

АДАПТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОНОМНЫХ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-1-25-35

Винограденко Алексей Михайлович,
Военная академия связи имени Маршала Советского Союза
С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия,
vinogradenko.a@inbox.ru

Будко Никита Павлович,
Военная академия связи имени Маршала Советского Союза
С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия,
budko62@mail.ru

Ключевые слова: автономные сложные
технические объекты, измерительная информация,
адаптивность, автоматизированные системы
контроля, техническое состояние, идентификация,
оценивание.

Статья посвящена исследованию процессов адаптивного контроля технического состояния автономных сложных технических объектов, характеризующихся высокой ценой отказа. Показана актуальность данного направления исследования. Цель работы заключается в синтезе адаптивной автоматизированной системы контроля технического состояния автономных сложных технических объектов, функционирующих в условиях воздействия дестабилизирующих факторов, для поддержания работоспособности которых, необходим адаптивный экспресс-анализ измерительной информации, получаемой в процессе контроля и ее безызыбыточная передача для принятия оперативных решений со стороны системы управления. Представлен подход к построению адаптивных систем контроля технического состояния автономных территориально-распределенных объектов на основе телеметрических систем, функционирующих в режимах экспресс-контроля и полного контроля. Приведен пример построения, структуры подсистемы оценивания измерительной информации и идентификации классов состояний объектов контроля в адаптивных автоматизированных системах контроля на основе идентификатора аварийных ситуаций. Определены характерные черты адаптивных автоматизированных систем контроля технического состояния автономных территориально-распределенных сложных технических объектов. К особенностям перспективных адаптивных систем контроля таких объектов следует отнести: двухэтапность процесса контроля (снижение избыточности измерительной информации), учет стохастической взаимозависимости контролируемых параметров объектов, адаптируемость частоты измерений относительно наблюдаемых отклонений параметров, проведение постоянного метрологического самоконтроля в процессе функционирования адаптивных автоматизированных систем контроля, комплексное применение разнородных каналов связи в сочетании с адаптивностью к внешним воздействиям на линию связи в процессе передачи телеметрической информации. Приведены основные методы адаптации автоматизированных систем контроля технического состояния автономных сложных технических объектов.

Информация об авторах:

Винограденко Алексей Михайлович, к.т.н., доцент, докторант, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия

Будко Никита Павлович, соискатель ученой степени, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Винограденко А.М., Будко Н.П. Адаптивный контроль технического состояния автономных сложных технических объектов на основе интеллектуальных технологий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №1. С. 25-35.

For citation:

Vinogradenko A.M., Budko N.P. (2020) Adaptive control of technical condition of autonomous complex technical objects on the basis of intelligent technologies. T-Comm, vol. 14, no.1, pp. 25-35. (in Russian)

Введение

Резкий рост новых автономных сложных технических систем (АСТС), характеризующихся «высокой ценой отказа», на основных этапах жизненного цикла (ЖЦ – испытаний, эксплуатации) требует коррекции старых, а также разработки новых требований и задач к автоматизированным системам контроля (АСК) технического состояния (ТС) АСТС. Под АСТС следует понимать такие объекты как робототехнические комплексы (РТК) различных типов базирования (наземного и морского (как подводного, так и надводного)), необитаемые отсеки стационарных технологических объектов специального назначения (СН), беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и др.

Автономность функционирования АСТС, требующая постоянного контроля их ТС, характеризует рост объема измерений, необходимых для контроля довольно большого числа контролируемых параметров и позволяющих производить оценку ТС объектов контроля (ОК). Однако не вся информация одинаково ценна, если учесть, что любые измерения проводятся с определенной точностью, то часть измеренного объема информации является избыточной.

С учетом специфики АСТС, наибольший интерес представляют системы контроля, функционирующие непрерывно, или в режиме времени, близком к реальному, и реализующие как полный контроль, так и экспресс-контроль [1], что необходимо для информационного обеспечения процессов управления, а также обеспечения работоспособности данных систем.

Контроль функционирования АСТС – контроль его ТС, осуществляемый непрерывно (периодически) при использовании по назначению с целью своевременного обнаружения факта перехода его в неработоспособное состояние [1].

