

Многоканальные адаптивные системы технической диагностики

Е. М. Антонюк, Д. С. Гвоздев 

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

 gvozdev_8@mail.ru

Аннотация

Введение. Современное промышленное производство сложно представить без информационно-измерительных систем контроля и диагностики объекта на всех этапах технологического процесса. Рост сложности объектов ведет к увеличению объема измерительной информации, что снижает быстродействие, а также достоверность контроля и диагностики. Традиционное решение заключается в наращивании вычислительной мощности и будучи экстенсивным лишь откладывает проблему. В качестве альтернативы в данной статье предлагается изменить алгоритмическое обеспечение, введя в него механизм адаптивности. Адаптивная коммутация в многоканальных системах технической диагностики с временным разделением каналов повышает достоверность контроля и диагностики объекта исследования.

Цель работы. Разработка алгоритмического обеспечения многоканальных систем технической диагностики и построение на его основе возможного варианта структурной схемы системы.

Материалы и методы. Исследование механизма адаптации для многоканальных систем технического диагностирования проводилось методами статистического моделирования из теории массового обслуживания, сама система диагностики представляет собой систему массового обслуживания.

Результаты. Разработано алгоритмическое обеспечение и структурная схема многоканальной адаптивной системы технической диагностики. Проведены математические расчеты по оценке погрешности от многоканальности для данного типа систем. Результаты исследования применимы при разработке информационно-измерительных систем различного направления.

Заключение. Применение адаптивного приоритетного опроса в многоканальных системах технической диагностики позволяет повысить достоверность и быстродействие поиска места неисправности в сложных технических объектах. Исследованный математический аппарат оценки методической погрешности от многоканальности позволяет точно задать границы ее допустимых значений.

Ключевые слова: система технической диагностики, адаптивный метод, алгоритм, структурная схема, многоканальность, погрешность аппроксимации, телеизмерительные системы, система массового обслуживания, методическая погрешность

Для цитирования: Антонюк Е. М., Гвоздев Д. С. Многоканальные адаптивные системы технической диагностики // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 5. С. 94–104.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-5-94-104

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.12.2024; принята к публикации после рецензирования 26.06.2025; опубликована онлайн 28.11.2025

Multichannel Adaptive Systems for Technical Diagnostics

Evgeniy M. Antonyuk, Dmitriy S. Gvozdev ✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ gvozdev_8@mail.ru

Abstract

Introduction. In modern industrial production, the role of information and measurement systems for monitoring and diagnostics at all stages of the technological process cannot be underestimated. The increasing complexity of objects leads to a growing volume of measurement information, which reduces the promptness and reliability of monitoring and diagnostics. The conventional approach consists in increasing the computational power, which only postpones the problem. As an alternative, this article proposes changes in the existing algorithmic support by introducing an adaptability mechanism. Adaptive commutation in multichannel technical diagnostic systems with time-division channeling enhances the reliability of monitoring and diagnosing the object under study.

Aim. To develop an algorithmic support for multichannel technical diagnostic systems and, on this basis, to propose a possible version of the structural diagram.

Materials and methods. The study of the adaptation mechanism for multichannel technical diagnostic systems was conducted using the methods of statistical modeling borrowed from queuing theory, with the diagnostic system itself represented as a queuing system.

Results. An algorithmic support and a structural diagram for a multichannel adaptive technical diagnostics system are developed. Mathematical calculations were performed to estimate the multichannel-induced error for this type of systems. The research results can be applied when developing various types of information and measurement systems.

Conclusion. The application of adaptive priority polling in multichannel technical diagnostic systems enhances the reliability and speed of locating faults in complex engineering objects. The studied mathematical framework for assessing the methodological error associated with multichannel operation allows its permissible error margins to be accurately determined.

Keywords: technical diagnostics system, adaptive method, algorithm, structural diagram, multichannel, approximation error, telemetry systems, queuing system, methodological error

For citation: Antonyuk E. M., Gvozdev D. S. Multichannel Adaptive Systems for Technical Diagnostics. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 5, pp. 94–104.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-5-94-104

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 17.12.2024; accepted 26.06.2025; published online 28.11.2025

Введение. Большинство современных предприятий и научных учреждений сегодня сталкиваются с непрерывным увеличением количества информации, которая требует тщательного контроля, обработки и анализа. С учетом стремительного развития технологий появляется острая необходимость в применении эффективного инструментария для измерения и управления информационными потоками. Одним из таких инструментов выступают информационно-измерительные системы (ИИС), которые применяются как в промышленности, так и в научных исследованиях в самых разных областях. ИИС представляют собой комплекс-

ные устройства, позволяющие осуществлять сбор, обработку, передачу и оценку информации, что является базой для принятия решений на различных этапах управления и эксплуатации оборудования [1].

ИИС имеют обширную классификацию, в частности, их можно разделить по функциональным задачам. Выделяют измерительные системы (ИС), системы автоматического контроля (САК), системы технической диагностики (СТД), системы распознавания образов (СРО).

Каждая из таких систем обладает уникальными возможностями, позволяющими решать задачи мониторинга, анализа и регулирования.

ИС служат для сбора данных о параметрах различных объектов и выступают основой для построения более сложных решений. Они имеют важное значение для работы САК, СТД и СРО, так как обеспечивают их исходной информацией.

