

УДК 621.313.333,62-192

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

© 2021 г. В. П. Мешалкин^а, С. П. Курилин^б, М. И. Дли^б, В. И. Бобков^б *, А. С. Федулов^б

^аРоссийский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

^бНациональный исследовательский университет “МЭИ” в г. Смоленске, Смоленск, Россия

*e-mail: vovabobkoff@mail.ru

Поступила в редакцию 01.06.2020 г.

После доработки 11.09.2020 г.

Принята к публикации 18.09.2020 г.

Организация эффективной эксплуатации парка асинхронных электродвигателей химических производств является крупной отраслевой задачей, направленной на инновационное развитие химической отрасли. Стратегия эффективной эксплуатации отраслевого парка электродвигателей базируется на систематической диагностике его технического состояния. Для ее реализации необходимы сведения о текущих значениях показателей энергетической эффективности электродвигателей и их надежности. В научном аспекте это ставит ряд задач, касающихся их формулирования и систематизации требований к решению, выявления специфики объекта исследования, выработки критериев эффективности и методов их оценки. В статье анализируется представленный круг вопросов. Ключевым звеном повышения эффективности отраслевого парка электродвигателей призвана стать система периодической эксплуатационной диагностики. Формулируются задачи системы и требования к ней. Как объект эксплуатации асинхронный электродвигатель является неоднородной электромеханической системой, у которой эксплуатационные состояния и технические характеристики изменяются по мере течения времени эксплуатации. Решение задач эксплуатационной диагностики требует разработки специальных безусловных критериев текущего энергетического и технического состояния таких систем, которые должны отображать параметрическую неоднородность устройства и быть независимыми от режима ее эксплуатации. Такими критериями являются представленные в статье матрицы текущих отклонений. Они позволяют сформировать текущие оценки остаточного ресурса и вероятности сохранения работоспособного состояния электродвигателя, а также косвенно отображают текущий уровень энергетической и технической эффективности устройства. Проводится моделирование эксплуатационных состояний асинхронного электродвигателя. Приводятся результаты расчетов характеристик эксплуатационной надежности. Выработка и реализация стратегии эффективной эксплуатации отраслевого парка электродвигателей на базе аппарата матриц текущих отклонений позволяет качественно обновить силовое электрооборудование химических производств и повысить эффективность его эксплуатации.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, эксплуатационная надежность, асинхронный электродвигатель, неоднородная электромеханическая система, эксплуатационное состояние, эксплуатационная диагностика, матрицы Грина, матрицы текущих отклонений

DOI: 10.31857/S0040357121020081

ВВЕДЕНИЕ

Развитие химического комплекса России происходит в условиях действия ряда системных проблем, среди которых – высокая степень износа оборудования и высокая степень зависимости от импорта высокотехнологичной продукции [1]. Для их разрешения в рамках действующей “Стратегии развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 г.” был разработан и утвержден (распоряжение Правительства Российской Федерации от 18 мая 2016 г. № 954-р) со-

ответствующий план мероприятий, включающий ряд “дорожных карт” по приоритетным направлениям развития химического комплекса. В соответствии с ними форсированное развитие комплекса будет осуществляться по направлению “Совершенствование технического регулирования и стандартизация”. Существенная часть данного направления реализуется на силовом электрооборудовании химических производств, которое представляет собой сложные динамические химико-энерготехнологические системы, осно-

вой которых являются асинхронные электродвигатели (АЭД).

Мощность парка асинхронных электродвигателей химических производств России можно оценить по годовому уровню потребления электроэнергии химической промышленностью, составляющему около 40 млрд кВт ч. Это соответствует средней мощности потребления электроэнергии $4,6 \times 10^6$ кВт, из которой 40–60% приходится на асинхронные электроприводы. Таким образом, установленную мощность парка АЭД химических производств можно оценить в $2,3 \times 10^6$ кВт. Для сравнения отметим, что эта мощность соответствует парку из 300 тысяч электродвигателей АИР132М6. Эксплуатация такого парка АЭД требует существенных материальных и финансовых затрат. При длительности цикла обновления оборудования отрасли 10 лет, средней удельной цене АЭД 2000 руб./кВт и средней удельной массе АЭД 11 кг/кВт, необходимо ежегодно заменять 0,23 млн кВт установленной мощности на сумму 0,46 млрд руб. При этом ежегодно из эксплуатации выводятся 2,5 тысячи тонн черных и цветных металлов. К этому следует добавить расходы, связанные с аварийными заменами АЭД и потерями продукции от аварийных остановок технологического процесса. Приведенные выше оценки характеризуют задачу организации эффективной эксплуатации парка АЭД химических производств, как крупную отраслевую задачу, которую, в соответствии с “дорожной картой”, предполагается решать техническими и нормативно-регламентными средствами.

В современном представлении задача повышения энергетической эффективности и надежности электрооборудования требуют скоординированных решений для всего жизненного цикла изделия, от его проектирования и изготовления до момента завершения эксплуатации. Стратегии и критерии эффективной эксплуатации АЭД могут быть сформулированы различным образом, в зависимости от реализуемой технической политики и конкретики производств. При этом очевидно, что показатели энергетической эффективности, и надежности в них будут иметь наибольший вес.

