Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XXXIX, вып. 1, 1959 г.

РАБОТА ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ НА СЛОЖНОМ ПРОФИЛЕ ПУТИ

А. В. Рысьев, Ф. С. Леонтьев

Режим работы тяговых двигателей рудничных электровозов мало изучен. Нет теоретического обоснования для выбора мощности тяговых двигателей к заданному весу электровоза. В СССР и за границей отношение мощности двигателей к весу электровоза берется различными заводами и фирмами по-разному. Американские фирмы например, для 1 *т* веса электровоза принимают двигатели мощностью от 6,95 до 8,76 *квт*, западно-германские — от 4,62 до 6,57 *квт*, заводы угольного машиностроения в СССР — от 5,88 до 6,57 *квт*. Таким образом, американские электровозы имеют более высокую удельную мощность. Увеличение удельной мощности электровоза гарантирует тяговые двигатели от возможных перегрузок. Это является положительным фактором. Если силы сопротивления движению поезда будут превышать силу тяги, обеспеченную сцепным весом электровоза, то начнется проскальзывание ведущих колес и дальнейшего увеличения мощности, потребляемой двигателями, не произойдет. При этом будет обеспечиваться автоматическое ограничение загрузки тяговых двигателей величиной, соответствующей сцепному весу электровоза.

Однако при завышенной мощности сериесных тяговых двигателей электровозов двигатели большую часть времени должны работать с недогрузкой при низких к. п. д. и на неустойчивой части скоростных характеристик. При этом малейшее изменение сопротивления движению приводит к резким изменениям скорости движения, что усложняет управление электровозом.

Таким образом, вопрос правильного выбора соотношения мощности тяговых двигателей и сцепного веса электровоза весьма важен.

Недостаточно изученным является и режим работы тяговых двигателей рудничных электровозов по величине и характеру нагрузки. Часто считают, что движение составов на подземных путях происходит при установившихся скоростях тяговых двигателей и определение величины нагрева двигателя производят по току при установившихся скоростях. Как показывают наши наблюдения, движение (особенно контактных электровозов) происходит, как правило, при неустановившихся режимах работы тяговых двигателей с резко переменной величиной нагрузки. При конструировании тяговых двигателей обычно задаются определенным соотношением между часовой, длительной и максимальной мощностью

двигателей. Часовая мощность является номинальной для тягового двигателя и указывается на его паспорте. Для закрытых двигателей рудничных электровозов длительный ток принимается порядка 40% от часового. Мгновенная максимальная мощность, допускаемая при кратковременных перегрузках, при проектировании принимается в два раза больше часовой. Такие соотношения в расчетных параметрах двигателей принимаются без достаточного обоснования для всех типов электровозов подземной электровозной откатки.

С целью изучения режимов работы тяговых двигателей рудничных электровозов в условиях сланцевых шахт нами был проведен экспери-

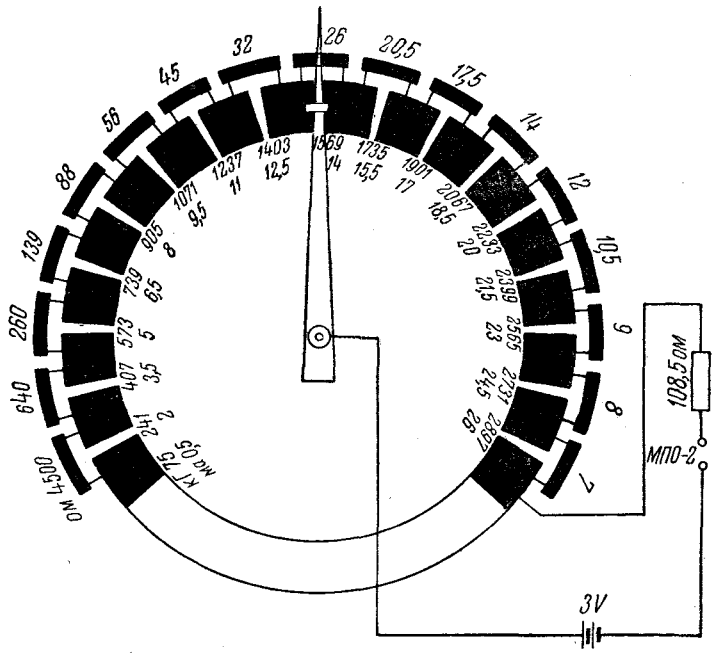


Рис. 1. Схема трехтонного стрелочного динамометра с электрическим датчиком напряжения

мент на электровозной откатке шахт трестов Ленинградсланца и Эстонсланца. При этом производился общий хронометраж электровозной откатки по шахте, составлялись диспетчерские графики, изучался режим работы бригад на погрузочных пунктах и в околоствольном дворе. Одновременно при помощи самопишущих измерительных приборов велась запись отдельных параметров и элементов движения электровозов и режимов работы тяговой подстанции и тяговой сети. Запись отдельных параметров производилась следующими методами.

