}\, l_{к.в.у.}$ — сумма произведений удельных сопротивлений движению на кривых на их длины, расположенных на вредных уклонах;

Σl — общая длина откатки, *м*.

Под вредным уклоном здесь понимается уклон, превышающий самокатный, т. е. уклон, на котором приходится применять тормозные средства.

При отсутствии вредных уклонов и кривых на линии, формула (1) будет представлять [2] средний уклон:

$$i_{ср} = \frac{1}{\Sigma l}\left(\Sigma i_{под}\, l_{под} - \Sigma i_{б.\,в.\,у.}\, l_{б.\,в.\,у.}\right) = \frac{1}{L}\left(h_2 - h_1\right), \qquad (2)$$

где

h_1 — начальная высотная отметка пути, *м*;

h_2 — конечная высотная отметка пути, *м*;

L — общая длина пути между отметками, *м*.

Как видно из сравнения формул (1) и (2), эквивалентный уклон отличается от среднего уклона учетом наличия вредных уклонов и кривых на линии.

Учет кривых производится увеличением удельного сопротивления движения на подъемах на величину удельного сопротивления от кривых. Учет вредных уклонов производится частично, т. е. считается, что на вредном уклоне полезно используется только величина самокатного уклона, равного основному удельному сопротивлению в тысячных w_0. Избыточное значение вредного уклона сверх самокатного $i_{в.у}—w_0$ при любой его величине, на движение поезда никакого влияния не оказывает. Избыток энергии сверх затрачиваемой на самокатное движение при этом целиком гасится в тормозной системе. При установившемся движении с постоянной скоростью такая трактовка режима работы электровоза на вредном уклоне вполне справедлива. Однако, фактически на вредном уклоне весьма сложно получить установившееся движение поезда. При этом всегда будет иметь место изменение величины скорости, а следовательно, изменение величины живой силы движущегося состава поезда.

В предлагаемом методе, когда за исходное условие принимается неустановившийся режим работы электровоза, и на вредном уклоне было бы несправедливым принимать скорость движения за постоянную величину и пренебрегать влиянием избыточного вредного уклона $i_{в.у}—w_0$ на характер движения состава поезда. На вредном уклоне, как правило, движение состава происходит с особенно резкими изменениями скорости при различных режимах электровоза. На сравнительно небольшом вредном уклоне избыточная величина уклона $i_{в.у}—w_0$ может быть использована для увеличения скорости движения поезда в допустимых пределах и, следовательно, для увеличения живой силы движущегося состава. Такой вредный уклон может быть пройден машинистом электровоза незамеченным.

Вредные уклоны большой величины, требующие торможения, избыточной величиной уклона могут также оказывать влияние на общий характер движения поезда и на расход энергии. В данном случае имеет значение скорость, с которой поезд вошел на вредный уклон, и скорость, с которой вышел с него.

Если скорость выхода с уклона больше скорости входа, то на данном вредном уклоне произошло увеличение живой силы движущегося состава поезда. Если же скорость входа была выше скорости выхода, то, очевидно, поезд потерял часть живой силы на этом уклоне. Эти обстоятельства в большей степени зависят от величины вредного уклона, т. е. от произведения длины его на избыточный уклон в тысячных $l_{в.у.}(i_{в.у.}— w_0)$.

Как видно из анализа, при неустановившемся движении поезда для определения эквивалентного уклона необходимо учитывать вредные уклоны не только по их длине, но и по величине избыточной части $i_{в.у} — w_0$, влияющей на скорость движения поезда.

При неустановившемся режиме работы тяговых двигателей остается справедливым равенство работы электровоза, затраченной на эквивалентном, приведенном к заданной скорости уклоне, с фактической работой, затраченной на движение состава по любому сложному пути. Например, работа, произведенная электровозом последовательно на двух элементах пути с различными уклонами при неустановившемся режиме, будет равновелика работе, затраченной электровозом на эквивалентном уклоне суммарной длины.

При этом работа, произведенная на первом элементе пути, может быть представлена в следующем виде:

$$W_{1э} = \left[\frac{1}{2} M \left(v^2_{макс} - v^2_{мин}\right) + l_{1раз} \left(w_0 \pm i_1\right) \left(P + Q\right)\right] \frac{L_1}{l_{1раз} + l_{1зам}} \text{ кгм}, \quad (3)$$

где

M — масса движущегося состава поезда, *кгм/сек²*;

$v_{мак}$ — максимально допустимая скорость, *м/сек*;

$v_{мин}$ — минимальная рекомендуемая скорость, *м/сек*;

$l_{1раз}$ — длина пути разгона поезда, *м*;

$l_{1зам}$ — длина пути замедления поезда, *м*;

w_0 — основное удельное сопротивление движению, *кг/т*;

i_1 — уклон пути данного элемента, *м/км*;

$P + Q$ — вес состава поезда, *т*;

L_1 — общая длина первого элемента, *м*.

Как видно из выражения (3), общая работа на элементе пути определяется работой, произведенной в одном цикле «разгон—замедление», умноженной на число циклов.

Для второго элемента пути работа, произведенная электровозом, может быть определена по аналогичной формуле:

$$W_{2э} = \left[\frac{1}{2} M \left(v^2_{макс} - v^2_{мин}\right) + l_{2раз} \left(w_0 \pm i_2\right) \left(P + Q\right)\right] \frac{L_2}{l_{2раз} + l_{2зам}} \text{ кгм}, \quad (4)$$

где значение величин принято выше, с индексами для второго элемента пути.

Имея в виду, что энергия, затраченная в период разгона поезда на увеличение живой силы, в каждом цикле «разгон—замедление» реализуется в виде работы на движение состава при свободном выбеге, можно написать равенство:

$$\frac{1}{2} M \left(v^2_{макс} - v^2_{мин}\right) = l_{1зам} \left(w_0 \pm i_1\right) \left(P + Q\right) = l_{2зам} \left(w_0 \pm i_2\right) \left(P + Q\right). \quad (5)$$

Значения величин, входящих в формулу (5), аналогичны принятым выше.

При замене в формулах (3) и (4) членов, выражающих расход энергии на разгон, их значениями, согласно формуле (5), общая работа электровоза на обоих элементах пути выражается:

$$W_{1э} + W_{2э} = \left(w_0 \pm i_1\right) \left(P + Q\right) L_1 + \left(w_0 \quad i_2\right) \left(P + Q\right) L_2 \text{ кгм}. \quad (6)$$

В результате простейших алгебраических преобразований формула (6) может быть представлена в виде:

$$W_{1э\,(кгм)} + W_{2э\,(кгм)} = \left(P + Q\right)\left(L_1 + L_2\right)\left[w_0 + \frac{i_1 L_1 \pm i_2 L_2}{L_1 + L_2}\right] \text{ кгм}. \quad (7)$$

Как видно из формулы (7), работа, произведенная на данных элементах пути с разными уклонами, равна работе на всей длине пути с эквивалентным уклоном, независимо от длин циклов «разгон—замедление».

Аналогичные рассуждения при относительно большем числе участков пути, отличающихся друг от друга уклонами, естественно, приведут к такому же выводу: суммарная работа, произведенная электровозом при неустановившемся режиме на фактическом переменном уклоне, будет равна работе, произведенной на эквивалентном уклоне при таком же режиме движения состава поезда.

Таким образом, пользоваться эквивалентным уклоном при расчете можно и при неустановившемся режиме работы электровозов.

При определении эквивалентного, приведенного к заданной скорости уклона сопротивление от кривых $w_к$ может быть учтено обычным путем по формуле (1). При наличии же вредных уклонов на пути формула (1) требует дополнения, учитывающего влияние, оказываемое вредными уклонами на величину скорости движения поезда при неустановившемся режиме работы электровоза.

В данном случае формула для определения эквивалентного, приведенного к заданной скорости уклона примет следующий вид:

$$i_{эк.\ пр.} = \frac{1}{\Sigma l}\left[\Sigma i_{под}\, l_{под} + \Sigma w_к\, l_к - \Sigma i_{б.\ в.\ у.}\, l_{б.\ в.\ у.} - \Sigma w_0\, l_{в.\ у.} - \right.$$

$$\left. - \Sigma w_к\, l_{к.\ в.\ у.} - \Sigma l_{в.\ у.}\,(i_{в.\ у.} - w_0)\, k\right]\ {}^0/_{00}. \qquad (8)$$

В дополнение к формуле (1), последний член числителя формулы (8) $-\Sigma l_{в.у.}(i_{в.у.}-w_0)\ к$ — учитывает влияние дополнительной величины превышения самокатного уклона, равного основному удельному сопротивлению, на общий эквивалентный уклон всей трассы.

к — можно назвать коэфициентом отдачи вредных уклонов, характеризующих величину возможной полной работы, отдаваемой данным уклоном составу поезда в виде приращения живой силы, в связи с увеличением скорости на уклоне. При этом *к* может быть как положительным, так и отрицательным. Знак его зависит от соотношения скоростей входа и выхода состава на вредном уклоне. Если на данном уклоне имеет место приращение скорости, *к* будет положительным, если же состав поезда на вредном уклоне потерял скорость, *к* имеет отрицательный знак.

Абсолютная величина коэфициента *к* зависит от разности скоростей входа и выхода электровоза с данного вредного уклона. Если скорость выхода в основном зависит от величины вредного уклона, то скорость входа определяется характером предшествующих элементов пути. Кроме того, величина отдачи уклона зависит от режима работы электровоза, при каком состав поезда заходит на данный вредный уклон. Коэфициент отдачи *к* повышается, если электровоз заходит на вредный уклон с выключенными двигателями. В этом случае разгон состава в пределах допустимых скоростей происходит только за счет вредного уклона. Возможность отдачи вредного уклона при тех же скоростях входа и выхода уменьшается, если электровоз при входе на него имеет двигательный режим работы. В этом случае, естественно, приращение живой силы движущегося состава поезда и на вредном уклоне в основном происходит за счет работы тяговых двигателей.

Обычно машинист электровоза не в состоянии обнаружить начало вредного уклона, тем более, что в этот момент весь состав поезда находится еще на предшествующем безвредном уклоне; поэтому смену режима работы электровоза в расчетах предполагаем на границах скоростей $v_{макс}$ и $v_{мин}$.

Для удобства анализа расчленяем решение проблемы. Первоначально принимаем скорость входа на вредный уклон равной средней приведенной скорости движения, соответствующей равновеликому приращению живой силы движущегося состава поезда при изменении скоростей от минимальной до средней и от средней до максимальной.

Средняя приведенная скорость движения определяется выражением:

$$v_{\text{ср. пр.}} = \sqrt{\frac{1}{2}\left(v^2_{\text{макс}} - v^2_{\text{мин}}\right)} \quad км/час, \tag{9}$$

где $v_{\text{макс}}$ $v_{\text{мин}}$ — соответственно максимально допустимая скорость движения поезда и рекомендуемая минимальная скорость движения.

Режим работы электровоза при входе на вредный уклон принимаем на свободном выбеге, т. е. при замедлении поезда с выключенными тяговыми двигателями.

При этих условиях значительно легче определить, какое влияние окажет вредный уклон на движение состава поезда и какую долю из возможной полной работы отдаст состав в виде приращения живой силы в связи с изменением скорости движения состава. Влияние дополнительной величины вредного уклона на движение состава поезда может быть выражено равенством:

$$l_{\text{в.}} \quad (i_{\text{в. у.}} - w_0)\,(P + Q) = \frac{1}{2} M \left(v^2_{\text{макс}} - v^2_{\text{мин}}\right) \quad кгм. \tag{10}$$

Если по принятым условиям поезд входит на вредный уклон с средней приведенной скоростью движения, очевидно, максимальная величина дополнительной отдачи энергии поезду данным уклоном может быть выражена равенством:

$$l_{\text{в. у.}}\,(i_{\text{в. у.}} - w_0)\,(P + Q) = \frac{1}{2} M \left(v^2_{\text{макс}} - v^2_{\text{ср. пр.}}\right) \quad кгм, \tag{11}$$

где значение величин принято выше.

При скорости, выраженной в *км/час*, формула (11) примет вид:

$$l_{\text{в.}} \quad (i_{\text{в. у.}} - w_0) = 3{,}9\,(1 + \gamma)\left(v^2_{\text{макс}} - v^2_{\text{ср. пр.}}\right) \quad кгм. \tag{12}$$

Здесь γ — коэфициент инерции вращающихся масс поезда. Очевидно, для величины уклонов в пределах этого равенства коэфициент отдачи κ будет равен + 1, и чем больше разность скоростей $v_{\text{макс}} - v_{\text{ср. пр.}}$, тем больше величина возвращенной энергии.

Формула длины вредного уклона в пределах максимального коэфициента отдачи κ будет иметь вид:

$$l_{\text{в. у.}} \leqslant \frac{3{,}9(1 + \gamma)}{i_{\text{в. у.}} \quad w_0}\left(v^2_{\text{макс}} - v^2_{\text{мин}}\right) \quad м, \tag{13}$$

т. е., при постоянной величине разности квадратов скоростей параметры вредного уклона $l_{\text{в.у.}}$ и $(i_{\text{в. у.}} - w_0)$ связаны гиперболической зависимостью.

Коэфициент отдачи κ будет отличаться от + 1 при условии:

$$(i_{\text{в. у.}} - w_0)\, l_{\text{в. у.}} > 3{,}9\,(1 + \gamma)\left(v^2_{\text{макс}} - v^2_{\text{мин}}\right) \quad кгм. \tag{14}$$

Последнее обусловлено режимом работы электровоза на большом вредном уклоне, когда скорость движения состава достигает предела по максимуму и машинист убеждается, что она не может быть снижена свободным выбегом (включена тормозная система).

При торможении с постоянным удельным тормозным усилием b, обеспечивающим замедление состава поезда на вредном уклоне, энергия, запасенная поездом в первый период движения на уклоне, будет

теряться. Коэфициент отдачи κ при этом будет уменьшаться. В пределах изменения скоростей от $v_{макс}$ до $v_{ср.пр.}$ κ будет убывать от $+1$ до 0. При дальнейшем снижении скорости от $v_{ср.пр.}$ до $v_{мин}$ κ будет отрицательным, изменяющимся от 0 до некоторой отрицательной величины.

