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

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

Ф. С. Леонтьев

Существующие в практике подземной электрифицированной откатки методы определения расхода энергии не учитывают некоторых особенностей работы электровоза. Обследованием угольных и сланцевых шахт ряда бассейнов установлено, что при работе электровоза энергия дополнительно (непроизводительно) затрачивается на истирание бандажей колес и головок рельсов при буксовании, в реостатном сопротивлении и повышаются потери на нагрев двигателей. Этот расход энергии особенно велик на сложном продольном профиле откаточных путей.

Если по абсолютной величине все составляющие энергии с увеличением состава поезда $Q_{гр}$ возрастают, то их удельные значения изменяются при этом различно. С уменьшением $Q_{гр}$ удельный расход энергии a увеличивается вследствие повышения удельной величины мертвого веса состава за счет веса электровоза, увеличения потерь в реостатах и в тормозной системе из-за необходимости большего ограничения скорости в пути и т. д.

С чрезмерным увеличением $Q_{гр}$ значение a растет вследствие увеличения расхода энергии на пробуксовку колес электровоза, уменьшения к. п. д. тяговых двигателей из-за перегрузки и т. д. При наилучшем сочетании указанных показателей достигается минимум в общем удельном расходе энергии. Этого можно добиться в первую очередь за счет выбора надлежащей величины состава поезда.

Учитывая многообразие горнотехнических условий шахт по производительности, длине откаточных выработок, схемам электроснабжения, нагрузочным режимам тяговых двигателей, типам вагонеток и другим факторам, нами принята следующая методика исследований.

1. Промышленный эксперимент на двух шахтах, резко отличных по характеристикам и условиям электровозной откатки. Одна шахта в отличие от другой характеризовалась малой производительностью и небольшой длиной откаточных выработок, режим работы двигателей электровозов приближался к повторно-кратковременному.

2. Комплексный эксперимент с использованием электрических счетчиков, показывающей аппаратуры, с фиксацией величины состава и производством хронометража по определению коэффициента использования электровоза во времени.

3. Анализ и математическая обработка экспериментальных данных с последующими выводами.

Исследования проводились на шахтах трестов Эстонсланец и Ленинградсланец на 7- и 10-тонных контактных электровозах. Откаточные пути этих шахт имеют сложный продольный профиль, протяженность 2—4 *км*, средний уклон около $3^0/_{00}$, длину руководящих уклонов 100—500 *м* при средних подъемах 14—$19^0/_{00}$. При эксперименте величина $Q_{ср}$ изменялась в максимально возможном диапазоне. Верхний предел лимитировался перегревом двигателей или полной пробуксовкой колес электровозов.

Влияние на работу электровоза ряда факторов, изменяющихся по произвольному закону, предопределило необходимость проведения большого объема исследований с использованием средних и среднеквадратичных величин.

Например, среднеарифметические значения электрических величин определялись по данным счетчиков энергии, включенных непосредственно в цепь двигателей электровоза (рис. 1).

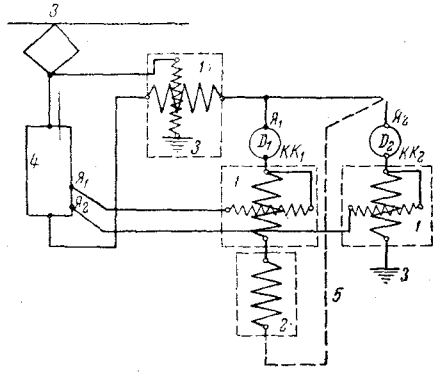


Рис. 1. Принципиальная схема включения счетчиков:
1—2 — счетчики энергии; *3* — контактный провод *4* — контроллер; *5* — последовательное включение двигателей

При известных элементах профиля путей, величине состава, расходе энергии и длительности рейса методика расчета заключалась в определении: 1) для каждого состава на каждом перегоне (исходя из 2—3 повторных рейсов) средних значений силы тяги $F_{ср}$, силы тока $I_{ср}$, напряжения $U_{ср}$, мощности $N_{ср}$, расхода энергии электровоза $A_э$, потерь в реостатах $A_р$, удельного расхода энергии a и к. п. д. электровоза по производительности η_R; 2) средних значений перечисленных параметров для шахты в целом, а затем для двух шахт; 3) среднеквадратичного тока

$$I_{кв} = I_{ср} k_п k_и k_н = I_{ср} k_э, \; a,$$

где $k_п = \frac{I'_{кв}}{I_{ср}}$ — коэффициент профиля;

$k_э$, $k_н$, $k_и$ — коэффициенты эффективности тока, неравномерности нагрузки двигателя, использования электровоза.

