

УДК 622.625.28-83

О.Н. Синчук, д-р техн. наук,  
Э.С. Гузов, канд. техн. наук,  
А.В. Омельченко, Е.И. Скапа, В.О. Черная

### ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РУДНИЧНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

*Аннотация.* Приведены результаты исследований по обоснованию и разработке предложений методики расчета электрических нагрузок тяговых электрических двигателей двухосных (рудничных) электровозов. Изложены экспериментальные данные для практических расчетов.

*Ключевые слова:* электрические нагрузки, тяговые электрические двигатели, рудничный электровоз.

O.N. Sinchuk, ScD,  
E.S. Guzov, PhD,  
A.V. Omelchenko, E.I. Skapa, V.O. Cherna

### PROBABILISTIC-STATISTICAL METHOD OF CALCULATION OF ELECTRIC LOADINGS OF HAULING ENGINES OF MINE ELECTRIC LOCOMOTIVES

*Abstract.* In the article the results of researches are resulted on a ground and development of suggestions of method of calculation of the electric loadings of hauling electric engines of dvoosnykh (mine) electric locomotives. Experimental information is expounded for practical calculations.

*Keywords:* electric loadings, hauling electric engines, mine electric locomotive.

О.М. Сінчук, д-р техн. наук,  
Е.С. Гузов, канд. техн. наук,  
О.В. Омельченко, Є.І. Скапа, В.О. Чорна

### ЙМОВІРНОСНО-СТАТИСТИЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ РУДНИКОВИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

*Анотація.* Наведено результати досліджень щодо обґрунтування і розробки пропозицій методики розрахунку електричних навантажень тягових електричних двигунів двовісних (рудникових) електровозів. Викладено експериментальні дані для практичних розрахунків.

*Ключові слова:* електричні навантаження, тягові електричні двигуни, рудниковий електровоз.

**Введение.** Основным видом транспорта на горных и других предприятиях с технологиями подземного ведения работ является электровозный.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** В эксплуатируемых на отечественных шахтах в более чем 4 тысяч электровозов используется 8 тысяч тяговых электрических двигателей (ТЭД) постоянного тока мощностью 15–45 кВт. В последние 5–10 лет межремонтные сроки эксплуатации этих двигателей снизились до катастрофических значений: 2–4 месяца [1]. Причиной такого явления являются жесткие условия эксплуатации ТЭД и недостаточный учет этих факторов в методах оценки и расчета их электрических нагрузок [2].

Наиболее реальными методами расчетов нагрузок электроприводов являются методы, основанные на непосредственном изучении

их режима работы и графиков нагрузки. Эти методы рекомендуются для тех электроприводов, графики нагрузки которых, как правило, неизвестны и могут меняться во времени в широких пределах. К таким электроприемникам, работающим в неустановившихся режимах, относятся и тяговые электроприводы рудничных электровозов.

Общая теория нагрузок электроприемников с переменным графиком нагрузки должна: дать анализ, исходящий из возможно меньшего числа допущений, количественных и качественных соотношений, имеющих место в реальных условиях работы двигателей;

выявить те параметры, которые требуются при расчете нагрузок тяговых двигателей, и которые подлежат экспериментальному определению в действующих установках;

в конечном итоге дать обоснованную методику для выбора мощности тяговых двигателей с последующей проверкой их на нагревание.

© Синчук О.Н., Гузов Э.С., Омельченко А.В., Скапа Е.И., Черная В.О., 2012

### Анализ исследований и публикаций

В отечественной литературе имеется ряд работ по исследуемому вопросу [2,3,4]. В частности, в [3] на основе анализа работы действующих тяговых электроприводов рудничных электровозов ставится задача и приводятся пути ее решения для повышения эксплуатационной надежности. Однако теория, отвечающая природе поставленных выше задач, все еще недостаточна, и полученные в известных публикациях практические результаты могут быть применены лишь для частных случаев [4].

**Цель исследований.** Обоснование и разработка предложений по выбору метода расчета электрических нагрузок тяговых двигателей рудничных электровозов.