Следовательно, при изменении скорости движения поезда на вредном уклоне в принятых пределах $v_{макс}$—$v_{мин}$ величина потерянной энергии выразится равенством:

$$l_{в.} \quad (i_{в.\,у} - w_0) \leq 3{,}9\ (1 + \gamma)\ (v^2_{макс} - v^2_{мин}) \quad кгм. \tag{15}$$

При весьма больших затяжных вредных уклонах, очевидно, возможен повторный разгон состава поезда. При этом κ будет снова увеличиваться от некоторой отрицательной величины до 0, при $v_{ср.пр.}$ и затем же от 0 до некоторой положительной величины при $v_{макс}$.

Процесс разгона и замедления поезда может повторяться несколько раз, как и на безвредных уклонах; частота и количество циклов «разгон—замедление» будут зависеть также от параметров самого уклона и разности принятых скоростей. Коэфициент отдачи κ при движении поезда по большому вредному уклону с многократным включением тормозов будет изменяться по некоторой затухающей периодической кривой. Эта кривая может быть представлена произведением двух величин, из которых одна — затухающая постоянного знака, вторая — периодическая, изменяющаяся в пределах $\pm$ 1.

Таким образом, коэфициент отдачи определяется произведением:

$$k = k'\,k'' \tag{16}$$

где

κ' — определяет величину ординаты затухающей кривой постоянного знака;

κ'' — определяет величину ординаты периодической кривой переменного знака;

κ — определяется отношением максимально возможной отдачи на вредном уклоне для принятых скоростей к общей величине параметров вредного уклона:

$$k = \frac{3{,}9(1 + \gamma)\ (v^2_{макс} - v^2_{ср.\,пр.})}{l_{в.\,у.}\ (i_{в.\,у.} - w_0)} \tag{17}$$

κ'' зависит от скорости и режима работы электровоза при выходе с вредного уклона. Чтобы найти величину периодической составляющей коэфициента отдачи, необходимо предварительно определить режим работы электровоза и скорость движения при выходе с вредного уклона поезда. Для этой цели находится длина пути разгона и замедления на вредном уклоне от $v_{ср.пр.}$ до $v_{макс}$; затем общая длина вредного уклона делится на длину одного цикла «разгон—замедление». Если полученное при этом целое число будет четным, то, очевидно, коэфициент отдачи будет положительной величиной, так как выход состава поезда с вредного уклона произойдет на скоростях больших $v_{ср.пр.}$

Если же полученное делением число окажется нечетным, то величина κ будет отрицательной, так как выход состава поезда произойдет на четной амплитуде «разгон—замедление» со скоростями, лежащими ниже $v_{ср.пр.}$ Дробная часть числа, полученного при делении длины вредного уклона на длину одного цикла «разгон—замедление», позволяет определить режим работы электровоза при выходе с уклона и абсолютную

величину периодической составляющей коэфициента отдачи вредного уклона κ. Величина дроби показывает, какую еще дополнительно часть длины одного цикла «разгон—замедление» пройдет состав до выхода с вредного уклона. По этой части пути легко найти, на каком режиме работы электровоза будет происходить движение при выходе с вредного уклона. Например, если выход состава происходит на нечетной верхней амплитуде «разгон — замедление», то малая величина дроби определит свободный выбег поезда, находящегося еще на разгоне, а большая величина этой дроби укажет на режим торможения электровоза при замедлении поезда. Обратная картина будет наблюдаться для четных амплитуд; там первая часть амплитуды отвечает режиму свободного выбега, а вторая — режиму торможения.

Имея в виду, что периодическая составляющая κ'' изменяется при разгоне или замедлении прямо пропорционально пройденному пути в пределах ± 1, абсолютное значение величины κ'' определится полученной дробью от деления длины вредного уклона на длину одного цикла. При этом некоторые упрощения в вычислениях — в предположении постоянных ускорений при разгоне и замедлении — практически на точность расчетов не влияют. Имея в виду, что машинисту трудно точно установить момент схода электровоза с вредного уклона, в расчетах правильнее предполагать режим работы электровоза, установленный для выхода с вредного уклона, продолжающимся до предельных скоростей и на последующих элементах пути с безвредными уклонами.

При большом количестве значительных вредных уклонов на линии все эти операции вычислений при определении эквивалентного, приведенного к заданной скорости уклона, явились бы несколько усложняющими общий метод определения элементов движения электровозной откатки на основе неустановившихся скоростей движения поезда. Однако, если воспользоваться гиперболической зависимостью элементов уклона при постоянной разности квадратов предельных скоростей движения (формула 12) и построить кривые зависимости $i_{в.у.}—w_0=f\ (l_{в.у.})$ (рис. 1) для различных скоростей, то операция определения величин коэфициентов отдачи значительно упрощается.

На графике (рис. 1) изображены кривые постоянной разности квадратов скоростей в интервалах через каждые 2 *км/час*. Поэтому всегда можно выбрать заданные интервалы скоростей при решении задачи и по известной величине $(i_{в.у.}—w_0)$ определить длину пройденного пути. Этим графиком можно пользоваться для решения аналогичных задач и на безвредных уклонах пути при отыскании длин пройденных путей при разгонах и замедлениях поезда.

Для упрощения решения проблемы по определению влияния вредных уклонов на движение состава поезда принято, что электровоз входит на вредный уклон при свободном выбеге со средней приведенной скоростью движения $_{ср.пр.}$. Однако практически возможны случаи, когда скорость входа на вредный уклон будет отличаться от $v_{ср.пр.}$ и тяговые двигатели при этом будут включены. Всякое отклонение скорости входа от средней приведенной величины в сторону увеличения будет уменьшать возможность отдачи энергии данным вредным уклоном на величину приращения живой силы движущегося состава поезда:

$$3{,}9\ (1+\gamma)\ (v^2_{вх}-v^2_{ср.\ пр.})\ кгм, \qquad (18)$$

где

$v_{вх}$ — скорость движения поезда при входе на вредный уклон, *км/час*.

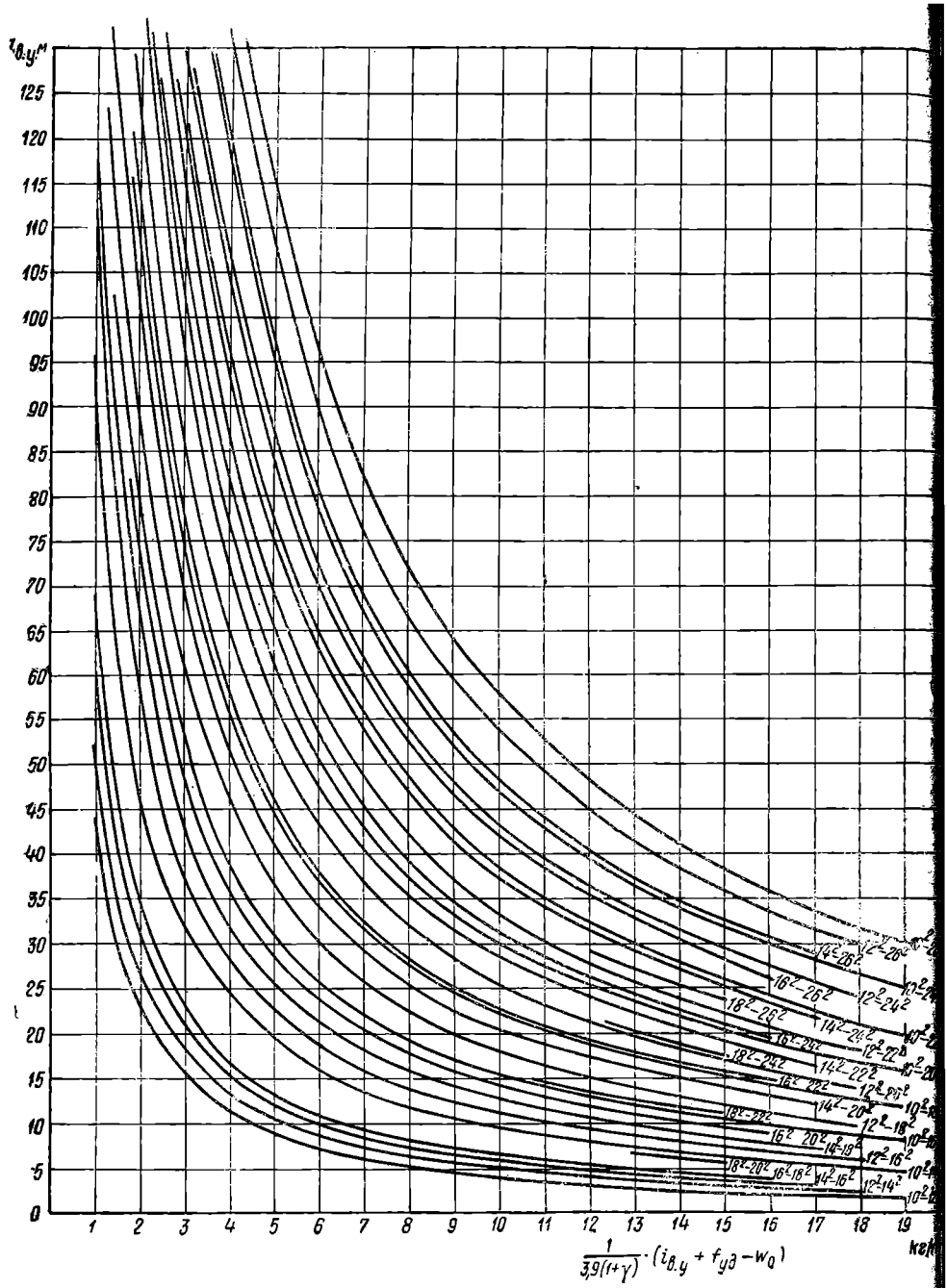


Рис. 1. Графики зависимости

$$l_{\text{в. у.}}\,(i_{\text{в. у.}} + f_{\text{уд}} - w_0) = \left(v^2 - v_1^2\right)(1+\tau)\,3{,}9.$$

В этом случае максимальная возможность дополнительной отдачи энергии данным уклоном будет определяться выражением:

$$3{,}9\,(1+\gamma)\,(v^2_{\text{макс}}-v^2_{\text{вх}})\quad кгм. \tag{19}$$

Если скорость входа окажется ниже средней приведенной скорости движения, то возможность отдачи энергии вредным уклоном увеличится. Величина энергии при этом, как и в предыдущем случае, может быть определена выражением (18). Решение этой задачи можно расчленить на два этапа: 1) решение задачи с расчетом влияния вредного уклона на движение состава в пределах скоростей $v_{\text{вх}}$ и $v_{\text{ср.пр.}}$; 2) дальнейшее решение задачи аналогично предыдущему случаю.

В тех случаях, когда электровоз входит на вредный уклон с включенными тяговыми двигателями, и в первый момент разгон поезда на уклоне происходит под действием двух сил (удельной силы тяги электровоза и величины превышения самокатного уклона), возможность отдачи энергии вредным уклоном тоже сократится на величину, равную работе тяговых двигателей на вредном уклоне. Тогда известное равенство величины работы примет следующий вид:

$$l_{\text{в. у.}}\,(i_{\text{в. у.}}+f_{\text{уд}}-w_0)=3{,}9\,(1+\gamma)\,(v^2_{\text{макс}}-v^2_{\text{вх}})\quad кгм, \tag{20}$$

где

$f_{\text{у.}}$ — удельная сила тяги электровоза, отвечающая принятым скоростям при разгоне в пределах $v_{\text{макс}}$—$v_{\text{вх}}$, *кг/т*.

В этом случае коэфициент отдачи вредного уклона $к$ будет равен $+1$ уже в меньших пределах длины вредного уклона. Определение величины длины вредного уклона, согласно выражению (19), можно производить по графику рис. 1.

Удельная сила тяги $f_{\text{уд}}$ определяется обычным путем по известным скоростям в принятых пределах. Если между скоростями $v_{\text{вх}}$ и $v_{\text{макс}}$ большой интервал, то для точности расчета следует определить промежуточные значения силы тяги в интервале скоростей движения примерно через каждые 2—3 *км/час*.

Стремясь к возможному упрощению и удобству всех операций расчета, в том числе к сокращению необходимых таблиц и графиков, для определения некоторых величин рекомендуем весьма простые аналитические зависимости. Так, для определения силы тяги по известным скоростям, не имея удовлетворительных характеристик тяговых двигателей, можно с достаточной точностью пользоваться следующей зависимостью:

$$F_x=F_{\text{час}}\left(\frac{v_{\text{час}}}{v_x}\right)^p\quad кг, \tag{21}$$

где

F_x — искомая сила тяги электровоза, *кг;*

$F_{\text{час}}$ — часовая сила тяги электровоза, *кг*;

v_x — скорость электровоза, при которой определяется сила тяги, *км/час*;

$v_{\text{час}}$ — часовая скорость движения электровоза, *км/час*;

p — постоянный коэфициент, для рудничных подземных электровозов равный 4,45.

Таким образом, в наиболее ответственных случаях расчета электровозной откатки, когда вредные уклоны занимают значительную часть пути и разность скоростей $v_{\text{макс}}$—$v_{\text{мин}}$ велика, необходимо более точно учитывать скорость входа поезда на вредный уклон и режим ра-

боты электровоза. Для этой цели нужно знать длину пути одного цикла «разгон—замедление» на предшествующих путях и, поделив весь предшествующий участок пути на путь одного цикла, найти часть цикла «разгон—замедление», в которой входит состав поезда на вредный уклон. Если предшествующие элементы пути представляют собой отрезки пути с разными уклонами, то необходимо предварительно найти их средний или эквивалентный уклон. Затем по формуле (21) или по известным характеристикам тяговых двигателей $F=f(v)$ необходимо найти силы тяги в интервале принятых скоростей разгона. По найденной силе тяги и эквивалентному уклону пути, определяется длина пути разгона по графику рис. 1 или выражением (1):

$$l_{раз} = \frac{3{,}9\,(1+\gamma)\left(v^2_{макс} - v^2_{мин}\right)}{\pm i_{экв} + f_{уд.\,ср.} - w_0} \text{ м}, \tag{22}$$

где

$f_{уд.ср.}$ — средняя величина удельной силы тяги в принятых скоростях разгона, *км/час*;

$\pm i_{экв}$ — эквивалентный уклон предшествующего пути.