В очерченной выше общей задаче выделяются частные направления и отдельные задачи. В частности, в ее рамках осуществляются проектно-технологические и эксплуатационные меры, направленные на повышение эксплуатационных характеристик отраслевого парка АЭД. Проектно-технологическое направление реализует решение так называемой аналитической задачи эксплуатации в виде проектно-конструкторских и технологических рекомендаций для производителей АЭД. Содержанием аналитической задачи является получение сведений о степени

соответствия конструктивных и технологических решений, принятых в ходе проектирования и изготовления АЭД, условиям и режимам эксплуатации. Источниками информации для решения задачи служат обобщенные данные диагностических тестирований, а также результаты моделирования эксплуатационных состояний АЭД. Меры эксплуатационного направления реализуют принятую стратегию эксплуатации парка и осуществляются нормативно-регламентными средствами и средствами технического управления. Направление базируется на, так называемой, прогнозной задаче эксплуатации. Содержанием этой задачи является получение сведений о работоспособности устройства, в частности – получение прогнозных оценок остаточного ресурса и вероятности сохранения работоспособности АЭД. Источником информации для решения прогнозной задачи служат данные о текущем техническом состоянии эксплуатируемого АЭД, получаемые в результате диагностического тестирования. Выходом задачи является поддержка эксплуатационных решений по реализации принятой стратегии эксплуатации парка.

Таким образом, эксплуатационная диагностика связывает воедино проектировочные решения и производственные технологии – с одной стороны, текущие характеристики энергетической эффективности и надежности АЭД – с другой стороны. По этой причине она является ключевым звеном повышения энергетической эффективности и надежности в процессе эксплуатации отраслевого парка АЭД. Повышение эффективности осуществляется путем выработки стратегии и критериев эффективной эксплуатации парка, а также путем создания методов, способов, правил и технологий ее реализации.

Отмеченные выше проектно-технологические и эксплуатационные меры должны поддерживаться соответствующим научным обоснованием. Важнейшими его элементами являются следующие научные результаты.

1. Формулирование задач эксплуатационной диагностики и требований, предъявляемых к системе эксплуатационной диагностики.
2. Постулирование АЭД как специфического объекта эксплуатации – неоднородной электро-механической системы.
3. Выработка критериев энергетической и технической эффективности АЭД, адекватных степени неоднородности и текущему техническому состоянию данного устройства.
4. Создание метода оценки показателей надежности АЭД в текущем эксплуатационном состоянии.

В данной статье авторы представляют читателю, полученные ими результаты решения перечисленных выше задач. Для обозначения асинхронных

электродвигателей в однородных и неоднородных эксплуатационных состояниях ниже, наряду с АЭД, используется аббревиатура НЭМС – неоднородная электромеханическая система.

ЗАДАЧИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СИСТЕМЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

Под эксплуатационной диагностикой далее понимается совокупность процедур диагностического тестирования, обработки диагностической информации и выработки заключения о степени эффективности, надежности и работоспособности устройства. При этом диагностическое тестирование производится процессе эксплуатации устройства, без его разборки и демонтажа. Эксплуатационная диагностика не ставит цель выявления поврежденных узлов устройства, но ее результаты могут содержать указания на них.

Система эксплуатационной диагностики призвана решать следующие задачи.

1. Служить источником информации для принятия эксплуатационных решений и, через них, реализовывать принятую стратегию эксплуатации парка АЭД.

2. Служить источником информации для принятия проектно-технологических решений и, через них, осуществлять модернизацию парка АЭД.

Для выполнения своих функций система эксплуатационной диагностики должна обладать следующими свойствами.

1. Обследования парка, сбор информации, проводятся на эксплуатируемых электродвигателях без их демонтажа и разборки. Информация включает в себя данные о техническом состоянии АЭД, а также об условиях и характере его эксплуатации.

2. Обработка и хранение информации проводится для каждого электродвигателя в течение всего жизненного цикла.

3. Обобщение данных диагностических обследований проводится постоянно и отдельно по характерным эксплуатационным группам электрооборудования. Результаты обобщения информации предоставляются проектирующим и производящим АЭД предприятиям и организациям.

4. Диагностические методы должны обладать достаточной детальностью для достоверной оценки текущего технического состояния электродвигателя и прогнозирования текущих показателей надежности АЭД.

5. В необходимых случаях система сбора и обработки информации, а также система поддержки принятия эксплуатационных решений долж-

ны опираться на интеллектуальные модели, методы и технологии.

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ КАК НЕОДНОРОДНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

По своим физическим и параметрическим характеристикам АЭД является неоднородной электромеханической системой, предназначенной для эксплуатации в однородных состояниях. На деле данный эксплуатационный принцип не выполняется как в связи с возможным действием несимметричного или несинусоидального питающего напряжения, так и по причине неравномерного эксплуатационного старения устройства.

Продемонстрируем неоднородность устройства на математической модели трехфазного АЭД с короткозамкнутым ротором, имеющим z_2 фаз. При постоянстве частоты вращения ротора математическая модель АЭД представляет собой векторно-матричное уравнение, связывающее вектор питающего напряжения u_S и векторы токов обмоток статора и ротора i_S, i_r . При этом, как правило, векторы u_S, i_S записываются в базисе трехмерного векторного пространства, а вектор i_r – в базисе векторного пространства с z_2 измерениями. Путем исключения вектора тока ротора, математической модели можно придать следующий вид:

$$u_S = Z_{Sr} i_S. \quad (1)$$

В (1) векторы напряжения и тока записаны в одном из базисов трехмерного векторного пространства, а Z_{Sr} параметрическая матрица в том же базисе. Матрица Z_{Sr} параметрически неоднородна в том смысле, что она имеет различные собственные значения по осям базиса векторного пространства

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \gg \lambda_0.$$

Для АЭД собственные значения λ_1 и λ_2 либо равны, либо относительно близки. Первый вариант соответствует устройствам без признаков эксплуатационного старения, второй – устройствам, подвергшимся эксплуатационному старению. Если справедливо неравенство $\lambda_1 > \lambda_2 \gg \lambda_0$, то неоднородность устройства проявляется в любом режиме его эксплуатации, а если справедливо неравенство $\lambda_1 = \lambda_2 \gg \lambda_0$, неоднородность проявляется при выполнении некоторых условий, но она имеет место в любом случае. Это дает основания с топологических позиций классифицировать асинхронный электродвигатель как НЭМС.

