

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕСУРСА НА ОСНОВЕ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

Н.А. Королев¹, Ю.Л. Жуковский¹, А.Д. Булдыско¹, Г.Д. Баранов², П. Чен³

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: korolev_na@pers.spmi.ru

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

³ Китайский университет горного дела и технологий, Суйчжоу, Китай

Аннотация: Электромеханическое оборудование (ЭМО) минерально-сырьевого комплекса наиболее подвержено износу из-за условий эксплуатации. Более раннее обнаружение дефектов оборудования лежит в основе определения фактического технического состояния ЭМО и повышения его энергетической эффективности. Представлены результаты исследования сигналов тока статора асинхронного двигателя для раннего обнаружения развивающихся дефектов на примере подшипников. Предложен подход, основанный на сингулярном разложении обобщенного тока и восстановлении временных рядов. Проведенные экспериментальные исследования с имитацией повреждения подшипника позволили установить связь изменения компонент временных рядов с наличием разного уровня дефектов подшипника, что дает возможность идентифицировать появление неисправности на более ранних стадиях. Подобная структура представления данных позволяет формировать компонентные диагностические карты, которые впоследствии при периодической оценке возможно использовать для выявления изменений в работе электромеханического оборудования. На основе предложенных подходов рассмотрены математический аппарат и индикаторы, позволяющие оценивать уровень вклада изменения технического состояния в потери электроэнергии для различных этапов эксплуатации. Оценка энергетических потерь на ранних стадиях дефектах дает перспективу к повышению энергоэффективности и безаварийности электромеханического оборудования минерально-сырьевого комплекса за счет последующего упреждающего управления.

Ключевые слова: минерально-сырьевой комплекс, энергоэффективность, электромеханическое оборудование, диагностика неисправностей, сингулярное разложение, компоненты сигнала, дефект подшипника, анализ тока.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01292, <https://rscf.ru/project/23-79-01292/>.

Для цитирования: Королев Н. А., Жуковский Ю. Л., Булдыско А. Д., Баранов Г. Д., Чен П. Оценка энергетического ресурса на основе диагностики технического состояния электромеханического оборудования минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 5. – С. 158–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_158.

Energy resource evaluation from technical diagnostics of electromechanical devices in minerals sector

N.A. Korolev¹, Y.L. Zhukovskiy¹, A.D. Buldysko¹, G.D. Baranov², P. Chen³

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: korolev_na@pers.spmi.ru

² ITMO University, Saint Petersburg, Russia

³ China University of Mining and Technology, Xuzhou, China

Abstract: Electromechanical devices (EMD) in the minerals sector are above all subjected to wear because of the operating conditions. Advanced detection of equipment defects is the basis of true condition evaluation and energy efficiency enhancement of EMD. The studies of the asynchronous motor stator current modulations for the advanced detection of incipient defects are carried out in terms of bearings. The proposed approach uses the singular value decomposition of generalized current and the time series recovery. The experiments with simulation of bearing damage revealed the relationship of change in components of time series with various-level defects in the bearing. This makes it possible to identify initiation of a defect at an earlier stage. The data presentation structure enables forming component diagnostics cards to be used subsequently in periodic assessments and detection of changes in operation of electromechanical devices. Using the proposed approaches, the authors analyze the mathematical apparatus and indicators of contribution made by the change in the technical condition of equipment at the loss of electric power per operation stages. The power loss evaluation at the early stages of defect formation makes provision for the improvement of energy efficiency and fail-safety of electromechanical devices in the minerals sector owing to the advanced control.

Key words: minerals sector, energy efficiency, electromechanical equipment, fault diagnostics, singular value decomposition, signal components, bearing defect, current analysis.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 23-79-01292, <https://rscf.ru/project/23-79-01292/>.

For citation: Korolev N. A., Zhukovskiy Y. L., Buldysko A. D., Baranov G. D., Chen P. Energy resource evaluation from technical diagnostics of electromechanical devices in minerals sector. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(5):158-181. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_158.

Введение

Управление энергоэффективностью и техническим состоянием энергетического и электромеханического оборудования в электротехнических комплексах предприятий минерально-сырьевого комплекса (МСК) является жизненно важным компонентом в поддержании конкурентоспособности. Основные направления по повышению энергоэффективности включают использование передовых технологий — таких как при-

менение вторичных и возобновляемых источников [1 – 3], активно-адаптивных сетей [4], аккумулирования энергии [5], систем управления спросом [6, 7], интеллектуального учета энергии [8], цифровых двойников [9], интернета вещей [10], передовых систем автоматизации и управления энергопотреблением и энергоменеджмента [11]. Эти технологии позволяют отслеживать, контролировать и оптимизировать генерацию, транспорт и потребление энергии, используя пара-

метры и критерии энергоэффективности для устойчивого управления и развития энергетических комплексов [12–14].

Техническое состояние оборудования — еще один из факторов влияния на показатели энергетической эффективности. Эксплуатация оборудования в неудовлетворительном техническом состоянии приводит к увеличению потерь энергии, связанных с непредвиденным выходом из строя оборудования и, соответственно, нарушением технологического процесса, а также повышенному потреблению электроэнергии на 3–7% при той же полезной мощности на длительном интервале времени, который соответствует эксплуатационному этапу жизненного цикла оборудования [15, 16]. По мере роста цен на энергию во всем мире стимулы для предприятий более эффективно эксплуатировать свое оборудование со временем будут усиливаться [17]. Например, электрическая энергия для привода насоса представляет собой основной фактор эксплуатационных расходов насосной системы в течение всего срока службы. Эксплуатационные расходы состоят из энергопотребления — 85%, обслуживания — 10% и стоимости оборудования — 5% [18, 19]. При такой высокой стоимости энергопотребления важно избегать любых условий эксплуатации, влияющих на производительность насоса, и повышать рентабельность эксплуатации оборудования. При этом на объектах МСК, спецификой которых зачастую является удаленность предприятия, сложность логистики доставки энергии и запасных частей, ограниченный доступ к оборудованию, отказ даже одного элемента производственной системы приведет к увеличению времени простоя. Также в соответствии с целями устойчивого развития необходимо учитывать факторы влияния на окружающую среду, включая повреждение при транспортировке и хранении,

а также загрязнение в случае возникновения аварии [20]. Поэтому особенно актуально по мере продвижения добычи полезных ископаемых в более труднодоступные регионы развивать методы прогнозирования технического состояния оборудования и оценки рисков, в том числе используя критерии энергетической эффективности [21].

По данным международного энергетического агентства, электродвигатели потребляют более 40% производимого в мире электричества. Наиболее распространенным типом промышленных двигателей, используемых сегодня, являются трехфазные асинхронные двигатели, более 90% которых представляют собой асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором [22]. И даже небольшое повышение эффективности электродвигателей может значительно снизить потребление энергии и выбросы. Потенциал повышения энергоэффективности электромеханических систем с нерегулируемым электроприводом составляет порядка 20–30%, что эквивалентно снижению общего потребления электроэнергии на 10%.

Промышленные предприятия в настоящий момент оснащаются системами, позволяющими автоматически собирать и анализировать параметры технологического процесса, оборудования и систем энергообеспечения, однако отсутствие моделей выявления дефектов и оценки затрат энергии, связанных с уровнем технического состояния, не позволяют в полной мере использовать собранные данные. Основные цели использования данных в основном включают оценку снижения производительности, построение индекса работоспособности и прогнозирование остаточного срока службы оборудования [23–25]. Однако тенденция в промышленности и академических кругах заключается в том, чтобы разработать эффективные способы ран-



Рис. 1. Структура системы диагностики ЭМО

Fig. 1. Structure of the electromechanical equipment diagnostic system

него обнаружения деградации компонентов двигателя и выявлять энергетические потери, связанные с техническим состоянием [26 – 28].

Таким образом, цель данного исследования заключается в качественной и количественной оценке энергетической эффективности при развитии дефектов на примере деградации подшипника.

Решения по выявлению неисправностей (дефектов) электромеханического оборудования (ЭМО) следует разделять на уровни, каждый из которых определяет качество диагностики. Формально разделение происходит на аппаратный и программный уровни (рис. 1). Аппаратный уровень в технической диагностике в первую очередь построен на первичных преобразователях (датчиках), технические характеристики (точность, чувствительность, частота дискретизации и др.) которых определяют качество формирующихся первичных (сырых) диагностических данных. В части контроля ЭМО широко применяются датчики:

- вибрации на пьезоэлементах (вибрационный и акустический анализ), обеспечивающие в большей степени контроль механических узлов [29, 30].
- тока и напряжения трансформаторного типа и на эффекте Холла (анализ электрических и энергетических параметров СЭС и ЭМО) [31, 32];
- частичных разрядов на высококачественных трансформаторах тока и конденсаторах (контроль частичных раз-

рядов) для оценки состояния изоляции высоковольтного оборудования [33];

- температуры (контроль и защита по пороговым значениям эксплуатации) [34];
- электромагнитного поля (контроль электромагнитного поля) статора, ротора и в воздушном зазоре [35].

Комплектность, конфигурации датчиков и выбор узлов контроля формируются исходя из технико-экономического обоснования ЭМО в зависимости от мощности, класса напряжения, степени ответственности и ряда технологических параметров.

Методы

Учитывая продолжительный режим работы ЭМО на предприятиях МСК и длину жизненного цикла эксплуатации, составляющую более 15 – 20 лет, необходимо фиксировать наличие дефекта и оценивать развитие потерь, обусловленных видом и уровнем дефекта [36, 37]. Для создания эффективной модели управления жизненным циклом ЭМО необходимо иметь инструменты, помогающие определить момент времени, когда дефект начал себя проявлять, и когда оборудование требует замены на основании составленного заранее плана использования.

Более 40% отказов ЭМО вызваны выходом из строя подшипника, поэтому в данном исследовании делается акцент на исследовании методов выявления дан-

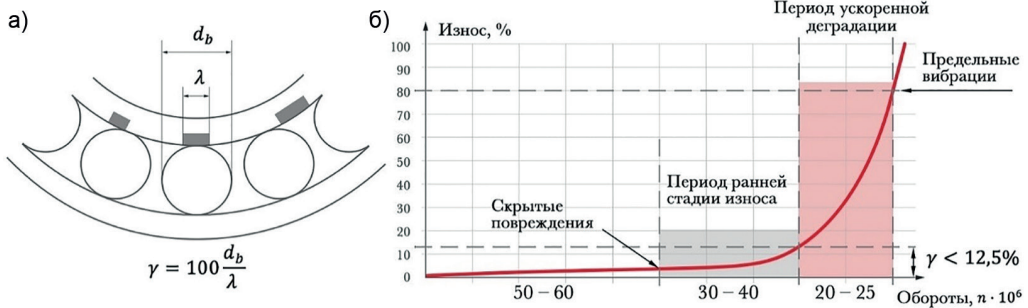


Рис. 2. Характеристики износа внутреннего кольца подшипника: общий вид отношения трещины к телу качения (а); стадии износа подшипника (б)

Fig. 2. Characteristics of bearing inner ring wear: general view of the spall to rolling element ratio (a); stages of bearing wear (b)

ного дефекта на ранней стадии по электрическим параметрам [38].