Если разность скоростей $v_{макс}$—$v_{мин}$ велика, для точности расчета при определении силы тяги также рекомендуется разбить скорость на участки по 2—3 *км/час*.

Путь замедления может определяться общим отрезком по графику рис. 1 или выражением:

$$l_{зам} = 3{,}9\,(1+\gamma)\,\frac{v^2_{макс} - v^2_{мин}}{\pm i_{экв} + w_0} \tag{23}$$

Количество циклов «разгон—замедление» определяется делением длины предшествующих элементов на длину одного цикла «разгон—замедление» по формуле:

$$m + m' = \frac{L_{общ} - l_{нач.\,раз.}}{l_{раз} + l_{зам}} \text{ циклов}, \tag{24}$$

где

m — целое число циклов «разгон — замедление»;

m' — дробная часть этого числа;

$L_{общ}$ — общая длина предшествующих элементов пути;

$l_{нач.раз}$ — начальная длина пути разгона поезда при пуске до скорости $v_{мин}$.

Дробная часть числа m' показывает, в какой части цикла «разгон—замедление» входит состав поезда на вредный уклон. Умножением дроби m' на длину пути цикла $(l_{раз}+l_{зам})$ определяется длина пройденного поездом пути в последнем перед вредным уклоном неполном цикле. Если эта длина окажется меньше длины разгона поезда, то электровоз войдет на вредный уклон на двигательном режиме. Это условие определяется отношением длин пути:

$$m'\,(l_{раз} + l_{зам}) < l_{раз}. \tag{25}$$

Если произведение полученной дроби m' на длину цикла окажется больше длины разгона, электровоз, очевидно, войдет на вредный уклон при свободном выбеге, что может определяться следующим неравенством:

$$m'\,(l_{раз} + l_{зам}) > l_{раз}. \tag{26}$$

Скорость движения электровоза при входе на вредный уклон при условии постоянных ускорений при разгоне и замедлении может быть определена по следующим формулам:

а) при входе электровоза под током

$$v_{вх} = v_{мин} + \frac{1}{l_{раз}} m' (l_{раз} + l_{зам}) (v_{макс} - v_{мин}) \ км/час; \qquad (27)$$

б) при входе электровоза на свободном выбеге

$$v_{вх} = v_{мин} + \frac{1}{l_{зам}} [m' (l_{раз} + l_{зам}) - l_{раз}] (v_{макс} - v_{мин}) \ км/час. \qquad (28)$$

Дальнейшее уточнение скоростей входа электровоза на вредный уклон с учетом изменения величин ускорений как при разгоне, так и при замедлении заметного влияния на итоги расчетов не оказывает. Принятые упрощения дают отклонения результатов в пределах точности общепринятых расчетных формул.

Задача определения влияния вредных уклонов на движение состава усложняется, когда электровоз входит на вредный уклон под током. В этом случае, чтобы привести исходные данные к ранее принятым упрощенным условиям, приходится отдельно учитывать работу тяговых двигателей. Сначала по графику, приведенному на рис. 1, определяется отрезок пути вредного уклона $l'_{в.у}$, на котором скорость входа сравняется со скоростью $v_{ср.пр}$; при этом к действию избыточного уклона добавляется влияние удельной силы тяги электровоза. Длина найденного отрезка пути должна быть прибавлена к общей длине вредного уклона, если $v_{вх.} > v_{ср.пр.}$ и отнята от него, если $v_{вх} < v_{ср.пр.}$

Затем определяется длина пути разгона на вредном уклоне от $v_{ср.пр.}$ до $v_{макс}$ под совместным действием удельной силы тяги электровоза и вредного уклона по графику на рис. 1, или формуле (19). Если этими отрезками пути охватывается еще не весь вредный уклон, то средняя величина вредного уклона находится по формуле:

$$i_{в.\,у.\,с.} = \frac{1}{l''_{в.\,у.} + l'''_{в.}} [l''_{в.\,у.} (i_{в.\,у.} + f_{уд} - w_0) + l'''_{в.\,у.} (i_{в.\,у.} - w_0)] \ ‰, \qquad (29)$$

где

$l''_{в.у.}$ — длина пути разгона на вредном уклоне при включенных двигателях;

$l'''_{в.у}$ — остаток длины пути вредного уклона за вычетом

$$\pm l'_{в.\,у.} + l''_{в.\,у.}$$

Здесь подразумевается вредный уклон, состоящий из двух элементов пути, отличающихся уклонами, причем $f_{уд.}$ как бы включается в величину вредного уклона. Дальнейшее решение задачи сводится к обычному случаю, когда $v_{вх} = v_{ср.пр.}$ и электровоз работает на свободном выбеге. Вредный уклон в результате включения в его величину $f_{уд}$ несколько изменяет свои параметры — длину и величину превышения над самокатным уклоном.

Приращение живой силы поезда, произведенное вредным уклоном на длине $l'_{в.у.}$ до равенства скоростей $v_{вх} = v_{ср.пр}$ в формуле (8) должно учитываться отдельно с коэфициентом отдачи, равным единице, согласно выражению:

$$\pm 1 \, l'_{в.\,у.} (i_{в.\,у.} - w_0) \ кгм. \qquad (30)$$

В практике бывают случаи, когда вредные уклоны расположены на путях рядом или весьма близко друг от друга. Рядом расположенные вредные уклоны будут оказывать влияние на движение состава поезда как один общий большой длины уклон с некоторой средней величиной $i_{в.у.с}$ ‰. Таким образом, для определения степени влияния на движение состава поезда вредных уклонов, расположенных рядом, достаточно определить их среднюю величину и решать вопрос обычным путем. Средняя величина вредных уклонов может быть найдена по формуле:

$$i_{в.\,у.\,с.} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} l_{i_{в.\,у.}}} \left(-l_{1_{в.\,у.}}\, i_{1_{в\ у.}} - l_{2_{в.\,у.}} - l_{2_{в.у.}}\, i_{2_{в.\,у.}} - \cdot \right.$$

$$\left. - l_{n_{в.\,у.}}\, i_{n_{в.\,у.}} \right) {}^{0}/_{00}, \qquad (31)$$

где

$l_{1_{в.у.}}$ — длина пути, *м*;

$i_{1_{в.у.}}$ — величина вредного уклона одного из элементов пути, ‰;

$\sum_{i=1}^{i=n} l_{i_{в.у.}}$ — суммарная длина всех рядом расположенных элементов пути с вредными уклонами.

Вредные уклоны можно считать расположенными рядом, если между ними нет элемента пути с безвредным уклоном длиной больше, чем длина, необходимая для торможения электровоза со скорости $v_{макс}$ до $v_{мин}$. Проверка этой длины также может быть произведена по приведенной номограмме (см. рис. 1), согласно выражению:

$$l_{тор} = 3{,}9\,(1+\gamma)\,\left(v^2_{макс} - v^2_{мин}\right) \frac{1}{\pm i + w_0 + b}\ м, \qquad (32)$$

где

b — удельное тормозное усилие, отвечающее сцепному весу электровоза, *кг/т*.

Нами были изложены методы определения эквивалентного, приведенного к заданной скорости уклона любого сложного профиля откаточного пути и проанализирован вопрос влияния вредных уклонов на эквивалентный приведенный к заданной скорости уклон.

Дальнейший расчет по определению элементов движения электровозной откатки и при неустановившемся режиме работы тяговых двигателей становится весьма простым. Сначала определяются элементы движения: длина пути, скорость хода, время движения, сила тока и расход энергии для одного цикла «разгон—замедление». Затем делением общей длины откатки на длину пути одного цикла определяется общее количество циклов «разгон—замедление». Умножением элементов движения одного цикла на общее количество циклов находятся элементы движения электровозной откатки по всей трассе пути.

При определении элементов движения цикла сначала определяется длина разгона $l_{раз}$ (уже известным образом по формуле (22) или по графику на рис. 1). Для точности расчетов интервал скоростей при определении силы тяги необходимо брать не более 2—3 *км/час* независимо от величин максимальной и минимальной скоростей. Сила тяги, отвечающая данным скоростям, может быть взята по характеристикам тяговых двигателей или определена по зависимости (21). Затем, нахо-

дится длина замедления $l_{зам}$. Последняя может определяться сразу целиком в интервале принятых скоростей $v_{макс}$ и $v_{мин}$ по графику рис. 1 или по формуле (23).

Длина пути одного цикла «разгон—замедление» определяется суммой:

$$l_{ц} = l_{раз} + l_{зам} \ м. \tag{33}$$

Количество циклов в общей длине пути определяется выражением:

$$Ц = \frac{L_{общ} - (l_{нач.\ раз} + l_{ост})}{l_{ц}} \text{ циклов;} \tag{34}$$

где

$L_{общ}$ — общая длина пути откатки, *м*;

$l_{нач.раз}$ — длина пути начального разгона при пуске до $v_{мин}$, которая, обычно, является скоростью выхода на автоматическую характеристику, *м*;

$l_{ост}$ — длина пути замедления при остановке от скорости $v_{мин}$ до 0 (обычно, на тормозном режиме работы электровоза).

Время движения за цикл определяется в той же последовательности. Сначала находится время движения при разгоне $t_{раз}$. В точных расчетах, при большой разности скоростей $v_{макс}$ и $v_{мин}$ лучше $t_{раз}$ определять также по частям. Используя данные длин путей разгона в интервалах скорости 2—3 *км/час*, время движения можно определять [1] по формуле:

$$\Delta t_{1,2} = \frac{3{,}6\,\Delta l_{1,2}}{0{,}5\,(v_2 + v_1)} \ сек, \tag{35}$$

где

$\Delta t_{1,2}$ — время движения в интервале принятых скоростей разгона, *сек*;

$\Delta l_{1,2}$ — длина пути разгона в интервале этих скоростей, *м*;

$0{,}5\,(v_2+v_1)$ — средняя скорость движения поезда за данный промежуток времени, *км/час*;

3,6 — переводной коэфициент в принятой размерности величин, входящих в формулу.

Таким образом, найденное по частям общее время движения за весь период разгона в интервале принятых скоростей определяется [1] по формуле:

$$t_{раз} = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta t_i = \Delta t_{1,2} + \Delta t_{2,3} + \quad + \Delta t_{n-1,\,n} \ сек. \tag{36}$$

Время движения при замедлении без большой ошибки можно определять [1] целиком, согласно выражению:

$$t_{зам} = \frac{3{,}6\,l_{зам}}{0{,}5\,(v_{макс} + v_{мин})} \ сек. \tag{37}$$

Суммируя время движения одного цикла $t_{раз}+t_{зам}$ и умножая его на количество циклов, можно определить общее время движения поезда на переходных режимах с неустановившейся скоростью по всей длине пути. Для точности расчетов при этом необходимо прибавить время начального разгона при пуске до $v_{мин}$ и время при замедлении от $v_{мин}$ до полной остановки.

Аналогично определяются параметры силы тока и расхода энергии на откатку. При точных расчетах, с большими интервалами скоростей $v_{макс}$—$v_{мин}$, весь период разгона также надлежит разбить на отдельные части. Используя имеющиеся средние скорости или силы тяги в промежутках времени $\Delta t_{1,2}$ и $\Delta t_{2,3}$ и т. д., можно по характеристикам тяговых двигателей найти силу тока, отвечающую той или иной силе тяги, а затем, умножая на время Δt, найти расход энергии.

Для определения силы тока при отсутствии удовлетворительных характеристик тяговых двигателей, можно пользоваться предложенной нами полуэмпирической зависимостью от силы тяги, в основу которой внесен характер изменения к. п. д. тяговых двигателей, с учетом влияния максимального насыщения их магнитной системы при больших нагрузках.

Формулы $I_я = f(F)$ для всех двигателей являются однотипными, лишь меняются постоянные коэфициенты, определяемые эмпирическим путем. В наших примерах были проверены зависимости силы тока от силы тяги для следующих двигателей:

$$\left.\begin{aligned} &1)\ \text{ДК-801-А:} \quad I = \frac{7F}{25 + \sqrt{F}}\ a; \\ &2)\ \text{ДК-800-А:} \quad I = 17 + \frac{2830\,F}{20000 - F}\ a. \end{aligned}\right\} \qquad (38)$$

Расход энергии за один цикл находится суммированием энергии за отдельные элементы времени Δt; полученная сумма умножается на количество циклов и находится общий расход энергии по всей трассе пути. Для точности расчета надлежит учесть дополнительный расход энергии в период пуска электровоза в ход до скорости $v_{мин}$.

Таким образом, не производя общего громоздкого интегрирования уравнений движения для весьма сложного профиля пути при неустановившемся режиме работы тяговых двигателей, можно сравнительно просто определить все элементы движения электровозной откатки. На ряде типовых примеров нами доказывается, что предлагаемый расчет в сравнении с детальными методами интегрирования уравнений движения точность получаемых результатов не снижает.

Для оценки правильности и точности расчетов по предложенному новому методу определения элементов движения, основанному на условии неустановившегося режима работы тяговых двигателей, нами было проделано большое число примеров по интегрированию уравнений движения по откаточным путям с разными характеристиками. Для сравнения сначала производилось интегрирование уравнений движения одним из детальных методов—графоаналитическим способом, затем новым методом по эквивалентному приведенному к заданной максимальной скорости уклону при неустановившихся скоростях движения электровоза. Имея в виду весьма большой объем работы по интегрированию уравнений движения и определению элементов движения электровозной откатки детальными методами, особенно при наличии неспокойного профиля откаточных путей, мы предварительно заготовили расчетные шаблоны в виде графиков, приведенных в качестве примеров на рис. 2—5. Эти шаблоны представляют собой результаты детального расчета методом конечных приращений зависимости скорости движения от пройденного пути с различными уклонами.

