Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института, том XXIX, вып. I, 1953 г.

ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ РУДНИЧНОЙ ЭЛЕКТРОВОЗНОЙ ОТКАТКИ

Доц. А. В. Рысьев

При расчете контактной сети в практике пользуются тремя методами: 1) сечения графиков движения поездов и нагрузочных графиков; 2) приведенных нагрузок; 3) с применением теории вероятностей.

Эти методы в применении к расчету тяговых сетей в условиях рудничной электровозной откатки имеют свои недостатки.

1. Метод сечения графиков отличается громоздкостью вычислений, требует предварительного построения графиков движения поездов и нагрузочных графиков. Кроме того, в условиях рудничной электровозной откатки он иногда не достигает поставленной цели — определения величины нагрузок и точек их приложения на линии. Величина нагрузок на тяговую сеть и точки их приложения при этом получаются весьма условными, представляющими лишь частный случай. Дело в том, что в принципах организации транспорта на рудниках, в частности при построении графиков движения поездов, многое заимствовано из практики магистральных железных дорог. Однако специфические условия транспорта на рудниках и шахтах заставляют при расчетах и организации тяги вносить соответствующие коррективы.

Основными отличиями электровозной откатки на рудниках от транспорта на магистральных железных дорогах являются следующие:

1) непрерывно изменяющаяся длина и часто направление откатки в связи с подвижностью фронта добычных работ, а на открытых горных разработках — и в связи с подвижностью мест разгрузки грузов на отвалах;

2) замкнутый челноковый характер транспортирования в пределах погрузочных пунктов на добычных участках и разгрузочных пунктов на отвалах и приемных или перегрузочных бункерах, когда одно направление движения является всегда грузовым, а второе — порожняковым;

3) преимущественно неспокойный профиль откаточных путей, имеющий большие уклоны, достигающие $\pm 30^0/_{00}$, что особенно характерно для открытых горных разработок или шахт с пологопадающим горизонтальным или мульдообразным залеганием месторождений полезных ископаемых, когда откаточные выработки проходятся по почве разрабатывающихся пластов;

4) короткие перегоны пути, частые остановки при движении, подтормаживания, искусственное уменьшение скорости по разным причинам и изменение графика движений по времени, вызываемое изменением производительности отдельных участков, а также изменением длины откатки;

5) часто неудовлетворительное состояние верхнего строения откаточных путей, обычно проложенных по почве выработок;

6) затрудненная видимость машинисту электровоза во время езды, в связи с чем необходимы повышенные требования к правилам и устройствам техники безопасности вождения поездов;

7) большая разбросанность мест погрузки и отсутствие на них бункеризации грузов.

Все эти особенности рудничной электровозной откатки, естественно, вызывают необходимость изменения методов ее проектирования. Переменная длина и направление откаточных путей определяют различную длительность рейса, а иногда и изменение эквивалентного уклона профиля откаточных путей. Это, в свою очередь, отражается на величинах, определяющих выбор элементов подвижного состава, т. е. на сцепном весе электровоза и количестве вагонов в составе. Изменение длительности рейса требует разного количества необходимых единиц подвижного состава (электровозов, вагонов) и изменения организации работ и графиков движений. Все это обусловливает непостоянный удельный расход энергии.

Таким образом, по мере развития горных работ на шахте или руднике рудничный транспорт должен рассматриваться в непрерывном развитии — в динамике. Здесь, в отличие от транспорта магистральных железных дорог, где длина перегонов и производительность обычно постоянны, необходимо иметь в виду увеличение длины перегонов, если добычные работы ведутся от ствола шахты к границам шахтного поля, и уменьшение длины перегонов, если выемка полезного ископаемого производится от границ шахтного поля к стволу шахты. Изменение длины откатки происходит при каждом переносе погрузочных пунктов на новый бремсберг, спуск или уклон. Следовательно, длина откатки может изменяться иногда через каждые три-четыре месяца. Одновременно с этим может значительно изменяться производительность электровозной откатки отдельных крыльев. Изменение производительности может происходить с вводом в работу новых лав, уступов в разрезах, резервных забоев. В подземных условиях производительность откатки изменяется с развитием работ на новом горизонте, а также при отработке старых горизонтов; то же имеет место и на открытых разработках при развитии работ на отдельных уступах, имеющих обособленные направления трасс откаточных путей. Изменение производительности откатки может вызвать и неравномерная выдача полезного ископаемого из забоев в течение суток. Иногда выдача полезного ископаемого из забоя изменяется по величине даже в течение одной смены, обычно увеличиваясь к концу.

Таким образом, изменения производительности и длины откатки, накладываясь друг на друга, образуют сложные суммарные изменения по времени производительности откатки (*ткм*).

В большинстве случаев суммарные изменения производительности откатки по времени не поддаются точному аналитическому определению и являются в каждом случае различными.

Наряду с изменением длины и производительности откатки в ряде случаев, по мере развития горных работ, изменяется эквивалентный уклон откаточных путей. Это изменение может быть особенно значительным в условиях открытых горных разработок. По мере углубления горных работ с переходом на нижележащие горизонты в карьере общий эквивалентный уклон откаточных путей будет возрастать.

Рассмотрев только три фактора, определяющие основные изменяющиеся параметры в расчете электровозной откатки, видим, что выбор

элементов подвижного состава (электровозов, вагонов) и определение элементов движения (скорость движения, сила тяги, время движения и расход энергии) будут удовлетворять только какому-то одному моменту в развитии горных работ. Для рудничных условий при беспрерывно изменяющихся параметрах, определяющих элементы движения, весь расчет может носить приближенный характер. При расчете приходится задаваться тем или иным отрезком времени в развитии горных работ и определять расчетные величины по средним или максимальным значениям длины, производительности откатки и эквивалентного уклона откаточных путей за данный отрезок времени. Очевидно, точность результатов расчетов будет тем ближе к истинным величинам, чем меньше взят расчетный отрезок времени в эксплуатации месторождения — в развитии горных работ. Чем больше будет выделено отдельных расчетных элементов времени в развитии работ на шахте или руднике, обладающем особыми условиями для электровозной откатки, тем точнее будет расчет.

Таким образом, специфические условия рудничной электровозной откатки при решении проектных и производственных задач требуют большого количества параллельных расчетов с приближенной точностью. Имея в виду однотипность оборудования (электровозов, вагонов и др.) и унификацию организации производства за некоторый период эксплуатации месторождения или участка, при расчетах необходимо выбрать правильный вариант из нескольких возможных. При выборе варианта наряду с техническими надо учитывать большое значение экономических сравнений.

Технико-экономические сравнения обычно отличаются большим объемом расчетных работ, что при значительном количестве параллельных расчетов крайне затруднительно. Очевидно, для массовых расчетов здесь необходимо иметь простые расчетные графики, полученные на основании технико-экономического сравнения отдельных вариантов с возможно полным учетом всех факторов, влияющих на выбор оборудования, и других расчетных элементов.

Таким образом, исходные данные для расчета контактных сетей — графики движения электровозов и нагрузочные графики — являются фиктивными или частными случаями из большого количества возможных вариантов. Любое сечение, взятое по таким графикам, очевидно, не будет отражать истинной картины нагрузок на тяговую сеть. Особенностью графиков движения рудничной электровозной откатки является также то, что время маневровой работы электровозов по сравнению с временем движения велико, поэтому при сечении графиков наибольшее число электровозов попадает в сечение на маневровой работе. Нагрузка же на сеть при маневровой работе электровозов является весьма неопределенной. Кроме того, небольшая задержка или уменьшение времени маневров значительно резко изменяют место положения электровозов на линии — передвигают точку приложения нагрузки на сеть. При определении числа электровозов принимаемый запас в 25% и округление до целых чисел также ведет к уклонению от истинного графика движения поездов. И, наконец, необходимые искусственные ограничения скорости движения в пути, зависящие от машиниста, делают график нагрузки на сеть еще более неопределенным. В каждый данный момент времени электровоз может оказаться на свободном выбеге или в режиме разгона под током.

Таким образом, метод расчета рудничных тяговых сетей по графикам движения является не только трудоемким и громоздким, но и по идее не удовлетворяющим условиям рудничной электровозной откатки.

2. В основу расчета тяговой сети методом приведенных нагрузок положен принцип чередования груженых и порожних составов, движущихся с одинаковыми скоростями, на одинаковом расстоянии друг от друга и с одинаковыми нагрузками на тяговые двигатели при установившемся движении. При этом подразумевается постоянный уклон на всем протяжении откаточного пути, большая длина откатки и сравнительно малая скорость движения, т. е. считается, что движение поездов преимущественно происходит на установившейся скорости. При этом условии нагрузка может рассматриваться как равномерно распределенная по всей длине сети. Когда нагрузка от всех электровозов одинакова (расчет сети на падение напряжения), нагрузка на сеть может рассматриваться даже как сосредоточенная и приложенная в одной точке. Точка приложения нагрузки может быть принята в конце или близко к середине длины линии [2]. Когда нагрузка прикладывается (приводится) к концу линии, она берется в половинном размере от суммы всей нагрузки и увеличивается на половинную нагрузку одного электровоза.

Расчет контактной сети на падение напряжения будет эквивалентным, если взять полную нагрузку линии и считать ее приведенной в точке с длиной плеча от пункта питания до половины расстояния длины линии. Такое распределение нагрузки на сеть дает удобные и простые формулы для расчета контактной сети на падение напряжения:

$$\Delta u_{ср} = 1{,}1 r_c L_у I_{ср} N_у' \ в, \qquad (1)$$

где 1,1 — коэффициент, учитывающий падение напряжения в питающем и отсасывающем фидерах;

r_c — общее сопротивление 1 *км* тяговой сети (рельсов и контактного провода), *ом/км*;

$L_у$ — общая длина откаточного участка, *км*;

$I_{ср}$ — средний поездной ток, *а*;

$N_у'$ — приведенное число поездов (электровозов) на откаточном участке

$$I_{ср} = \frac{I_{гр} + I_{пор}}{2} \ a,$$

где $I_{гр}$ — ток грузового направления;

$I_{пор}$ — ток порожнякового направления;

$$N_у' = \frac{N+1}{2},$$

где N — действительное число электровозов на участке.

Недостатком приведенного метода расчета контактной сети является исходное предположение о том, что нагрузка на сеть является равномерно распределенной по длине сети и постоянной по своей величине. Это соответствует только частному случаю. Фактически же нагрузка на тяговую сеть рудничной электровозной откатки часто является неравномерно распределенной и непостоянной по своей величине.