1. На отдельных изолированных участках тяговой сети (на крыльях) и в целом на тяговую сеть (в точках секционных разъединителей) включались самопишущие амперметры.

2. В концах отдельных участков линии и на тяговой подстанции включались самопишущие вольтметры.

3. Для записи средних значений нагрузки в цепь каждого двигателя и электровоза в целом одновременно включались отдельные счетчики ампер-часов и киловатт-часов.

4. Для записи мгновенных значений скорости, силы тяги, проскальзывания колес и электрических параметров на электровозе был установлен восьмишлейфовый осциллограф МПО-2.

Скорости записывались через датчики напряжения от таходинам, включенных на ведущем полускате электровоза и полускате одного из вагончиков. Для записи силы тяги электровоза обычный трехтонный стрелочный динамометр был оборудован электрическим датчиком напряжения (рис. 1). Перемещение стрелки динамометра через специальные контакты изменяло величину сопротивления в цепи одного из шлейфов осциллографа Динамометр подвешивался в специальном вагончике, прицепленном между электровозом и составом.

5. Одновременно обследовались тяговые сети, изучалось состояние стыковых соединений рельсов, замерялись величины переходных сопротивлений в стыках и величины перепадов напряжения относительно «земли» от наличия блуждающих токов.

Анализ экспериментального материала и исследований по двум наиболее типичным сланцевым шахтам с разными условиями и характеристиками электровозной откатки позволяет сделать выводы, значительно корректирующие существующее представление о некоторых режимах работы тяговых двигателей рудничных электровозов.

1. Пусковой режим работы двигателей

В условиях электровозной тяги имеют место два случая пуска двигателей в ход: а) при начальном разгоне состава поезда; б) при движущемся составе поезда по инерции.

При двухступенчатом пуске электровозов в ход, когда производится переключение тяговых двигателей с последовательного на параллель-

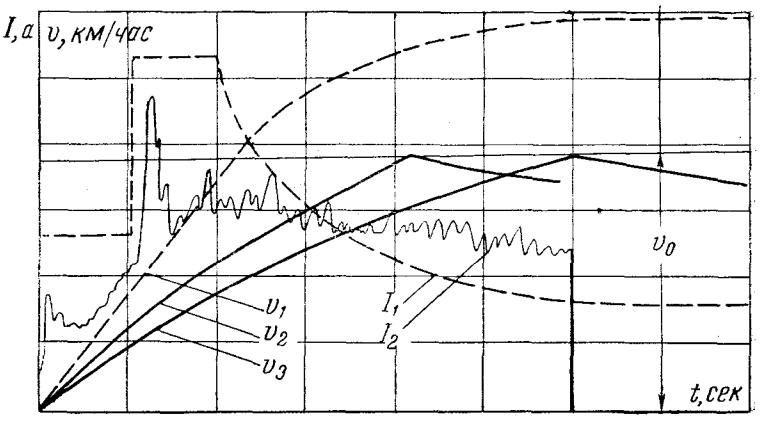


Рис. 2. Изменение некоторых электромеханических параметров при разгоне состава:

t' — время разгона, *сек*; *v*, v_1, v_2, v_3 и v_0 — соответственно скорость движения состава, расчетная скорость, фактическая на ободе ведущих полускатов, поступательная и скорость ограничения, *км/час*; *I*, I_1 и I_2 — соответственно ток нагрузки двигателя и фактический, *а*

ное соединение, расчетные графики тока и скорости обычно отличаются от фактических (рис. 2). При разгоне происходит сглаживание пика мощности, растягивание процесса разгона во времени. Сглаживание пика мощности, потребляемой из сети при разгоне поезда, является следствием, во-первых, падения напряжения в линии при увеличении тока нагрузки и, во-вторых, пробуксовки колес. При падении напряжения в линии естественные скоростные характеристики двигателей снижаются и, следовательно, уменьшается скорость выхода на естественную характеристику, сокращается период разгона при максимальном

усилии. Разгон в основном происходит на естественных характеристиках при постепенном повышении напряжения. При наличии пробуксовок колес имеет место также расхождение в скоростях движения поезда и полускатов электровоза.

Двигатели и полускаты электровоза достигают скорости выхода на естественную характеристику раньше, чем собственно состав поезда. Дальнейший разгон состава происходит вследствие уменьшения величины пробуксовки колес и увеличения скорости на естественной характеристике. Как видно из анализа, процессы разгона электровоза сопровождаются сложными режимами работы тяговых двигателей при беспрерывно изменяющихся электромеханических характеристиках. Повторное включение двигателей в сеть при движении поезда имеет место при искусственных ограничениях скорости, когда установившаяся скорость движения велика. В этом случае электродвижущая сила тягового двигателя ограничивает бросок пускового тока по времени до долей секунды.