Учитывая возможные случаи работы электровоза на сложном профиле пути, расчетные шаблоны заготовлялись на различные уклоны пути в пределах $\pm 30‰$, для:

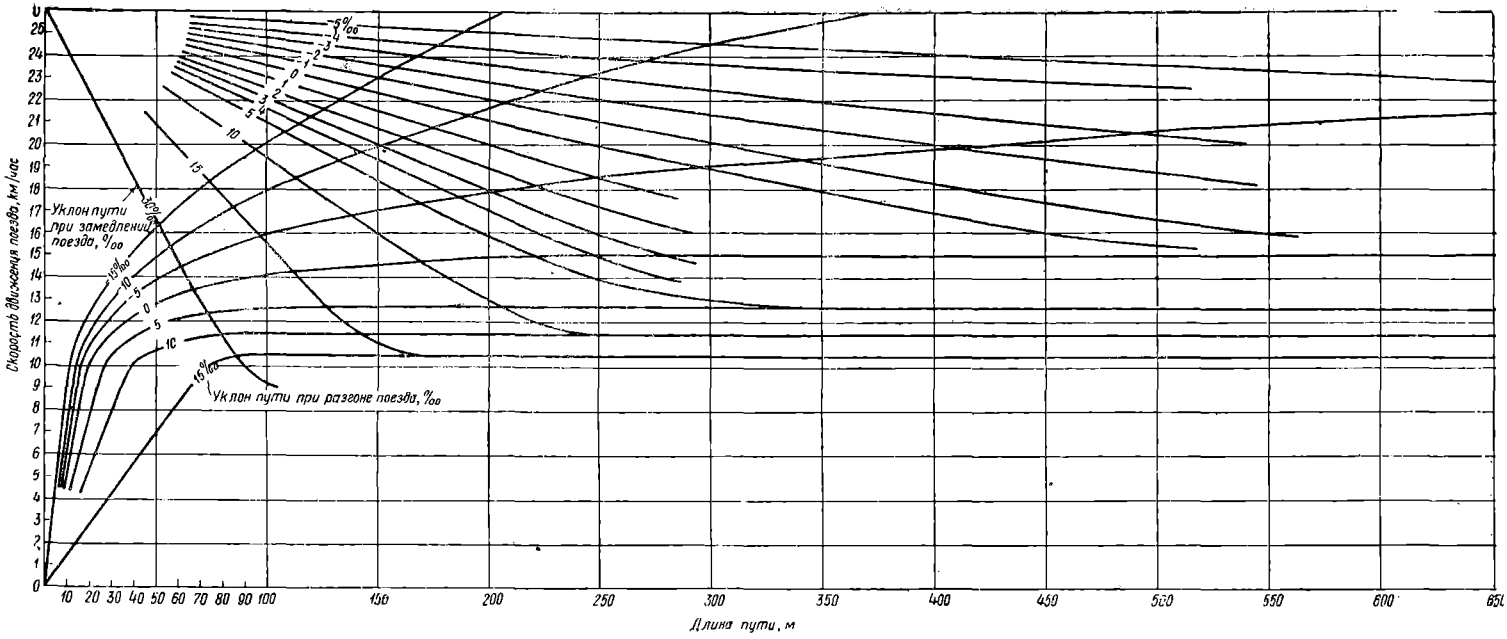


Рис. 2. Расчетный шаблон грузового направления при параллельном включении двигателей

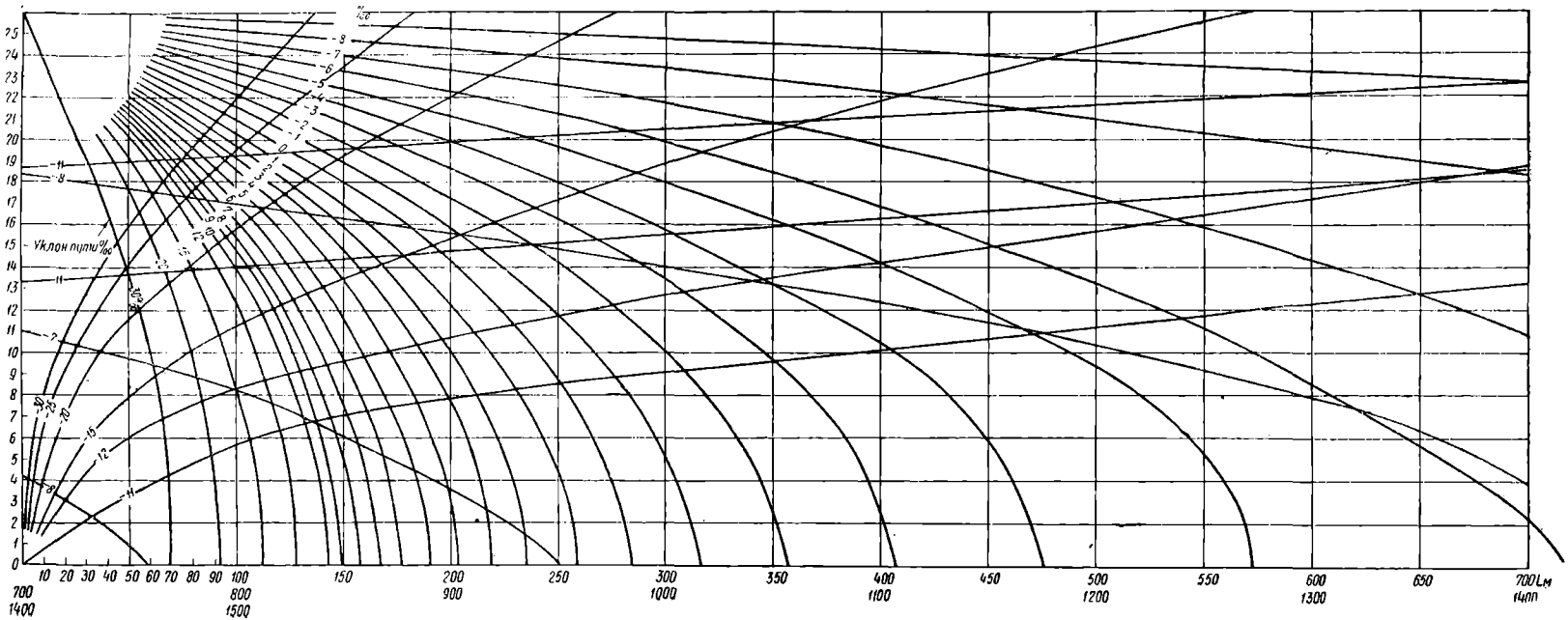


Рис. 3. Расчетный шаблон грузового направления при свободном выбеге

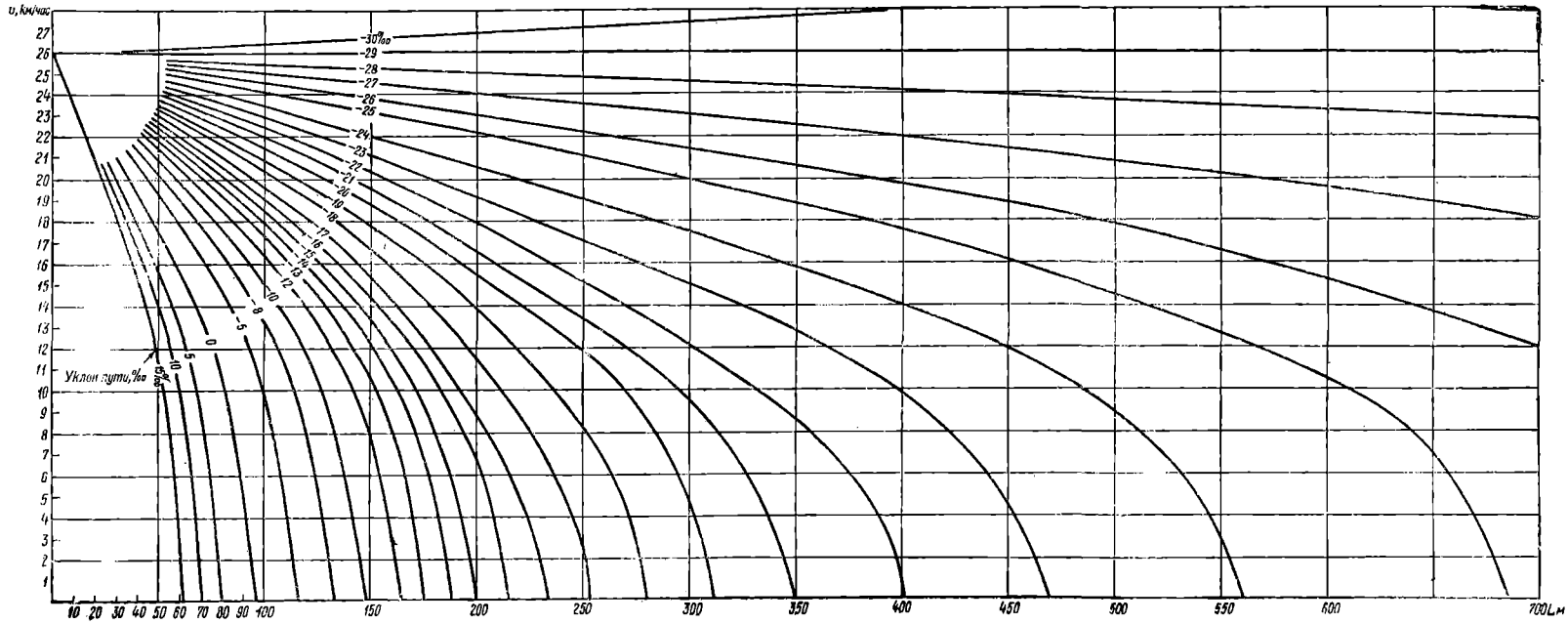


Рис. 4. Расчетный шаблон грузового направления при тормозном режиме

1) разгона электровоза в грузовом направлении при последовательном включении двигателей;

2) разгона электровоза в порожняковом направлении при последовательном включении двигателей;

3) разгона и замедления электровоза в грузовом направлении при параллельном включении двигателей;

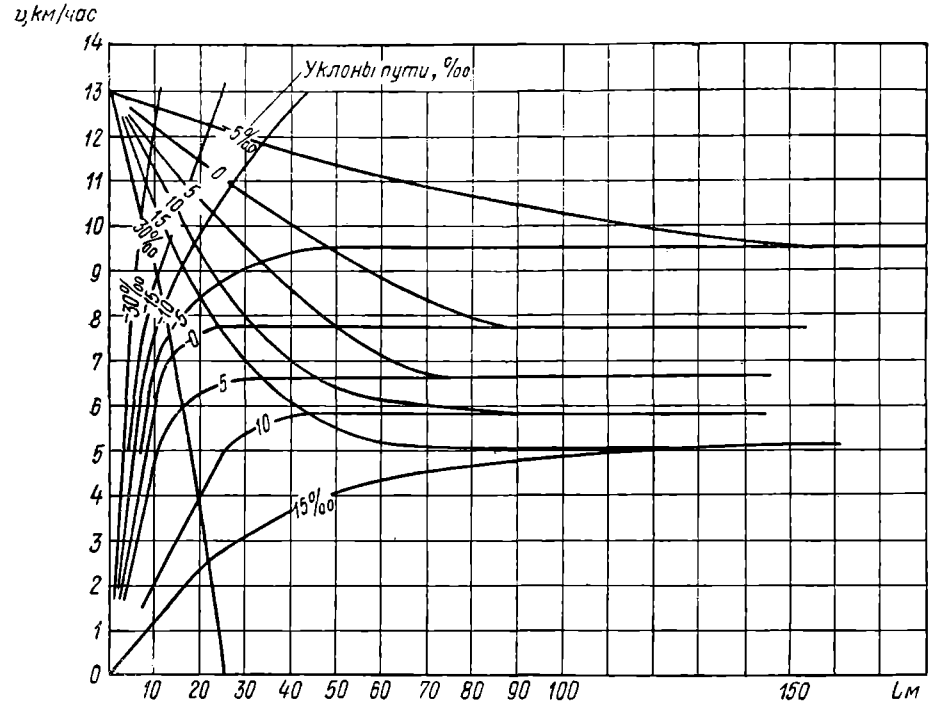


Рис. 5. Расчетный шаблон грузового направления при последовательном включении двигателей

4) разгона и замедления электровоза в порожняковом направлении при параллельном включении тяговых двигателей;

5) разгона и замедления электровоза при свободном выбеге (с выключенными тяговыми двигателями) в грузовом направлении движения;

6) разгона и замедления при свободном выбеге в порожняковом направлении движения поезда;

7) разгона и замедления при торможении электровоза с постоянными тормозными усилиями в грузовом направлении движения;

8) разгона и замедления при торможении электровоза с постоянными тормозными усилиями в порожняковом направлении движения.

Наличие перечисленных графиков изменения скорости движения в зависимости от длины пройденного пути на любом уклоне в пределах $\pm 30‰$ позволяет производить графическое интегрирование уравнений движения на любом сколь угодно сложном профиле откаточного пути.

Для этого профиль пути с соответствующими уклонами на отдельных элементах наносится на прозрачную бумагу. Затем по соответствующим расчетным шаблонам для данного режима работы электровоза и согласно профилю откаточного пути вычерчивается график движения.

Для этого прозрачная бумага для каждого элемента пути, отличающегося уклоном, последовательно накладывается на соответствующие расчетные шаблоны без разрыва линии графика скоростей. В качестве примеров приводим графики движения в упрощенном виде, с уменьшением в масштабах (рис. 6, 7, 8, 9).

На основании вычерченных графиков движения электровоза остальные элементы движения — сила тяги, величина тока, время движения и расход энергии — определяются согласно средним скоростям движения по графику для любого элемента пути. Такая большая предварительная работа по изготовлению расчетных шаблонов, связанная с трудоемкими вычислениями, может быть оправдана лишь значительным упрощением всех последующих расчетов по интегрированию уравнений движения.

В качестве примеров взяты профили пути на шахтах Карагандинского и Черемховского угольных месторождений. При расчетах приняты следующие данные:

1) контактные электровозы 250 *в*, весом 7 *т*, с двигателями типа ДК-801-А (их характеристики представлены на рис. 10);

2) вес состава поезда в грузовом направлении $P_с+Q_{гр}=45{,}4$ *т*, в порожняковом направлении $P_с+Q_{пор}=21{,}4$ *т*;

3) основное удельное сопротивление в грузовом направлении $w_{о_{гр}}=10$ *кг/т*, в порожняковом направлении — $w_{о_{пор}}=12$ *кг/т*;

4) удельное тормозное усилие при *b*, определяемое из условий максимального нажатия тормозных колодок при скорости движения до 18 *км/час*, принято постоянным и равным 19,4 *кг/т*;

5) коэфициент сцепления колес электровоза с рельсами принят равным 0,2;

6) коэфициент, учитывающий инерцию вращающихся масс поезда γ, принят одинаковым для грузового и порожнякового направлений — 0,075.