Собственные значения λ_1 и λ_2 характеризуют двумерную область векторного пространства, называемую рабочей областью, которая также может также быть параметрически однородной ($\lambda_1 = \lambda_2$)

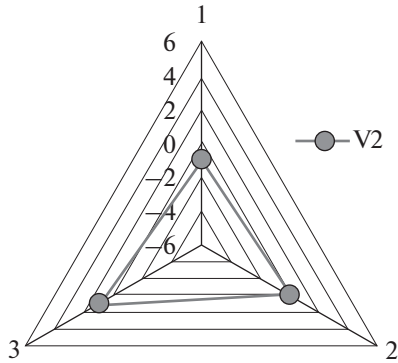


Рис. 1. Рабочая область АЭД со стороны обмотки статора.

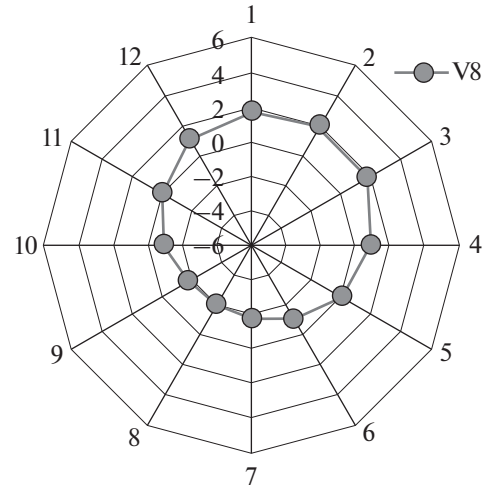


Рис. 2. Рабочая область АЭД со стороны обмотки ротора.

или параметрически неоднородной ($\lambda_1 > \lambda_2$). При этом ей, полностью или частично, принадлежат векторы напряжения и тока НЭМС. Собственное значение λ_0 характеризует одномерное подпространство “0”, ортогональное рабочей области. В это подпространство, в соответствии с (1), могут частично перераспределяться векторы напряжения и тока в результате операции с участием неоднородной матрицы Z_{sr} . Таким образом, даже при абсолютной симметрии и синусоидальности питающих напряжений, реализуются неоднородные эксплуатационные состояния НЭМС. В них перераспределение части энергии в область векторного пространства с низкими собственными значениями λ_2, λ_0 , при прочих равных условиях, снижает энергетические показатели НЭМС.

Подробное исследование векторного пространства НЭМС проведено в источниках [2–4]. Ниже, в качестве иллюстраций, приведены изображения рабочей области векторного пространства трехфазного АЭД с короткозамкнутым ротором из 12 фаз. Изображения даны с позиции наблюдателя, находящегося в подпространстве “0”.

На рис. 1 в виде подобных треугольников приведено изображение рабочей области АЭД со стороны трехфазной обмотки статора. Номерами 1, 2, 3 обозначены оси фаз обмотки А, В, С. Точками показаны координаты вектора $v2 = (-1 \ 0 \ 1)^{tr}$, принадлежащего рабочей области. Здесь и далее в тексте tr – символ операции транспонирования вектора.

На рис. 2 в виде подобных 12-угольников приведено изображение рабочей области АЭД со стороны 12-фазной обмотки ротора. Номерами 1, 2, ... 12 обозначены оси фаз обмотки ротора. Точками показаны координаты вектора

$$v8 = (\sqrt{3} \ 2 \ \sqrt{3} \ 1 \ 0 \ -1 \ -\sqrt{3} \ -2 \ -\sqrt{3} \ -1 \ 0 \ 1)^{tr},$$

принадлежащего рабочей области.

Векторы $v2$ и $v8$ приводимы к одному базису через операцию преобразования базисов. Например, вектор $v8$ преобразуется в базис трехмерного пространства операцией

$$v8_3 = V_{3 \times 12} \cdot v8,$$

где $V_{3 \times 12}$ – матрица преобразования базисов, содержащая 3 строки и 12 столбцов. Физически данная операция выполняется матрицей взаимной индукции обмоток ротора и статора. Важно подчеркнуть, что операция осуществима только благодаря наличию рабочей области, общей для обоих базисов.

Существует единственная ситуация, в которой возможны однородные и высокоэффективные эксплуатационные состояния НЭМС. Она определена следующими условиями:

- рабочая область параметрически однородна и имеет высокие собственные значения;
- векторы питающего напряжения, токов и других электромагнитных величин полностью принадлежат рабочей области.

Описанная ситуация отвечает эксплуатации АЭД без признаков эксплуатационного старения с симметричными и синусоидальными питающими напряжениями.

Существует множество ситуаций, в которых перечисленные выше условия не выполняются и в которых проявляется неоднородность АЭД. Данные ситуации отвечают эксплуатации АЭД с выраженным эксплуатационным старением и с отклонениями питающих напряжений от строгой симметрии и синусоидальности. В таких ситуациях находится большинство асинхронных электродвигателей в процессе эксплуатации. Этот

факт должен найти отражение и в методах проектирования, и в стратегии эксплуатации АЭД.

ВЫРАБОТКА АДЕКВАТНЫХ КРИТЕРИЕВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЭД

Критериями энергетической эффективности АЭД принято считать их энергетические показатели – КПД и коэффициент мощности. Однако данные показатели слабо увязаны с задачами эксплуатационной диагностики. Основная причина этого – информационное наполнение, не соответствующее задачам диагностики. Это несоответствие предполагает разработку специальных диагностических критериев. Существенным требованием к ним, кроме прочих, является требование доступности информации для их определения в условиях действующего производственного оборудования.

