

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РУДНИЧНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ В НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, И. О. Синчук, А. В. Омельченко

Государственное высшее учебное заведение «Криворожский национальный университет»
ул. XXII партсъезда, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина. E-mail: speet@ukr.net

Изложен анализ нагрузочных диаграмм тяговых двигателей рудничных электровозов при выполнении погрузочных работ и при движении по главным выработкам. Отмечено существенное различие тяговых нагрузок и характер нагрева тяговых двигателей при погрузочных работах и движении по магистральным выработкам. Определена интегральная кривая распределения токов нагрузки тяговых двигателей в зависимости от веса состава. Построены зависимости, позволяющие определить мощность тяговых двигателей по условию допустимого нагрева в неустановившихся режимах работы.

Ключевые слова: рудничный электровоз, режимы работы.

ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ РУДНИКОВИХ ЕЛЕКТРОВЗІВ У НЕСТАЛИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

О. М. Сінчук, Е. С. Гузов, І. О. Сінчук, О. В. Омельченко

Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет»
вул. XXII партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. E-mail: speet@ukr.net

Викладено аналіз діаграм навантажень тягових двигунів копальневих електровозів при виконанні завантажувальних робіт та під час руху по головних виробках. Відзначено істотну відмінність тягових навантажень і характер нагріву тягових двигунів при завантажувальних роботах та під час руху по магістральних виробках. Визначено інтегральну криву розподілу струмів навантаження тягових двигунів залежно від ваги составу. Побудовано залежності, що дозволяють визначити потужність тягових двигунів за умови допустимого нагріву в несталих режимах роботи.

Ключові слова: рудниковий електровоз, режими роботи.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. На подземных предприятиях Украины – шахтах, рудниках, при строительстве метрополитенов и других аналогичных производств – эксплуатируется более 4 тыс. электровозов [1]. При этом установленная мощность их тяговых электрических двигателей составляет около 300 МВт.

За последние 5–10 лет в Украине реализовались ранее не завершённые работы по разработке давно ожидаемых горно-металлургической промышленностью энергоэффективных тяговых электротехнических систем (ТЭТС) для рудничных видов электровозов [2]. Одной из слагаемых в определении уровня энергоэффективности ТЭТС является правильный выбор мощности тяговых электрических двигателей (ТЭД).

Выбор реально необходимой мощности тяговых электрических двигателей является проблемой не новой, но далеко не полностью решённой. Особенно остро эта проблема стоит перед разработчиками ТЭД рудничных электровозов в силу специфических условий их эксплуатации.

Имеющиеся исследования в анализируемой проблеме в немалой степени определили направление дальнейших исследований, хотя полностью не дают определяющих методологий по выбору мощности ТЭД.

Целью исследования является оценка ожидаемых электрических нагрузок для выбора мощности ТЭД.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ нагрузочных диаграмм тяговых электрических двигателей. Организация электровозной откатки в горнорудных шахтах разграничивает работу электровоза в течение рейса на четыре вида операций: погрузочные операции в ортах, движение груженого состава к рудничному двору, разгрузка состава в руднич-

ном дворе, движение порожнего состава на участок. При анализе режимов работы тяговых двигателей операции, характеризующиеся однотипностью, такие, как, например, погрузка в ортах и разгрузка состава в рудничном дворе, а также движение груженого и порожнего состава, целесообразно рассматривать совместно.

Погрузочные операции в ортах состоят в перестановке вагонеток под люками, а также проезда по орту к люкам, заполненным рудой. При существующей технологии погрузки руды вагонетку для полной загрузки приходится переставлять дважды. Состояние рельсовых путей в ортах значительно хуже, чем на откаточных выработках, т.к. при погрузке часть руды рассыпается, создавая дополнительное сопротивление движению.

Из приведенных диаграмм (рис. 1) видно, что при выполнении однотипных операций, состоящих в перестановке состава под люками, форма графика нагрузки получается весьма различной. Однако нагрузочные диаграммы все же дают возможность получить количественную и качественную оценку рассматриваемых операций.