Полный контроль, заключается в получении измерительной информации (ИИ) по всем контролируемым параметрам ОК. Экспресс-контроль позволяет осуществлять наблюдение за ограниченной (приоритетной) группой параметров в течение определенного периода времени [1].

Динамическое изменение процессов мониторинга (дистанционного контроля) ТС территориально-распределенных автономных АСТС по полученной экспресс-информации в ряде случаев является достаточно важным.

В условиях автономного функционирования, когда система обладает широким спектром ресурсных ограничений (временных, энергетических, структурных и др.), наиболее актуальным является требование по адаптивности синтезируемой модели функционирования АСТС под конкретную задачу [2]. Данный факт подтверждается перспективным направлением работ в области создания систем адаптивного контроля ТС АСТС, построенных с учетом существующих (апробированных) интеллектуальных технологий, а также различных математических аппаратов. При этом, под *адаптивностью* в общем смысле понимается свойство системы мониторинга (контроля) приспосабливаться к изменению параметров объекта и среды функционирования. Очевидно, что АСТС работают в изменяющейся, неопределенной обстановке, поэтому свойство адаптивности должно в обязательном порядке присутствовать в моделируемой системе автоматизированного контроля (АСК) как нелинейной многосвязной системе [3].

1. Постановка задачи синтеза адаптивных АСК ТС АСТС

Стратегическая цель любой АСТС – выжить вопреки разрушающим воздействиям дестабилизирующих факторов (внутренней и внешней среды), обуславливает ее тактические цели: сохранение целостности, информированность о среде и внешняя активность по отношению к неблагоприятному воздействию окружающей среды.

АСТС является функционирующей системой только тогда, когда она физически не разрушена, технически исправна и развернута так, что работоспособна при допустимом отклонении ее параметров. Невыполнение любого из перечисленных условий прекращает существование АСТС как единого целого и приводит к потере всех остальных (дополнительных) свойств.

Парирование угроз возможно за счет повышения эффективности работы (функционирования) АСК, осуществляющей дистанционный контроль ТС АСТС различной степени автономности и базирования, который включает, своевременное формирование, обработку и передачу ИИ, с учетом ее избыточности, для принятия оперативных решений (ПОР) по поддержанию работоспособности АСТС или, например, ее резервирования.

Решение задач контроля ТС АСТС с требуемой достоверностью как единого комплекса, а не как совокупности частных параметров, с целью определения общего ТС ОК в целом, в настоящее время затруднено ввиду применения в существующих АСК либо однопараметрического допускового метода контроля, либо контроля функционального [1]. Стохастический характер дрейфа контролируемых параметров ОК и степени их корреляции (стохастической взаимосвязанности), определение степени приближения параметров к допустимым пределам (динамика отклонений) вносят определенные трудности в процесс анализа ИИ, влияющие на достоверность результатов контроля. Учет стохастической связи (корреляции) контролируемых параметров, при принятии решений о результатах контроля, необходим с точки зрения адаптации АСК к частоте выбросов (превышений допусков контролируемыми параметрами).

Затраты на поддержание требуемого состояния АСТС (на компенсацию изменений параметров, осуществляемую в процессе технического обслуживания) в настоящее время превышают в среднем в 2-3 раза затраты на их разработку и изготовление. За весь период эксплуатации затраты на ремонт и техническое обслуживание АСТС, в связи с их износом и старением, превышают стоимость новой АСТС до 12 раз [4].

Недостаточная изученность физических процессов старения и износа, несовершенство методов контроля, прогнозирования случайных процессов дрейфа параметров приводит к существенному недоиспользованию потенциальных возможностей АСТС, к которым предъявляются высокие требования по безопасности. Подобные объекты, как правило, снимаются с эксплуатации намного раньше того срока, который могло бы наработать большинство из них.

Частичная работоспособность ОК вносит неопределенность в процесс функционирования всей АСТС. В данном случае, с одной стороны, проблематично оценить для каких режимов работы ОК годен, а для каких нет, с другой сторо-

стороны, трудно спрогнозировать гарантированное изменение (тренд динамики) ТС всего наблюдаемого объекта. АСТС признанная по результатам проведения планового ТО исправной (работоспособной), допускается к дальнейшей эксплуатации, несмотря на то, что существующие системы контроля не позволяют определить граничное состояние работоспособности ОК. Этот факт обуславливает риск перехода через короткий промежуток времени одного вида ТС АСТС в другой [5].

