

УДК 62-83; 658.58

Борисенко В. Ф., *Сидоров В. А., Землянский А. И.

Донецкий национальный технический университет

*E-mail: sidorov_va58@mail.ru

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

В промышленности подавляющее число электромеханических систем (ЭМС) подвержено различным видам нагружения — это динамические нагрузки в пуско-тормозных, повторно-кратковременные режимы работы механизма, нестационарный характер нагружения, сбои в работе системы управления и контроля, неисправности в механической части (износ подшипников, увеличение зазоров в зубчатых передачах, недостаток смазки и др.), возможность развития резонансных явлений вследствие близости собственной частоты колебаний системы с частотой нагружения, нестабильность напряжения питания, симметричное снижение напряжения по фазам, несимметричное (кратковременное — с последующим восстановлением до номинального). На примере ЭМС шаровой мельницы показаны возможные неисправности в её работе и их влияние на устойчивость работы системы.

Ключевые слова: электромеханическая система, неисправности, колебания напряжения питания, вибрационные показатели.

Основой промышленного производства современной цивилизации являются электромеханические системы, дополненные в последнее время программируемыми системами управления. Высокий уровень безотказности и долговечности данных систем обеспечивает непрерывность технологического процесса энергетических, металлургических, химических, машиностроительных и других отраслей. Нестационарные режимы нагружения, воздействие окружающей среды, ошибки при обслуживании приводят к внезапным отказам электромеханического оборудования после многих лет безаварийной эксплуатации. Успешная ликвидация внезапных отказов требует определения и устранения основных и дополнительных причин для исключения повторения внештатной ситуации. Возможным решением в данном случае становится моделирование технического состояния, предшествующего отказу, на основе логических алгоритмов с учётом физических зависимостей развития повреждений. Математическое моделирование в практике промышленного производства имеет ограниченное применение

из-за отсутствия точного значения фактических параметров систем.

Основой логического моделирования является представление электромеханического привода как сложной системы и определение связей между элементами с учётом их фактического состояния (рис. 1). В процессе эксплуатации работоспособное состояние системы обеспечивают специалисты ремонтных служб (электрической, механической, КИП и А), не учитывая качества поставляемой предприятию электрической энергии.

В связи с этим **целью** настоящей работы явилось моделирование технического состояния, предшествующего отказу, на основе логических алгоритмов с учётом физических зависимостей развития повреждений.

Объект исследования — электромеханическая система привода шаровых мельниц горнодобывающей отрасли.

Предмет исследования — параметры, характеризующие техническое состояние и закономерности развития неисправностей.

Задачи исследования:

– определение возможных неисправностей и диагностических параметров;

– определение подходов к математическому моделированию;

– выявление закономерностей развития повреждений методами виброметрии.

Методика исследования. Исследование проводилось на основании рассмотрения математических моделей оценки состояния и развития повреждений. Использовались методы термометрии, ваттметрии (фиксация просадок напряжения) и виброметрии. Применялись портативные приборы и многоканальные анализаторы спектров, а также стационарные системы вибрационного контроля.

Изложение материала. Ниже приводим основные неисправности, влияющие на состояние системы.

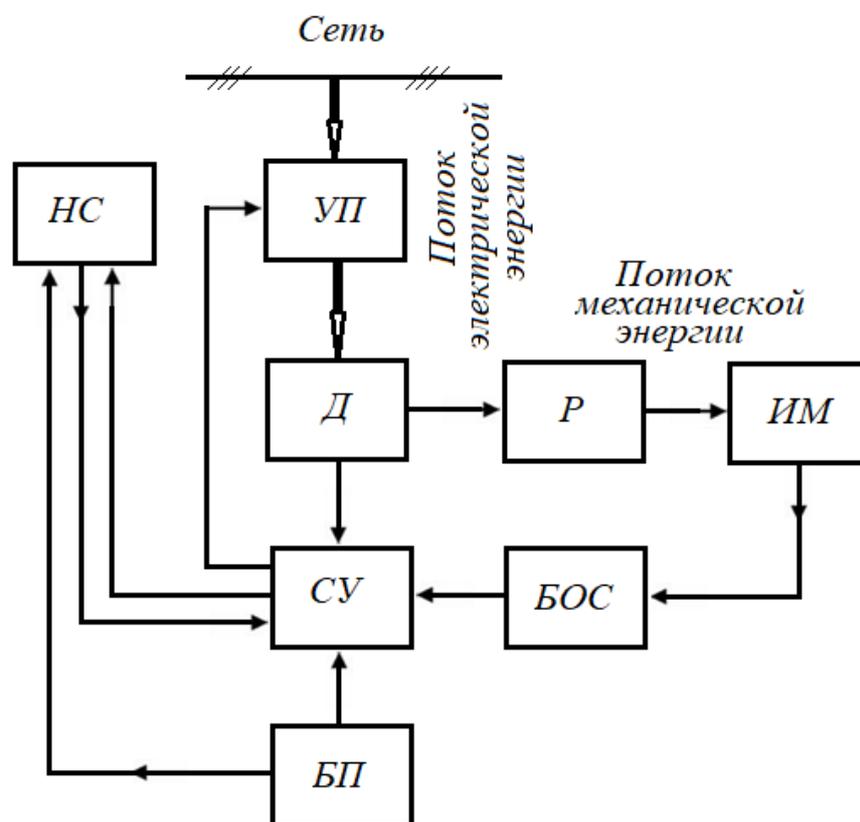
Система электроснабжения (ЛЭП) — дисбаланс и нестабильность напряжения

по фазам, гармонические искажения по напряжениям и токам.

Преобразование электрической энергии (трансформаторы) — старение и износ изоляции; ослабление прессовки магнитопровода; ослабление затяжки резьбовых соединений; ложное срабатывание газовой и дифференциальной защит.

Преобразование электрической энергии в механическую (электродвигатель) — асимметрия в цепи статора из-за естественного старения обмоток; межвитковые замыкания; повышенный нагрев в электромагнитной цепи; повреждённые стержни; эксцентриситет/изгиб ротора.