Таким образом, при пусках двигателей в ход фактические графики нагрузки, в отличие от расчетных, как бы сглажены. В связи с этим утрачивается смысл проверки тяговых сетей на пиковую нагрузку при пуске электровозов в ход, а при определении расхода энергии на движение нет необходимости особо выделять период начального разгона электровоза.

2. Ходовой режим работы двигателей

При движении состава поезда по откаточному участку тяговые двигатели между остановками работают почти исключительно на переходных режимах, которые обусловлены рядом причин, вызывающих изменение величины нагрузки. Главными из них являются: изменение величины уклонов профиля пути, основных сопротивлений движению; необходимость искусственного ограничения скорости из-за плохого состояния путей, коротких перегонов и невозможности достижения установившейся скорости движения вследствие резких колебаний напряжения в линии при наличии нескольких работающих электровозов и изменения коэффициента сцепления колес электровоза с рельсами. Неустойчивость скоростных характеристик сериесных двигателей, особенно в зонах малых нагрузок, вынуждает машинистов электровозов эпизодически отключать тяговые двигатели от сети, что также вызывает переходные режимы работы двигателей иногда и на спокойном профиле пути. Резкие изменения нагрузки двигателей вызываются подсыпанием песка под колеса на тяжелом профиле пути.

Интегрирование уравнения движения поезда, идущего в грузовом направлении с двадцатью четырьмя двухтонными вагонами сланца, дает представление о возможном характере изменения скоростей движения по перегону (рис. 3, линия *а, б, в, г, д, е*). Пунктирной линией на графике указана величина установившейся скорости движения. Для большинства элементов пути она значительно превышает скорость, полученную при интегрировании. При ограничении скорости движения до 12 *км/час* график скорости будет еще более сложен (рис 3, линия *а′, б′, в′, г′, д′, е′*). В нижней части рисунка изображены графики тока двигателей. При движении поезда без ограничения скорости ток нагрузки изменяется по линии *а, б, в, г, д, е*, и т. д., при ограничении скорости до 12 *км/час* — по линии *а′, б′, в′, г′, д′, е′* и т. д. Графики скорости движения и тока нагрузки, полученные интегрированием уравнений движения, показывают, что работа двигателей происходит все время на переходных режимах.

Графики нагрузки в условиях работы электровозов в шахте могут быть еще более сложными. Колебание напряжения в сети может вызвать дополнительное изменение скорости почти в полтора раза. При уменьшении величины состава изменения скорости будут еще более резкими, а установившиеся скорости движения поезда — еще более высокими, нереальными.

Хронометражными наблюдениями установлено, что в условиях сланцевых шахт величина состава колеблется от 4 до 45 вагонов.