Подшипники выходят из строя из-за усталостного разрушения, вызванного высокими циклическими нагрузками между телами качения и дорожками качения. Исходя из идеальных условий, срок службы определяет минимальное количество часов работы, которое должен обеспечить подшипник при правильной установке и эксплуатации в пределах своих проектных ограничений. Однако в полевых условиях отказ подшипника происходит преждевременно и в большинстве случаев обусловлен факторами окружающей среды, производства или условий эксплуатации, таких как чрезмерная температура, неправильная смазка, повышенная нагрузка, воздействие вибрации и прохождения электрического тока через подшипник.

Каждый из факторов, приводящих к отказу, вызывает свои характерные первичные или скрытые повреждения (износ, вмятины, повреждение поверхности, коррозия, повреждение электрическим током), которые приводят к вторичным (отслаиванию, трещинам и повреждениям каркаса). Неисправные подшипники качения создают механические вибрации на скоростях вращения каждого компонента (внутреннее кольцо, сепаратор, тела качения и наружное кольцо)

в результате циклических напряжений или периодических ударов на дефекте. Эти характеристические частоты, относящиеся к дорожкам качения и шарикам или роликам, рассчитываются по размерам подшипников и скорости вращения электрического двигателя. Как показано на рис. 2, износ подшипника происходит постепенно: инкубационный период от 50 до 60 млн оборотов; стадия начального развития разрушения — от 30 до 40 млн оборотов; ускоренная деградация — от 20 до 25 млн оборотов, при которой за относительно короткий срок повреждение существенно увеличивается и впоследствии происходит отказ [39].

Неисправные подшипники генерируют различные силы, вызывающие повышение амплитуды вибрации до 85% от номинальных [40]. Это приводит к увеличению потребления энергии, которая, по различным оценкам для насосных систем, может увеличиваться до 14%, при этом общий КПД снижается до 18% [41, 42]. Обнаружение разрушения подшипника считается ранним, когда диаметр трещины λ меньше 12,5% диаметра шарика подшипника d_b [43]. Поскольку деградация подшипника на ранней стадии очень низка, величина изменения диагностических параметров чрезвычайно мала и классическими средствами в условиях реального предприя-

тия может не обнаруживаться. Наиболее распространенными причинами повреждения подшипников являются ошибки смазывания — 36%, монтажа — 16%, загрязнение смазки — 14% и усталостный износ — 34% [44].

Для формирования общего подхода к идентификации различного вида дефектов необходимо перейти к обобщенной задаче исследования и разложения временных рядов. Учитывая скорость распространения интеллектуальных систем энергообеспечения в работе, используются подходы к обнаружению дефектов на основе электрических параметров.

Предобработка сигналов. Анализируя форму фазных токов и напряжений статора АД, при возникновении дефектов наблюдаются соответствующие искажения только в токе, качественная оценка которого выполняется на основе преобразования Парка-Горева [45 – 47]. Преобразование Парка-Горева (формулы (1), (2)) осуществляет переход от трехфазной системы ABC к однофазной dq что позволяет отслеживать траектории векторов (годографов) тока $I_s(t)$ и напряжения $U_s(t)$ вместо 6 фазных координат $i_A(t), i_B(t), i_C(t), u_A(t), u_B(t), u_C(t)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_d(t) = \left[\sqrt{\frac{2}{3}} \right] \cdot i_A(t) - \left[\sqrt{\frac{1}{6}} \right] \cdot i_B(t) - \left[\sqrt{\frac{1}{6}} \right] \cdot i_C(t) \\ i_q(t) = \left[\sqrt{\frac{1}{2}} \right] \cdot i_B(t) - \left[\sqrt{\frac{1}{2}} \right] \cdot i_C(t) \\ I_s(t) = i_d(t) + j \cdot i_q(t) \\ M(t) = |I_s(t)| = \sqrt{i_d(t)^2 + i_q(t)^2} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d(t) = \left[\sqrt{\frac{2}{3}} \right] \cdot u_A(t) - \left[\sqrt{\frac{1}{6}} \right] \cdot u_B(t) - \left[\sqrt{\frac{1}{6}} \right] \cdot u_C(t) \\ u_q(t) = \left[\sqrt{\frac{1}{2}} \right] \cdot u_B(t) - \left[\sqrt{\frac{1}{2}} \right] \cdot u_C(t) \\ U_s(t) = u_d(t) + j \cdot u_q(t) \\ M(t) = |U_s(t)| = \sqrt{u_d(t)^2 + u_q(t)^2} \end{array} \right. \quad (2)$$

где $i_d(t), i_q(t), u_d(t), u_q(t)$ — проекции обобщенных векторов тока $I_s(t)$ и напряжения $U_s(t)$ асинхронного двигателя (АД) в двухфазной вращающейся системе координат — dq ; $i_A(t), i_B(t), i_C(t), u_A(t), u_B(t), u_C(t)$ — мгновенные значения фазных токов и напряжения статора АД.

Для выделения частотных составляющих, соответствующих дефектам, применяют быстрое преобразование Фурье (БПФ), разложение регистрируемого сигнала в сумму гармонических сигналов с характерной амплитудой, частотой и фазой (3). В составе спектра сопоставляют выявленные частотные составляющие с расчетными по конструктивным параметрам электродвигателя [48].

$$x(t) = \sum_{n=1}^N X_n e^{\sigma_n t} \cos(2\pi f_n t + \theta_n), \quad (3)$$

где $x(t)$ — регистрируемый дискретный сигнал мгновенных значений; X_n — амплитуда n -й гармонической составляющей в $x(t)$; σ_n — коэффициент затухания; f_n — частота n -й гармонической составляющей в $x(t)$; θ_n — фазовый сдвиг.

В спектре тока присутствуют большое количество частотных составляющих помимо компонент, характеризующих дефект. При этом при различных режимах работы и нагрузке, качестве электрической энергии в узле питания и при других внешних факторах наблюдаются нелинейные изменения амплитуд и частот с наложением частотных составляющих. С целью эффективного разделения и отслеживания составляющих в различных сигналах все чаще применяют интеллектуальные методы разложения временных рядов [49–51]. Предлагаемый алгоритм, основанный на сингулярном разложении, может применяться для обнаружения компонент, связанных с повреждением, сглаживания временного ряда, для исследования изменения при деградации подшипника и развитии повреждений, обусловленных его износом.

Построение траекторной матрицы. Сигналы тока регистрируются при определенном режиме работы и уровне нагрузки с проявлением дефекта, преобразуются в вектор X представляющий собой упорядоченный набор N мгновенных значений тока [52] с последующей процедурой вложения — преобразование исходного одномерного ряда $X = [x_1, \dots, x_N]$ длины N в последовательность L -мерных векторов, число которых равно $K = N - L + 1$ с длиной окна L где $1 < L < N$:

$$X_i = (x_{i-1}, \dots, x_{i+L-1})^T, \quad 1 \leq i \leq K. \quad (4)$$

Данные векторы образуют траекторную матрицу $X = [X_1; \dots; X_K]$ исходного

временного ряда, которая является Ганкелевой [53] и имеет одинаковые элементы на диагонали $i + j = \text{const}$:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_K \\ x_2 & x_3 & x_4 & \dots & x_{K+1} \\ x_3 & x_4 & x_5 & \dots & x_{K+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_L & x_{L+1} & x_{L+2} & \dots & x_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

Сингулярное разложение (Singular value decomposition — SVD) для матрицы $A \in R^{m \times n}$ имеет вид

$$A = U \Sigma V^T, \quad (6)$$

где $U = (u_1, u_2, \dots, u_m) \in R^{m \times m}$ — унитарная матрица левых сингулярных векторов; $V = (v_1, v_2, \dots, v_n) \in R^{n \times n}$ — унитарная матрица правых сингулярных векторов; Σ — диагональная матрица размером $m \times n$ диагональные элементы которой — неотрицательные значения сингулярных чисел матрицы A в порядке убывания [54, 55]:

$$\Sigma = [\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m), 0] \in R^{m \times n},$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots, \sigma_m > 0$$

Для разложения полученной на предыдущем шаге траекторной матрицы X рассмотрим матрицу $S = XX^T$ собственные числа которой $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_L \geq 0$ неотрицательны и взяты в порядке убывания. Обозначим

$$d = \text{rank } X = \max\{j : \lambda_j > 0\},$$

U_1, \dots, U_L — соответствующие собственные векторы матрицы S ;

$V_j = X^T U_j / \sqrt{\lambda_j}, j = 1, \dots, d$ — факторные векторы.

Тогда разложение траекторной матрицы может быть записано следующим образом:

$$X = X_1 + \dots + X_d, \quad X_j = \sqrt{\lambda_j} U_j V_j^T, \quad (7)$$

где $(\sqrt{\lambda_j} U_j V_j^T)$ – j -я собственная тройка сингулярного разложения, содержащая сингулярное значение $\sigma_j = \sqrt{\lambda_j}$, левый сингулярный вектор U_j и правый сингулярный вектор V_j траекторной матрицы X :

$$X = \sum_i X_i, X_i = \sigma_i U_i V_i^T. \quad (8)$$

Реконструкция исходного сигнала. На заключительном этапе алгоритма каждая из матриц X_{id} из разложенных преобразуется обратно в форму исходного объекта X . Эта операция осуществляется с помощью ганкелизации матриц (диагонального усреднения). Диагональное усреднение, примененное к каждой результирующей матрице компонент, создает восстановленные временные ряды. Таким образом, исходный ряд раскладывается в сумму восстановленных рядов.

Обсуждение результатов

В ходе работы выполнена деградация поверхности внутреннего кольца подшипника на заднем подшипниковом щите асинхронного двигателя в виде градиционных раковин. Условия, при которых регистрировались три набора мгновенных значений фазных токов и напряжений:

- без дефектов (без обнаруженных дефектов, $\gamma \leq 1\%$);
- 1 раковина внутреннего кольца ($1\% < \gamma \leq 12,5\%$);
- 3 раковины внутреннего кольца ($12,5\% < \gamma \leq 20\%$).