Классические определения КПД и коэффициента мощности трехфазного АЭД выражаются известными формулами [5]

$$\eta = \frac{M\Omega}{P_S}, \quad (2)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{P_S}{3U_S I_S}, \quad (3)$$

где M, Ω – момент на валу и частота вращения вала АЭД, P_S, U_S, I_S – потребляемая электрическая мощность, действующие значения фазного напряжения и тока обмотки статора АЭД. Известно также, что формулы (2), (3) адекватны ситуации симметричного синусоидального питания, постоянства нагрузки и полной параметрической однородности АЭД. С позиций реальных эксплуатации и текущих изменений технического состояния объекта, данная ситуация выглядит весьма локальной. Следует констатировать, что классические характеристики энергоэффективности не отвечают задачам эксплуатационной диагностики АЭД в связи с чрезмерным уровнем идеализации эксплуатационного состояния объекта.

Обобщенными критериями энергоэффективности являются выражения для КПД и коэффициента мощности, записанные для мгновенных значений электрических и механических величин и формально не зависящие от степени их симметрии, синусоидальности или параметрической однородности АЭД. Обобщенные выражения для КПД и коэффициента мощности определяются как

$$\eta = \frac{M\Omega}{(u_S, i_S)}, \quad (4)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{(u_S, i_S)}{|u_S||i_S|}. \quad (5)$$

Выражения (4), (5) имеют достаточно широкую область определения и принципиально применимы для задач эксплуатационной диагностики. Вместе с тем следует подчеркнуть, что соотношение (4) выражает энергетический баланс и имеет физико-технический смысл только при отсутствии знакопеременных потоков мощностей на электрическом и механическом входах АЭД. Как правило, это наблюдается в установившихся режимах его работы с постоянной нагрузкой.

Оценивая критерии (2)–(5) в целом, следует отметить, что основными их негативными качествами являются:

- информационное наполнение, не соответствующее задачам эксплуатационной диагностики;
- низкая доступность информации для их определения в условиях действующего электрооборудования. Прежде всего, это относится к информации о моменте на валу машины.

По информационному наполнению критерии (2)–(5) характеризуют не столько техническое состояние самого устройства, сколько энергетическую эффективность устройства в фиксированном режиме эксплуатации. В ходе эксплуатации режим АЭД может отклоняться от номинального по значениям питающего напряжения, частоты и нагрузки. Соответствующие им изменения энергетических критериев характеризуют изменения режима эксплуатации устройства, а не изменения, происходящие в самом устройстве. В этом смысле критерии энергетической эффективности (2)–(5) условны, то есть – обусловлены фиксированными значениями питающего напряжения, частоты и нагрузки. Так, например, измерение КПД при питающем напряжении $u_S = U_{Sh} (1 \ 1 \ 1)^T$, где U_{Sh} – номинальное фазное напряжение обмотки статора, даст значение “ноль”. Он указывает на то, что при данном способе питания энергетическая эффективность объекта равна нулю, но не несет в себе никакой информации о текущем техническом состоянии и работоспособности объекта при других питающих напряжениях.

По перечисленным выше причинам решение задач эксплуатационной диагностики предполагает разработку специальных критериев текущего технического и энергетического состояния АЭД. Последние могут быть прямыми или косвенными, но должны отражать возможную параметрическую неоднородность эксплуатационных состояний АЭД и должны быть безусловными, т.е. – не соотношенными с режимом эксплуатации объекта.

Текущее энергетическое и техническое состояние АЭД может быть определено путем фиксации реакций устройства на импульсные напряжения, приложенные к обмотке статора. Данный инструмент дает безусловные результаты, поскольку любые системы питающих напряжений

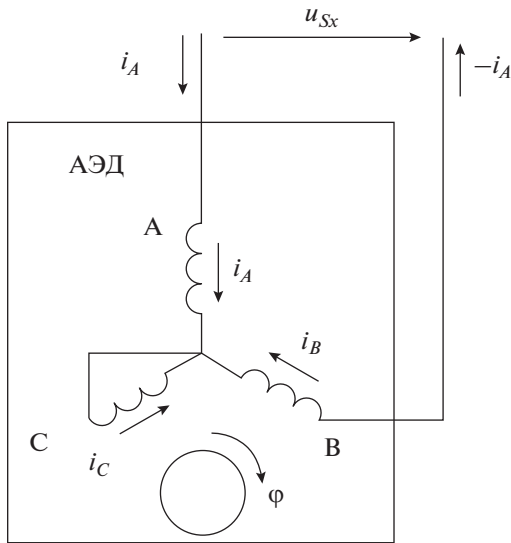


Рис. 3. Схема диагностического тестирования АЭД.

могут быть представлены как континуальные множества импульсных напряжений. Подобный подход к диагностике был назван топологическим и развит в [6–9]. Другие подходы к оценке надежности АЭД, диагностике их технического состояния и эксплуатации химических производств отражены в источниках, приведенных в библиографическом списке [10–29].

В соответствии с топологическим подходом, при проведении диагностического тестирования АЭД, векторы импульсных напряжений ориентируются по трем направлениям рабочей области векторного пространства x, y, z :

$$u_{Sx} = (\delta(t) \ -\delta(t) \ 0)^T, \quad u_{Sy} = (0 \ \delta(t) \ -\delta(t))^T, \\ u_{Sz} = (-\delta(t) \ 0 \ \delta(t))^T,$$

где $\delta(t)$ – функция Дирака. Схема соединения фаз обмотки статора АЭД при подаче напряжения u_{Sx} показана на рис. 3.

В соответствии с (1) и схемой на рис. 3 под действием напряжения u_{Sx} в обмотке статора АЭД появятся токи, вектор которых записывается как

$$i_{Sx} = (i_A \ -i_A \ i_C)^T.$$

Схемы соединения фаз обмотки статора при подаче напряжений u_{Sy} и u_{Sz} получаются из схемы рис. 3 круговой перестановкой фаз обмотки статора АЭД. Соответствующие им векторы токов

$$i_{Sy} = (i_A \ i_B \ -i_B)^T, \quad i_{Sz} = (-i_C \ i_B \ i_C)^T,$$

совместно с вектором i_{Sx} , несут в себе информацию о текущем состоянии рабочей области АЭД. В частности, непропорциональность координат сходственных векторов, например – векторов u_{Sx}

и i_{Sx} , свидетельствует о параметрической неоднородности рабочей области и частичном выходе вектора тока i_{Sx} в подпространство “0”. Фиксируемые, по мере течения времени эксплуатации, изменения сигналов i_{Sx}, i_{Sy}, i_{Sz} свидетельствует об изменении технических и энергетических свойств АЭД в связи с эксплуатационными повреждениями и старением.