Учет дестабилизирующих факторов в процессе контроля ТС АСТС, предполагает определенную адаптацию, гибкость АСК при передаче и обработке ИИ, подвергающейся воздействию помех (в каналах передачи), отказов и сбоев в работе аппаратуры (элементов подсистемы контроля ТС). При этом ИИ может быть искажена из-за воздействия внешней среды по отношению к системе [6-8].

Рассмотрение системы «в целом» позволяет наметить пути выявления последствий влияния различного рода дестабилизирующих факторов среды на процесс функционирования АСТС с целью определения вектора повышения эффективности (качества работы) АСК. Комплексный подход к проблеме повышения АСТС к воздействию различных факторов дает возможность не только более рационально распределить ресурсы АСК, но и решать вопросы оптимального использования параметрической, структурной, алгоритмической, информационной и другой избыточности.

Задачу синтеза нелинейных многосвязных систем, к которым относятся АСК, функционирующих в условиях неопределенности можно сформулировать как задачу поиска некоторого вектора идентификации в функции координат состояния $u = u(x)$, который обеспечивает асимптотический переход к цели контроля объекта:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x, a, u), \quad (1)$$

из произвольного начального состояния $x(0)$, принадлежащего некоторой допустимой области пространства состояний Ω , в желаемое конечное $h(x)=0$ с заданными динамическими характеристиками изменения (движения). При этом параметры $a(t)$, а иногда, и структура правых частей системы (1) могут неопределенным образом изменяться в некотором ограниченном диапазоне.

Вышеперечисленные проблемы процесса контроля ТС АСТС, можно обобщить как необходимость разработки методов построения адаптивных систем контроля с учетом автоматизации процессов сбора, формирования измерительной информации и ее передачи для последующей обработки и принятия соответствующих решений, что представляет собой одно из наиболее важных направлений теории контроля.

Цель работы – синтез адаптивной АСК ТС АСТС, функционирующих в условиях воздействия дестабилизирующих факторов, для поддержания работоспособности которых, необходим адаптивный экспресс-анализ ИИ, получаемой в процессе контроля и ее безызыбочная передача для ПОР со стороны системы управления.

Для достижения цели необходим анализ существующих адаптивных АСК и разработка новых моделей и методов, позволяющих осуществлять дистанционный контроль мно-

гопараметрических АСТС в режиме времени близком к реальному с учетом дестабилизирующих факторов.

Сокращение объема ИИ, при контроле ТС АСТС, с учетом ошибок при ее передаче, позволит сократить объем управляющей информации и, в целом, своевременно принять управляющее решение.

2. Анализ известных работ в области адаптивного контроля технического состояния сложных технических систем

Проблема синтеза адаптивных систем контроля в течение многих десятков лет является одной из самых актуальных задач. Неубывающий поток публикаций подтверждает актуальность этой проблемы и сейчас [3].

Вопросы синтеза адаптивных систем сбора, обработки и передачи ИИ освещены в работах ученых Авдеева Б.Я., Антонюка Е.М., Дядюнова А.Н., Назарова А.В., Пьявченко О.Н., Фремке А.В., Хаусли Г., Пшихопова В.Х. и других специалистов в области телеметрических систем (ТМС), а также информационно-измерительных и управляющих систем [8-11].

В работах [13, 14] представлены теоретические основы построения высокоэффективных многоканальных измерительных систем и АСК со сжатием ИИ, обеспечивающих ее обработку в реальном масштабе времени, способы (методы) повышения эффективности адаптивных систем, обеспечивающих обработку ИИ с помощью обратной связи по погрешности аппроксимации, позволяющие повысить точность системы.

