

Повышение эффективности энергетических систем в нефтегазовой промышленности путем оценки жизненного цикла электропривода

Н.А. КОРОЛЕВ, А.Е. КОЗЯРУК, В.А. МОРЕНОВ ✉

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ morenov@spmi.ru; ☎ +7-8123288729

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Korolev, N.; Kozyaruk, A.; Morenov, V. Efficiency Increase of Energy Systems in Oil and Gas Industry by Evaluation of Electric Drive Lifecycle. *Energies* 2021, 14, 6074. <https://doi.org/10.3390/en14196074>

Аннотация: Вопрос эффективности энергетических систем в нефтегазовой отрасли является одним из важнейших в настоящее время. Доля энергии в себестоимости добычи нефти и газа может достигать 50 %. Среди наиболее важного энергетического оборудования – электроприводы насосов, компрессоров, вспомогательных агрегатов и т. д. В работе рассмотрен жизненный цикл электроприводов, используемых на нефтегазовых месторождениях, и оценены параметры их эффективности в периоды эксплуатационного износа или неисправностей. При этом жизненный цикл энергетического оборудования рассматривался как его техническое состояние в процессе эксплуатации. На основе спектрального анализа тока с использованием конечного преобразования Фурье (КТПФ) были выделены основные частотные составляющие, характеризующие вид и уровень неисправности, с учетом установленных показателей эффективности электропривода. Предложена методика оценки технического состояния электропривода по нормированным уровням амплитуд частотных составляющих. Реализовано предиктивное управление электроприводом в части корректировки системы управления при возникновении неисправности, обеспечивающей требуемые показатели эффективности. Определены границы технического состояния электропривода. Представлены рекомендации по дальнейшей эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту или профилактическому управлению.

Ключевые слова: электропривод; спектральный анализ тока; коэффициент гармонических искажений; коэффициент пульсаций электромагнитного момента; границы технического состояния; алгоритмы прогнозирующего управления.

Efficiency Increase of Energy Systems in Oil and Gas Industry by Evaluation of Electric Drive Lifecycle

Nikolay A. KOROLEV, Anatoly E. KOZYARUK and Valentin A. MORENOV ✉

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

✉ morenov@spmi.ru; ☎ +7-8123288729

Abstract: The efficiency issue of energy systems in the oil and gas industry is a crucial factor nowadays. Energy share in the production costs of oil and gas can reach 50%. Among the most important energy equipment are the electric drives of the pumps, compressors, auxiliary units, etc. The paper considered the lifecycle of the electric drives used at oil and gas fields and evaluated their efficiency parameters during periods of operational wear or malfunctioning. At the same time, the lifecycle of the energy equipment was seen as its technical state during operation. Based on the spectral analysis of the current using the finite Fourier transform (FFT), the main frequency components were identified that characterize the type and level of malfunction, taking into account defined efficiency indicators of the electric drive. A technique for assessing the technical state of an electric drive was proposed based on the normalized levels of the amplitudes of the frequency components. Predictive management of the electric drive was implemented in terms of correcting the control system when a malfunction occurs, providing the required efficiency indicators. Boundaries for the technical state of the electric drive were determined. Recommendations for further operation, terms of maintenance and repair or preventive management were presented.

Keywords: electric drive; spectral analysis of current; harmonic distortion coefficient; pulsation coefficient of electromagnetic moment; technical state boundaries; predictive control algorithms.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

1. Введение

Перспективы развития предприятий топливно-энергетического и минерально-сырьевого комплексов в условиях возрастающих экономических, экологических и технических требований связаны с повышением эффективности электромеханического оборудования. Такие устройства, включая электромоторы и электродвигатели (ЭД), обеспечивают до 85 % [1-3] потребления электроэнергии и являются основным производственным узлом в автоматизированных и роботизированных системах.

Решение вопросов повышения энергоэффективности нефтегазодобычи напрямую связано с использованием и совершенствованием регулируемого электропривода. В настоящее время он в большей степени реализуется на базе асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором. Его широкое применение в электроприводах обусловлено простотой конструкции и низкой стоимостью. В то же время проблемы большого пускового тока, относительно низкого коэффициента мощности и потребления реактивной мощности из сети решаются с помощью преобразователей частоты, в частности, преобразователей с активным выпрямителем [4, 5]. Несмотря на это, различные воздействия (тепловые, электрические, механические, экологические и т.д.) на электропривод приводят к его износу в процессе эксплуатации. Нерегулируемые режимы работы, частые перегрузки, переключения и естественные процессы деградации приводят к сбоям в работе. Они приводят к снижению ресурса электропривода, показателей энергоэффективности (потери мощности, КПД АМ и электропривода) и механических характеристик (КПД исполнительного органа (ИО), частота вращения и крутящий момент на валу). Несвоевременное обнаружение дефектов на стадии их возникновения и развития без принятия упреждающих мер приводит к их активному росту и воздействию на сопряженные узлы электромеханического оборудования с последующим экономическим ущербом для предприятия [6, 7].

Поэтому вопросы оценки текущего состояния используемого электрооборудования, своевременной диагностики аварийных и предаварийных режимов его работы и оценки остаточного ресурса приобретают особую актуальность. Несмотря на то, что в рамках цифровой трансформации предприятия переходят на прогнозирование состояния своих активов, сложность и высокая стоимость использования систем обнаружения и контроля повреждений для каждой единицы оборудования не позволяет предприятиям отказаться от существующей системы плановых ремонтов [8, 9]. Эта система предполагает вывод электрооборудования из эксплуатации и замену компонентов на новые детали через фиксированные промежутки времени. Однако такой подход не учитывает реальную нагрузку на оборудование и его реальное техническое состояние. Таким образом, возможны простои и даже замена оборудования, которое еще не выработало свой ресурс. При этом сохраняется вероятность внезапных отказов, если оборудование выработает свой ресурс раньше запланированного срока. Тем не менее, экономический эффект от ремонтных работ часто оказывается неоправданно низким.

Затраты на ремонт и обслуживание электрооборудования составляют значительную часть общих эксплуатационных расходов предприятий, особенно в минерально-сырьевой отрасли [10, 11]. Причем их общая доля в процессе эксплуатации возрастает по мере выработки ресурса оборудования. Сложность технической диагностики электрооборудования технологических систем нефтегазовой отрасли обусловлена его широкой номенклатурой, спецификой исполнения и режимов работы, а также сложными условиями эксплуатации и нахождением в труднодоступных местах, которые могут быть опасны для обслуживающего персонала [12].

В настоящее время для диагностики асинхронного двигателя используются различные приемы, основанные на вибрационных, электромагнитных и других методах. В работах [13, 14] представлен метод диагностики неисправностей асинхронного двигателя, основанный на анализе потребляемых токов. Метод обеспечивает выявление дефектов по рассчитанным частотным составляющим, но в то же время затрудняет оценку уровня влияния.

Анализ вибраций асинхронного двигателя с целью выявления неисправностей двигателя и рабочего органа путем анализа усредненных составляющих виброперемещения, виброскорости и виброускорения представлен в работах [15, 16]. Метод анализа гармонических составляющих виброперемещения, виброскорости и виброускорения описан в [17]. Однако существуют лишь экспериментальные методы оценки уровня дефектов и их влияния на работоспособность электромеханического оборудования по виброакустическим данным электродвигателя.

В работах [18-20] описан подход к вейвлет-анализу частотных вибрационных и электрических характеристик электромеханического оборудования. Метод обладает высокой информативностью, однако отсутствуют методы и средства обработки самих вейвлетов.