Мощность, потребляемая электровозом за период рейса, меняется в широких пределах (от нуля до максимума, равного пусковой мощности). Изменение величины потребляемой мощности связано с периодами пуска, замедления, ограничения скорости движения на кривых малого радиуса и с изменением уклонов пути. Как установлено ранее [4], для большинства электровозов установившееся движение возможно толь-

ко при движении на подъем или с весьма большим составом поезда. В обычном случае движение характеризуется периодическим включением и выключением тяговых двигателей. Следовательно, нагрузка на сеть является резко переменной даже при равномерном движении поезда на спокойном профиле пути. При наличии нескольких электровозов на линии комбинации таких резко переменных нагрузок в отдельные моменты могут быть еще более разнообразны. В этом случае трудно представить себе постоянство величины нагрузки на линии. Изменение величины нагрузки как на сеть, так и на тяговую подстанцию одинаково. Величина нагрузки тяговых подстанций резко переменная [8]. Наряду с мгновенными изменениями нагрузка на тяговые подстанции изменяется по часам работы, в течение смены, суток и другим, более крупным отрезкам времени эксплуатации месторождения. Эти дополнительные изменения величины нагрузки на линию обусловлены технологией добычи полезного ископаемого, характером развития горных работ на горизонтах и уступах.

На большинстве шахт и карьерах открытых горных разработок схемы откаточных путей являются весьма разветвленными. Их трудно представить вытянутыми в линию с равномерным распределением электровозов. На разветвленных линиях точки приложения нагрузок часто будут совпадать с точками ответвлений контактного провода от главной линии. При расчете сетей по методу приведенных нагрузок подразумевается, что все электровозы (независимо от их количества и длины пути) находятся все время в движении и под током. Чем больше число электровозов и короче путь, тем большее количество их находится на погрузочных пунктах и меньшее время они могут находиться на равномерном ходу. В зависимости от схемы путей, разбросанности погрузочных пунктов, характера механизации на погрузке и разгрузке вагонов, какое-то количество электровозов всегда будет исключено из движения, а следовательно, снижена нагрузка на сеть.

Электровозы и при равномерном движении не все время находятся под током [4]. Нагрузка, потребляемая тяговыми двигателями из сети и от преобразовательной подстанции, сосредоточивается на небольшом отрезке времени движения и только в периоды разгона до допустимой скорости $v_{макс}$ (рис. 1). Причем время потребления тока будет тем меньше, чем меньше состав поезда и сила тяги электровоза, обусловленная только статическими сопротивлениями движению. Однако величина тока, потребляемая при этом, будет фактически одинакова. Она, согласно характеристике тяговых двигателей, будет определяться полной силой тяги электровоза при разгоне.

Статические сопротивления движению поезда, определяемые величиной состава поезда и уклоном пути, будут дополняться динамическими усилиями, обусловливающими ту или иную величину ускорения при разгоне.

Фактически величина потребляемого тока из сети будет отличаться от тока установившегося движения поезда. Отличие будет тем больше, чем меньше статические сопротивления движению поезда, а следовательно, чем больше динамические усилия при разгоне. В рудничных условиях, как правило, езда происходит на неустановившихся режимах работы тяговых двигателей. В связи с этим в расчете сети и тяговой подстанции при определении нагрузок необходимо, очевидно, учитывать время нахождения поезда под током, определять величину нагрузки из полных сопротивлений движению, включая и динамические.

3. Метод расчета контактных сетей и тяговых подстанций с применением теории вероятностей нужно считать наиболее совершенным. Однако наличие особых условий электровозной тяги на разрезах и в шахтах ограничивает возможность его применения в чистом виде. Этот метод дает более удовлетворительные результаты при значи-

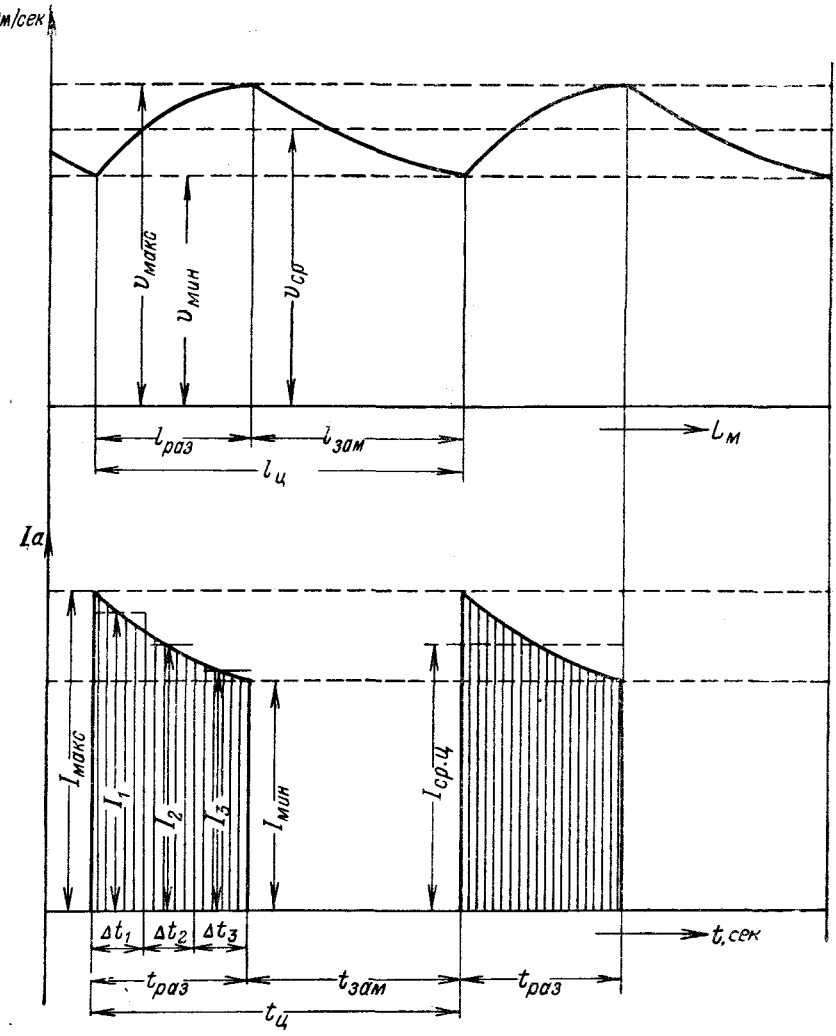


Рис. 1. График скорости и потребляемого электровозом тока

тельном количестве электровозов на линии и беспорядочном их движении.

В шахтных условиях число электровозов обычно мало. Кроме того, в рудничных условиях, хотя и частично нарушаемый, существует график движения поездов, определяющий вполне закономерный характер нагрузки. Он не учитывает возможные резкие изменения профиля откаточных путей, разницу в величине нагрузок грузового и порожнякового направлений движения, различные соотношения времени движения и маневров, времени движения под током и без тока.

ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

1. Определение мощности тяговой подстанции

При определении мощности тяговой подстанции и выборе преобразователей необходимо, чтобы машины и аппараты при продолжительной работе, во-первых, не нагревались свыше допустимого предела, во-вторых, при пиковых нагрузках удовлетворяли бы допустимым перегрузкам.

В предлагаемом методе для определения мощности тяговой подстанции рекомендуется использовать данные расчета элементов движения по методу неустановившейся скорости поездов, т. е. данные величины тока по времени движения $I = f(t)$ [5].

График нагрузки, определяемый по методу неустановившейся скорости движения, является эквивалентным по нагреву тяговых двигателей истинному графику величины тока на заданном профиле пути. Несмотря на сложность графика определение его этим методом является довольно простым. График нагрузки дает основные параметры для определения мощности тяговой подстанции. Графиком довольно точно определяется величина потребляемого тока тяговыми двигателями на заданном профиле пути и время движения, четко выделяется время движения поезда под током, т. е. истинная величина нагревательного тока.

Согласно графику тока, потребляемого тяговыми двигателями при неустановившемся режиме работы (рис. 1), эквивалентный нагревательный ток может быть определен по формулам:

а) за один цикл «разгон и замедление»

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum I_i^2 \Delta t_{i\,\text{раз}}}{t_{\text{раз}} + t_{\text{зам}}}} = \sqrt{\frac{I_1^2 \Delta t_1 + I_2^2 \Delta t_2 + \ldots I_n^2 \Delta t_n}{t_{\text{раз}} + t_{\text{зам}}}}\ a; \qquad (2)$$

б) за полурейс одного электровоза в грузовом или порожняковом направлении движения

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{I_i^2 \Delta t_i K_{\text{ц}}}{(t_{\text{раз}} + t_{\text{зам}}) K_{\text{ц}}}}\ a; \qquad (3)$$

в) за полный рейс одного электровоза

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{I_{i\,\text{гр}}^2 \Delta t_{i\,\text{гр}} K_{\text{ц. гр}} + I_{i\,\text{пор}}^2 \Delta t_{i\,\text{пор}} K_{\text{ц. пор}}}{(t_{\text{раз}} + t_{\text{зам}})_{\text{гр}} K_{\text{ц. гр}} + (t_{\text{раз}} + t_{\text{зам}})_{\text{пор}} K_{\text{ц. пор}} + \theta}}\ a; \qquad (4)$$

г) суммарный нагревательный ток при нескольких электровозах

$$I_{\text{экв}} = N_{\text{э}} \sqrt{\frac{I_{i\,\text{гр}}^2 \Delta t_{i\,\text{гр}} K_{\text{ц. гр}} + I_{i\,\text{пор}}^2 \Delta t_{i\,\text{пор}} K_{\text{ц. пор}}}{(t_{\text{раз}} + t_{\text{зам}})_{\text{гр}} K_{\text{ц. гр}} + (t_{\text{раз}} + t_{\text{зам}})_{\text{пор}} K_{\text{ц. пор}} + \theta}}\ a, \qquad (5)$$

где I_1, I_2 и т. д. — величина потребляемого тяговыми двигателями тока в период разгона в грузовом или порожняковом направлении движения соответственно за периоды времени Δt_1, Δt_2 и т. д.;

$t_{\text{раз}}$ — время разгона поезда под током;

$t_{\text{зам}}$ — время замедления поезда без тока;

$K_{\text{ц. гр}}$, $K_{\text{ц. пор}}$ — количество циклов „разгон и замедление" соответственно в грузовом и порожняковом направлении движения;

θ — общее время маневровой работы и простоев электровоза.