При изготовлении расчетных шаблонов вычисления производились по общеизвестным формулам интегрирования уравнений движения методом конечных приращений. Остаточная удельная сила тяги определялась [5] по формуле:

$$f_{ост}=f_{уд}-w_о \quad кг/т, \tag{39}$$

где

$f_{уд}$ — удельная сила тяги, определяемая отношением общей силы тяги электровоза *(кг)* к весу состава поезда *(т)*;

$w_о$ — основное удельное сопротивление движению, *кг/т*.

Время движения за принятый элемент приращения скорости определялось [3] по формуле:

$$\Delta t=\frac{\sigma\,\Delta v}{f_{ост}\pm i\,{}^0/_{00}} \quad сек, \tag{40}$$

где

σ — переводный коэфициент, равный $\frac{1000(1+\gamma)}{9{,}81\ \ 3{,}6}$;

Δv — приращение скорости, которым задавались, сообразуясь с точностью расчетов, меньшими значениями при резких изменениях $f_{ост}$ и более крупными приращениями при постоянных $f_{ст}$, *км/час*;

$i^0{}_{00}$ — уклоны пути.

Приращение пути за данный промежуток времени определялось [3] по формуле:

$$\Delta l = \alpha v_{ср} \Delta t \ м, \tag{41}$$

где

α — постоянный переводный коэфициент, равный $\frac{1000}{3600}$;

v — средняя скорость движения поезда, *км/час*, в интервале заданного приращения скорости, *км/час*.

Общее время движения и общая длина пути определялись [3] суммированием приращений с предыдущими суммами по формулам:

$$t_2 = t_1 + \Delta t \ сек; \quad l_2 = l_1 + \Delta l \ м. \tag{42}$$

С целью сокращения записи расчет, произведенный по приведенным формулам, и расчетные таблицы в силу их громоздкости здесь не приводятся. Для примера предлагаются лишь некоторые графики расчетных шаблонов только грузового направления движения (см. графики 2, 3, 4, 5).

Для пояснения нового метода расчета и сравнений со старыми приводим также лишь несколько типичных примеров.

В качестве первого примера для расчета взят сравнительно сложный профиль пути грузового направления по штрекам одной из шахт Черемховского угольного месторождения (график рис. 6).

Эквивалентный уклон, определяемый формулой (1), примет вид:

$$i_{экв} = \frac{1}{\Sigma l}(\Sigma l_{под}\ i_{под} - \Sigma l_{б.\ в.\ у.}\ i_{б.\ в.\ у.} - \Sigma l_{в.\ у.}\ w_0) =$$

$$= \frac{1}{1820}[11\ \ 55 - (170\ \ 5{,}88 + 110 \cdot 9 + 100\ \ 10 + 100 \cdot 10 +$$

$$+ 125 \cdot 7{,}95 + 2\ \ 110 \cdot 9 + 115\ \ 8{,}65 + 160\ \ 6{,}2) - (70\ \ 100 + 90 \cdot 10 +$$

$$+ 85\ \ 10)] = \frac{-10780}{1820} = -5{,}9‰.$$

При таком большом отрицательном эквивалентном уклоне определение элементов движения обычным упрощенным методом невозможно, т. к. установившаяся величина скорости выходит за пределы тяговых скоростных характеристик двигателей типа ДК-801-А. Как известно, величина силы тяги при отсутствии ускорений определяется [2] по формуле:

$$F = (P + Q)\ (w_0 \pm i_{экв})\ кг. \tag{43}$$

Учтя принятые выше условия, получим силу тяги: $F = 45{,}4\ (10 - 5{,}9) = 186$ *кг* или 93 *кг* на один двигатель. Как видно из характеристик тяговых двигателей (рис. 10), при $F = 93$ *кг* скорость больше 26 *км/час*, т. е. выходит за пределы допустимых скоростей.

Таким образом, задача нахождения элементов движения при установившихся скоростях обычным упрощенным методом является неопределенной. Для ее решения невозможно применить электромеханические характеристики. В данном случае для определения силы тяги, скорости движения и других параметров требуется применить какой-либо из детальных методов интегрирования уравнений движения. Детальные методы решения задачи по отдельным элементам пути позволяют найти истинные скорости движения поезда, а следовательно, определить более точно время движения и расход энергии.

С целью сравнения мы, пользуясь ранее заготовленными таблицами и вычерченными по ним расчетными шаблонами (рис. 2, 3, 4, 5), производим детальный расчет элементов движения по приведенному профилю пути методом конечных приращений. Границы скоростей приняты $v_{макс} = 18$ *км/час*, а $v_{мин} = 12{,}5$ *км/час* (скорость выхода на автоматическую характеристику при облегченном режиме работы двигателей). Результаты расчетов сведены в общую таблицу — график на рис. 6. Данные по детальному расчету внесены в нижнюю часть графика в виде сумм и средних значений для отдельных элементов пути, отличающихся друг от друга уклонами пути или режимом работы электровоза. Для сокращения объема статьи расчетный график движения приводится упрощенным и сокращенным по оси абсцисс, против фактического расчетного, в масштабе 1 : 5.

Как видно из графика, приведенного на рис. 6, при определении элементов движения детальным методом общее время движения по перегону составило 458,4 сек, а расход энергии определился в сумме 13525 *а-сек*.

Решить эту задачу можно упрощенным новым методом на основе неустановившихся скоростей движения и при значительном сокращении объема работы по сравнению с детальными методами расчетов. На данном профиле пути (см. рис. 6) имеются три элемента с вредными (отрицательными) уклонами, превышающими самокатный уклон, равный $w_{0_{тр}}$. Величина превышения самокатных уклонов ($i_{в.у.} — w_0$) здесь невелика, поэтому их влияние на движение состава поезда будет незначительно. При определении эквивалентного уклона влиянием этого превышения в данном случае практически можно было бы пренебречь. Однако с целью уяснения нового метода расчетов при определении $i_{экв}$ приведенного к заданной скорости, пользуемся формулой (8), учитывающей дополнительную работу уклона при изменениях скорости движения состава:

$$i_{экв} = \frac{1}{\Sigma l}\left[\Sigma l_{под}\, i_{под} — \Sigma l_{б.в.у.}\, i_{б.в.у.} — \Sigma l_{в.у.}\, w_0 — \Sigma l_{в.у.}\,(i_{в.у.} — w_0)\, k\right].$$

Учитывая результаты предыдущих вычислений эквивалентного уклона, дополняем числитель лишь одним членом:

$$_{кв} = \frac{-10780 — \Sigma l_{в.у.}\,(i_{в.у.} — w_0)\, k}{1820}\ {}^0/_{00}.$$

Имея в виду три элемента пути с вредными уклонами, выражение переписываем в виде:

$$i_{экв.\,пр.} = \frac{-1}{1820}\left[10780 + 70\,(14{,}4 — 10)\, k_1 + 90\,(11{,}2 — 10)\, k_2 + \right.$$

$$\left. + 85\,(11{,}8 — 10)\, k_3\right] = \frac{-1}{1820}\left[10780 + (308\, k_1 + 109\, k_2 + 154\, k_3)\right].$$

Как видно из последнего выражения, чтобы учесть влияние вредных уклонов на движение состава поезда, требуется найти три коэфициента отдачи. Влияние дополнительного члена в числителе на общую величину эквивалентного уклона будет небольшим; даже при максимальных $k = +1$, эквивалентный уклон изменится от 5,9 до 6,2‰.

Следовательно, при определении k можно пользоваться приближенным методом, предполагая, что скорость входа на вредный уклон равна средней приведенной скорости $v_{ср.пр}$, а режим работы электровоза —

на свободном выбеге. Возможность ошибки в данном случае невелик т. к. интервал между скоростями $v_{макс}$—$v_{мин}$ небольшой. Поэтом скорость входа на вредный уклон не будет резко отличаться от $v_{ср.п}$ и, кроме того, вредным уклонам во всех трех случаях предшествуют бо́льшей величины безвредные, но отрицательные уклоны. Таким обр зом, режим работы электровоза на свободном выбеге при входе в вредные уклоны является даже более вероятным.

Средняя приведенная скорость, согласно выражению (9), будет

$$v_{ср.\,пр.} = \sqrt{0{,}5\left(v^2_{макс} + v^2_{мин}\right)} = \sqrt{0{,}5\left(18^2 + 12{,}5^2\right)} = 15{,}5 \text{ км/час}.$$

По графику, приведенному на рис. 1, согласно выражению (13 в данном случае условие неравенства удовлетворяется даже для бо́л шего из трех вредных уклонов:

$$l_{в.\,у.}\left(i_{в.\,у} - w_0\right) \leqslant 3{,}9\left(1 + \gamma\right)\left(v^2_{макс} - v^2_{ср.\,пр.}\right),$$

т. е.

$$70\left(14{,}4 - 10\right) < 3{,}9\left(1 + 0{,}075\right)\left(18^2 - 15{,}5^2\right), \quad \text{или} \quad 308 < 350.$$

Таким образом, все три коэфициента отдачи вредных уклонов являются максимальными, равными + 1, т. е. по существу все тр уклона являются безвредными. Величина превышения самокатных укл нов ($i_{в.у.}$—w_0) в данном случае может быть использована на увелич ние скорости движения поезда, на запас живой силы движущегос состава.

Следовательно, как было уже установлено выше, при $k = +$ эквивалентный уклон данного профиля пути, приведенный к заданн максимальной скорости, будет равен — 6,2‰.

Далее решение задачи сводится к простому интегрированию ура нений движения состава поезда на постоянном уклоне пути — 6,2‰ при заданных ограничениях скорости, принятых в детальном мето расчета. Пользуясь формулами 39, 40, 41, 42 и графиками, представле ными на рис. 1 и 2, производим вычисления элементов движения одно цикла «разгон—замедление». Результаты расчетов вносим в таблицу - график, приведенный на рис. 7 (верхнюю часть). На графике изображ только один цикл «разгон—замедление»; общее количество циклов н всей длине определяется формулой (34).

В данном случае (см. рис. 7) длина начального разгона до скор сти 12,5 *км/час* составляет:

$$l_{нач.\,раз} = 7{,}55 + 7{,}87 + 12{,}8 = 28{,}22 \text{ м}.$$

Длина пути замедления при остановке поезда от скорос 12,5 *км/час* до 0, определяемая формулой (32), составляет 28 *м*.

Длина пути одного цикла $l_{раз} + l_{зам} = 15{,}3 + 38{,}2 + 77 + 184 =$ $= 314{,}5$ *м*. Таким образом, число циклов будет:

$$Ц = \frac{1820 - (28{,}22 + 28)}{314{,}5} = 5{,}6 \text{ цикла}.$$

Время движения согласно расчетному графику (см. рис. 6) за од цикл составляет:

$$t_ц = 4{,}15 + 9{,}15 + 16{,}4 + 43{,}4 \approx 73 \text{ сек}.$$

С учетом начального времени разгона $7{,}77 + 3{,}33 + 4{,}1 = 15{,}2$ се и времени остановки 16,1 сек, общее время движения поезда по пер гону составляет:

$$\Sigma t = 7{,}3 \quad 5{,}6 + 15{,}2 + 16{,}1 = 440 \text{ сек}.$$

Как видно из расчетов, время движения почти точно совпадает с временем, определяемым детальным методом интегрирования уравнений движения. Расхождение порядка 8 сек, т. е. около 2%, укладывается в пределы точности расчетов даже и при детальном методе интегрирования уравнений движения.

Расход энергии за цикл согласно графику, представленному на рис. 6, составляет $430 + 750 + 1055 = 2235$ *а-сек*. С учетом расхода энергии в начале разгона — $738 + 630 + 598 = 1966$ *а-сек* общая потеря энергии на движение по данному профилю пути определяется:

$$\Sigma It = 2235 \cdot 5{,}6 + 1966 = 14500 \text{ а-сек}.$$

Как видно из расчетов, результаты и по расходу энергии почти полностью совпадают. Разница в расходе энергии порядка 6% укладывается в пределы точности расчетов при пользовании характеристиками тяговых двигателей и при детальных методах расчетов.

Таким образом, на реальном примере с помощью упрощенного метода показана возможность определения элементов движения электровозной откатки на сложном профиле пути, имеющем отрицательный эквивалентный уклон. При этом точность расчетов не уступает детальному методу интегрирования уравнений движения.

В качестве второго примера нами взят расчет элементов движения электровозной откатки грузового направления по штрекам шахты Черемховского угольного бассейна, где профиль пути весьма сложен и имеются участки с вредными уклонами. Профиль пути с указанием длин и уклонов отдельных элементов представлен на рис. 7.

Решение задачи обычным упрощенным методом на основе установившейся скорости движения на эквивалентном уклоне в данном случае также дает неудовлетворительные результаты.

Эквивалентный уклон согласно формуле (1) определяется:

$$i_{экв} = \frac{1}{580}[150 \quad 6{,}65 - 210 \quad 7{,}12 - (60 \quad 10 + 40 \quad 10 +$$

$$+ 30 \cdot 10 + 25 \quad 10)] = -\frac{2060}{580} = -3{,}6\ ‰.$$

При принятой величине состава поезда сила тяги на один двигатель при равномерном движении поезда составляет 145 *кг*.

При данной силе тяги величина скорости также превышает допустимые значения. По характеристике тяговых двигателей она совпадает с неустойчивой частью скоростных характеристик. В результате этого получаются нереально малыми время движения и расход энергии. Более удовлетворительное решение в данном случае может быть получено при детальном интегрировании уравнений движения по отдельным элементам пути, отличающимся друг от друга уклонами и режимом работы тяговых двигателей электровоза.