Анализ вышеперечисленных работ позволяет обозначить несовершенство методов диагностики электромеханического оборудования, что определяет актуальность решения данной проблемы. Решение задачи по определению уровня и вида дефекта позволит разработать метод оценки технического состояния электромеханического оборудования.

Основной целью работы является разработка метода диагностики ЭД на основе комплексного анализа данных с расчетом технического состояния для насосных агрегатов с частотно-регулируемым приводом.

2. Материалы и методы

Объектом исследования является многодвигательный электропривод в системе с асинхронными двигателями среднего класса мощности (132 кВт) общепромышленного назначения в непрерывных режимах работы S1. Система предназначена для перекачки нефтепродуктов. Частота вращения вала регулируется скалярными алгоритмами U/f , при достижении номинальных параметров двигатель переключается с синхронизацией с электрической сетью. Силовая часть преобразователя представлена двухуровневой структурой с 6-импульсным неуправляемым выпрямителем и двухуровневым автономным инвертором напряжения. К системе предъявляются достаточно низкие требования по частоте вращения и электромагнитному моменту, а требования по бесперебойной работе составляют не более 1 ч [21, 22]. Питание электродвигателей в номинальных режимах осуществляется от электрической сети с синусоидальным напряжением промышленной частоты (50 Гц). При снижении нагрузки они переключаются на питание от автономного инвертора с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения и квази-синусоидального тока (рис. 1). Учитывая характер изменений и коммутаций, для идентификации состояний электропривода были выбраны методы, основанные на анализе электрических параметров и координат, с учетом аудита современных методов диагностики [23]. Для измерения искажений тока потребления АМ, позволяющих выделить составляющие, характеризующие состояние узлов, необходимо использовать датчики тока на эффекте Холла, обеспечивая тем самым точность измерений [24, 25]. Последующие преобразования, расчеты и анализ выполнялись на микроконтроллере, персональном компьютере или сервере.

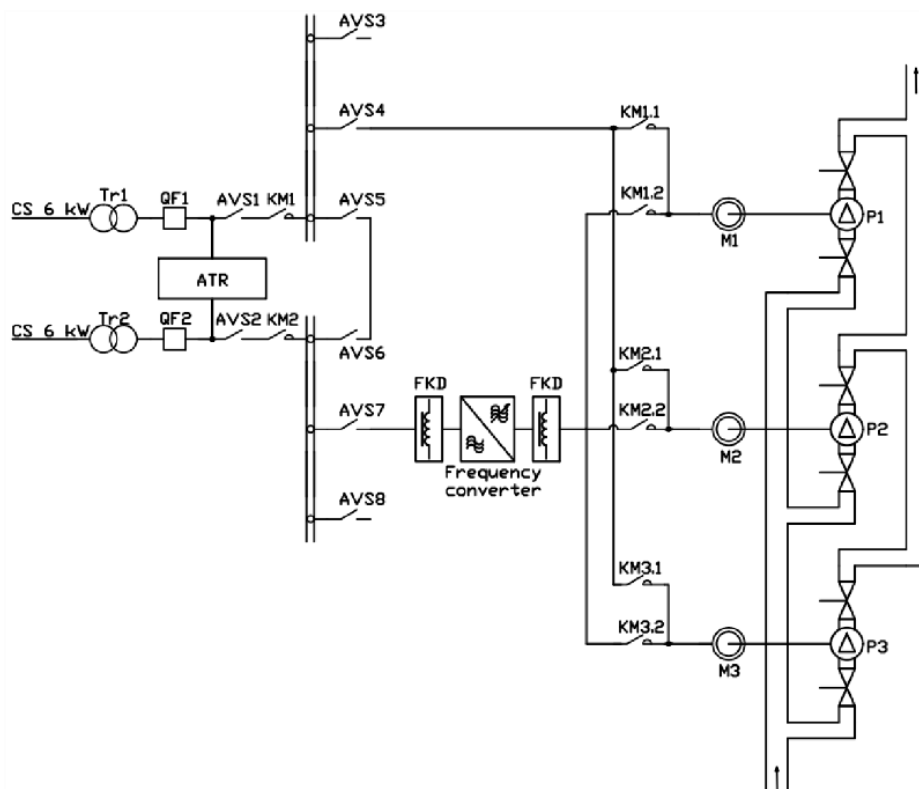


Рис. 1. Блок-схема исследуемого электропривода. ЗРУ – закрытое распределительное устройство; Тр – трансформатор; АВ – автоматический выключатель; АПР – автоматический перевод резерва; АВВ – автоматический вакуумный выключатель; ФКУ – фильтрокомпенсирующие устройства; МК – магнитный контактор; М – асинхронный двигатель; П – насос

Спектральный анализ необходимо использовать с учетом состояния питания двигателя как от синусоидального, так и несинусоидального напряжения, которое определяет форму тока, а также искажений, вызванных дефектами машины [26]. Энергоэффективность электропривода (рис. 1) определяется режимом работы двигателя и его состоянием, но количественно выражается коэффициентом мощности χ (1) при несинусоидальной форме тока и напряжения с учетом гармонических искажений для тока K_I и напряжения K_U , (2), а при синусоидальной форме тока и напряжения $K_I = 1$, $K_U = 1$ [27].

$$\chi = P/S = 3I_{1p}U_{1p} \cos \varphi / 3I \cdot U = (I_{1p}/I)(U_{1p}/U) \cos \varphi = K_I K_U \cos \varphi \quad (1)$$

$$\chi = K_I K_U \cos \varphi = |K_I = 1| K_U = 1 = \cos \varphi \quad (2)$$

где K_I , K_U – гармонические искажения напряжения (ГИН); I_{1p} , U_{1p} – амплитуда основной гармоники тока и напряжения в фазе (А, В); I , U – эффективное значение тока и напряжения (А, В); P , S – сетевая и кажущаяся мощность (Вт, вар); φ – угол сдвига между основными гармониками фазных тока и напряжения (рад).

Состав тока на выходе автономного инвертора описывается уравнением (3) и определяется тремя основными частями: первая – основная гармоника питающей сети; вторая – гармоники, обусловленные структурой и пульсацией инвертора; третья – комбинация гармоник первой и второй частей.

$$I = I_{st}(t) = I_n \sin(n\omega_1 t + \varphi) + \sum_{m=1}^{m=\infty} I_m \sin(m\omega_H t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} I_{nm} \sin(m\omega_H \pm n\omega_1)t, \quad (3)$$

где I_n – амплитуды гармоник тока статора, кратные основной гармонике (А); I_m – амплитуды гармоник тока (А), кратные несущей частоте; U_n – амплитуды комбинационных гармоник тока статора (А); $\omega_1 = 2\pi f_1$ – частота вращения основной гармоники тока (рад/с); $\omega_H = 2\pi f_H$ – частота вращения несущей гармоники тока статора (рад/с); $m = 1, 2, 3, \dots$ и $n = 1, 5, 7, \dots$ – кратные значения несущей ω_H и основной ω_1 частот вращения; f_1 , f_H – основная и несущая частоты (Гц).