В процессе пуска движение состава начинается только при токах 150–180 А, когда момент, развиваемый тяговыми двигателями, оказывается достаточным для перемещения состава со скоростью порядка 0,2 м/с. Тяговые двигатели работают в неустановившемся режиме, на реостатных позициях с пикообразным изменением тока, что в сочетании с низкой скоростью движения проходит в тяжелых условиях с точки зрения нагрева тяговых двигателей. При этом развивается мощность около 4 кВт при напряжении на зажимах двигателя порядка 20–30 В.

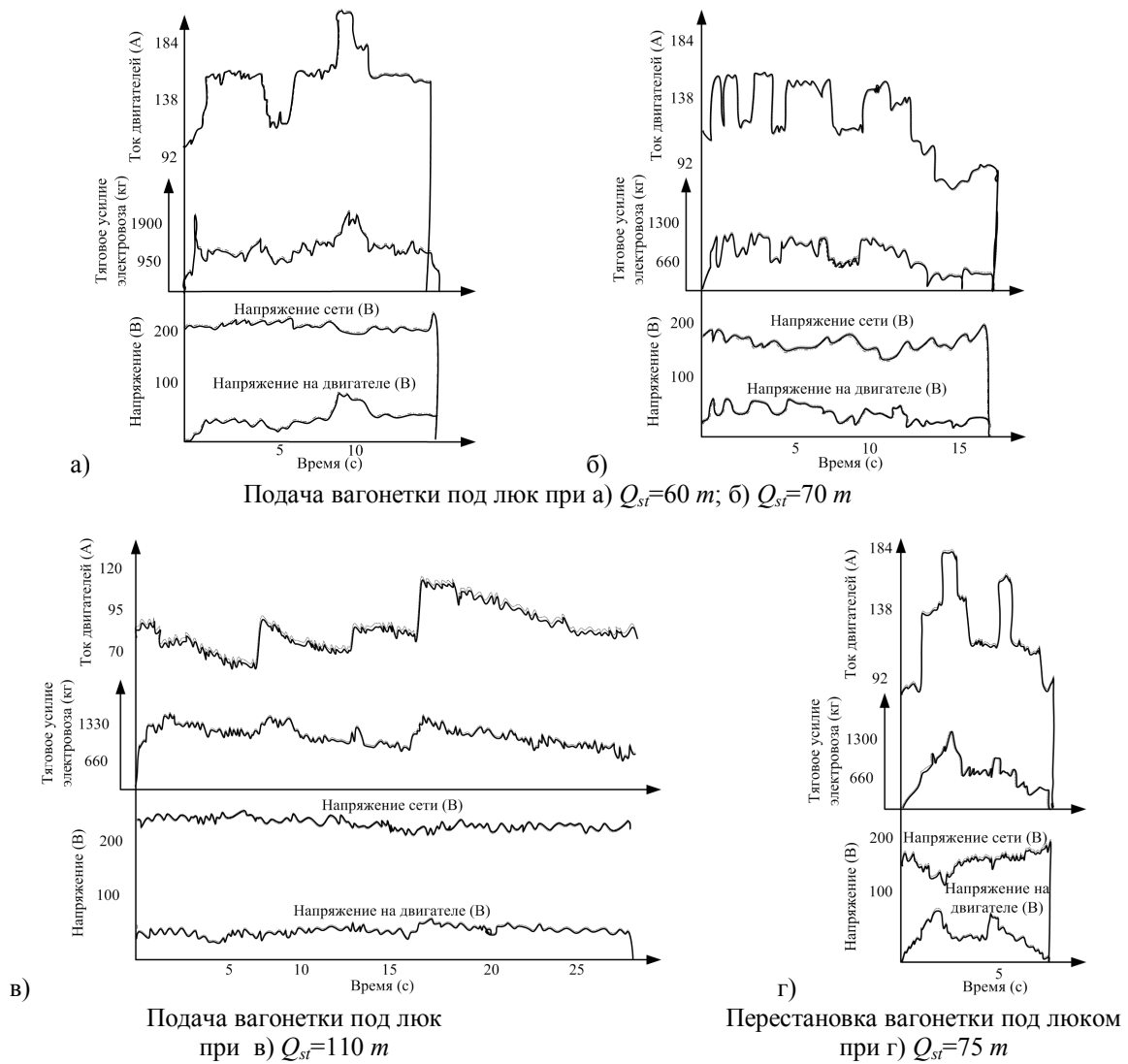


Рисунок 1 – Нагрузочные диаграммы электровоза К14 при погрузочных работах

Таким образом, в период погрузки на участке и подаче вагонеток в опрокидыватель двигатель развивает незначительную мощность и большой вращающийся момент. Толчки тока сказываются на быстром «старении» изоляции вследствие больших потерь, идущих на нагрев обмоток двигателя, работающего в период погрузки и разгрузки в условиях, близких к режиму короткого замыкания.