Система управления — нарушения в работе защит, блокировок; отклонения приводов с регулируемой скоростью, плавных пусков.



УП — управляемый преобразователь; Д — двигатель (электромеханический преобразователь); Р — редуктор; ИМ — исполнительный механизм; БОС — блок обратных связей; СУ — система управления; БП — блок питания; НС — наблюдатель состояния

Рисунок 1 — Элементы системы автоматизированного электропривода

Механическая часть — повреждения подшипников, ослабление резьбовых соединений, несоосность валов двигателя и редуктора/исполнительного механизма; податливое основание.

Исполнительная часть — нестабильность нагрузки; превышение допустимых значений.

Для примера рассмотрим электромеханическую систему шаровой мельницы, имеющей широкое применение в добывающей и энергетической отраслях. Она имеет высокую эксплуатационную надёжность в случае проведения качественного технического обслуживания (рис. 2). Среди основных дефектов данного агрегата отмечаются [1, 2] износ шаров и брони барабана, перегрев подшипников, вибрация, износ зубьев, налипание пыли на обмотку статора. При этом восстановление работоспособного состояния двигателя имеет наибольшее оценочное время устранения (50...950 часов) и сложность определения состояния.

После долгой эксплуатации пыль прилипает к статору, образуя слой определённой толщины, при котором происходит короткое замыкание. Повторение этого явления приводит к повреждению изоляции, что вызовет явление искрения и пробоя, в результате чего шаровая мельница остановится. Без резервного двигателя работать невозможно.

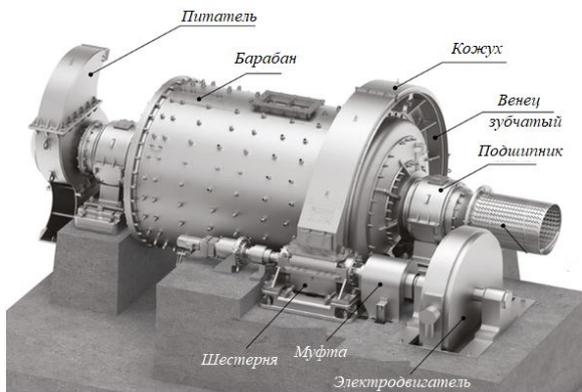


Рисунок 2 — Шаровая мельница: общий вид

Техническое состояние электромеханической системы отслеживается в процессе эксплуатации. Для электродвигателя наиболее слабым элементом является его изоляция: она весьма чувствительна к перегреву, динамическим и вибрационным воздействиям. Для оценки теплового состояния двигателя прибегают к использованию многомассовых расчётных схем, которые могут быть описаны системой уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} = \left(-\sum_{i=2}^m \Lambda_{i1} \right) \theta_1 + \sum_{i=2}^m \Lambda_{i1} \theta_i + P_1, \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} = \left(-\sum_{i=1}^{k(i \neq 2)} \Lambda_{i2} \right) \theta_2 + \sum_{i=1}^{k(i \neq 2)} \Lambda_{i2} \theta_i + P_2, \\ \dots \\ C_n \frac{d\theta_n}{dt} = \left(-\sum_{i=2}^{q(i \neq n)} \Lambda_{in} \right) \theta_n + \sum_{i=2}^{q(i \neq n)} \Lambda_{in} \theta_i + P_n, \end{cases}$$

где C_n — теплоёмкость n -го тела; θ_n — температура n -го тела; θ_i — температура одного из соседних тел i ; q — количество тел, связанных в тепловом отношении с рассматриваемым телом n ; Λ_{in} — теплоотдача от одного из соседних тел i к данному телу n ; P_n — потери мощности в данном теле n ; t — текущее время; m — количество тел, связанных в тепловом отношении с первым телом; k — количество тел, связанных в тепловом отношении со вторым телом.

Решение данной системы приводит к определению средней температуры n -го тела в момент времени t . Составление модели сопряжено с трудностями определения фактических коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи. Использование термограмм может стать одним из эффективных методов уточнения расчётных коэффициентов.

В некоторых случаях дополнительную информацию несет регистрация скорости нагрева. Время свободного выбега ротора электродвигателя позволяет оценить значение коэффициента трения с точностью инженерного расчёта, без учёта возможно-

МАШИНОСТРОЕНИЕ

го электромагнитного воздействия, используя следующие соотношения.

$$J \cdot \varepsilon = M_{TP}, \omega = \varepsilon \cdot t,$$

принимая

$$J \approx 0,5 \cdot m \cdot R^2, M_{TP} = r \cdot m \cdot g \cdot f_{TP},$$

получаем

$$f_{TP} = (0,5 \cdot m \cdot R^2 \cdot \omega) / (r \cdot m \cdot g \cdot t)$$

или $f_{TP} = (0,5 \cdot R^2 \cdot \omega) / (r \cdot g \cdot t),$

где J — момент инерции ротора, кг·м²; ε — угловое ускорение, с⁻²; ω — угловая скорость, с⁻¹; t — время остановки, с; M_{TP} — момент трения, Н·м; m — масса ротора, кг; r — радиус трения в подшипнике, м; R — радиус ротора, м; g — ускорение свободного падения, м/с².

Пример 1. Свободный выбег двигателя мощностью 1,2 МВт с частотой вращения 960 об/мин при приёмке после ремонта составил $t_1 = 60$ с. Учитывая, что $r = 96$ мм, а $R = 290$ мм, рассчитан коэффициент трения:

$$f_{TP1} = (0,5 \cdot 0,29^2 \cdot 100,5) / (0,096 \cdot 9,81 \cdot 60) = 0,075.$$

После проведения дополнительных ремонтных работ по выверке положения подшипников и смазывания выбег составил $t_2 = 420$ с, а коэффициент трения:

$$f_{TP2} = (0,5 \cdot 0,29^2 \cdot 100,5) / (0,096 \cdot 9,81 \cdot 420) = 0,011.$$

Для оценки коэффициента трения используются следующие соотношения. При жидкостном трении коэффициент трения составляет 0,001...0,003. Возникновение граничного контакта приводит к увеличению коэффициента трения до значений 0,01...0,03. Сухое трение — 0,15. В результате проведенных дополнительных ремонтных работ состояние подшипникового узла изменилось от плохого до удовлетворительного, необходимого для длительной эксплуатации (рис. 3).