**Изложение материала и результаты исследований.** Анализируя нагрузочные осциллограммы рейсовой работы рудничных электровозов, полученные в одних и тех же условиях, можно утверждать, что изменения нагрузки тяговых двигателей протекают каждый раз по-иному и никогда не идентичны по своему виду [3]. В связи с этим нагрузочную диаграмму каждого рейса можно рассматривать как случайное явление, присущее только данному опыту.

Пользуясь существующими методами тяговых расчетов, определяем элементы движения для трапецеидальной диаграммы скорости (как наиболее распространенной) и строим теоретическую нагрузочную диаграмму тяговых двигателей, которая представлена на рис. 1.

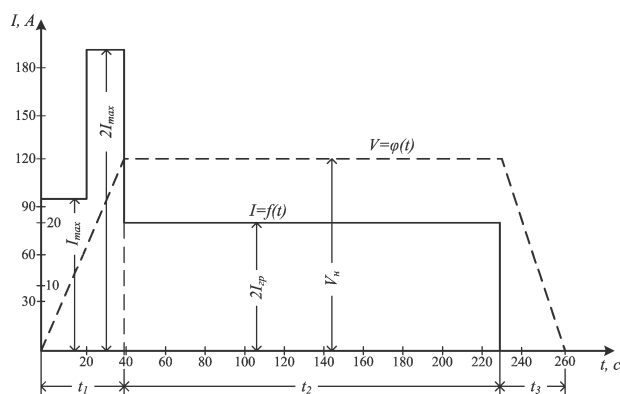


Рис. 1. Диаграмма скорости  $V=\varphi(t)$  и соответствующая ей нагрузочная диаграмма  $I=f(t)$  тяговых двигателей

Эта нагрузочная диаграмма определяется условиями расчета: разгон поезда при двухступенчатом пуске тяговых двигателей с постоянной величиной ускорения, установившимся режимом в период движения и реализацией тягового усилия на полезное перемещение состава. Фактическая нагрузочная диаграмма указанного рейса неизбежно отличается от теоретической за счет совокупного влияния многих факторов. Среди этих факторов можно, например, назвать: тяжелые условия пуска, замедляющие процесс разгона, буксование колес электровоза, нестабильность величины коэффициента сцепления, изменение сопротивления обмоток тягового двигателя с нагревом, влияние других работающих электровозов на режим двигателя, точность выполнения машинистом заданной диаграммы скорости, колебания напряжения контактной сети, искусственное ограничение скорости, изменение сопротивления движению, паразитные движения состава и др. Результаты повторных рейсов, совершаемых по этому маршруту, отличаются один от другого: меняются чередования и длительности отдельных периодов нагрузки и пауз, изменяется вид нагрузочной диаграммы для фиксированных промежутков времени, изменяется скорость движения на отдельных участках пути. Эти изменения являются случайными и связаны с влиянием указанных выше факторов.

В качестве примера рассмотрим осциллограммы тока и напряжения двигателей электровоза К14 с составом из 7 вагонеток в течение рейса на горизонте 1320 м шахты «Родина» (рис. 2).

Приведенные нагрузочные диаграммы показывают, что постоянно происходят случайные вариации, неодинаковые результаты последовательности экспериментов, хотя основные условия остаются неизменными. Эти вариации всегда связаны с наличием второстепенных факторов, влияющих на ход опыта, но не заданных в числе его основных условий. Основные условия опыта: грузоподъемность состава и уклон рельсового пути, определяющие в общих чертах его протекание, сохраняются неизменными; второстепенные, к которым относятся перечисленные