Нагрузочные диаграммы при движении груженых и порожних составов как в пусковом, так и ходовом режиме, по результатам экспериментальных рейсов, значительно отличаются от расчетных, построенных по методу постоянных ускорений или установившихся скоростей.

Движение составов по главным выработкам происходит со скоростью 2–2,5 м/с, что вдвое ниже скорости, соответствующей движению на естественной характеристике, т.е. работа на параллельном соединении тяговых двигателей носит эпизодический характер и длится не более 0,1 времени рейса. Это обстоятельство подтверждает отсутствие установившихся режимов работы тяговых двигателей. Таким образом, в период движения груженых и порожних составов тяговые двигатели работают в основном на переход-

ных режимах, вследствие чего нагрузочная диаграмма представляет собой чередование периодов нагрузки с широкими пределами изменения тока и периодов пауз. Установившееся значение тока можно наблюдать лишь в отдельные моменты времени, соответствующие езде на последовательно соединенных тяговых двигателях (позиции пять и восемь соответственно для электровозов 10КР и 14КР), поэтому тяговые расчеты при любом типе тягового электропривода (ТЭП) рудничных электровозов должны производиться, исходя из неустановившихся режимов работы двигателей электровоза.

При этом следует понимать, что сила тяги электровоза обусловлена, с одной стороны, моментом вращения тяговых двигателей, а с другой – сцеплением колес электровоза с рельсами. При использовании основного уравнения движения подразумевается, что момент вращения тяговых двигателей целиком реализуется только на полезную силу тяги, обуславливающую лишь поступательное движение состава.

Однако на работе тяговых двигателей сказываются колебания напряжения контактной сети, изменение величины уклонов и коэффициента сцепления, искусственные ограничения скорости и др. Все

это вызывает толчки подвижного состава, буксование полускатов электровоза, работу тяговых двигателей в неэкономичных энергетических режимах.

Определение мощности тяговых двигателей. Как показывают исследования, значительная часть выпускаемых тяговых двигателей для рудничных электровозов в силу ряда причин не обладает достаточной эксплуатационной надежностью. Они разработаны с целью максимального снижения затрат при изготовлении, но без необходимого учета затрат при эксплуатации. Об этом убедительно говорят статистические данные о ремонтах тяговых двигателей. Как показывает опыт, выход из строя тяговых двигателей ДТН-45 во многом зависит не от исполнения двигателей или класса изоляции, а определяется, главным образом, относительной тепловой напряженностью активных частей, т.е. разницей между фактически установленным уровнем нагрева активных частей и предельно допустимым. Это объясняется тем, что при проектировании электродвигателей недостаточно учитываются реальные режимы работы, значительно отличающиеся от тех, которые могут быть искусственно созданы в лабораториях при исследовании и испытании двигателей на заводах – изготовителях этих ТЭД.

Нагрузочные диаграммы, снятые в шахтах Криворожского железорудного бассейна, показывают, что работа тяговых двигателей характеризуется значительными перегрузками и высокой загрузкой в периоды напряженной работы в конце смены. Пользование установившимися режимами движения при выборе мощности тяговых двигателей приводит к тому, что результаты расчетов значительно отличаются от действительного потребления.

Необходимо отметить, что даже самый совершенный метод расчета не может обеспечить полного соответствия расчетных и действительных нагрузок при работе двигателя. Это вытекает из самого существа постановки задачи – определения реально необходимой мощности ТЭД. Однако на основе анализа экспериментального материала и индивидуальных особенностей производства уменьшить дистанцию между расчетными и действительными нагрузками можно и необходимо.

Для этого при выборе мощности тяговых двигателей необходимо пользоваться интегральной кривой распределения, т.к. она дает возможность определить максимальную, расчетную и среднюю нагрузку, а также продолжительность и частоту появления отдельных значений нагрузок, т.е. параметры, позволяющие предопределить тепловое состояние двигателя во время работы.

