

*Пономарев Максим Сергеевич,
студент направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация
технологических процессов и производств»*

ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Россия, г. Москва

*Кищенко Роман Валерьевич,
студент направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация
технологических процессов и производств»*

ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Россия, г. Москва

ДИАГНОСТИКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ ДАТЧИКОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

***Аннотация:** В статье разработан многоуровневый алгоритм диагностики неисправностей датчиков, применяемых в системах автоматического регулирования технологических параметров. Рассмотрены характерные дефекты измерительных каналов: обрыв связи, выход сигнала за допустимый диапазон, скачкообразное смещение, дрейф, повышенный шум, кратковременные выбросы и «залипание» показаний. Предложено совместное использование аппаратных признаков качества, логических проверок правдоподобия, контроля скорости изменения, аналитической избыточности и сравнения резервных каналов. Сформирован порядок классификации отказов и выбора реакции системы управления — от сигнализации до замещения измерения и перевода объекта в безопасное состояние. Приведены результаты имитационной проверки, подтверждающие возможность обнаружения различных типов дефектов без вмешательства в основной контур регулирования.*

Ключевые слова: датчик, система автоматического регулирования, диагностика, неисправность, невязка, аналитическая избыточность, программируемый логический контроллер.

Annotation: The article develops a multilevel algorithm for diagnosing sensor faults in automatic process control systems. Typical measurement-channel defects are considered, including communication loss, out-of-range signal, abrupt bias, drift, excessive noise, short spikes and frozen readings. The proposed approach combines hardware quality indicators, plausibility checks, rate-of-change monitoring, analytical redundancy and comparison of redundant channels. A procedure is formulated for fault classification and selection of the control-system response, ranging from alarm generation to value substitution and transfer of the process to a safe state. Illustrative simulation results demonstrate the possibility of detecting different fault types without disturbing the basic control loop.

Key words: sensor, automatic control system, diagnostics, fault, residual, analytical redundancy, programmable logic controller.

Классификация неисправностей измерительных каналов

Неисправности целесообразно разделять по характеру проявления и скорости развития. Мгновенные дефекты возникают за один или несколько циклов контроллера: обрыв линии, короткое замыкание, выброс, внезапное смещение, потеря цифровой связи. Постепенные дефекты развиваются медленно: дрейф нуля, изменение чувствительности, загрязнение чувствительного элемента, старение кабеля или ухудшение контакта. Отдельную группу составляют перемежающиеся отказы, которые появляются нерегулярно и могут исчезать при повторном опросе.

С точки зрения алгоритма диагностики важна не только физическая причина, но и форма искажения сигнала. Одинаковое наблюдаемое отклонение может быть вызвано неисправностью датчика, реальным возмущением объекта или ошибкой исполнительного механизма. Например, отсутствие изменения температуры после включения нагревателя может

означать «залипание» датчика, отказ нагревателя, потерю теплоносителя либо чрезмерные тепловые потери. Поэтому окончательный вывод следует формировать по совокупности признаков.

Таблица 1.

Типовые неисправности датчиков и их диагностические признаки

Неисправность	Проявление в сигнале	Основные признаки	Рекомендуемая реакция
Обрыв / потеря связи	Нет значения, код ошибки или ток вне рабочего диапазона	Аппаратный статус модуля, тайм-аут обновления, недопустимый код качества	Немедленная сигнализация, переход на резерв или безопасное состояние
Выход за диапазон	Значение ниже физического минимума или выше максимума	Сравнение с техническим и технологическим диапазонами	Отбраковка значения, фиксация причины
Скачкообразное смещение	Устойчивый скачок без соответствующего изменения процесса	Превышение допустимой производной, невязка с моделью, расхождение каналов	Подтверждение во времени, замещение при устойчивом дефекте
Дрейф	Медленное нарастающее отклонение	Тренд невязки, накопительный критерий, сравнение с эталонным каналом	Предупреждение, плановая поверка, переход на резерв при достижении порога
Повышенный шум	Рост разброса и частые колебания	Скользкая дисперсия, спектральные признаки, частота пересечения порога	Фильтрация, проверка экранирования и соединений
Кратковременный выброс	Одиночный импульс большой амплитуды	Медианный фильтр, ограничение скорости изменения, подтверждение несколькими отсчётами	Игнорирование единичного отсчёта, журналирование
«Залипание»	Неизменное значение при изменяющемся объекте	Малая дисперсия, отсутствие реакции на управление, несогласованность с другими параметрами	Замещение и диагностика канала
Изменение чувствительности	Ошибка растёт с величиной измеряемого параметра	Сопоставление по нескольким режимам, оценка коэффициента преобразования	Калибровка или замена датчика