Развитие дефекта прослеживается по форме фазных токов (см. рис. 3, а), а также в девиации траектории годографа обобщенного тока статора (рис. 3, б) и выделенных искажений в виде модуля тока согласно (1), (2). Вид дефекта устанавливается по частотным составляющим спектров фазных токов и модуля обобщенного тока (рис. 3, в), определяемых по расчетным и паспортным параметрам [47] согласно

$$f_{rb} = \frac{n}{2} \cdot f_{rm} \cdot \left[1 \pm \left(\frac{D_{ball}}{D_{pit}} \cdot \cos \beta \right) \right], \quad (9)$$

где f_{rm} – частота вращения ротора; n – количество шариков в подшипнике; β – контактный угол; D_{pit} – диаметр окружности центров шаров; D_{ball} – диаметр шара.

При этом искажений в годографе обобщенного напряжения не наблюдается (рис. 3, в), что исключает влияние качества электроэнергии сети на диагностические данные.

В результате сингулярного разложения обобщенного тока (см. рис. 4, а, б) и восстановления временных рядов (см. рис. 4, в–е) мы получаем упорядоченное по убыванию представление компонент. Используя уровень вклада и отслеживание перемещения характерных временных рядов, можно наблюдать как за появлением новых компонент в сигнале тока, так и за изменением вклада определенных компонент в общую структуру. При появлении и увеличении дефекта компонент как нестационарного, так и стационарного характера увеличивают свой вклад в общую структуру сигнала, что приводит к увеличению их порядковых номеров (рис. 4, з–е). Такая структура представления данных позволяет формировать сингулярные компонентные диагностические карты (СКДГ), которые впоследствии при периодической оценке возможно использовать для выявления изменений в работе электро-механического оборудования.

Оценка относительного вклада компонент в основной сигнал, а также кумулятивный вклад рассчитываются по следующим выражениям:

$$RC_i = \frac{\sigma_i^2}{\sum_{k=0} \sigma_k^2}, \quad \sum_{i=0}^i RC_i = \frac{\sum_{j=0}^i \sigma_j^2}{\sum_{j=0} \sigma_k^2}. \quad (10)$$

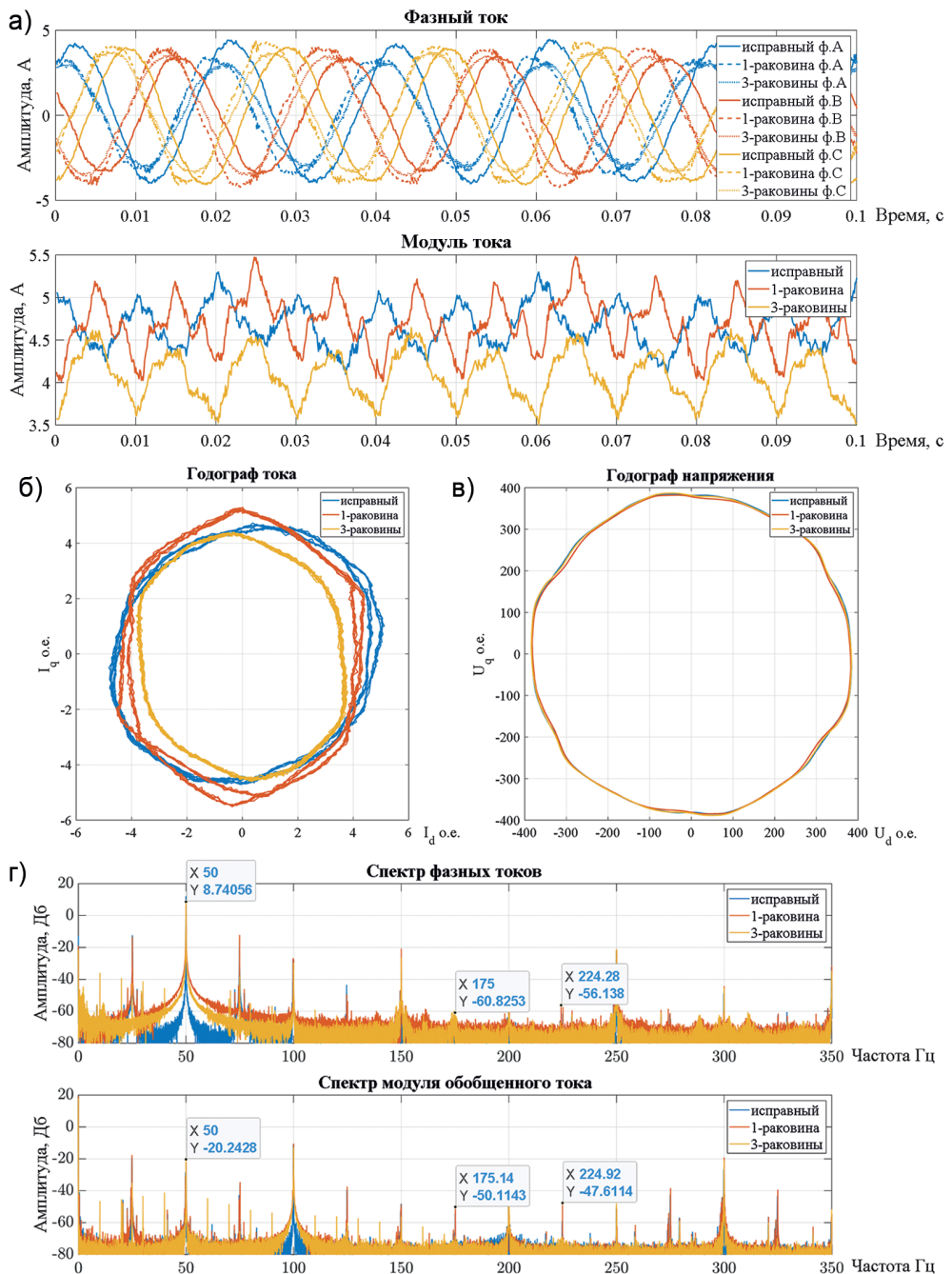


Рис. 3. Анализ потребляемого тока и напряжения: фазные токи с модулем обобщенного тока (а); годограф обобщенного тока статора (б); годограф обобщенного напряжения (в); спектры фазных токов и модуля обобщенного тока (г)

Fig. 3. Analysis of current and voltage consumption: phase currents with generalized current module (a); generalized stator current hodograph (b); generalized voltage spectrum (v); spectrums of phase currents and generalized current module (g)

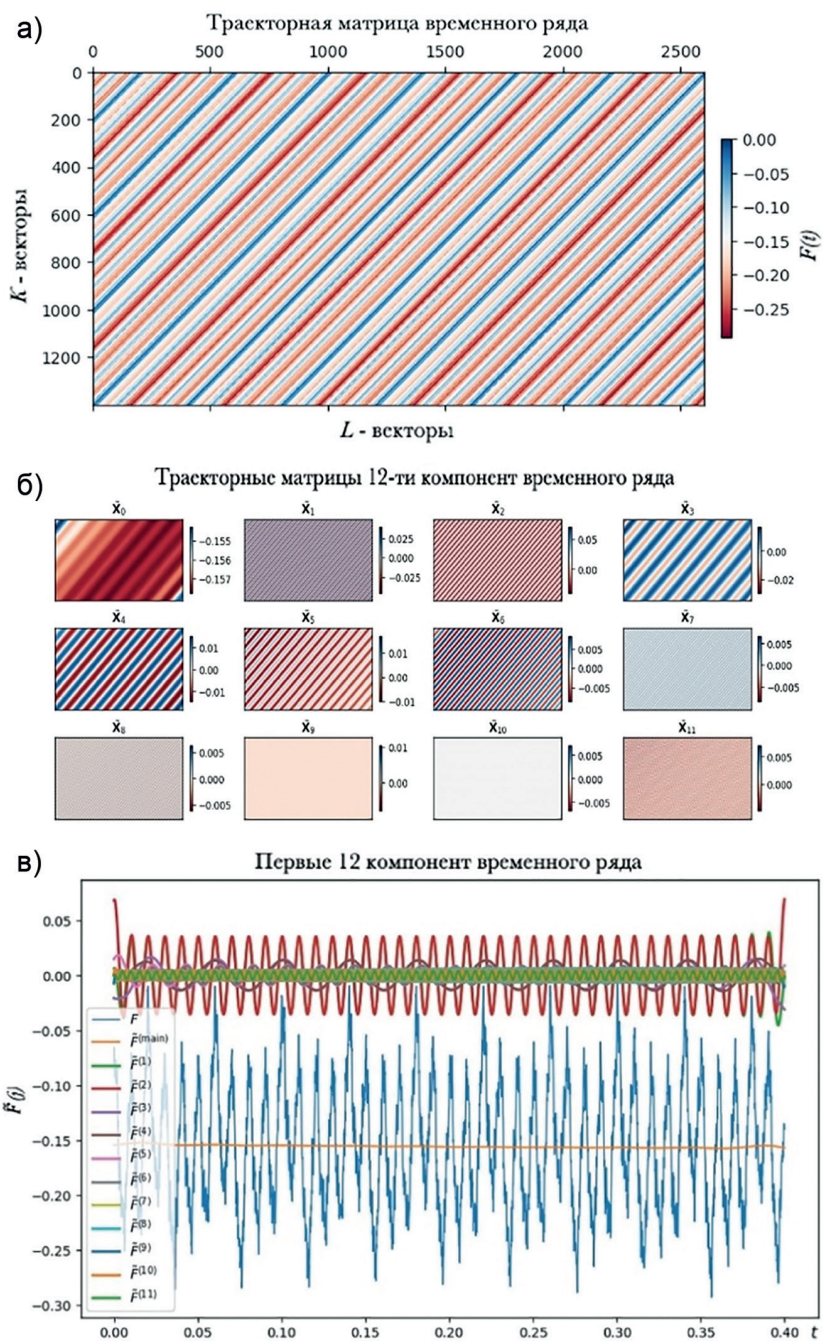


Рис. 4. Построение траекторной матрицы: разложение исходного сигнала тока (а); разложение на компоненты (б); совокупное восстановление временных рядов компонент по траекторным матрицам сигналов тока (в)

Fig. 4. Construction of the trajectory matrix: decomposition of the original current signal (a); decomposition into components (b); combined reconstruction of the time series of the components by the trajectory matrices of current signals (v)