Таким образом, расчетное значение нагрузочного тока может быть представлено в виде следующего равенства:

$$I_r = \bar{I} + \beta \bar{\sigma}, \quad (1)$$

где I_r – расчетное значение нагрузочного тока, определяется, исходя из грузоподъемности поезда с учетом влияния второстепенных факторов.

Для практического использования приведенной формулы необходимо знать всего лишь два пара-

метра: генеральную среднюю нагрузку \bar{I} и генеральную дисперсию $\bar{\sigma}$, методы оценки которых достаточно разработаны в математической статистике [3].

Величина β является как бы мерилем эквивалентирования расчетного значения тока с действительным для различных режимов работы.

Следует отметить, что, выбирая мощность тягового двигателя по формуле

$$P = U \cdot I_r, \text{ кВт}, \quad (2)$$

необходимо учитывать, что I_r является основным параметром, поскольку уровень напряжения всегда задается.

На рис. 2 приведено значение генеральной средней нагрузки \bar{I} в зависимости от грузоподъемности поезда Q_p для периодов движения и погрузочно-разгрузочных операций, полученное в результате статистической обработки рейсовых графиков нагрузки. Положение экспериментальных точек на рис. 2 позволяет предположить наличие линейной зависимости вида

$$\bar{I} = aQ_p + b. \quad (3)$$

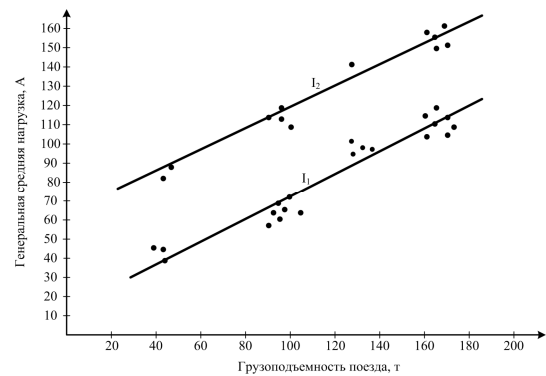


Рисунок 2 – Зависимость генеральной средней нагрузки тяговых двигателей I от веса электровозосостава Q_p

Предположение о линейной зависимости также подтверждается электромеханическими характеристиками тяговых двигателей, где ток и тяговое усилие, зависящее от веса поезда, имеют линейную зависимость. Поскольку в расчетной практике при определении генеральной средней загрузки \bar{I} удобнее пользоваться формулами, а не графиками, из опыта по методу наименьших квадратов находим параметры a и b линейной функции. В результате предложены следующие подходы для определения:

– периода движения

$$\bar{I}_1 = 0,51Q_p + 10; \quad (4)$$

– погрузочно-разгрузочных операций

$$\bar{I}_2 = 0,49Q_p + 56. \quad (5)$$

Таким образом, мощность двигателя, выбранная с учетом генеральной средней нагрузки, отражает реализацию фактических тяговых усилий в период движения по главным транспортным выработкам, а

также при перестановках состава во время выполнения погрузочно-разгрузочных работ.

Дальнейшая проверка на нагревание по методу среднеквадратичного тока не может служить гарантией того, что в отдельные моменты двигатель не перегреется, т.к. эквивалентный ток определяет лишь среднее превышение температуры в течение заданного времени.

Чтобы учесть характер протекания тепловых процессов в неустановившихся режимах работы, в обмотки главных и дополнительных полюсов тяговых двигателей типа ДТН-45 были заложены термометры и в условиях шахты сняты характеристики изменения температуры двигателя в течение рейса и смены.

Как показали результаты эксперимента, изменение температуры значительно отличается от экспоненциального и, следовательно, от результатов обычно применяемой методики проверки мощности двигателя по условиям допустимой температуры нагрева.

При расчете мощности тяговых двигателей по условиям нагрева исходили из двух независимых требований – допустимой величины максимальной кратковременной температуры, подлежащей нормированию для изоляции данного класса, и допустимого длительного превышения температуры.

Согласно этим требованиям, применительно к работе тяговых двигателей различаются мощности, соответствующие двум режимам работы – часовому и длительному.