Значения $I'_{кв}$ определялись планиметрированием мгновенных величин тока. Величина $k_п$ обусловлена величиной колебания действующего тока и частотой ее изменения во времени. Она зависит в основном от величины и знакопеременности уклонов продольного профиля. Среднее значение $k_п$ для двух выбранных шахт получилось равным 1,34. Коэффициент использования электровоза во времени

$$k_н = \frac{I''_{кв}}{\sqrt{T^2_{ср}}} = \frac{\sqrt{I^2\tau}}{\sqrt{(I\tau)^2}},$$

где τ — относительная продолжительность включения двигателей в течение рейса.

Коэффициент $k_и$ зависит от степени использования электровоза во времени, характеризуемой величиной τ. Графики $k_и = f(\tau)$ и $k_н = f\left(\frac{I_{max}}{I_{min}}\right)$ представлены на рис. 2.

Величина $k_н$ обусловлена неравномерностью нагрузки двигателей электровоза в течение грузового и порожнякового полурейсов

$$k_н = \frac{I''_{кв}}{I_{ср}} = \frac{\sqrt{\frac{I^2_{max} + I^2_{min}}{2}}}{\frac{I_{max} + I_{min}}{2}}.$$

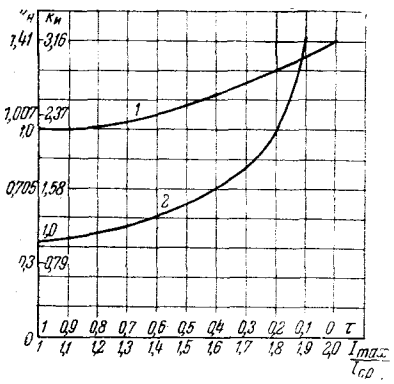


Рис. 2. Коэффициенты использования и неравномерности нагрузки двигателей электровоза:

$1 - k_н = f\frac{I_{max}}{I_{ср}}$; $2 - k_и = f(\tau)$

Под I_{max} и I_{min} подразумеваются токи грузового $I_{гр}$ и порожнякового $I_{пор}$ направлений движения, в зависимости от вида профиля (уклонного или бремсбергового) [1]. Чем больше средний уклон $i_{ср}$ откаточных путей отличается от уклона равного сопротивления $i_{р.с}$, тем больше величина $k_н$.

Считаем, что работа двигателей электровоза на основных откаточных участках соответствует длительному режиму, а на руководящем подъеме — кратковременному с максимальной нагрузкой. По известной формуле подсчитываем силу тяги для грузового направления движения на руководящем подъеме.

Как видно из табл. 1, где показана зависимость энергетических и электромеханических показателей электровоза от величины состава, расход энергии в реостатах при работе электровоза на основных участках больше, чем на руководящих подъемах, хотя пусковые периоды в последнем случае более тяжелые и затяжные. Следовательно, на основных участках в течение рейса имело место несколько пусковых периодов.

Таблица 1

Участки	$Q_{гр.\ min}$						$Q_{гр.\ опт.}$		
	F, кг	$I_{кв}$, а	N, квт	$A_р$, квт-ч	τ_R	a, квт-ч/ткм	F, кг	$I_{кв}$ а	N, квт
Основные по шахте в целом	485	76	16	1,05	0,48	0,124	600	96	19,6
Реководящий подъем $L = 100$ м	1000	180	32,8	0,038	0,44	0,32	1233	204	36
Руководящий подъем $L = 500$ м	500	180	30	0,1	0,25	0,26	1550	250	49

Продолжение табл. 1

Участки	$Q_{гр.\ опт.}$			$Q_{гр.\ шах}$					
	$A_р$ *квт-ч*	η_R	a, *квт-ч/ткм*	F, *кг*	$I_{кв}$, *а*	N, *квт*	$A_р$, *квт-ч*	η_R	a, *квт-ч/ткм*
Основные по шахте в целом	1,65	0,68	0,108	705	116	21,6	2,05	0,59	0,127
Руководящий подъём $L = 100$ *м*	0,042	0,49	0,15	1900	276	47,2	0,252	0	1,68
Руководящий подъём $L = 500$ *м*	0,5	0,75	0,162	2100	282	35	1,25	0,37	0,222

Отметим, что исследования на основных откаточных участках и руководящем подъеме ($L = 500$ *м*) проводились при работе электровоза с частичным применением песка.