Поиск путей по уменьшению избыточности ИИ, представленный в работах [15, 16], приводит к построению алгоритмов сжатия ИИ, позволяющих снизить загруженность каналов связи (КС), защитить информацию, циркулирующую в системах мониторинга и т.д. Для оперативного выделения актуальной информации предлагается уменьшать избыточность ИИ благодаря применению алгоритмов семантического сжатия, а также устройств, построенных на их основе, с учетом ситуационной обстановки, складывающейся в процессе измерения.

Проведенный анализ моделей, методов и методик синтеза нелинейных адаптивных динамических регуляторов (идентификаторов) [3, 6-8], соответствующих идеологии синергетической теории управления [17, 18], показал возможность использования в решении этой проблемы принципа расширения пространства состояний управляемой (контролируемой) системы для учета динамики внешних возмущений.

Однако, рассмотренные источники достаточно полно охватывают классическую теорию управления (контроля), но практически не затрагивают других постановок задач контроля, и почти не рассматривают интеллектуальное управление (контроль), децентрализованный/распределенный контроль, сетевое управление (контроль) и управление многоагентными и киберфизическими системами, контроль с учетом современных технологических тенденций и возможностей машинного обучения, стратегическое поведение субъектов контролируемых систем и др.

Таким образом, дальнейшего исследования требуют процессы контроля с учетом влияния дестабилизирующих фак-

факторов (как внутренних, так и внешних) на ТС контролируемых АСТС, процессы передачи ИИ в условиях помех, взаимосвязанности параметров на частоту измерений, характеристик измерительных каналов, каналов передачи ИИ на состав сенсорных подсистем АСК и др. Современные АСК должны обладать высокой информативностью и структурной гибкостью, что позволит обеспечить достаточную вероятность обслуживания АСТС и своевременную доставку телеметрической информации (ТМИ) соответствующим получателям (для ПОР и управлений) с минимальными потерями в достоверности.

3. Построение адаптивных систем дистанционного контроля АСТС на основе интеллектуальных технологий

Специфика функционирования АСТС, заключающаяся в территориальной распределенности объектов определенной степени автономности, предполагает, в качестве АСК, использование ТМС для реализации процессов контроля на этапах сбора, обработки и дистанционной передачи ТМИ на диспетчерские пункты (мониторинга телеметрии). Классификация ТМС приведена на рис. 1.

В связи с увеличением числа источников ИИ, специфичностью задач, которые ставятся при контроле ТС АСТС, и, соответственно, многообразием каналов передачи ТМИ, к ТМС предъявляются более жесткие требования. Поэтому традиционными методами не всегда удается решить задачу сбора и передачи больших потоков ТМИ с заданной достоверностью (и требуемой оперативностью) при воздействии помех в КС.

Непрерывное увеличение потоков ТМИ, связанное с избыточностью сообщений, возрастанием числа контролируемых параметров, жесткостью построения сенсорных подсистем ТМС, ограниченностью пропускной способности КС в их составе [5], приводят к необходимости либо сокращения объема данных, адаптации структуры подсистем ТМС под реальные характеристики каналов с учетом их помехоустойчивости и пропускной способности, либо комплексирования данных свойств в одной системе [19-21].

Существующие ТМС (АСК), определяемые как совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств (рис. 2), размещенные в различных точках территориально-распределенных контролируемых АСТС, с целью измерения нескольких физических величин, свойственных данным объектам, и выработки измерительных сигналов в разных целях, не обладают свойством адаптации к изменяющейся обстановке (изменению числа ОК и режимов их работы, влиянию дестабилизирующих факторов на взаимосвязанные АСК и ОК и др.).

Согласно ГОСТ Р 8.673-2009, *адаптивная измерительная система (АИС)* – измерительная система, параметры и/или алгоритмы которой в процессе эксплуатации могут изменяться в зависимости от сигналов содержащихся в ней адаптивных датчиков. Изменение параметров и/или алгоритмов работы АИС в процессе эксплуатации осуществляется с целью повышения точности и/или достоверности результатов измерений.