При запуске двигателя происходит интенсивный нагрев его элементов под действием пусковых токов $I_{II} \approx 5,5 I_H$, далее

процесс нарастания температур замедляется (рис. 4), т. к. имеет место работа двигателя с постоянной нагрузкой и расчётными условиями охлаждения.

При работе двигателя в повторно-кратковременном режиме, с частыми пусками интенсивность нагрева элементов машины возрастает в первые несколько десятков циклов, далее имеет место переход в квазиустановившийся режим работы (по условиям нагрева). Одновременно на обмотки статора действуют электродинамические силы, имеющие минимальное значение при отсутствии зазоров и проектных значениях жёсткости изоляции и увеличивающиеся при изменении данных параметров. Следовательно, при построении моделей, учитывающих накопление повреждений изоляции статорной обмотки, необходимо учитывать температуру, количество запусков и циклов, исходя из отработанных мотор-часов.

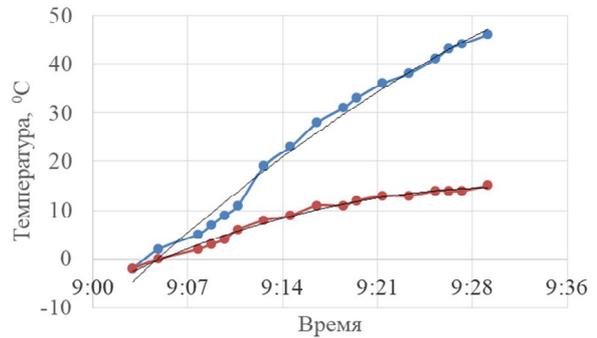


Рисунок 3 — Повышенная скорость нагрева подшипника при нарушении режима смазывания по сравнению с исправным подшипником

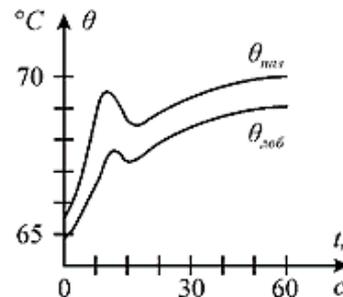


Рисунок 4 — Нагрев обмоток статора в лобовой $\theta_{лоб}$ и пазовой $\theta_{паз}$ частях

Время пуска достигает десятков секунд при больших пусковых токах (рис. 5).

Для снижения пусковых токов применяются реакторы (X_L), которые шунтируются по окончании пуска, или реализуется ступенчатый пуск через автотрансформатор. В случае применения систем ПЧ — АД, ПЧ — СД не возникает вопросов с ограничением пусковых токов и регулированием производительности агрегатов.

Потребляемая шаровой мельницей электрическая мощность зависит от конструктивных параметров, количества шаров, расхода и прочности загружаемого материала, режима работы (каскадный или водопадный), технического состояния элементов. Входными величинами со стороны электрической системы являются параметры питающего напряжения.

Реализация требований ряда стандартов [3–5 и др.] требует выполнения ряда приборных измерений: активного сопротивления, температуры обмотки, сопротивления изоляции, коэффициента поляризации, относительной влажности окружающего воздуха, тангенса угла диэлектрических потерь, частичного разряда, магнитной индукции, магнитной проницаемости, воздушного зазора. Одновременно появляется возможность контролировать целый ряд параметров в непрерывном режиме при удалённом доступе. Полученные данные требуют тщательного анализа, а отмеченные превышения допустимых значений — учёта в моделях накопления или развития повреждений (рис. 6).

Фиксируемые нестабильные значения напряжения по фазам могут компенсироваться демпфирующими свойствами и инертностью электромагнитной системы или служить причиной снижения частоты вращения и возникновения резонансных явлений, вплоть до остановки агрегата (рис. 7). Определение допустимых значений и методов стабилизации напряжения является одной из актуальных задач

обеспечения стабильности работы электромагнитного привода. Существующие суточные колебания напряжений необходимо учесть при запусках. Изменения токов, напряжений следует фиксировать при уменьшении длительности выборки для первичного определения отклонений и оценки дополнительных колебаний, желательно выделять 3...5 оборотов. Определённую информативность содержат циклы 10...15 с, однако при частоте 970 об/мин — это 160...240 оборотов.

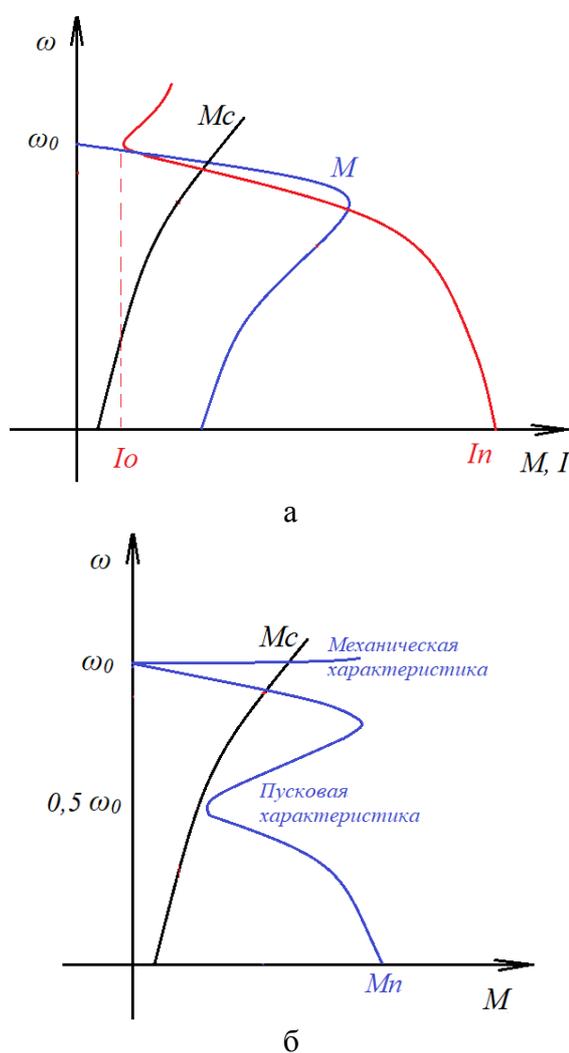


Рисунок 5 — Пусковые характеристики:
 а) для АД — $I_n = (5 \dots 7)I_0$;
 б) для СД — $I_n = (4 \dots 8)I_0$