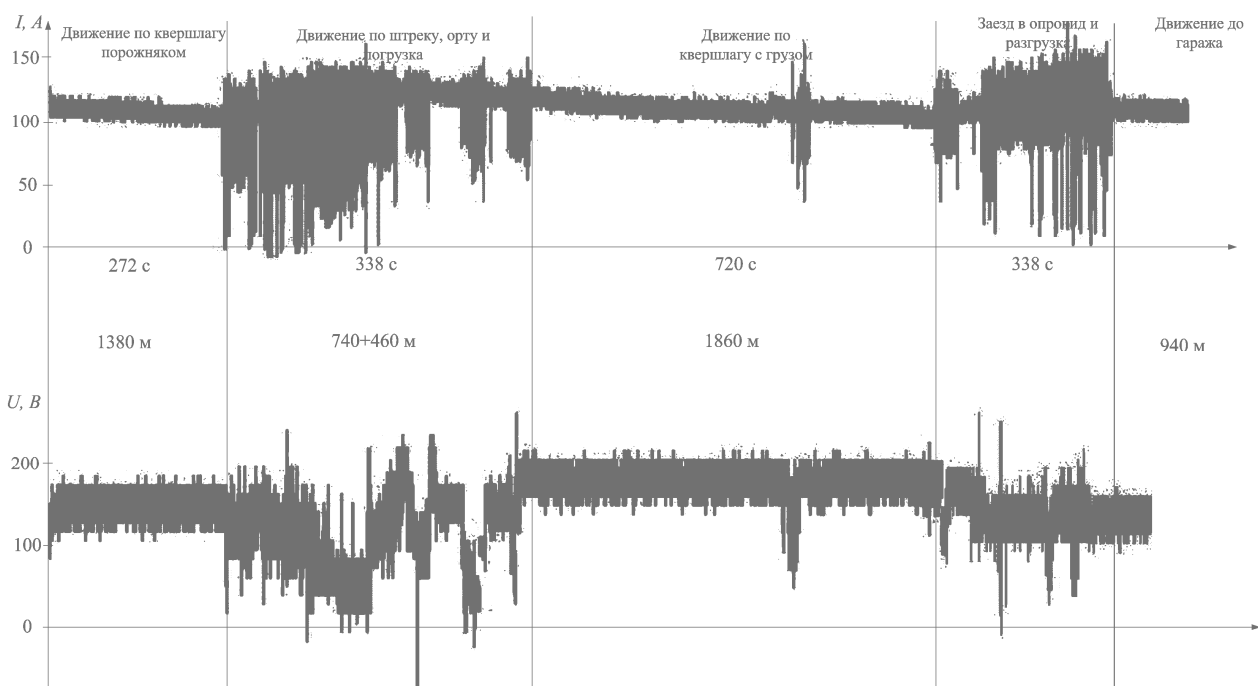


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения двигателей электровоза К14 с составом из 7 вагонеток в течение рейса на горизонте 1320м шахты «Родина»

ниже факторы, меняются от опыта к опыту и вносят случайные различия в их результаты.

Случайные отклонения неизбежно сопутствуют любому закономерному явлению. Тем не менее, в ряде практических задач этими случайными элементами пренебрегают. Например, в ряде известных методов тяговых расчетов вместо реальных условий движения рассматривается его упрощенная схема и предполагается, что в данных условиях движение поезда протекает вполне определенным образом. Это, в свою очередь, вносит заметную условность в определение элементов движения и построение нагрузочной диаграммы, которая являясь основанием для проверки мощности тяговых двигателей по условиям нагрева, не учитывает множества факторов, влияющих на нагрев двигателя.

Таким образом, сопоставление рейсовых осциллограмм, полученных в одинаковых условиях опыта, показывает, что случайные факторы в процессе движения электровоза играют заметную роль, а влияние их столь сложно, что применение классических методов исследования себя не оправдывает.

В связи с этим целесообразно отказаться от применяемого при изучении неустано-

вившихся процессов решения системы линейных дифференциальных уравнений, выражающих состояние электрической цепи и удовлетворяющих определенным начальным условиям, так как определение постоянных интегрирования по начальным условиям оказывается очень громоздким, а в ряде случаев просто невозможным.

Следовательно, необходимо исследовать природу случайных возмущений, воздействующих на систему и придающих нагрузочной диаграмме элемент неопределенности. Практика показывает, что статистические закономерности случайных явлений проявляются только при многократном наблюдении рассматриваемых явлений, которые могут наблюдаться в процессе работы неограниченное число раз, т.е. при массовых случайных явлениях [3].