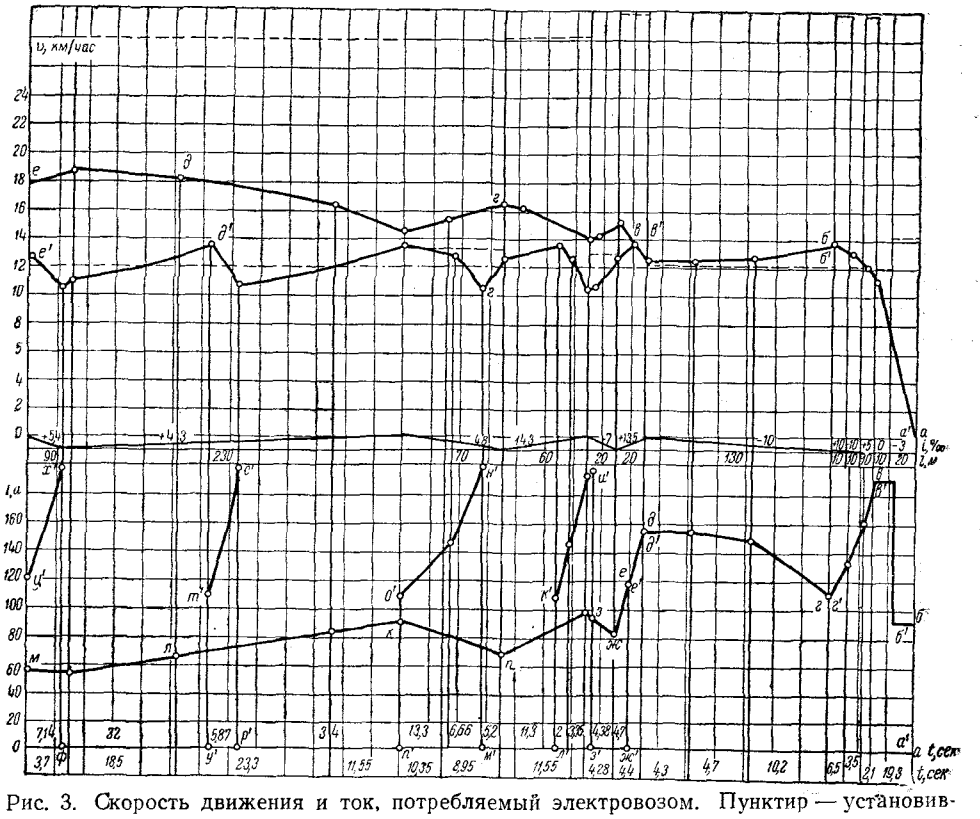


Рис. 3. Скорость движения и ток, потребляемый электровозом. Пунктир — устанавливающаяся скорость на отдельных элементах пути

При больших составах вследствие изменения коэффициента сцепления на некоторых тяжелых участках пути возникают пробуксовки колес, что также вызывает переходные режимы работы тяговых двигателей.

Перечисленные изменения величины состава поезда, профиля пути, величины напряжения на линии, коэффициентов сцепления колес электровоза и сопротивления движению не позволяют аналитически воспроизвести сложный график движения электровоза на подземных путях. Все расчеты будут приближенными. Одновременно с факторами, вызывающими изменение величины нагрузки, двигатели подвергаются сглаживающим воздействиям, выравнивающим нагрузку: автоматическому уменьшению величины напряжения в линии при увеличении нагрузки. Это несколько ограничивает нарастание тока и растягивает переходный процесс во времени. Переход состава поезда с одного уклона пути на другой происходит постепенно, поэтому сопротивление от уклона пути изменяется плавно за время перемещения поезда на длину состава

(порядка 50—90 *м*). Пробуксовки колес электровоза на тяжелых элементах профиля пути также сглаживают большие пики нагрузки двигателей. Некоторый люфт, имеющийся в сцепках при всяких разгонах состава, как бы расчленяет общую нагрузку на крюке электровоза от сопротивления движению. Одновременно растяжка в сцепках вызывает удары на крюке электровоза. Особенно сильным сглаживающим фактором в переходных режимах является механическая инерция массы поезда и его вращающихся частей. Резко выраженный динамический характер нагрузки на крюке электровоза значительно сглаживается маховыми массами полускатов электровоза и якорями двигателей. К сглаживающим факторам нагрузки двигателей необходимо отнести вклю-

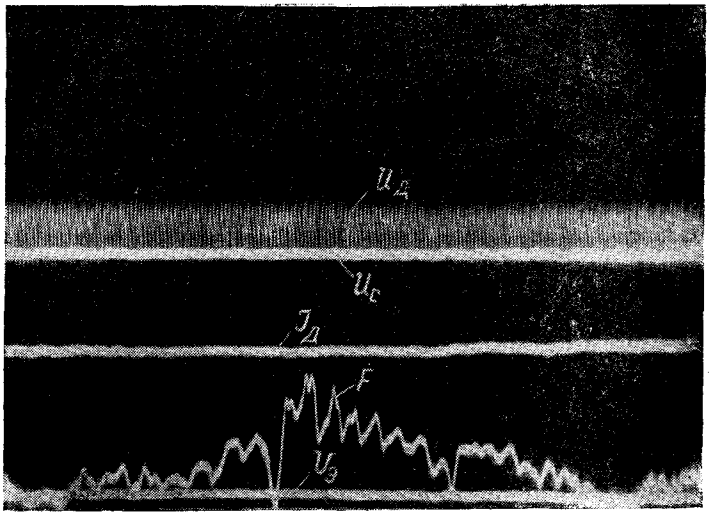


Рис. 4. Осциллограмма, снятая при движении электровоза с пробуксовками:
$U_д$ и $U_с$ — соответственно напряжение на клеммах двигателя и троллейной сети, *в*; $I_д$ — ток в цепи двигателя, *а*; F — сила тяги на крюке электровоза, *кг*; $v_э$ — скорость движения электровоза, *км/час*

чение реостата с целью ограничения скорости при движении состава поезда на сложном профиле пути.

Как следует из анализа рис. 4, пусковые реостаты используются не только при пуске двигателей в ход, но и при регулировании скорости во время движения. Расход энергии в реостатах характеризуется графиком, приведенным на рис. 5. Перечисленные сглаживающие факторы растягивают во времени все переходные процессы в режимах работы тяговых двигателей. Они как бы соединяют плавными переходными кривыми нагрузки двигателей в резко переменных режимах работы. Фактически установившиеся режимы работы двигателей отсутствуют. При наличии сглаживающих факторов новые изменения в режиме работы двигателей наступают прежде, чем закончится переходный процесс предыдущего изменения.