Для практических целей полученные формулы могут быть значительно упрощены. В частности, для подземных условий откатки при уклонах

равного сопротивления тока нагрузки грузового и порожнякового направлений движения одинаковы и суммарный нагревательный ток определится формулой

$$I_{\text{экв}} = N_{\text{э}} \sqrt{\frac{I_i^2 \Delta t_i K_{\text{ц}}}{(t_{\text{раз}} + t_{\text{зам}}) K_{\text{ц}} + \theta}}\, a. \tag{6}$$

Это выражение может использоваться для определения нагревательного тока и в тех случаях, когда величина тока грузового направления движения отличается от нагрузки двигателей при движении в порожняковом направлении. Тогда при расчете надлежит принимать средние величины элементов движения грузового и порожнякового направлений, определяемые формулами

$$\left.\begin{aligned} I_{\text{ср 1}} &= \frac{I_{\text{гр 1}} \Delta t_{\text{гр 1}} + I_{\text{пор 1}} \Delta t_{\text{пор 1}}}{\Delta t_{\text{гр 1}} + \Delta t_{\text{пор 1}}}\, a; \\ I_{\text{ср } i} &= \frac{I_{\text{гр } i} \Delta t_{\text{гр } i} + I_{\text{пор } i}\, \Delta t_{\text{пор } i}}{\Delta t_{\text{гр } i} + \Delta t_{\text{пор } i}}\, a; \\ \Delta t_{\text{ср 1}} &= \frac{\Delta t_{\text{гр 1}} + \Delta t_{\text{пор 1}}}{2} \text{ сек.}; \quad \Delta t_{\text{ср } i} = \frac{\Delta t_{\text{гр } i} + \Delta t_{\text{пор } i}}{2} \text{ сек.} \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

Точность таких расчетов для подземных условий вполне достаточна. Отклонения результатов вычислений не превышают 5%. Фактически величина тока при разгоне с грузом или порожняком остается одинаковой и меняется лишь время разгона.

Дальнейшее упрощение расчетных формул может быть допущено в тех случаях, когда разность скоростей движения электровоза между минимальной (при выходе на автоматическую характеристику) и максимальной (допустимой по условиям откатки) невелика; когда величина тока в период разгона поезда на автоматической характеристике меняется в небольших пределах. Тогда ток нагрузки может определяться по формуле

$$I_{\text{ср. гр}} = \frac{\Sigma I_{i\,\text{гр}} \Delta t_{i\,\text{гр}}}{t_{\text{раз. гр}}}\, a, \qquad I_{\text{ср. пор}} = \frac{\sum I_{i\,\text{пор}}^2 \Delta t_{i\,\text{пор}}}{t_{\text{раз. пор}}}\, a, \tag{8}$$

а эквивалентный (нагревательный) ток — выражением

$$I_{\text{экв}} = N_{\text{э}} \sqrt{\frac{I_{\text{ср. гр}}^2 t_{\text{раз. гр}} K_{\text{ц. гр}} + I_{\text{ср. пор}}^2 t_{\text{раз. пор}} K_{\text{ц. пор}}}{(t_{\text{раз}} + t_{\text{зам}})_{\text{гр}} K_{\text{ц. гр}} + (t_{\text{раз}} + t_{\text{зам}})_{\text{пор}} K_{\text{ц. пор}} + \theta}}\, a. \tag{9}$$

Формулой (9) можно пользоваться как для условий подземной откатки, так и для открытых горных разработок.

Имея в виду, что минимальная скорость выхода на автоматическую характеристику и максимальная допустимая скорость движения электровоза для грузового и порожнякового направлений движения могут быть приняты одинаковыми, можно считать

$$I_{\text{ср. гр}} \approx I_{\text{ср. пор}}.$$

В том случае, когда можно пользоваться средними токами между грузовым и порожняковым направлением движения, расчетная формула примет вид

$$I_{\text{экв}} = N_{\text{э}} \sqrt{\frac{I_{\text{ср}}^2 (t_{\text{раз. гр}} + t_{\text{раз. пор}}) K_{\text{ц}}}{(t_{\text{раз. гр}} + t_{\text{раз. пор}}) K_{\text{ц}} + \theta}} = N_{\text{э}} I_{\text{ср}} \sqrt{\frac{T_{\text{дв. т}}}{T_{\text{р}}}}\, a, \tag{10}$$

где $T_{\text{дв. т}}$ — время движения поезда под током в течение одного рейса, сек.;

$T_{\text{р}}$ — полное время рейса, включая время маневров и стоянок, сек.

Для нормальных условий подземной электровозной откатки можно пользоваться формулой (10). Результаты точности расчетов по ней не выходят за пределы отклонений, обусловленных графо-аналитическими методами расчетов.

В условиях электровозной откатки на открытых горных разработках упрощенной формулой можно пользоваться только в частных случаях, когда профиль пути спокойный и величина скорости на автоматической характеристике изменяется в небольших пределах.

Как видно из формулы (10), нагревательный ток прямо пропорционален числу электровозов $N_{\text{э}}$, среднему току нагрузки при разгоне $I_{\text{ср}}$ и корню квадратному из отношения времени движения поезда под током к общему времени рейса. Для удобства решения практических задач эта параболическая зависимость может быть выражена графически в осях координат $I_{\text{ср}}$ и $\frac{T_{\text{дв. т}}}{T_{\text{р}}}$.

Имея данные расчетов элементов движения $I_{\text{с}}$, $T_{\text{дв. т}}$ и $T_{\text{р}}$, а также число рабочих электровозов $N_{\text{э}}$ по расчетным кривым, можно быстро определить эквивалентный (нагревательный) ток нагрузки на тяговую подстанцию. Затем по этому току может быть выбран соответствующий преобразовательный агрегат.

Для проверки преобразователя на перегрузку необходимо знать коэффициент одновременности работы электровозов под нагрузкой. В настоящее время вполне обоснованных данных по определению коэффициентов одновременности работы электровозов нет. Одновременность работы электровозов, естественно, будет зависеть от числа электровозов на линии и от графика нагрузки.

Определение коэффициента одновременности работы электровозов в рудничных условиях усложняется в связи со значительными нарушениями графика движения электровозов. Однако совсем игнорировать наличие графиков движения электровозов было бы тоже неправильным. Здесь имеет место вполне закономерное чередование движения и пауз в грузовом и порожняковом направлении, чередование движения поездов под током и при выключенных двигателях. Эти элементы времени могут быть сдвинуты относительно друг друга в ту или иную сторону, но количество их и характер нагрузки останутся более или менее постоянными. Причем количество элементов времени движения поезда под током и характер нагрузки на тяговую подстанцию будут определяться характеристикой статических сопротивлений движению, т. е. профилем пути.

Очевидно, чем больше статические сопротивления движению, чем больше время движения под током $T_{\text{в. т}}$, тем больше коэффициент одновременности работы электровозов (при других равных условиях). Коэффициент одновременности, естественно, будет уменьшаться с увеличением числа электровозов на линии.

Одновременность работы электровозов под током еще не полностью характеризует суммарную нагрузку на тяговую подстанцию. При этом дополнительно необходимо знать величину нагрузки каждого из одновременно работающих электровозов. Наиболее характерными нагрузками электровозов считаются пусковая и нагрузка установившегося движения поезда.

Однако, фактически график нагрузки является более сложным. При движении поезда на равномерном ходу нагрузка иногда резко изменяется. Машинист электровоза вынужден часто включать и выключать тяговые двигатели. Следовательно, нагрузка при этом может меняться от пусковой до установившейся скорости движения или скорости максимально допустимой на данном перегоне.

Таким образом, наиболее характерной нагрузкой электровозов является переменная, не установившаяся величина нагрузки в указанных выше пределах. При этом задача несколько упрощается тем, что пределы изменения величины нагрузки могут быть приняты одинаковыми для грузового и порожнякового направлений движения независимо от величины статических сопротивлений движению. Разница может быть учтена лишь во времени действия этой нагрузки.

При больших статических сопротивлениях время разгона — время действия нагрузки — будет больше, чем при малых статических сопротивлениях.

На коэффициенте одновременности в сильной степени отразится также длительность пауз Θ. Чем больше Θ при прочих равных условиях, тем меньше будет одновременность работы электровозов. Большое количество проведенных наблюдений за работой рудничных электровозов в условиях подземной откатки и на открытых разработках показывает, что из времени пауз Θ время работы электровоза под током составляет всего лишь 3—4%. В связи с этим при определении коэффициента одновременности работы электровозов указанным временем можно пренебречь или учесть его некоторым процентом в общем времени работы электровозов под током.

При таких условиях одновременность работы электровозов может быть установлена лишь как некоторая средняя величина, от которой возможны значительные отклонения в ту и другую сторону. При наличии на линии большого числа электровозов в работе под током одновременно может оказаться разное количество электровозов. При этом может быть несколько пределов максимальной нагрузки, превышающей эквивалентное значение: например, при пяти электровозах на линии могут одновременно брать ток все пять и четыре электровоза. То и другое суммарное значение тока может превышать эквивалентный ток нагрузки на подстанцию.

При этом важно знать, не только величину тока максимальной нагрузки, но и время ее действия. Обычно перегрузочные способности машин и аппаратов указываются по величине и времени действия той или иной перегрузки. Для ртутных выпрямителей, например, указывается величина перегрузки в процентах от номинального выпрямленного тока, продолжительности перегрузки (сек., мин. или час.), кроме того, дается допустимый интервал между перегрузками (час. или мин.). Таким образом, перегрузочная способность аппарата должна удовлетворять всем трем условиям определяемой нагрузки. Однако задача несколько упрощается тем, что при уменьшении величины процента перегрузки можно допустить более продолжительное время ее действия, чем указано в каталоге, или меньший интервал между перегрузками.

Одним словом, в данном случае и по заданию не требуется какой-то строгий постоянный коэффициент, выше которого переступить нельзя. Нужно установить некоторые средние условия перегрузки подстанции, определяемые тремя параметрами: величиной, временем действия и частотой повторения. Высокая точность их расчетов не обязательна, так как они могут иметь весьма большие отклонения с компенсацией одного параметра другим.

Перегрузка преобразователя может быть допущена и в бо́льшем проценте, чем указано в каталоге, если она будет действовать менее продолжительное время или реже повторяться.

Эти требования норм эксплуатации оборудования удачно согласуются с условиями работы на тяговых подстанциях, где при различных сочетаниях нагрузок отдельных электровозов в одновременной их работе под током будут иметь место разной величины нагрузки, действующие при различной продолжительности и имеющие разную частоту повторений. Вероятность повторений в нагрузке одного электровоза можно ожидать при каждом новом разгоне под током в пределах принятых скоростей $v_{макс}$ и $v_{мин}$. Вероятность повторений различных сочетаний нагрузок нескольких электровозов на подстанцию зависит от числа электровозов и соотношения времени движения электровозов под током к общему времени рейса электровоза.

При указанных условиях для решения задачи по определению одновременности работы электровозов на линии можно применить элементы теории вероятностей. Может быть допущена та невысокая точность расчетов, которая имеет место в данном методе при малом числе равновероятных случаев.

При определении перегрузки требуется определить: 1) средние наиболее вероятные случаи сочетания нагрузок при заданных условиях откатки и графике движения; 2) средние значения длительности действия этих перегрузок; 3) среднюю частоту их повторений.

При этом заранее подразумевается возможность отклонения этих величин от заданных в широких пределах (в несколько раз).

При расчете делаются следующие допущения: 1) принимается не истинный график нагрузки тяговых двигателей, а график нагрузки на эквивалентном уклоне; 2) все движение поездов рассматривается состоящим из периодов разгонов и замедлений в пределах заданных скоростей $v_{макс}$ и $v_{мин}$; 3) при определении нагрузки время начального разгона до скорости выхода на естественную характеристику не учитывается.