Закономерности, проявляющиеся в этой массе, оказываются практически независимыми от индивидуальных особенностей отдельных случайных явлений, входящих в массу. Эти отдельные особенности в массе как бы взаимно поглощаются, нивелируются, и средний результат массы случайных явлений оказывается уже не случайным. Именно

это многократно подтвержденная опытом устойчивость массовых случайных явлений и служит базой для применения вероятностных (статистических) методов исследования нагрузок тяговых двигателей.

Как известно, любое техническое приращение теории вероятностей должно исходить из некоторой обоснованной стохастической схемы рассматриваемого явления. Обычно в качестве такой схемы применяют изменение нагрузки за законченный технологический цикл производства, например, рабочую смену, сутки. Учитывая циклическую работу рудничных электровозов, изменение нагрузки тяговых двигателей будем рассматривать за время одного рабочего рейса.

Форма графика нагрузки любой операции рейса определяется многообразным сочетанием большого количества факторов. К ним относятся: грузоподъемность составов  $Q_{II}$ , уклоны откаточных путей  $i$ , режим питания контактной сети  $U$ , скорость движения электровозов  $v$ , коэффициент сцепления  $\psi$ , состояние рельсовых путей  $\zeta$  и др.

Таким образом, ток можно представить как функцию нескольких аргументов:

$$I = f(Q_{II}, i, U, v, \psi, \zeta).$$

Многочисленные исследования графиков нагрузки показали, что для тяговых двигателей, работающих в одинаковых условиях, степень влияния этих факторов весьма различна.

Поэтому на фактически наблюдающуюся нагрузку тяговых двигателей можно смотреть как на реализацию случайного процесса.

Известно, что под случайным процессом понимают случайную величину или случайный вектор, зависящий от одного или нескольких непрерывно меняющихся параметров [3]. Рассмотрим ток, потребляемый тяговым двигателем в течение рейса как функцию времени  $I = f(t)$  и разобьем график нагрузки на интервалы такой деятельности, при которой происходит незначительное изменение тока. Пронумеруем эти интервалы времени и обозначим через величину тока на  $k$ -м участке  $I_k$ . Для каждого интервала по-

требляемый ток представляет собой случайную величину, так как он зависит от того, как и какие независимые факторы влияют на реализацию тягового усилия.

Поэтому за различные промежутки одинаковой длительности в одном из них происходит резкий подъем, а в другом, при очень спокойном на большей части промежутка потреблении тока, несколько раз возникают кратковременные спады или броски. Следовательно, фактическую нагрузку тяговых двигателей можно представить как совокупность значений тока в соответствующих интервалах.

Анализируя графики нагрузки повторных рейсов, проведенных в одинаковых условиях опыта, можно видеть, что даже в том случае, когда двигатель имеет достаточно строгие циклы работы при движении к рудничному двору и достаточно строгую повторяемость операций в период загрузки состава на участке в потреблении тока случайное начало весьма значительно.

Рост тяговых усилий по мере загрузки состава, изменение сопротивления движению при просыпании руды, резкие падения напряжения при погрузке, изменение коэффициента сцепления на отдельных участках пути, неустановившиеся режимы движения и другие факторы изменяют как мгновенное потребление тока, так и длительность отдельных операций. Точный учет этих факторов невозможен из-за их случайного характера.

В результате этого ток  $I_k$  мы должны считать непрерывной случайной величиной, для которой нельзя заранее предсказать, какое она примет значение. Однако можно с большой уверенностью указать пределы, в которых будет заключаться каждая из этих ординат.

Для этого составляются упорядоченные диаграммы, представляющие собой преобразованный график нагрузки  $I = f(t)$  за время рейса с ординатами, расположенными в порядке их убывания. Вид графика нагрузки  $I = f(t)$  неизбежно меняется в силу самой его природы, однако упорядоченная диаграмма графика остается стабильной (рис. 3).