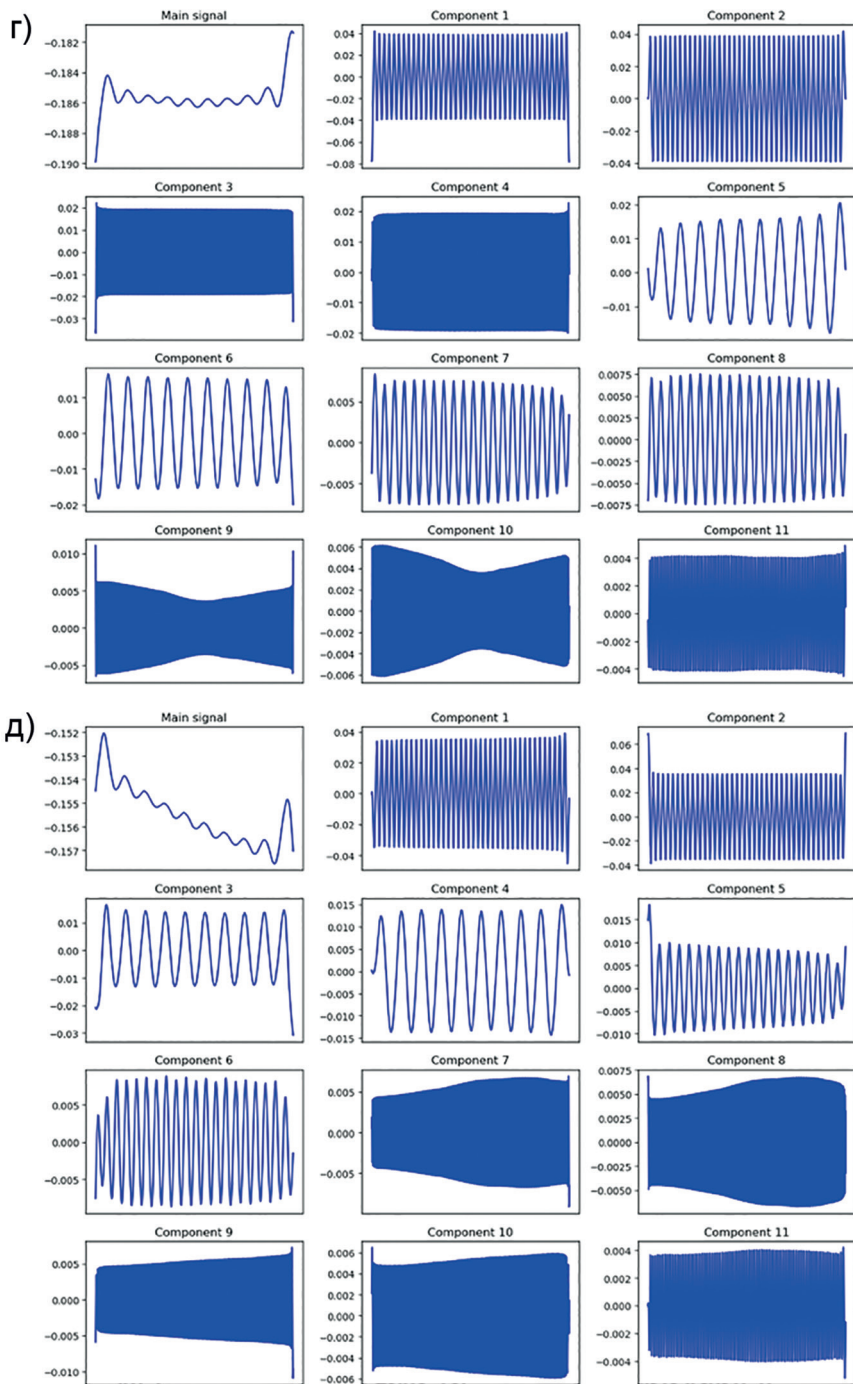


Рис. 4. Построение траекторной матрицы: индивидуальное восстановление временных рядов для подшипника без дефектов (г); для подшипника с одной раковинной (д)

Fig. 4. Construction of the trajectory matrix: individual reconstruction of the time series for the bearing without defects (g); the bearing with one spall (d)

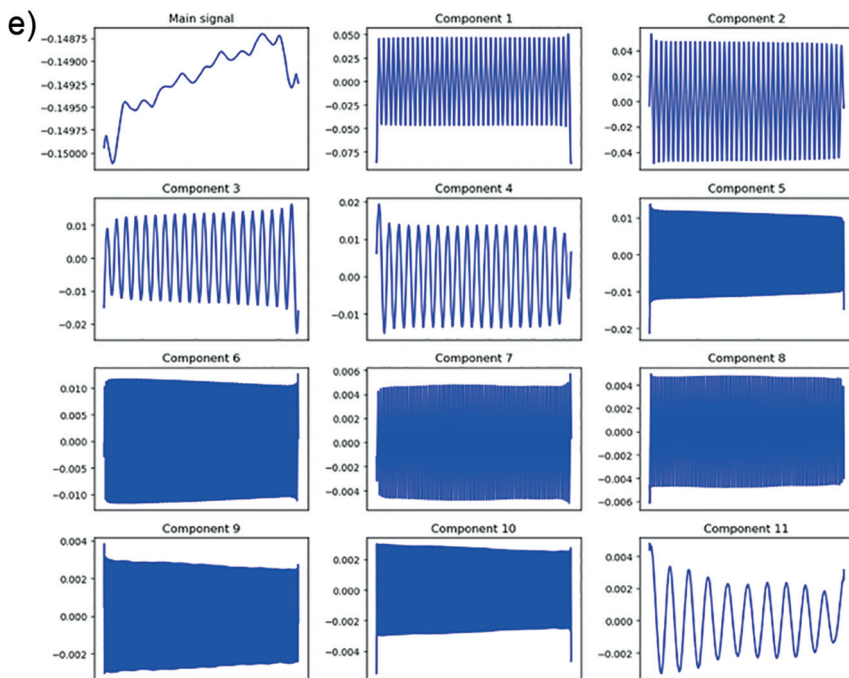


Рис. 4. Построение траекторной матрицы: для подшипника с тремя раковинами (е)
 Fig. 4. Construction of the trajectory matrix: the bearing with three spalls (e)

Таблица 1

Сравнение полученных результатов расчета вклада компонент
Comparison of the obtained results of the component contribution calculation

№ п/п	Относительный вклад			Кумулятивный вклад		
	без дефектов	1 раковина	3 раковины	без дефектов	1 раковина	3 раковины
0	87,551	87,515	81,342	87,551	87,515	81,342
1	4,823	4,189	7,926	92,375	91,704	89,269
2	4,812	4,183	7,924	97,186	95,887	97,193
3	0,759	0,935	0,663	97,946	96,822	97,856
4	0,751	0,934	0,661	98,697	97,756	98,517
5	0,178	0,727	0,387	98,874	98,483	98,904
6	0,175	0,720	0,387	99,049	99,203	99,291
7	0,124	0,117	0,076	99,173	99,320	99,367
8	0,124	0,116	0,076	99,297	99,435	99,442
9	0,091	0,066	0,044	99,387	99,501	99,486
10	0,090	0,065	0,044	99,477	99,566	99,530
11	0,047	0,051	0,022	99,524	99,617	99,552

Примечание: Цвет отображает присутствие и уровень вклада одной и той же компоненты при изменении состояния подшипника.

Выделение компонент, которые при появлении дефекта изменяются на диагностической компонентной карте, позволяет сопоставить рост вклада с увеличением дефекта и ростом потерь мощности и энергии.

Как видно из табл. 1, отслеживание проявления дефекта на ранней стадии по компонентам $X_{10} - X_{12}$ у которых кумулятивный вклад составляет более 95–97%, не представляется возможным по причине незначительного изменения, которое может быть обусловлено нестационарностью множества факторов, в том числе особенностями самого способа разложения. При трех раковинах явно прослеживается снижение вклада компоненты X_{10} относительно нормального состояния и увеличение вклада X_{11} , X_{12} ; в итоге вклад первых шести компонент увеличивается относительно исходного значения на 79,48%, увеличение вклада компонент с 3 по 6 относительно исходного – в 3,9 раз.

Для однозначной оценки вклада и фиксации проявления компонентного изменения в сигнале тока, обусловленного именно наличием начальной стадии дефекта, необходимо выделить компоненты, которые при наличии повреждения изменяют свое положение на компонентной диагностической карте, и просуммировать их вклад во всех трех состояниях.

Для раннего обнаружения дефекта необходимо выделение компонент $X_{11} - X_{16}$ при появлении 3 раковин подшипника и суммирование вклада соответствующих временных рядов. Прирост вклада компонентного состава (см. табл. 1) позволяет явно определить наличие зарождающегося дефекта, а впоследствии наблюдать за его развитием. При этом суммарный вклад компонент $X_{13} - X_{16}$ более информативен для отслеживания начальной стадии, когда компоненты низких порядков $X_{17} - X_{111}$ начинают уси-

ливать свой вклад при развитии повреждения (см. рис. 4, z-e).

Переход к оценке энергетического ресурса при такой дискретности регистрируемых данных заключается в оценке потерь энергии за полный оборот вала ротора и сравнении полученных значений с предыдущим и начальным состоянием. Для вычисления времени оборота вала асинхронной машины $t_{o.p.}$ требуется прямой или косвенный контроль частоты вращения ротора ω_r или угла положения ротора θ_r . Вычисление изменения потерь активной мощности $\Delta W(t_{o.p.})$ в единицу времени, вызванных дефектом подшипника, осуществляется по формуле (11). Аналогично данное соотношение позволяет оценить изменение как активной, так и реактивной энергии (рис. 5) в единицу времени на всех стадиях развития дефекта (табл. 2).

$$\Delta W(t_{o.p.}) = \int_0^{t_{o.p.}} (p_{i+1}(t_{o.p.}) - p_i(t_{o.p.})) dt, \quad (11)$$

где $p_i(t_{o.p.})$ – мгновенная мощность i -го оборота вала ротора; $t_{o.p.}$ – время оборота вала ротора.

Результаты оценки энергетических потерь (см. табл. 2) и сопоставление вклада компонентного состава при повреждениях (см. рис. 6) могут быть использованы для выявления наличия дефекта на ранней стадии и корректировки кривой остаточного ресурса с учетом фактического состояния (см. рис. 7). Отклонение от эталонной кривой возможно выявить уже на второй стадии – период раннего износа подшипника. Подсчет суммарных потерь на определенном этапе эксплуатации, которые обусловлены наличием дефекта, впоследствии позволит сформировать новые критерии, основанные на энергетической эффективности для интеллектуальных алгоритмов управления ТООР.