САК, проверяющие соответствие отдельных параметров объекта заранее заданным нормам, выполняют задачи контроля и управления технологическими процессами, часто используя результаты измерений, полученные от ИС.

СРО осуществляют идентификацию и классификацию различных объектов на основе анализа их характеристик.

Одним из видов ИИС являются СТД, позволяющие выявлять факт возникновения неисправности объекта исследования и находить место этой неисправности в сложном объекте. В СТД всегда присутствуют элементы автоматического контроля, т. е. проверка соответствия параметров объекта заранее заданным нормам. По результатам контроля может приниматься решение по регулированию и управлению, например, технологическим процессом. В отличие от САК, получающих информацию непосредственно от объекта, на входы СТД подаются сигналы так называемого диагностического теста.

СТД могут осуществлять также операцию прогнозирования работоспособности объекта по результатам проверки отдельных параметров. Например, проверка сопротивления изоляции в разных точках диагностируемого объекта может показать, что сопротивление изоляции в определенном месте меньше номинального значения, хотя объект пока еще функционирует. Это означает, что необходимо контролировать значение данного параметра и не допустить неработоспособности объекта.

При контроле и диагностике движущихся объектов или находящихся на значительном расстоянии от потребителя, в том числе и при диагностике объектов, например, атомной энергетики, приходится использовать специальные каналы связи, позволяющие уменьшать погрешности, возникающие при передаче информации на значительные расстояния. Такие системы носят название телеизмерительных систем (ТИС), хотя это совсем не значит, что передается только измерительная информация. С помощью соответствующих каналов связи на большое расстояние

может передаваться также информация о контроле и диагностике объекта исследования [2].

В ИИС с большим множеством источников информации в подавляющем большинстве случаев осуществляется временное разделение измерительных каналов посредством циклического опроса. Частота измерений, контроля, диагностики и идентификации определяется с учетом особенностей максимальных динамических характеристик объектов. Это зачастую приводит к значительному избыточному объему данных, что, в свою очередь, требует дополнительных вычислительных ресурсов для обработки информации, расширения полосы пропускания каналов связи и увеличения емкости носителей данных для записывающих устройств [3–5].

Отметим, что системы технической диагностики заслуживают отдельного внимания. В условиях современной промышленности и научных исследований техническая диагностика становится незаменимым инструментом для обеспечения бесперебойной работы оборудования и минимизации рисков возникновения аварийных ситуаций. Это особенно актуально для таких отраслей, как машиностроение, энергетика, авиационная и космическая промышленность, где отказ оборудования может привести к серьезным последствиям.

Диагностический процесс подразумевает сложное взаимодействие между объектом, диагностическими средствами и оператором, которые в совокупности образуют диагностическую систему (ДС) [1]. Это взаимодействие позволяет не только обнаруживать технические неисправности, но и прогнозировать возможные проблемы в будущем, что повышает надежность эксплуатации сложных промышленных объектов. При этом уже на этапе проектирования данных объектов необходимо учитывать требования технической диагностики, которые позволяют в дальнейшем проводить непосредственно саму диагностику объектов в соответствии с установленными стандартами и нормами.

Диагностика любого объекта начинается с выработки набора требований. К ним относятся: список оцениваемых диагностических показателей; методы их оценки; условия эксплуатации объекта; признаки дефектов и отклонений, а также алгоритмы и программа диагностики [6]. Все эти условия составляют основу для построения

эффективной СТД. Стоит отметить, что алгоритмы и программа диагностики должны быть разработаны таким образом, чтобы охватить все возможные сценарии эксплуатации объекта и позволить точно и оперативно выявлять потенциальные неисправности.

Один из ключевых факторов успешного внедрения и функционирования ДС – построение и использование эффективных алгоритмов диагностирования. Также алгоритмы позволяют получать оценку технического состояния объекта с заданной точностью и принимать решения о дальнейших действиях в отношении диагностируемого объекта. Разработанные алгоритмы являются основой построения структурных схем функционирования СТД.

Адаптивные алгоритмы работы СТД. Современные СТД сложных объектов обрабатывают значительное число параметров, прямо или косвенно влияющих на состояние оцениваемого объекта. Все это приводит к необходимости создания алгоритмов, позволяющих получать, обрабатывать и оценивать информацию от большого количества источников, тем самым создавая многоканальные системы.

Традиционный подход при создании алгоритмов с последующим построением системы – циклический опрос. Он часто применяется в системах с фиксированным числом параметров и относительно стабильными динамическими свойствами их изменений. Реализация такого метода проста и позволяет равномерно распределить ресурсы системы на все диагностируемые параметры. Однако циклическому опросу присущ ряд значительных недостатков, снижающих его эффективность в многоканальных системах.

Во-первых, одинаковая частота опроса всех источников измерительной информации приводит к равномерному распределению времени между всеми диагностируемыми параметрами, вне зависимости от их значимости, а также без учета априорных сведений о динамических свойствах объекта диагностики. В реальных условиях значения параметров объекта могут изменяться с разной интенсивностью, и не все из них требуют постоянного мониторинга с заданной частотой. Это значит, что система с циклическим опросом с большой вероятностью будет тратить ресурсы на так называемую из-

быточную информацию, т. е. на проверку параметров, которые остаются неизменными на протяжении длительных периодов, в то время как более приоритетные и динамичные параметры могут нуждаться в более частом опросе. Таким образом, процесс диагностирования при наличии избыточной информации ограничивает эффективность диагностики в сложных объектах с большим числом параметров и не позволяет своевременно обнаруживать критические изменения параметров объекта.