По результатам анализа статистических данных о неисправностях электропривода, связанных с нарушениями в работе асинхронного двигателя, были выявлены основные виды дефектов. Ими оказались: износ подшипников, эксцентриситет воздушного зазора, межвитковое замыкание и обрыв стержней ротора [28,29], описываемые гармоническими составляющими тока (4).

$$\begin{aligned} i_{d1}(t) &= I_r \sin(\omega_1(1 \pm 2ks)t), \quad i_{d2}(t) = I_{d.st} \sin(\omega_1[\frac{n}{p}(1-s) \pm k]t), \\ i_{d3}(t) &= I_b \sin \omega_r t, \quad i_{d4}(t) = I_{ec} \sin(\omega_1[r_s \frac{1-s}{p} \pm n]t \pm \omega_1[\frac{1-s}{p}]t), \end{aligned} \quad (4)$$

где I_r , $I_{d.st}$, I_b , I_{ec} – амплитудные значения тока статора, модулированные дефектами ротора, статора, подшипников и эксцентриситетом воздушного зазора; $\omega_r = 2\pi f_r$ – частота вращения ротора (рад/с); s – скольжение асинхронного двигателя; $k = 1, 3, \dots$ – одно целое число; p – число пар полюсов; r_s – число стержней ротора.

Ток статора I_{st} с учетом дефектов АМ при синусоидальном напряжении будет формироваться в соответствии с (5), а при питании от автономного инвертора – в соответствии с (6).

$$I_{st}(t) = I_n \sin(n\omega_1 t + \varphi) + \sum_{di=1}^{di=\infty} I_{di} \sin(\omega_{di} t), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} I_{st}(t) &= I_n \sin(n\omega_1 t + \varphi) + \sum_{m=1}^{m=\infty} I_m \sin(m\omega_H t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} I_{nm} \sin(m\omega_H \pm n\omega_1)t \\ &\quad + \sum_{di=1}^{di=\infty} I_{di} \sin(\omega_{di} t), \end{aligned} \quad (6)$$

где I_{di} – амплитудное значение тока статора (А), соответствующее дефекту; $\omega_{di} = 2\pi f_{di}$ – частота вращения гармонической составляющей тока статора, вызванной дефектом (рад/с); f_{di} – частота дефекта.

В этом случае коэффициент гармонических искажений тока с учетом (1), (3), (4) и (6) может быть представлен в виде двух составляющих (7).

$$K_I = \frac{\sqrt{(K_{I(A)} + K_{I*(A)})^2 + (K_{I(B)} + K_{I*(B)})^2 + (K_{I(C)} + K_{I*(C)})^2}}{3} \quad (7)$$

где $K_{I(n)}$ – коэффициент гармонических искажений тока, определяемый качеством электрической энергии в питающей сети в фазах А, В, С; K_{I*} – гармонические искажения тока в фазах А, В, С электродвигателя, определяемые дефектами.

Искажения кривой тока статора не только приводят к несинусоидальности тока и снижению коэффициента мощности, но и являются моментопределяющей величиной электромагнитного момента асинхронного двигателя (8).

$$M_e = \frac{3}{2} z_p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot I_{st} \psi_r \sin(\theta) \quad (8)$$

где z_p – число пар полюсов асинхронного двигателя, L_m – индуктивность намагничивания, L_r – индуктивность обмотки ротора, ψ_r – потокосцепление ротора, θ – угол между векторами тока статора I_{st} и потокосцепления ротора ψ_r .

Электромагнитный момент $M_{(n)}$ формируется векторами тока статора и потокосцепления ротора, образованного основной гармоникой напряжения (9). Структура и работа автономного инвертора определяет состав высших гармоник тока статора и потокосцепления ротора, а также их комбинации, образующие переменные моменты $M_{(qp)}$ (9). При этом учитываются составляющие (4), которые в свою очередь формируют субгармоники тока статора и потока ротора и образуют дополнительные переменные моменты $M_{(di)}$ (9).

$$M_e = M_{(n)} + M_{(qp)} + M_{(di)} = \sum_{n=1}^{n=\infty} I_{st(n)} \psi_{r(n)} \sin(\theta) + \sum_{q=1}^{q=\infty} \sum_{p=1}^{p=\infty} I_{st(q)} \psi_{r(p)} \sin(\theta_{qp}) + \sum_{i=1}^{i=\infty} I_{st(di)} \psi_{r(di)} \sin(\theta_{di}), \quad (9)$$

где $M_{(n)}$, $M_{(qp)}$, $M_{(di)}$ – составляющие электромагнитного момента (M_m), создаваемого в результате взаимодействия n гармоник тока статора и потокосцепления ротора, d_i гармоник тока статора и потокосцепления ротора, q гармоники тока статора и p гармоники потокосцепления ротора; $I_{st(n)}$, $I_{st(q)}$, $I_{st(di)}$, $\psi_{r(n)}$, $\psi_{r(p)}$, $\psi_{r(di)}$ – гармонические составляющие тока статора и потока ротора (А, Вб); $\theta_{(qp)}$ – угол между q -гармоникой тока статора и p -гармоникой потокосцепления ротора, $\theta_{(di)}$ – угол между d_i -гармониками тока статора и потокосцепления ротора (рад) (6).

Общее влияние переменных моментов на результирующий электромагнитный момент АД определяется коэффициентом пульсаций электромагнитного момента K_p (10). Для учета влияния многокомпонентного гармонического состава, обусловленного как дефектами преобразователя, так и дефектами АД, с учетом (8) и (9) необходимо разделить общий коэффициент пульсаций $\sum K_p$ на составляющие K_p и K_p^* (11).

$$K_p = \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} M_{(n)}^2} / M_{av} \quad (10)$$

$$\sum K_p = \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} M_{(n)}^2 + \sum_{q=1}^{q=\infty} \sum_{p=1}^{p=\infty} M_{(qp)}^2} / M_{av} + \sqrt{\sum_{i=2}^{i=\infty} M_{(di)}^2} / M_{av} = K_{p(n)} + K_p^* \quad (11)$$

где M_{av} – среднее значение электромагнитного момента асинхронного двигателя (Н·м), $K_{p(n)}$ – коэффициент пульсации электромагнитного момента, определяемый типом и конструкцией силового преобразователя частоты, K_p^* – коэффициент пульсации электромагнитного момента, определяемый типом и уровнем дефектов в двигателе и механической части электропривода.

Для исследования влияния неисправностей в условиях эксплуатации с переключением питания двигателя между преобразователем частоты и энергосетью была разработана модель

в MATLAB Simulink (рис. 2). Она представляла собой многодвигательный электропривод насосной станции для перекачки нефтепродуктов. Модель соответствовала описанной выше структуре привода.