Текущая информация, актуальная для фиксированного момента времени эксплуатации, сохраняется в матрице Грина. При этом для задач эксплуатационной диагностики, как правило, достаточно сохранить только амплитуды координат векторов токов. Сформированная таким образом и соотношенная с моментом времени эксплуатации t матрица Грина имеет вид

$$G(t) = \begin{pmatrix} I_{Am} & i_{Am} & -I_{Cm} \\ -I_{Am} & I_{Bm} & i_{Bm} \\ i_{Cm} & -I_{Bm} & I_{Cm} \end{pmatrix},$$

где большими символами обозначены амплитуды токов в фазах, подключенных к источнику питания (токов проводимости), а малыми – амплитуды токов короткозамкнутых фаз (индуцированных токов).

При эталонном техническом состоянии АЭД, фиксируемом в момент начала эксплуатации $t = 0$, матрица Грина имеет вид

$$G(0) = I_m \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix},$$

где I_m – амплитуда тока в любой из фаз обмотки статора, подключенных к источнику питания. Векторы – столбцы этой матрицы, задающие тестируемые направления рабочей области векторного пространства x, y, z , принадлежат рабочей области векторного пространства АЭД и сдвинуты между собой на углы $2\pi/3$. Третий столбец матрицы $G(0)$ показан на рис. 1.

Для анализа и хранения информации о текущем техническом состоянии АЭД формируются матрицы текущих отклонений, записанные в отнесенных единицах

$$\Delta G(t) = \frac{1}{I_m} \text{abs}(G(0) - G(t)).$$

В соответствии с спецификой формирования данных матриц, информация, содержащаяся в них, не соотносится с режимом эксплуатации АЭД, т.е. является безусловной. Отметим при этом, что матрицы $\Delta G(t_1), \Delta G(t_2), \dots$ не являются прямыми критериями технической и энергетической эффективности АЭД. Вместе с тем, очевидно, что любые отклонения матрицы Грина от эталонной матри-

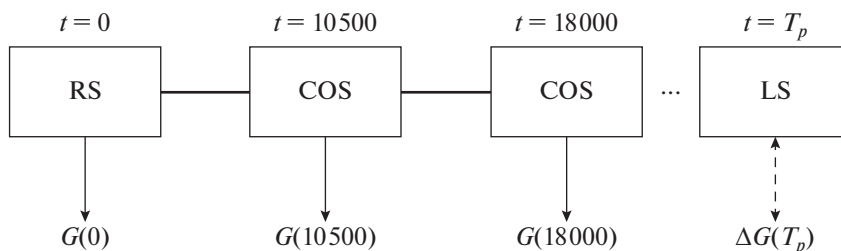


Рис. 4. Эксплуатационные состояния НЭМС.

цы $G(0)$ снижают все технические показатели устройства и, в первую очередь – энергетические показатели. Поэтому матрицы отклонений можно рассматривать, как безусловные косвенные критерии энергетической эффективности АЭД.

МЕТОД ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ АЭД

При эксплуатационной диагностике элементы матрицы текущих отклонений сопоставляются с нормами предельных отклонений, достижение которых в некоторый момент времени $t = T_p$ влечет за собой прекращение эксплуатации АЭД. Нормы предельных отклонений $\Delta I, \Delta i$ в относительных единицах формируются экспертным путем отдельно для токов проводимости и индуцированных токов. Полученная после этого нормированная матрица текущих отклонений имеет вид

$$\|\Delta G(t)\| = \frac{1}{\Delta I} \begin{pmatrix} 1 - I_{Am}^* & i_{Am}^* \frac{\Delta I}{\Delta i} & 1 - I_{Cm}^* \\ 1 - I_{Am}^* & 1 - I_{Bm}^* & i_{Bm}^* \frac{\Delta I}{\Delta i} \\ i_{Cm}^* \frac{\Delta I}{\Delta i} & 1 - I_{Bm}^* & 1 - I_{Cm}^* \end{pmatrix},$$

где символ “*” указывает на запись соответствующей величины в долях от амплитуды I_m . Нормированная матрица позволяет сформировать прогнозные оценки текущей вероятности сохранения работоспособности изделия

$$p(t) = 1 - \max \|\Delta G(t)\| \tag{6}$$

и текущего значения остаточного ресурса НЭМС

$$T_{op} = \left(\frac{1}{\max \|\Delta G(t)\|} - 1 \right) t. \tag{7}$$

На протяжении жизненного цикла эксплуатационные состояния НЭМС изменяются от эталонного состояния, имеющего место в момент выпуска с производящего предприятия $t = 0$, до предельного состояния, имеющего место в момент завершения эксплуатации $t = T_p$.

Состояния НЭМС в фиксированные моменты времени эксплуатации показаны на рис. 4.

