

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Г.Я. Иванов, Б.В. Малозёмов, М.Е. Вильбергер, П.В. Зонов

В статье рассматривается математическая модель процесса технической эксплуатации тягового электродвигателя в агропромышленном комплексе (АПК), учитывающая изменение внешних условий, режимы работы, техническое состояние механизмов, занятых в производстве сельскохозяйственной продукции, и влияние этих факторов на расход электроэнергии.

Ключевые слова: математическая модель, тяговый электродвигатель, диагностика, техническая надежность.

Проблема при эксплуатации ТЭД и способы ее решения

При изменении надежности тяговых электродвигателей (ТЭД) во время эксплуатации существуют статистические закономерности, на которые во многом влияет исправное техническое состояние коллектора. По внешнему виду контактной поверхности коллектора судят о состоянии и работе ТЭД в целом. Коллектор двигателя, находящегося в эксплуатации, в идеальных условиях должен иметь на контактной поверхности коллекторных пластин глянцевую темно-коричневую пленку (политуру) повышенной твердости. Она позволяет увеличить коммутационную устойчивость ТЭД и значительно снижает износ коллекторных пластин. Однако такие условия в эксплуатации зачастую не соблюдаются.

При эксплуатации ТЭД испытывает значительные динамические перегрузки, которые приводят (при определенных условиях) к электромеханическим резонансным колебаниям звена «якорь – магнитная система», вызывая различные повреждения коллектора.

К еще часто встречающимся неисправностям коллектора ТЭД относится механический и электроэрозионный износ.

Основными причинами механического износа являются применение щеток с повышенным коэффициентом трения; плохая очистка воздуха, поступающего для охлаждения; чрезмерное нажатие щеток; перегрев отдельных пластин; биение коллектора из-за его эксцентриситета.

Электроэрозионный износ контактной поверхности вызывается коммутацией, приводящий к подгару коллекторных пластин, что может спровоцировать круговой огонь по коллектору, приводящий к прожогу и опла-

влению пластин, распайке концов якорной обмотки в «петушках» коллектора. Перебросы по коллектору или на корпус двигателя могут быть вызваны загрязнением коллектора щеточной пылью.

Указанные неисправности коллектора устраняются обточкой, продорожкой, снятием фасок, шлифовкой и полировкой. Однако на работе коллекторно-щеточного узла абразивная обработка сказывается отрицательно. С целью исключения операций шлифования и полирования из технологического процесса ремонта ТЭД после продорожки коллектора лучше создавать, как отмечено в [1], оксидную пленку-политуру повышенной твердости с новыми свойствами, обеспечивающими повышение коммутационной устойчивости и снижение износа коллектора, а значит и в целом коллекторно-щеточного узла.

Существуют различные методы упрочнения поверхностей деталей машин из сталей и сплавов, которые можно подразделить на следующие группы в зависимости от технологического приема изменения поверхностных или объемных свойств материала.

Упрочнение коллектора путем создания поверхностных пленок, при котором структура внутренних слоев материалов остается неизменной. Упрочнение выполняют формированием покрытия за счет химических и диффузионных реакций между элементами парогазовых смесей и материала изделия. Покрытия реализовывают плазменным, газоплазменным, детонационным и другими известными видами напыления. При этом триботехнические свойства тел во многом определяются структурой и химическим составом поверхностных покрытий.

Другим прогрессивно-инновационным подходом к созданию качественного упрочне-

ния поверхностей коллекторов в настоящее время является исследование, разработка, а также совершенствование технологий получения поверхностных слоев с заданными составом, структурой и, соответственно, с требуемыми свойствами. При этом необходимо учитывать, что решающее значение при формировании структуры слоя имеют следующие факторы: физико-химическая природа насыщающей среды, механизм фазовых превращений, энергетическая способность взаимодействия насыщающего элемента [1]. Широкие перспективы в этом направлении открывает технологическое обеспечение износостойкости металлов на основе электрофизических способов упрочнения с помощью применения высокоэнергетических концентрированных потоков энергии. В настоящее время данные методы используются для легирования приповерхностных слоев металлов и сплавов на их основе.

Проблема повышения надежности и долговечности деталей машин и механизмов может быть решена высокоэффективной, но относительно дешевой и нетрудоемкой операцией механической обработки.

