

Алиев Омар Гамзатович, бакалавр

*Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.*

Говяжова Софья Александровна, бакалавр

*Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.*

Поманисточка Тихон Александрович, бакалавр

*Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.*

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛИЙ В РАБОТЕ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация. *Предметом исследования является метод автоматического обнаружения аномалий в работе насосного оборудования по данным штатных измерений, объектом — насосный агрегат, оснащённый средствами контроля расхода, напора, мощности, вибрации и температуры. Применялись построение модели нормального режима по данным исправной работы, расчёт многомерного показателя отклонения и статистическое назначение порога. Показано, что пороговый контроль отдельных параметров реагирует на развитие дефекта позже, чем совместный анализ, поскольку не учитывает согласованность отклонений. Приведены результаты проверки на данных действующего агрегата: заблаговременность обнаружения выросла с 3–14 до 19–96 часов при сокращении числа ложных срабатываний.*

Ключевые слова: *насосное оборудование, обнаружение аномалий, обслуживание по состоянию, модель нормального режима, расстояние Махаланобиса, вибрационный контроль, техническая диагностика.*

AUTOMATIC ANOMALY DETECTION IN THE OPERATION OF PUMPING EQUIPMENT

Abstract. *The subject of the study is a method for automatic anomaly detection in the operation of pumping equipment based on regular measurements; the object is a pump unit equipped with flow, head, power, vibration and temperature monitoring. A model of the normal operating mode built from healthy-operation data, calculation of a multivariate deviation index and statistical threshold assignment were applied. Threshold monitoring of individual parameters is shown to react to a developing fault later than joint analysis, since it does not account for the consistency of deviations. Verification results on data from an operating unit are given: detection lead time increased from 3–14 to 19–96 hours while the number of false alarms decreased.*

Key words: *pumping equipment, anomaly detection, condition-based maintenance, normal mode model, Mahalanobis distance, vibration monitoring, technical diagnostics.*

Актуальность исследования

Насосные агрегаты составляют значительную долю парка динамического оборудования промышленных предприятий и входят в состав систем, останов которых влечёт остановку технологического процесса в целом. Внезапный отказ насоса обходится дороже плановой замены изношенного узла, поэтому предприятия переходят от планово-предупредительного ремонта к обслуживанию по фактическому состоянию.

Нормативная база задаёт средства такого контроля. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009 устанавливает общие методы вибрационного контроля состояния машин [1], ГОСТ ИСО 10816-3-2002 — критерии оценки состояния промышленных машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях [2]. Оба документа опираются на сопоставление измеренной величины с установленной границей зоны, то есть на пороговый контроль одного параметра. Между тем деградация насоса проявляется совместным изменением нескольких величин, каждая из которых в

отдельности остаётся в допустимых пределах, что и определяет актуальность методов совместного анализа.

Обзор научной литературы по теме статьи

Задача оценки технического состояния оборудования по эксплуатационным измерениям решается в [6, с. 46] на примере конденсатора тепловой станции: показано, что измеряемые величины связаны между собой режимом работы, и отклонение следует оценивать относительно ожидаемого при текущем режиме значения. В [5, с. 103] построен цифровой двойник технологического агрегата, математические модели которого получены по данным пусковых и остановочных режимов.

Цифровой двойник как средство описания состояния объекта определён ГОСТ Р 57700.37-2021 [3]; совместное применение двойников и систем дискретно-событийного моделирования рассмотрено в [4, с. 71]. Вопросы передачи измерительных данных в промышленных приложениях, включая выбор протокола и периодичности опроса, систематизированы в [7, с. 20]. Перечисленные работы сосредоточены на построении модели объекта; настоящая работа рассматривает прикладную задачу — использование такой модели как эталона нормального режима для автоматического обнаружения аномалий.

Постановка проблемы исследования

Объектом исследования выступает насосный агрегат, оснащённый штатными средствами измерения, предметом — метод автоматического обнаружения отклонений в его работе.

Проблема состоит из двух частей. Первая связана со способом контроля: уставки назначаются для каждого параметра отдельно и с запасом, охватывающим весь диапазон рабочих режимов, поэтому медленное согласованное изменение нескольких величин — например, одновременное снижение напора и рост потребляемой мощности при неизменном расходе — не выводит ни один параметр за уставку и остаётся незамеченным. Вторая

связана с данными: отказы насосов происходят редко, размеченных примеров развития каждого вида дефекта на конкретном агрегате нет, поэтому обучение классификатора «норма — отказ» неприменимо.