Таким образом, и при так называемом равномерном движении электровоза тяговые двигатели работают все время на переходных режимах. Существующие методы определения элементов движения (включая и метод конечных приращений) не отражают действительных режимов работы тяговых двигателей. Эти режимы должны рассматриваться в совокупности со всеми особенностями условий работы, особенно

характера изменений напряжения и наличия пробуксовок колес электровоза.

При определении элементов движения и энергетических параметров необходимо исходить из условий неустановившихся режимов работы тяговых двигателей на среднем или эквивалентном уклоне пути. Если принять колебания скорости движения состава относительно некоторой средней величины постоянными, будет справедливо равенство прира-

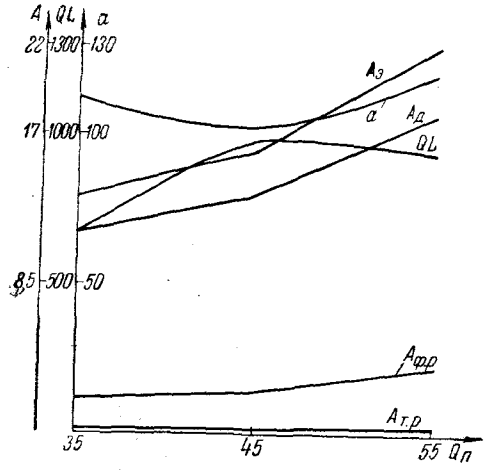


Рис. 5. Показатели откатки по производительности и расходу энергии:

a — удельный расход энергии по наблюдениям за смену, *вт-ч/ткм*; QL — производительность за смену, *ткм*; $A_э$ — потребление энергии электровозом за рейс, *квт-ч*; $A_д$ — потребление энергии собственно двигателями за рейс, *квт-ч*; $A_{ф.р}$ — фактические потери энергии в реостатах по показаниям счетчиков за рейс, *квт-ч*; $A_{т.р}$ — теоретические потери энергии в реостатах за рейс, подсчитанные по существующим в литературе формулам, *квт-ч*; $Q_п$ — полезная величина состава, *т*

щения скорости при разгоне под током уменьшению ее при свободном выбеге без потребления тока двигателями

$$\Delta v_{раз} = \Delta v_{зам}$$

или, используя основное уравнение движения [1], получим

$$\frac{\Delta t_{раз}}{\Delta t_{зам}} = \frac{w_0 \pm i_{эк}}{f - (w_0 \pm i_{эк})}, \qquad (1)$$

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

$\Delta t_{зам}$ — время замедления без тока при свободном выбеге, сек;

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

$i_{эк}$ — эквивалентный или средний уклон пути, $^0/_{00}$;

f — удельная сила тяги, соответствующая заданной средней скорости движения, *кг/т*.

По отношению (1) определим суммарное время потребления тока электровозом за время движения

$$T_т = T_{дв} \frac{\frac{\Delta t_{раз}}{\Delta t_{зам}}}{\frac{\Delta t_{раз}}{\Delta t_{зам}} + 1} \qquad (2)$$

и время движения без потребления тока из сети

$$T_0 = T_{дв} - T_т. \qquad (3)$$

Общее время движения определяется по длине пути L и средней скорости $v_{ср}$

$$T_{дв} = \frac{L}{v_{ср}}. \qquad (4)$$

Величина тока также вычисляется по средней скорости из характеристик двигателей.

3. Тормозной режим работы двигателей

В данной работе исследование тормозных режимов тяговых двигателей ограничено установлением возможной области применения электрического торможения, исходя из конкретных условий работы электровозов. Кроме того, аналитическим путем по электромеханическим характеристикам выявлено влияние электрического торможения на нагрев тяговых двигателей. Уклоны откаточных путей на сланцевых шахтах колеблются в пределах $\pm 15^0/_{00}$ вместо $\pm 4^0/_{00}$ проектных. Около 60% путей имеют уклоны больше проектных и 20% характеризуются уклонами $\pm 10^0/_{00}$ и более.