Во-вторых, циклический опрос зачастую приводит к снижению достоверности сведений, полученных в ходе операции диагностики. Под оценкой достоверности понимается не что иное, как вероятность $P[X \in D]$, где X – значение диагностируемого параметра; D – удовлетворяющий требованиям предел. Данная вероятность описывает ситуацию, при которой значение диагностируемого параметра X не превысит установленного значения D в момент времени $t < t_i$ (t_i – значение времени прошлого опроса). Для того чтобы добиться максимально возможного значения оценки $P[X \in D]$, необходимо подбирать период опроса характеристик на основании их максимальных динамических свойств. В условиях ограниченных ресурсов системы избыточная частота опросов может вызывать перегрузку и снижать общую производительность. Особенно это актуально для сложных технических объектов, где число параметров может исчисляться десятками, сотнями и даже тысячами.

Таким образом, в многоканальных системах циклический опрос демонстрирует свою неэффективность из-за необходимости опрашивать все каналы данных с одинаковой частотой, что приводит к нерациональному использованию ресурсов, снижению оперативности и потенциальной перегрузке системы.

Применение адаптивных алгоритмов – перспективный подход, способствующий оптимизации процессов контроля и диагностирования сложных информационных объектов. В отличие от традиционного циклического контроля, основанного на дискретном опросе источников сообщений через фиксированные интервалы времени, адаптивный алгоритм предполагает фокусировку на первоочередном опросе конеч-

ного числа наиболее важных для функционирования объекта измерительных каналов и анализе полученной информации, т. е. введение механизма приоритетности при опросе. В результате такого подхода может обеспечиваться практически непрерывное диагностирование этих параметров и повышаться точность и надежность получаемых данных [7].

Одно из основных преимуществ адаптивного метода – его способность более эффективно использовать информационные ресурсы СТД. Устраняя избыточность, присущую циклическому опросу, система концентрирует усилия на диагностировании наиболее важных и динамично изменяющихся параметров. Это не только снижает нагрузку на систему, но и позволяет значительно увеличить количество диагностируемых параметров без ущерба для качества получаемых данных [8].

В основу адаптивных алгоритмов системы контроля и диагностирования положен принцип определения номера измерительного канала, диагностируемый параметр которого максимально отклонился от заданного (номинального) значения. Именно этот измерительный канал и должен опрашиваться в первую очередь. Выбор такого канала может осуществляться на основе параллельного, последовательного или последовательно-параллельного анализа.

При параллельном анализе возможно использование аналогии между операциями алгебры логики и максимальным значением сигнала, а именно $x \cup y = \max(x, y)$, где \cup – знак операции дизъюнкции. В этом случае операция нахождения измерительного канала с наибольшим отклонением диагностируемого параметра от номинального значения осуществляется с максимальным быстродействием. Недостаток параллельного анализа – значительная сложность, резко увеличивающаяся с ростом числа каналов [9, 10].

Проще в разработке оказываются системы, в основу которых положен последовательный анализ. Отличительная особенность таких систем – наличие блока поиска наибольшего значения отклонения, вырабатывающего логический сигнал при превышении последующего сигнала над предыдущим. Недостаток последовательного анализа – естественно пониженное быстродействие, определяемое параметрами

оперативной памяти, используемой для запоминания отсчетов анализируемых сигналов, и числом измерительных каналов.

При последовательно-параллельном анализе отклонений диагностируемых параметров объекта от номинальных значений наибольшее отклонение определяется параллельным методом без запоминания, а место наибольшего отклонения, т. е. номер измерительного канала с этим отклонением, – последовательным опросом. Отсутствие запоминающего устройства в блоке поиска наибольшего значения отклонения существенно увеличивает скорость поиска канала с максимальным значением отклонения. Это в свою очередь упрощает схемотехнически диагностируемую систему с большим числом каналов относительно систем с параллельным принципом действия.

Рассмотрим блок-схему алгоритма функционирования адаптивной системы технического диагностирования с последовательно-параллельным анализом отклонений (рис. 1).

Работа адаптивной СТД начинается с получения сведений о диагностируемой величине S_n от датчиков, т. е. операции по сбору информации F_{cn} , где n – порядковый номер канала.

Основная задача систем диагностики – получение информации об отклонении измеряемой величины от допустимого значения $\varepsilon_{дн}$. Для этого необходимо определить разность сигналов F_{pn} .