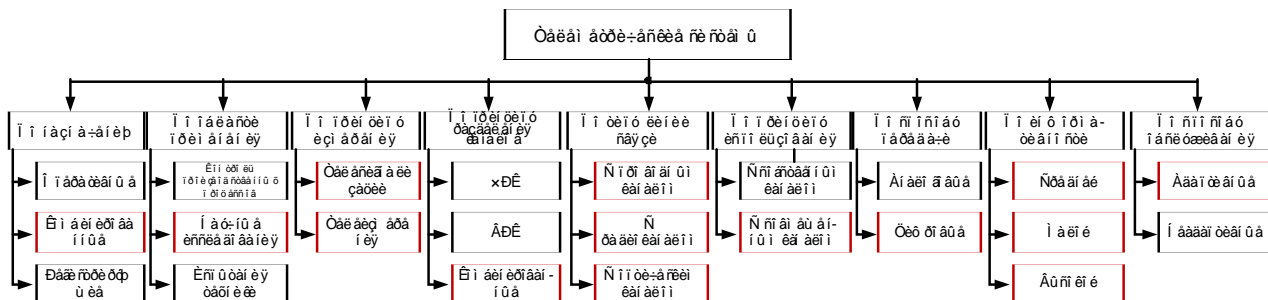
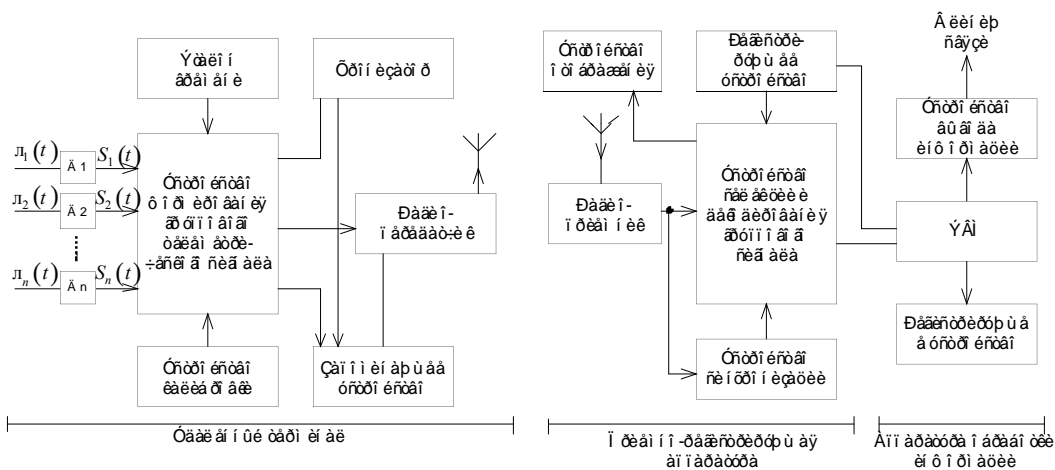


Рис. 1. Классификация телеметрических систем



АИС может обеспечивать адаптацию (приспособление) в пределах, установленных в технических условиях, к диапазону и скорости изменения значений измеряемой величины, к воздействию влияющих факторов, включая помехи, к объему выборки, к выбору маршрутов в каналах связи и т.д. При этом под адаптивным датчиком понимают первичный измерительный преобразователь (или их совокупность), параметры и/или алгоритмы работы которого могут изменяться в зависимости от сигналов, содержащихся в нем преобразователей. Изменение параметров и/или алгоритмов работы датчика в процессе эксплуатации осуществляется с целью повышения точности и/или достоверности результатов измерений. Адаптивный датчик может обеспечивать адаптацию (приспособление) в пределах, установленных в технических условиях, к диапазону и скорости изменения значений измеряемой величины, к воздействию влияющих факторов, включая помехи.

В дополнение к сигналам преобразователей, содержащихся в адаптивном датчике, параметры и/или алгоритмы его работы в процессе эксплуатации могут изменяться в зависимости от внешних сигналов (например, сигналов, поступающих с встроенного контроллера). В данном случае датчик называется адаптируемым.

Среди множества подходов к построению адаптивных систем контроля, как нелинейных многосвязных систем, в теории автоматического управления можно выделить адаптивные системы с идентификатором, которые оценивают параметры ОК и среды функционирования и не включаются непосредственно в контур управления. В представленной на рис. 2 структурной схеме ТМС, идентификатор может быть включен как в устройство формирования группового телеметрического сигнала и устройство (в системах телесигнализации (СТС)), так и в устройство селекции и декодирования группового сигнала (в системах телеизмерения (СТИ)).