Здесь RS – эталонное состояние НЭМС, в котором все ее технические показатели соответствуют требованиям нормативно-технической документации, а устройство полностью работоспособно. Вероятность сохранения работоспособности для состояния RS принимается равной единице. В процессе выходных испытаний снимается информация об эталонном техническом состоянии устройства и формируется эталонная матрица $G(0)$. COS – текущее эксплуатационное состояние, соответствующее фиксированному моменту эксплуатации t . На рис. 4 это время составляет 10500 и 18000 ч. В состоянии COS устройство уже подверглось эксплуатационному старению и, возможно, приобрело мелкие – не вызывающие потерю работоспособности, повреждения. В связи с этим технические характеристики устройства отклонились от эталонных значений, что можно трактовать как частичную утрату работоспособности. На рис. 4 показано также состояние LS – предельное состояние, соответствующее моменту прекращения эксплуатации. В предельном состоянии технические показатели НЭМС неустранимо ушли за рамки требований нормативно-технической документации. В этом – нормативно-техническом, смысле устройством полностью утрачена работоспособность, а вероятность сохранения работоспособности равна нулю. Состоянию LS соответствует матрица предельных отклонений $\Delta G(T_p)$. По меньшей мере, один из ее элементов достиг значения соответствующей нормы предельных отклонений.

Моделирование эксплуатационных состояний АЭД проводилось в предположении неравномерного эксплуатационного старения устройства. Его влияние на АЭД представляет рис. 5. Здесь в виде поверхностей показаны матрицы текущих отклонений $\Delta G(0) = 0, \Delta G(10500), \Delta G(18000)$, а также – матрица предельных отклонений $\Delta G(T_p)$. Значения норм предельных отклонений $\Delta I, \Delta i$ были приняты 0.15 и 0.10 соответственно.

Аппроксимация зависимостей по рис. 5 позволила определить эксплуатационный ресурс АЭД

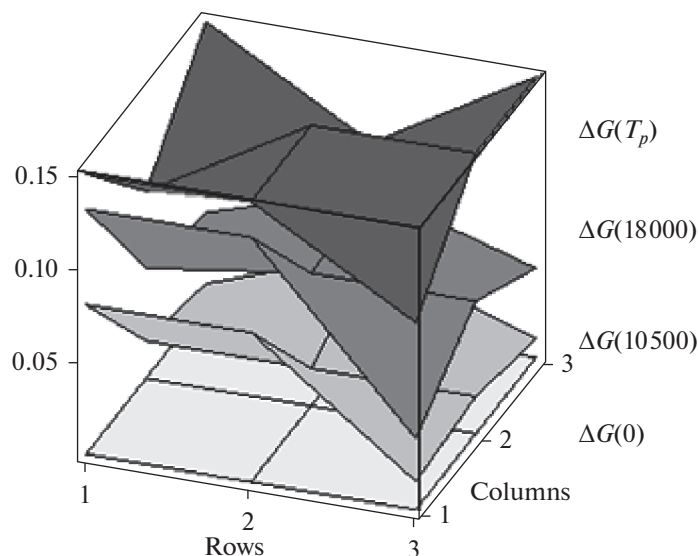


Рис. 5. Матрицы текущих отклонений для АЭД.

и дать текущие оценки остаточного ресурса и вероятности сохранения работоспособности для различных моментов времени. На рис. 6 показана зависимость остаточного ресурса АЭД по (6) от длительности эксплуатации. Точками показаны расчетные значения остаточного ресурса.

Как следует из рис. 6, текущая оценка остаточного ресурса, производимая в ходе эксплуатации, сходится к нулевому значению. Ему соответствует величина эксплуатационного ресурса АЭД 21000 ч.

На рис. 7 представлена зависимость текущей оценки вероятности сохранения работоспособности АЭД по (7) от длительности его эксплуатации.

При времени $t = T_p = 21000$ ч вероятность сохранения работоспособности равна нулю. Как указывалось выше, этот результат следует трактовать как достижение состояния LS, в котором технические показатели АЭД неустранимо ушли за

рамки требований нормативно-технической документации и устройством полностью утрачена работоспособность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Силовое электрооборудование химических производств представляет собой сложные динамические химико-энерготехнологические системы, основой которых являются АЭД. Организация эффективной эксплуатации парка АЭД химических производств является крупной отраслевой задачей,

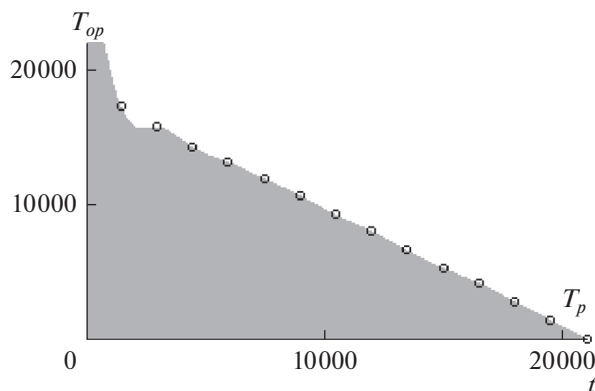


Рис. 6. Остаточный ресурс АЭД.

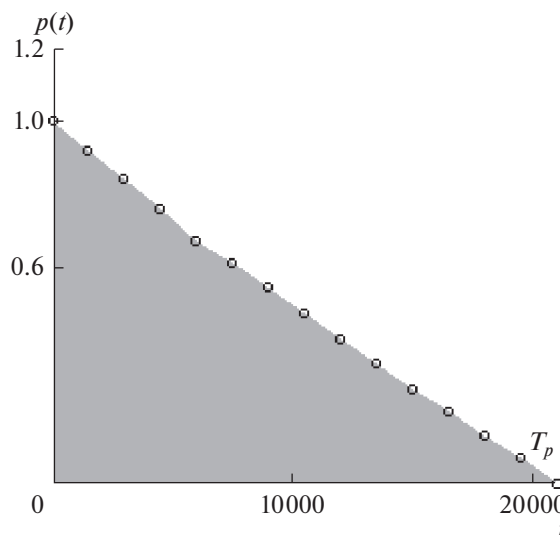


Рис. 7. Вероятность сохранения работоспособности АЭД.

решение которой направлено на инновационное развитие химического комплекса РФ.