Однако затяжные уклоны больше самокатного на длинных участках пути встречаются редко; кроме того, почти половина путей имеет подъемы в грузовом направлении. При этих условиях получить существенную экономию энергии при рекуперативном торможении нельзя. Реостатное торможение, имеющее известные преимущества перед механическим торможением, может иметь место также в ограниченных пределах. Существующие ограничения по сцеплению колес электровоза с рельсами, по допустимому напряжению на коллекторе двигателя, по минимуму тока возбуждения и скорости вращения якоря показаны пунктирными линиями на электромеханических характеристиках тягового двигателя ДК-801А на рис. 6. Реостатное торможение, как видно из графика, возможно в интервале скоростей от 2,5 до 18 *км/час* при изменении тормозного усилия от 150 до 650 *кг*. Реостатное торможение может применяться при замедлениях поезда на остановках и движении на затяжных уклонах больше самокатного. В первом случае живая сила движущегося состава будет реализована на движение поезда и генерирование тока двигателями в пределах времени замедления. Равенство работы и живой силы поезда при этом будет иметь вид

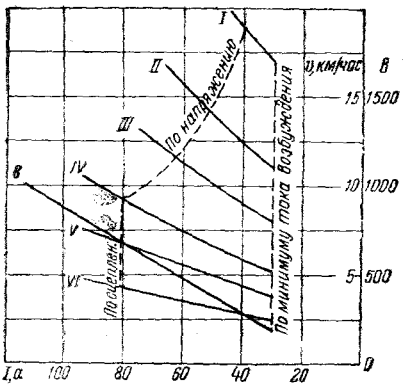


Рис. 6. Тормозные характеристики тягового двигателя ДК-801А:
v — скорость движения электровоза, *км/час*; *B* — тормозные усилия, *кг*; *I* — ток нагрузки двигателя, *a*; *I — VI* — кривые скорости на разных ступенях реостата, *км/час*. Пунктиром показаны ограничения

$$M_{\text{пр}} \frac{v_{\text{ср}}^2 - v_{\min}^2}{2} = l_{\text{т}} (w_0 \pm i + b)(P + Q), \qquad (5)$$

где $M_{\text{пр}}$ — приведенная масса поезда, *кг·сек²/м*;

$$M_{\text{пр}} = \frac{1{,}075\,(P + Q)\,1000}{9{,}81} = 110\,(P + Q);$$

$v_{\text{ср}}$ — скорость движения поезда в начале торможения, *м/сек*;
$v_{\min}$ — скорость движения поезда в конце торможения, *м/сек*;
$l_{\text{т}}$ — длина пути торможения, *м*.

$$l_{\text{т}} = \frac{v_{\text{ср}} + v_{\min}}{2} t;$$

i — уклон пути, $^0/_{00}$;
P — сцепной вес электровоза, *т*;
Q — вес состава поезда, *т*;

t — время торможения, сек.;
b — удельное тормозное усилие при реостатном торможении, *кг/т*,

$$b = \frac{0{,}8B_{max}}{P+Q};$$

B_{max} — общее тормозное усилие, *т*.

Подставляя в формулу (5) значения скоростей и усилий, взятых из тормозных характеристик (см. рис. 6) для средней величины состава поезда, время реостатного торможения при остановках поезда получается равным для грузового направления — 30 сек., а для порожнякового — 20 сек. Для реостатного торможения на уклонах пути больше самокатного остается справедливым равенство (5). При этом могут быть три случая, когда в период торможения происходит: а) уменьшение скорости движения; б) увеличение скорости движения и в) когда скорость движения остается постоянной.

В последнем простейшем случае справедливо равенство

$$w_0 - i + b = 0; \quad i = w_0 + b.$$

Как видно из характеристик, торможение по условиям минимума возбуждения двигателей возможно только с усилием более 150 *кг* на каждый двигатель. Следовательно, для средней величины состава минимальные удельные тормозные усилия в грузовом направлении

$$b_{гр} = \frac{150 \cdot 2}{60} = 5 \ кг/т;$$

в порожняковом

$$b_{пор} = \frac{150 \cdot 2}{27{,}3} = 11 \ кг/т.$$

При удельном сопротивлении движению 8—10 *кг/т* торможение с неуменьшающейся скоростью возможно только на уклонах для грузового направления более 13‰ и порожнякового — более 21‰. Таким образом, на сланцевых шахтах реостатное торможение практически ограничивается случаем движения с уменьшением скорости. Некоторым исключением является шахта «Кукрусе» Эстонсланца, где затяжной уклон в сторону движения порожняка на длине 500 *м* равен 14‰. На других сланцевых шахтах длина путей с уклонами, обеспечивающими реостатное торможение, мала. Проходятся они, как правило, при включенных двигателях с некоторым увеличением скорости движения поезда.