Дифференциальные сигналы формируются на основе отклонений диагностируемых значений от номинального значения A по формуле

$$F_{pn}(F_{cn}, A) = F_{cn} - A.$$

Следует отметить, что диагностируемый параметр может принимать значения, как превышающие номинальное значение A , так и меньше его. Соответственно, отклонения могут иметь как положительные, так и отрицательные значения, поэтому правильное сравнение рассчитанного отклонения возможно только после того, как оно будет также представлено в виде модуля. Это достигается операцией вычисления модуля F_{mn} , которая заключается в сравнении полученных значений отклонения с нулем и умножении их на -1 , если отклонение меньше нуля. Это делает его положительным и пригодным для сравнения с допустимым отклонением $\varepsilon_{дн}$:

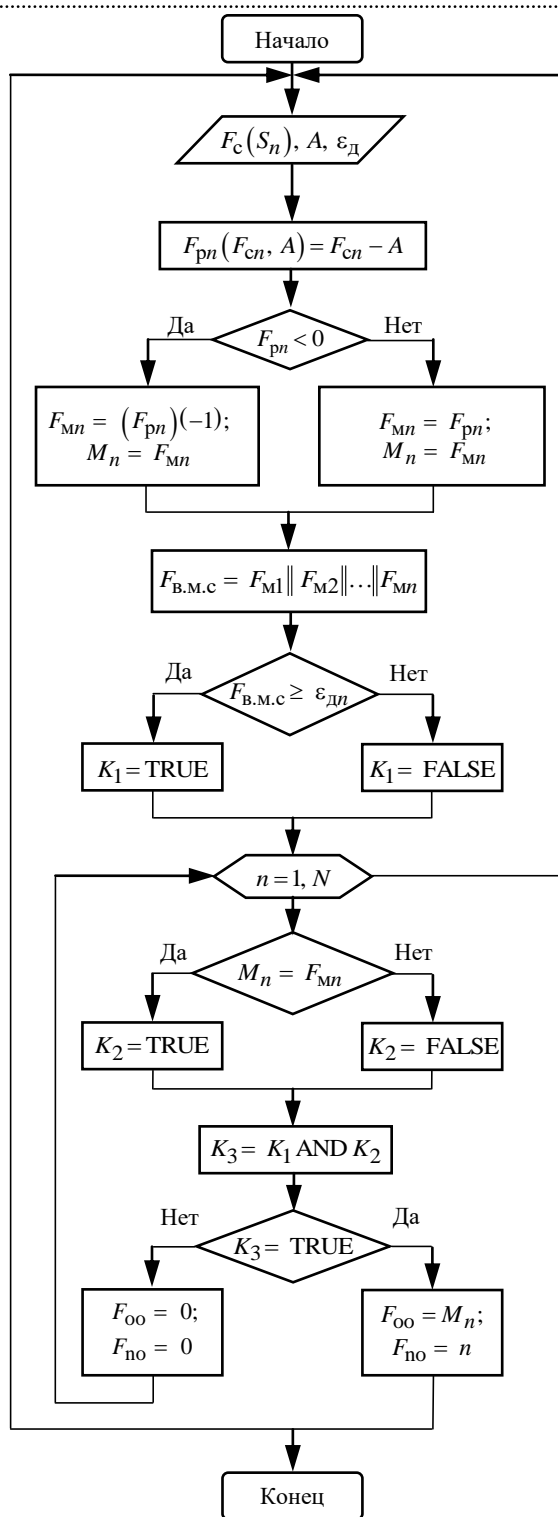


Рис. 1. Блок-схема алгоритма функционирования адаптивной системы технического диагностирования с последовательно-параллельным анализом отклонений

Fig. 1. Block diagram of the algorithm for operation of an adaptive technical diagnostics system with serial-parallel analysis of deviations

$$F_{Mn}(F_{pn}) = F_{pn}(-1) \text{ при } F_{pn} < 0;$$

$$F_{Mn}(F_{pn}) = F_{pn} \text{ при } F_{pn} \geq 0.$$

Из полученных абсолютных значений выбирается наибольшее:

$$F_{\text{в.м.с}}(F_{M1}, \dots, F_{Mn}) = F_{M1} \parallel F_{M2} \parallel \dots \parallel F_{Mn},$$

где индекс в.м.с – выявитель максимального сигнала.

Результат операции $F_{\text{в.м.с}}$ представляет собой информацию об абсолютном значении наибольшего отклонения, но без информации о номере канала, на котором это отклонение было получено.

Полученное максимальное отклонение сравнивается с допустимым отклонением $\varepsilon_{\text{дн}}$.

Если оно больше допустимого или равно ему, формируется логический сигнал K_1 :

$$K_1(F_{\text{в.м.с}}, \varepsilon_{\text{дн}}) = \text{TRUE} \text{ при } F_{\text{в.м.с}} \geq \varepsilon_{\text{дн}};$$

$$K_1(F_{\text{в.м.с}}, \varepsilon_{\text{дн}}) = \text{FALSE} \text{ при } F_{\text{в.м.с}} < \varepsilon_{\text{дн}}.$$

Далее определяется номер измерительного канала с максимальным отклонением параметра от заданного значения, которое последовательно сличается с другими измеренными отклонениями M_n . Совпадение значений отклонения от какого-либо из каналов с максимальным значением приводит к остановке операции по поиску и к генерированию сигнала K_2 :

$$K_2(F_{\text{в.м.с}}, M_n) = \text{TRUE} \text{ при } F_{\text{в.м.с}} = M_n;$$

$$K_2(F_{\text{в.м.с}}, M_n) = \text{FALSE} \text{ при } F_{\text{в.м.с}} \neq M_n.$$

Результаты сравнения (информационные сигналы высокого или низкого уровня K_1 и K_2) подаются на входы логического блока, осуществляющего операцию конъюнкции:

$$K_3(K_1, K_2) = K_1 \cap K_2,$$

где \cap – знак операции конъюнкции.