Структура многоуровневой диагностики

Предлагаемая структура строится по принципу последовательного повышения сложности. Сначала выполняются быстрые проверки, не требующие математической модели: анализ статуса модуля, тайм-аута связи и

физического диапазона. Затем оценивается скорость изменения, наличие «залипания» и статистические характеристики. На следующем уровне вычисляется невязка между измерением и прогнозом модели либо сравниваются резервные каналы. Такой порядок уменьшает вычислительную нагрузку и позволяет формировать понятную причину отказа.

Диагностическая подсистема должна работать параллельно с контуром регулирования. Она не изменяет управляющее воздействие непосредственно, а формирует признак качества измерения и разрешённый источник обратной связи. Решение о замещении значения или останове объекта принимается отдельной логикой с учётом критичности параметра, длительности дефекта и наличия резервирования.

Первичные проверки и контроль качества данных

На первом уровне каждому измерению присваивается код качества. Он объединяет аппаратный статус входного модуля, актуальность временной метки, результат проверки диапазона и наличие конфигурационных ошибок. Для аналоговых каналов дополнительно контролируется значение тока или напряжения, соответствующее обрыву и короткому замыканию. ГОСТ 22520-85 устанавливает общие требования к датчикам с унифицированными электрическими аналоговыми выходными сигналами, предназначенным для систем автоматического управления, контроля и регулирования [1].

Следует различать технический и технологический диапазоны. Технический диапазон определяется возможностями датчика, а технологический - допустимыми условиями конкретного процесса. Значение может быть корректным для прибора, но недопустимым для установки. Поэтому проверка выполняется по двум парам границ. Выход за технический диапазон указывает на отказ канала, а выход за технологический диапазон требует одновременно проверки датчика и реакции системы защиты.

Контроль скорости изменения применяется для обнаружения выбросов и резких смещений. Для дискретного времени вычисляется приращение измерения:

$$v(k) = |y(k) - y(k-1)| / \Delta t \quad (1)$$

Если $v(k)$ превышает физически возможную скорость изменения параметра, отсчёт помечается как подозрительный. Однако единичное превышение не всегда означает отказ: импульс может быть вызван электромагнитной помехой. Поэтому рекомендуется использовать двухступенчатое решение. Первый отсчёт блокируется медианным фильтром или ограничителем, а неисправность подтверждается при повторении признака в заданном окне времени.

«Залипание» выявляется по отсутствию изменчивости. В скользящем окне из N отсчётов рассчитывается дисперсия. Если она ниже порога и при этом управляющее воздействие или связанные параметры изменяются, формируется подозрение на фиксированное значение. Сам по себе постоянный сигнал не является достаточным признаком, поскольку объект действительно может находиться в установившемся режиме.

Модельная диагностика и аналитическая избыточность

Для обнаружения скрытых дефектов используется аналитическая избыточность - сравнение измеренного значения с оценкой, полученной из модели объекта или взаимосвязанных параметров. Модель может быть физической, идентификационной либо упрощённой логической. В системе регулирования температуры прогноз строится по мощности нагрева, расходу продукта и тепловой инерции; в гидравлическом контуре давление сопоставляется с расходом и положением регулирующего клапана.

Основным диагностическим показателем является невязка:

$$r(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (2)$$

где $y(k)$ — измеренное значение, а $\hat{y}(k)$ — оценка модели. Для разных режимов объекта допустимая погрешность различается, поэтому абсолютную невязку целесообразно нормировать по оценке стандартного отклонения:

$$z(k) = |r(k)| / \sigma_r \quad (3)$$

Превышение порога $z(k)$ в одном цикле используется как признак подозрения, а устойчивое превышение в течение времени подтверждения —

как диагностический факт. Такой подход уменьшает число ложных срабатываний при пуске, переключении рецепта или резком, но реальном возмущении.