Важнейшим условием повышения надежности машин является работоспособность деталей узлов трения, которая в свою очередь связана с их износостойкостью. Одним из основных факторов, определяющих износостойкость деталей машин, является сопротивление материалов разрушающему действию абразивных частиц. Особого внимания заслуживает возможность повышения сопротивления металлов абразивному изнашиванию путем изменения их физико-механических свойств: в этом случае не требуется замена применяемых материалов на более дорогие и тем более дефицитные.

Поэтому повышение абразивной износостойкости может быть достигнуто путем применения известных, но пока не нашедших широкого применения технологических операций. Существующие методы термической обработки металлов подразделяются на объемные и поверхностные. К первым относят традиционные процессы термической обработки: отжиг, нормализацию, закалку, отпуск; ко вторым – все способы поверхностной закалки, создания электрохимических покрытий и химико-термическую обработку.

Одним из наиболее широко применяемых вариантов поверхностной обработки являются химико-термические методы повышения эксплуатационных характеристик изде-

лий, изменению химического состава, структуры и свойств поверхностных слоев.

Для получения требуемых свойств материалов широко используются комбинированные методы поверхностного упрочнения.

Поставленная проблема, как частный случай, ставит задачу создания модели процесса технической эксплуатации ТЭД.

Постановка задачи

Для решения задачи анализа и совершенствования процесса технической эксплуатации ТЭД в АПК следует иметь математическую модель (далее модель), позволяющую использовать методы теории вероятностей, математической статистики и теории оптимизации [2, 3].

К основным понятиям, применяемым в модели технической эксплуатации ТЭД как процесса, относятся :

- O_3 – объект эксплуатации;
- θ_i – технические состояния объекта;
- δ_i – режимы эксплуатации;
- γ_i – состояния условий эксплуатации;
- $\delta(t)$ – процесс эксплуатации;
- S_3 – стратегия эксплуатации.

Под объектом эксплуатации O_3 понимается система, включающая в себя аккумулятор электрической энергии и непосредственно связанные с ним потребители (тяговый электропривод, вентилятор, ТЭД). В модели объект эксплуатации O_3 представляет собой совокупность Θ его технических состояний θ_i , определяемых конструктивными особенностями и техническим состоянием отдельных узлов ТЭД и настройкой вспомогательной аппаратуры.

Режимы эксплуатации объекта зависят от состояния условий γ_i и определяются видом работы механизма (ожидание работы, маневровые операции, тяга, торможение, выбег, останов) и режимом работы ТЭД (холостой ход, режим нагрузки).

Состояние условий эксплуатации γ_i зависят от внешних условий: массы механизма, нагрузки на его ось, рода груза, профиля и состояния дороги и параметров окружающей среды. Возможные состояния γ_i внешних условий составляют совокупность (множество) Y .

Процесс технической эксплуатации механизма $\delta(t)$ в модели определяется как стохастическое отображение комплекса технических состояний Θ и внешних условий Y на множество состояний эксплуатации Δ . Условно это отображение можно выразить следующим образом:

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

$$\{\Theta, Y\} \xrightarrow{\delta(t)} \Delta. \quad (1)$$

Следовательно, процесс технической эксплуатации ТЭД в АПК $\delta(t)$ определяется как процесс возникновения и смены режимов эксплуатации δ_i под воздействием определенных технических состояний θ_i и внешних условий γ_i .

Кроме того, в процессе технической эксплуатации ТЭД необходимо более широко применять методы диагностики, как технических состояний, так и внешних условий. При этом особенное значение имеет вибродиагностика в силу своих возможностей обнаружения изменений состояния задолго до наступления аварийной ситуации [4].

Графическое изображение модели процесса технической эксплуатации ТЭД приведено на рисунке 1.

Математическая запись модели

Множества Θ и Y формируют комплекс Δ состояний процесса технической эксплуатации $\delta(t)$, т. е. статистически определяют закономерности повторения и продолжительности режимов δ_i , переходов между γ_i состояниями. С одной стороны, математическое выражение (1) носит случайный характер, отражающий объективную составляющую процесса $\delta(t)$, с другой стороны, величины θ_i и δ_i , а значит и отображение Θ и Y на Δ , отражают субъективную составляющую процесса $\delta(t)$. Поэтому процесс $\delta(t)$ является, в общем, управляемым.

Субъективная составляющая со стороны Θ отражается, например, выбором системы обслуживания и ремонта, нормируемыми параметрами и качеством настройки аппаратуры и характеристик ТЭД, а со стороны Y – выбором характеристик механизма, графика работы и другими факторами.