Эти булевы сигналы, в псевдокоде, представленные как логические переменные типа TRUE или FALSE, интерпретируются в соответствии с таблицей истинности логической операции "И". Этот блок может иметь 2 состояния K_3 (TRUE или FALSE).

Если условия выполнены и отклонение на выходе операции сравнения больше допустимого и совпадает с значением одного из опрашиваемых измерительных каналов, K_3 передается на вход операции обнаружения отклонений. Опрос

каналов для поиска совпадений приостанавливается, и начинается формирование информационного пакета, который будет включать F_{no} – адрес найденного канала и F_{oo} – значение отклонения, которое превысило допустимое значение:

$$F_{oo}(K_3) = M_n \text{ при } K_3 = \text{TRUE};$$

$$F_{no}(K_3) = n \text{ при } K_3 = \text{TRUE}.$$

После формирования и отправки информации о диагностируемом параметре алгоритм возвращается к началу функционирования и процесс поиска канала с максимальным отклонением начинается вновь.

Структурная схема адаптивной СТД. Одним из вариантов построения структуры СТД с последовательно-параллельным принципом нахождения отклонений измеряемых величин от их номинальных значений может быть следующая блок-схема (рис. 2)

Как уже отмечалось, выбор максимального значения отклонения происходит параллельно, а определение его адреса – через пошаговый опрос всех измерительных каналов. При этом не нужна информация о ранее зафиксированных значениях отклонения, что позволяет реализовать опрос с вы-

сокой скоростью, тем самым используя главное достоинство параллельных систем. При этом схематически такие системы приближены к адаптивным с последовательным опросом.

Согласно рис. 2 после завершения цикла анализа прошлых отклонений блок обнаружения отклонения БОО посылает импульс, имеющий на схеме наименование "Пуск". Тем самым активизируется схема запуска СЗ, которая в свою очередь позволяет генератору тактовых импульсов ГТИ начать генерацию сигнала, поступающего на распределитель Р. Датчики Д, отвечающие за измерение диагностируемых параметров, подают стандартные сигналы (напряжение) на вычитающие блоки ВБ, в которых происходит их сличение с номинальным значением от блока номинальных значений БНЗ. В функции вычитающего блока ВБ входит также нахождение абсолютного (по модулю) значения вычисленного отклонения от номинального значения. Все функции выполняются одновременно под управлением одного и того же тактового сигнала, приходящего с ГТИ.

Полученные значения разностей поступают на многоканальный блок выявителя максимального сигнала ВМС и входы ключей K_1 и

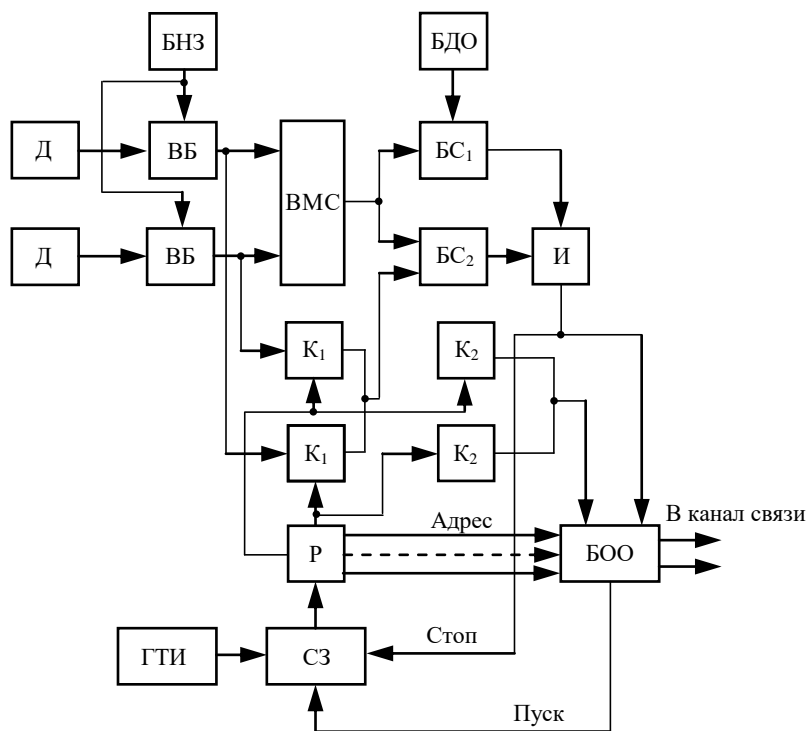


Рис. 2. Структурная схема адаптивной системы технической диагностики с анализом отклонений диагностируемых параметров

Fig. 2. Structural diagram of an adaptive technical diagnostics system with the analysis of deviations of the parameters of interest

K_2 , являющихся информационными. Важно отметить, что ключи K_1 и K_2 , входы которых присоединены к одному и тому же информационному каналу, в случае поступления на них управляющего импульса открываются одновременно. Управление ключами происходит с помощью распределителя P , представляющего собой вместе с ключами коммутатор, работающий от тактовых импульсов ГТИ.

Результатом операций в блоке ВМС является напряжение, соответствующее максимальному отклонению из тех, которые присутствуют на выходах блоков ВБ. При этом для выявления наибольшего значения в ВМС может использоваться, как уже отмечалось, операция дизъюнкции.