Для медленного дрейфа разовое пороговое сравнение малоэффективно. Небольшая невязка может долго оставаться ниже границы. Поэтому применяется накопительный критерий, который суммирует положительное превышение над допустимым уровнем. После достижения порога формируется предупреждение о развивающемся дефекте. В отличие от аварийного сигнала оно не обязательно требует немедленного останова, но инициирует проверку или переход на резервный канал.

В системах с двумя или тремя датчиками используется аппаратная избыточность. Для двух каналов расхождение показывает наличие проблемы, но не позволяет однозначно определить неисправный датчик без модели или дополнительного признака. Три канала позволяют применять медианное голосование. При этом одинаковый отказ нескольких датчиков общей причины остаётся возможным, поэтому резервирование следует дополнять независимыми принципами измерения и отдельными линиями питания.

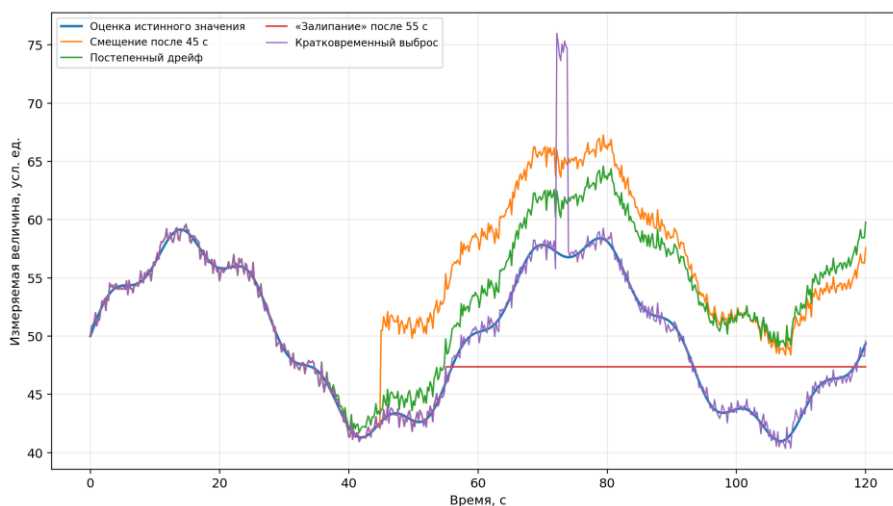


Рисунок 2. Примеры изменения сигнала при характерных неисправностях датчика

Алгоритм классификации и выбора реакции

Результаты отдельных проверок объединяются в диагностический автомат. Для каждого канала вводятся состояния «исправен», «подозрение»,

«подтверждённая неисправность», «замещён» и «восстановление». Переход в состояние подозрения выполняется при первом нарушении. Подтверждение требует либо аппаратного признака высокой достоверности, либо устойчивого совпадения нескольких программных критериев. Возврат к состоянию «исправен» также выполняется не мгновенно, а после интервала стабильных показаний.

Реакция зависит от критичности измерения. Для информационного датчика достаточно сигнализации и исключения значения из тренда. Для датчика, участвующего в регулировании, требуется замещение: резервный канал, модельная оценка либо последнее достоверное значение на ограниченное время. Для параметра безопасности использование последнего значения недопустимо как длительная стратегия; при отсутствии достоверного измерения объект переводится в заранее определённое безопасное состояние.

Замещение должно сопровождаться явным признаком на панели оператора. Подставленное значение нельзя отображать как обычное измерение, иначе персонал может ошибочно считать канал исправным. В архиве сохраняются исходный сигнал, замещённое значение, диагностические признаки, время срабатывания и принятое решение.

Таблица 2.