Если задана структура идентификатора, то есть задан допустимый класс ТС АСТС $u(x)$, то сами процедуры оптимальной идентификации, то есть процедуры адаптации, развиты достаточно полно. В этом случае структура системы с прямой адаптацией может иметь вид, представленный на рис. 3.

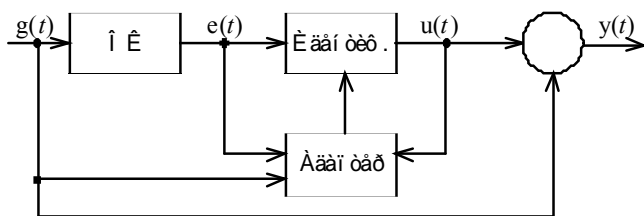


Рис. 3. Структура адаптивной системы контроля:

ИДФ – идентификатор; ОК – объект контроля; А – адаптер; $g(t)$ – сигнал «аварии»; $e(t)$ – ложный отказ (ошибка первого рода), различного рода «шум», помехи; $u(x)$ – допустимые пороговые значения контролируемых параметров, определяющие заданный класс ТС; $y(t)$ – выход системы

Очевидно, что качество адаптивной системы напрямую зависит от выбранного класса и структуры идентификатора. Если идентификатор достаточно адекватен задаче контроля

и условиям функционирования, то алгоритм адаптации обеспечит желаемое качество определения координат состояния. Однако синтез структуры идентификатора представляет собой самостоятельную сложную задачу. В настоящее время в качестве идентификаторов, в основном, выбираются линейные идентификаторы (с линейными законами), что ограничивает возможности алгоритма адаптации. При таком выборе структуры идентификатора алгоритм адаптации позволяет подобрать его параметры в соответствии с некоторым критерием оценки только лишь для узкого диапазона определения переменного состояния.

Подобный подход ограничивает возможности адаптации, так как предельные свойства замкнутой системы определяются линейными или типовыми законами идентификации, которые как известно, эффективны в локальных областях, но оказались малопродуктивными при синтезе систем контроля ТС АСТС.

Проанализируем структурные свойства адаптируемости и параметрического синтеза идентификатора.

Пусть АСТС и идентификатор АСК заданной структуры описываются во временной области.

$$\dot{x} = Ax + B_2u + B_1w, \quad x(0) = x_0 = 0, \quad (2)$$

$$y = Cx;$$

$$\dot{x}_r = A_{rm}x_r + G_1(g - y), \quad x_{rm}(0) = x_{rm0}, \quad g(0) = g_0 = 0, \quad (3)$$

$$u = C_{rm}x_r + G_2(g - y), \quad G_1 = B_r, \quad G_2 = D_r.$$

где x, x_r и y, g, u, w – векторы состояний ОК, идентификатора, выхода ОК, задания, выхода идентификатора и возмущения (дестабилизирующие факторы) соответственно, $x \in R^n$, $x_r \in R^{n_r}$, $u, y, g \in R^n$, $w \in R^{m_3}$.

Через $A, B_1, B_2, C, A_{rm}, C_{rm}, G_1, G_2$ обозначены матрицы параметров ОК и регулятора соответствующих размерностей. Предположим, что объект (1) полностью наблюдаем (контролируется все необходимые, критически важные параметры), реализации (A, B_2, C) , $(A_{rm}, G_1, C_{rm}, G_2)$ минимальны, а матрицы A, B, C принадлежат ограниченному множеству Σ . Целью идентификации является слежение за заданием для произвольных начального состояния и переменных параметров ОК, взятых из интервального множества Σ :

$$A, B_2, C \in \Sigma, \quad \left\{ \Sigma: a_{ij}^- \leq a_{ij} \leq a_{ij}^+, \quad b_{ij}^- \leq b_{ij} \leq b_{ij}^+, \quad c_{ij}^- \leq c_{ij} \leq c_{ij}^+, \right\}$$

Требуемые показатели качества регулирования основного контура задаются стационарной эталонной моделью разомкнутого контура, которая может быть описана системой уравнений

