

УДК 622.6

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА НАГРЕВ ОБМОТКИ ЯКОРЯ ТЯГОВОГО ГЕНЕРАТОРА КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

Алиев Ж.А., Жумабеков А.Т., Аскарров Б.Ш., Жаркенов Н.Б., Есбосынов К.Т.

Карагандинский государственный технический университет Республики Казахстан, Караганда, e-mail: aidar_7478@mail.ru

Неоспоримой тенденцией развития мировой горной промышленности на обозримую перспективу считается стабильная ориентация на открытый способ разработки, как обеспечивающий наилучшие экономические показатели. На его долю приходится до 73% общих объемов добычи полезных ископаемых в мире (в США – 83%, в странах СНГ – около 70%) [1]. К примеру, в Казахстане 73,3% запасов железной руды являются легко добываемыми, в России открытым способом добывается 91% железных руд и более 70% руд цветных металлов. Если учесть, что по мере роста глубины карьеров доля затрат на карьерный транспорт доходит до 55–60% в общей себестоимости добычи полезного ископаемого, то вполне очевидным представляется тезис о том, что вопросы развития и совершенствования карьерного транспорта являются одними из основных для открытых горных разработок. Основным видом технологического транспорта при добыче полезных ископаемых открытым способом остается автомобильный. Он используется для перевозки примерно 80% всей горной массы во всем мире, в т.ч. в США и Канаде – 85%, в Южной Америке – 85%, в Австралии – почти 100%, в Южной Африке – более 90%. В России и странах СНГ удельный вес карьерного автотранспорта с учетом всех подотраслями горнодобывающей промышленности приблизился к 75% и в ближайшей перспективе будет расти за счет расширения открытого способа добычи угля [1].

Ключевые слова: автосамосвал, генератор, обмотки якоря, карьерный автомобиль, устойчивость, ток нагрузки, тяговый генератор, электропривод, работоспособность

THE ENERGY DEVELOPMENT STRATEGY OF KAZAKHSTAN IN THE CONDITIONS OF DEEPENING OF ECONOMIC INTEGRATION

Aliev Zh.A., Zhumabekov A.T., Askarov B.Sh., Zharkenov N.B., Esbosynov K.T.

Karaganda State Technical University of Republic of Kazakhstan, Karaganda, e-mail: aidar_7478@mail.ru

The undeniable trend in the development of the global mining industry for the foreseeable future is considered stable orientation to the open method of development, as it provides the best economic indicators. It accounts for up to 73% of the total volume of mining in the world (83%, CIS countries – about 70%). For example, in Kazakhstan, only 73.3% of iron ore reserves are easily mined in Russia is extracted in the open way 91% iron ore and 70% non-ferrous metals. Considering that the growth of the depth of pits, the share of expenditures on transport career comes to 55-60% of the total cost of mining, it is quite obvious and is the thesis that the development and improvement of quarry transport are among the main for open pit mining. The main type of technological transport in the extraction of minerals by open method remains automobile. It is used to transport approximately 80% of the rock mass around the world, including in the United States and Canada – 85% in South America – 85%, in Australia – almost 100% in South Africa more than 90%. In Russia and the CIS countries, the proportion of quarry road, taking into account all sectors of the mining industry approached 75% in the near future will grow due to the expansion of open cut coal mining.

Keywords: dump truck, generator, armature winding, career car, the resistance, the load current, of the traction generator, the electric drive, the performance

К основным видам карьерного транспорта, широко применяемым на открытых горных работах, относятся железнодорожный карьерный транспорт, автомобильный карьерный транспорт и конвейерный карьерный транспорт, применяемые самостоятельно, а также комбинированный транспорт, предусматривающий различное сочетание основных видов транспорта. Реже на карьерах используются канатный (скиповые и автомобильные подъемники и канатные подвесные дороги), гидравлический, гравитационный, скреперная доставка и новые виды транспорта (конвейерные поезда, крутонаклонные конвейеры, воздушный транспорт и другие). По характеру грузопотоков, различают циклический (же-

лезнодорожный, автомобильный, скиповой) и непрерывный (конвейерный, конвейерные поезда) виды транспорта [1].

Автомобильный карьерный транспорт благодаря своим преимуществам в сравнении с другими видами транспорта в настоящее время является наиболее распространенным в Казахстане и странах всего мира. Опыт применения автомобильного транспорта подтвердил его высокие технико-экономические показатели в определенных горнотехнических условиях.

