

УДК 621.331

ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКА КАРЬЕРНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ

В. А. Александров

Как известно, наиболее простым и удобным методом проверки тяговых двигателей, работающих на открытых горных разработках, является метод, основанный на определении нагрева двигателя по среднеквадратичному (эффективному) току. Знание эффективного тока электровозов кроме того необходимо для ряда расчетов, связанных с электрификацией карьерного железнодорожного транспорта: для определения потерь энергии в электрической схеме электровоза, потерь энергии в контактной сети и т. п.

При изменяющейся величине тока в зависимости от времени и наличия перерывов в потреблении энергии эффективное значение тока в общем виде определяется так

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{п}}} i^2 dt},$$

где i — мгновенное значение тока; T — время, за которое определяется среднеквадратичная величина тока, равное времени одного цикла; $t_{\text{п}}$ — общая продолжительность потребления энергии за время T .

Среднее значение тока за это же время

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{п}}} i dt.$$

Отношение среднеквадратичного тока к среднему за равный промежуток времени получило название коэффициента эффективности [Розенфельд и др., 1957]

$$k_{\text{э}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{п}}} i^2 dt}}{\frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{п}}} i dt}. \quad (1)$$

Умножив числитель и знаменатель выражения (1) на $\frac{T}{t_{\Pi}}$,

$$k_2 = \frac{\sqrt{\frac{T}{t_{\Pi}^2} \int_0^{t_{\Pi}} i^2 dt}}{\frac{1}{t_{\Pi}} \int_0^{t_{\Pi}} i dt} = \frac{\sqrt{\frac{1}{t_{\Pi}} \int_0^{t_{\Pi}} i^2 dt}}{\frac{1}{t_{\Pi}} \int_0^{t_{\Pi}} i dt} \sqrt{\frac{T}{t_{\Pi}}} = \frac{k_{\Phi}}{\sqrt{k_B}}, \quad (2)$$

где коэффициент формы

$$k_{\Phi} = \frac{\sqrt{\frac{1}{t_{\Pi}} \int_0^{t_{\Pi}} i^2 dt}}{\frac{1}{t_{\Pi}} \int_0^{t_{\Pi}} i dt}; \quad (3)$$

коэффициент включения

$$k_B = \frac{t_{\Pi}}{T}.$$

Среднеквадратичная величина тока электровоза за время рейса (цикла)

$$I_3 = \frac{k_{\Phi}}{\sqrt{k_B}} I_{\text{ср}}. \quad (4)$$

Среднюю величину тока электровоза за время одного рейса легко подсчитать по расходу электроэнергии, а коэффициент включения — по результатам тяговых расчетов [Розенфельд и др., 1957; Марквардт, 1958; Стасюк, 1963]. Значительно труднее определить коэффициент формы. Наиболее точно значение k_{Φ} можно получить непосредственно из тяговых расчетов (возведением в квадрат ординат кривой потребляемого электровозом тока с последующим планиметрированием полученной площади). Правда, это требует большой затраты труда и времени.

Значение k_{Φ} кривой тока электровозов, работающих на магистральных железных дорогах, установлено эмпирически [Розенфельд и др., 1957] и на основе законов теории вероятности [Киеня, 1959] или определенных предположений о характере изменения тока электровоза [Марквардт, 1958]. И. М. Киеня показал, что закон распределения тока электровоза, работающего на магистральных железных дорогах, с достаточной степенью точности можно принять за нормальный. Полученное им значение k_{Φ} является уточнением, рассчитанным В. Е. Розенфельдом и К. Г. Марквардтом. Но эти значения нельзя использовать для электровозов, работающих на открытых горных разработках, так как работа карьерного железнодорожного транспорта характеризуется, во-первых, цикличностью (погрузка и маневры в забое, движение с грузом к месту разгрузки, разгрузка, движение порожняком в забой); во-вторых, большей частотой включений, чем на магистральных железных дорогах; в-третьих, значительно худшим состоянием пути, большим числом кривых, подъемов, спусков, стрелок, чем на магистральных железных дорогах. Естественно, величина тока, потребляемого электровозом, работающим на открытых горных разработках, подвержена более резким изменениям во времени. В настоящей статье на основании изучения характера изменения тока карьерных электровозов в первом

приближении устанавливается значение k_{ϕ} и границы возможных его изменений.

Характер изменения тока карьерных электровозов изучался по большому числу регистраций тока самопишущими приборами. Установлено, что величина тока электровоза имеет резко переменный характер. Изменение тока во время погрузки и разгрузки состава сильно отличается от характера изменения тока во время движения состава с грузом (рис. 1) или порожняком.

При погрузке и разгрузке состава величина потребляемого тока сравнительно невелика и режим работы тяговых двигателей приближается к повторно-кратковременному с непостоянной продолжительностью включения. Время включения тяговых двигателей в этом случае всегда меньше времени паузы.