Максимальное отклонение от ВМС поступает на блоки сравнения $БС_1$ и $БС_2$, которые есть не что иное, как дифференциальные усилители с коэффициентом усиления, стремящимся к бесконечности.

На другой вход $БС_1$ подается сигнал с блока допустимых отклонений БДО, пропорциональный заданному значению отклонения $\varepsilon_{дп}$. Одновременно на $БС_2$ поступают сигналы (с помощью информационных ключей K_1), являющиеся отклонениями диагностируемых параметров от заданного значения $\varepsilon_{дп}$.

Блоки сравнения $БС_1$ и $БС_2$ вырабатывают логические сигналы "1" при равенстве сигналов на их входах.

Блок конъюнкции "И" останавливает схему запуска СЗ, которая в свою очередь прекращает работу по генерации тактового сигнала от ГТИ. Распределитель P делает остановку на текущем измерительном канале, а значения отклонения на данном канале совместно с номером этого канала передаются для обработки в блок обнаружения отклонений БОО.

При возникновении на выходах нескольких вычитающих блоков ВБ максимального отклонения данные обрабатываются согласно разработанному приоритету, заключающемуся в очередности опроса в зависимости от порядкового номера канала. Выявление и отправка сигнала происходят от того измерительного канала, чей порядковый номер в иерархии системы меньше.

В адаптивных системах с временным разделением измерительных каналов, к которым относятся рассматриваемые СТД, возможно появление дополнительной погрешности от многоканальности, обусловленной ожиданием обслуживания того или иного канала [11]. Характеристики этой погрешности, которую следует считать методической, можно определить с помощью теории массового обслуживания [12]. При этом многоканальная система представляется как система массового обслуживания, в которой входным потоком заявок является поток моментов достижения отклонений диагностируемого параметра номинального значения, т. е. поток моментов выполнения операций сравнения. Очевидно, что интенсивность входного потока заявок зависит также от коэффициента сжатия входных сигналов [2]. Время обработки заявки – длительность от момента прихода на обслуживание заявки до момента завершения ее обработки.

Обслуживание заявок для таких систем осуществляется в 2 этапа. Первый этап – поиск канала, которому необходимо обслуживание, второй этап передает обработанную заявку в канал связи (в ТИС) или же осуществляет генерацию управляющего сигнала, поступающего на диагностируемый объект [13].

Если продолжительность использования заявки остается неизменной, то время, затрачиваемое на поиск канала, требующего обслуживания, определяется количеством каналов и выбранным алгоритмом поиска. Оно может быть как фиксированной, так и случайной величиной. В рассматриваемом случае время поиска зависит от того, на каком канале закончится поиск в предыдущий момент времени и на каком канале закончится последующий поиск, т. е. время поиска следует считать случайным, а потому и полное время обслуживания оказывается случайным. В этом случае невозможно определить вероятностный закон распределения времени обслуживания. В связи с этим для осуществления анализа принимается, что закон распределения времени обслуживания экспоненциальный, позволяющий получить оценку сверху погрешности от многоканальности [14].

Предельное значение погрешности от многоканальности

$$\varepsilon_M = M_1 \Delta t_i,$$

где M_1 – максимальное значение модуля первой производной на i -м интервале дискретизации в определенном канале; Δt_i – период обработки заявки в i -м канале.

Поскольку ε_M – случайная функция, необходимо определить ее математическое ожидание $m[\varepsilon_M]$ и дисперсию $D[\varepsilon_M]$:

$$m[\varepsilon_M] = m[M_1]m[\Delta t_i];$$
$$D[\varepsilon_M] = D[M_1]D[\Delta t_i] + m^2[M_1]D[\Delta t_i] + m^2[\Delta t_i]D[M_1],$$

где $m[M_1]$ и $D[M_1]$ – математическое ожидание и дисперсия максимального значения модуля первой производной сигнала; $m[\Delta t_i]$ и $D[\Delta t_i]$ – математическое ожидание и дисперсия периода обработки.

В дальнейшем будем использовать относительные величины $m[\varepsilon_M]/\varepsilon_d$ и $\sigma[\varepsilon_M]/\varepsilon_d$, где ε_d – предельное значение погрешности от многоканальности.

Используя выражения для плотности распределения при экспоненциальном законе распределения [14] вероятностные характеристики погрешности от многоканальности можно представить следующим образом [2]:

$$\frac{m[\varepsilon_M]}{\varepsilon_d} = \frac{\rho^2}{N(1-\rho)};$$
$$\frac{\sigma[\varepsilon_M]}{\varepsilon_d} = \frac{\rho}{N(1-\rho)} \sqrt{2\rho(\sigma_{\text{пр}}^2 + 1) - \rho^2},$$

где ρ – параметр, являющийся отношением интенсивностей поступления заявок на входе и выходе системы; N – число измерительных каналов системы; $\sigma_{\text{пр}}^2 = D[M_1]/m^2[M_1]$ – приведенное значение дисперсии максимального значения первой производной сигнала.

Так, если первая производная имеет нормальное распределение, то $\sigma_{\text{пр}}^2 = 0.56$, в случае равномерного закона $\sigma_{\text{пр}}^2 = 0.33$, для экспоненциального $\sigma_{\text{пр}}^2 = 1$ [15, 16].