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m g, \quad x_m(0) = x_0 = 0, \quad (4)$$

$$y_m = C_m x_m,$$

где векторы состояния x_m , выхода y_m и матрицы эталонной модели разомкнутого основного контура отмечены индексом m ; $x_m \in R^{n_m}$, $y_m \in R^m$, причем $n_m = n + n_r$. Отметим, что в качестве эталонной модели можно выбрать

где через $W(j\omega)$, $W_p(j\omega)$, $W_r(j\omega)$, $W_m(j\omega)$ обозначены соответственно передаточные функции разомкнутого основного контура. Условие (5) есть условие идеального наблюдения выхода разомкнутой системы за выходом ее неявной эталонной модели. Целевому равенству (5) соответствует полиномиальное уравнение настройки идентификатора вида

$$\frac{\sum_{j=0}^{n_2-1} s^j C A_j B_2 \left(\sum_{\lambda=0}^{n_1-1} s^\lambda C_{r\lambda} A_{r\lambda} B_r + D_r \sum_{v=0}^{n_1} a_{r\lambda v} s^v I \right)}{\sum_{i=0}^{n_2} a_i s^i \sum_{v=0}^{n_1} a_{r\lambda v} s^v} = \frac{\sum_{\mu=0}^{n_m-1} s^\mu C_m A_{m\mu} B_m}{\sum_{\sigma=0}^{n_m} a_{m\sigma} s^\sigma}, \quad (6)$$

где $A_j, A_{r\lambda}, A_{m\mu}$ – матрицы Фадеева, которые представляют собой линейные комбинации произведений коэффициентов характеристических уравнений матриц на их степени [22], например

$$A_j = \sum_{q=j+1}^n a_q A^{q-j+1}, \quad q=1, 2, \dots, n, \quad a_n = 1.$$

Умножая обе части (6) на произведение характеристических полиномов, получим полиномиальное уравнение

$$(P_1 - Q_1) s^{2n_2+n_1-1} + \dots + (P_{2n_2+n_1-1} - Q_{2n_2+n_1-1}) s + (P_{2n_2+n_1} - Q_{2n_2+n_1}) = 0.$$

Определим следующие матрицы адаптируемости и функционалы настройки

$$L^T = [L_{\mu 1} \quad L_{\mu 2}], \quad Q^T = [Q_{\mu 1} \quad Q_{\mu 2}];$$

$$P_\mu = \sum_{\eta=1}^2 L_{\mu\eta} G_\eta, \quad Q_\mu = Q_{\mu 1} + Q_{\mu 2};$$

$$J_1 = \sum_{\mu=0}^{2n_2+n_1-1} \text{tr}(P_\mu - Q_\mu)^T (P_\mu - Q_\mu), \quad J_2 = \|W(j\omega) - W_m(j\omega)\|_F^2.$$

Для того чтобы минимизировать функционал J_1 , необходимо найти точное или приближенное решение эквивалентного матричного алгебраического уравнения

$$L G = Q. \quad (7)$$

Функционалы J_1, J_2 показывают меру отклонения показателей качества идентификации ТС ОК от аналогичных показателей эталонной модели. При этом нижняя граница значений функционала на множестве Σ является положительным вещественным числом, не обязательно малым. Задача адаптивного синтеза идентификатора заданной структуры сводится к следующим двум задачам.

$$G = [G_1^* \quad G_2^*] = \arg \min J_1,$$

$$G = [G_1^* \quad G_2^*] = \arg \min J_2.$$

Точное решение уравнения (7) существует только в случае выполнения условий полной адаптируемости по выходу. Однако это не всегда представляется возможным.

В связи с этим, рассмотрим альтернативное решение поставленной задачи нейросетевым методом, получившим в настоящее время широкое распространение для синтеза адаптивного контроля ТС сложных технических систем в условиях неопределенности [6, 23, 24]. Структура такой адаптивной нейросетевой системы имеет вид, показанный на рис. 4.