Свойства упорядоченных диаграммы можно объяснить с помощью теории вероятностей, которая позволяет проникнуть в физическую сущность картины взаимного положения меняющихся нагрузок, оставляя в стороне индивидуальную роль отдельных факторов, влияющих на график нагрузки. Относительная продолжительность  $t_k/t_T$  нагрузки  $I = I_k$  может рассматриваться при ступенчатом графике как вероятность  $P_k$  равенства  $I = I_k$ :

$$P_k = P(I = I_k) = t_k/t_T,$$

где  $t_k$  – продолжительность действия данной нагрузки,  $t_T$  – длительность работы под нагрузкой.

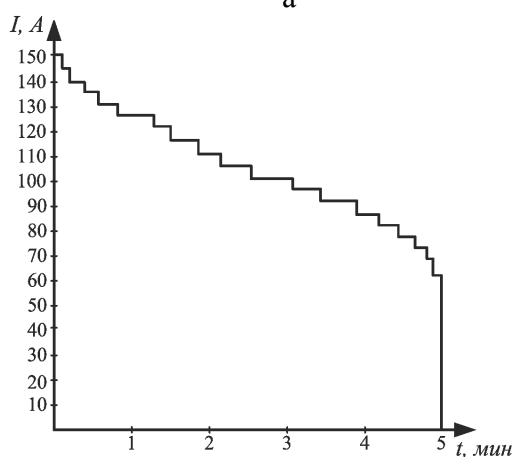
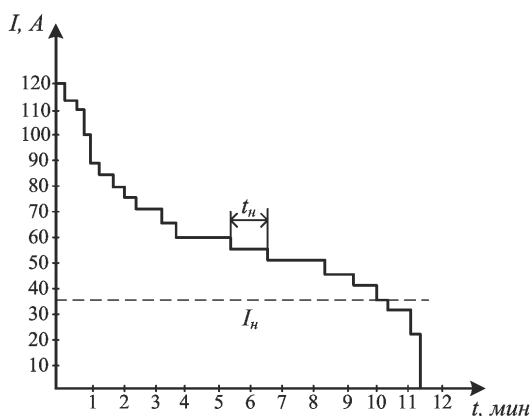


Рис. 3. Упорядоченные диаграммы нагрузки тяговых двигателей рудничных электровозов при движении с груженым и порожняковым составом (а) и при погрузочно-разгрузочных режимах (б)

Сама же упорядоченная диаграмма представляет собой распределение вероятностей

различных по величине нагрузок. Это дает возможность по экспериментальным материалам построить статистическую функцию распределения непрерывной случайной величины тока  $I$  для периода движения и погрузки.

Статистической функцией распределения случайной величины  $I$  называется частота событий  $I < i$  в данном статистическом материале.

$$F(i) = P(I < i).$$

Для этого весь диапазон изменения случайной величины, оформленный в виде простой статистической совокупности, разделим на «разряды» и подсчитаем количество  $m_k$ , приходящееся на каждый разряд. Это число разделим на общее число наблюдений  $n$  и найдем частоту, соответствующую данному разряду,

$$P_k^* = \frac{m_k}{n}.$$

Пользуясь данными статистического ряда, строим статистическую функцию распределения величины  $I$ .

В качестве точек для построения берем границы  $K1, K2, \dots$  разрядов, которые фигурируют в статистическом ряде. Тогда

$$\left\{ \begin{array}{l} F(i_1) = 0 \\ F(i_2) = P_1 \\ F(i_3) = P_1 + P_2 \\ \dots \\ F(i_n) = \sum_{i=1}^{n-1} P_i \\ F(i_{n+1}) = \sum_{i=1}^n P_i = 1 \end{array} \right.$$

Соединяя полученные точки плавной кривой, получим приближенный график статистической функции распределения, приведенный на рис. 4.