Расчеты показывают, что математическое ожидание погрешности от многоканальности не коррелирует напрямую с характеристиками закона распределения максимального значения модуля первой производной. Одновременно с этим приведенное значение является частью формулы для вычисления приведенного значения среднеквадратического отклонения (СКО) погрешности.

Анализ продемонстрировал, что при варьировании $\sigma_{\text{пр}}^2$ от 0.1 до 1.0 нормированное значение СКО погрешности от многоканальности меняется не более чем в 1.5 раза.

Максимальное отклонение можно определить следующим образом:

$$\varepsilon_{\text{max}} = m[\varepsilon_M] + k_p \sigma[\varepsilon_M],$$

где k_p – параметр, определяемый характеристиками распределения ошибки аппроксимации и вероятностью возникновения ее наибольшего значения (например, для нормального закона распределения $k_p = 3$ при вероятности $P = 0.9973$).

Заключение. Таким образом, использование адаптивных методов работы в ДС создает широкие возможности для улучшения точности и надежности диагностики технического состояния объекта. Данный алгоритм позволяет гибко адаптироваться к изменяющимся условиям работы и оперативно реагировать на изменения в поведении диагностируемых объектов. Это особенно важно в сложных системах с большим количеством элементов, где требуется быстрое и точное выявление отклонений от нормы. Проведенные исследования продемонстрировали, что использование данных алгоритмов позволяет значительно сократить объем избыточной информации, передаваемой для диагностики. В частности, объем избыточных данных может быть уменьшен более чем в 4 раза, что приводит к оптимизации процессов передачи и обработки информации [5]. Полученные данные об оценке СКО методической погрешности от многоканальности при дискретном опросе, который используется в адаптивных системах, свидетельствуют о том, что использование адаптивных алгоритмов позволяет снизить влияние вносимых неточностей из-за ожидания заявки на обслуживание в очереди.

Следовательно, применение адаптивных методов в СТД – важный шаг на пути к созданию высокоэффективных и точных систем мониторинга состояния оборудования, способных оперативно и адекватно реагировать на любые изменения в процессе эксплуатации.

Таким образом, роль СТД сводится к обеспечению надежности, безопасности и эффективности работы различных объектов. Алго-

ритмы и программное обеспечение, разработанные для таких систем, позволяют точно оценивать техническое состояние объектов и принимать своевременные меры для предотвращения возможных неисправностей. В условиях стремительного развития технологий и увеличения объемов обрабатываемой информации такие системы становятся все более востребованными и актуальными.

Список литературы

1. Рубичев Н. А. Измерительные информационные системы. М.: Дрофа, 2010. 334 с.
2. Telemetry System with Adaptive Commutation / E. M. Antonyuk, I. E. Varshavskiy, I. S. Kolpakova, A. A. Minina, P. E. Antonyuk // Proc. of the IEEE NW Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf., Saint Petersburg, 2–3 Feb. 2016. IEEE, 2016. P. 425–427.
doi: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448202
3. Антонюк Е. М., Антонюк П. Е., Гвоздев Д. С. Адаптивная система автоматического контроля с последовательно-параллельным анализом отклонений // Перспективные информационные технологии: тр. Междунар. науч.-техн. конф. / под ред. С. А. Прохорова. Самара: Изд-во Самарского науч. центра РАН, 2022. С. 15–18.
4. Левенец А. В. Принципы разработки перспективных способов сжатия телеметрических данных // Вести Тихоокеанского гос. ун-та. 2017. Т. 45, № 2. С. 31–38.
5. Анохин А. М., Ивкин А. С. Человеко-машинный интерфейс для поддержания когнитивной деятельности оператором АС // Ядерные измерительно-информационные технологии. 2012. № 1 (41). С. 57–66.
6. Antonyuk E. M., Antonyuk P. E., Gvozdev D. S. Technical Diagnostic System with a Multiplicative Maintenance Principle // Proc. of the 2024 XXVII Intern. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russia, 22–24 May 2024. IEEE, 2024. P. 45–47.
doi: 10.1109/SCM62608.2024.10554159
7. Куприянова О. В., Левенец А. В. Адаптивные способы передачи данных в информационно-измерительных системах // Информационные технологии XXI в. 2016. С. 87–95.
8. Chye E. U., Bogachev I. V., Levenets A. V. Selection Criteria of the Compression Algorithm in Information-Measuring System // Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia, 19–20 May 2016. IEEE, 2016. P. 79–115.
doi:10.1109/ICEAM.2016.7911541
9. Levenets A. V., Chye E. U., Bogachev I. V. Reversible Structural Transformation Methods of Measuring Data Frames as a Means of Increasing the Efficiency of Compression // Proc. of the 2018 Inter Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 3–4 Oct. 2018. IEEE, 2018. P. 1–6.
doi: 10.1109/FastEastCon.2018.8602827
10. Пат. RU 2015618795 / И. Е. Варшавский. Адаптивный коммутатор с параллельным анализом погрешности аппроксимации. Опубл. 20.06.2015.
11. Adaptive Transmitting Device of a Telemetry System / E. M. Antonyuk, I. E. Varchavsky, P. E. Antonyuk, N. V. Orlova // Proc. of the IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg, Russia, 28–30 Jan. 2019. IEEE, 2019. P. 66–68.
doi: 10.1109/EIConRus.2019.8656757
12. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
13. Сарычев В. В. Телеметрическая система на базе интеллектуальных интерфейсов // Изв. ЮФУ, техн. науки. 2010. № 2 (103). С. 68–73.
14. Риордан Д. Вероятностные системы массового обслуживания. М.: Связь, 1966. 184 с.
15. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: КНОРУС, 2016. 764 с.
16. Заездный А. М. Основы расчета по статистической радиотехнике. М.: Связь, 1969. 448 с.