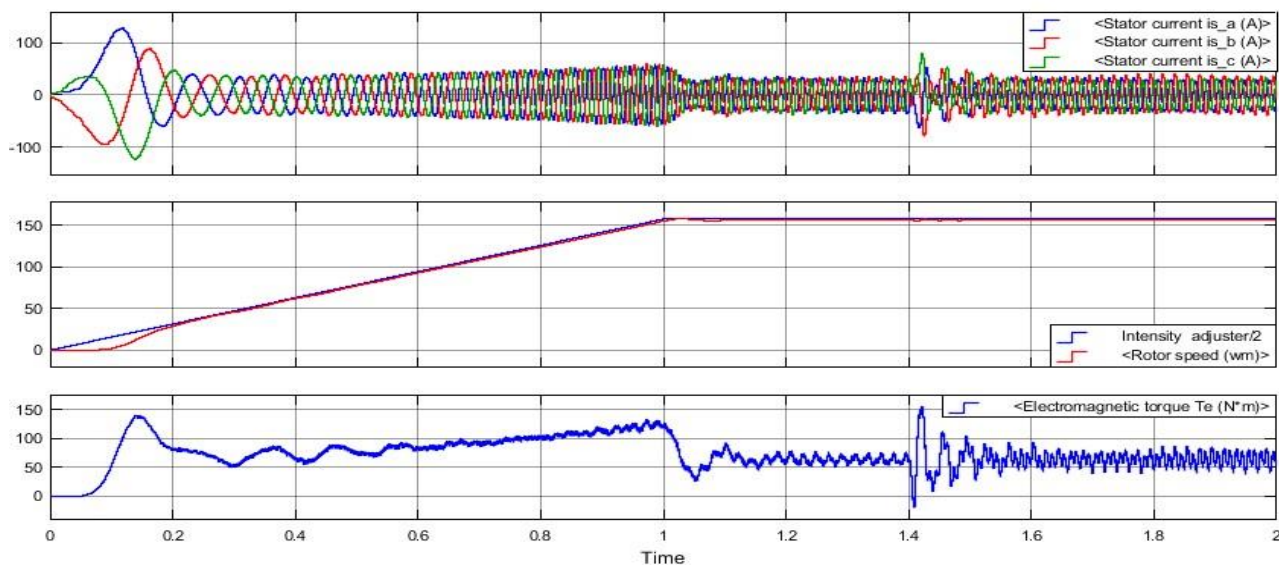


Рис. 2. Осциллограммы выходных координат электродвигателя

Результаты моделирования повреждения одной фазы (фазы A) в виде эквивалентного поочередного короткого замыкания в течение $t = 1,4$ с при сохранении постоянной частоты вращения и электромагнитного момента в интервале $1,2 < t < 2$ с за счет алгоритмов управления показывают, что форма исказилась, а амплитуда тока статора увеличилась. Это привело к соответствующим изменениям гармонических искажений тока K_i (7) осциллограммы (рис. 3). Появление искажений тока, не кратных основной гармонике и вызванных дефектами, определило увеличение коэффициента пульсаций электромагнитного момента ΣK_p (11) осциллограммы (рис. 3).

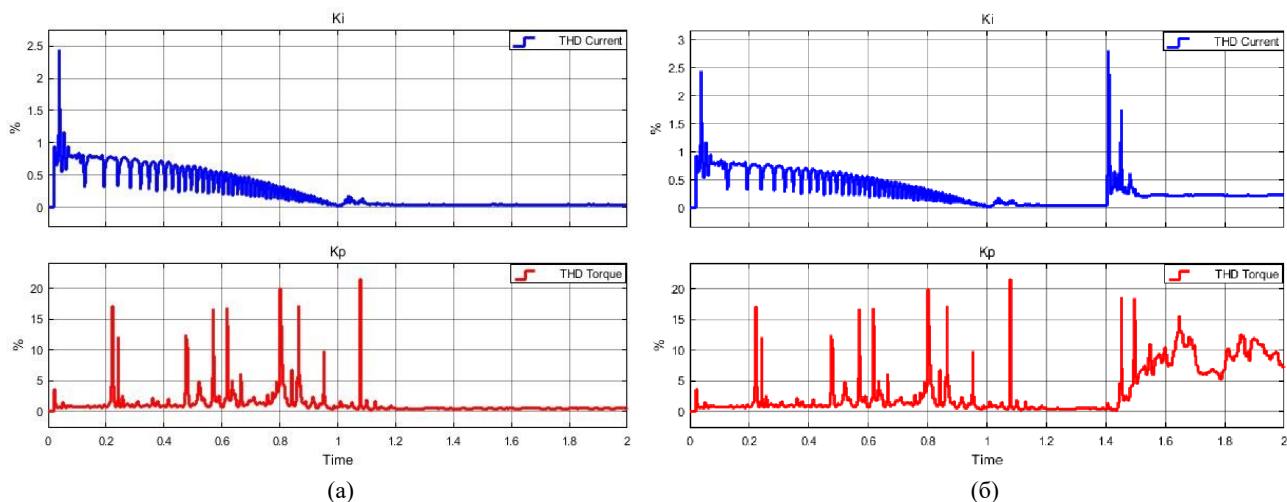


Рис. 3. Изменение коэффициента гармонических искажений K_i и коэффициента пульсаций электромагнитного момента ΣK_p для АД:

(а) в нормальном состоянии; (б) с фазовым коротким замыканием обмотки статора (при $t = 1,4$ с)

Метод оценки технического состояния ЭД

Разработка диагностической системы, основанной на комплексном анализе параметров различной физической природы, позволит решить задачи повышения точности оценки технического состояния и ресурса электромеханического оборудования.

Предложен подход к оценке технического состояния и прогнозированию ресурса, основанный на анализе электрических и механических координат электропривода. Большое количество параметров, регистрируемых и рассчитываемых сигнальных составляющих, а также их обработка, предполагали использование искусственной нейронной сети (ИНС).

Диагностическая система (рис. 4) представляла собой программно-аппаратный комплекс, включающий программные алгоритмы анализа данных на основе работы ИНС, и систему сбора данных, состоящую из нескольких комплектов датчиков, передающих сигналы на плату сбора данных (ПСД). Из полученных сигналов формировалась основная база данных параметров. В нее также входила дополнительная база параметров (далее косвенные параметры) о техническом состоянии агрегата из блока предварительной обработки данных, состоящая из статических данных (T -средняя температура окружающей среды, ρ -влажность, ξ -прочность изоляции и т.д.) и данных от системы автоматизации технологического процесса (например, $v_{r(t)}$ – сигнал скорости вращения редуктора, $v_{l(t)}$ – сигнал ИО).

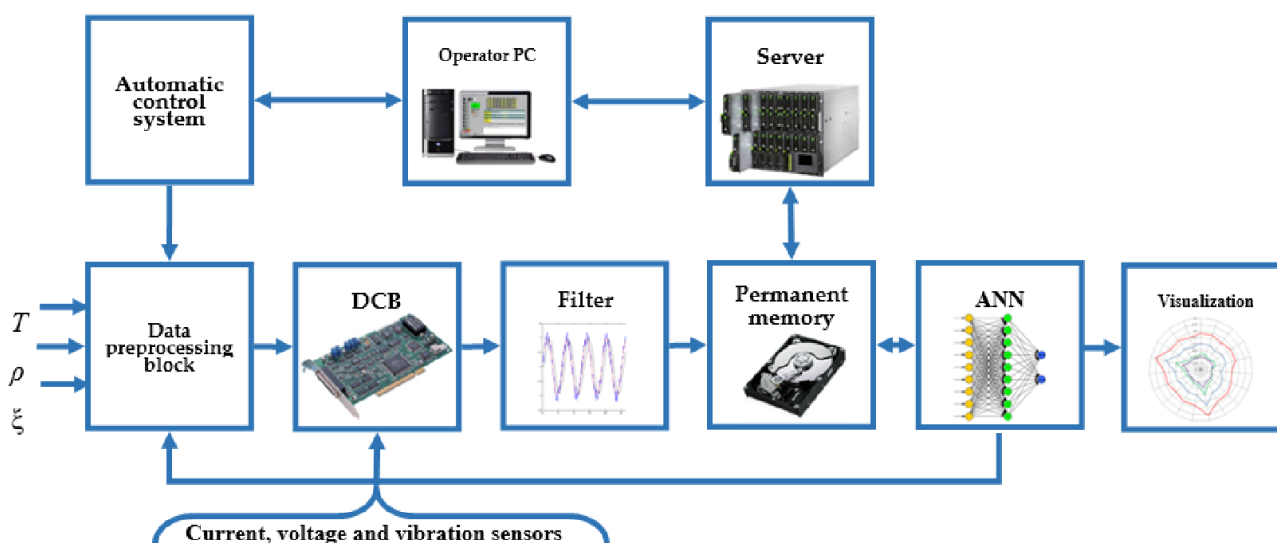


Рис. 4. Структурная схема системы оценки вероятности безотказной работы по диагностируемым электрическим и вибрационным параметрам АД с использованием ИНС

Перед подачей на вход ИНС основные и косвенные параметры были отфильтрованы, и на постоянном запоминающем устройстве была сформирована база данных. Обработка данных с помощью ИНС привела к формированию ретроспективной базы данных, по которой можно было оценить работоспособность электропривода.

