

УДК 621.333

## АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВЗОВ С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В.В. Харламов, П.К. Шкодун, Д.И. Попов, А.В. Проненко

Омский государственный университет путей сообщения

E-mail: emoe@omgups.ru

Предложено проводить приемо-сдаточные испытания тяговых электродвигателей электровозов не только в стационарных, но и в переходных режимах. На основе математического моделирования переходных процессов в цепи обмотки якоря предложен подход, позволяющий определить требования к силовому оборудованию испытательной станции, необходимые для обеспечения испытания тяговых электродвигателей с учетом параметров перегона, а также провести оценку возможности реализации необходимых режимов с использованием существующих испытательных станций.

### Ключевые слова:

Тяговый электродвигатель, диагностирование, математическое моделирование, реальные условия эксплуатации.

### Key words:

Traction electric motor, diagnostics, mathematical modeling, actual environment of operations.

Повышение качества технического обслуживания электровозов в условиях локомотивного депо, несомненно, является актуальным. Одним из путей достижения указанной цели является решение задачи совершенствования методики проведения приемо-сдаточных испытаний тяговых электродвигателей (ТЭД), в том числе при их испытаниях на коммутационную устойчивость.

В настоящее время оценку коммутационной устойчивости работы ТЭД при проведении приемо-сдаточных испытаний производят в соответствии с ГОСТ 2582-81 и разработанными технологическими картами в стационарном режиме нагрузки [1]. Вместе с тем, уровень искрения под щетками ТЭД зависит не только от постоянной составляющей тока якоря, но и от его производной по времени, которая воздействует на магнитный поток в зоне коммутации [2], что приводит к усилению неидентичности коммутационных циклов в секциях обмотки якоря и, следовательно, к значительному усложнению настройки коммутации. Возникновение искрения щеток и появление круговых огней при эксплуатации ТЭД в большей степени проявляется в нестационарных (переходных) режимах работы электродвигателей, например, при трогании электровоза, боксовании.

Следовательно, необходимо проводить испытания ТЭД не только в стационарных, но и в переходных режимах работы с учетом условий эксплуатации. Для этого необходимо сформировать методику получения информации об особенностях работы ТЭД электровоза на участке железной дороги с целью определения параметров переходных режимов в силовой цепи ТЭД. С другой стороны, полученная информация может служить основой для уточнения условий проведения приемо-сдаточных испытаний и формирования требований к силовому оборудованию испытательной станции ТЭД.