Диагностика состояния электромеханического оборудования на основе

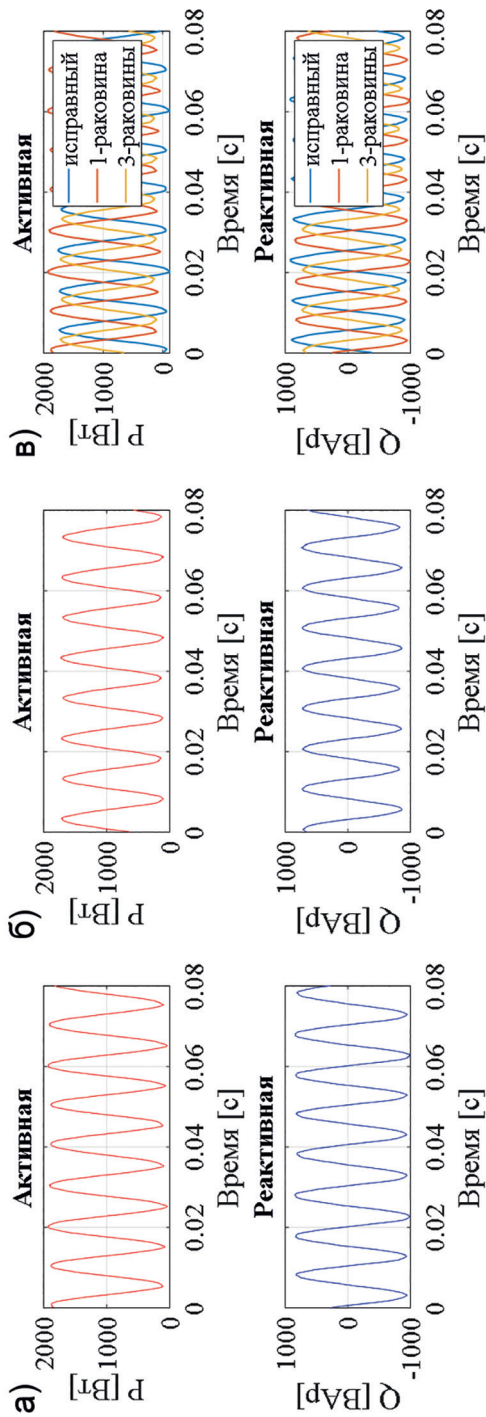


Рис. 5. Анализ мгновенной мощности, потребляемой АД, при дефекте подшипника: при 1 раковине (а); при 3 раковинах (б); сравнение исправного с 1 и 3 раковинами (в)

Fig. 5. Analysis of instantaneous power consumed by IM with bearing defect: with 1 spall (a); with 3 spalls (b); comparison of serviceable bearing with 1 and 3 spalls (v)

Таблица 2

Оценка энергетических потерь при дефекте ЭМО
Assessment of energy losses in case of a defect in electromechanical equipment

Состояние	Потери мощности	I за единицу времени			II за единицу времени			III за единицу времени		
		1 оборот	1 час	I стадия	1 оборот	1 час	II стадия	1 оборот	1 час	III стадия
До обнаружения дефекта	ΔW_1 , Втч	0,010	37,683	12 561,020	0,021	75,366	16 748,027	0,037	131,891	18 318,155
	ΔQ_1 , Варч	0,006	21,500	7 166,517	0,012	42,999	9 555,357	0,021	75,248	10 451,171
	ΔW_2 , Втч	0,209	753,661	251 220,407	0,419	1507,322	334 960,543	0,733	2637,814	366 363,093
1 раковина	ΔQ_2 , Варч	-0,119	-429,991	-143 330,348	-0,239	-859,982	-191 107,131	-0,418	-1504,969	-209 023,424
	ΔW_3 , Втч	0,204	733,563	244 521,120	0,408	1467,127	326 028,160	0,713	2567,472	356 593,300
	ΔQ_3 , Варч	-0,139	-499,904	-166 634,535	-0,278	-999,807	-222 179,380	-0,486	-1749,663	-243 008,697

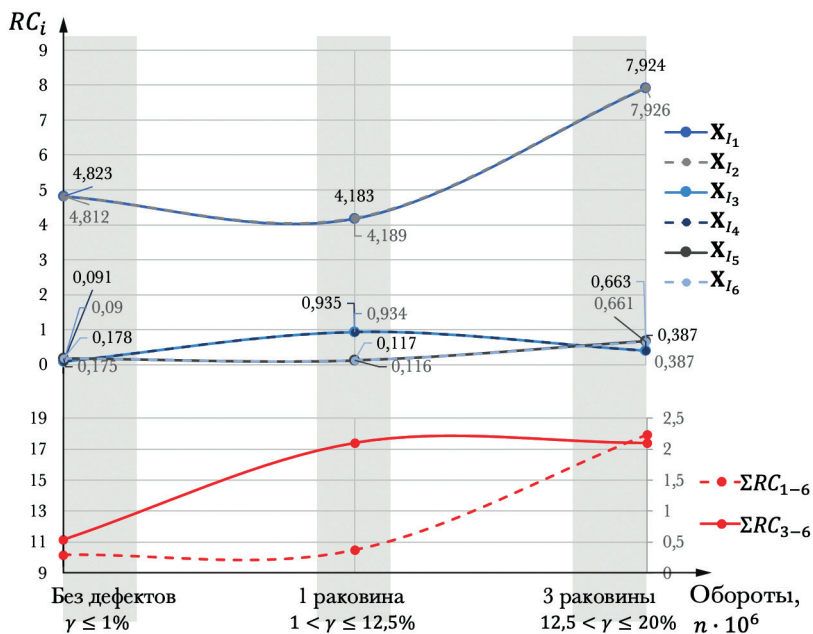


Рис. 6. Изменения энергетических потерь в зависимости от уровня развития дефекта подшипника для опорных компонент $X_{I1} - X_{I6}$

Fig. 6. Changes in energy losses depending on the level of bearing defect development for bearing components $X_{I1} - X_{I6}$

анализа сигнала тока является перспективным направлением, позволяющим обойти недостатки, связанные с анализом сигналов вибраций. Несмотря на то, что анализ вибрации считается одним из самых эффективных способов диагностики, на сегодняшний день не суще-

ствует единого подхода и метода выделения важной информации из сигнала, и более того — не существует способа обнаружения неисправностей, находящихся на ранней стадии развития. В то же время существуют ограничения в установке и обеспечении работоспособно-

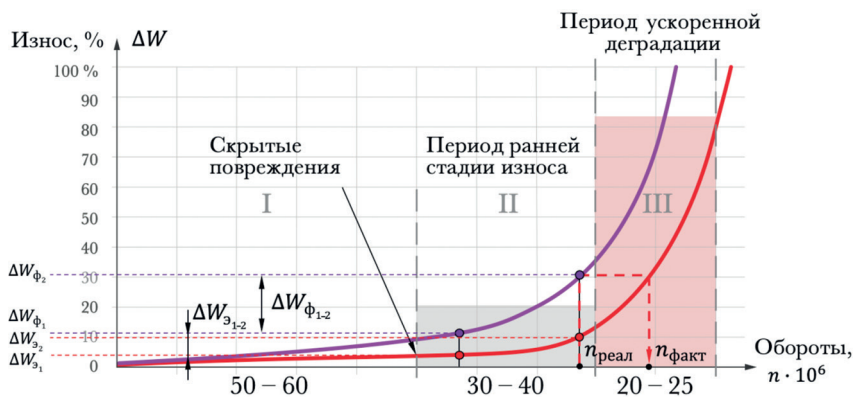


Рис. 7. Стадии развития дефекта подшипника: красный — фактическая кривая износа, фиолетовый — эталонная кривая износа

Fig. 7. Stages of bearing defect development: red — actual wear curve; purple — reference wear curve

сти датчиков вибрации для диагностики оборудования минерально-сырьевого комплекса в осложненных условиях эксплуатации и труднодоступности оборудования.

Методы определения наличия дефекта на основе электрических параметров (ток, напряжение), такие как быстрое преобразование Фурье, годограф обобщенного тока, эффективны и позволяют определить в том числе вид дефекта, но не его уровень. Поэтому авторами предлагается метод, дополняющий предыдущие на основе сингулярного разложения обобщенного сигнала тока, в результате которого выявленные диагностические компоненты позволяют производить оценку уровня развития дефекта и определять реальные показатели технического состояния. Предложенная методика обоснована теоретически и подкреплена экспериментально с помощью обнаружения деградации поверхности внутреннего кольца подшипника на заднем подшипниковом щите АД в виде градиционных раковин. Однако реализация данной методики требует синхронной регистрации фазных токов и напряжений с частотой дискретизации не менее 10 кГц и высокочастотной АЦП. По сравнению с другими методами диагностики и контроля (вибродиагностическим, акустическим, температурным и др.) представленное решение не требует дополнительной модернизации оборудования по установке датчиков и нарушения целостности токоведущих частей, обладает широким перечнем выявляемых как механических, так и электрических дефектов, а также применим в условиях отсутствия непосредственного доступа к электромеханическому оборудованию.

Заключение

Исследование сигналов тока статора асинхронного двигателя, проведенное в

работе, основано на сингулярном разложении обобщенного тока и восстановлении временных рядов. По результатам разложения временной ряд обобщенного тока представлен упорядоченными по убыванию вклада компонентами, которые путем ганкелизации матриц восстанавливаются в форму временных рядов. Различные уровни повреждения подшипника в результате экспериментальных исследований позволили установить связь изменения сингулярных компонентных карт с наличием разного уровня дефектов подшипника.

В ходе работы авторами теоретически обосновано применение сингулярного анализа в дополнение к диагностике электромеханического оборудования по электрическим параметрам, что позволяет выявить и оценить уровень дефекта на ранних стадиях развития, а также оценить рост дополнительных потерь электроэнергии с учетом влияния дефектов. Соответственно, выявлено, что на первой стадии потери могут увеличиваться до 5–10%, на второй стадии — до 10–25% и третьей стадии — до 25–50% от номинальной потребляемой мощности, что при продолжительной эксплуатации сопоставимо с себестоимостью самого электромеханического оборудования. На основе этого авторами предложен подход к организации ТОиР, доказанный экспериментальными данными с приведением осциллограмм мгновенных значений тока, напряжения и мощности электродвигателя.