Оценка технического состояния и ресурса агрегата проводилась с использованием ИНС как оценка возможности безотказного функционирования ЭД. Определение вероятности безотказной работы ЭД можно представить в виде построения уравнения (1). Оно основано на ретроспективной базе данных с учетом требований к относительной погрешности, или к границе доверительного интервала прогноза λ при $p \geq 95$ %-меньше 5 % [30].

$$P = F(t, \Delta t, n, k, l, N_i, P_i(t), P(t - \Delta t), \dots, P_{im}(m_i), P_i(t - n\Delta t), \dots, P_{ih}(h_i), P_{ih}(t - n\Delta t)) \quad (12)$$

где P_i – прогноз вероятности; t – текущее время; Δt – период между измерениями; λ – интервал прогноза; n – количество интервалов в прошлом; k – количество интервалов в будущем; l – количество оцениваемых характеристик; $P_{im}(m_i)$, $P_{ih}(h_i)$ – значения вероятностей для электрических и вибрационных параметров (m_i – дефект, выявленный при анализе электрических параметров, h_i – дефект, выявленный при анализе вибрационных параметров в соответствии с таблицей 1; N_i – косвенные параметры, влияющие на прогноз оценки вероятности безотказной работы.

Для работы ИНС необходимо было сформировать обучающую и тестовую выборки по диагностируемым параметрам из ретроспективной базы данных. То есть для работы ИНС были необходимы данные, полученные с датчиков. К данным, влияющим на прогнозирование безотказной работы, могли быть добавлены косвенные параметры с учетом проведенного регрессионного анализа и оценки значимости коэффициентов корреляции.

Работа ИНС заключалась в следующем: запускались и задавались начальные условия для работы нейронной сети (значения весовых коэффициентов, количество обучающих выборок, параметры ИНС, заданное малое значение, определяющее точность прогноза), считывались значения измеряемых сущностей и далее следовал процесс преобразования в относительные величины Y_i в диапазоне ($0 \leq Y_i \leq 1$). Исходными данными для определения вероятности возникновения дефекта с помощью ИНС являлись эксплуатационные, статистические и ремонтные параметры асинхронного двигателя и параметры, косвенно влияющие на его техническое состояние, в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Контролируемые параметры асинхронных двигателей

Параметры			
	Электрика	Вибрация	Косвенные
Зарегистрированный	1. Мгновенные значения тока в каждой фазе (I , I_{st}) 2. Мгновенные значения напряжения в каждой фазе (U , U_{st}) 3. Мгновенные значения мощности в каждой фазе (P , S)	1. Мгновенные значения виброперемещений (осевое s_x , горизонтальное s_y , вертикальное s_z) 2. Мгновенные значения виброскорости (осевая v_x , горизонтальная v_y , вертикальная v_z) 3. Мгновенные значения виброускорения (осевое a_x , горизонтальное a_y , вертикальное a_z)	1. Средняя температура окружающей среды (T) 2. Влажность (ρ) 3. Долговечность изоляции (ξ) 4. Скорость вращения редуктора ($v_{r(t)}$) 5. Скорость исполнительного органа ($v_{l(t)}$)
Расчетный статистический ремонт	1. Среднеквадратичный ток в каждом фазовращателе 2. Среднеквадратичное значение напряжения в каждой фазе 3. Среднеквадратичная мощность в каждой фазе 4. Спектры тока каждой фазы 5. Спектры мощности каждой фазы 6. Коэффициент мощности 7. Значение потерь мощности 8. Коэффициенты небаланса напряжения	4. Среднеквадратичное значение виброперемещения RMS 5. Среднеквадратичное значение виброскорости RMSr 6. Среднеквадратичное значение виброускорения RMSr 7. Спектр виброперемещений 8. Спектр виброскоростиг 9. Спектр виброускорения 10. Мощность фундаментальной гармоники	

На основе уравнения (10) был составлен алгоритм работы ИНС. Он учитывал работу системы, которая оценивает возможность безотказной работы для анализируемых электрических и вибрационных характеристик АД с помощью ИНС.

Вход нейронной сети включал блок генерации обучающих данных и блок создания ИНС. В нем определялись тип ИНС, количество промежуточных слоев, число нейронов и функция активации. В блоке обучения задавался определенный алгоритм обучения и параметры. Вероятность безотказной работы ЭД оценивалась по электрическим, вибрационным и косвенным параметрам. Они сравнивались с заданными значениями ЭД в блоках, которые отвечали за тестирование и оценку качества прогнозирования.

Структурная модель формального нейрона, на основе которого строится нейронная сеть, предназначенная для прогнозирования [31], представлена на рисунке 5.

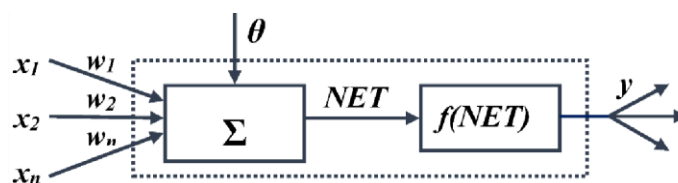


Рис. 5. Модель формального нейрона

Формальный нейрон – это элементарный преобразующий элемент с несколькими входами, на которые поступают сигналы $x_1, x_2 \dots x_n$, блоком сумматора, блоком преобразования сигнала с помощью передаточной функции (или функции активации) $f(NEI)$ и одним выходом y . Каждый вход имеет свой «вес» w_i , θ – параметр смещения. Представленный нейрон функционирует в два этапа. На первом этапе в блоке сумматора вычисляется величина возбуждения, поступающего на нейрон [32].

$$NET_{jl} = \sum_i w_{ijl} x_{ijl} + \theta \quad (13)$$

где i – номер входа, j – номер нейрона в слое, l – номер слоя, x_{ijl} – i -й входной сигнал j -того нейрона в слое l ; w_{ijl} – весовой коэффициент i -го входа для нейрона с номером j в слое l ; NET_{jl} – сигнал NET нейрона с номером j в слое l , θ – пороговый уровень данного нейрона [33].

Параметр смещения θ часто представляется в виде одного входа $x_{n+1} = 1$ с весом $w_{n+1} = \theta$. На втором этапе суммарное возбуждение пропускается через функцию активации. В результате получается выходной сигнал $y = f(NEI)$. Функция преобразования, как правило, должна удовлетворять двум условиям:

(1) $f(NEI)$ -монотонная (обычно неубывающая) функция;

(2) $|f(NEI)| \leq 1$,

где f -нелинейная функция, называемая функцией активации.

Работа многослойного перцептрона (МСП) [34,35] описывается следующими уравнениями:

$$NET_{jl} = \sum_i w_{ijl} x_{ijl}, \quad (14)$$

$$OUT_{jl} = F(NEI_{jl} - \theta_{jl}), \quad (15)$$

$$x_{ij(l+1)} = OUT_{jl}, \quad (16)$$

3. Результаты и обсуждение

Точность прогнозирования достигалась путем сравнения полученных результатов с фактическими данными на предыдущей итерации. Это позволяло переобучать систему на новых данных с отклонением более 5, тем самым сокращая время цикла обработки данных. Алгоритм обучения автоматически выполнял минимальное количество итераций для достижения требуемой точности. В качестве исходных данных для системы использовались эталонные данные вибрационных и электрических параметров в соответствии с таблицей 2. По окончании обучения нейронной сети проводилась оценка ее характеристик с учетом стандартных требований [36, 37].