Данная субъективная составляющая воздействия Θ и Y на Δ и $\delta(t)$ определяется в соответствии со стратегией технической эксплуатации S_3 , под которой понимается совокупность правил, управляющих воздействиями и порядок их применения.

Правила стратегии эксплуатации S_3 могут устанавливаться и корректироваться на основе изучения состояний θ_i и γ_i , свойства процесса $\delta(t)$, режимов эксплуатации δ_i и их эффективности. Часть правил может быть направлена на создание более благоприятных Θ и Y , а часть – на формирование наиболее эффективных режимов эксплуатации δ_i в зависимости от θ_i и γ_i . При достаточно полной и определенной стратегии эксплуатации S_3

можно считать, что режимы эксплуатации выбираются и назначаются в некотором соответствии (носящем, в основном, стохастический характер) с техническим состоянием объекта эксплуатации θ_i и условиями эксплуатации γ_i , поэтому конечной целью исследования процесса технической эксплуатации $\delta(t)$ и оценки эффективности его состояний следует признать корректировку существующей стратегии эксплуатации S_3 объекта (механизма) в АПК.

Основные понятия и элементы модели процесса технической эксплуатации механизма, а также описание их взаимодействия необходимо дополнить количественными характеристиками. Такими характеристиками переходов по состояниям процесса технической эксплуатации являются вероятности P_{ij} перехода процесса $\delta(t)$ из режимного состояния δ_i в δ_j и время t_i пребывания объекта в состоянии δ_i . Время t_i рассматривается как случайная величина, характеризующаяся интегральной функцией распределения $F_i(t)$ и плотностью распределения $f_i(t)$ времени.

С помощью введенных понятий модель эксплуатации механизма описывается следующим образом. Первоначально при $t = t_0$ процесс технической эксплуатации $\delta(t)$ находится в некотором состоянии $\delta_i \in \Delta$. Через случайное время t_i , распределенное по закону $F_i(t)$, с вероятностью P_{ij} в момент $t_1 = t_0 + t_i$ в соответствии с техническим состоянием $\theta_i \in \Delta$, внешними условиями $\gamma_i \in Y$ и стратегией эксплуатации S_3 процесс $\delta(t)$ переходит в состояние $\delta_j \in \Delta$. В некоторый момент $t_2 = t_1 + t_j$ осуществляется новый переход по приведенному выше алгоритму.

Вероятности переходов P_{ij} и функции распределения $F_i(t)$ времени пребывания объекта в состоянии $\delta(t)$ являются самой важной количественной характеристикой модели процесса технической эксплуатации $\delta(t)$, которую оценивают статистическими методами.

Для этого, с помощью прямых или автоматизированных наблюдений [5] за процессом технической эксплуатации группы механизмов, в течение времени t_H необходимо определить число n_{ij} переходов из δ_i в δ_j . При наличии указанной информации вероятность переходов P_{ij} оценивается выражением:

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i}, \quad (2)$$

где n_i – общее число попаданий в состояние δ_i .