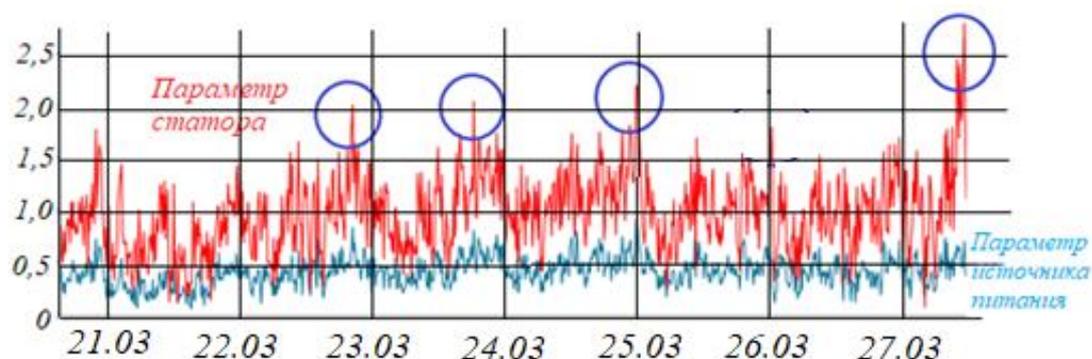


Рисунок 6 — Ток статора (красный цвет) и напряжение питания (синий) в процессе эксплуатации

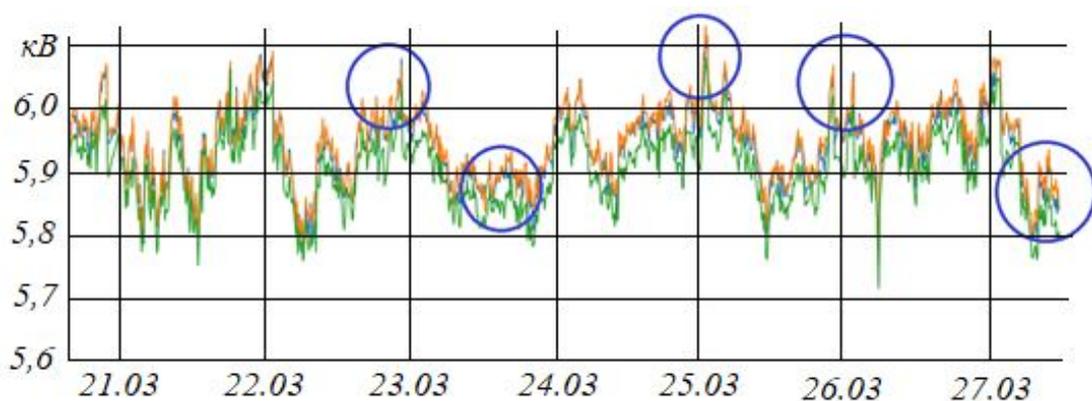


Рисунок 7 — Колебания напряжения питания (по фазам) в процессе эксплуатации

Спектральный анализ, наиболее информативный в этой ситуации, позволяет выполнить идентификацию причин отклонений. Если отклонения оцениваются как критические, то следует принять экстренные меры по предотвращению внезапного отказа. Стационарная система контроля должна дополняться непрерывной работой экспертной системы.

Соосность осей ротора и статора определяет равномерность и интенсивность силовых нагрузок электромагнитного поля, обеспечивая комплексную оценку текущего состояния двигателя. Изменение зазора приводит к нарушению стабильной работы контура намагничивания и к появлению периодических составляющих, влияющих на стабильность магнитного потока и электромагнитного момента двигателя. Появляются дополнительные гармониче-

ские колебания, вызывающие повышенную вибрацию корпуса и связанных с ним деталей. Прямые диагностические измерения воздушного зазора, фиксация фактических электромагнитных полей статора и оценка их равномерности практически невозможны в производственных условиях.

В настоящее время специальные электроприводы оснащаются датчиками ЭДС Холла для измерения магнитного потока и определения характера изменения тока намагничивания. С другой стороны, с помощью средств вычислительной техники возможно решение системы дифференциальных уравнений и определение магнитного потока двигателя. Необходимо заметить, что уравнения составляются при известных идеализированных условиях работы, постоянства потока, параметров двигателя, воздушного зазора и др. Для

упрощения решения системы реальный трёхфазный двигатель приводится к эквивалентному двухфазному, для чего используется система координатных преобразований [6–8].

Однако в реальных условиях при нарушении работы подшипниковых узлов или геометрии двигателя происходит изменение положения ротора относительно обмоток статора, возможны смещения по оси, в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Эти нарушения приводят к неравномерному распределению потока в зазоре, что вызывает появление в составляющих момента двигателя дополнительных пульсаций, приводящих к колебаниям механически связанных с ротором звеньев, в том числе и корпуса двигателя.

Как отмечалось выше, фиксация потока в зазоре двигателя затруднена, измерение фактического воздушного зазора не всегда допускает конструкция двигателя, а установка датчиков Холла в расточке статора может выполняться более с исследовательскими, нежели с практическими целями управления. Установка датчиков в нескольких точках приводит к тому, что их показания усредняются или за основу берутся показания одного датчика, а остальные служат резервом.

Косвенным показателем стабильности воздушного зазора и магнитного потока (тока намагничивания) могут быть значения параметров вибрации и показания температуры, что вполне достаточно для оценки состояния в производственных условиях.