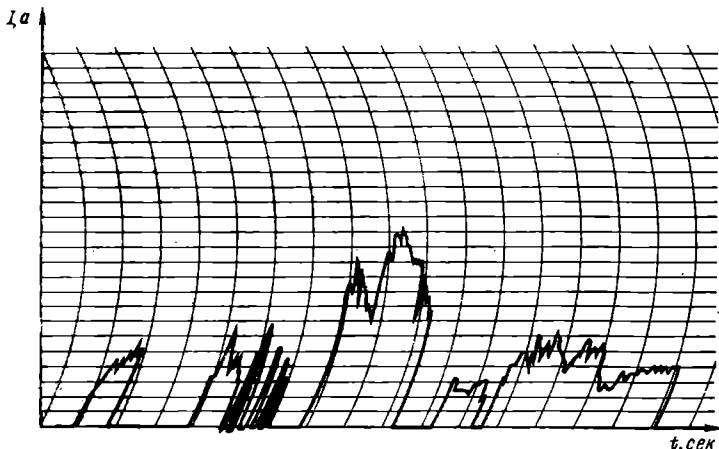


Рис. График тока электровоза во время движения состава с грузом.

На первый взгляд изменение тока электровоза во времени не поддается математическому описанию. Но, как показала обработка большого числа диаграмм, форма кривой поездного тока, построенной в порядке возрастания ординат за время потребления энергии, повторяет форму интегральной кривой распределения Грама-Шарлье. В интегральной форме этот закон записывается в виде

$$F(X) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^X e^{-\frac{(X-\bar{X})^2}{2\sigma^2}} dx - \frac{S}{6\sigma} \varphi''\left(\frac{X-\bar{X}}{\sigma}\right) + \frac{E}{24\sigma} \varphi''' \left(\frac{X-\bar{X}}{\sigma}\right), \quad (5)$$

где

$$\varphi\left(\frac{X-\bar{X}}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X-\bar{X})^2}{2\sigma^2}}$$

X — случайная величина; $\bar{X}$ — математическое ожидание или среднее значение случайной величины; σ — среднеквадратичное отклонение случайной величины от ее математического ожидания; S — коэффициент асимметрии кривой плотности распределения случайной величины; E — эксцесс случайной величины, характеризующий так называемую крутость, т. е. островеершинность или плосковершинность кривой плотности распределения.

Итак, рассматривая ток, потребляемый электровозом, как случайную величину и определив на основании опытных поездок математическое ожидание, среднеквадратичное отклонение, коэффициент асимметрии и эксцесс тока электровоза, можно на основании формулы (5) определить интеграл вероятностей или, что одно и то же, время $t_{отн}$, в течение которого величина тока оказывается меньше некоторого значения I

$$F(I) = t_{отн} = \frac{1}{\sigma_I \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^I e^{-\frac{(\bar{I}-I)^2}{2\sigma_I^2}} dI - \frac{S}{6\sigma_I} \Psi''\left(\frac{I-\bar{I}}{\sigma_I}\right) + \frac{E}{24\sigma_I} \Psi'''\left(\frac{I-\bar{I}}{\sigma_I}\right). \quad (6)$$

Пример кривой, рассчитанной по формуле (6), приведен на рис. 2, где по оси абсцисс отложено время, определяемое как отношение времени,

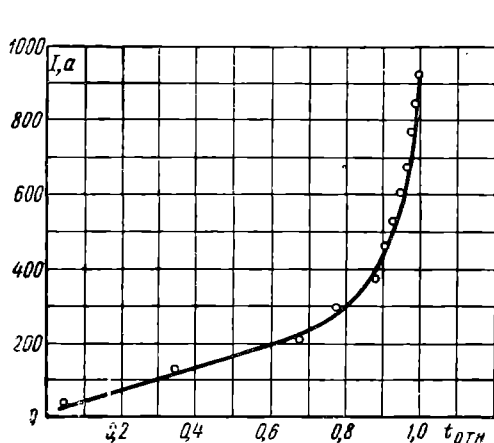


Рис. 2. Кривая тока, потребляемого электровозом.

Точки — результаты перестройки графика в порядке возрастания ординат.

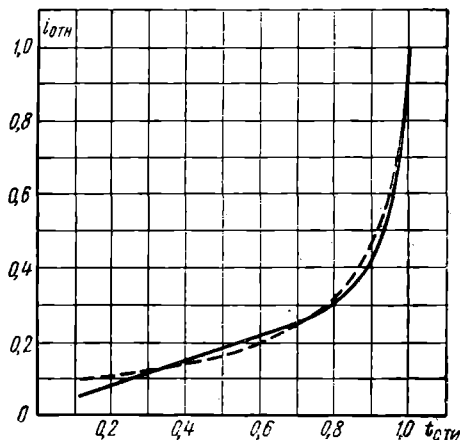


Рис. 3. Кривые тока, рассчитанные по закону Грама-Шарлье (сплошная) и по формуле (7) (пунктирная). $a = 10$.