При определении длительного тока при переменной нагрузке естественно требовать, чтобы он выражался через параметры распределения \bar{I} и $\bar{\sigma}$ и, вызывая перегрев двигателя, был эквивалентен действительному току. Для этого было исследовано превышение температуры нагрева обмоток двигателя при реализации действительного, упорядоченного и усредненного графиков нагрузки (результаты приведены на рис. 3). Из рисунка видно, что перегрев двигателя при реализации действительного графика нагрузки занимает промежуточное положение между усредненным графиком (генеральной средней нагрузкой \bar{I}) и упорядоченной диаграммой при расположении всех ступеней нагрузки во времени в порядке их убывания. Это говорит о том, что в усредненном графике вся совокупность действующих нагрузок, представленная средней величиной, не учитывает кратковременных перегрузок, вызывающих заметное превышение температуры.

Сложность протекания тепловых процессов в тяговых двигателях обусловлена случайным чередованием всех ступеней нагрузки в реальных условиях работы. Поэтому упорядоченная диаграмма с расположением ступеней нагрузки в порядке их возрастания или убывания также не может характеризовать истинный перегрев двигателя, т.к. вероятность такого расположения ступеней ничтожно мала.

Совпадение действительного и усредненного графиков нагрузки может быть достигнуто путем прибавления дополнительной нагрузки; выраженной слагаемым $\beta\bar{\sigma}$ в (1). Поскольку $\bar{\sigma}$ является величиной, устойчивой для данного распределения, то

наиболее приемлемым условием прибавления дополнительной нагрузки является правильный выбор величины. Исходя из опытных данных, совпадение кривых нагрева осуществляется при $\beta = 0,5$. В результате для определения длительного тока тягового двигателя предложено выражение

$$I_{dl} = \bar{I}_1 + 0,5\bar{\sigma}_1, \quad (6)$$

где \bar{I}_1 – генеральная средняя нагрузка для периода движения, определяется по (4); σ_1 – среднее квадратичное отклонение; $\beta=0,5$ – величина доверительного интервала, соответствующая эквивалентному нагреву при реализации действительного и усредненного графиков нагрузки.

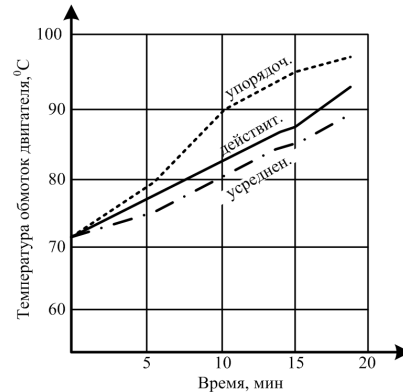


Рисунок 3 – Превышение температуры обмоток двигателя ДТН-45 при реализации действительного, упорядоченного и усредненного графиков нагрузки

Часовую мощность двигателя можно определить из требования того, чтобы максимальная эксплуатационная температура обмотки даже кратковременно не превышала допустимого верхнего предела $Q_{max} = 120^0C$. Такой режим соответствует движению с грузом на подъем, а также погрузочным операциям в ортах и подчиняется нормальному закону распределения вероятностей. Каким же должно быть значение β при определении величины часового тока? Согласно нормальному закону распределения, вероятность того, что нагрузка будет находиться в пределах $\bar{I}_2 \pm \beta\bar{\sigma}_2$, составляет для $\beta = 0,1; 2,0; 2,5; 3,0$ соответственно 0,68; 0,95; 0,99; 0,997.

Ввиду симметрии кривой распределения, вероятность противоположного события, т.е. того, что нагрузка превысит $\bar{I}_2 \pm \beta\bar{\sigma}_2$, будет равна соответственно:

$$\frac{1-0,68}{2} = 0,16; \quad \frac{1-0,95}{2} = 0,025; \quad \frac{1-0,99}{2} = 0,005; \\ \frac{1-0,997}{2} = 0,0015.$$

В математической статистике обычно принимается $\beta = 3,0$. В рассматриваемом случае считаем возможным ограничиться величиной $\beta = 2,0$ по следующим причинам.