Как и в предыдущем примере, для сравнения произведен расчет элементов движения детальным методом с помощью расчетных шаблонов, представленных на графиках рис. 2, 3, 4, 5, 10, и формулами 39, 40, 41 и 42. При расчете приняты пределы скоростей: минимальная, равная скорости выхода на автоматическую характеристику при пуске 10 *км/час*, и максимальная, равная допустимой по состоянию откаточных путей на шахте 16 *км/час*.

Результаты расчетов по определению скорости движения, длины пути, времени движения и расхода энергии по отдельным участкам

пути, отличающимся уклонами или режимом работы электровоза, внесены в таблицу-график, представленный на рис. 8 (нижнюю часть). С целью сокращения объема записи график представлен упрощенным, за исключением периода пуска электровоза в ход, где изображены отдельно все расчетные участки пути.

На графике суммированы значения длины пути, времени движения поезда и расхода энергии в *а-сек* по всему перегону. Результаты этих расчетов вынесены в правую часть графика в соответствующие строки значений элементов движения.

Далее, при прочих равных условиях, произведен расчет элементов движения по данному перегону новым упрощенным методом при неустановившихся скоростях движения. При определении эквивалентного приведенного к заданным скоростям уклона учитывается наличие элементов пути, имеющих вредные уклоны. Как видно из данных о профиле пути (см. рис. 7), все вредные уклоны расположены рядом, поэтому их можно рассматривать как один общий вредный уклон. Величина превышения вредного уклона над самокатным ($i_{в.у.}—w_0$) значительна, поэтому важно более точно установить степень влияния вредного уклона на движение состава поезда — определить, какую величину энергии вредный уклон дополнительно отдает или поглощает у движущегося состава при изменении скорости движения. Для этого необходимо точно знать, при каком режиме работы и с какой скоростью электровоз входит на вредный уклон, а также установить скорость выхода поезда с вредного уклона. С этой целью необходимо проанализировать режим работы электровоза на предшествующих элементах пути. При этом упрощенным методом расчета неустановившихся скоростей движения определяются режим работы электровоза и скорость движения при входе на вредный уклон. В данном случае предшествующие элементы пути до вредных уклонов имеют один уклон, поэтому не требуется предварительно находить их средний или эквивалентный уклон.

Средняя приведенная скорость определяется по формуле (9)

$$v_{ср.\ пр.} = \sqrt{\frac{16^2 + 10^2}{1}} = 13{,}35 \ км/час.$$

Длина пути разгона на первом элементе пути длиной 210 *м*, уклоном 7,12‰ могла бы быть взята из предыдущего детального расчета элементов движения по графику, представленному на рис. 7, однако, имея в виду в будущем приближенный метод расчета в роли самостоятельного, определяем длину разгона повторно упрощенно, с целью уяснения метода. При этом, как показала практика решения большого числа примеров, длину цикла «разгон—замедление» можно определять более приближенно, т. е. приращения скорости Δv можно брать большей величины. Для решения задачи на основании формул (22) и (23) и при использовании графика, изображенного на рис. 1 определены элементы движения одного цикла «разгон—замедление», результаты расчетов внесены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, длина пути разгона со скоростью от 10 до 16 *км/час* составляет 59 *м*, а путь замедления в том же интервале скоростей — 226 *м*. Следовательно, полный цикл «разгон—замедление» равен 285 *м*, что определяет число циклов:

$$Ц = \frac{l_{общ} - l_{нач.\ раз}}{l_{раз} + l_{зам}} = \frac{210—15}{285} = 0{,}683 \text{ цикла}.$$

Таблица 1

Элементы движения при разгоне и замедлении поезда весом $P + Q = 45{,}4$ *т* на уклоне пути—7,12% с удельным сопротивлением $w_0 = 10$ *кг/т*

Приращение скорости Δv, *км/ч*	Скорость движения поезда, *км/час*			Удельная сила тяги f, *кг/т*	Длина пути
	начальная v_1	конечная v_2	средняя $v_{ср}$		
+10	0	10	5	30,8	15
+3,35	10	13,35	11,67	19,7	19,4
+2,65	13,35	16	14,67	11,1	39,6
—6	16	10	13	0	226

Из расчета видно, что поезд подходит к вредному уклону на режиме работы электровоза с свободным выбегом, т. к. общая длина разгона поезда не превышает общую длину пути до вредного уклона, а полный цикл «разгон—замедление» в принятых скоростях не укладывается до него.

Этот случай определяется условием неравенства (26), а величина скорости входа поезда на вредный уклон — выражением (28):

$$v_{вх} = v_{мин} + \frac{m'(l_{раз} + l_{зам}) - l_{раз}}{l_{зам}}(v_{макс} - v_{мин}) =$$

$$= 10 + \frac{1}{226}[0{,}683(59 + 226) - 59](16 - 10) = 12{,}4 \ км/час.$$

Таким образом, скорость входа оказывается несколько ниже средней приведенной скорости, равной 13,35 *км/час*. Следовательно, до нее поезд пройдет еще некоторую длину пути по вредному уклону, определяемую выражением (22).

Рассматривая все рядом расположенные вредные уклоны как один общий с средним уклоном, определяемым выражением (2), имеем:

$$i_{в.\,у.} = \frac{-\Sigma l_{в.\,у.}\, i_{в.\,у.}}{\Sigma l_{в.\,у.}} = \frac{-(60 \quad 33{,}2 + 40 \cdot 25 + 30 \quad 33{,}2 + 25 \quad 40)}{155} = -32{,}3‰.$$

Длина пути, пройденная поездом по вредному уклону, в пределах скоростей от $v_{вх}$ до $v_{ср.\,пр.}$ будет:

$$l'_{в.\,у} = \frac{(13{,}32^2 - 12{,}4^2)\,3{,}9(1 + 0{,}075)}{32{,}3 - 10} = 4{,}5 \ м.$$

Для обычного упрощенного метода определения влияния вредного уклона на движение поезда длина его определяется разностью

$$l_{в.\,у.} = 155 - 4{,}5 \approx 150 \ м.$$

Затем задача решается аналогично предыдущему случаю. Длина разгона поезда до максимальной скорости на вредном уклоне определяется выражением (22):

$$l_{раз} = \frac{3{,}9(1 + 0{,}075)(16^2 - 13{,}35^2)}{32{,}3 - 10} = 14{,}7 \ м.$$

Следовательно, составляющая коэфициента отдачи постоянного знака, определяемая отношением работ, выразится:

$$k' = \frac{l_{раз}\,(i_{в.\,у.} - w_0)}{l_{в.\,у.}\,(i_{в.\,у.} - w_0)} = \frac{14{,}7}{150} = 0{,}1.$$

Для определения второй, периодически изменяющейся, составляющей коэфициента отдачи требуется знать величину скорости выхода поезда с вредного уклона.

В данном случае величина вредного уклона показывает, что даже с применением торможения замедление поезда не произойдет, т. к. величина тормозных усилий оказывается меньше движущих сил, обусловленных уклоном. Скорость движения поезда при выходе с вредного уклона может быть определена следующим выражением:

$$3{,}9\,(1+\gamma)\,(v^2_{вых} - v^2_{макс}) = [(i_{в.\,у.} - w_0) - (b + w_0)]\,(l_{в.\,у.} - l_{раз}),$$

откуда

$$v_{вых} = \sqrt{\frac{1}{3{,}9\,(1+0{,}075)}\left\{v^2_{макс}\,3{,}9\,(1+\gamma) + [(i_{в.\,у.} - w_0) - (b+w_0)]\,(l_{в.\,у.} - l_{раз})\right\}} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{3{,}9\,(1+0{,}075)}\left\{16^2\;\;3{,}9\,(1+0{,}075) + [(32{,}3-10) - (19{,}4+10)]\,(150-14{,}7)\right\}} =$$

$$= 18{,}7\ км/час.$$

Следовательно, периодическая составляющая коэфициента отдачи k'' является положительной величиной, большей единицы, т. к. $v_{вых} > v_{макс}$. В данном частном случае она определяется отношением:

$$k'' = \frac{v_{вых} - v_{ср.\,пр.}}{v_{макс} - v_{ср.\,пр.}} = \frac{18{,}7 - 13{,}35}{16 - 13{,}35} \approx 2.$$

Таким образом, общий коэфициент отдачи вредных уклонов, согласно выражению (16), будет:

$$k = k'\,k'' = 0{,}1\;\;2 = 0{,}2.$$

Тогда эквивалентный уклон, приведенный к заданной максимальной скорости, определяемый формулой (8), при учете предварительных вычислений по формуле (1), выразим:

$$i_{экв} = \frac{-2060 - \Sigma\, l_{в.\,у.}\,(i_{в.\,у.} - w_0)\,k}{580} = \frac{-2060 - 150\,(32{,}3-10)\,0{,}2}{580} = -4{,}7‰.$$

Из сравнения эквивалентных уклонов, определяемых формулами (1) и (8), видно, что влияние вредного уклона на движение состава поезда в изменении скоростей равноценно действию удельной силы тяги на всей длине пути перегона, полученной в виде разности:

$$f_{уд} = 4{,}7 - 3{,}6 = 1{,}1\ кг/т.$$

Дальнейший расчет приближенным методом при наличии эквивалентного, приведенного к заданной скорости, уклона производится аналогично предыдущему примеру. По известному выражению (22) или

расчетному графику, представленному на рис. 1, определяется длина разгона и по формуле (23) — длина замедления; затем по сумме их находится длина цикла «разгон—замедление». По формулам (40), (41) и (42) находится время движения, а затем умножением времени движения на соответствующие величины токов находится расход энергии. Результаты расчетов вносятся в таблицу-график, приведенный на рис. 7 (в верхней части). Как видно из графика, длина начального разгона составляет

$$l_{\text{нач. раз}} = 12 + 5{,}6 = 17{,}6 \ м,$$

а длина пути замедления при остановке —

$$l_{\text{ост}} = \frac{3{,}9\,(1 + 0{,}075)\,10^2}{4{,}7 - 10 - 19{,}4} = 17 \ м.$$

По длине пути цикла «разгон—замедление», равной 232 *м*, общее число циклов по перегону согласно выражению (34) определится:

$$\text{Ц} = \frac{580 - (17{,}6 + 17)}{232} = 2{,}36 \text{ цикла}.$$

Время движения за один цикл (см. рис. 7) составляет:

$$t_{\text{ц}} = 1{,}71 + 2{,}2 + 3{,}44 + 4{,}78 + 4{,}97 + 33{,}6 \approx 58 \ сек.$$

С учетом начального времени разгона $t_{\text{нач}} = 13{,}3 + 2{,}37 = 14{,}67$ *сек* и времени замедления при остановке $t_{\text{ост}} = 12{,}2$ сек. общее время движения по перегону определится:

$$\Sigma t = t_{\text{ц}}\,\text{Ц} + t_{\text{нач. раз}} + t_{\text{ост}} = 58 \quad 2{,}36 + 14{,}67 + 12{,}2 \approx 165 \text{ сек}.$$

Из приведенных расчетов видно, что время движения почти полностью совпадает с определяемым точным графоаналитическим методом расчетов и равно 170 сек.

Расход энергии согласно графику, представленному на рис. 7, за один цикл «разгон—замедление» составляет 2415 *а-сек*. Учитывая расход в начальный период разгона до скорости 10 *км/час* в количестве 1615 *а-сек*, общий расход энергии по перегону определим:

$$\Sigma It = 2415 \cdot 2{,}36 + 1615 = 7315 \ а\text{-}сек.$$

Расхождение в расходе энергии порядка 300 *а-сек*, или около 4%, укладывается в пределы точности расчетов графоаналитическими методами.

Третий пример должен показать возможность определения элементов движения новым методом, когда профиль пути не вызывает необходимости повторного включения и выключения тяговых двигателей и когда есть возможность решения задачи старым, таким же простым методом на основе установившихся скоростей движения по среднему уклону путей. На этом примере удобно показать более высокую точность расчета новым методом и более широкие возможности определения элементов движения при любых ограничениях скорости движения, т. е. более общий характер нового метода.

Расчет произведен по грузовому направлению главных откаточных путей для одной из шахт Черемховского угольного бассейна. Профиль пути представлен на графике рис. 8. Как и в предыдущих случаях, для оценки точности расчетов приближенными методами предварительно произведен расчет детальным графоаналитическим методом при помощи расчетных шаблонов. Результаты расчетов по определению элементов движения сведены в общую таблицу-график, изображенный в умень-

шенном и упрощенном виде на рис. 8. Значение элементов движения, определенных точным методом, внесены в нижнюю часть графика с суммами, вынесенными в правую часть.

Далее произведен расчет упрощенным методом на основе установившихся скоростей движения поезда. Эквивалентный уклон, определяемый по формуле (1), составляет $i_{экв} = -0{,}6‰$. Сила тяги при установившемся режиме работы тяговых двигателей будет:

$$F = 45{,}4\,(10 - 0{,}6) = 427 \text{ кг}.$$

Скорость движения согласно характеристикам (см. рис. 10) отвечает найденной силе тяги и равна 16 *км/час*, а величина тока 36,2 *а*. При общем времени движения

$$t = \frac{L\,3{,}6}{v} = \frac{2810\ \ 3{,}6}{16} = 630 \text{ сек}.$$

Расход энергии по перегону определяется:

$$It = 36\ \ 2\ \ 630 \text{ а-сек}.$$

Сравнивая полученные данные с итогами детального метода расчетов (см. рис. 8), видим, что по времени движения расхождение $660 - 630 = 30$ сек или около 4,5% и по расходу энергии $52910 - 45400 = 7510$ *а-сек* или около 14%. Если по времени движения расхождения и могут являться предельно допустимыми, то по расходу энергии желательно было бы иметь более высокую точность приближенного расчета. А если учесть, что на шахте имеет место ограничение скоростей движения на отдельных участках пути по условиям техники безопасности и состоянию откаточных путей, то становится ясным, что результаты расчетов элементов движения по приведенному методу являются явно заниженными. Фактически на шахте значительно большее время движения и особенно больший расход энергии, чем полученный по этому расчету.