Воздушный зазор между ротором и статором двигателя шаровой мельницы проверяется после каждой разборки. Зазор измеряется в трёх точках, разнесённых на 120° под каждым полюсом с двух сторон. Отклонение зазора от его номинального значения должно быть не более 10 %. Зазор измеряется набором щупов шириной 9 мм, длиной 600 мм. Толщина щупа для замера воздушного зазора принимается из расчёта: непроходной — величина воздушного зазора +10 %, проходной — величина воз-

душного зазора — 10 %. При измерении щуп направляется параллельно оси двигателя по оси полюса, при этом он не должен попадать на пазовый клин. К измеренной величине зазора необходимо прибавить 0,03...0,05 мм, т. к. действительная величина зазора несколько больше измеренной.

Для исследования поведения ЭМС в динамике наиболее часто используется двухмассовая расчётная схема, которая учитывает упруго-вязкие связи в механической системе (рис. 8). В случае учёта сухого трения и зазора поведение системы описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} J_1 \cdot p\omega_1 &= M_1 - M_{12} - M_{TP1}(\omega_1), \\ J_2 \cdot p\omega_2 &= M_{12} - M_2 - M_{TP2}(\omega_2), \\ M_y &= C_{12} \cdot \Delta\varphi_{12}, \\ M_e &= \beta_{12} \cdot \Delta\omega_{12}, \\ M_{12} &= M_y + M_e, \\ \Delta\varphi_{12} &= 0, \text{ если } \Delta\omega_{12}/p \leq \delta\varphi_{12}, \\ \Delta\varphi_{12} &= \Delta\omega_{12}/p, \text{ если } \Delta\omega_{12}/p > \delta\varphi_{12}, \end{aligned} \quad (1)$$

где p — оператор Лапласа; J_m — момент инерции первой массы; J_2 — момент инерции второй массы; ω_1 — частота вращения первой массы; ω_2 — частота вращения второй массы; M_1 — движущий момент первой массы; M_{12} — движущий момент второй массы; M_2 — момент сопротивления механизма, приложенный ко второй массе; M_{TP1} — момент сухого трения первой массы, зависящий от частоты вращения первой массы ω_1 ; M_{TP2} — момент сухого трения второй массы, зависящий от частоты вращения второй массы ω_2 ; M_y — упругая составляющая момента, пропорциональная углу закручивания вала между первой и второй массами; M_e — вязкая составляющая момента, пропорциональная разности частот вращения первой и второй масс; C_{12} — коэффициент упругости между первой и второй массами, $C_{12} = M_{12}/\Delta\varphi_{12}$; β_{12} — коэффициент вязкого трения между первой и второй массами $\beta_{12} = M_{12}/\Delta\omega_{12}$; $\Delta\varphi_{12}$ — текущее значение угла закручивания между первой и второй массами; $\Delta\omega_{12}$ — текущее значение разности частот вращения масс; $\delta\varphi_{12}$ — зазор в кинематической передаче.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

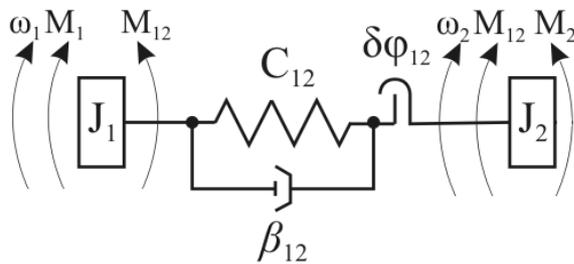


Рисунок 8 — Двухмассовая расчётная схема механической системы

Взаимовлияние механической и электрической частей ЭМС в полной мере в этой модели проследить невозможно. Для этого необходим более полный учёт механической части системы, т. е. за счёт увеличения числа расчетных масс механической части, упругих связей между ними, а также зазоров. Появление неисправностей имитируется изменением значений момента инерции, жёсткости упругой связи и значением зазора, что ограничивает изучение многообразных проявлений неисправностей. В этом случае более информативными становятся вибрационные методы оценки состояния механического оборудования.

При этом используется модель продольных вибрационных колебаний (рис. 9) — основной элемент — двухмассовая расчётная схема со стремящейся к бесконечности второй массой. Данный элемент используется для построения многомассовых расчётных моделей [9] уникальных объектов.

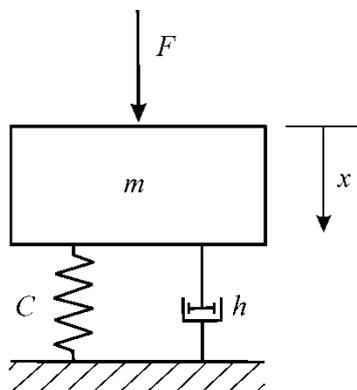


Рисунок 9 — Двухмассовая расчётная схема продольных колебаний

Факторами модели являются: масса — m , жёсткость — c , коэффициент демпфирования — h . Колебания системы возможны при воздействии переменной силы — F . Характер вынужденных колебаний определяется силами инерции, упругости, демпфирования и возмущающими:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + cx = F. \quad (2)$$

В данной модели учитываются характеристики и реакции системы: масса, жёсткость, коэффициент демпфирования. Значения этих величин при измерениях вибрации неизвестны, но предполагаются неизменными. Повреждения в механической системе приводят к изменению характеристик последней: жёсткости — при износе деталей или ослаблении резьбовых соединений; коэффициента демпфирования — при развитии трещин и др.

Реакции системы (виброускорение, виброскорость, виброперемещение) являются функцией вынуждающей силы и характеристик системы.

Для получения объективной оценки необходимы значения величин:

- виброускорения a — как показателя сил инерции;
- виброскорости V — как показателя энергии механических колебаний;
- виброперемещения S — как показателя линейных отклонений;
- частоты f — как идентификатора источника механических колебаний.

Идентификация момента появления повреждения при использовании методов виброметрии требует комплексного подхода.

Пример 2. По свободному подшипнику двигателя (опора 1) привода шаровой мельницы в 18:00 зафиксирован проворот вкладыша по следующим вибрационным показателям.

Значения результатов измерения общего уровня вибрации в вертикальном направлении представлены в таблице 1.