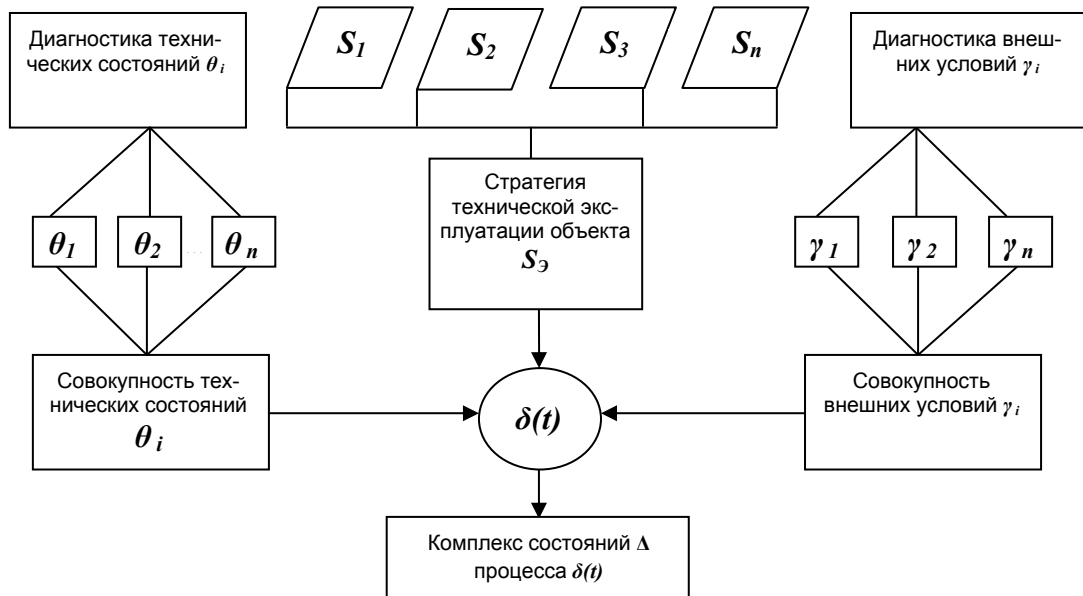


Рисунок 1 – Структурная схема процесса технической эксплуатации ТЭД

Оценку вероятности P_i пребывания процесса $\delta(t)$ в состоянии δ_i дает величина

$$P_i = \frac{t_{in}}{t_n}, \quad (3)$$

где t_{in} – общее время пребывания в состоянии δ_i .

Совокупность величин $\{P_{ij}, P_i, F_{i(t)}\}$ определяет количественную структуру процесса технической эксплуатации. Следовательно, для оценки эффективности эксплуатации необходимо количественно описать режимные состояния процесса технической эксплуатации генераторной установки механизма. Прежде всего, эти режимные состояния характеризуются развиваемой генератором мощностью N_i , величина которой переменна во времени, т. е. изменяется от состояния δ_i к состоянию δ_j даже во время нахождения в фиксированном состоянии.

Нестабильность уровня мощности в каждом фиксированном состоянии δ_i обусловлена переходными процессами в генераторе, изменениями режимов нагрузки вспомогательных агрегатов и системы управления. В общем случае величина мощности является случайной для каждого режимного состояния δ_i и характеризуется плотностью распределения вероятностей $f_i(N)$ мощности в состояниях δ_i . Плотность распределения мощности ТЭД механизма, развиваемой в процессе эксплуатации, определяется по правилу суперпозиции:

$$f(N) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot f_i(N), \quad (4)$$

где P_i – вероятность нахождения генератора в состояниях δ_i .

В этом случае, основными случайными характеристиками мощности генератора будут математическое ожидание M и дисперсия D , определяемые соответственно из выражения (5) и (6):

$$\begin{aligned} M &= \int_0^{\infty} N \cdot f(N) dN = \\ &= \int_0^{\infty} N \sum_{i=1}^n P_i f_i(N) dN = \sum_{i=1}^n P_i \cdot M_i. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{где } M_i = \int_0^{\infty} N \cdot f_i(N) dN.$$

$$\begin{aligned} D &= \int_0^{\infty} (N - M)^2 f(N) dN = \\ &= \int_0^{\infty} (N - M)^2 \sum_{i=1}^n P_i \cdot f_i(N) dN. \end{aligned} \quad (6)$$

Развиваемая мощность расходуется на выполнение работы A механизмом и на привод вспомогательного электрооборудования. Величина работы A обуславливается комплексом условий θ и Y , определяющих то, каким образом выполняется работа A . Если за время наблюдения t_i ТЭД находится в со-

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

стояниях δ_i в течение определенного времени t_{in} , то:

$$A = \sum_{i=1}^{t_{in}} N_i t_{in}. \quad (7)$$

На выполнение работы A механизмом расходуется количество электроэнергии:

$$B = \sum_{i=1}^{t_n} b_e(N_i) \cdot N_i t_{in}, \quad (8)$$

где $b_e(N_i)$ – удельный расход топлива (электроэнергии) на единицу работы.

Выражение (8) определяет абсолютную величину расхода электроэнергии. Для оценки эффективности использования ТЭД в АПК необходимо перейти к среднему часовому расходу электроэнергии за время t_n :

$$\begin{aligned} B_h &= \frac{B}{t_n} = \frac{\sum_{i=1}^{t_n} b_e(N_i) \cdot N_i t_{in}}{t_n} = \\ &= \sum_{i=1}^n b_e(N_i) \cdot N_i \cdot \bar{P}_i, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\bar{P}_i$ – статистическая оценка вероятности P_i пребывания ТЭД в состоянии δ_i .

Если в выражении (9) удельный расход электроэнергии заменить её стоимостью, то:

$$\begin{aligned} B_h &= \frac{B}{t_n} = \frac{\sum_{i=1}^{t_n} c_e(N_i) \cdot N_i t_{in}}{t_n} = \\ &= \sum_{i=1}^n c_e(N_i) \cdot N_i \cdot \bar{P}_i, \end{aligned} \quad (10)$$

где $c_e(N_i)$ – удельная стоимость топлива (электроэнергии) на единицу работы.