Диагностические правила предлагаемого алгоритма

Уровень	Проверка	Условие срабатывания	Формируемый признак
1	Актуальность данных	Не обновлена временная метка дольше T_{comm}	Потеря связи / зависание обмена
1	Технический диапазон	$y < y_{min.tech}$ или $y > y_{max.tech}$	Недостоверное значение
1	Статус модуля	Код обрыва, короткого замыкания или аппаратной ошибки	Аппаратная неисправность
2	Скорость изменения	$v(k) > v_{max}$ более M отсчётов	Выброс или скачкообразное смещение
2	«Залипание»	Дисперсия ниже порога при изменении воздействия	Фиксированное показание
2	Повышенный шум	Скользкая дисперсия выше допустимого уровня	Помеха или деградация канала
3	Модельная невязка	$z(k) > z_{max}$ в течение $T_{confirm}$	Систематическое несоответствие модели

3	Накопительный критерий	Сумма малых отклонений превышает порог	Медленный дрейф
3	Сравнение каналов	Расхождение резервных измерений выше допуска	Неисправность одного или нескольких каналов
4	Классификация	Совпадение комбинации признаков	Тип неисправности и степень доверия
5	Реакция	Критичность + наличие резерва + длительность	Сигнализация, замещение или безопасный останов

Реализация на программируемом логическом контроллере

Алгоритм может быть реализован отдельным функциональным блоком для каждого измерительного канала. На вход блока поступают значение, аппаратный статус, временная метка, технологические границы, модельная оценка и связанные сигналы. На выходе формируются очищенное значение, код качества, тип неисправности, уровень достоверности и команда на использование резерва.

Внутренние параметры следует разделить на инженерные и технологические. К инженерным относятся физический диапазон, время обмена, допустимая скорость изменения и характеристики фильтра. Технологические параметры зависят от режима, рецепта и состояния оборудования. При переключении режима требуется кратковременная адаптация порогов, чтобы штатный переходный процесс не воспринимался как неисправность.

Приоритет обработки должен быть однозначным. Аппаратный отказ и потеря связи имеют более высокий приоритет, чем модельная невязка. Если значение уже признано недостоверным по первичному признаку, дальнейшие вычисления могут быть приостановлены, но диагностическая история сохраняется. После восстановления канала вводится период наблюдения, в течение которого показания сравниваются с резервом, но ещё не используются в обратной связи.

С точки зрения программной архитектуры рекомендуется хранить диагностику отдельно от регулятора. Регулятор получает структуру данных, содержащую разрешённое значение и его качество. Это уменьшает

связанность программы, упрощает тестирование и позволяет одинаково применять диагностический блок к температуре, давлению, расходу и уровню.

Имитационная проверка

Для проверки сформирован синтетический сигнал, содержащий медленную составляющую технологического процесса и измерительный шум. Последовательно моделировались выход за диапазон, одиночный выброс, «залипание», скачкообразное смещение, линейный дрейф и потеря обновления. Пороговые значения и времена подтверждения выбраны иллюстративно; результаты не относятся к конкретному промышленному датчику.

Быстрые аппаратные и логические дефекты обнаруживались в пределах одного-двух циклов обработки. Для «залипания» требовалось накопить окно постоянных отсчётов, а для дрейфа - достаточную сумму малых невязок. Это подтверждает необходимость разных диагностических механизмов: универсальный единичный порог не обеспечивает одинаковой чувствительности к быстрым и медленным отказам.