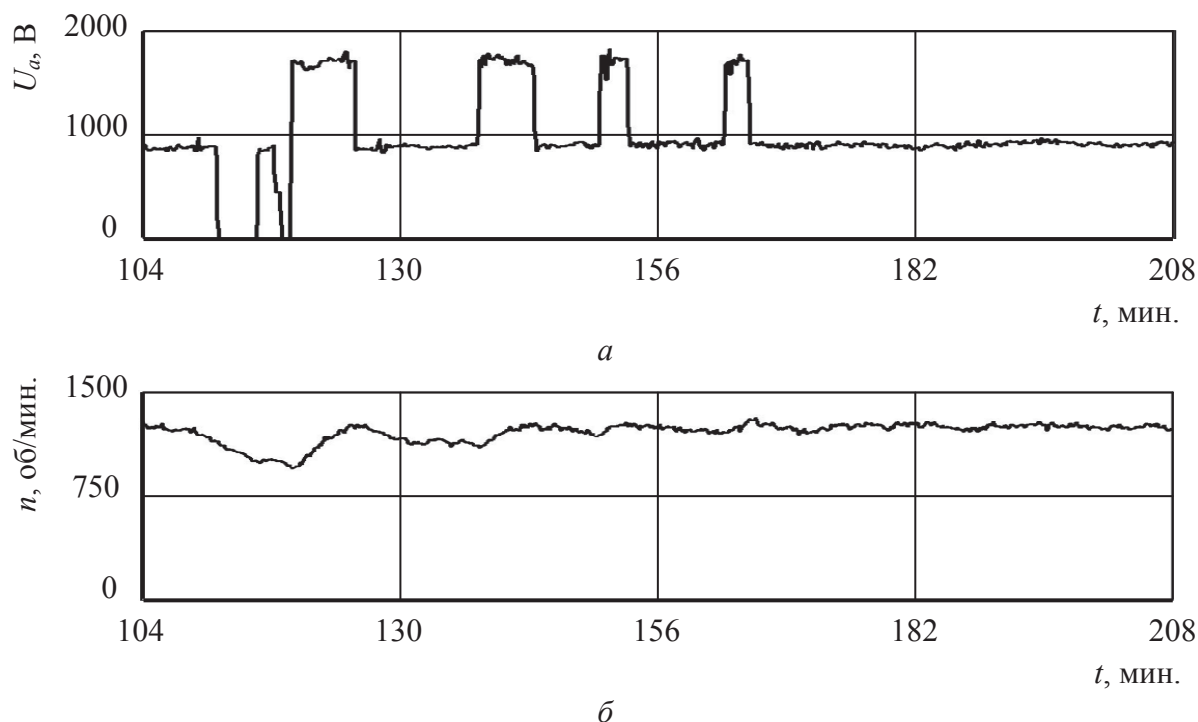
Для возможности детального анализа данного вопроса необходимо провести математическое моделирование переходных процессов в цепи обмот-

ки якоря ТЭД, которое позволит получить необходимые данные для определения режимов, устанавливаемых при проведении испытаний. В качестве исходных данных для математического моделирования переходных режимов возможно использование результатов измерений, выполненных на перегоне Ишим–Московка Западно-Сибирской железной дороги, и параметров эксплуатируемых на данном перегоне электровозов ВЛ-10 с тяговыми двигателями ТЛ-2К1. На данном перегоне рассмотрены переходные режимы при начале движения электровоза с места, осуществлении ослабления возбуждения ТЭД и др. Данные измерений параметров по одному из участков выбранного перегона приведены на рис. 1. Помимо напряжения контактной сети, схемы соединения силовых цепей ТЭД и скорости движения электровоза также регистрировалась степень ослабления возбуждения.

На основании электрической схемы соединений электровоза ВЛ-10 [3] и соответствующей схемы замещения (рис. 2) сформирована система дифференциальных уравнений, описывающая переходные процессы в якорной цепи ТЭД:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{\Sigma L_a + L_{дп}(t)} \times \\ \quad \times [U_a(t) - n(t) \cdot C_e \cdot \Phi(I_b) - I_a \cdot \Sigma R_a]; \\ \frac{dI_b}{dt} = \frac{1}{L_b + L_{н.ш}} \cdot \left[ \begin{array}{l} (U_a(t) - n(t) \cdot C_e \times \Phi(I_b)) \times \\ \quad \times \frac{L_{н.ш}}{\Sigma L_a + L_{дп}(t)} - \dots \\ \dots - I_b (R_b + R_{ш}(t)) + \\ \quad + I_a \left[ R_{ш}(t) - \Sigma R_a \cdot \frac{L_{н.ш}}{\Sigma L_a + L_{дп}(t)} \right] \end{array} \right], \end{array} \right. \quad (*)$$

где  $I_a$ ,  $I_b$  – ток якоря и возбуждения, А;  $t$  – время, с;  $U_a(t)$  – напряжение, приходящееся на один ТЭД, равное отношению напряжения сети к коэффициенту, учитывающему схему соединения двигателей



**Рис. 1.** Фрагмент результатов измерений, выполненных на участке перегона Ишим–Московка Западно-Сибирской железной дороги: а) напряжение, приходящееся на один ТЭД, с учетом схемы соединения (серийное, серийс-параллельное, параллельное); б) частота вращения якоря ТЭД