Имеется два температурных уровня, на которых один для наших условий, равный 1050 °C, определяет допустимое превышение температуры и другой, равный 1200 °C, определяет предельную температу-

ру нагрєва. Температура, пєвышаясь от первого уровня, достигаєт своего максимума (второго уровня), как показали результаты проведенных испытаний, через промежуток времени, равный $(0,16-0,17) T_h$ времени часового режима. Таким образом, относительная продолжительность воздействия максимальной температуры на изоляцию, следовательно, ее вероятность равна $0,165-0,026=0,0042$, или 15 с, в течение часа. Это означает, что, принимая $\beta = 2,0$ по нагрузке; приближаемся к $\beta=3,0$ по температуре. В результате определение тока часового режима производится как

$$I_h = \bar{I}_2 + 2,0\bar{\sigma}_2, \quad (7)$$

где \bar{I}_2 – генеральная средняя нагрузка, характеризующая режим погрузочных операций и определяющаяся по (5); $\bar{\sigma}_2$ – среднее квадратическое отклонение.

Часовая (номинальная) мощность двигателя определяется из известного выражения

$$P_h = I_h U. \quad (8)$$

Таким образом, интегральная кривая распределения и зависимость генеральной средней нагрузки от веса поезда $\bar{I} = f(Q_p)$ могут быть использованы как при проектировании нового типа электровоза, так и для выбора величины состава для заданного типа электровоза и мощности его тяговых двигателей.

В первом случае для конкретных условий производства на основе технико-экономического сравнения вариантов движения задается рациональный вес состава. Согласно этому весу, из рис. 1 или по (4),

(5) определяется генеральная средняя нагрузка \bar{I} , а по ней, пользуясь интегральной кривой распределения, можно установить весь диапазон нагрузок, выявить частоту их появления, определить максимум данной продолжительности и частоты – т.е. величины, необходимые для определения мощности тяговых двигателей.

Во втором случае для заданного электровоза по паспортным данным находим длительный ток двигателя и из (6) определяем значение генеральной средней нагрузки, которая дает основание, пользуясь зависимостью $\bar{I} = f(Q_p)$, из рис. 1 определить допустимый вес состава.

ВЫВОДЫ. Определены характеристики интегральной кривой распределения тока нагрузки тяговых двигателей в функции веса состава, которые позволяют определить мощность тяговых двигателей по заданному весу состава или наоборот – вес состава по заданной мощности двигателей по условию допустимого нагрева тяговых двигателей в реальных условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Синчук О.Н. К вопросу управления тяговой нагрузкой рудничных электровозов // Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 1985. – № 3. – С. 92–95.
2. Оат Г.П. Исследование нагрузок тяговых двигателей электровозов горнорудных шахт: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Кривой Рог, 1962. – 19 с.
3. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1989. – 365 с.

DETERMINATION OF POWER OF HAULING ENGINES OF MINE ELECTRIC LOCOMOTIVES IS IN THE UNSET OFFICE HOURS

O. Sinchuk, E. Guzov, I. Sinchuk, A. Omelchenko

State Higher Educational Institution «Kryvyi Rih National University»
ul. 22 Partsyezda, 11, Krivoy Rog, 50027, Ukraine. E-mail: speet@ukr.net

The analysis of loadings diagrams of hauling engines of mine electric locomotives is expounded at implementation of stevedorages and at motion on mainwaies. Substantial distinction of the hauling loadings and character of heating of hauling engines is marked at stevedorages and motion on the main making. An integral distribution of currents of loading of hauling engines curve is certain depending on weight of composition. Dependences, allowing to define power of hauling engines on the condition of the possible heating in the unset office hours, are built.

Key words: mine electric locomotive, office hours.

REFERENCES

1. Sinchuk O.N. To the question of management the hauling loading of mine electric locomotives // *News of high schools. Electromechanics*. – 1985. – № 3. – PP. 92–95. [in Russian]
2. Oat G.P. *Research of loadings of hauling engines of electric locomotives of mining mines: abstract of the thesis of dissertation on the competition of graduate degree of candidate of engineering sciences*. – Krivoy Rog, 1962. – 19 p. [in Russian]
3. Ventcel E.S., Ovcharov L.A. *Theory of chances*. – М.: Nauka, 1989. – 365 p. [in Russian]

Стаття надійшла 16.05.2012.
Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Чорним О.П.