Таблица 2

Значения вероятности дефектов по электрическим и вибрационным параметрам на разных этапах эксплуатации

Дефекты	Вероятность						
	$m, I:$	$H, I:$	Нормальное состояние	Докризисное состояние	Кризисное состояние	Согласно заводским данным	Фактическое состояние
Повреждение изоляции между фазами	1		0,12	0,2	0,28	0,1	0,16
Короткое замыкание между витками	2		0,1	0,18	0,26	0,09	0,3
Короткое замыкание в обмотке статора	3		0,12	0,2	0,28	0,1	0,12
Повреждение подшипника		1	0,1	0,18	0,26	0,09	0,17
Повреждение ротора		2	0,12	0,2	0,28	0,1	0,16
Динамический эксцентриситет	4	3	0,12	0,2	0,28	0,1	0,3
Статический эксцентриситет	5	4	0,12	0,2	0,28	0,1	0,3
Несинусоидальное напряжение питания	6		0,12	0,2	0,28	0,1	0,14
Дисбаланс массы ротора		5	0,2	0,28	0,36	0,14	0,18
Механическое ослабление муфты		6	0,12	0,2	0,28	0,1	0,22

Значение жизненного цикла электромеханического оборудования, учитывающее работу ИНС (11), (12), (13), (14), представлено уравнением (15) [38-40].

$$\begin{aligned} \delta = & K_1 \cdot P_{ih}(h) + K_2 \cdot P_{im}(m) + K_3 \cdot P_{ih}(h) + \\ & + K_4 \cdot P_{im}(m) = K_1 \cdot F\left(\sum_{i=1}^{17} (\Delta w_{ij} \cdot x_{ij} - \Delta \theta_j)\right) + K_2 \cdot F\left(\sum_{i=1}^{17} (\Delta w_{ij} \cdot x_{ij} - \Delta \theta_j)\right) \\ & + K_3 \cdot F\left(\sum_{i=1}^{21} (\Delta w_{ij} \cdot x_{ij} - \Delta \theta_j)\right) + K_4 \cdot F\left(\sum_{i=1}^{21} (\Delta w_{ij} \cdot x_{ij} - \Delta \theta_j)\right) \end{aligned} \quad (17)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий состояние границ для оценки вибрационных параметров и обнаруженных дефектов в момент времени t в зависимости от нормального, предкризисного и кризисного состояний.

K_2 – коэффициент, учитывающий состояние границ для оценки электрических параметров и появления (обнаружения) дефектов в момент времени t , в зависимости от нормального, предкризисного и кризисного состояний.

K_3 – коэффициент, учитывающий состояние границ для оценки вибрационных параметров и измеряемых параметров и факторов, влияющих на прогноз жизненного цикла в момент времени t , в зависимости от нормального, предкризисного и кризисного состояний.

K_4 – коэффициент, учитывающий состояние границ для оценки электрических параметров и измеряемых параметров и факторов, влияющих на прогноз жизненного цикла в момент времени t , в зависимости от нормального, предкризисного и кризисного состояний.

$P_{ih}(h)$, $P_{im}(m)$ – вероятности для вибрационных и электрических параметров, учитывающие работу ИНС.

$$\Delta w_{ij} = \epsilon(d_j^s - y_j^s) \cdot x_{ij}, \Delta \theta_j = -\epsilon(d_j^s - y_j^s) \quad (18)$$

где Δw_{ij} ; $\Delta \theta_j$ – поправки на весовые коэффициенты и пороговые уровни, с учетом рассчитанного выхода и сравнения полученного выходного вектора y^s со стандартной скоростью обучения d^s – ИНС.

Расчетное значение жизненного цикла, полученное на основе работы ИНС, с учетом электрических, вибрационных и косвенных параметров, а также выявленных дефектов оценивалось в соответствии с границами, представленными в табл. 3.

Таблица 3

Уровни оценки жизненного цикла АД

Индикатор жизненного цикла δ	Характеристики технического состояния	Разрешение на операцию
$0 < \delta \leq 0.1$	«эталонное» состояние, не влияет на производительность	Разрешено
$0.1 < \delta \leq 0.2$	«нормальное» состояние, влияние на производительность незначительно	Разрешено
$0.2 < \delta \leq 0.4$	«предкризисное» состояние, требуется комплексная диагностика с заданными периодами, снижение	Разрешено со встроенной диагностикой
$0.4 < \delta \leq 1$	нагрузка на устройство	Не разрешено

Результатом работы системы диагностики технического состояния и оценки жизненного цикла электромеханического агрегата с асинхронным двигателем являются диагностические изображения вероятностей для технического состояния на рисунках 6-8.

На рисунке 6 представлено диагностическое изображение нормального состояния ЭД по всем контролируемым параметрам. После создания нескольких незначительных искусственных дефектов в агрегате были выявлены четыре параметра, отклоняющиеся от нормального состояния, а общее состояние машины оценивалось как предкризисное (рис. 7). В процессе длительной эксплуатации агрегата были выявлены быстро нарастающие изменения трех параметров, перешедшие в зону критических значений, и состояние агрегата было оценено как кризисное с рекомендациями по остановке и ремонту (рис. 8).



Рис. 6. График для вероятностного нормального состояния устройства



Рис. 7. График для вероятностного предкризисного состояния подразделения



Рис. 8. График вероятностного кризисного состояния установки

4. Выводы

Безопасное функционирование предприятий нефтяной отрасли напрямую зависит от качественных и количественных показателей, связанных с экономической эффективностью. Она выражается в затратах на проведение работ по диагностике и мониторингу и эксплуатации электро-механического оборудования, что включает в себя комплекс мероприятий, направленных на совершенствование систем диагностики.

Описанный подход к оценке технического состояния и прогнозированию возможности безотказной работы по электрическим, вибрационным и косвенным параметрам позволит получить мгновенную картину состояния для электропривода с высокой точностью.

Конечным результатом станет снижение количества непредвиденных остановок электропривода и простоев сопутствующего оборудования, а также сокращение затрат на плановые и внеплановые ремонты и обслуживание.

По данным, полученным на выходе системы, можно было косвенно определить состояние сопутствующего механического оборудования и исследовать способы поддержания работоспособности электропривода путем корректировки алгоритмов управления.