в течение которого величина тока остается меньше некоторого значения t_i , к общему времени потребления энергии в течение рейса (цикла) $t_{п}$. Как видно, кривая, построенная по закону Грама-Шарлье, достаточно хорошо совпадает с опытными точками.

В уравнение (6) ток входит как аргумент. Разрешить это выражение относительно тока в элементарных функциях не удастся. Если же интегральную кривую распределения тока электровоза, рассчитанную по закону Грама-Шарлье, построить в относительных единицах, то ее достаточно хорошо описать в осях $t_{отн}$, $i_{отн}$ уравнением

$$i_{отн} = \frac{1}{1 + a(1 - t_{отн})}, \quad (7)$$

где a — коэффициент функции, значение которого должно быть подобрано в каждом конкретном случае общеизвестными методами (избранных точек, наименьшей средней ошибки и т. д.).

Формула (7) справедлива при изменении $t_{отн}$ в промежутке $0 \leq t_{отн} \leq 1$. На рис. 3 построена кривая, рассчитанная по закону Грама-Шарлье и формуле (7).

Отложенная по оси ординат относительная величина тока представляет собой отношение действительного тока к максимальному току данного распределения

$$i_{\text{отн}} = \frac{I}{I_{\text{max}}}.$$

Как показывает анализ подобных замен, получаемая при этом ошибка не превышает 2—4%, что практически вполне допустимо. При этом величина ошибки во многом зависит от точности и тщательности определения коэффициента a .

После подстановки значения тока из уравнения (7) и соответствующих пределов интегрирования выражение (3) примет вид

$$k_{\Phi} = \frac{\sqrt{\int_0^1 [1 + a(1 - t_{\text{отн}})]^2 dt}}{\int_0^1 [1 + a(1 - t_{\text{отн}})] dt}.$$

После интегрирования и простейших преобразований получим

$$k_{\Phi} = \sqrt{\frac{a^2}{(1+a) \ln^2(1+a)}}.$$

Исследуем полученное выражение. Во-первых, коэффициент a не может быть величиной отрицательной, так как зависимость $i_{\text{отн}} = f(t_{\text{отн}})$, построенная в порядке возрастания ординат, не может быть функцией убывающей. Наименьшее значение подкоренное выражение

$$\psi(a) = \frac{a^2}{(1+a) \ln^2(1+a)}$$

имеет при $a = 0$. Действительно, раскрывая неопределенность вида $0/0$ путем двойного дифференцирования числителя и знаменателя в отдельности, находим, что

$$\lim_{a \rightarrow 0} [\psi(a)] = 1, \quad k_{\Phi} = 1.$$

Это естественно, так как при $a = 0$ график тока превращается в прямоугольный, для которого, как известно, $k_{\Phi} = 1$. Функция $\psi(a)$ не имеет максимума, так как при возрастании a значение ее неограниченно растет. Как показал анализ большого числа кривых распределения поездных токов, значение a может изменяться в пределах $3 \leq a \leq 12$.

Таким образом

$$k_{\Phi \text{ min}} = 1,07; \quad k_{\Phi \text{ max}} = 1,29.$$

Минимальное значение коэффициента формы можно определить также и исходя из следующих соображений. Известно, что закон Грама-Шарлье незначительно отличается от нормального, в который он переходит при весьма нежестких ограничениях, накладываемых на случайную величину. И. М. Киеня, показал, что $k_{\Phi} = 1,07$, когда распределение тока электровоза подчиняется нормальному закону. Это обстоятельство может служить критерием того, что границы изменения коэффициента формы определены с достаточной степенью надежности.

После подстановки предельных значений k_{Φ} в формулу (2) получаем окончательное выражение коэффициента эффективности тока электровоза, работающего в условиях открытых горных разработок

$$k_{\Phi} = (1,07 \div 1,29) \frac{1}{\sqrt{k_B}} = (1,07 \div 1,29) \sqrt{\frac{T}{t_n}}. \quad (8)$$

Выводы

1. Полученная формула (8) позволяет определить границы возможного изменения коэффициента эффективности и показывает, что для карьерных электровозов величина k_2 может значительно отличаться от величины k_2 для магистральных электровозов.

2. Устойчивость интегральной формы закона распределения тока электровозов, работающих в условиях открытых горных разработок, позволяет определить коэффициент эффективности по формуле (8) с достаточной степенью точности.

ЛИТЕРАТУРА

Киеня И. М. Определение коэффициента эффективности тока электровоза. Тр. МИИТ, вып. 104, 1959.

Марквард К. Г. Энергоснабжение электрических железных дорог. Трансжелдориздат, 1958.

Розенфельд В. Е. и др. Электрические железные дороги. Трансжелдориздат, 1957.

С т а с ю к В. Н. Электровозный транспорт на карьерах. Госгортехиздат, 1963.