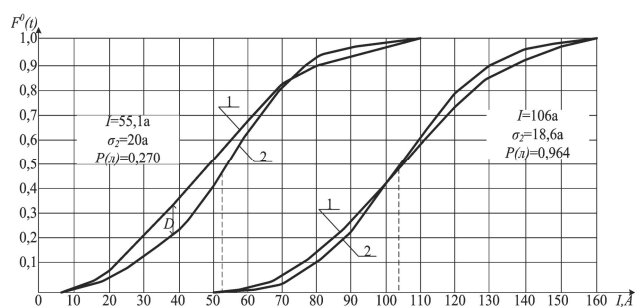


Рис. 4. Статистическая (1) и теоретическая (2) функции распределения тока при рейсовой работе рудничного электровоза

Для более подробного изучения полученного распределения определяем его числовые характеристики: статистические среднее  $M^*[I]$  и статистическую дисперсию  $D^*[I]$ , так как они характеризуют наиболее важные черты распределения – его положения и степень разбросанности

$$M^*[I] = \frac{\sum_{k=1}^n i_k}{n},$$

где  $i_k$  – значение случайной величины, наблюдаемое в  $K$ -ом интеграле;  $n$  – число интервалов;

$$D^*[I] = \frac{\sum_{k=1}^n (i_k - m_i^*)^2}{n},$$

где  $m_i^* = M^*[I]$  – статистическое среднее.

Таким образом, располагая статистической функцией распределения и основными числовыми характеристиками, предположительно определяем закон распределения случайной величины  $I$ . Согласно теореме А.М. Ляпунова распределение  $I$ , являющееся суммой большого числа независимых случайных величин, каждая из которых оказывает лишь незначительное влияние на сумму, имеет распределение вероятностей, близкое к нормальному и определяется двумя параметрами: генеральной средней нагрузкой  $\bar{I}$  (математическим ожиданием) и генеральной дисперсией  $\bar{\sigma}^2$ .

Известно, что при сложении случайных величин среднее значение суммы с ростом числа слагаемых становится все более устойчивым. Следовательно, на основании закона больших чисел, доказанного П.Л.Чебышевым, для определения генеральной средней нагрузки используется приближенное равенство

$$\bar{I} = \frac{i_1 + i_2 + \dots + i_n}{n}.$$

Генеральная дисперсия, характеризующая степень изменчивости нагрузки, присущей данному режиму, определяется

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{(i_1 - \bar{I})^2 + (i_2 - \bar{I})^2 + \dots + (i_n - \bar{I})^2}{n}.$$

Согласно теореме А.М. Ляпунова [57] вероятность того, что  $I_k$  превзойдет  $\bar{I} + \beta\sigma$ ,

$$P(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\beta}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

где  $\beta$  – доверительный интервал, его значение выбирается в зависимости от того, с какой вероятностью желательно определить расчетную нагрузку.

Для общей ориентировки, которая позволит судить о том, как часто могут наступать значения, превосходящие определенную величину, приведем небольшую таблицу значений  $P(\beta)$ ,

$$P(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\beta}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

дающего значение вероятности того, что  $I$  превзойдет величину  $\bar{I} + \beta\sigma$ .

$\beta$	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$P(\beta)$	0,0668	0,0225	0,0022	0,0014	0,0002

Для иллюстрации сказанного рассмотрим случай, когда  $\beta = 3$ . Это значит, что за расчетную нагрузку принята величина

$$I_3 = \bar{I} + 3\sigma$$

и с вероятностью всего 0,0014 допускается превышение расчетной нагрузки.

Иными словами, расчетный уровень будет превышен в среднем один раз за восемь рейсов.

Если расчетная нагрузка должна быть выбрана так, чтобы относительная тепловая напряженность активных частей двигателя была не слишком велика, необходимо отметить следующее. С вероятностью 0,9986 указанный расчетный уровень не будет достигаться, а с вероятностью 0,5 нагрузка окажется даже меньше, чем  $I$ . Это означает, что приращением температуры активных частей двигателя в редкие пики длительностью 0,00035 постоянной времени нагрева можно пренебречь за счет его недогрузки на подавляющей части рабочего времени.