Далее нами, при прочих равных условиях, приводится новый метод расчета элементов движения электровозной откатки на основе неустановившихся скоростей движения. Для сравнения предложены три случая *ограничения скоростей движения по максимуму*. Для каждой из максимальных скоростей по графику (см. рис. 1) определены элементы движения одного цикла «разгон — замедление» от минимальной скорости движения в 10 *км/час*, равной скорости выхода на автоматическую характеристику при максимальной силе тяги. Результаты расчетов внесены в верхнюю часть графика, приведенного на рис. 8. Как и в предыдущих примерах, для каждого из трех случаев найдено количество циклов на общей длине и определены суммарные значения времени движения и расхода энергии по перегону в целом. Результаты расчетов по всем трем примерам сведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, результаты расчетов новым методом более близки к результатам, определяемым детальными методами интегрирования уравнений движения. Результаты расчетов обоих методов почти совпадают по своей величине, когда ограничение скорости по максимуму, принятое в новом методе расчета, приближается к установившейся величине скорости движения, в данном случае к 16 *км/час*. С принятым ограничением скорости по максимуму в 15,7 *км/час* имеют место расхождения величин по времени движения $715 - 660 = 55$ сек (8%) и по расходу энергии $53056 - 52910 = 146$ *а-сек* (0,4%).

Таблица 2

Элементы движения при различных ограничениях скорости по грузовому направлению главных путей на одной из шахт Черемховского бассейна $i_{экв} = 0{,}6‰$, $L = 2810$ м

Элементы движения	Величина ограничения максимальной скорости, км/час		
		15	15,7
Общее время разгона от 0 до $v_{макс}$, сек	32,5	50,9	74,3
Время замедления от $v_{макс}$ до $v_{мин}$, сек	14,3	16,75	18,3
Время начального разгона от 0 до $v_{мин}$, сек	14,84	14,84	14,84
Время разгона от $v_{мин}$ до $v_{макс}$, сек	17,66	36,06	59,47
Общее время одного цикла $t_ц$, сек	31,96	52,61	77,76
Общая длина разгона от 0 до $v_{макс}$, м	78,5	151,5	251,5
Длина пути замедления от $v_{макс}$ до $v_{мин}$, м	47,5	58	65
Начальная длина разгона от 0 до $v_{мин}$, м	18	18	18
Длина разгона от $v_{мин}$ до $v_{макс}$, м	60,5	133,5	233,5
Длина одного цикла «разгон — замедление» $l_ц$, м	108,0	191,5	298,5
Длина пути торможения при остановке, м	14	14	14
Количество циклов по перегону, цикл	25,7	14,5	9,23
Общее время движения по перегону, сек	820	760	717
Общий расход энергии при разгоне до $v_{макс}$, а-сек	3748	5358	7228
Расход энергии при пуске до $v_{мин}$, а-сек	1656	1656	1656
Расход энергии при разгоне от $v_{мин}$ до $v_{макс}$, а-сек	2092	3700	5570
Общий расход энергии по перегону, а-сек	55156	55356	53056

Приведенные расхождения в результатах являются вполне приемлемыми, особенно, если учесть значительное упрощение и сокращение в операциях расчета. Сокращение объема работы по расчету наглядно представлено сравнением на графике, представленном на рис. 8, где вместо интегрирования уравнений движения детальным методом по всему перегону с переменными уклонами, мы ограничиваемся упрощенным расчетом лишь по небольшому участку пути с постоянным уклоном для одного цикла «разгон — замедление», а затем распространяем этот режим работы на всю длину пути.

Однако преимущества нового метода заключаются не только в упрощении и сокращении объема расчетов; этот метод, как видно из большого числа решенных примеров, дает возможность определить элементы движения довольно точно и при любых ограничениях скорости движения поезда по производственным условиям. При этом, как видно из табл. 1, 2, с уменьшением максимальной скорости увеличивается время движения и несколько увеличивается расход энергии, что является вполне закономерным. На ряде конкретных примеров нами доказано, что изменение нижней границы скорости движения при расчете против скорости выхода на автоматическую характеристику практически роли не играет. Совершенно не сказывается на результатах расчетов изменение скорости в сторону уменьшения. При отрицательных уклонах пути на результат расчетов не влияет изменение скорости в любую сторону. Это объясняется тем, что при скоростях, близких к скорости выхода на автоматическую характеристику, остаточные силы тяги, как правило, велики, а следовательно, имеют место большие ускорения. Изменения

скорости в пределах 1—2 *км/час* происходят в течение долей секунды, поэтому при некотором практическом несовпадении нижней границы скорости с принятой по расчету общее время движения и расход энергии большего фактического отклонения иметь не будут.

Для доказательства того, что новый упрощенный метод расчета элементов движения на основе неустановившихся скоростей движения является более общим методом по сравнению с упрощенным расчетом по установившимся скоростям остается рассмотреть случай, когда общая длина пути откатки не составляет даже одного цикла «разгон — замедление». Здесь упрощенный метод дает особенно грубые ошибки.

Для решения такого примера взят фактический профиль пути грузового направления по *«встречникам»* шахты Черемховского угольного месторождения (см. рис. 9). Как видно из графика, величина среднего уклона пути по общей длине 600 *м* составляет — 4‰. При решении задачи обычным упрощенным методом по установившимся скоростям движения, с принятыми значениями $P + Q = 45{,}4$ *м* и $w_{0_{гр}} = 10$ *кг/т*, при равномерном ходе по перегону, имеют место следующие значения элементов движения:

1) сила тяги на один двигатель 136 *кг*;
2) скорость движения при установившемся режиме 21 *км/час*;
3) величина тока, потребляемая двигателями, 25 2 *а*;
4) общее время движения по перегону 103 сек;
5) общий расход энергии по перегону 5130 *а-сек*.

Решая эту задачу по трехпериодной тахограмме скорости, при пуске с переключением с последовательного на параллельное соединение двигателей и при замедлении на свободном выбеге, получим следующие значения элементов движения по перегону:

1) общее время движения 170,7 сек;
2) расход энергии 5500 *а-сек*.

Затем, как и в предыдущих случаях, рассчитаем элементы движения по перегону детальным методом, пользуясь известными расчетными шаблонами. Полученные данные сведены в график и таблицу, представленные на рис. 9 (нижнюю часть).

Наблюдаемые в данном случае значительные расхождения результатов упрощенных расчетов по эквивалентному уклону с установившимися скоростями движения с данными, полученными в результате детального расчета, вполне закономерны.

Фактически скорость движения поезда на таком коротком перегоне вообще не может достигнуть установившейся скорости, равной 21 *км/час*. Это наглядно иллюстрируется графиком, представленным на рис. 9.

В данном случае вообще нет установившегося режима работы тяговых двигателей, вся работа происходит на переходных режимах в разгоне и замедлении. Очевидно, здесь имеют место наиболее близкие к истине условия, принятые в новом методе расчета на основе неустановившихся скоростей движения.

Далее нами произведен расчет элементов движения новым методом при максимальной скорости движения, взятой без ограничений, какой может достигнуть электровоз (21 *км/час*). Результаты расчетов одного цикла «разгон — замедление», при среднем уклоне пути — 4‰, внесены в верхнюю часть таблицы, приведенной на рис. 9. Как видно из таблицы, длина пути разгона составляет 1005 *м* и замедление 236 *м*, т. е. суммарная длина одного цикла 1240 *м* намного превысила общую длину откатки 600 *м*. Учитывая путь начального разгона 1194 *м* и путь

замедления при остановке 16,5 *м*, получим число циклов в общей длине откатки:

$$Ц = \frac{600 - (11{,}4 + 16{,}5)}{1240} = 0{,}463 \text{ цикла}.$$

Из той же таблицы следует, что время движения поезда в одном цикле «разгон — замедление» равно 250 сек. С учетом времени начального разгона 8,24 сек и времени замедления при остановке 11,9 сек, общее время движения по перегону определим:

$$\Sigma t = 250 \quad 0{,}463 + 8{,}24 + 11{,}9 = 139 \text{ сек}.$$

Расход энергии в одном цикле равен 11876 *а-сек*. При умножении его на число циклов и суммировании с энергией начального разгона 1570 *а-сек*, общий расход энергии по перегону составит:

$$\Sigma It = 11876 \quad 0{,}463 + 1570 = 7050 \text{ } а\text{-сек}.$$

Как видно из приведенного примера, и в данном случае расхождения величин расхода энергии и времени движения не превышают допустимых пределов, составляя лишь разницу 3%. Таким образом, доказывается возможность применения указанного метода определения элементов движения и на коротких перегонах, когда расчет обычными упрощенными методами дает неудовлетворительные результаты.

На основании приведенного анализа можно сделать вывод о том, что предлагаемый новый метод определения элементов движения рудничной электровозной откатки, имеющий в основе неустановившийся режим работы тяговых двигателей, является более общим расчетом среди упрощенных методов — дальнейшим развитием теории упрощенных методов расчетов рудничной электровозной откатки по эквивалентным уклонам.

В рудничных условиях, особенно подземной электровозной откатки, детальные методы интегрирования уравнений движения практически не применяются. Обычно ограничиваются решением этих задач на основе упрощенного метода по установившимся скоростям движения. Поэтому предлагаемый метод может быть рекомендован, как более точный, охватывающий все наиболее сложные случаи работы электровоза. Старые упрощенные методы определения элементов движения по установившимся скоростям, как наиболее простые из существующих, могут применяться в случаях работы электровоза на сравнительно спокойном профиле пути с положительным уклоном на длинных перегонах или в предварительных ориентировочных подсчетах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Н. Шклярский, Рудничная откатка электровозами, ОНТИ, 1936.
2. С. А. Волотковский, Подземная электровозная тяга, ГОНТИУ, 1939.
3. В. А. Тимофеев, Электрификация откаточных путей открытых и подземных разработок, КУБУЧ, 1934.
4. А. В. Рысьев, К некоторым вопросам теории рудничной электровозной откатки, Записки Ленинградского горного института, 1948, т. XXII,
5. А. В. Рысьев, Технико-экономический метод определения элементов подземной электровозной откатки, Записки Ленинградского горного института, 1950, т. XXIV.

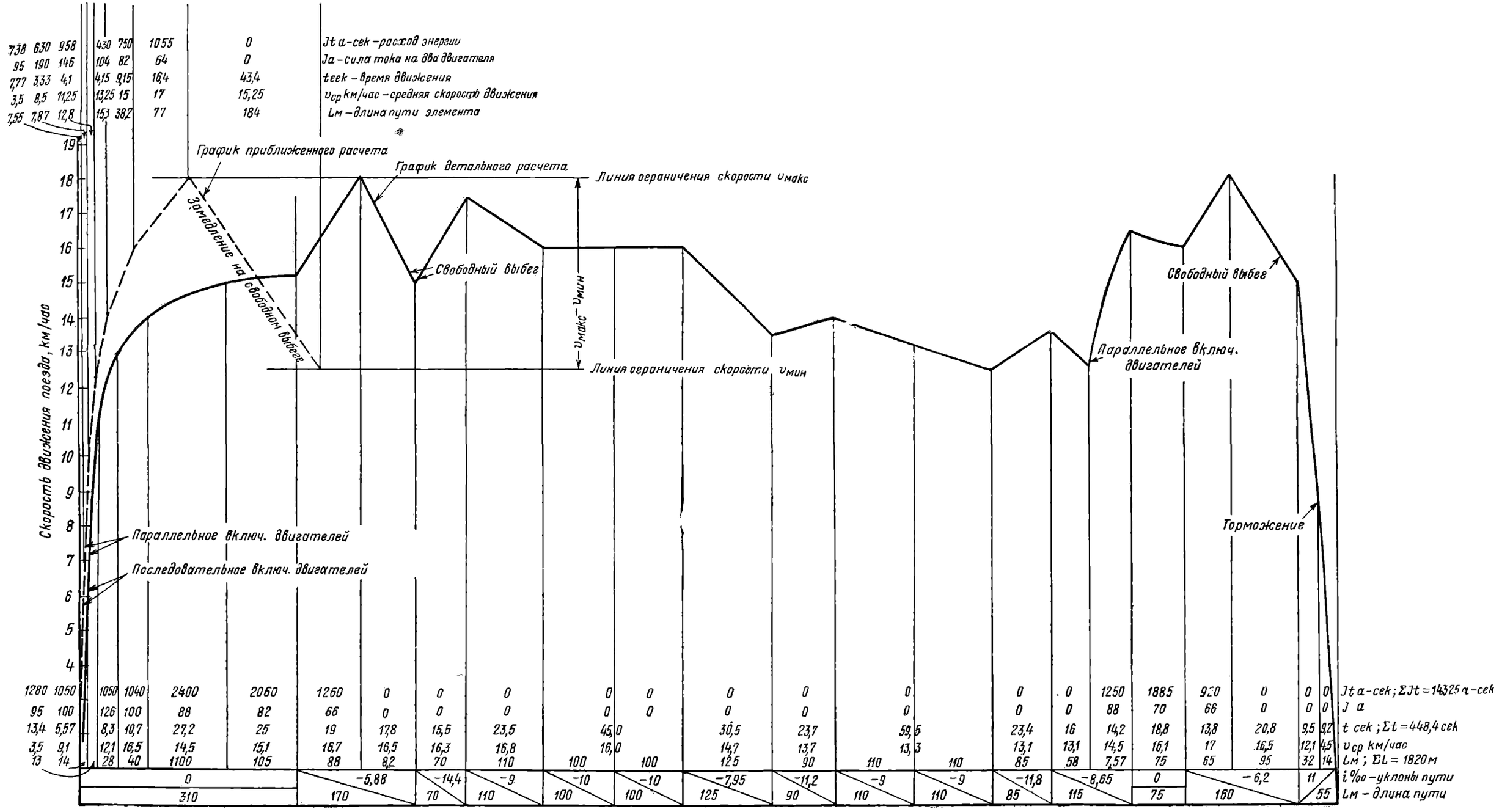


Рис. 6. Расчетная таблица-график к расчету элементов движения по штрекам грузового направления шахты Черемховского месторождения