Поэтому формула (10) будет определять денежные затраты. Следовательно, выражение (10) определяет в модели процесса $\delta(t)$ технической эксплуатации механизма величину затрат, подлежащих минимизации, т. е. одну из целевых функций этого процесса.

Рассмотрим подробнее возможности минимизации затрат через отдельные составляющие формулы (10). Величины вероятностей P_i (или их статистические оценки $\bar{P}_i$) характеризуют долю времени пребывания процесса эксплуатации $\delta(t)$ в состояниях δ_i . С видом состояния δ_i связаны все остальные составляющие в формуле стоимости затрат

(10). Таким образом, по условию (11) происходит перераспределение значений величин P_i :

$$P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1, \quad (11)$$

Условие (11) позволяет в большей степени влиять на экономичность расхода электроэнергии. Вектор $\bar{P} = (P_1, P_2, \dots, P_n)$ определяется комплексами состояний Θ и Y и стратегией эксплуатации S_3 . По сути, вектор $\bar{P}$ в обобщенном виде полностью отражает состояние ремонтного процесса, поэтому изучение совокупности $\{P_i\}$ – одна из важнейших задач исследования процесса эксплуатации механизмов в АПК.

Другой фактор в выражении (10) – совокупность N_i . Значения N_i определяются в основном конструктивными решениями ТЭД, и поэтому субъективное воздействие на них в условиях эксплуатации очень ограничено.

Затраты на выполнение работы ТЭД зависят ещё и от удельного расхода электроэнергии механизма $b_e(N_i)$. Эта удельная характеристика механизма для каждой их серии определяется как конструкцией конкретного механизма, так и техническими нормативами по ремонту и эксплуатации электрооборудования, т. е. элементами стратегии эксплуатации S_3 .

Выводы

Следовательно, решение поставленной задачи – «повысить экономичность работы ТЭД» может быть осуществлено путем совершенствования стратегии S_3 на стадии создания и в процессе эксплуатации ТЭД.

Одним из путей совершенствования стратегии S_3 при создании новых механизмов должно быть уточнение вида зависимости $b_e(N)$ для генеральной совокупности режимов работы механизмов в АПК.

В процессе эксплуатации механизмов стратегию S_3 необходимо корректировать в соответствии с местными условиями.

Таким образом, описанная модель процесса технической эксплуатации $\delta(t)$ позволяет количественно оценивать характеристики состояний, выбирать критерии эффективности работы ТЭД и наметить пути снижения расхода топлива и электроэнергии в условиях АПК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белан, Д.Ю. Повышение надежности работы коллекторно-щеточного узла тяговых электро-

ИВАНОВ Г.Я., МАЛОЗЕЛОВ Б.В., ВИЛЬБЕРГЕР М.Е., ЗОНОВ П.В.

двигателей/ Д.Ю. Белан, В.М. Лузин // Известия Транссиба. – 2010. – № 4(4). – С. 6-11.

2. Шуп, Т. Решение инженерных задач на ЭВМ / Т.Шуп. – М.: Мир, 1982. – 238 с.

3. Дегтярев, Ю.И. Методы оптимизации: Учеб. пособие / Ю.И. Дегтярев. – М.: Советское радио, 1980. – 272 с.

4. Иванов, Г.Я. Диагностика и анализ вибрации электрических машин / Г.Я. Иванов, Б.В. Малозёмов, П.В. Зонов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2010. – № 2. – С. 326-329.

5. Балагин, О.В. Математическая модель процесса технической эксплуатации дизельных локомотивов / О.В. Балагин, А.В. Чулков, Д.В. Балагин //

Известия Транссиба. – 2010. – № 4(4). – С. 2-6.

Иванов Г.Я., проф., д.т.н., каф. ЭАПУ, Новосибирский государственный технический университет, тел. 8(343)46-15-68, E-mail: ispc_el-en-ag@ngs.ru;

Малозёмов Б.В., доц. каф. ЭТК, к.т.н., Новосибирский государственный технический университет, E-mail: mbv@emf.nstu.ru;

Вильбергер М.Е., доц. каф. ЭТК, к.т.н., Новосибирский государственный технический университет, E-mail: berrger82@mail.ru;

Зонов П.В., аспирант каф. ЭиАПУ, Новосибирский государственный технический университет, E-mail: ispc_el-en-ag@ngs.ru.