Имея в виду равновероятное и весьма большое число нагрузок каждого из электровозов в пределах величины тока, отвечающего скоростям $v_{мин}$ и $v_{макс}$, вероятную нагрузку одного электровоза определим как средневзвешенную

$$I_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} I_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \Delta t_i} \; a, \qquad (11)$$

где I_i — величина изменяющего тока при разгоне в пределах принятых скоростей $v_{мин}$ и $v_{макс}$, a;

Δt_i — время действия той или иной величины нагрузки, сек.

Таким образом, действующий ток поезда определяется как средняя ордината площади, выражающей расход энергии *(а/сек)* за один разгон в пределах скоростей от $v_{мин}$ до $v_{макс}$.

Для шахтных условий эта разность скоростей обычно невелика, а следовательно, и отклонения действительной величины тока от принимаемой по расчету также будут небольшими.

В рудничной электровозной откатке число электровозов на линии обычно невелико. При этих условиях перегрузку тяговой подстанции можно выявить следующим образом. Необходимо задаться определен-

ным сочетанием — совпадением нагрузок нескольких электровозов и определять вероятность времени действия этой нагрузки в течение рейса или полурейса электровоза.

Например, при наличии четырех электровозов на линии сначала можно задаться суммарной нагрузкой всех четырех электровозов и определить вероятность времени действия этой максимальной нагрузки. Затем задаться одновременной работой трех электровозов на линии и также определить вероятность времени действия этой нагрузки. Если и для двух электровозов суммарная нагрузка окажется больше эквивалентного нагревательного тока, то же нужно проделать и для двух электровозов.

При этом методе определения перегрузки получим точные значения перегрузочного тока (если пренебречь некоторыми возможными отклонениями нагрузки двигателей каждого электровоза от $I_р$), который может быть выражен процентом к эквивалентному значению нагрузки или к мощности выбранного преобразователя. При этом расчетом определяется лишь среднее возможное время действия данной величины перегрузки.

Время действия нагрузки при одном электровозе на линии может быть точно выражено отношением времени движения электровоза под током к общему времени рейса

$$P_{11} = \frac{T^2_{\text{дв. т}}}{T_р}. \qquad (12)$$

Величины $T_{\text{дв. т}}$ и $T_р$ можно получить из расчета элементов движения методом неустановившихся скоростей. Вероятность времени действия суммарной нагрузки при двух электровозах на линии может быть выражена произведением отношений

$$P_{22} = \frac{T_{\text{дв. т}}}{T_р}\frac{T_{\text{дв. т}}}{T_р} = \frac{T^2_{\text{дв. т}}}{T_р^2}. \qquad (13)$$

Формулой (13) определяется вероятное суммарное время действия данной нагрузки в течение рейса. Фактически нагрузка может быть рассредоточена по времени действия на ряд отдельных пиков. При этом изменится лишь частота или повторяемость перегрузки в сторону увеличения. Имея в виду неустановившийся режим работы электровозов и большое число циклов «разгон и замедление» в течение рейса, время действия суммарной нагрузки всегда можно считать рассредоточенным по времени рейса. Вероятность времени действия суммарной нагрузки при трех и более электровозах на линии аналогично может быть выражена формулами

$$P_{33} = \left(\frac{T_{\text{дв. т}}}{T_р}\right)^3, \qquad P_{nn} = \left(\frac{T_{\text{дв. т}}}{T_р}\right)^n, \qquad (14)$$

где n — число электровозов на линии.

Этими выражениями мы устанавливали время действия лишь максимальных перегрузок. В действительности могут быть перегрузки и других меньших величин. Например, при трех электровозах на линии в равновременной работе могут оказаться два электровоза. Нагрузка двух электровозов может быть больше эквивалентного значения мощности питающих преобразователей. Следовательно, потребуется установить время действия и этой перегрузки. Из времени одновременной работы двух электровозов необходимо вычесть время, при котором работали одно-

временно все три электровоза, так как тройная электровозная нагрузка уже включает двойную.

Вероятность времени действия суммарной нагрузки только двух электровозов при наличии на линии трех электровозов может быть определена формулой

$$P_{32}=\frac{3}{2}\left(\frac{T_{\text{дв. т}}}{T_{\text{р}}}-P_{33}\right)^{2}. \tag{15}$$

Очевидно также, из времени работы одного электровоза под током необходимо вычесть время, при котором работали все три или два электровоза одновременно, так как тройная или двойная нагрузка обязательно включает в себя одинарную.

Вероятность времени действия нагрузки только одного электровоза, при наличии на линии трех электровозов, может быть определена выражением

$$P_{31}=\frac{3}{1}\left[\frac{T_{\text{дв. т}}}{T_{\text{р}}}-(P_{33}+P_{32})\right]^{1}. \tag{16}$$

Вероятность времени действия суммарной нагрузки m электровозов, при наличии на линии N электровозов, аналогично может быть определена формулой

$$P_{Nm}=\frac{N}{m}\left[\frac{T_{\text{дв. т}}}{T_{\text{р}}}-(P_{NN}+P_{N(N-1)}+P_{N(m+1)})\right]^{m}. \tag{17}$$

Как видно из выражения (17), вероятность времени одновременной работы того или иного числа электровозов зависит от соотношения времени движения поезда под током к общему времени рейса, а также от общего количества электровозов на линии.

Для установления общего характера этой зависимости далее произведен расчет по определению времени одновременной работы электровозов согласно выражению (17). При расчете принималось различное число электровозов на линии и разное соотношение времени движения электровозов под током к общему времени рейса $\frac{T_{\text{дв. т}}}{T_{\text{р}}}$ (табл. 1).

Для наглядности представления характера зависимости (17) и удобства пользования табл. 1 построены графики вероятности времени одновременной работы электровозов в зависимости от числа электровозов на линии и соотношения $\frac{T_{\text{дв. т}}}{T_{\text{р}}}$ (рис. 2).

Вероятность времени действия одновременной нагрузки выражена безразмерной характеристикой в относительных числах к длительности рейса.

График зависимости времени одновременной работы определенного числа электровозов (рис. 2) наглядно показывает, при каких условиях возможны те или иные перегрузки тяговой подстанции. С увеличением числа электровозов уменьшается относительная величина перегрузки (в процентах) и время ее действия относительно общего времени рейса.

Чем больше отношение времени движения электровозов под током к общему времени рейса $\frac{T_{\text{дв. т}}}{T_{\text{р}}}$, тем меньше относительная величина перегрузки, но больше время ее действия.

На графиках (рис. 2) изображены все кривые согласно расчетным таблицам. Сплошными линиями показаны графики, отвечающие условиям перегрузки подстанции, когда суммарная нагрузка данного числа

Таблица 1

Время одновременной работы электровозов под током (в относительных величинах к длительности рейса) в зависимости от числа электровозов на линии и отношения $\frac{T_{дв.т}}{T_р}$

Число электровозов $N_э$	Вероятность времени действия нагрузки P_{Nm}	Отношение времени движения под током к общему времени рейса $\frac{T_{дв.т}}{T_р}$					
		0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0
1	P_{11}	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0
2	P_{22}	0,01	0,09	0,25	0,49	0,81	1,0
2	P_{21}	0,18	0,42	0,5	0,42	0,18	0,0
3	P_{33}	0,001	0,027	0,125	0,343	0,73	1,0
3	P_{32}	0,013	0,112	0,21	0,191	0,0435	0,0
3	P_{31}	0,258	0,483	0,49	0,498	0,378	0,0
4	P_{44}	0,0001	0,0081	0,0625	0,2401	0,6561	1,0
4	P_{43}	0,0128	0,0325	0,112	0,13	0,0187	0,0
4	P_{42}	0,015	0,134	0,206	0,22	0,097	0,0
4	P_{41}	0,288	0,501	0,454	0,44	0,512	0,0
5	P_{55}	0,00001	0,00243	0,03125	0,1681	0,59	1,0
5	P_{54}	0,0012	0,00946	0,061	0,0985	0,0115	0,0
5	P_{53}	0,0162	0,0834	0,113	0,135	0,0445	0,0
5	P_{52}	0,0168	0,100	0,217	0,223	0,16	0,0
5	P_{51}	0,33	0,523	0,388	0,377	0,468	0,0
6	P_{66}	0,000001	0,000729	0,015625	0,118	0,532	1,0
6	P_{65}	0,000012	0,00284	0,0307	0,081	0,00808	0,0
6	P_{64}	0,00015	0,0115	0,063	0,0938	0,0252	0,0
6	P_{63}	0,002	0,0446	0,119	0,134	0,074	0,0
6	P_{62}	0,0288	0,173	0,218	0,224	0,203	0,0
6	P_{61}	0,475	0,405	0,322	0,295	0,346	0,0
7	P_{77}	0,0000001	0,000219	0,0078	0,0822	0,479	1,0
7	P_{76}	0,00000117	0,00085	0,0161	0,0606	0,00655	0,0
7	P_{75}	0,000014	0,0034	0,0336	0,0753	0,017	0,0
7	P_{74}	0,000175	0,0131	0,089	0,0946	0,107	0,0
7	P_{73}	0,0023	0,052	0,13	0,133	0,058	0,0
8	P_{88}	0,00000001	0,0000656	0,0039	0,0576	0,43	1,0
8	P_{87}	0,0000001	0,00025	0,008	0,0503	0,00578	0,0
8	P_{86}	0,0000013	0,00097	0,016	0,065	0,013	0,0
8	P_{85}	0,000016	0,0039	0,0384	0,065	0,0294	0,0
8	P_{84}	0,00002	0,0156	0,0705	0,091	0,064	0,0

электровозов превышает эквивалентное значение тока; пунктирными линиями изображены аналогичные зависимости для условий, когда суммарная токовая нагрузка того или иного числа электровозов оказывается меньше эквивалентного значения тока. Например, при любом числе электровозов на линии одновременная работа двух электровозов не будет вызывать перегрузки, если $I_{экв} \geqslant 2I_{ср}$. Также при $I_{экв} \geqslant 3I_{ср}$ одновременная работа трех электровозов не является перегрузкой.

Таким образом, для расчетного графика по определению величины перегрузки нужны только кривые, изображенные сплошными линиями. На рис. 3 представлены аналогичные зависимости, удовлетворяющие только перегрузочным условиям работы тяговой подстанции (для упрощения расчетного графика пунктирная часть линий не изображена). График наглядно показывает, как по мере уменьшения числа электровозов и величины отношения $\frac{T_{дв.т}}{T_р}$ увеличиваются значения перегрузок в процентах и по времени их действия.