При наблюдении за появлением новых компонент в сигнале тока и изменением вклада компонент, соответствующих дефекту, в общую структуру сигнала, установлено: при появлении и увеличении дефекта ряд компонент как нестационарного, так и стационарного характера увеличивают свой вклад в общую структуру сигнала, что приводит к увеличению их порядковых номеров.

Компонентные диагностические карты, которые впоследствии при периодической оценке возможно использовать для выявления изменений в работе электромеханического оборудования, позволяют сопоставлять уровень развития дефекта и потери электрической мощности.

В свою очередь, такой подход способствует будущим исследованиям:

- рассмотреть индикаторы, позволяющие оценивать уровень вклада изменения технического состояния в потери электроэнергии для различных этапов эксплуатации;
- выстроить на основе знания о текущих и накопленных потерях новые стратегии управления энергоэффективностью и техническим состоянием оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ustinov D. A., Shafhatov E. R.* Assessment of reliability indicators of combined systems of offshore wind turbines and wave energy converters // *Energies*. 2022, vol. 15, article 9630. DOI: 10.3390/en15249630.
2. *Бельский А. А., Добуш В. С., Хайкал Ш. Ф.* Эксплуатация однофазного автономного инвертора в составе ветроэнергетического комплекса малой мощности // *Записки Горного института*. — 2019. — Т. 239. — С. 564. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.564.
3. *Shklyarskiy J. E., Batueva D. E.* The influence of external climatic factors on the accuracy of the forecast of energy consumption // *E3S Web of Conferences*. 2019, vol. 140, article 04014. DOI: 10.1051/e3sconf/201914004014.
4. *Сычев Ю. А., Зимин Р. Ю.* Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения минерально-сырьевого комплекса гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами // *Записки Горного института*. — 2021. — Т. 247 (1). — С. 132–140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14.
5. *Feng Y., Dong Z.* Optimal energy management with balanced fuel economy and battery life for large hybrid electric mining truck // *Journal of Power Sources*. 2020, vol. 454, article 2279948. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.227948.
6. *Моргоева А. Д., Моргоев И. Д., Ключев Р. В., Хетагуров В. Н., Гаврина О. А.* Краткосрочное прогнозирование электропотребления обогатительной фабрики // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2023. — № 5-1. — С. 157–169. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_157.
7. *Vöth S., Nikolaev A. V., Kychkin A. V.* Demand response service architecture for power system of russian mining enterprise / 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2021, pp. 63–67.
8. *Skamyin A., Shklyarskiy Y., Dobush I., Dobush V., Sutikno T., Jopri M. H.* An assessment of the share contributions of distortion sources for various load parameters // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2022, vol. 13, pp. 950–959. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp950-959.
9. *Белоглазов И. И., Сабинин Д. С., Николаев М. Ю.* Моделирование процесса дезинтеграции в шаровых мельницах барабанного типа с использованием метода дискретных элементов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2022. — № 6-2. — С. 268–282. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_268.
10. *Xu X., Zuo Y., Wu G.* Design of intelligent internet of things for equipment maintenance / *IEEE 2011. Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. 2011, pp. 509–511. DOI: 10.1109/ICICTA.2011.412.
11. *Shaobo X., Xiaosong H., Shanwei Q., Xiaolin T., Kun L., Zongke X., Brighton J.* Model predictive energy management for plug-in hybrid electric vehicles considering optimal battery depth of discharge // *Energy*. 2019, vol. 173, pp. 667–678. DOI: 10.1016/j.energy.2019.02.074.
12. *Tsvetkov P.* Engagement of resource-based economies in the fight against rising carbon emissions // *Energy Reports*. 2022, vol. 8, pp. 874–883. DOI: 10.1016/j.egy.2022.05.259.
13. *Ключев Р. В., Голик В. И., Босиков И. И., Гаврина О. А.* Анализ потерь электроэнергии в системе электроснабжения обогатительной фабрики // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. — 2021. — Т. 332. — № 10. — С. 7–16.

14. Жуковский Ю. Л., Малькова Я. М. Классификация способов повышения эффективности процесса измельчения и реализация энергоэффективных алгоритмов управления двухдвигательным электроприводом мельницы // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 4 (162). – С. 20 – 35. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-20-35.

15. Korolev N., Kozyaruk A., Morenov V. Efficiency increase of energy systems in oil and gas industry by evaluation of electric drive lifecycle // Energies. 2021, vol. 14, no. 19, article 6074. DOI: 10.3390/en14196074.

16. Control Engineering: Monitoring induction motors for energy savings [Электронный ресурс]. URL: <https://www.controleng.com/articles/monitoring-induction-motors-for-energy-savings/> (дата обращения: 15.02.2023).

17. Батуева Д. Е., Булдыско А. Д., Халтурин А. А., Парфенчик К. В., Кошенкова А. А. Традиционная углеводородная энергетика в рамках устойчивого развития / Научно-практический форум о продвижении принципов «зеленой» экономики в целях ускорения научно-технологического прогресса. – 2020. – С. 12 – 13. DOI: 10.38006/907345-65-2.2020.12.13.

18. Koteleva N., Valnev V., Frenkel I. Investigation of the effectiveness of an augmented reality and a dynamic simulation system collaboration in oil pump maintenance // Applied Sciences. 2021, vol. 12, no. 1, article 350. DOI: 10.3390/app12010350.

19. Brkovic A., Gajic D., Gligorijevic J., Savic-Gajic I., Georgieva O., Di Gennaro S. Early fault detection and diagnosis in bearings for more efficient operation of rotating machinery // Energy. 2017, vol. 136, no. 1. DOI: 10.1016/j.energy.2016.08.039.

20. Khalturin A. A., Parfenchik K. D., Shpenst V. A. Features of oil spills monitoring on the water surface by the Russian Federation in the Arctic Region // Journal of Marine Science and Engineering. 2023, vol. 11, article 111. DOI: 10.3390/jmse11010111.

21. Сержан С. Л., Малеванный Д. В., Федоров Е. В., Дадаян Л. М. Перспективы применения добычного комплекса с капсулой в условиях добычи шельфовых железомарганцевых конкреций Российской Федерации // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 4 (162). – С. 3 – 11. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-3-11.

22. Gundewar S. K., Kane P. V. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor // Journal of Vibration Engineering & Technologies. 2021, vol. 9, pp. 643 – 674. DOI: 10.1007/s42417-020-00253-y.

23. Barabady J., Kumar U. Reliability analysis of mining equipment. A case study of a crushing plant at Jajram Vauxite Mine in Iran // Reliability Engineering & System Safety. 2008, vol. 93, pp. 647 – 653. DOI: 10.1016/j.res.2007.10.006.

24. Земенкова М. Ю., Чижевская Е. Л., Земенков Ю. Д. Интеллектуальный мониторинг состояний объектов трубопроводного транспорта углеводородов с применением нейросетевых технологий // Записки Горного института. – 2022. – Т. 258. – С. 933 – 944. DOI: 10.31897/PMI.2022.105.

25. Baranov G., Nepomuceno E., Vaganov M., Ostrovskii V., Butusov D. New spectral markers for broken bars diagnostics in induction motors // Machines. 2020, vol. 8, no. 1, article 6. DOI: 10.3390/machines8010006.

26. Zhou X., Mao S., Li M. A novel anti-noise fault diagnosis approach for rolling bearings based on convolutional neural network fusing frequency domain feature matching algorithm // Sensors. 2021, vol. 21, no. 16, article 5532. DOI: 10.3390/s21165532.

27. Choudhary A., Goyal D., Shimi S. L., Akula A. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: A review // Archives of Computational Methods in Engineering. 2019, vol. 26, pp. 1221 – 1238. DOI: 10.1007/s11831-018-9286-z.

28. Khan M. A., Asad B., Kudelina K., Vaimann T., Kallaste A. The bearing faults detection methods for electrical machines – The state of the art // Energies. 2023, vol. 16, article 296. DOI: 10.3390/en16010296.

29. Glowacz A., Glowacz W., Kozik J., Piech K., Gutten M., Caesarendra W., Khan Z. F. Detection of deterioration of three-phase induction motor using vibration signals // Measurement Science Review. 2019, vol. 19, no. 6, pp. 241 – 249. DOI: 10.2478/msr-2019-0031.

30. Glowacz A., Tadeusiewicz R., Legutko S., Caesarendra W., Irfan M., Liu H., Xiang J. Fault diagnosis of angle grinders and electric impact drills using acoustic signals // Applied Acoustics. 2021, vol. 179, article 108070. DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108070.