Из отношения параметров F, I и N, соответствующих $Q_{гр.\ опт}$, определяем коэффициенты кратности по силе тяги κ_F, току κ_I и мощности κ_N. Силу тяги F подсчитываем по эмпирической формуле, найденной из электромеханической характеристики двигателя,

$$F_I = \frac{I_{кв} - 15}{0{,}114}, \ кг. \tag{1}$$

Коэффициент кратности:

по силе тяги

$$k_F = \frac{F_{рук}}{F_{I_{осн}}} = 2{,}2; \tag{2}$$

по току

$$k_I = \frac{I_{рук}}{I_{осн}} = 2{,}6\ (2{,}13); \tag{3}$$

по мощности

$$k_N = \frac{N_{рук}}{N_{осн}} = 2{,}5\ (1{,}83). \tag{4}$$

Как видно из табл. 2, сила тяги на руководящих подъемах, найденная по току из формулы (1), значительно больше силы тяги, подсчитанной по силам сопротивления движению. Следовательно, из-за низких к. п. д. тяговых двигателей и наличия пробуксовки только часть тока идет на создание силы тяги.

Таблица 2

Участки	F, *кг*	F_I, *кг*,	$I_{кв}$, *а*	k_I	k_F	N, *квт*	k_N
Основные	600	710	96	—	—	19,6	—
Руководящий подъём $L = 500$ *м* . .	1550	2060	250	2,6	2,2	49	2,5
Руководящий подъём $L = 100$ *м* . .	1233	1660	204	2,13	1,74	36	1,83

На рис. 3—5 максимум кривой производительности η_R совпадает с минимумом кривой удельного расхода энергии a. Таким образом, все

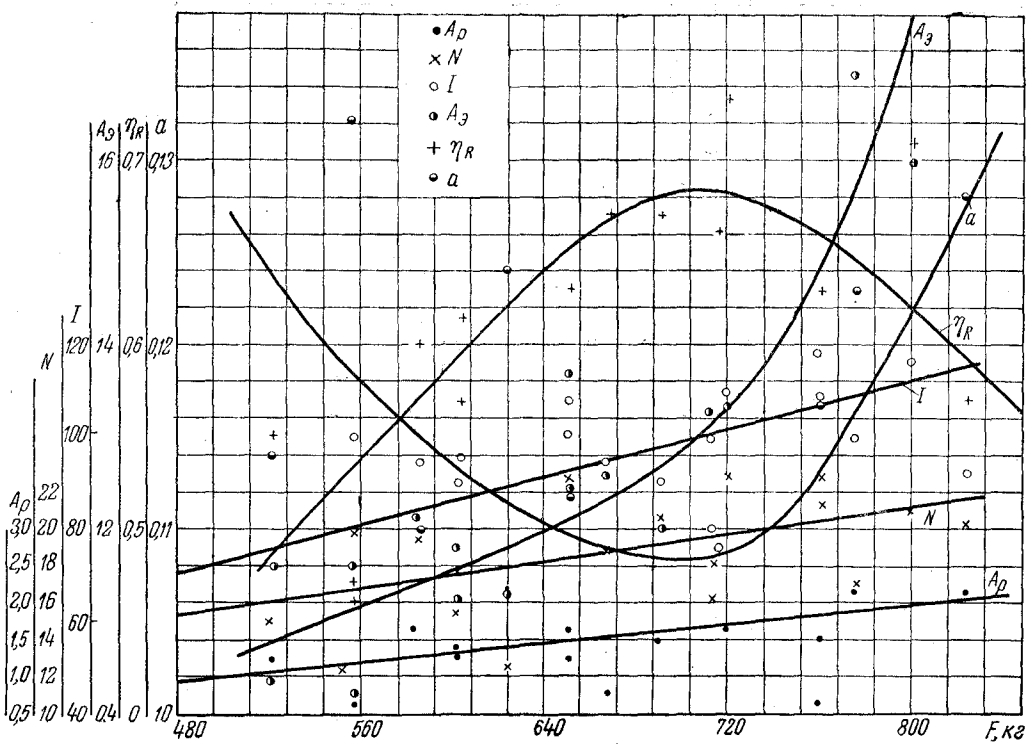


Рис. 3. Энергетические показатели при работе 10-тонного электровоза на сложном профиле пути на основных откаточных участках:

$A_р$ — потери энергии в реостатном сопротивлении, *квт-ч*; N — мощность двигателей электровоза, *квт*; I — ток двигателей электровоза, *а*; $A_э$ — потребляемая электровозом энергия, *квт-ч*; η_R — к. п. д. электровоза по производительности; a — удельный расход энергии, *квт-ч/ткм*

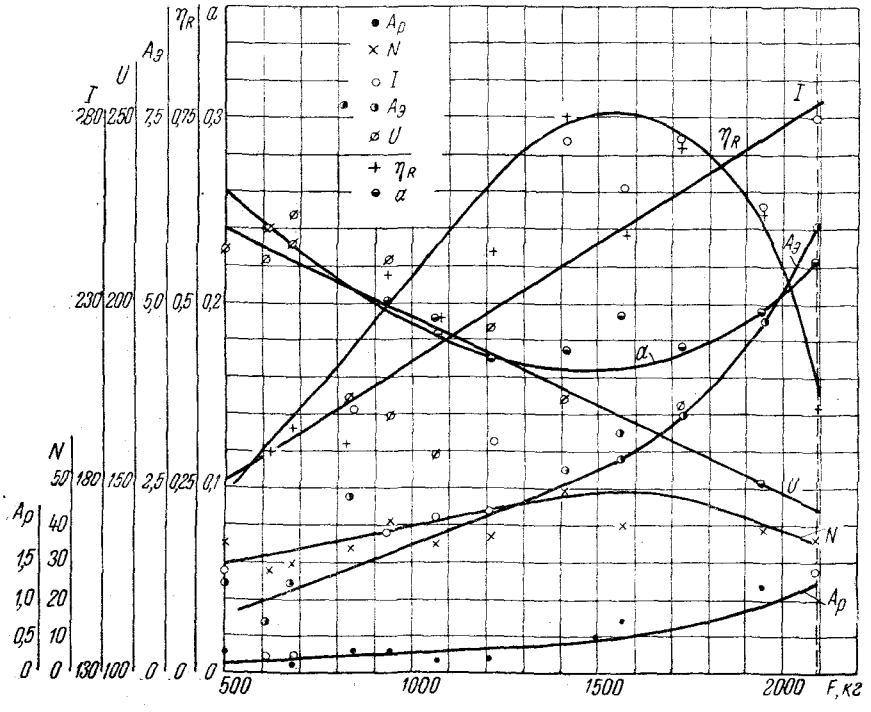


Рис. 4. Энергетические показатели при работе 10-тонного электровоза на руководящем подъеме за рейс:

A_p — потери энергии в реостатном сопротивлении, *квт-ч*; N — мощность двигателей электровоза, *квт*; I — ток двигателей электровоза, *а*; $A_э$ — потребляемая электровозом энергия, *квт-ч*; U — напряжение на клеммах двигателя, *в*; η_R — к. п. д. электровоза по производительности; a — удельный расход энергии, *квт-ч/ткм*

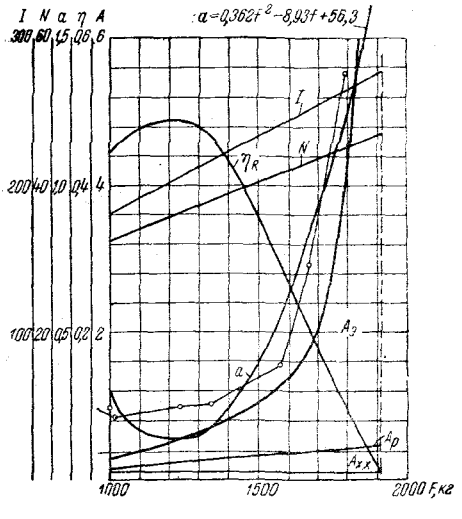


Рис. 5. Энергетические показатели 7-тонного электровоза на руководящем подъеме за рейс. Потери:

A_p — потери в реостатах, *квт-ч*; $A_{x.x}$ — потери на холостой ход электровоза, *квт-ч*; N — мощность двигателей электровоза, *квт*; I — ток двигателей электровоза, *а*; A — общий расход энергии электровоза, *квт-ч*; η — производительность электровоза, *ткм*; a — удельный расход энергии, *квт-ч/ткм*

параметры электровоза, соответствующие на графиках этой зоне, с энергетической точки зрения оптимальны. Значения N и I с ростом силы тяги F, как правило, изменяются по закону прямой, а $A_э$ и $A_р$ изменяются непропорционально изменениям F. Графики рис. 3—5 построены при большом разбросе точек, что свидетельствует о нестабильности условий работы подземной электротяги. Построение графиков по мгновенным величинам привело бы к еще большему разбросу точек. Это подтверждает правильность выбранного способа исследований по средним показателям.