Информация об авторах

Антонюк Евгений Михайлович – доктор технических наук (2003), профессор (2009), профессор кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 326 научных работ. Сфера научных интересов – метрология; информационно-измерительные системы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: peterant@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0016-3905>

Гвоздев Дмитрий Сергеевич – магистр по направлению "Приборостроение" (2022), аспирант, инженер кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов – моделирование адаптивных систем автоматического контроля и технического диагностирования. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: gvozdev_8@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-4654-9377>

References

1. Rubichev N. A. Measuring Information Systems. Moscow, *Drofa*, 2010. 334 p. (In Russ.)
2. Antonyuk E. M., Varshavskiy I. E., Kolpakova I. S., Minina A. A., Antonyuk P. E. Telemetry System with Adaptive Commutation. Proc. of the IEEE NW Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf., Saint Petersburg, 2–3 Feb. 2016. IEEE, 2016. P. 425–427. doi: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448202
3. Antonyuk E. M., Antonyuk P. E., Gvozdev D. S. Adaptive Automatic Control System with Serial-Parallel Deviation Analysis. Proc. of the Intern. Scientific and Technical Conf. Samara, Russia, 18–21 Oct. 2022, Samara State University, pp. 15–18.
4. Levenets A. V. Principles of the Development of Promising Methods for Telemetry Data Compression // Bulletin of PNU. 2017, vol. 45, no. 2, pp. 31–38. (In Russ.)
5. Anokhin A. M., Ivkin A. S. Human-Machine Interface for Supporting Cognitive Activity of the AS Operator. Nuclear Measurement and Information Technologies. 2012, no. 1 (41), pp. 57–66. (In Russ.)
6. Antonyuk E. M., Antonyuk P. E., Gvozdev D. S. Technical Diagnostic System with a Multiplicative Maintenance Principle. Proc. of the 2024 XXVII Intern. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russia, 22–24 May 2024. IEEE, 2024, pp. 45–47. doi: 10.1109/SCM62608.2024.10554159
7. Kupriyanova O. V., Levenets A. V. Adaptive Methods of Data Transmission in Information and Measuring Systems. Information Technologies of the 21st Century. 2016, pp. 87–95. (In Russ.)
8. Chye E. U., Bogachev I. V., Levenets A. V. Selection Criteria of the Compression Algorithm in Information-Measuring System. Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICEAM), Chelyabinsk, Russia, 19–20 May 2016. IEEE, 2016, pp. 79–115. doi:10.1109/ICEAM.2016.7911541
9. Levenets A. V., Chye E. U., Bogachev I. V. Reversible Structural Transformation Methods of Measuring Data Frames as a Means of Increasing the Efficiency of Compression. Proc. of the 2018 Inter Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 3–4 Oct. 2018. IEEE, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/FastEastCon.2018.8602827
10. Varshavsky I. E. *Adaptivnyy kommutator s parallel'nym analizom pogreshnosti approksimatsii* [Adaptive Switch with Parallel Approximation Error Analysis]. Pat. RF, no. 2015618795, 2015. (In Russ.)
11. Antonyuk E. M., Varchavsky I. E., Antonyuk P. E., Orlova N. V. Adaptive Transmitting Device of a Telemetering System. Proc. of the IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg, Russia, 28–30 Jan. 2019. IEEE, 2019, pp. 66–68. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8656757
12. Kleinrock L. Theory of Mass Service. Moscow, *Mashinostroenie*, 1979, 432 p. (In Russ.)
13. Sarychev V. V. Telemetering System on the Basis of Intellectual Interfaces. Bulletin of SFedU, technical sciences. 2010, vol. 103, no. 2, pp. 68–73. (In Russ.)
14. Riordan D. Probabilistic Queuing Systems. Moscow, *Svyaz*, 1966, 184 p. (In Russ.)
15. Wentzel E. S. Probability Theory. Moscow, *KNORUS*, 2016, 764 p. (In Russ.)
16. Zaezdny A. M. Fundamentals of Calculation in Statistical Radio Engineering. Moscow, *Svyaz*, 1969, 448 p. (In Russ.)

Information about the authors

Evgeniy M. Antonyuk, Dr Sci. (Eng.) (2003), Professor (2009), Professor of the Department of Information-Measuring Systems and Technologies of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 326 scientific publications. Area of expertise: metrology; information and measurement systems. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: peterant@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0016-3905>

Dmitriy S. Gvozdev, Master's degree in Instrument Engineering (2022), postgraduate student, engineer of the Department of Information-Measuring Systems and Technologies of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 15 scientific publications. Area of expertise: modeling of adaptive automatic control systems and technical diagnostics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: gvozdev_8@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-4654-9377>