31. Bessous N., Sbaa S., Megherbi A. C. Mechanical fault detection in rotating electrical machines using MCSA-FFT and MCSA-DWT techniques // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. 2019, vol. 67, no. 3. DOI: 10.24425/bpasts.2019.129655.
32. Arabaci H., Mohamed M. A. A knowledge-based diagnosis algorithm for broken rotor bar fault classification using FFT, principal component analysis and support vector machines // International Journal of Intelligent Engineering Informatics. 2020, vol. 8, no. 1, pp. 19–37. DOI: 10.1504/IJIEI.2020.105431.
33. Chai H., Phung B. T., Mitchell S. Application of UHF sensors in power system equipment for partial discharge detection. A review // Sensors. 2019, vol. 19, no. 5, article 1029. DOI: 10.3390/s19051029.
34. Huang Q., Li X., Zhang G., Deng J., Wang C. Thermal management of Lithium-ion battery pack through the application of flexible form-stable composite phase change materials // Applied Thermal Engineering. 2021, vol. 183, article 116151. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116151.
35. Bernat P., Hytka Z., Kačor P. Indication of failures of rotor bar on induction machine with squirrel cage rotor in its external electromagnetic field / IEEE 2015. 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). 2015, pp. 691–696. DOI: 10.1109/EPE.2015.7161135.
36. Lavrenko S. A., Shishljannikov D. I. Performance evaluation of heading-and-winning machines in the conditions of potash mines // Applied Sciences (Switzerland). 2021, vol. 11, no. 8, article 3444. DOI: 10.3390/app11083444.
37. Beloglazov I. I., Boikov A. V., Petrov P. A. Discrete element simulation of powder sintering for spherical particles // Key Engineering Materials. 2020, vol. 854, pp. 164–171. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.854.164.
38. Ciszewski T., Gelman L., Ball A. Novel nonlinear high order technologies for damage diagnosis of complex assets // Electronics. 2022, vol. 11, article 3885. DOI: 10.3390/electronics11233885.
39. Halme J., Andersson P. Rolling contact fatigue and wear fundamentals for rolling bearing diagnostics-state of the art // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2010, vol. 224, no. 4, pp. 377–393. DOI: 10.1243/13506501JET656.
40. Abu-Zeid M. A., Abdel-Rahman S. M. Bearing problems' effects on the dynamic performance of pumping stations // Alexandria Engineering Journal. 2013, vol. 52, no. 3, pp. 241–248. DOI: 10.1016/j.aej.2013.02.002.
41. Pleskach B. Estimation of hidden energy losses // Electric Power Conversion and Micro-Grids. 2021. DOI: 10.5772/intechopen.97504.
42. Sung Y. T., Chang K. E., Liu T. C. The effects of integrating mobile devices with teaching and learning on students' learning performance. A meta-analysis and research synthesis // Computers & Education. 2016, vol. 94, pp. 252–275. DOI: 10.1016/j.compedu.2015.11.008.
43. Развитие разрушений подшипников качения вследствие контактной усталости при качении // Технический журнал SKF. [Электронный ресурс]. URL: <https://evolution.skf.com/ru/развитие-разрушений-подшипников-кач/> (дата обращения: 26.02.2023).
44. SKF. Bearing damage and failure analysis [Электронный ресурс]. URL: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968064c148-Bearing-failures---14219_2-EN_tcm_12-297619.pdf (дата обращения: 26.02.2023).
45. Mendes A. M. S., Cardoso A. J. M. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives, by the average current Park's vector approach / IEEE International Electric Machines and Drives Conference. 1999. article 6314016, pp. 704–706. DOI: 10.1109/IEMDC.1999.769220.
46. Cornell E. P., Lipo T. A. Modeling and design of controlled current induction motor drive systems // IEEE Transactions on Industry Applications. 1977, vol. 4, pp. 321–330. DOI: 10.1109/TIA.1977.4503414.
47. Thomson W. T., Fenger M., Lloyd B. Development of a tool to detect faults in induction motors via current signature analysis / 2003 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference. Dallas, TX. 2003. DOI: 10.1109/CITCON.2003.1204707.
48. Yoo Y. J. Fault detection of induction motor using fast Fourier transform with feature selection via principal component analysis // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2019, vol. 20, no. 9, pp. 1543–1552. DOI: 10.1007/s12541-019-00176-z.
49. Zhao H., Sun M., Deng W., Yang X. A new feature extraction method based on eemd and multi-scale fuzzy entropy for motor bearing // Entropy. 2017, vol. 19, article 14. DOI: 10.3390/e19010014.

50. Isham M. F., Leong M. S., Lim M. H., Ahmad Z. A. Variational mode decomposition: Mode determination method for rotating machinery diagnosis // *Journal of Vibroengineering*. 2018, pp. 2604–2621. DOI: 10.21595/jve.2018.19479.

51. Wang H., Li R., Tang G., Yuan H., Zhao Q., Cao X. A compound fault diagnosis for rolling bearings method based on blind source separation and ensemble empirical mode decomposition // *PLOS ONE*. 2014, vol. 9, no. 10. DOI: 10.1371/journal.pone.0109166.

52. Голяндина Н. Э., Ломтев М. А. Улучшение разделимости временных рядов в анализе сингулярного спектра с помощью одного метода анализа независимых компонент // *Вестник СПбГУ*. – 2016. – № 3 (61). – С. 14–25.

53. Кузьмин О. В., Кедрин В. С. Анализ структуры гармонических рядов динамики на базе алгоритма сингулярного разложения // *Проблемы управления*. – 2013. – № 1. – С. 26–31.

54. Guo M., Li W., Yang Q., Zhao X., Tang Y. Amplitude filtering characteristics of singular value decomposition and its application to fault diagnosis of rotating machinery // *Measurement*. 2020, vol. 154, article 107444. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107444.

55. Xu L., Chatterton S., Pennacchi P., Liu C. A tachless order tracking method based on inverse short time fourier transform and singular value decomposition for bearing fault diagnosis // *Sensors*. 2020, vol. 20, article 6924. DOI: 10.3390/s20236924. **PLoS**

REFERENCES

1. Ustinov D. A., Shafhatov E. R. Assessment of reliability indicators of combined systems of offshore wind turbines and wave energy converters. *Energies*. 2022, vol. 15, article 9630. DOI: 10.3390/en15249630.

2. Belsky A. A., Dobush V. S., Haikal Sh. F. Operation of a single-phase autonomous inverter as a part of a low-power wind. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 239, pp. 564. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.564.

3. Shklyarskiy J. E., Batueva D. E. The influence of external climatic factors on the accuracy of the forecast of energy consumption. *E3S Web of Conferences*. 2019, vol. 140, article 04014. DOI: 10.1051/e3sconf/201914004014.

4. Sychev Y. A., Zimin R. Y. Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 247 (1), pp. 132–140. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14.

5. Feng Y., Dong Z. Optimal energy management with balanced fuel economy and battery life for large hybrid electric mining truck. *Journal of Power Sources*. 2020, vol. 454, article 2279948. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.227948.

6. Morgoeva A. D., Morgoev I. D., Klyuev R. V., Khetagurov V. N., Gavrina O. A. Short-term prediction of energy consumption at concentration factory. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 5-1, pp. 157–169. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_157.

7. Vöth S., Nikolaev A. V., Kychkin A. V. Demand response service architecture for power system of russian mining enterprise. *2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2021, pp. 63–67.

8. Skamyin A., Shklyarskiy Y., Dobush I., Dobush V., Sutikno T., Jopri M. H. An assessment of the share contributions of distortion sources for various load parameters. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2022, vol. 13, pp. 950–959. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp950-959.

9. Beloglazov I. I., Sabinin D. S., Nikolaev M. Yu. Modeling the disintegration process for ball mills using dem. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 268–282. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_268.

10. Xu X., Zuo Y., Wu G. Design of intelligent internet of things for equipment maintenance. *IEEE 2011. Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. 2011, pp. 509–511. DOI: 10.1109/ICICTA.2011.412.

11. Shaobo X., Xiaosong H., Shanwei Q., Xiaolin T., Kun L., Zongke X., Brighton J. Model predictive energy management for plug-in hybrid electric vehicles considering optimal battery depth of discharge. *Energy*. 2019, vol. 173, pp. 667–678. DOI: 10.1016/j.energy.2019.02.074.

12. Tsvetkov P. Engagement of resource-based economies in the fight against rising carbon emissions. *Energy Reports*. 2022, vol. 8, pp. 874–883. DOI: 10.1016/j.egy.2022.05.259.

13. Klyuev R. V., Golik V. I., Bosikov I. I., Gavrina O. A. Analysis of power losses in the power supply system of a concentrator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021, vol. 332, no. 10, pp. 7–16. [In Russ].

14. Zhukovskiy Yu. L., Malkova Ya. M. Classification of ways to improve the efficiency of the comminution and implementation of energy-efficient algorithms for controlling the twin-motor electric mill drive. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2022, no. 4 (162), pp. 20–35. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-20-35.

15. Korolev N., Kozyaruk A., Morenov V. Efficiency increase of energy systems in oil and gas industry by evaluation of electric drive lifecycle. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 19, article 6074. DOI: 10.3390/en14196074.

16. *Control Engineering: Monitoring induction motors for energy savings*. available at: <https://www.controleng.com/articles/monitoring-induction-motors-for-energy-savings/> (accessed 15.02.2023). [In Russ].

17. Batueva D. E., Buldysko A. D., Khalturin A. A., Parfenchik K. V., Koshenkova A. A. Traditional hydrocarbon energy in the framework of sustainable development. *Nauchno-prakticheskiy forum o prodvizhenii printsipov «zelenoy» ekonomiki v tselyakh uskoreniya nauchno-tekhnologicheskogo progressa* [Scientific and practical forum on the promotion of green economy principles to accelerate scientific and technological progress], 2020, pp. 12–13. DOI: 10.38006/907345-65-2.2020.12.13.

18. Koteleva N., Valnev V., Frenkel I. Investigation of the effectiveness of an augmented reality and a dynamic simulation system collaboration in oil pump maintenance. *Applied Sciences*. 2021, vol. 12, no. 1, article 350. DOI: 10.3390/app12010350.

19. Brkovic A., Gajic D., Gligorijevic J., Savic-Gajic I., Georgieva O., Di Gennaro S. Early fault detection and diagnosis in bearings for more efficient operation of rotating machinery. *Energy*. 2017, vol. 136, no. 1. DOI: 10.1016/j.energy.2016.08.039.

20. Khalturin A. A., Parfenchik K. D., Shpenst V. A. Features of oil spills monitoring on the water surface by the Russian Federation in the Arctic Region. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023, vol. 11, article 111. DOI: 10.3390/jmse11010111.

21. Serzhan S. L., Malevannyi D. V., Fedorov E. V., Dadayan L. M. Prospects of application of a production complex with a capsule in the conditions of mining on the Russian Federation shelf iron-manganese nodules. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2022, no. 4 (162), pp. 3–11. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-3-11.

22. Gundewar S. K., Kane P. V. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2021, vol. 9, pp. 643–674. DOI: 10.1007/s42417-020-00253-y.

23. Barabady J., Kumar U. Reliability analysis of mining equipment. A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran. *Reliability Engineering & System Safety*. 2008, vol. 93, pp. 647–653. DOI: 10.1016/j.res.2007.10.006.

24. Zemenkova M. Y., Chizhevskaya E. L., Zemenkov Y. D. Intelligent monitoring of the condition of hydrocarbon pipeline transport facilities using neural network technologies. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 258. C. 933–944. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.105.

25. Baranov G., Nepomuceno E., Vaganov M., Ostrovskii V., Butusov D. New spectral markers for broken bars diagnostics in induction motors. *Machines*. 2020, vol. 8, no. 1, article 6. DOI: 10.3390/machines8010006.

26. Zhou X., Mao S., Li M. A novel anti-noise fault diagnosis approach for rolling bearings based on convolutional neural network fusing frequency domain feature matching algorithm. *Sensors*. 2021, vol. 21, no. 16, article 5532. DOI: 10.3390/s21165532.

27. Choudhary A., Goyal D., Shimi S. L., Akula A. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2019, vol. 26, pp. 1221–1238. DOI: 10.1007/s11831-018-9286-z.

28. Khan M. A., Asad B., Kudelina K., Vaimann T., Kallaste A. The bearing faults detection methods for electrical machines – The state of the art. *Energies*. 2023, vol. 16, article 296. DOI: 10.3390/en16010296.

29. Glowacz A., Glowacz W., Kozik J., Piech K., Gutten M., Caesarendra W., Khan Z. F. Detection of deterioration of three-phase induction motor using vibration signals. *Measurement Science Review*. 2019, vol. 19, no. 6, pp. 241–249. DOI: 10.2478/msr-2019-0031.