4. Тепловой режим работы двигателей

Двигатель подземного рудничного электровоза вместе с пусковым металлическим реостатом вмонтирован в общую массивную железную раму электровоза. Это вносит свои особенности в тепловой режим работы двигателя: 1) нагрев корпуса двигателя в каждый данный момент зависит не только от величины токовой нагрузки, но и степени нагрева рамы и других металлических частей электровоза; 2) суммарный тепловой баланс при нагреве всех частей электровоза складывается из нагрева обмоток и железа тяговых двигателей, нагрева металлических секций пускового реостата. При резко переменной величине нагрузки на тяговые двигатели и пусковые реостаты имеет место сложный взаимно зависимый процесс нагревания и охлаждения двигателей. Существующие практические методы расчетов тепловых процессов тяговых двигателей рудничных электровозов имеют в виду упрощенные условия нагрева и охлаждения. Тяговые двигатели рассматриваются как одно-

родное тело с одним источником тепла, выделяемого обмотками двигателя. Проверка двигателей на нагрев производится по эквивалентному току нагрузки, исходя из одного рейса электровоза. Считается, что рейсы следуют один за другим без перерывов. Эквивалентный ток определяется из условий установившейся скорости движения в грузовом и порожняковом направлениях и сравнивается с током длительного режима.

Исследования показывают, что температурные условия работы тяговых двигателей из-за большой постоянной времени нагрева не остаются одинаковыми в течение суток. Наблюдается значительная разница в величине нагрева обмоток двигателей и частей машины, подверженных охлаждению. Нагрев машин в сильной степени зависит от числа рейсов, коэффициента загрузки по времени в течение смены или суток. Фактический режим работы тяговых двигателей по загрузке приближается к повторно кратковременному, поэтому эквивалентный нагревательный ток следует определять из неустановившихся режимов работы двигателей при ограниченной скорости движения (см. рис. 3).

Ограничивая задачу проверкой тяговых двигателей по нагреву в эксплуатационных условиях, можно рекомендовать следующие уточнения к существующим методам расчетов. При сложных тепловых процессах применять многоступенчатую теорию расчетов нецелесообразно. Проверку двигателей по нагреву необходимо осуществлять по эквивалентному току длительного режима. При этом в существующие методы расчетов необходимо внести следующие коррективы.

1. Эквивалентный нагревательный ток определять из неустановившихся режимов работы тяговых двигателей при переменной нагрузке и ограниченной скорости движения на эквивалентных уклонах пути.

2. При неполной загрузке электровозов при определении эквивалентного тока учитывать коэффициент загрузки электровозов по времени, представляющий отношение фактического числа рейсов электровоза к теоретически возможному числу рейсов в течение суток (см. ниже формулу (6)).

3. Для определения эквивалентного тока тяговых двигателей рудничных электровозов с неполной загрузкой в течение суток сначала по формулам (1), (2), (3) найти общее время движения поезда и время движения под током в течение рейса по всем эксплуатационным участкам откаточных путей. Из характеристик тяговых двигателей по заданным скоростям найти соответствующие средние значения тока. Затем по формуле (6) определить эквивалентный по нагреву ток нагрузки двигателя

$$I_{эк} = \alpha \sqrt{\frac{\sum I_i^2 t_{ti} k_i}{\sum t_i}}, \qquad (6)$$

где $I_{эк}$ — эквивалентный ток нагрузки двигателя, a;

α — коэффициент, учитывающий дополнительный нагрев тяговых двигателей при маневровой работе электровоза (для сланцевых шахт рекомендуется 1,2 — 1,6 в зависимости от средней длины откатки);

I_i — средний ток по отдельным откаточным участкам, a;

t_{ti} — время движения под током по отдельным откаточным участкам, сек.;

$\sum t_i$ — суммарное время работы электровоза, включая маневры и простои, сек.;

k_i — число рейсов по отдельным откаточным участкам.

5. Потребление энергии двигателями

Расход энергии на движение поезда аналитически определяется двумя методами: а) по кривым ампер-часов, полученным интегрированием уравнений движения; б) по работе, совершенной поездом на эквивалентном уклоне пути [1].

Точность расчетов по кривым ампер-часов зависит от метода интегрирования уравнений движения. По степени точности вычислений все методы расчетов могут быть расположены в следующем порядке: а) метод конечных приращений; б) неустановившихся скоростей движения [1]; в) постоянных ускорений; г) установившихся скоростей движения.

Для подземной электровозной откатки метод конечных приращений утрачивает актуальность в связи с неточностью исходных данных при интегрировании уравнений. В условиях шахты, как правило, изменяются основные исходные расчетные данные, которые должны быть приняты за постоянные. Изменяется величина состава, длина откаточных путей, производительность откаточных участков, уклоны путей, графики движения и пр. По точности расчета эти трудоемкие вычисления не достигают цели.