На рис. 5 показана кривая  $P(\beta)T_p$ , где  $T_p$  – время нахождения двигателя под нагрузкой в течение рейса. Она пропорциональна инте-

гальной кривой распределения и вместе с тем является универсальным рейсовым графиком для идеально ритмичного режима. Действительный рейсовый график (пунктир на рисунке) пройдет выше идеального в области отрицательных значений  $\beta$  и ниже в области положительных  $\beta$ . Пользуясь этим графиком, можно для каждого значения  $\beta$  установить, какую часть времени рейса действительная нагрузка может оказаться выше или ниже  $\bar{I} + \beta\sigma$ .

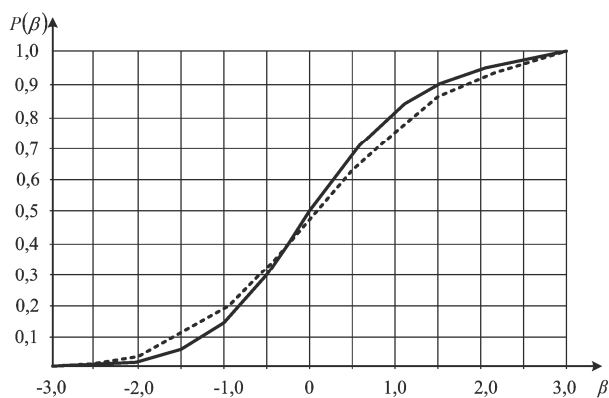


Рис. 5. Интегральная кривая распределения тока тяговых двигателей рудничного электровоза

На рис. 6 приведена плотность распределения значений тока при рейсовой работе электровоза, а именно, для периодов движения и погрузочно-разгрузочных операций.

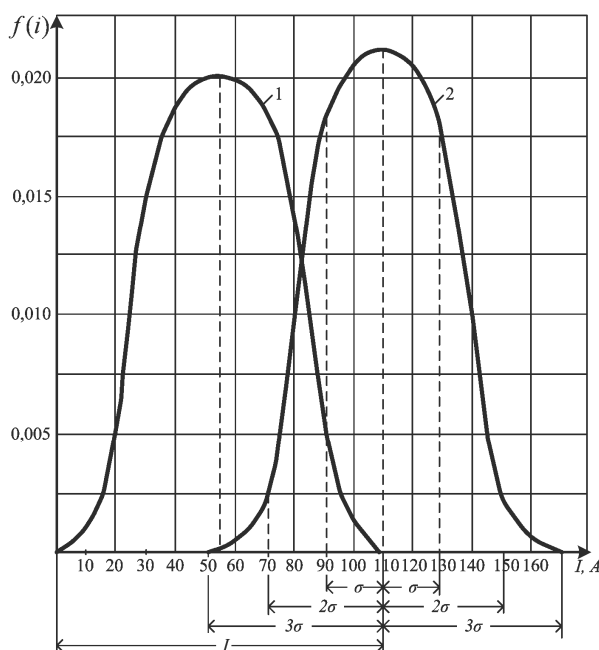


Рис. 6. Плотность распределения тока тяговых двигателей при рейсовой работе электровозов для периодов движения (1) и погрузочно-разгрузочных операций (2)

Эти кривые показывают, как основная масса полученных результатов группируется около некоторого среднего значения  $\bar{I}$ . На участке от  $(I - \sigma)$  до  $(I + \sigma)$  оказывается в среднем 0,9545 (95,45%) всех измерений, а на участке  $(I - 3\sigma)$ ,  $(I + 3\sigma)$  – уже 0,9978 (99,73 %), так что за пределы  $\pm 3\sigma$  выходит лишь 0,0027 (0,27 %) всего числа измерений, т.е. ничтожная их доля.

**Выводы.** Статистический анализ в отличие от других известных методов оценки нагрузочных рейсовых диаграмм работы рудничных электровозов позволяет установить реальные параметры распределения электрических нагрузок тяговых электрических двигателей этих видов электровозов.

Статистический метод определения расчетных нагрузок тяговых электрических двигателей рудничных электровозов, как обеспечивающий требуемую точность рекомендуется для определения их мощности.