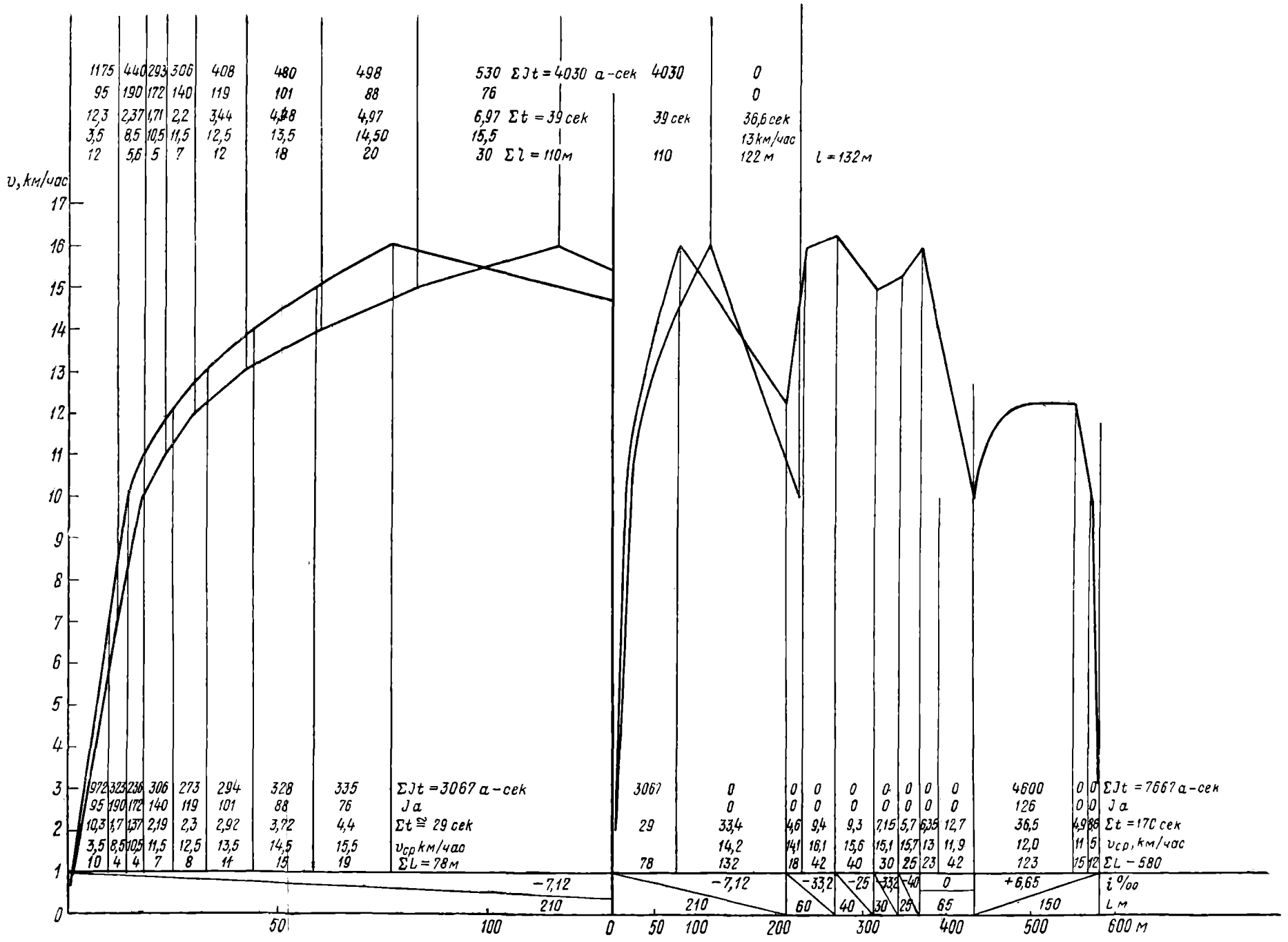


Рис. . Расчетная таблица-график к расчету элементов движения по штрекам грузового направления шахты Черемховского месторождения

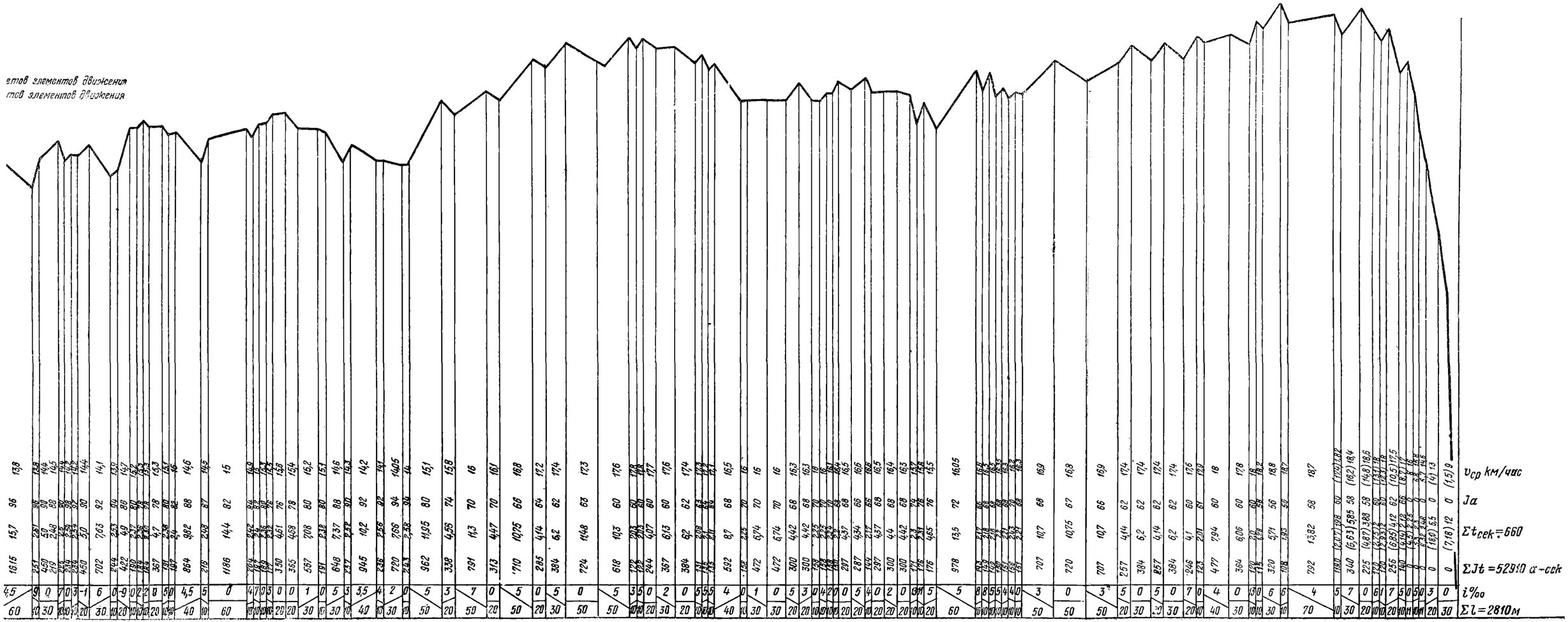


Рис. 8. Таблица-график к расчету элементов движения по главным откаточным путям одной из шахт Черемховского месторождения (грузовое направление)

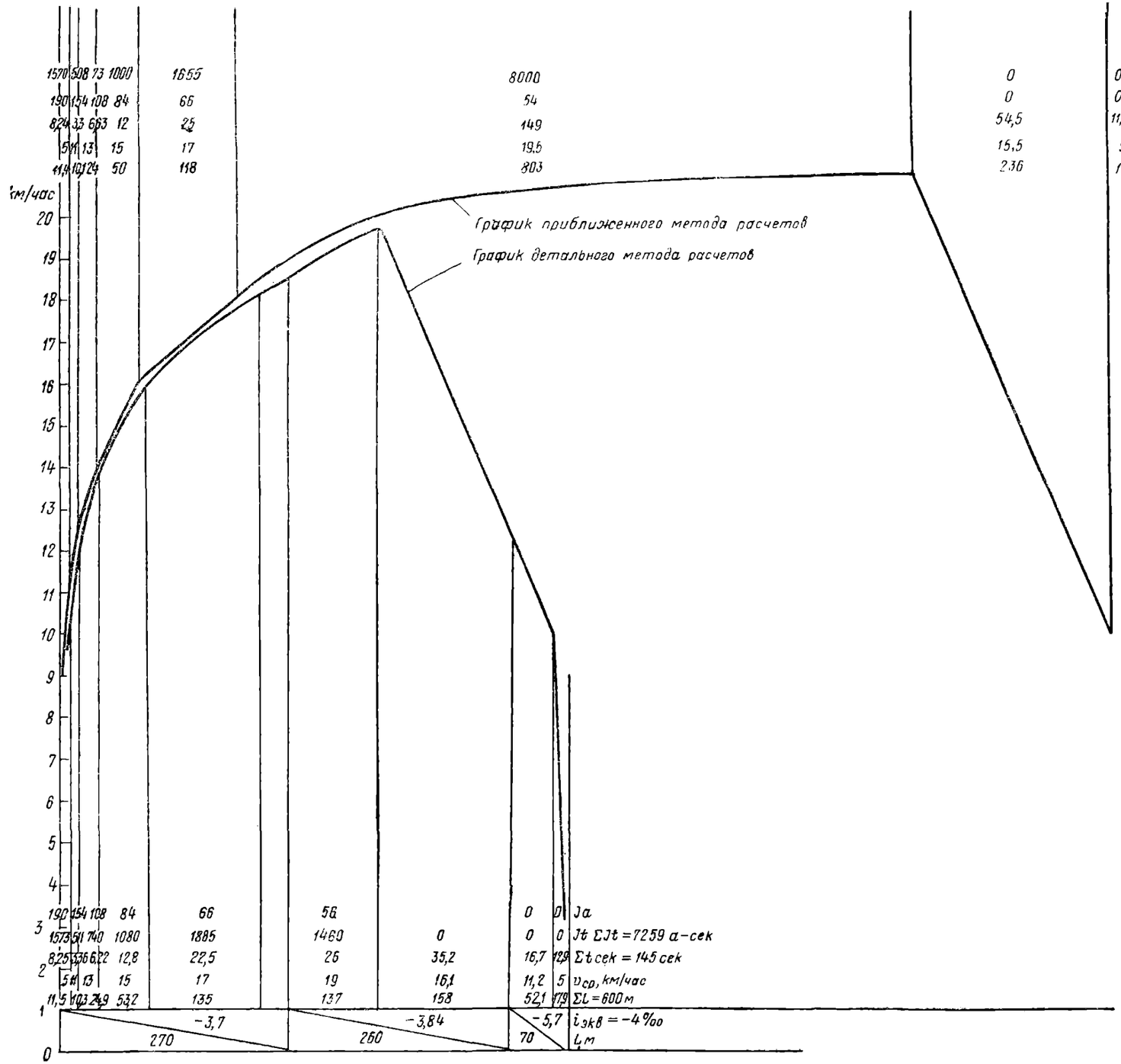


Рис. 9. Таблица-график к расчету элементов движения по встречникам грузового направления шахты Черемховского месторождения

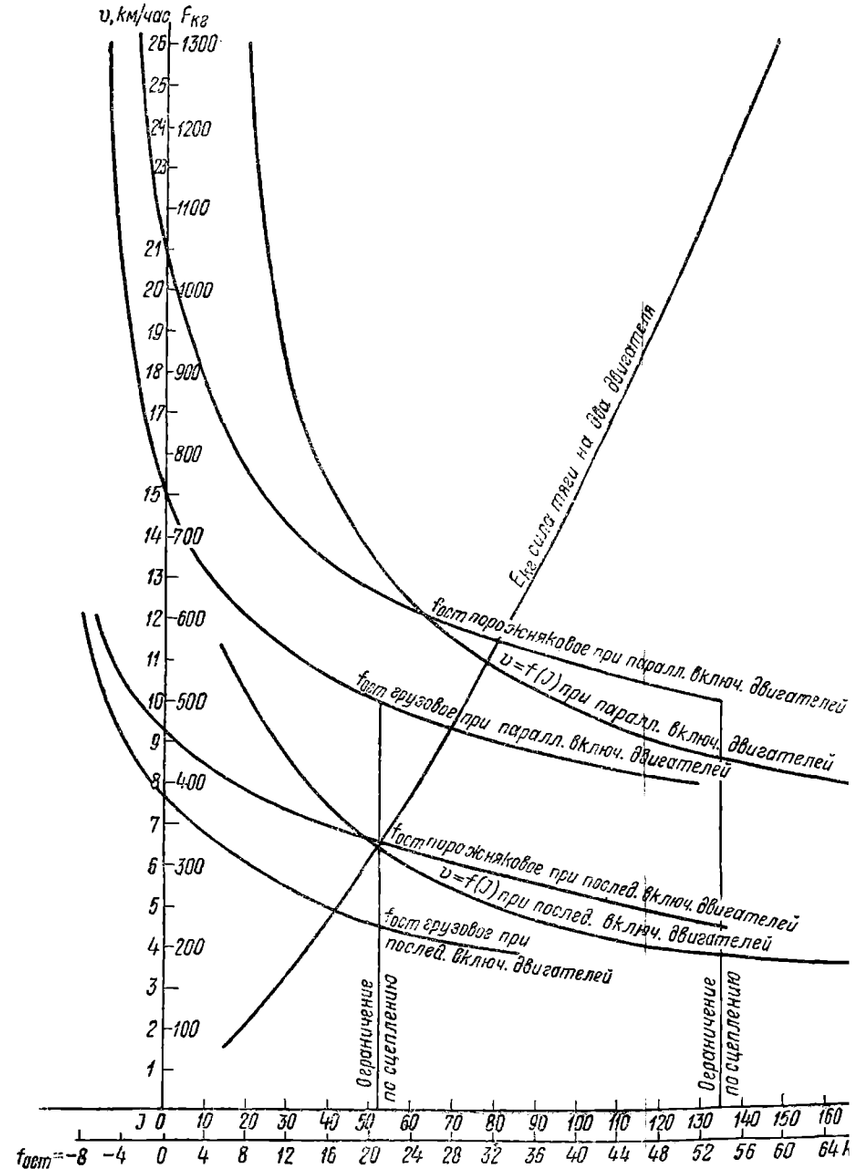


Рис. 10. Характеристика электровоза II—ТР—3