Список сокращений

В данной рукописи используются следующие сокращения:

FFT	КПФ	конечное преобразование Фурье
ED (EM)	ЭД	электродвигатель
AM	АД	асинхронный двигатель
EB	ИО	исполнительный орган
ANN	ИНС	искусственная нейронная сеть
DCB	ПСБ	плата сбора данных
CS	ЗРУ	закрытое распределительное устройство
Tr	Тр	трансформатор
QF	АУ	автоматический выключатель
ATR	АПП	автоматический перевод резерва
AVS	АВВ	автоматический вакуумный выключатель
FKD	ФКУ	фильтрокомпенсирующее устройство
KM	МК	магнитный контактор
AM	АД	асинхронный двигатель
P	Н	насос

Список символов

I_{1p}, U_{1p}	амплитуда основной гармоники тока и напряжения в фазе (А, В)
I, U	действующее значение тока и напряжения (А, В)
P, S	чистая и кажущаяся мощность (Вт, вар)
I_n	амплитудные гармоники тока статора, кратные основной гармонике (А)
I_m	амплитуды гармоник тока (А), кратные несущей частоте
I_{nm}	амплитуды комбинационных гармоник тока статора (А)
I_{di}	амплитудные значения тока статора (А), соответствующие дефекту
$I_{st(n)}, I_{st(q)}, I_{st(di)}$	гармонические составляющие тока статора (А)
$I_r, I_{d,st}, I_b, I_{ec}$	амплитудные значения тока статора, модулированные с учетом дефектов ротора, статора, подшипников и эксцентриситета воздушного зазора
ω_1	частота вращения основной гармоники тока (рад/с)
ω_H	частота вращения несущей гармоники тока статора (рад/с)
ω_r	частота вращения ротора (рад/с)
ω_{di}	частота вращения гармонической составляющей тока статора, вызванной дефектом (рад/с)

ϕ	угол сдвига между основной гармоникой фазного тока и напряжения (рад)
s	скольжение асинхронного двигателя
rs	число стержней ротора
f_1, f_H	основная и несущая частоты (Гц)
f_{di}	частота дефекта (Гц)
$M(n), M(qp), M(di)$	составляющие электромагнитного момента (Нм), создаваемого в результате взаимодействия n гармоник тока статора и потокоцепления ротора, di гармоник тока статора и потокоцепления ротора, q гармоники тока статора и p гармоники потокоцепления ротора
M_{av}	среднее значение электромагнитного момента асинхронного двигателя (Н·м)
$\psi_{r(n)}, \psi_{r(p)}, \psi_{r(di)}$	гармонические составляющие потокоцепления ротора (Вб)
$\theta(qp)$	угол между q -гармоникой тока статора и p -гармоникой потокоцепления ротора (рад)
$\theta(di)$	угол между ди-гармониками тока статора и потокоцеплением ротора (рад)
T	средняя температура окружающей среды
ρ	влажность
ξ	прочность изоляции
$v_{r(t)}$	сигнал частоты вращения редуктора
$v_{i(t)}$	сигнал ЭБ
$KI(n)$	коэффициент гармонических искажений тока, определяемый качеством электрической энергии в питающей сети в фазах А, В, С навески (рад)
KI^*	коэффициент гармонических искажений тока в фазах А, В, С электродвигателя, определяемый по дефектам
$Kp(n)$	коэффициент пульсаций электромагнитного момента, определяемый типом и конструкцией силового преобразователя частоты
Kp^*	коэффициент пульсации электромагнитного момента, определяемый видом и степенью дефектности электродвигателя и механической части электропривода
K_1	коэффициент, учитывающий состояние границ оценки параметров вибрации и обнаруженных дефектов в момент времени t и зависящий от нормального, предкризисного и кризисного состояний
K_2	коэффициент, учитывающий состояние границ для оценки электрических параметров, и наступление (обнаружение) дефектов в момент времени t и в зависимости от нормального, предкризисного и кризисного состояний
K_3	коэффициент, учитывающий состояние границ оценки вибрационных параметров, а также измеряемых параметров и факторов, влияющих на прогноз жизненного цикла, в момент времени t и в зависимости от нормального, предкризисного и кризисного состояний
K_4	коэффициент, учитывающий состояние границ для оценки электрических параметров, а также измеренных параметров и факторов, влияющих на прогноз жизненного цикла, в момент времени t и в зависимости от нормального, предкризисного и кризисного состояний
$P_{ih}(h), P_{im}(m)$	вероятности для вибрационных и электрических параметров с учетом работы ИНС
ε	скорость обучения ИНС
δ	показатель жизненного цикла
$\Delta w_{ij}; \Delta \theta_j$	коррекция весовых коэффициентов и пороговых уровней, учет рассчитанного выхода и сравнение полученного выходного вектора y^s с эталоном d^s

Вклад авторов: концептуализация, А.К.; формальный анализ, А.К. и Н.К.; исследование, Н.К.; методология, А.К. и Н.К.; администрирование проекта, В.М.; ресурсы, Н.К.; программное обеспечение, Н.К.; валидация, А.К.; визуализация, В.М.; написание первоначального варианта, Н.К.; написание и редактирование, В.М. Все авторы прочитали и согласились с опубликованным вариантом рукописи.

Финансирование: исследование выполнено за счет средств субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 г. № ФЦРВ-2020-0014.

Заявление о доступности данных: данные, представленные в настоящем исследовании, доступны по запросу у соответствующего автора. Данные не находятся в открытом доступе в связи с их хранением в частных сетях.