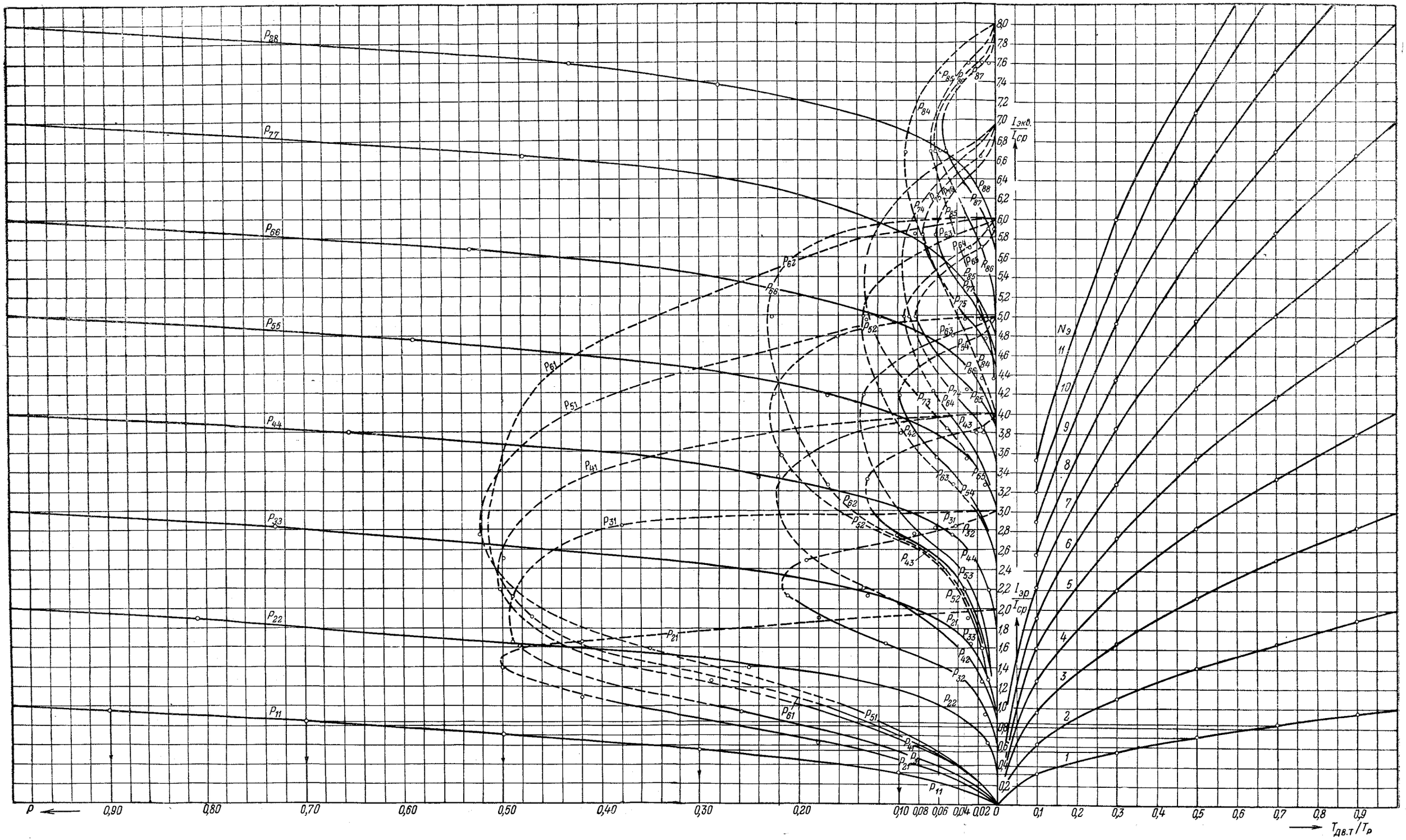


Рис. 2. График вероятности времени одновременной работы электровозов

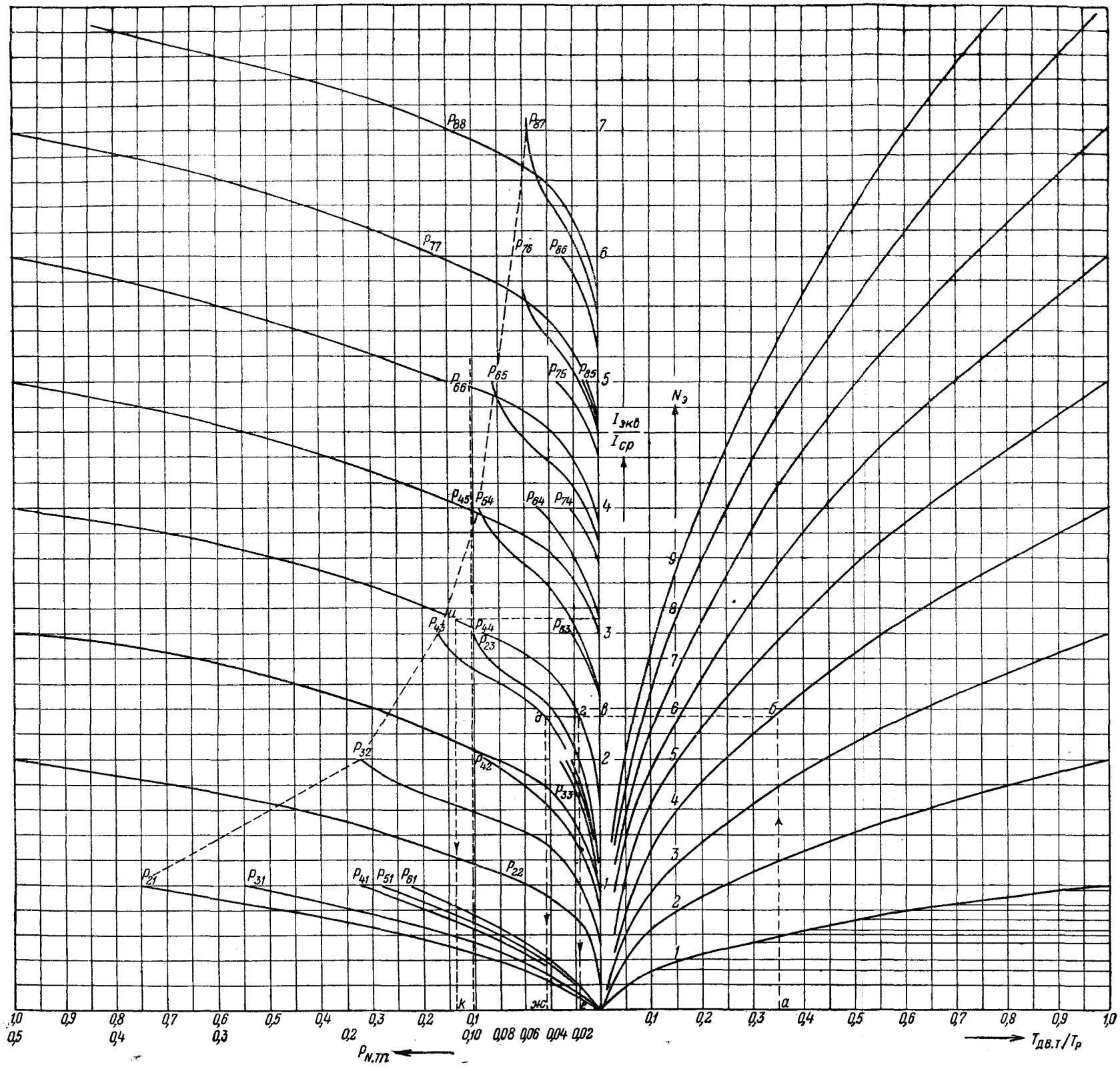


Рис. 3. Графики вероятности времени одновременной работы электровозов при перегрузках подстанции

Методика пользования расчетными кривыми по определению мощности тяговой подстанции заключается в следующем. По известным данным элементов движения поезда $\frac{T_{\text{дв. т}}}{T_{\text{р}}}$ и $I_{\text{ср}}$, полученным из расчета, и определенному числу электровозов на линии $N_{\text{э}}$ сначала определяется отношение $\frac{I_{\text{экв}}}{I_{\text{ср}}}$. Для этого восстанавливается перпендикуляр к оси абсцисс в точке известного отношения $\frac{T_{\text{дв. т}}}{T_{\text{ср}}}$ до пересечения с кривой $\frac{I_{\text{экв}}}{I_{\text{ср}}}$ соответствующего числа электровозов. Из полученной точки пересечения по горизонтальной линии на оси ординат находится численное значение отношения $\frac{I_{\text{экв}}}{I_{\text{ср}}}$. При известном значении $I_{\text{ср}}$ устанавливается эквивалентное значение тока тяговой подстанции

$$I_{\text{экв}} = I_{\text{ср}} \frac{I_{\text{экв}}}{I_{\text{ср}}} a. \tag{18}$$

Для определения условий перегрузки тяговой подстанции из полученной точки $\frac{I_{\text{экв}}}{I_{\text{ср}}}$ на оси ординат горизонтальная линия продолжается во второй четверти координатной системы. Она пересекает кривые перегрузки для определенного числа электровозов. Полученные точки пересечения, спроектированные по вертикали, на оси абсцисс дают соответствующее время действия этих перегрузок. Здесь время определяется отношением времени действия данной перегрузки в течение одного рейса к продолжительности рейса.

Для определения численного значения времени перегрузки необходимо воспользоваться формулой

$$t_{\text{пер}} = P_{Nm} T_{\text{р}} \text{ сек.}, \tag{19}$$

где P_{Nm} — величина математической вероятности времени перегрузки, полученной из графика;

$T_{\text{р}}$ — время рейса, сек.

Полученная длительность действия перегрузки $t_{\text{пер}}$ и частота ее повторения дают возможность судить, может ли быть допущена найденная величина перегрузки для данного типа выпрямительных устройств. Таким образом, безразмерные характеристики (кривые зависимости величины $\frac{I_{\text{экв}}}{I_{\text{ср}}}$ как функции отношения $\frac{T_{\text{дв. т}}}{T_{\text{р}}}$) дают возможность весьма быстро определять основные параметры тяговой подстанции, т. е. нагревательный ток и величину возможной перегрузки.

В качестве примера на графике рис. 3 рассмотрен случай определения мощности тяговой подстанции для четырех электровозов типа IV-ТР-4. При $\frac{T_{\text{дв. т}}}{T_{\text{р}}} = 0{,}35$ отношение тока $\frac{I_{\text{экв}}}{I_{\text{ср}}} = 2{,}34$. При этом перегрузочными режимами работы подстанции будут одновременная работа четырех и трех электровозов. Время одновременной работы четырех электровозов в течение одного рейса $P_{44} = 0{,}016$, а время одновременной работы трех электровозов $P_{43} = 0{,}044$.