Цель исследования

Оценка работоспособности системы тягового электропривода (СТЭП) автомобильного карьерного транспорта в различ-

ных горно-геологических и климатических условиях Центрального Казахстана. Проведение натурных исследований СТЭП, а также испытания системы на имитационных стендах, выполняемые с целью оценки ее параметров в эксплуатационных условиях, требуют значительных затрат времени и средств. В связи с этим в КАРГТУ на базе математической модели многокомпонентной системы «Карьерный автомобиль – условия и режимы движения – системы тягового привода» разработаны алгоритм и машинные программы расчетного исследования системы тягового электропривода (СТЭП).

Методика исследования предусматривает экспериментальную проверку математической модели, выполнение расчетной оценки работоспособности агрегатов тягового электрооборудования СТЭП при работе в условиях различных карьеров и выдачу аргументированных рекомендаций. Последние охватывают мероприятия по наиболее рациональному использованию агрегатов системы, обеспечивающему заданную производительность в данных конкретных условиях при соответствующем уровне надежности тягового электрооборудования, а также определение путей совершенствования электрооборудования СТЭП с целью расширения сферы эффективного применения карьерных автомобилей.

Основными задачами исследования системы тягового электропривода является:

- расчетная оценка работоспособности СТЭП карьерного автомобиля в условиях различных карьеров горнодобывающей промышленности Центрального Казахстана;

- разработка рекомендаций по наиболее рациональному использованию существующей СТЭП, а также по дальнейшему совершенствованию тягового электрооборудования карьерного автомобиля.

С целью решения задач исследования разработана методика предусматривающая: – выбор критериев оценки параметров системы тягового электропривода, обеспечивающих заданные эксплуатационные характеристики карьерного автомобиля;

- разработку математической модели «Карьерный автомобиль – условия и режимы движения – системы тягового привода»;

- разработку методики и программы экспериментальной проверки математической модели.

Анализ нагрузочных режимов тока и напряжения генераторов автосамосвалов грузоподъемностью 70–150 тс на карьерах Центрального Казахстана показывает, что в некоторых случаях на-

блюдаются значительные отклонения их величин от номинального уровня. Это отражается на температурном режиме охлаждения тягового генератора, т.е. при нарушении расчетной связи между величиной тока и расходом воздуха происходит перегрев обмотки якоря.

Многообразие эксплуатационных факторов и значительные колебания их величин относительно номинальных значений при неблагоприятном сочетании усугубляет температурные условия работы изоляции якоря генератора. Как показал анализ, в большинстве исследований изучается влияние отдельных факторов на температурное поле якоря генератора.

Это является недостаточным, т.к. в реальных условиях действует большое их многообразие. Поэтому задача сводится к отысканию условий нагрузочных параметров генератора при минимально допустимой величине температуры наиболее нагреваемой части обмотки якоря. Таким образом, исследования требуют решения экстремальной задачи, направленной на отыскание оптимальных условий протекания процессов или *оптимальный выбор* рабочих параметров.

Предварительно проведенные исследования позволили исключить несущественные факторы и ограничиться основными параметрами, к которым относятся: ток нагрузки генератора; скорость и вес; расход воздуха в системе вентиляции генератора; температура окружающего воздуха, в качестве выходного параметра примем максимальную температуру перегрева обмотки якоря генератора, материалы которой относятся к классу изоляции В с допустимой абсолютной температурой нагрева 120 °С.

Для описания процесса воспользуемся методами дисперсионного в регрессионного анализов, базирующихся на планировании эксперимента. Это приводит, по существу, к новому методу описания изучаемого процесса. Здесь математическим методам отводится активная роль.

По данным экспериментальной статистики по изучаемому процессу выбирается некоторая оптимальная стратегия для управления экспериментом. Задача планирования заключается в следующем: на каждом этапе исследования нужно выбрать оптимальное расположение точек в факторном пространстве для того, чтобы получить некоторое представление о поверхности отклика. Здесь приходится учитывать как постановку задачи экспериментатором, так и реальную ситуацию, в которой приходится решать ее.

Как известно, регрессионный анализ основывается на методе наименьших квадратов. Вкратце изложим суть метода [2].

Допустим, что исследуемый параметр – температура перегрева обмотки якоря – имеет определенное количество измерений в условиях эксплуатации. Кроме того, он зависит от K_i эксплуатационных факторов, которые из условий статистики независимые переменные измерения. Обозначим их через $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Представим результаты наблюдений в виде полинома степени α . Основная задача заключается в том, чтобы по данным эксплуатационной статистики измерений определить коэффициенты регрессии из выражения $C^{\alpha}_{\alpha+K}$. Количество наблюдений должно удовлетворять неравенству

$$N \geq C^{\alpha}_{\alpha+K} \quad (1)$$

Учитывая свойства регрессионного анализа, должны выполняться следующие условия:

1. Результаты наблюдений $y_1, y_2, y_3, \dots, y_i$ представляют собой независимые нормально распределенные случайные величины:

$$P\{y < x\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(u-\alpha)^2}{2\sigma^2}} du. \quad (2)$$

Приведенное требование не является обязательным. Метод наименьших квадратов можно рассматривать как частный случай метода максимума правдоподобия. В этом случае можно говорить о достаточных статистиках, т.е. таких функциях, которые позволяют определить информацию об исследуемых параметрах. Учитывая это, температуры якоря записывали непрерывно при помощи самопишущих приборов. Кроме того, для устойчивости результатов измерений были проведены многократные экспериментальные исследования.