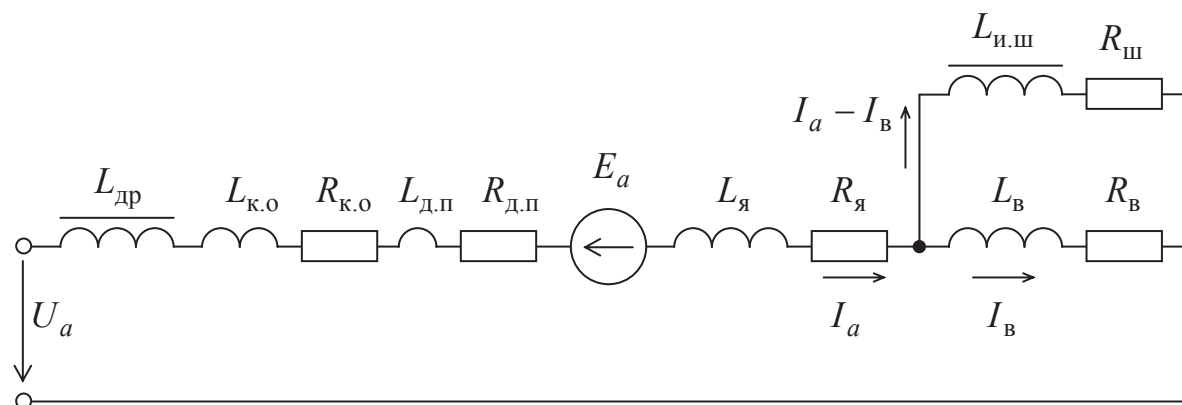
(серийное, серийс-параллельное, параллельное), В;  $n(t)$  – частота вращения якоря, об/мин;  $C_e \cdot \Phi(I_B) = E_a/n$  – отношение ЭДС обмотки якоря к частоте вращения, В·мин/об;  $R_{ш}(t)$  – суммарное сопротивление в цепи, шунтирующей обмотку возбуждения, задающее степень ослабления возбуждения, Ом;  $\Sigma R_a$  – сумма сопротивлений обмоток якоря  $R_я$ , добавочных полюсов  $R_{д.п}$ , компенсационной  $R_{к.о}$  и возбуждения  $R_в$ , Ом;  $\Sigma L_a$  – сумма индуктивностей обмоток якоря  $L_я$ , добавочных полюсов  $L_{д.п}$ , компенсационной  $L_{к.о}$  и возбуждения  $L_в$ , Гн;  $L_в$ ,  $L_{и.ш}$ ,  $L_{др}(t)$  – индуктивности обмотки возбуждения, индуктивного шунта и дросселя, Гн.

При этом следует учитывать, что индуктивность  $L_{и.ш}$  является функцией, зависящей от тока, проте-

кающего по индуктивному шунту  $I_{и.ш} = I_a - I_в$ , т. е.  $L_{и.ш} = f(I_a - I_в)$ .

В случае переключения схемы соединения ТЭД (серийное, серийс-параллельное, параллельное), которое происходит при полном возбуждении, необходимо решить только одно (первое) дифференциальное уравнение из системы (\*). При этом в сумму сопротивлений  $\Sigma R_a$  необходимо включить сопротивление добавочных резисторов  $R_d(t)$ , вводимых в цепь якоря в пусковых позициях главного вала контроллера машиниста.

При решении представленной системы дифференциальных уравнений с нелинейными коэффициентами (\*) использована программа *Mathcad* и реализованный в ней численный метод решения



**Рис. 2.** Схема замещения силовой цепи электровоза ВЛ-10

систем дифференциальных уравнений Рунге–Кутты четвертого порядка, позволяющий с необходимой точностью найти численные решения и визуализировать их в виде графиков зависимости тока якоря от времени  $I_a=f(t)$ .