При $I_{ср} = 160$ *а* и длительности рейса $T_р = 40$ мин.

$$I_{экв} = I_{ср} \frac{I_{экв}}{I_{ср}} = 160 \cdot 2{,}34 = 374 \text{ а}.$$

Средний ток при одновременной работе четырех электровозов

$$\sum I_{ср.\,4} = 160 \cdot 4 = 640 \text{ а}.$$

Средний ток при одновременной работе трех электровозов

$$\sum I_{ср.\,3} = 160 \cdot 3 = 480 \text{ а}.$$

Если бы $I_{экв}$ выбранного выпрямителя было точно равно 374 *а*, то при четырех электровозах перегрузка была бы $\frac{640}{374} = 1{,}71$, а при трех электровозах $\frac{480}{374} = 1{,}28$. Средняя продолжительность действия указанных перегрузок в течение одного рейса составит:

а) при четырех электровозах

$$t_{пер} = P_{44} T_р = 0{,}016 \cdot 4 = 0{,}64 \text{ мин.};$$

б) при трех электровозах

$$t_{пер} = P_{43} T_р = 0{,}044 \cdot 40 = 1{,}76 \text{ мин.}$$

Применительно к ртутным выпрямителям РМНВ-500 перегрузка на 100% допускается в течение 10 сек. (через каждую минуту), перегрузка на 50% допускается в течение 2 мин. (через каждый час). Как видно из сравнения, при этих условиях наши перегрузки являлись бы близкими к предельным. Перегрузка на 71% в течение 38 сек. является нежелательной.

При сравнении мы пользовались $I_{экв}$, полученным из графика рис. 2. Фактически номинальный ток выпрямителей типа РМНВ-500 равен 500, а не 374 *а*. Следовательно, истинное отношение

$$\frac{I_{экв}}{I_{ср}} = \frac{500}{160} = 3{,}12.$$

При этих условиях перегрузочным режимом будет только одновременная работа четырех электровозов. Величина перегрузки определится $\frac{640}{500} = 1{,}28$, т. е. около 25%.

Перегрузка на 25% для данных ртутников допускается в течение 15 мин. через каждые 2 часа.

Сравнивая полученные перегрузки через эквивалентный нагревательный ток, согласно известной формуле

$$I_{экв} = \sqrt{\frac{\sum I_i^2 t_i}{\sum t_i}} \, a;$$

$$\sqrt{\frac{(500 \cdot 1{,}28)^2 0{,}64}{40}} \, a < \sqrt{\frac{(500 \cdot 1{,}25)^2 15}{120}} \text{ или } 82\,a < 220\,a,$$

видим, что перегрузка вполне допустима. Фактический нагревательный ток перегрузки значительно меньше допустимого по нормам.

Перегрузка на 28% лежит в пределах между перегрузками на 25% и на 50%. Имея в виду изменение коэффициентов теплопередачи при нагревании машин, определяем нагревательный ток и 50% перегрузки по формуле

$$I_{экв} = \sqrt{\frac{(500 \cdot 1{,}5)^2 2}{60}} = 136\,a > 82\,a.$$

Как видно, и этот допустимый по нормам нагревательный ток перегрузки больше фактически полученного по расчету.

2. Расчет тяговой сети

Расчет тяговой сети рудничной электровозной откатки производится обычно в следующей последовательности. Сначала задаются сечением контактного провода и рельса из имеющихся стандартных профилей. Затем, тем или иным методом, устанавливают величину нагрузки на сеть и точки их приложения. И, наконец, выбранное сечение тяговой сети проверяют на допустимое нормами падение напряжения.

Если предварительно выбранное сечение тяговой сети удовлетворяет допустимому падению напряжения, то расчет считается сделанным правильно. Таким образом, расчет сети приближается к методу проб. Иногда могут потребоваться повторные перерасчеты.

Для правильной ориентировки в предварительном выборе сечений контактного провода целесообразно пользоваться технико-экономическим сравнением вариантов. При сравнении для простоты можно учитывать только основные статьи расхода — медь контактного провода и расход энергии в тяговой сети. Они в данном случае связаны взаимно обратной пропорциональностью: чем больше сечение контактного провода, тем меньше расход энергии.

Взаимно обратная пропорциональность расходов может быть выражена аналитически. Годовая стоимость расхода энергии в тяговой сети может быть вычислена по формуле

$$A_{эн} = I_{ср}^2 R T_г r_{эн} 10^{-3} \text{ руб.}, \tag{20}$$

где $I_{ср}$ — средний ток, потребляемый электровозом в период разгона (в одном цикле „разгон и замедление"), который может быть определен как средняя величина между током грузового и порожнякового направлений движения;

$r_{эн}$ — стоимость энергии 1 *квт-ч*, руб.;

R — электрическое сопротивление провода;

$T_г$ — чистое время работы тяговой сети в году, отнесенное к нагрузке одного состава поезда,

$$R = \frac{l}{57q}\ ом, \tag{21}$$

где l — длина провода, которая может быть равна половине длины крыла откаточного участка $\frac{L}{2}$, *м*;

q — суммарное сечение контактного провода тяговой сети, *мм*^{2}

$$T_г = \frac{T_{дв.т} M_г}{Q_п} \text{ час.}, \tag{22}$$

где $T_{\text{дв. т}}$ — время работы электровоза под током в течение одного рейса, час.;

$M_{\text{г}}$ — годовая производительность откаточного участка, $т$;

$Q_{\text{п}}$ — полезный вес состава поезда, $т$.

При подстановке соответствующих величин формула (20) примет вид

$$A_{\text{эн}} = 10^{-3} I_{\text{ср}}^2 \frac{T_{\text{дв. т}}}{Q_{\text{п}}} M_{\text{г}} \frac{L r_{\text{эн}}}{2 \cdot 57 q} \text{ руб.} \tag{23}$$

В свою очередь стоимость меди на проводку может быть определена так:

$$Б = \frac{P r_{\text{м}}}{\text{л}} = 10^{-6} L \gamma \frac{r_{\text{м}}}{\text{л}} \text{ руб.}, \tag{24}$$

где P — вес контактного провода стандартного сечения, $кг$;

$r_{\text{м}}$ — стоимость 1 $кг$ контактного провода, руб.;

л — срок амортизации контактного провода, лет;

q — сечение контактного провода, $мм^2$;

L — длина контактного провода, $м$;

γ — удельный вес меди, 8,9 $кг/дм^3$.

Суммарная годовая стоимость по указанным статьям может быть выражена

$$A_{\text{с}} = A_{\text{эн}} + Б = I_{\text{ср}}^2 \frac{L T_{\text{дв. т}} M_{\text{г}} r_{\text{эн}}}{2 \cdot 57 \cdot 10^3 q Q_{\text{п}}} + q \frac{8{,}9 L r_{\text{м}}}{10^6 \text{л}} \text{ руб.} \tag{25}$$

При технико-экономическом сравнении независимой переменной считаем сечение контактного провода, все другие величины принимаем за постоянные. Пользуясь обычным приемом определения минимума по заданной функции, находим наивыгоднейшую величину суммарного сечения контактного провода

$$q \simeq \sqrt{\frac{0{,}89 I_{\text{ср}}^2 T_{\text{дв. т}} M_{\text{г}} \text{л} r_{\text{эн}}}{Q_{\text{п}} r_{\text{м}}}} \; мм^2. \tag{26}$$

В формуле (26) величины $I_{\text{ср}}$, $T_{\text{дв. т}}$ и $Q_{\text{п}}$ берутся из расчета элементов движения поезда. Производительность участка M обычно задается.

Стоимость энергии и меди, а также срок амортизации проводки принимаются согласно существующим нормативам и прейскурантным ценам для данного района. Так как стоимость электроэнергии для основных районов СССР имеет небольшие отклонения от некоторой средней величины, а сроки амортизации тяговой сети могут быть приняты одинаковыми, задача может быть решена графическим способом. Это возможно еще и потому, что предварительный выбор сечения провода из небольшого числа стандартных сечений носит весьма приближенный характер. Решение должно быть максимально простым. Для графического решения задачи может быть использована зависимость величины сечения контактного провода q от $I_{\text{ср}}$, $T_{\text{дв. т}}$, $M_{\text{г}}$ и $Q_{\text{п}}$ (формула 26).

Однако эти пять взаимно зависимых переменных величин образуют сравнительно сложную расчетную номограмму. Для максимального упрощения расчетного графика и с целью унификации формы расчета по безразмерным кривым формулу (26) преобразуем

$$\frac{q}{I_{\text{ср}}} = \sqrt{\frac{0{,}89 T_{\text{г}} \text{л} r_{\text{эн}}}{r_{\text{м}}} N_{\text{э}} \frac{T_{\text{дв. т}}}{T_{\text{р}}}} \frac{мм^2}{a}, \tag{27}$$

где $\frac{M_г}{Q_п}$ заменено $\frac{T_г}{T_р} N_э$;

$T_г$ — чистое время работы электровоза в течение года;

$T_р$ — полное время одного рейса;

$N_э$ — число электровозов на линии.

В выражении (27) связаны уже не пять, а только три переменные величины:

$\frac{q}{I_{ср}}$ — удельное сечение контактной сети, приходящееся на 1 $а$ среднего тока при разгоне поезда от минимальной скорости до максимально допустимой;

$\frac{T_{дв.\,т}}{T_р}$ — отношение времени движения электровоза под током в течение рейса к общей продолжительности рейса;

$N_э$ — число электровозов на линии.

Общая зависимость трех переменных величин может быть графически представлена семейством кривых в обычной координатной системе. Тогда и определение наивыгоднейшей величины удельного сечения контактного провода сведется к простому приему нахождения точки на заданной кривой в осях координат.

Переход от удельного сечения провода к суммарной величине может производиться по формуле

$$q = \left(\frac{q}{I_{ср}}\right) I_{ср} \; мм^2, \tag{28}$$

где $I_{ср}$ — средняя величина тока при разгоне поезда, в цикле «разгон — замедление».

Наивыгоднейшее сечение провода, полученное по формуле (28), округляется до стандартного, а затем проверяется на допустимое падение напряжения. Суммарное сечение не всегда может быть выполнено одним проводом. В случаях больших сечений необходимы два провода, а иногда и усиливающий третий.

На основании формулы (27) произведено определение удельных сечений контактного провода. При этом были приняты следующие значения:

а) средняя стоимость электроэнергии 20 коп. за 1 *квт-ч*;

б) средняя стоимость фасонного сечения контактного провода 9100 руб. за 1 *т* (ГОСТ 2584—44);

в) средний срок амортизации провода 5 лет;

г) число часов работы в год $T_г = 4200$ час.

Расчетные данные систематизированы в общую табл. 2, по которой на рис. 4 построены графики (по определению выгодного сечения провода). Они так же, как и графики по определению эквивалентного значения тока (рис. 3), могут быть построены относительно общей оси абсцисс.

В этих графиках в явном виде отсутствует длина провода, однако косвенно длина откатки влияет на выбор сечения провода через отношение времени движения электровоза под током к общему времени рейса, включая паузу $\frac{T_{дв.\,т}}{T_р}$. При увеличении длины откатки это отношение возрастает.