2. При многократных наблюдениях над исследуемой величиной Y , при некотором определенном наборе значений $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$ получаем дисперсию $\sigma^2\{y_i\}$, которая не будет зависеть от математического ожидания $M\{y_i\}$, т.е. не будет отличаться от дисперсии $\sigma^2\{y_i\}$, полученной при повторных наблюдениях для любого другого набора значений независимых переменных $x_{1e}, x_{2e}, \dots, x_{ke}$ или дисперсии:

$$\sigma^2\{y_u\}, u = 1, 2, \dots, N.$$

3. Независимые переменные $x_{1e}, x_{2e}, \dots, x_{ke}$ измеряются с пренебрежимо малой ошибкой по сравнению с ошибкой в определении Y . Из большого количества эксплуатационных факторов были выбраны определяющие: вес в скорость движения, так и расход воздуха системы вентиляции

генератора, температура окружающего воздуха [2].

Остальные факторы в условии задачи не учитываются как несущественные.

Для определения коэффициента регрессии введем новую переменную, тогда в новой системе обозначения полинома в степени будет записываться как однородные линейное уравнение вида

$$Y = b_0x_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k, \quad (3)$$

где $K = C^{\alpha}_{K+\alpha-1}$.

Из всех полиномов степени α отыскиваем тот, который минимизирует сумму квадратов отклонений:

$$\sum_{u=1}^N (y_u - b_0x_{0u} - b_1x_{1u} - \dots - b_kx_{ku})^2. \quad (4)$$

Решая систему полученных нормальных уравнений относительно неизвестных коэффициентов регрессии, определяем значения:

$$b_0(00) + b_1(01) + \dots + b_k(0k) = (0y),$$

$$b_0(10) + b_1(11) + \dots + b_k(1k) = (1y), \quad (5)$$

$$b_0(k0) + b_1(k1) + \dots + b_k(kk) = (ky),$$

где введены обозначения:

$$\begin{aligned} (ij) &= (ji) \sum_{u=1}^N x_{iu}, \\ (ii) &= \sum_{u=1}^N x_{iu}^2, \\ (iy) &= \sum_{u=1}^N x_{iu} * y_u. \end{aligned} \quad (6)$$

Для упрощения решения системы уравнений (5) применяем матричную форму планирования, соблюдая следующие условия:

$$\sum x_{iu} * x_{ju} = 0. \quad (7)$$

где $i \neq j$ т.е. скалярные произведения всех вектор-столбцов равны нулю. Тогда при «ортогональном» планировании матрица коэффициентов нормальных уравнений станет диагональной, и коэффициенты регрессии определяются по формуле

$$b_i = C_{ii}(iy), \quad (8)$$

где $C_{ii} = \frac{1}{(ii)}$.

Вычислив коэффициенты регрессии, необходимо произвести статистический анализ уравнения, которое предусматривает определенный разброс значений функции относительно исходных величин [4]. Для

определения дисперсии, характеризующей рассеяние остаточных точек, воспользуемся матричным уравнением

$$Y = XB,$$

$$Y = \begin{bmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \\ \dots \\ \hat{y}_N \end{bmatrix},$$

$$XB = \begin{bmatrix} b_0x_{01} + b_1x_{11} + \dots + b_kx_{k1} \\ b_0x_{02} + b_1x_{12} + \dots + b_kx_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_0x_{0N} + b_1x_{1N} + \dots + b_kx_{kN} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Для остаточной суммы квадратов имеем

$$S = (yy) - \sum_{i=0}^K b_i(iy). \quad (10)$$

Разделив (10) на число степеней свободы, получим остаточную дисперсию:

$$S_R^2 = \frac{S_k}{f_k}, \quad (11)$$

где $f_k = N - K - 1$.

Гипотезу об адекватности представления результатов полиномом заданной степени α определяем F отношением:

$$F = \frac{S_e^2}{S\{y\}}. \quad (12)$$

Предлагается метод нахождения ошибки опыта. Для этого необходимо знать функцию плотности величины:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

Пусть $f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ – априорная функция плотности.