Полученные данные показывают, что первое отклонение произошло в 16:17 — увеличение в 1,25 раза; второе отклонение в

МАШИНОСТРОЕНИЕ

17:35 — увеличение в 1,5 раза; значения виброускорения стабильны. В поперечном направлении значения виброускорения и виброскорости стабильны. В осевом направлении (табл. 2) фиксируется увеличение значения виброускорения в 1,56 раза; увеличение значения виброскорости — в 1,8 раза.

Следовательно, в процессе эксплуатации необходим контроль стабильности значений в течение смены или суток, признак повреждения — увеличение значения более чем в 1,56 раза.

Дополнительно признаки развивающегося повреждения проявляются в виде гармонических составляющих в низкочастотной области в спектрограммах виброскорости (рис. 10).

Одновременно происходит изменение формы временного сигнала (рис. 11) виброускорения, в частности увеличение размаха колебаний в два раза в момент возникновения повреждения. В осевом направлении проявление схватывания при провороте выражено (рис. 12) увеличением большего количества гармонических составляющих. Отмечается также нестабильность временных реализаций виброускорения перед отказом.

Таблица 1

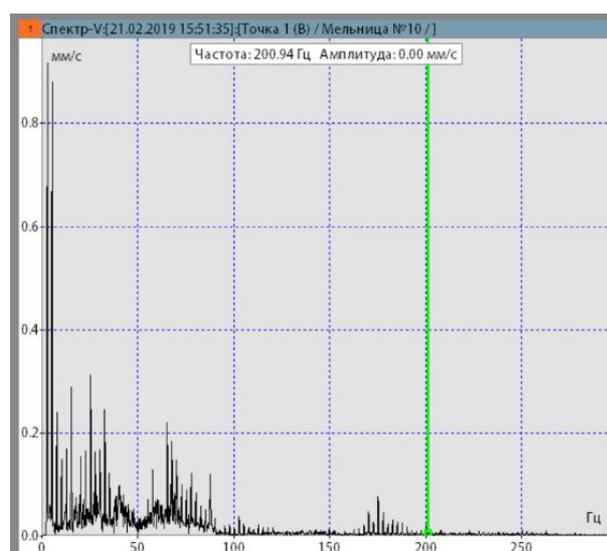
Показатели вибрации опоры 1 двигателя в вертикальном направлении

Время	Виброскорость, мм/с	Виброускорение, м/с ²
15:51	1,71	0,9
16:17	2,14	0,94
16:42	1,96	1,10
17:09	1,92	1,05
17:35	2,57	1,15
18:00	3,59	1,57
18:37	1,56	0,73

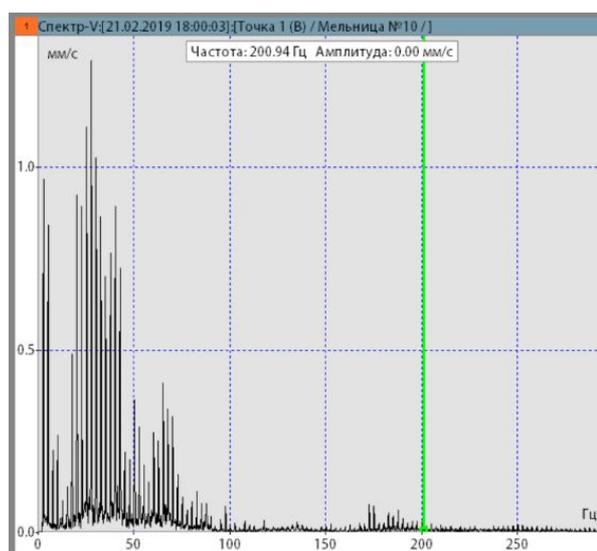
Таблица 2

Показатели вибрации опоры 1 двигателя в осевом направлении

Время	Виброскорость, мм/с	Виброускорение, м/с ²
15:51	1,23	0,79
16:17	1,35	0,69
16:42	1,55	0,96
17:09	1,62	0,93
17:35	1,59	1,04
18:00	2,23	1,24
18:37	1,11	0,77