Стратегия эффективной эксплуатации отраслевого парка АЭД базируется на систематической диагностике его технического состояния. Для выработки подобной стратегии необходимы сведения о текущих значениях показателей энергетической и технической эффективности электродвигателей. В научном аспекте эти обстоятельства выдвигают ряд задач, касающихся их формулирования и систематизации требований к решению, выявления специфики объекта, выработки критериев эффективности и методов их оценки в условиях действующего оборудования.

Ключевым звеном повышения эффективности эксплуатации парка АЭД химических производств призвана стать система периодической эксплуатационной диагностики, на основе которой решаются прогнозная и аналитическая задачи эксплуатации парка. Как объект эксплуатации АЭД является неоднородной электромеханической системой, эксплуатационные состояния и технические характеристики которой изменяются по мере роста времени эксплуатации. Зачастую при этом изменяется и степень неоднородности объекта.

Решение задач эксплуатационной диагностики предполагает разработку специальных безусловных критериев текущего энергетического и технического качества АЭД, которые должны отражать параметрическую неоднородность устройства и должны быть соотнесенными с текущим моментом эксплуатации. Такими критериями являются матрицы текущих отклонений матриц Грина. Нормированные матрицы текущих отклонений позволили сформировать текущие оценки остаточного ресурса и вероятности сохранения работоспособного состояния АЭД. Кроме того они дают возможность сделать ряд заключений о текущем техническом состоянии АЭД. В частности, это касается темпов эксплуатационного старения устройства и степени его однородности.

Выработка и реализация стратегии эффективной эксплуатации отраслевого парка электродвигателей на базе аппарата матриц текущих отклонений, позволяет качественно обновить силовое электрооборудование химических производств и повысить эффективность его эксплуатации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00283.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

A, B, C обозначения фаз обмотки статора АЭД
 $G(0)$ матрица Грина в момент начала эксплуатации, A

$G(t)$	матрица Грина в текущий момент эксплуатации, A
$\Delta G(t)$	матрица текущих отклонений
$\ \Delta G(t)\ $	нормированная матрица текущих отклонений
I_{Am}, I_{Bm}, I_{Cm}	амплитуды токов i_A, i_B, i_C в фазах, подключенных к источнику импульсного напряжения, A
I_m	значение амплитуд I_{Am}, I_{Bm}, I_{Cm} в эталонном состоянии АЭД, A
I_S	действующие значения фазного тока обмотки статора, A
ΔI	норма предельных отклонений для токов проводимости
i_A, i_B, i_C	фазные токи обмотки статора АЭД, вызванные действием импульсного напряжения, A
i_{Am}, i_{Bm}, i_{Cm}	амплитуды токов i_A, i_B, i_C в короткозамкнутых фазах, A
i_r	вектор тока обмотки ротора, A
i_S	вектор тока обмотки статора, A
Δi	норма предельных отклонений для индуцированных токов;
M	момент на валу АЭД, Нм
P_S	потребляемая электрическая мощность, Вт
$p(t)$	текущее значение вероятности сохранения работоспособности АЭД
T_{op}	текущее значение остаточного ресурса АЭД, ч
T_p	эксплуатационный ресурс АЭД, ч
t	текущее время, отсчитываемое с момента начала эксплуатации АЭД, ч
$\delta(t)$	функция Дирака
tr	символ операции транспонирования вектора
U_S	действующие значения фазного напряжения обмотки статора, В
U_{Sh}	номинальное значение фазного напряжения обмотки статора, В
u_S	вектор вращающегося напряжения, В
$V_{3 \times 12}$	матрица преобразования базисов
Z_{Sr}	параметрическая матрица АЭД, Ом
z_2	число фаз обмотки ротора АЭД
η	коэффициент полезного действия АЭД
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_0$	собственные значения матрицы Z_{Sr} , Ом
v^2	один из ортов базиса рабочей области трехмерного векторного пространства

v_8	один из ортов базиса рабочей области 12-мерного векторного пространства
v_8_3	вектор v_8 в базисе трехмерного векторного пространства
$\cos(\varphi)$	коэффициент мощности АЭД
Ω	частота вращения вала АЭД, с^{-1}
COS	текущее эксплуатационное состояние НЭМС
LS	предельное состояние НЭМС
RS	эталонное состояние НЭМС

ИНДЕКСЫ

A, B, C	принадлежащий фазе A, B, C обмотки статора
m	максимальный
r	принадлежащий ротору
S	принадлежащий статору
Sr	принадлежащий статору и ротору
x, y, z	принадлежащий направлению x, y, z рабочей области векторного пространства
*	выраженный в долях от I_m