Метод определения расхода энергии по работе, совершенной поездом на эквивалентном уклоне, весьма приближенный, особенно при определении ампер-часового графика нагрузки. Он не учитывает изменений к. п. д. тяговых двигателей при изменении величины состава поезда и квадратичной зависимости тока от силы тяги при малых нагрузках, не учитывает того, что при работе электровоза под реостатом ток двигателей остается большим и при малой полезной мощности, затрачиваемой на движение.

Указанные методы определения расхода энергии на движение не учитывают дополнительную составляющую расхода энергии на истирание бандажей колес электровоза и головок откаточных рельсов, возникающие при пробуксовках колес рудничных электровозов. Проведенные исследования дают основание внести некоторые коррективы в определение расхода энергии на рудничную электровозную откатку в подземных условиях. При определении расхода энергии необходимо: а) учитывать дополнительную составляющую потерь энергии на пробуксовку колес ведущих полускатов электровоза при больших составах поезда; б) учитывать расход энергии в реостатах не только на пусковые операции, но и частично на регулирование скорости, особенно при большом проценте маневровых работ (см. рис. 5); в) определять энергетические параметры методом интегрирования уравнений движения из условий неустановившихся скоростей движения поезда; г) определять расход энергии на маневровые работы с учетом не только длины откаточных участков, но и степени механизации погрузочно-разгрузочных операций.

Как видно из рис. 5, общий и удельный расходы энергии резко изменяются в связи с изменением величины состава поезда и уклона пути. Удельный расход энергии на 1 *ткм* полезной перевозки имеет явно выраженный минимум. Расход энергии на движение складывается из полезных затрат и ряда потерь, зависящих от величины состава поезда. При изменении состава поезда изменяются удельные значения отдельных составляющих по расходу энергии. С уменьшением веса состава удельный расход энергии возрастает вследствие; а) увеличения удельного мертвого веса состава за счет веса электровоза; б) увеличения потерь в реостатах и тормозной системе при большом ограничении ско-

рости в пути в связи с ростом установившейся скорости движения поезда; в) уменьшения к. п. д. тяговых двигателей в связи с их недогрузкой; г) увеличения в процентном отношении расхода энергии на порожняковое направление движения.

С чрезмерным увеличением веса состава удельный расход энергии возрастает вследствие: а) увеличения расхода энергии на пробуксовку колес электровоза; б) уменьшения установившейся скорости движения и затягивания процессов разгона; в) уменьшения скорости движения из-за пробуксовки колес; г) увеличения потерь в пусковых реостатах при разгоне поезда; д) уменьшения к. п. д. тяговых двигателей в связи с перегрузкой.

Минимум удельного расхода энергии на откатку по оси абсцисс совпадает с максимумом производительности электровоза (см. рис. 5).

Выводы

1. Работа двигателей электровозов происходит, как правило, при неустановившихся переходных режимах.

2. Графики нагрузки сложные, приближаются к повторно-кратковременным с неравномерным чередованием пауз и различным временем нахождения электровоза под током.

3. В работе электровозов имеет место проскальзывание колес ведущих полускатов, что приводит к дополнительному расходу энергии на трение.

4. Машинисты электровоза пользуются пусковыми реостатами не только при разгоне состава, но и при ограничениях скорости.

5. Вследствие отсутствия больших затяжных уклонов на откаточных путях в работе двигателей нет устойчивых электрических тормозных режимов.

6. Удельный расход энергии на откатку изменяется в зависимости от величины состава поезда, а при оптимальной величине состава имеет явно выраженный минимум.

7. Для двигателей характерен своеобразный тепловой режим работы: нагрев собственно двигателя зависит не только от нагрузки, но и от теплоты, выделяемой пусковыми реостатами, и степени нагрева корпуса электровоза.

8. Энергетические элементы движения электровозной откатки необходимо определять по методу неустановившейся скорости движения [1].

9. Расход энергии на движение необходимо подсчитывать с учетом дополнительных потерь в пусковых реостатах и особенно потерь на истирание бандажей колес при пробуксовках ведущих полускатов.

10. Число вагонов состава поезда необходимо выбирать с учетом возможности уменьшения величины пробуксовок колес электровоза и минимального удельного расхода энергии.

11. В коммутационных схемах рудничного электровоза необходимо предусматривать электрические тормозные режимы только в тех случаях, когда по условиям откатки наблюдаются большие затяжные уклоны в сторону движения груза.

12. Дальнейшие научно-экспериментальные исследования должны установить: а) возможность ограничения потребления энергии пусковыми реостатами при искусственном ограничении скорости движения электровоза; б) экономическую целесообразность уменьшения пробуксовки ведущих полускатов электровоза методом подмагничивания колес; в) характер теплового режима работы тяговых двигателей непосредственно на работающем электровозе.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Рысьев А. В., Ломакин С. М. Электровозы, электровозное хозяйство и вагонный парк. Углетехиздат, 1956.