15:51 — исходный сигнал



18:00 — схватывание, проворот

Рисунок 10 — Изменение спектрограмм виброскорости по опоре 1

МАШИНОСТРОЕНИЕ

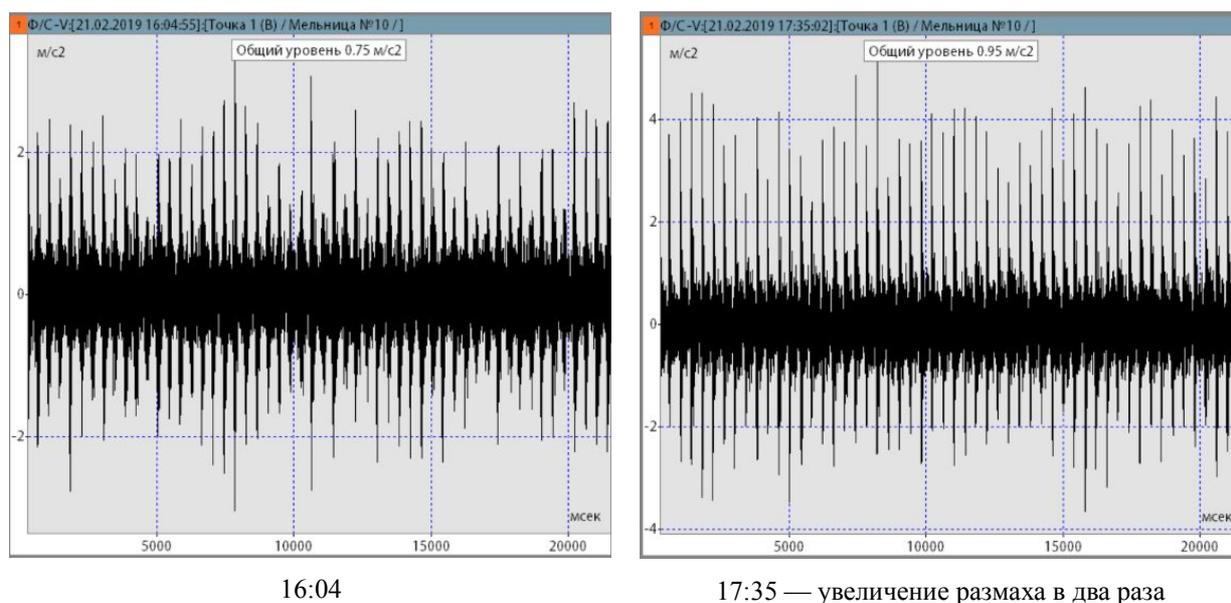


Рисунок 11 — Изменение формы временного сигнала виброускорения по опоре 1

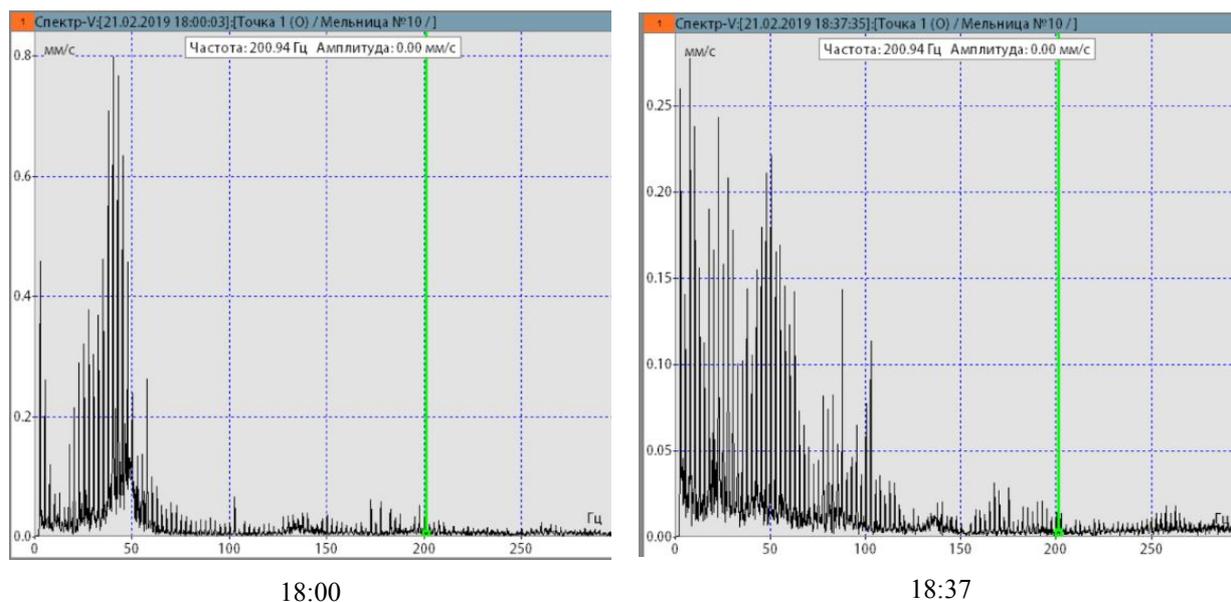


Рисунок 12 — Изменение спектрограмм виброскорости по опоре 1 в осевом направлении при провороте подшипника в корпусе

Модели развития повреждений, такие как модель допустимых значений, износосвая, ступенчатых переходов и логическая, учитывающая взаимное влияние элементов [10], должны быть согласованы с нарушениями качества проводимых операций при техническом обслуживании. Вмешаться в работу двигателя возможно с ограниченным числом операций, но это более ме-

ханическая часть двигателя: затяжка резьбовых соединений; замена подшипников; проверка работы системы смазки; измерение температуры и вибрации; измерение сопротивления изоляции и токов; центровка вала двигателя и механизма. Стабилизация нагрузки, изменение воздушных зазоров между статором и ротором в процессе эксплуатации не могут быть реализованы.

Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Электромеханические системы, применяемые в промышленности, обладают большой долговечностью и большим запасом прочности. При качественно выполненных монтажных и наладочных работах система работает стабильно.

2. Состояние эксплуатируемых ЭМС определяется влиянием производственной программы, возникающих технологиче-

ских и паразитных сил, при неопределённости качества текущего технического обслуживания и проведенных ремонтов.

3. Различные законы изменения моментов сопротивления, кинематические схемы механизмов, приводимые к определенному числу расчётных схем, подходы к оценке состояния системы, приведенные в данной статье, могут служить основой для составления алгоритма оценки поведения системы в аномальных режимах функционирования.

Список источников

1. Бестужева О. В. Прогнозирование остаточного ресурса опорных цапф шаровой мельницы с учетом напряженно-деформированного состояния: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2019. 170 с.

2. Гамидов Ф. М. Определение оптимальных параметров конструкции подъемных лифтеров в шаровых мельницах типа SAG MILL // НАУ : сетевой научный журнал. 2020. № 51-1 (51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-optimalnyh-parametrov-konstruktsii-podemnyh-lifterov-v-sharovyh-melnits-tipa-sag-mill> (дата обращения: 29.07.2023).

3. IEC 60034-2-1:2014. Машины электрические вращающиеся. Ч. 2-1. Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия по испытаниям (за исключением машин для подвижного состава). М. : Стандартинформ, 2018. 63 с.

4. ГОСТ IEC/TS 60034-24-2015. Машины электрические вращающиеся. Ч. 24. Онлайн-обнаружение и диагностика потенциальных отказов активных деталей вращающихся электромашин и деталей с подшипниковым током. М. : Стандартинформ, 2016. 8 с.

5. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. М. : Стандартинформ, 2019. 22 с.

6. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М. М. Соколов, Л. П. Петров, Л. Б. Масандилов, В. А. Ладензон. М. : Энергия, 1967. 200 с.

7. Luczak D. Mathematical model of multi-mass electric drive system with flexible connection // 2014 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2014. P. 590–595. DOI: 10.1109/MMAR.2014.6957420

8. Об использовании метода контроля состояния машин технологических агрегатов по энергетическим параметрам привода / А. Н. Савельев, М. В. Кипервассер, Д. С. Аниканов, В. Е. Реморов // Известия вузов. Черная металлургия. 2013. № 12. С. 31–33.