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гавриленко В.А.* Системные проблемы химической и нефтехимической промышленности: что изменилось за период 2005–2017 гг. // Вестн. хим. пром-сти. 2018; <http://vestkhimprom.ru/author/556-gavpilenkova>
2. *Курилин С.П., Денисов В.Н.* Математическая модель неявиноплюсной электрической машины в матричной форме // Электричество. 2014. № 4. С. 43.
3. *Курилин С.П., Денисов В.Н.* Энергетические поля и избыточное рассеяние энергии в неявиноплюсной электрической машине // Электричество. 2015. № 3. С. 35.
4. *Курилин С.П., Денисов В.Н.* Топологические аспекты теории асинхронных электрических машин: монография. Смоленск: УНИВЕРСУМ, 2019.
5. *Копылов И.П.* Электрические машины: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2004.
6. *Kurilin S.P., Denisov V.N.* The Development of Topological Diagnostic Methods of Asynchronous Electric Machines // Diagn., Resour. Mech. Mater. Struct. 2018. № 6. P. 214. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2018.6.214-221>
7. *Kurilin S.P., Denisov V.N., Fedulov A.S., Dli M.I.* Scientific basis of methods for topological diagnostics of asynchronous electric machines // AIP Conf. Proc. 2018. V. 2053. Article number 030031. <https://doi.org/10.1063/1.5084392>
8. *Kurilin S.P., Denisov V.N., Dli M.I., Bobkov V.I.* A method for the operational diagnostics of induction motors // AIP Conf. Proc. 2019. V. 2176. Article number 040008. <https://doi.org/10.1063/1.5135157>
9. *Kurilin S.P., Denisov V.N., Dli M.I., Bobkov V.I.* Vector space as an area of the operation risks characteristics for asynchronous electric machines // IOP Conf. Ser.: J. Phys. 2019. V. 1260. Article number 052017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/5/052017>
10. *Демурчян К.С., Богуславский И.З.* Методы аналитического исследования токов в короткозамкнутых обмотках ротора машин переменного тока // Изв. Акад. наук. Энерг. 1992. № 4. С. 35.
11. *Степанов В.М., Свистунов Н.А.* Диагностика и управление режимами работы электромеханических и электротехнических систем автономных источников электроэнергии для собственных нужд газораспределительных объектов // Изв. Тул. гос. унив. Тех. науки. 2018. № 12. С. 96.
12. *Shprekher D.M., Kolesnikov E.B.* The Remote Method of Diagnosing the Technical Condition of Complex Electromechanical Systems // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2018.
13. *Yu M., Li M.* Fault Detection and Isolation in a Non-linear Electromechanical System // 2017 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC). Piscataway, N.J.: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2017.
14. *Veresnikov G.S., Skryabin A.V.* The Electromechanical Actuator Technical Condition Monitoring System Based on Data Mining Methods // Eleventh International Conference “Management of Large-Scale System Development” (MLSD). Piscataway, N.J.: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2018.
15. *Moon J., Leeb S.B.* Wire Less Sensors for Electromechanical Systems Diagnostics // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2018. V. 67. № 9.
16. *Калугин М.В., Бирюков В.В.* Диагностика и надежность электромеханических систем транспортного комплекса. Новосибирск: НГТУ, 2018.
17. *Гайдаш М.А.* Прогнозирование показателей надежности технических систем по результатам ускоренных по времени испытаний // Научн. горизонты. 2018. № 3(7). С. 180.
18. *Lamim Filho P.S.M., Pederiva R., Brito J.N.* Detection of stator winding faults in induction machines using flux and vibration analysis // Mech. Syst. Signal Process. 2014. V. 42. P. 377.
19. *Aksenov Y.P., Yaroshenko I.V., Noe G., Andreev A.V.* Diagnostic technology for transformers: methods synergy and double-coordinate location // 2009 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. Cargese, 2009. <https://doi.org/10.1109/DEMPED.2009.5292768>
20. *Петухов В.С., Соколов В.А.* Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Нов. ЭлектроТех. 2005. № 1(31). С. 50.
21. *Петухов В.С.* Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения // Нов. ЭлектроТех. 2008. № 1(49). С. 1.
22. *Браун М., Раутани Дж., Пэттил Д.* Диагностика и поиск неисправностей электрооборудования и цепей управления. М.: Додэка XXI, 2007.

23. *Thorsen V., Dalva M.* Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical Industry // 1997 Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 444). Cambridge, 1997. P. 109. <https://doi.org/10.1049/cp:19971048>
24. *Гольдберг О.Д., Макаров Л.Н., Хелемская С.П.* Инженерное проектирование электрических машин. М.: БАСТЕТ, 2016.
25. *Pavlov S.Yu., Kerimov R.M., Kulov N.N.* Improvement of chemical engineering processes systems analysis // Theor. Found. Chem. Eng. 2014. V. 48. № 2. P. 117. [*Павлов С.Ю., Кулов Н.Н., Керимов Р.М.* Совершенствование химико-технологических процессов на основе системного анализа // Теор. осн. хим. технол. 2014. Т. 48. № 2. С. 131.]
26. *Meshalkin V.P., Puchkov A.Y., Dli M.I., Bobkov V.I.* Generalized model for engineering and controlling a complex multistage chemical energotechnological system for processing apatite-nepheline ore wastes // Theor. Found. Chem. Eng. 2019. V. 53. № 4. P. 463. [*Мешалкин В.П., Пучков А.Ю., Дли М.И., Бобков В.И.* Обобщенная модель инжиниринга и управления сложной многостадийной химико-энерготехнологической системой переработки отходов апатит-нефелиновых руд // Теор. осн. хим. технол. 2019. Т. 53. № 4. С. 363.]
27. *Meshalkin V.P., Bobkov V.I., Dli M.I.* Automated decision support system in energy- and resource-efficiency management of a chemical-energy engineering system for roasting phosphorite pellets // Theor. Found. Chem. Eng. 2019. V. 53. № 6. P. 960. [*Мешалкин В.П., Бобков В.И., Дли М.И.* Автоматизированная система поддержки принятия решений по управлению энергоресурсоэффективностью химико-энерготехнологической системы обжига фосфоритовых окатышей // Теор. осн. хим. технол. 2019. Т. 53. № 6. С. 609.]
28. *Ostrovsky G.M., Lapteva T.V., Ziyatdinov N.N., Silvestrova A.S.* Design of chemical engineering systems with chance constraints // Theor. Found. Chem. Eng. 2017. V. 51. № 6. P. 961. [*Островский Г.М., Лантева Т.В., Зиятдинов Н.Н., Сильвестрова А.С.* Проектирование оптимальных химико-технологических систем при учете вероятностных ограничений // Теор. осн. хим. технол. 2017. Т. 51. № 6. С. 618.]
29. *Ivanenko A.Y., Yablokova M.A.* Simulation of the vertical pneumatic transport of a polydisperse material // Theor. Found. Chem. Eng. 2019. V. 53. № 3. P. 432. [*Иваненко А.Ю., Яблокова М.А.* Математическое моделирование вертикального пневмотранспорта полидисперсного материала // Теор. осн. хим. технол. 2019. Т. 53. № 3. С. 338.]