Ориентировочно выбранное сечение провода технико-экономическим сравнением должно быть проверено на падение напряжения. Основными требованиями проверки сечения контактного провода являются допустимые падения напряжения. Принятые пределы допустимых падений напряжения являются результатом многолетней практики эксплуатации

Таблица 2

Определение удельных сечений контактного провода экономическим сравнением

Число электровозов на линии $N_э$	Отношение времени движения электровоза под током к длительности рейса $\frac{T_{дв.т}}{T_р}$				
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
1	0,203	0,352	0,455	0,538	0,61
2	0,286	0,496	0,642	0,758	0,86
3	0,35	0,605	0,782	0,925	1,05
4	0,406	0,707	0,91	1,07	1,22
5	0,455	0,788	1,02	1,2	1,36
6	0,498	0,862	1,11	1,32	1,49
7	0,538	0,932	1,20	1,42	1,62
8	0,575	0,995	1,29	1,52	1,73
9	0,61	1,05	1,36	1,61	1,83
10	0,65	1,11	1,44	1,7	1,93

тяговых сетей. Для установления нормативов рудничной электровозной откатки много заимствовано из практики электрифицированных магистральных железных дорог.

Основой установления пределов падения напряжения в линии является технико-экономический анализ и требования, предъявляемые к режиму работы локомотивов. Известно, что увеличение падения напряжения в линии влечет завышенный расход энергии. При большой длине откатки снижение потерь в контактной сети может быть получено лишь за счет увеличения сечения — удорожания оборудования. Даже при грубом сравнении нетрудно убедиться в том, что принятые пределы допустимых падений напряжения для нормальной работы сети соответствуют минимуму расходов по оборудованию и эксплуатации установки, включая стоимость энергии.

Снижение напряжения в линии отражается на производительности локомотивов. При сериесных тяговых двигателях скорость движения прямо пропорциональна величине напряжения, поэтому при строгом графике движения, особенно на магистральных или пригородных железных дорогах, значительное падение напряжения является весьма нежелательным. В сетях переменного тока изменение напряжения играет особенно большую роль, так как отражается на вращающем моменте тяговых двигателей.

Для рудничной электровозной откатки указанные нормативные требования упрощены. Допустимое падение напряжения дается в широких пределах — от 10—15% при нормальной работе до 30—40% при максимальных нагрузках. Причем есть основание считать, что при пиковых нагрузках падение напряжения в линии может быть допущено и более 40%. При этом лишь несколько понизится скорость движения или более затянется пуск — разгон. Величина состава, как правило, определяется (лимитируется) не условиями пуска. Движение электровоза под током составляет всего лишь 20—30% от длительности рейса. Следовательно, увеличенное падение напряжения на производительности откатки практически не отразится.

Как доказано выше, в рудничных условиях установившаяся скорость движения возможна в ограниченных случаях. Следовательно, и понижение напряжения в линии не будет оказывать существенного влияния на

среднюю скорость движения локомотива, оборудованного сериесными двигателями. Точная величина падения напряжения в линии от подстанции может быть установлена лишь при постоянной нагрузке и строго фиксированной длине до точки ее приложения.

В начале данного раздела указаны особые специфические условия рудничной электровозной откатки, которые обусловливают приближенный характер всех расчетов. Изменение общей длины и производительности откатки, непрерывное изменение и нарушение графиков движения

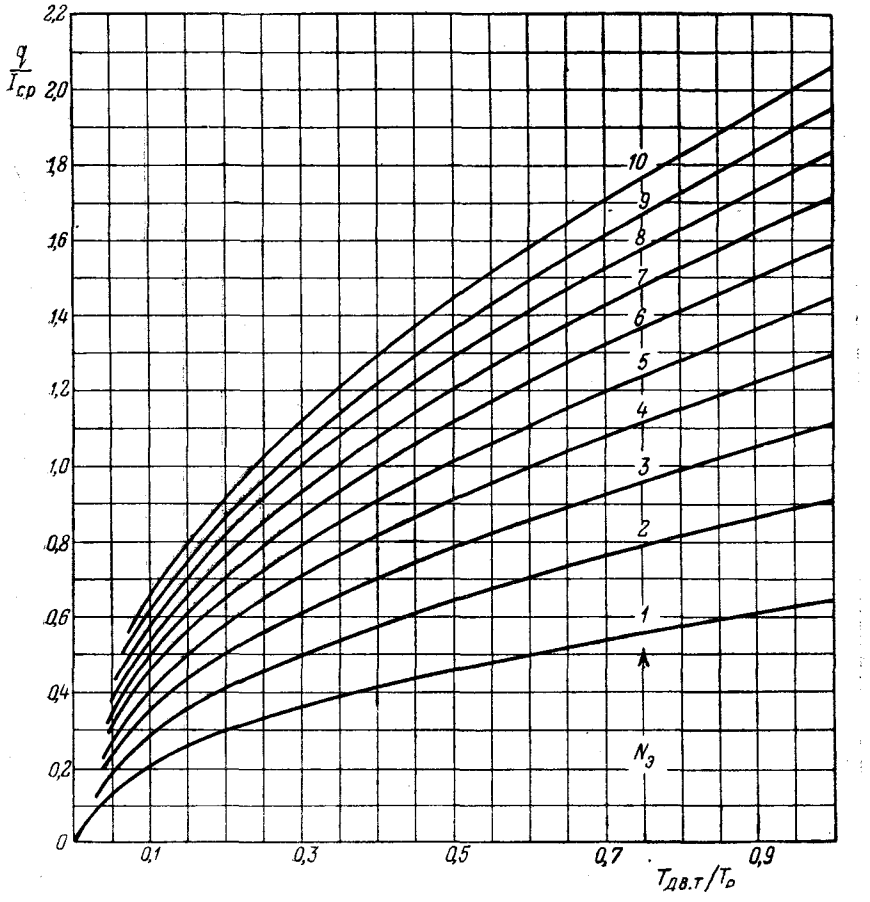


Рис. 4. График определения выгодного сечения провода

и прочее не позволяют применять точные методы расчетов, которыми пользуются для магистральных железных дорог.

Широкие пределы допустимого падения напряжения в линии от 10 до 40—45% могут привести в ряде случаев к неверному и неэкономичному решению задач. В указанных требованиях допустимого падения напряжения возможны субъективные суждения о нагрузках сети. По-различному могут трактоваться средние, максимальные и аварийные нагрузки.

При расчете тяговых сетей необходимо исключить элементы субъективного суждения о нагрузках. Характер нагрузки тяговых сетей нужно представлять в виде определенных сочетаний одновременной работы того

или иного числа электровозов. Например, при наличии на линии трех электровозов нагрузки на тяговую сеть могут быть в виде суммы трех, двух или одного электровоза. При этом может иметь место и время, совершенно свободное от нагрузки на сеть. Различные сочетания нагрузки на сеть могут существовать произвольное время, которое будет зависеть от целого ряда факторов, в том числе и от воли машиниста электровоза.

Главные из этих факторов следующие:

1) соотношение времени движения электровоза под током к общему времени рейса;

2) величина уклонов (характер профиля) пути;

3) величина состава поезда и тяговых усилий электровоза;

4) пределы ограничения скорости движения электровоза $v_{макс}$ и $v_{мин}$;

5) количество локомотивов на линии.

Учитывая приближенный метод расчета, для определения времени действия той или иной нагрузки, можно использовать данные расчетов по теории вероятностей.

При определении условий перегрузки тяговых подстанций нами установлены характеристики зависимости времени действия перегрузок при разном количестве электровозов на линии. В расчетах учтены все основные факторы (кроме субъективных), влияющие на характер сочетания нагрузок и время их действия:

1) профиль пути при определении эквивалентного уклона;

2) величина состава поезда (сила тяги), время движения под током и общее время рейса при определении элементов движения;

3) количество электровозов, принимаемое точным числом;

4) величина нагрузки каждого электровоза как средняя величина за период разгона в одном цикле «разгон и замедление».

Таким образом, и для расчета тяговых сетей при определении величины нагрузки можно воспользоваться формулами (15), (16), (17), данными табл. 1 и расчетного графика (рис. 3). По ним можно установить величину и время действия различного сочетания нагрузок в течение рейса. По этим данным, очевидно, можно определить и среднюю величину нагрузки и проверить сеть на пиковые нагрузки.

Если для расчета сети на допустимое падение напряжения в 15% брать все электровозы, одновременно потребляющими средний ток, то получаются слишком завышенные сечения контактного провода. При этом весьма трудно выправить положение каким-либо постоянным коэффициентом одновременности работы. Этот коэффициент должен зависеть не только от числа электровозов, но и от характера их загрузки — соотношения $\frac{T_{дв.\,т}}{T_р}$, от силы тяги, профиля пути и пр.

Здесь весьма важно учесть хотя бы самые главные факторы, влияющие на характер загрузки линии. При этих условиях среднее значение общего тока нагрузки на сеть за период рейса может быть определено по формуле

$$I_{ср.\,общ} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} I_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \Delta t_i} = \frac{N_э I_{ср} \Delta t_N + (N_э - 1) I_{ср} \Delta t_{(N-1)} + \ldots I_{ср} \Delta t_1}{\Delta t_N + \Delta t_{(N-1)} + \ldots \Delta t_1} a, \qquad (29)$$

где $N_э$ — число электровозов на линии;

$I_{ср}$ — средний ток за период разгона в одном цикле, a;

Δt_i — время действия данного сечения нагрузки, определяемое формулами (15), (16), (17) или по графику рис. 3.

Для проверки сети на падение напряжения основным параметром является длина линии L. Считая равновероятным любое положение электровозов на линии, центр общей нагрузки по теории вероятностей определим в середине длины пути. Это не противоречит и главному требованию организации электровозной откатки. Графики движения обусловливают равномерное распределение электровозов на линии, т. е. движение электровозов с равными интервалами по времени. При этих условиях для простоты расчета можно считать суммарную нагрузку приложенной в середине линии. Тогда падение напряжения в линии определится по известной расчетной формуле

$$\frac{\Delta U}{U} = R\frac{1}{U}\sum I_i l_i = \frac{\sum I_i l_i}{57Uq}, \qquad (30)$$

где U — напряжение тяговой подстанции, *в*;

R — сопротивление провода, *ом*;

q — суммарное сечение провода, *мм*^{2};

$\sum I_i l_i$ — суммарный момент токов, *ам*.

В нашем случае формула (30) примет вид:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{I_{\text{ср. общ}}}{2 \cdot 57qU}; \qquad \frac{q}{I_{\text{ср. общ}}} = \frac{L}{\frac{\Delta U}{U} 2 \cdot 57U}, \qquad (31)$$

где L — длина линии, *м*.

По этой формуле могут определяться любые нужные параметры обычным методом.

Главным определяющим параметром в формуле (31) является суммарный нагрузочный ток. Величина его характеризует все особенности локомотивной откатки: производительность, количество локомотивов, сложность профиля пути, величину состава, скорость движения составов и соотношение времени движения под током к общему времени рейса. Для нахождения этого параметра необходимо произвести следующие операции расчета по определению:

1) эквивалентного уклона пути;

2) величины состава поезда;

3) элементов движения поездов (скорости и времени движения под током и общего времени рейса, величины тока в отдельные элементы времени и среднего за период разгона в одном цикле);

4) числа электровозов на линии;

5) времени действия различных сочетаний нагрузок на тяговую сеть;

6) среднего суммарного тока нагрузки на тяговую сеть.