9. Логов А. Б., Логов А. Б., Замараев Р. Ю. Математические модели диагностики уникальных объектов. Новосибирск : СО РАН, 1999. 228 с.

10. Герцбах И. Б., Кордонский Х. Б. Модели отказов / под ред. Б. В. Гнеденко. М. : Советское радио, 1966. 166 с.

© Борисенко В. Ф., Сидоров В. А., Землянский А. И.

Рекомендована к печати д.т.н., зав. каф. «Управление качеством» ДонНТУ Ченцовым Н. А. д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.

Статья поступила в редакцию 21.09.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Борисенко Владимир Филиппович, канд. техн. наук, доцент каф. электропривода и автоматизации промышленных установок
Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Донецкая Народная Республика, Россия

Сидоров Владимир Анатольевич, д-р техн. наук, доцент каф. механического оборудования заводов чёрной металлургии им. профессора В. Я. Седуша
Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Донецкая Народная Республика, Россия,
e-mail: sidorov_va58@mail.ru

Землянский Андрей Игоревич, ассистент каф. электропривода и автоматизации промышленных установок
Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Донецкая Народная Республика, Россия,
e-mail: andrewiz@yandex.ru

Borisenko V. P., *Sidorov V. A., Zemlyanskiy A. I. (*Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic, the Russian Federation, *e-mail: sidorov_va58@mail.ru*)
ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS IN INDUSTRIAL PRACTICE

In industry, the overwhelming number of electromechanical systems (EMS) are subjected to a wide range of loads that is: the dynamic loads in the start-and-brake, intermittent mechanism operation, non-stationary nature of loading, management and control system failures, malfunctions in the mechanical part (bearings runout, increase of gaps in gears, lack of lubrication, etc.), resonance phenomena could arise due to the proximity of the system's vibrational frequency to the loading frequency, power voltage instability, symmetric phase voltage reduction, non-symmetrical (short-term — followed by recovery to nominal). The example of EMS ball mill shows possible failures in its operation and their impact on the system stability.

Key words: *electromechanical system, failures, power supply variations, vibration signatures.*

References

1. Bestuzheva O. V. Predicting the remaining lifespan of the ball mill's bearing axle taking into account the stress-strain state: thesis of PhD in Engineering [Prognozirovanie ostatochnogo resursa opornyh tsapf sharovoj mel'nicy s uchetom napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya: dis. ... kand. tekhn. nauk]. Belgorod, 2019. 170 p. (rus)
2. Gamidov F. M. Determination of optimum design parameters for lifting elevators in SAG MILL ball mills [Opredelenie optimal'nyh parametrov konstrukcii pod'emnyh lifterov v sharovyh mel'nichah tipa SAG MILL]. NAU: setevoy nauchnyi zhurnal. 2020. No. 51-1 (51). (rus) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-optimalnyh-parametrov-konstruktsii-podemnyh-lifterov-v-sharovyh-melnits-tipa-sag-mill> (data of treatment: 29.07.2023).
3. IEC 60034-2-1:2014. Rotating electrical machines. Part 2-1. Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles) [Mashiny elektricheskije vrashchayushchiesya. Chast' 2-1. Standartnyye metody opredeleniya poter' i koefficienta poleznogo dejstviya po ispytaniyam (za isklyucheniem mashin dlya podvizhnogo sostava)]. M.: Standartinform, 2018. 63 p. (rus)
4. GOST IEC/TS 60034-24-2015. Rotating electrical machines. Part 24. Online detection and diagnosis of potential failures at the active parts of rotating electrical machines and of bearing currents. [Mashiny elektricheskije vrashchayushchiesya. Chast' 24. Onlajnovoe obnaruzhenie i diagnostika potencial'nyh otkazov aktivnyh detalej vrashchayushchihsya elektromashin i detalej s podshipnikovym tokom]. M.: Standartinform. 2016. 8 p. (rus)
5. GOST ISO 20958-2015. Monitoring and diagnostics of machines. Signature analysis of electrical signals of three-phase asynchronous engine. [Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Signaturnyj analiz elektricheskikh signalov trekhfaznogo asinhronnogo dvigatelya]. M.: Standartinform, 2019. 22 p. (rus)
6. Sokolov M. M., Petrov L. P., Masandilov L. B., Ladenzon V. A. Electromagnetic transient processes in asynchronous electric drive [Elektromagnitnye perekhodnye processy v asinhronnom elektroprivode]. M.: Energiya, 1967. 200 p. (rus)

7. Łuczak D. *Mathematical model of multi-mass electric drive system with flexible connection*. 2014 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2014. Pp. 590–595. DOI: 10.1109/MMAR.2014.6957420.

8. Savel'ev A. N., Kipervasser M. V., Anikanov D. S., Remorov V. E. *The use of method for monitoring the condition of technological aggregates machines and their energy drive parameters [Ob ispol'zovanii metoda kontrolya sostoyaniya mashin tekhnologicheskikh agregatov po energeticheskim parametram privoda]*. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2013. No. 12 Pp. 31–33. (rus)

9. Logov A. B., Logov A. B., Zamaraev R. Yu. *Mathematical models of diagnostics of unique objects. [Matematicheskie modeli diagnostiki unikal'nykh ob'ektov]*. Novosibirsk: SB RAS, 1999. 228 p. (rus)

10. Gertsbakh I. B., Kordonskiy Kh. B. *Failure model eds. B. V. Gnedenko [Modeli otkazov pod. red. B. V. Gnedenko]*. M.: Sovetskoye radio, 1966. 166 p. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Borisenko Vladimir Philipovich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations
Donetsk National Technical University,
Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia

Sidorov Vladimir Anatolievich, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants named after Prof. Sedush V. Ya.
Donetsk National Technical University,
Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia,
e-mail: sidorov_va58@mail.ru

Zemlyanskiy Andrei Igorevich, Assistant Lecturer of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations
Donetsk National Technical University,
Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia
e-mail: andrewiz@yandex.ru