В результате решения системы уравнений получены графики изменения тока якоря ТЭД в переходных режимах. Одна из характерных кривых изменения тока якоря при переключении с полного на ослабленное возбуждение представлена на рис. 3. По расчетным кривым определен ряд значений производной тока якоря по времени  $dI_a/dt$ , как тангенс угла  $\text{tg}\alpha$  между осью абсцисс и касательной к кривой тока якоря в начале переходного процесса.

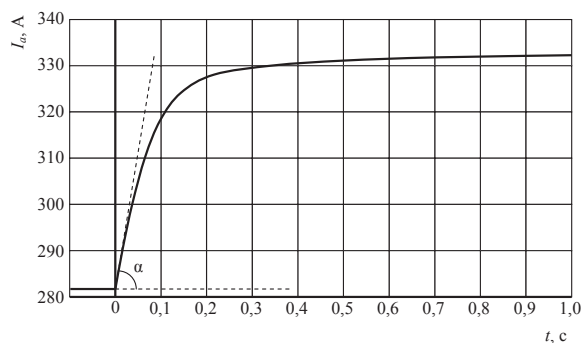


Рис. 3. Расчетная кривая тока якоря в переходном процессе при переключении с режима полного на первый режим ослабления возбуждения

Статистическая обработка результатов, полученных на расчетном перегоне для переходных процессов при переключениях в силовой цепи, позволила получить гистограммы распределения скорости изменения тока якоря. Одна из характерных гистограмм, соответствующих переходу с полного на ослабленное возбуждение для рассматриваемого участка железной дороги, приведена на рис. 4. Количество интервалов группирования на гистограмме выбрано в соответствии с формулой Стердженса [4].

Полученная гистограмма наглядно отображает распределение значений производной тока якоря для рассмотренного перегона и может быть ис-

пользована в качестве исходной информации для уточнения условий приемо-сдаточных испытаний, необходимых для решения задачи обеспечения возможности испытательной станции моделировать переходные процессы, соответствующие тем, что ТЭД испытывает в эксплуатации. В частности, из гистограммы видно, что производная тока якоря ТЭД на рассмотренном перегоне наиболее часто имеет значение от 100 до 200 А/с, а максимальное значение не превышает 800 А/с.

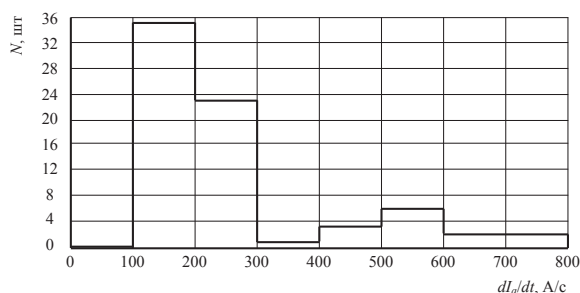


Рис. 4. Гистограмма распределения скорости изменения тока  $dI_a/dt$

#### Выводы

1. В связи со значительным ухудшением условий коммутации в нестационарных режимах предложено при приемо-сдаточных испытаниях проводить оценку коммутационной устойчивости ТЭД не только в стационарных, но и в переходных режимах.
2. На основании численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в якорной цепи ТЭД, предложена методика получения информации необходимой для формирования требований к силовому оборудованию испытательной станции тяговых электродвигателей.
3. Результаты математического моделирования переходных процессов в якорной цепи ТЭД позволяют провести оценку возможности реализации необходимых переходных режимов на существующих испытательных станциях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия.
2. Авилон В.Д. Методы анализа и настройки коммутации машин постоянного тока. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 237 с.

3. Кикнадзе О.А. и др. Электровозы ВЛ-10 и ВЛ-10У. Руководство по эксплуатации. — М.: Транспорт, 1981. — 519 с.
4. Абенгауз Г.Г. Справочник по вероятностным расчетам. — М.: Воениздат, 1970. — 536 с.

Поступила 24.01.2012 г.