30. Glowacz A., Tadeusiewicz R., Legutko S., Caesarendra W., Irfan M., Liu H., Xiang J. Fault diagnosis of angle grinders and electric impact drills using acoustic signals. *Applied Acoustics*. 2021, vol. 179, article 108070. DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108070.
31. Bessou N., Sbaa S., Megherbi A. C. Mechanical fault detection in rotating electrical machines using MCSA-FFT and MCSA-DWT techniques. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 2019, vol. 67, no. 3. DOI: 10.24425/bpasts.2019.129655.
32. Arabaci H., Mohamed M. A. A knowledge-based diagnosis algorithm for broken rotor bar fault classification using FFT, principal component analysis and support vector machines. *International Journal of Intelligent Engineering Informatics*. 2020, vol. 8, no. 1, pp. 19–37. DOI: 10.1504/IJIEI.2020.105431.
33. Chai H., Phung B. T., Mitchell S. Application of UHF sensors in power system equipment for partial discharge detection. A review. *Sensors*. 2019, vol. 19, no. 5, article 1029. DOI: 10.3390/s19051029.
34. Huang Q., Li X., Zhang G., Deng J., Wang C. Thermal management of Lithium-ion battery pack through the application of flexible form-stable composite phase change materials. *Applied Thermal Engineering*. 2021, vol. 183, article 116151. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116151.
35. Bernat P., Hytka Z., Kačor P. Indication of failures of rotor bar on induction machine with squirrel cage rotor in its external electromagnetic field. *IEEE 2015. 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. 2015, pp. 691–696. DOI: 10.1109/EPE.2015.7161135.
36. Lavrenko S. A., Shishljannikov D. I. Performance evaluation of heading-and-winning machines in the conditions of potash mines. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021, vol. 11, no. 8, article 3444. DOI: 10.3390/app11083444.
37. Beloglazov I. I., Boikov A. V., Petrov P. A. Discrete element simulation of powder sintering for spherical particles. *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 854, pp. 164–171. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.854.164.
38. Ciszewski T., Gelman L., Ball A. Novel nonlinear high order technologies for damage diagnosis of complex assets. *Electronics*. 2022, vol. 11, article 3885. DOI: 10.3390/electronics11233885.
39. Halme J., Andersson P. Rolling contact fatigue and wear fundamentals for rolling bearing diagnostics-state of the art. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2010, vol. 224, no. 4, pp. 377–393. DOI: 10.1243/13506501JET656.
40. Abu-Zeid M. A., Abdel-Rahman S. M. Bearing problems' effects on the dynamic performance of pumping stations. *Alexandria Engineering Journal*. 2013, vol. 52, no. 3, pp. 241–248. DOI: 10.1016/j.aej.2013.02.002.
41. Pleskach B. Estimation of hidden energy losses. *Electric Power Conversion and Micro-Grids*. 2021. DOI: 10.5772/intechopen.97504.
42. Sung Y. T., Chang K. E., Liu T. C. The effects of integrating mobile devices with teaching and learning on students' learning performance. A meta-analysis and research synthesis. *Computers & Education*. 2016, vol. 94, pp. 252–275. DOI: 10.1016/j.compedu.2015.11.008.
43. Razvitie razrusheniy podshipnikov kacheniya vsledstvie kontaktnoy ustalosti pri kachenii. *Tekhnicheskii zhurnal SKF*, available at: <https://evolution.skf.com/ru/развитие-разрушений-подшипников-кач/> (accessed 26.02.2023). [In Russ].
44. SKF. *Bearing damage and failure analysis*, available at: https://www.skf.com/binaries/pub12/images/0901d1968064c148-Bearing-failures---14219_2-EN_tcm_12-297619.pdf (accessed 26.02.2023).
45. Mendes A. M. S., Cardoso A. J. M. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives, by the average current Park's vector approach. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. 1999. article 6314016, pp. 704–706. DOI: 10.1109 / IEMDC.1999.769220.
46. Cornell E. P., Lipo T. A. Modeling and design of controlled current induction motor drive systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1977, vol. 4, pp. 321–330. DOI: 10.1109 / TIA.1977.4503414.
47. Thomson W. T., Fenger M., Lloyd B. Development of a tool to detect faults in induction motors via current signature analysis. *2003 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference*. Dallas, TX. 2003. DOI: 10.1109/CITCON.2003.1204707.
48. Yoo Y. J. Fault detection of induction motor using fast Fourier transform with feature selection via principal component analysis. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2019, vol. 20, no. 9, pp. 1543–1552. DOI: 10.1007/s12541-019-00176-z.

49. Zhao H., Sun M., Deng W., Yang X. A new feature extraction method based on eemd and multi-scale fuzzy entropy for motor bearing. *Entropy*. 2017, vol. 19, article 14. DOI: 10.3390/e19010014.
50. Isham M. F., Leong M. S., Lim M. H., Ahmad Z. A. Variational mode decomposition: Mode determination method for rotating machinery diagnosis. *Journal of Vibroengineering*. 2018, pp. 2604–2621. DOI: 10.21595/jve.2018.19479.
51. Wang H., Li R., Tang G., Yuan H., Zhao Q., Cao X. A compound fault diagnosis for rolling bearings method based on blind source separation and ensemble empirical mode decomposition. *PLOS ONE*. 2014, vol. 9, no. 10. DOI: 10.1371/journal.pone.0109166.
52. Golyandina N. E., Lomtev M. A. Improving the separability of time series in singular spectrum analysis with one method of independent component analysis. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016, no. 3 (61), pp. 14–25. [In Russ].
53. Kuzmin O. V., Kedrin V. S. Analysis of the structure of harmonic series of dynamics based on singular decomposition algorithm. *Problemy upravleniya*. 2013, no. 1, pp. 26–31. [In Russ].
54. Guo M., Li W., Yang Q., Zhao X., Tang Y. Amplitude filtering characteristics of singular value decomposition and its application to fault diagnosis of rotating machinery. *Measurement*. 2020, vol. 154, article 107444. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107444.
55. Xu L., Chatterton S., Pennacchi P., Liu C. A tacholeless order tracking method based on inverse short time fourier transform and singular value decomposition for bearing fault diagnosis. *Sensors*. 2020, vol. 20, article 6924. DOI: 10.3390/s20236924.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Королев Николай Александрович*¹ — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник,

e-mail: korolev_na@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0583-9695,

*Жуковский Юрий Леонидович*¹ — канд. техн. наук, доцент, e-mail: zhukovskiy_yul@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0312-0019,

*Булдыско Александра Дмитриевна*¹ — аспирант, e-mail: abuldysko@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0685-0546,

Баранов Георгий Дмитриевич — ведущий инженер, Университет ИТМО,

e-mail: georgii.baranov@metalab.ifmo.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6614-6238,

Пенгпенг Чен — профессор (PhD),

Китайский университет горного дела и технологий,

221116, Сьючжоу, Китай, e-mail: chenp@cumt.edu.cn,

ORCID ID: 0000-0002-6595-1451,

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

Для контактов: Королев Н.А., e-mail: korolev_na@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*N.A. Korolev*¹, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher,

e-mail: korolev_na@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0583-9695,

*Y.L. Zhukovskiy*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: zhukovskiy_yul@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0312-0019,

*A.D. Buldysko*¹, Graduate Student,

e-mail: georgii.baranov@metalab.ifmo.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6614-6238,

G.D. Baranov, Leading Engineer, ITMO University,
197101, Saint-Petersburg, Russia,

e-mail: georgii.baranov@metalab.ifmo.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6614-6238,

P. Chen, PhD, China University of Mining and Technology,

221116, Xuzhou, China, e-mail: chenp@cumt.edu.cn,

ORCID ID: 0000-0002-6595-1451,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: N.A. Korolev, e-mail: korolev_na@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 21.04.2023; получена после рецензии 21.08.2023; принята к печати 10.04.2024.

Received by the editors 21.04.2023; received after the review 21.08.2023; accepted for printing 10.04.2024.



**ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ
(СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)**

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КРЕПИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ
СТВОЛОВ В НЕРАВНОМЕРНОМ ТЕКТОНИЧЕСКОМ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ**

(2023, № 11, СВ 11, 20 с.)

Маркин Илья Владимирович – аспирант, НИТУ МИСИС, e-mail: sps@misis.ru.

Выполнен анализ методов проектирования крепи стволов в неравномерном тектоническом поле напряжений. Отмечено, что в отечественной геомеханике применяются три основные геомеханические модели природного напряженного состояния массивов месторождений полезных ископаемых в условиях тектонического воздействия. Рассмотрены методы проектирования крепи стволов. Описана концепция применения расчетно-аналитического метода расчета крепи. Для его практической реализации предложено применение при проходке стволов замерных станций, укомплектованных струнными датчиками отечественного производства. В неравномерном тектоническом поле напряжений замерная станция комплектуется не менее чем тремя группами датчиков, разнесенными под углом 120 градусов в сечении ствола. Полученные с применением такой замерной станции результаты мониторинга показывают, что в неравномерном тектоническом поле напряжений наблюдается неравномерное нагружение крепи ствола в призабойной зоне. Это вызывает необходимость поиска решений по компенсированию выявленного негативного влияния, так как бетонные крепи стволов наиболее эффективно воспринимают именно равномерные сжимающие нагрузки.

Ключевые слова: породный массив, тектонические напряжения, ствол, крепь, проходка, мониторинг, деформации, нагрузка.

**STRESS-STRAIN STATE OF VERTICAL SHAFT SUPPORT
IN AN UNEVEN TECTONIC STRESS FIELD**

I.V. Markin, Graduate Student NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: sps@misis.ru.

This publication analyzes methods for designing shaft support in an uneven tectonic stress field. It is noted that in domestic geomechanics three main geomechanical models of the natural stress state of mineral deposits under conditions of tectonic influence are used. Methods for designing shaft support are considered. The concept of using the calculation-analytical method for calculating support is described. For its practical implementation, it is proposed to use measuring stations equipped with domestically produced string sensors when sinking shafts. In an uneven tectonic stress field, the measuring station is equipped with no less than three groups of sensors spaced at an angle of 120 degrees in the trunk section. The monitoring results obtained using such a measuring station show that in an uneven tectonic stress field, uneven loading of the shaft support in the bottomhole zone is observed. This necessitates the search for solutions to compensate for the identified negative impact, since concrete shaft supports most effectively absorb uniform compressive loads.

Key words: rock mass, tectonic stress, shaft, support, excavation, monitoring, deformation, load.