Задачи исследования: определить состав контролируемых параметров; построить модель нормального режима по данным исправной работы без разметки; ввести обобщённый показатель отклонения и правило принятия решения; проверить метод на данных действующего агрегата и сопоставить его с пороговым контролем по заблаговременности обнаружения и числу ложных срабатываний.

Описание и обоснование методологии исследования

Состояние агрегата описывается вектором измеряемых величин $x(t)$, состав которого приведён в таблице 1. Величины разнородны по размерности и диапазону, поэтому перед обработкой выполняется нормировка по среднему и среднеквадратичному отклонению, вычисленным на обучающей выборке.

Таблица 1. Состав контролируемых параметров насосного агрегата

Параметр	Средство измерения	Период опроса
Подача Q	расходомер на напорной линии	1 с
Напор Н	датчики давления на входе и выходе	1 с
Потребляемая мощность N	измерительный преобразователь	1 с
Ток статора I	трансформатор тока	1 с
СКЗ виброскорости	вибропреобразователь на опоре	1 с
Температура подшипника	термопреобразователь сопротивления	10 с

Модель нормального режима задаёт ожидаемое значение вектора при текущих условиях работы. Часть величин связана рабочей характеристикой насоса, поэтому ожидаемые значения напора, мощности и тока восстанавливаются по подаче и частоте вращения регрессионной моделью, обученной на данных исправной работы. Отклонение фактического состояния от ожидаемого описывается вектором остатков

$$r(t) = x(t) - \hat{x}(t), \quad (1)$$

где $\hat{x}(t)$ — оценка, выдаваемая моделью. Остатки отдельных параметров коррелированы: например, снижение напора при неизменной подаче сопровождается ростом потребляемой мощности. Поэтому вместо покомпонентного сравнения применяется обобщённый показатель, учитывающий ковариационную структуру остатков:

$$D^2(t) = r^T(t) \cdot S^{-1} \cdot r(t), \quad (2)$$

где S — ковариационная матрица остатков, оценённая на обучающей выборке. Величина $D^2(t)$ представляет собой квадрат расстояния Махаланобиса и объединяет отклонения всех контролируемых параметров в одно число, чувствительное именно к нарушению привычных соотношений между ними. Порог назначается по эмпирическому распределению D^2 на обучающей выборке как квантиль уровня p :

$$D^2_{\text{пор}} = F^{-1}(p), \quad p = 0,999. \quad (3)$$

Одинокое превышение порога не считается признаком аномалии, поскольку возможно при переходных режимах и кратковременных возмущениях. Признак выдаётся при выполнении условия подтверждения: превышение зафиксировано не менее чем в m отсчётах из n последовательных. Структура системы обнаружений приведена на рисунке 1.



Рис. 1. Структура системы автоматического обнаружения аномалий

Результаты исследования

Метод проверен на данных центробежного насосного агрегата мощностью 55 кВт, работающего в составе системы технического

водоснабжения. Обучающая выборка сформирована из 30 суток непрерывной работы после планового ремонта; контрольная выборка охватывает 11 месяцев эксплуатации и содержит четыре зафиксированных события: засорение приёмного фильтра, износ рабочего колеса, развитие дисбаланса ротора и кавитационный режим при изменении уровня в приёмном резервуаре.

Порог, вычисленный по (3), составил $D^2_{\text{пор}} = 24,3$ при числе контролируемых параметров 6. Условие подтверждения принято как 30 отсчётов из 60, что соответствует устойчивому превышению в течение минуты. Характерный вид показателя $D^2(t)$ при развитии дефекта приведён на рис. 2: до начала деградации показатель колеблется около уровня, определяемого шумом измерений, затем монотонно нарастает.

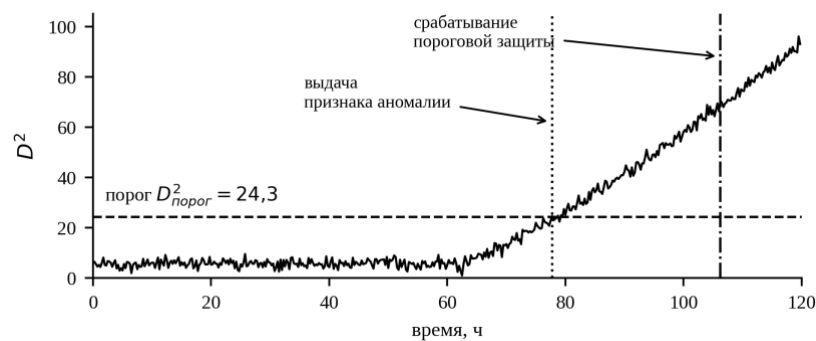


Рис. 2. Изменение показателя D^2 при развитии дефекта насосного агрегата

Сопоставление предложенного метода с действующим пороговым контролем по уставкам приведено в таблице 2. Заблаговременность отсчитывалась от момента выдачи признака до останова агрегата или до вмешательства персонала.