Из шести перечисленных операций пять производятся предварительно — по ходу расчета электровозной откатки.

Таким образом, специально для проверки тяговой сети на допустимое падение напряжения необходимо выполнить лишь шестую операцию, т. е. найти средний суммарный ток нагрузки на тяговую сеть согласно ранее приведенной формуле (29). Некоторые величины этой формулы определяются из графика рис. 3, поэтому и эту зависимость целесообразно представить графически, что значительно упростит решение поставленной задачи.

Определение средней общей величины нагрузки на сеть систематизировано в табл. 3, по которой построен график безразмерных зависимостей (рис. 5). Из графика видно, что с уменьшением отношения времени

Таблица 3

Коэффициенты для определения средней общей величины нагрузочного тока тяговой сети

Число электровозов на линии $N_э$	Отношение времени движения электровоза под током к длительности рейса $\frac{T_{дв.т}}{T_р}$				
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2	1,05	1,18	1,33	1,53	1,82
3	1,055	1,27	1,56	1,85	2,3
4	1,13	1,33	1,75	2,17	2,65
5	1,15	1,43	1,93	2,46	3,17
6	1,17	1,49	2,1	2,78	3,65

движения электровозов под током к общему времени рейса $\frac{T_{дв.т}}{T_р}$ резко уменьшается нагрузочный ток на линию $I_{ср\ общ}$. Средний суммарный ток нагрузки на тяговую сеть будет представлять сумму токов всех электровозов только в одном случае, когда $\frac{T_{дв.т}}{T_р} = 1$. Для рудничной электровозной откатки отношение $\frac{T_{дв.т}}{T_р}$ обычно не превышает 0,3. Следовательно, средний суммарный нагрузочный ток в большинстве случаев меньше двукратного среднего тока электровоза.

Однако при большом количестве электровозов на линии могут быть пиковые нагрузки, когда на режиме работы под током окажется одновременно несколько электровозов. В этом случае суммарный нагрузочный ток достигнет величины

$$I_{общ} = N_э I_{ср}\ a. \tag{32}$$

Перегрузка сети относительно среднего тока

$$\gamma = \frac{I_{общ}}{I_{ср.\ общ}}. \tag{33}$$

При таких режимах работы допустимо падение напряжения в линии до 40—45%, т. е. примерно в три-четыре раза больше, чем в нормальном случае.

При небольших значениях отношения $\frac{T_{дв.т}}{T_р}$ совпадение одновременной работы полного числа электровозов мало вероятно. Например, при $N_э = 6$ электровозов и при $\frac{T_{дв.т}}{T_р} = 0{,}3$ совпадение по времени работы шести электровозов может длиться $0{,}0007\ T_р$. Это составляет примерно две секунды в течение часа, т. е. меньше выдержки времени максимальной защиты фидерных выключателей. Из графиков рис. 2 и 3 и табл. 1 видно, что при большем количестве электровозов это время уменьшается. Например, при $N_э = 7$ и $\frac{T_{дв.т}}{T_р} = 0{,}3$ совпадение одновременной работы всех электровозов возможно только в среднем порядка $0{,}0002\ T_р$, т. е.

в три раза меньше предыдущего. В этом случае одновременная работа шести электровозов по времени равновероятна предыдущему примеру, т. е. примерно 2 сек. в течение 1 часа.

Таким образом, для тяговой сети, рассчитанной на общую среднюю нагрузку (согласно графикам рис. 2, 3), возможные перегрузки не опасны. В этом случае перегрузки укладываются в допустимые пределы по

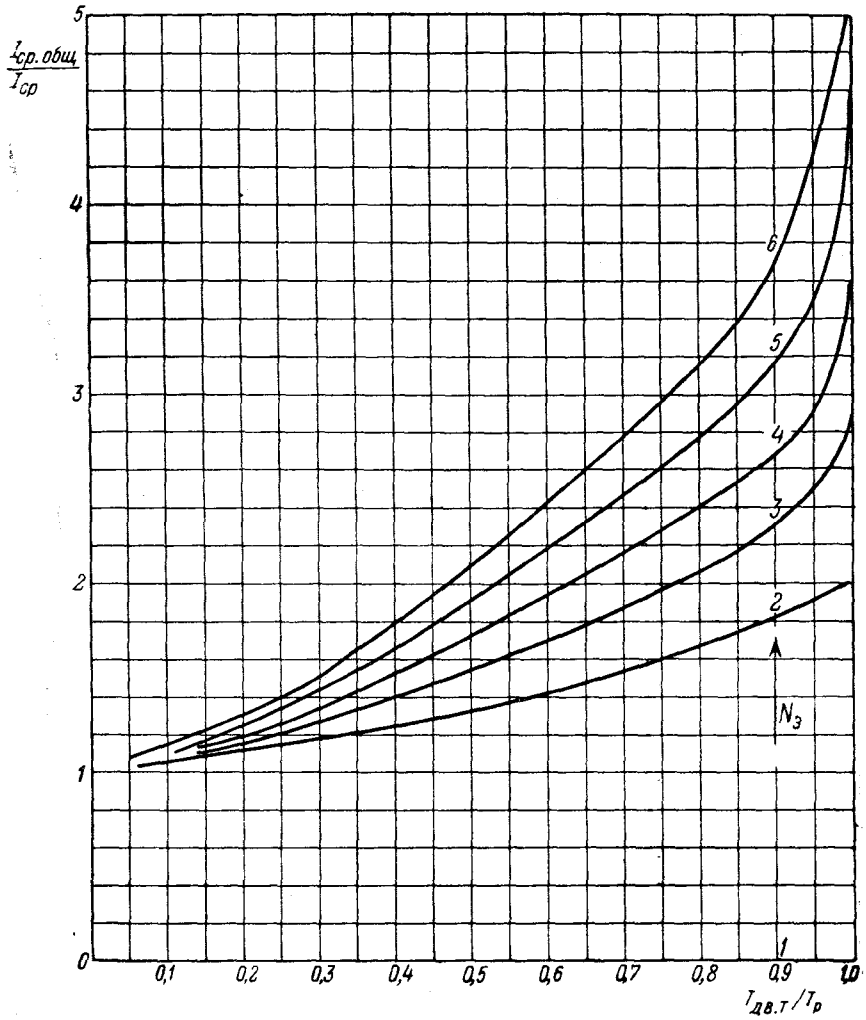


Рис. 5. График отношения общей величины нагрузочного тока к поездному току

величине и времени их действия. Вероятное изменение частоты перегрузок, отличное от расчетных, не опасно, так как оно вызовет обратно пропорциональное изменение времени действия перегрузок.

Определение сечения контактного провода согласно формуле (31) и при наличии данных о среднем нагрузочном токе $I_{ср.\,общ.}$ уже не представляет трудности. Однако, придерживаясь принятой методики — максимального упрощения расчетных операций, производим соответствующие вычисления и строим безразмерные зависимости.

При вычислениях принимаем следующие данные:

1) напряжение тяговых подстанций — 275, 500, 750 и 1500 *в*;
2) падение напряжения в контактном проводе — 10%;
3) проводимость меди — 1/57.

Расчетные данные систематизируем в табл. 4. Кривые зависимости, согласно данным расчета, изображены на рис. 5. По ним можно производить выбор удельного сечения контактного провода $\frac{q}{I_{\text{ср. общ.}}}$ для любой длины откатки в пределах от 0,5 до 10 *км* при различных напряжениях в тяговой сети.

Таблица 4

Определение удельного сечения контактного провода по падению напряжения

Напряжение в линии, *в*	Длина откатки (линии), *км*				
	0,5	1,0	3,0	5,0	10,0
275	0,16	0,318	0,955	1,6	—
500	0,088	0,175	0,526	0,88	1,75
750	0,0585	0,117	0,351	0,585	1,17
1500	0,0292	0,0553	0,175	0,292	0,58

Сечение контактного провода q определяется по известной величине среднего общего нагрузочного тока $I_{\text{ср. общ}}$

$$q = \left(\frac{q}{I_{\text{ср. общ}}}\right) I_{\text{ср. общ}} \; мм^2. \qquad (34)$$

При расчете необходимо учитывать дополнительное падение напряжения в питающем и отсасывающем кабелях, а также в рельсовой сети. В более точных расчетах оно может быть учтено в общей формуле (30).

Выводы

В порядке обсуждения приводится новый метод выбора элементов энергоснабжения, позволяющий увеличить точность расчетов тяговых сетей и подстанций для рудничной электровозной откатки. Этот метод расчета позволяет учесть все основные факторы, определяющие условия электровозной тяги: производительность и длину откаточных участков, уклоны путей, величину состава поезда, время движения и др.

В отличие от существующих методов отдельно учитывается время движения электровоза под током в течение рейса, что существенно отражается на суммарной величине нагрузки.

При расчете совершенно исключается субъективный метод выбора расчетных параметров: сечения по графикам, расстановки поездов на линии, числа одновременно работающих электровозов, количества электровозов, находящихся в пусковом режиме и др.

Нагрузочные токи принимаются как средние интегральные, отнесенные ко времени движения электровоза под током, а не к общему времени движения или рейса.

При расчетах возможно производить проверку не только на величину перегрузки, но и на длительность ее действия и на частоту повторения.

Новый расчет элементов энергоснабжения является частью общей методики расчета электровозной тяги. Он базируется на исходных дан-

ных определения элементов подвижного состава (числа вагонов в составе, общего числа электровозов) и на расчете элементов движения электровозной откатки (силы тяги, скорости движения, величины тока и времени движения).

Технический расчет при выборе наивыгоднейшего варианта включает элементы экономического сравнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шклярский Ф. Н. Рудничная откатка электровозами. ОНТИ, 1936.
2. Волотковский С. А. Рудничная электровозная тяга. Углетехиздат, 1951.
3. Стасюк В. Н. и Ефимов В. М. Электровозный транспорт на открытых горных разработках. Углетехиздат, 1950.
4. Рысьев А. В. Новый метод определения элементов движения рудничной электровозной откатки. Записки Ленинградского горного института, т. XXV, вып. I, 1951.
5. Рысьев А. В. Технико-экономический метод определения элементов подземной электровозной откатки. Записки Ленинградского горного института, т. XXIV, 1950.
6. Рысьев А. В. К некоторым вопросам теории рудничной электровозной откатки. Записки Ленинградского горного института, т. XXII, 1948.
7. Рысьев А. В. Влияние паразитных движений состава на работу рудничных локомотивов. Записки Ленинградского горного института, т. XXVII, вып. I, 1952.
8. Тимофеев В. А. Электрификация откаточных путей открытых и подземных разработок. Кубуч, 1934, стр. 305.

Поступило 15.IX 1952 г.