#### Список использованной литературы

1. Дебелый В. Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В. Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый, С. А. Мельников // Уголь Украины. – 2006. – № 6. – С. 30–31.
2. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / Синчук О. Н., Юрченко Н. Н., Чернышев А. А., Синчук И. О., Удовенко О. А., Пасько О. В., Гузов Э. С. // Под ред. О. Н. Синчука. – К.: 2006. – 252 с.
3. Оат Г. П. Промышленные испытания аппаратуры автоматического вождения шахтных поездов / Г. П. Оат, Н. И. Литун, В. Н. Дардалан // Уголь. – 1989. – № 11. – С. 38–39.
4. Ренгевич А. А. Экспериментальные исследования расхода и потерь энергии рудничных электровозов / А. А. Ренгевич, С. В. Федоренко // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1984. – № 5. – С. 97–99.

5. Синчук О.Н. К вопросу управления тяговой нагрузкой рудничных электровозов / О. Н. Синчук // Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 1985. – № 3. – С. 92–95.

Получено 05.07.2012

#### References

1. Debelyj V. L. Basic directions of development of mine locomotive transport / V. L. Debelyj, L. L. Debelyj, S. A. Melnikov // Coal of Ukraine. – 2006. – № 6. – P. 30–31 [in Ukrainian].

2. Combinatorics of transformers of tension of modern hauling electromechanics of mine electric locomotives / O. N. Sinchuk, N. N. Yurchenko, A. A. Chernyshev, I. O. Sinchuk, O. A. Udovenko, O. V. Pasko, E. S. Guzov; under a release O. N. Sinchuk. – Kiev: 2006, – 252 p. [in Ukrainian].

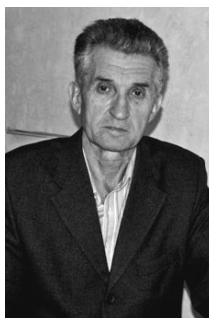
3. Oat G.P. Industrial tests of apparatus of the automatic driving of mine trains / G. P. Oat, N. I. Litun, V. N. Dardalan // Coal. – 1989. – № 11. – P. 38–39 [in Ukrainian].

4. Rengevich A. A. Experimental researches of expense and losses of energy of mine electric locomotives / A. A. Rengevich, S. V. Fedorenko // News of Institutes of higher. Mountain magazine. – 1984. – № 5. – P.97–99 [in Ukrainian].

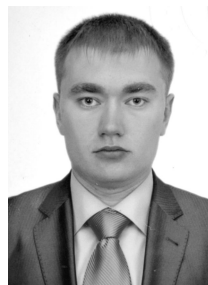
5. Sinchuk O. N. To the question of management the hauling loading of mine electric locomotives / O. N. Sinchuk // News of Institutes of higher. Electromechanics. – 1985. – № 3. – P. 92–95[in Ukrainian].



Синчук  
Олег Николаевич,  
д-р техн. наук,  
проф., зав. каф. СПЭЭТ  
ГВУЗ Криворожского нац.  
ун-та.  
Украина, г. Кривой Рог.  
E-mail: speet@ukr.net



Гузов  
Эдуард Семенович,  
канд. техн. наук, доц. каф.  
СПЭЭТ ГВУЗ Криворож-  
ского нац. ун-та.  
Украина, г. Кривой Рог.  
E-mail: speet@ukr.net



Омельченко  
Александр Владимирович,  
ассистент каф. СПЭЭТ  
ГВУЗ Криворожского нац.  
ун-та.  
Украина, г. Кривой Рог.  
E-mail: speet@ukr.net



Скапа  
Евгений Иванович,  
аспирант каф. СЭЭМ Кре-  
менчугского нац. ун-та им.  
М. Остроградского.  
Украина, г. Кременчуг.  
E-mail: seem@kdu.edu.ua



Черная  
Виктория Олеговна,  
ассистент каф. СЭЭМ  
Кременчугского нац. ун-та  
им. М. Остроградского.  
Украина, г. Кременчуг.  
E-mail: seem@kdu.edu.ua