Таблица 2. Сравнение порогового контроля и обнаружения по показателю D^2

Показатель	Контроль по уставкам	Обнаружение по D^2
Обнаружено событий из четырёх	3	4
Заблаговременность обнаружения, ч	3–14	19–96
Ложных срабатываний за 30 суток	11	2
Число настраиваемых величин	12 уставок	порог и правило m из n

Наибольший выигрыш получен для износа рабочего колеса: снижение напора на 4 % при неизменной подаче не выводило ни один параметр за уставку, тогда как показатель D^2 превысил порог за 96 ч до вмешательства персонала. Событие, не обнаруженное пороговым контролем, относится к тому же виду дефекта.

Обсуждение результатов исследования и выводы

Полученные результаты объясняются природой показателя (2): он реагирует не на величину отклонения, а на нарушение привычных соотношений между параметрами. Именно поэтому медленная деградация, не выводящая отдельные величины за уставки, обнаруживается раньше. Вывод согласуется с положением [6, с. 47] о том, что техническое состояние следует оценивать относительно ожидаемого при текущем режиме значения, а не относительно фиксированной границы.

Ограничением метода является зависимость от качества обучающей выборки: если в период её сбора агрегат работал с уже развившимся дефектом, отклонение войдёт в норму и перестанет обнаруживаться. Второе ограничение — отсутствие указания на вид дефекта: показатель D^2 фиксирует факт отклонения, а определение причины требует анализа вклада отдельных компонент вектора остатков. Третье связано с режимами работы: при выходе за диапазон подач, представленный в обучающей выборке, модель экстраполирует и даёт завышенные остатки, что и объясняет два оставшихся ложных срабатывания.

Таким образом, предложен метод автоматического обнаружения аномалий в работе насосного оборудования, включающий модель нормального режима, обобщённый показатель отклонения (1)–(2), статистическое назначение порога (3) и правило подтверждения. Проверка на данных действующего агрегата показала обнаружение всех четырёх зафиксированных событий при увеличении заблаговременности с 3–14 до 19–96 ч и снижении числа ложных срабатываний с 11 до 2 за 30 суток. Дальнейшая

работа связана с разложением показателя D^2 по вкладам параметров для указания вероятной причины отклонения и с распространением метода на группу однотипных агрегатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы. М.: Стандартиформ, 2010.

2. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин⁻¹. М.: Стандартиформ, 2007.

3. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 12 с.

4. Намиот Д. Е., Покусаев О. Н., Куприяновский В. П., Жабицкий М. Г. Цифровые двойники и системы дискретно-событийного моделирования // International Journal of Open Information Technologies. 2021. Т. 9. № 2. С. 70–75. URL: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/1071> (дата обращения: 19.08.2026).

5. Салов И. В., Щербатов И. А., Салова Ю. А., Косов А. Ю., Чечеткин Д. А. Разработка цифрового двойника туннельной печи // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10. № 12. С. 102–109. URL: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/1400> (дата обращения: 19.08.2026).

6. Щербатов И. А., Долгушев А. Н., Белов М. К., Агибалов В. А., Салов И. В. Оценка технического состояния оборудования тепловой станции на примере конденсатора // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Т. 11. № 3. С. 45–51. URL: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/1488> (дата обращения: 19.08.2026).

7. Селезнев С., Яковлев В. Архитектура промышленных приложений IoT и протоколы AMQP, MQTT, JMS, REST, CoAP, XMPP, DDS // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Т. 7. № 5. С. 17–28. URL: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/737> (дата обращения: 19.08.2026).

8. Лукьянов А. В., Алейников Д. П., Хоменко А. П., Налётов В. А. Вибродиагностика насосного оборудования тепловых электростанций // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/stsam/article/view/1992> (дата обращения: 19.08.2026).

© Алиев О.Г., Говязова С.А., Поманисточка Т.А., 2026.