Тогда математическое ожидание будет равно

$$My(x_1, x_2, \dots, x_k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} y(x_1, x_2, \dots, x_k) dx_1 * dx_2 * \dots * dx_k. \quad (13)$$

Исходя из этого

$$S^2(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} [y(x_1, x_2, \dots, x_k) - My(x_1, x_2, \dots, x_k)]^2 * f(x_1, x_2, \dots, x_k) dx_1 * dx_2 * \dots * dx_k. \quad (14)$$

В некоторых случаях при решении практических задач сбор статистики производят, фиксируя исследуемые параметры. В результате выходные параметры принимают значения $y_1, y_2, \dots, y_k$.

Тогда величина $S^2(y)$ определяется по формуле

$$\bar{S}^2(y) = \frac{1}{N} * (y_i - \bar{y})^2, \quad (15)$$

где $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$.

Матрица планирования экспериментов

№ п/п	x_0	X_1	X_2	X_3		X_1x_2	X_1x_3	X_2x_3	$X_1x_2x_3$
1	+	–	–	–	J	+	+	+	–
2	+	+	–	–	a	–	–	+	+
3	+	–	+	–	b	–	+	–	+
4	+	–	–	+	c	+	–	–	+
5	+	+	+	–	ab	+	–	–	–
6	+	+	–	+	ac	–	+	–	–
7	+	–	+	+	bc	–	–	+	–
8	+	+	+	+	abc	+	+	+	+
	$B_0 = 133,1$	$B_1 = 3,6$	$B_2 = 3,6$	$B_3 = -2,37$		$B_4 = -11,2$	$B_5 = -0,87$	$B_6 = 0,125$	$B_7 = -0,63$

Для описания критической области эксплуатационных факторов были приняты основные из них, существенно влияющие на работу генератора, приводящие к перегреву изоляции обмотки якоря [3]:

К ним относятся:

x_1 – ток нагрузки генератора, a ;

x_2 – температура окружающего воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

x_3 – расход воздуха системы вентиляции генератора, $\text{м}^3/\text{сек}$.

Рассматривается трехфакторный эксперимент, тогда количество проделанных экспериментов $N = 2^3 = 8$.

Результаты экспериментов сведены в матрицу планирования (таблица), в которой даны кодовые обозначения независимых переменных и их сочетания.

Так как в данной задаче исследуется критическая область, то необходимо установить определенные уровни факторов,

а также интервалы варьирования с учетом допустимой температуры нагрева изоляции обмотки якоря (120°C).

Для упрощения расчета таблицы методической предусматривается переход от натуральных переменных к кодовым по формуле

$$x_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (16)$$

где x_i – произвольное значение независимого переменного;

x_{i0} – значение независимого переменного, соответствующего основному уровню;

Δx_i – единица варьирования независимого переменного.

По данным опыта получены численные значения коэффициентов регрессий (таблица) $b_1, b_2, \dots, b_7$.

Уравнение регрессий 17 для расчета температуры нагрева обмотки якоря:

$$y = 133,1 + 3,6 \frac{x_1 - 4000}{500} + 0,37 \frac{x_2 - 37,5}{2,5} - 2,37 \frac{x_3 - 3,5}{0,1} - 1,21 \frac{x_1 - 4000}{500} * \frac{x_2 - 37,5}{2,5} - 0,87 \frac{x_1 - 4000}{500} * \frac{x_2 - 3,5}{0,1} - 0,125 \frac{x_2 - 37,5}{2,5} * \frac{x_3 - 3,5}{0,1} - 0,625 \frac{x_1 - 4000}{500} * \frac{x_2 - 37,5}{2,5} * \frac{x_3 - 3,5}{0,1}. \quad (17)$$

Подставляя значения пределов варьирования в уравнение (17), находим функцию отклика, т.е. температуру нагрева обмотки якоря от действия эксплуатационных факторов: тока нагрузки x_1 , расхода воздуха в системе вентиляции x_2 и температуры окружающего воздуха x_3 .

Для проверки воспроизводимости экспериментальных данных по формуле вида

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_1 x_2 + b_5 x_1 x_3 + b_6 x_2 x_3 + b_7 x_1 x_2 x_3 \quad (18)$$

были пересчитаны их значения. В результате установлена достаточная воспроизводимость экспериментальных данных.

Выводы

Полученная формула (18) позволяет определить температуру наиболее нагреваемой части обмотки якоря при различных вариантах влияния эксплуатационных факторов.

Список литературы

1. Бахтурин Ю.А. Современные тенденции развития карьерного транспорта. Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 7.
2. Лукомский Я.И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. Госстатиздат. – М., 1961.
3. Сковцов Н.А. Пути повышения эксплуатационной надежности изоляции обмоток тяговых электродвигателей. – М., «Транспорт», 1972.
4. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математический метод в теории надежности. – М.: «Наука», 1995.