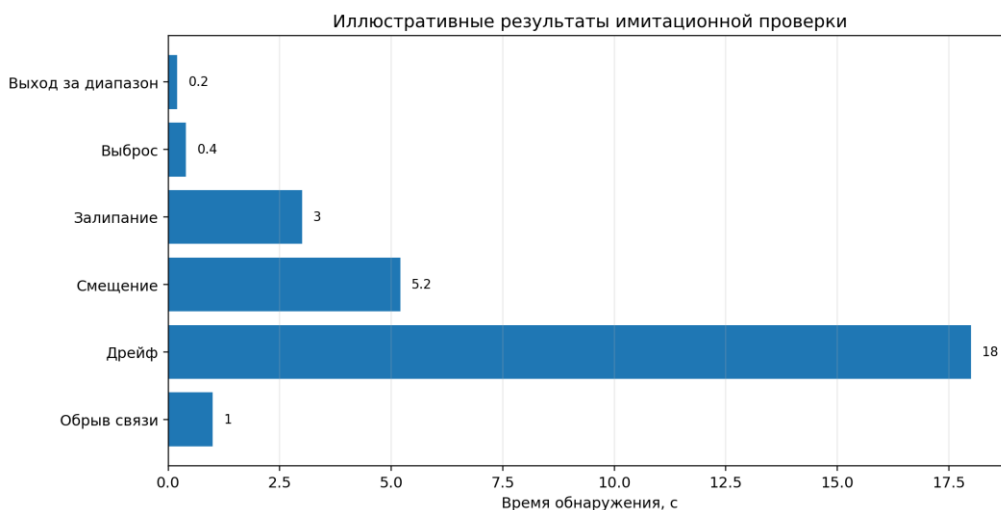


Рисунок 3. Время обнаружения смоделированных неисправностей

Таблица 3.

Результаты имитационной проверки типовых неисправностей

Сценарий	Активный критерий	Время обнаружения	Реакция алгоритма
Выход за технический диапазон	Проверка $y_{\min.tech}$ / $y_{\max.tech}$	0,2 с	Значение немедленно признано недостоверным

Кратковременный выброс	Ограничение производной и медианный фильтр	0,4 с	Отсчёт отброшен; авария не подтверждена
«Залипание» показаний	Малая дисперсия при изменении управления	3,0 с	Сформирован признак Stuck; выбран резерв
Скачкообразное смещение	Невязка модели и превышение производной	5,2 с	После выдержки подтверждён Bias
Медленный дрейф	Накопительный критерий невязки	18,0 с	Сформировано раннее предупреждение Drift
Потеря обновления данных	Тайм-аут временной метки	1,0 с	Канал исключён из регулирования

Разработан многоуровневый алгоритм диагностики неисправностей датчиков в системах автоматического регулирования. Алгоритм объединяет аппаратные коды качества, проверки диапазона и актуальности, анализ скорости изменения и дисперсии, модельную невязку, накопительный критерий дрейфа и сравнение резервных измерений.

Предложена классификация дефектов, включающая обрыв связи, выход за диапазон, выброс, смещение, дрейф, повышенный шум, «залипание» и изменение чувствительности. Для каждого типа определены диагностические признаки и возможная реакция системы управления.

Имитационная проверка показала, что быстрые дефекты выявляются первичными логическими проверками, тогда как медленный дрейф требует накопительного анализа. Разделение диагностики и регулирования, явное кодирование качества и контролируемое замещение измерений повышают устойчивость автоматизированной установки к отказам измерительных каналов.

Полученная структура может быть реализована на программируемом логическом контроллере и адаптирована к контурам температуры, давления, расхода, уровня и положения. Перед промышленным применением необходимы настройка порогов по данным конкретного объекта, проверка отказовых сценариев и согласование безопасных реакций с требованиями технологического регламента.

Использованные источники:

1. ГОСТ 22520-85. Датчики давления, разрежения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП. Общие технические условия [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023454> (дата обращения: 05.08.2026).
2. ГОСТ Р ИСО 13374-1-2011. Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных. Часть 1. Общее руководство [Электронный ресурс]. URL: https://allgosts.ru/17/160/gost_r_iso_13374-1-2011 (дата обращения: 05.08.2026).
3. ГОСТ Р ИСО 13374-2-2011. Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных. Часть 2. Обработка данных [Электронный ресурс]. URL: https://allgosts.ru/17/160/gost_r_iso_13374-2-2011 (дата обращения: 05.08.2026).
4. ГОСТ Р ИСО 13374-3-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных. Часть 3. Передача данных [Электронный ресурс]. URL: https://allgosts.ru/17/160/gost_r_iso_13374-3-2015 (дата обращения: 05.08.2026).
5. ГОСТ Р ИСО 13374-4-2021. Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных. Часть 4. Представление данных [Электронный ресурс]. URL: https://allgosts.ru/17/160/gost_r_iso_13374-4-2021 (дата обращения: 05.08.2026).
6. IEC 61508-2:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems — Part 2: Requirements for electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems [Электронный ресурс]. URL: <https://webstore.iec.ch/> (дата обращения: 05.08.2026).
7. IEC 61508-6:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems — Part 6: Guidelines on the application of IEC 61508-2 and IEC 61508-3 [Электронный ресурс]. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/5520> (дата обращения: 05.08.2026).