Конфликты интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. *J. Min. Inst.* 2021, 247, 132–140. <http://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.14>
2. Shklyarskiy, Y.; Skamyin, A.; Vladimirov, I.; Gazizov, F. Distortion load identification based on the application of compensating devices. *Energies* 2020, 13, 1430. <http://doi.org/10.3390/en13061430>
3. Kodkin, V.L.; Anikin, A.S.; Baldenkov, A.A. Performance identification of the asynchronous electric drives by the spectrum of rotor currents. *Int. J. Power Electron. Drive Syst.* 2019, 10, 211–218. <http://doi.org/10.11591/ijpeds.v10.i1.pp211-218>
4. Marco, L.; Blaabjerg, F.; Hansen, S. Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2005, 41, 1281. <http://doi.org/10.1109/TIA.2005.853373>
5. Dell'Aquila, A.; Liserre, M.; Monopoli, V.G.; Rotondo, P. An energy-based control for an nH-bridges multilevel active rectifier. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2005, 52, 670. <http://doi.org/10.1109/TIE.2005.843971>
6. Zhukovskiy, Y.L.; Korolev, N.; Filatova, I. Asynchronous motor drive operability field with two-link structure of frequency converter. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020, 1661, 012127. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1661/1/012127>
7. Klyuev, R.V.; Bosikov, I.I.; Mayer, A.V.; Gavrina, O.A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustain. Dev. Mt. Territ.* 2020, 2, 283–290. <http://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290>
8. Salomon, C.P.; Ferreira, C.; Sant'Ana, W.C.; Lambert-Torres, G.; Borges da Silva, L.E.; Bonaldi, E.L.; Torres, B.S. A study of fault diagnosis based on electrical signature analysis for synchronous generators predictive maintenance in bulk electric systems. *Energies* 2019, 12, 1506. <http://doi.org/10.3390/en12081506>
9. Filatova, I.; Nikolaichuk, L.; Zakaev, D.; Ilin, I. Public-private partnership as a tool of sustainable development in the oil-refining sector: Russian case. *Sustainability* 2021, 13, 5153. <http://doi.org/10.3390/su13095153>
10. Lavrenko, S.A.; Shishljannikov, D.I. Performance evaluation of heading-and-winning machines in the conditions of potash mines. *Appl. Sci.* 2021, 11, 3444. <http://doi.org/10.3390/app11083444>
11. Klyuev, R.; Fomenko, O.; Gavrina, O.; Turluev, R.; Marzoev, S. Energy indicators of drilling machines and excavators in mountain territories. In *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*; Springer: Cham, Switzerland, 2019; Volume 1258, pp. 272–281. http://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_25
12. Natalia, K.; Frenkel, I. Digital Processing of Seismic Data from Open-Pit Mining Blasts. *Appl. Sci.* 2021, 11, 383. <http://doi.org/10.3390/app11010383>
13. Minav, T.A.; Laurila, L.I.E.; Pyrhönen, J.J. Analysis of electro-hydraulic lifting system's energy efficiency with direct electric drive pump control. *Autom. Constr.* 2013, 30, 144. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.009>
14. CusidÓCusido, J.; Romeral, L.; Ortega, J.A.; Rosero, J.A.; Espinosa, A.G. Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008, 55, 633. <http://doi.org/10.1109/TIE.2007.911960>
15. Wang, J.; Fu, P.; Zhang, L.; Gao, R.X.; Zhao, R. Multilevel information fusion for induction motor fault diagnosis. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 2019, 24, 2139. <http://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2928967>
16. Glowacz, A.; Glowacz, W.; Kozik, J.; Piech, K.; Guttén, M.; Caesarendra, W.; Khan, Z.F. Detection of deterioration of three-phase induction motor using vibration signals. *Meas. Sci. Rev.* 2019, 19, 241. <http://doi.org/10.2478/msr-2019-0031>
17. Raj, V.P.; Natarajan, K.; Girikumar, S.T. Induction motor fault detection and diagnosis by vibration analysis using MEMS accelerometer. In *Proceedings of the 2013 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control, Signal Processing and Computing Applications (C2SPCA)*, Bangalore, India, 10–11 October 2013; IEEE: Bangalore, India, 2013; pp. 1–6. <http://doi.org/10.1109/C2SPCA.2013.6749391>
18. Tsypkin, M. Induction motor condition monitoring: Vibration analysis technique—a twice line frequency component as a diagnostic tool. In *Proceedings of the 2013 International Electric Machines & Drives Conference*, Chicago, IL, USA, 12–15 May 2013; IEEE: Chicago, IL, USA, 2013; pp. 117–124. <http://doi.org/10.1109/IEMDC.2013.6556242>
19. Seker, S.; Ayaz, E. Feature extraction related to bearing damage in electric motors by wavelet analysis. *J. Frankl. Inst.* 2003, 340, 125–134. [http://doi.org/10.1016/S0016-0032\(03\)00015-2](http://doi.org/10.1016/S0016-0032(03)00015-2)
20. Kar, C.; Mohanty, A.R. Monitoring gear vibrations through motor current signature analysis and wavelet transform. *Mech. Syst. Signal Process.* 2006, 20, 158–187. <http://doi.org/10.1016/j.ymsp.2004.07.006>
21. Ye, Z.; Wu, B.; Sadeghian, A. Current signature analysis of induction motor mechanical faults by wavelet packet decomposition. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2003, 50, 1217. <http://doi.org/10.1109/TIE.2003.819682>
22. Kiselichnik, O.I.; Bodson, M. Nonsensor control of centrifugal water pump with asynchronous electric-drive motor based on extended Kalman filter. *Russ. Electr. Eng.* 2011, 82, 69–75. <http://doi.org/10.3103/S1068371211020088>
23. Uddin, J.; Kang, M.; Nguyen, D.V.; Kim, J.M. Reliable fault classification of induction motors using texture feature extraction and a multiclass support vector machine. *Math. Probl. Eng.* 2014, 2014, 814593. <http://doi.org/10.1155/2014/814593>
24. Glowacz, A. Diagnostics of DC and induction motors based on the analysis of acoustic signals. *Meas. Sci. Rev.* 2014, 14, 257. <http://doi.org/10.2478/msr-2014-0035>

25. Petruk, O.; Szewczyk, R.; Ciuk, T.; Strupiński, W.; Salach, J.; Nowicki, M.; Trzcinka, K. Sensitivity and offset voltage testing in the hall-effect sensors made of graphene. In *Recent Advances in Automation, Robotics and Measuring Techniques*; Springer: Cham, Switzerland, 2014; Volume 267. http://doi.org/10.1007/978-3-319-05353-0_60
26. Vasilev, B.Y. The study methods of increase efficiency algorithms pulse width modulation in AC electric drives. *Int. J. Electr. Comput. Eng.* 2016, 6, 2855. <http://doi.org/10.11591/ijece.v6i6.11322>
27. Long, P.T.; Van An, N.; Vasilev, B. Compare the Efficiency of the Active Filter and Active Rectifier to Reduce Harmonics and Compensate the Reactive Power in Frequency Controlled Electric Drive Systems. In *International Conference on Engineering Research and Applications*; Springer: Cham, Switzerland, 2020; Volume 78, pp. 242–253. http://doi.org/10.1007/978-3-030-64719-3_28
28. Belsky, A.A.; Saint Petersburg Mining University; Dobush, V.S.; Haikal, S.F. Lebanese University Operation of a Single-phase Autonomous Inverter as a Part of a Low-power Wind Complex. *J. Min. Inst.* 2019, 239, 564–569. <http://doi.org/10.31897/pmi.2019.5.564>
29. Cardoso, A.J.M.; Saraiva, E.S. Computer aided detection of Airgap eccentricity in operating three phase induction motors by Park's vector approach. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 1993, 29, 897–901. <http://doi.org/10.1109/28.245712>
30. Zhukovskiy, Y.L.; Korolev, N.A.; Babanova, I.S.; Boikov, A. The probability estimate of the defects of the asynchronous motors based on the complex method of diagnostics. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2017, 87. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/87/3/032055>
31. Jing, L.; Zhao, M.; Li, P.; Xu, X. A convolutional neural network based feature learning and fault diagnosis method for the condition monitoring of gearbox. *Measurement* 2017, 111, 1–10. <http://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.017>
32. Thomson, W.T.; Fenger, M. Current signature analysis to detect induction motor faults. *IEEE Ind. Appl.* 2001, 7, 26–34. <http://doi.org/10.1109/2943.930988>
33. Tino, P.; Benuskova, L.; Sperduti, A. Artificial neural network models. In *Springer Handbook of Computational Intelligence*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2015; pp. 455–471. http://doi.org/10.1007/978-3-662-43505-2_27
34. Bounds, D.G.; Lloyd, P.J.; Mathew, B.G.; Waddell, G. A multilayer perceptron network for the diagnosis of low back pain. *ICNN* 1988, 2, 481–489. <http://doi.org/10.1109/ICNN.1988.23963>
35. Vasil'ev, B.Y.; Shpenst, V.A.; Kalashnikov, O.V. Providing energy decoupling of electric drive and electric grids for industrial electrical installations. *J. Min. Inst.* 2018, 229, 41. <http://doi.org/10.25515/PMI.2018.1.41>
36. Xiao, C.; Ye, J.; Esteves, R.M.; Rong, C. Using Spearman's correlation coefficients for exploratory data analysis on big dataset. *Concurr. Comput. Pract. Exp.* 2016, 28, 3866–3878. <http://doi.org/10.1002/cpe.3745>
37. Rebekić, A.; Lončarić, Z.; Petrović, S.; Marić, S. Pearson's or Spearman's correlation coefficient-which one to use. *Poljoprivreda* 2015, 21, 47–54. <http://doi.org/10.18047/poljo.21.2.8>
38. Abramovich, B.N. Uninterruptible power supply system for mining industry enterprises. *J. Min. Inst.* 2018, 229, 31. <http://doi.org/10.25515/pmi.2018.1.31>
39. Abramovich, B.N.; Veprikov, A.A.; Sychev, Y.A.; Lyakh, D.A. Use of active power transducers in industrial dc power systems supplying electrolysis cells. *Tsvetnye Met* 2020, 2, 95–100. <http://doi.org/10.17580/tsm.2020.02.13>
40. Turysheva, A.; Voytyuk, I.; Guerra, D. Estimation of Electricity Generation by an Electro-Technical Complex with Photoelectric Panels Using Statistical Methods. *Symmetry* 2021, 13, 1278. <http://doi.org/10.3390/sym13071278>