Практически целесообразно иметь аналитическое выражение удельного расхода энергии a. С этой целью представляем a в виде суммы следующих ее составляющих: расхода на разгоны в пусковых периодах, потерь в реостатах при разгонах, на движение, на потери в реостатах при движении, на буксование и торможение. Затем все члены этих уравнений выражаем эмпирическими формулами в зависимости от полезного веса состава $Q_п$:

время при разгоне состава $t_{разг} = 10^{0,1+0,05Q_п}$, *сек*;
скорость буксования колес $v_б = 10^{-2,62+0,078Q_п}$, *м/сек*;
время движения состава . $t_{дв} = 10^{1+0,035Q_п}$, *сек* и т. д.

Однако подстановка их в общую формулу для a дает настолько громоздкое и сложное выражение, что продифференцировать его по $Q_п$ (для нахождения минимума) практически невозможно. Поэтому аналитическое выражение для a находим другим способом. По данным эксперимента, проведенного на руководящем подъеме $19‰$ длиной 100 *м* при обычном состоянии поверхности рельсов, строим график $a = f(F)$ (рис. 5).

Параболическим интерполированием кривой a по методу наименьших квадратов получим ту же кривую расчетным путем. Для удобства расчетов масштабы a и F увеличим в 10 раз и обозначим a через y, а F через x.

Пусть даны значения интерполируемой функции $y_1, y_2, \ldots, y_n$, соответствующие значениям аргумента $x_1, x_2, \ldots, x_n$, и требуется найти такую целую функцию $f(x) = a_0 + a_1x + \ldots + a_\lambda^\lambda x$ (λ не больше $n-1$), которая удовлетворяла бы условию наименьшего значения суммы

$$\sum_{i=1}^{i=n} [y_i - f(x_i)]^2.$$

Как известно [2], решение задачи параболического интерполирования по способу наименьших квадратов приводится к нахождению интерполяционного ряда Чебышева. Сумма первых членов этого ряда дает приближенное представление интерполируемой функции в виде целой функции степени λ, удовлетворяющей требованию наименьших квадратов. Так было найдено, что наиболее близко интерполируемой функции $a = f(F)$ (с минимальной среднеквадратичной ошибкой) отвечает уравнение

$$a = 0{,}362F^2 - 8{,}93F + 56{,}3. \qquad (5)$$

Для нахождения интересующего нас минимума кривой a берем первую производную по F

$$\frac{da}{dF} = 2 \cdot 0{,}362F - 8{,}93 = 0{,}724F - 8{,}93 = 0. \qquad (6)$$

Взяв вторую производную

$$\frac{d^2a}{dF^2} = 0{,}724 > 0,$$

убеждаемся в том, что найденная точка является минимумом.

Таким образом, из формулы (6)

$$F_{\text{опт}} = \frac{8{,}93}{0{,}724} = 1233 \text{ кг}.$$

Подсчитанная по этой формуле величина состава $Q_{\text{гр}}$ и число вагонеток в составе совпадают с экспериментальными данными.

Считая целесообразным частичное применение песка, имеющее место на практике, в дальнейшем в качестве расчетной оптимальной силы тяги принимаем $F_{\text{опт}} = 1550$ *кг*, полученное при исследованиях на затяжном руководящем подъеме длиной 500 *м*. Определим допустимую величину τ, исходя из нормированного значения $I_{\text{дл}}$ для двигателя ДК-801А,

$$\tau = \frac{I_{\text{дл}}}{I_{\text{опт. осн}}} = \frac{34}{48} = 0{,}71, \qquad (7)$$

где $I_{\text{опт. осн}}$ — оптимальное значение тока на основных откаточных участках, *а*.

Проведенный на шахтах ряда угольных и сланцевых бассейнов хронометраж показал, что значение τ находится в пределах 0,25 — 0,7. Чтобы электровоз работал с максимальной производительностью при $\tau < 0{,}71$, необходимо соответственно увеличить величину состава, исходя из тока $I_{\text{дл}} = \frac{34}{\tau}$:

τ	0,1	0,2	0,3	0,35	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$I_{\text{дл}}$	340	170	113,3	97	85	68	56,6	48,5	42,5	37,8	34

Как видно из приведенных данных, уже при $\tau = 0{,}35$ длительный ток достигает часового значения. За счет улучшения условий электроснабжения (увеличения мощности тяговых подстанций, уменьшения расстояния между ними, при хорошем состоянии рельсовой токоведущей цепи и т. д.), допуская более интенсивное применение песка, можно добиться работы электровоза с максимальной производительностью и при $\tau < 0{,}71$. Однако осуществление этих мероприятий, вызванное увеличением состава поезда, приведет к значительным капитальным затратам [3]. При этом неизбежно возникнет необходимость деления состава на части на руководящем подъеме. Следовательно, по всем показателям целесообразна работа электровоза с более эффективным использованием его во времени.

При нагрузке же электровоза на руководящем подъеме с применением песка могут быть допущены значения $I_{\text{рук}} = 1{,}5\, I_{\text{час}}$, а при пусках — кратковременные нагрузки $2\, I_{\text{час}}$. Чтобы кратковременные перегрузки на руководящем подъеме не привели к перегреву двигателей, при определении τ маневры на погрузочном и разгрузочном пунктах следует считать за время движения. Кроме того, в одном направлении на руководящем подъеме электровоз движется под уклон с выключенными двигателями.

Проведенные исследования по увеличению коэффициента сцепления ψ с применением песка показали положительный результат. Величина ψ была доведена до 0,55. При этом не был достигнут предел по сцеплению, так как из-за большой величины падения напряжения в тяговой сети двигатели электровоза останавливались. Предлагаемый способ

определения оптимальных показателей электровоза заключается в следующем.

1. Имея исходные данные $F_{I_{осн}} = 710$ *кг*, $I_{опт.\ осн} = 96$ *а* и $\tau = 0{,}71$, определяем средний вес состава

$$Q_{ср} = \frac{F_{I_{осн}}}{w_{ср}} - P,\ m, \tag{8}$$

где $w_{ср}$ — среднее удельное сопротивление движению состава, *кг/т*;

P — сцепной вес электровоза, *т*;

$F_{I_{осн}}$ — сила тяги электровоза, подсчитанная по формуле (1) для основных откаточных путей, *кг*.

Затем при известном типе вагонеток определяем $Q_{гр}$ и $Q_{пор}$.

2. Находим силу тяги электровоза на руководящем подъеме

$$F_{рук} = k_F F_{I_{осн}},\ кг. \tag{9}$$

3. Из условия $Q_{гр.\ осн} = Q_{гр.\ рук}$ определяем допустимую величину руководящего подъема

$$i_{рук} = \frac{F_{рук}}{P + Q_{гр}} - w_{гр},\ ‰, \tag{10}$$

где $w_{гр}$ — удельное сопротивление движению груженого состава, *кг/т*.

Если руководящий подъем превышает найденный по формуле (10), необходимо либо допускать работу двигателей электровоза с перегрузкой до 1,5 $I_{час}$, либо делить состав на части.

В общем случае расчет следует производить в следующей последовательности:

1) для заданной величины τ по формуле

$$I_{дл} = \frac{68}{\tau},\ а$$

находим длительно допустимый ток электровоза;

2) по формуле (1) определяем силу тяги $F_{I_{осн}}$, *кг*.

Затем в том же порядке находим $Q_{гр}$, $F_{рук}$ и $i_{рук}$.

Этот способ определения оптимальных энергетических параметров рудничного электровоза может быть распространен на шахты других бассейнов, имеющие аналогичные условия электроотка тки.

Выводы

1. На основании экспериментальных данных предложен уточненный метод определения среднеквадратичного тока тяговых двигателей.

2. Посредством анализа и математической обработки экспериментального материала определена оптимальная зона в энергетических характеристиках рудничного электровоза.

3. Найдено аналитическое выражение удельного расхода энергии в зависимости от силы тяги электровоза.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ренгевич А. А. Ограничения в применении электровозной откатки при различных профилях откаточных путей. «Вопросы рудничного транспорта», сб. статей. Углетехиздат, 1954.

2. Хотимский В. Выравнивание статистических рядов по методу наименьших квадратов. ВСНХ, 1925.

3. Рысьев А. В. Технико-экономический метод определения элементов подземной электровозной откатки. Зап. ЛГИ, 1950, т. XXIV.