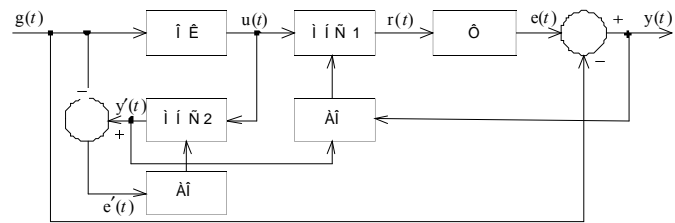


Рис. 4. Структура адаптивной системы контроля с нейросетью: Ф – фильтр; МНС1 – регулятор на многослойной нейронной сети; АО – алгоритм обучения; ОК – объект контроля; МНС2 – идентификатор на многослойной нейронной сети

Система содержит две динамически обучаемые нейросети. Сеть МНС 1 выполняет роль регулятора, а вторая – МНС 2 – идентификатора. Адаптация системы происходит благодаря универсальным свойствам нейросети, как многомерного аппроксимирующего устройства. При этом сеть МНС 2 реализует прямую аппроксимацию неопределенной модели объекта, то есть идентифицирует модель объекта в реальном времени, а МНС 1 аппроксимирует инверсную модель, то есть обеспечивает сведение ошибки контроля (ошибки 1 и 2 рода) в процессе управления к нулю.

Полученные в рамках нейросетевого подхода результаты показывают его высокую эффективность. При этом использование нейросетей для структурной и параметрической адаптации возможно и в случае значительной неопределенности моделей управляемых объектов, когда затруднено само описание процессов на языке динамики.

В моделируемой адаптивной АСК предложена структура идентификатора, в которой оперативно формируется адаптивная математическая модель, представленная на рис. 5.

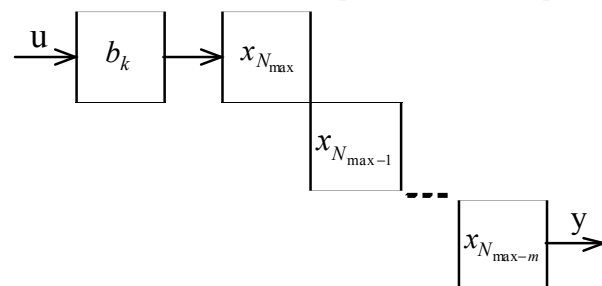


Рис. 5. Структура адаптивной модели АСК

Представленная адаптивная модель АСК является универсальной в том смысле, что может быть использована для аппроксимации любого непрерывного процесса, при этом требуется оценка только одного коэффициента или его знака. В качестве переменного состояния задаются производные от времени выходной координаты объекта.

Структура адаптивного идентификатора для такой модели имеет вид, представленный на рис. 6, и включает в себя N_{\max} цепочек, оценивающих структуру и параметры текущего состояния объекта. Каждая цепочка состоит из блока

оценивания, координат и блока экстраполяции и идентификации текущего порядка системы.

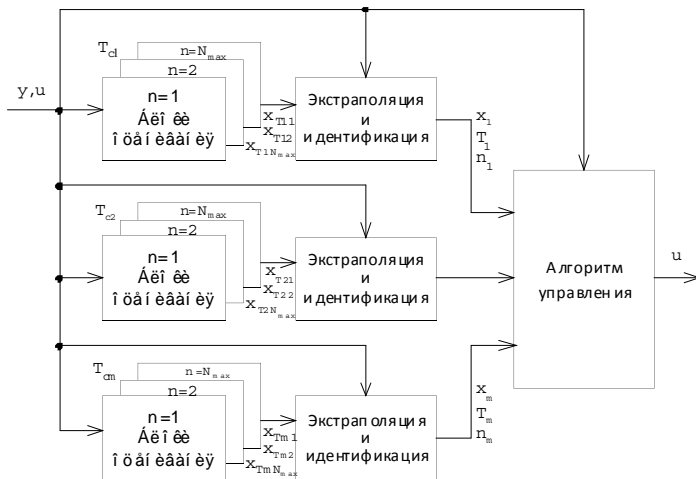


Рис. 6. Структура адаптивного идентификатора

На вход адаптивного идентификатора подаются измеряемые входные и выходные сигналы u, y . Сам идентификатор состоит из параллельно работающих цепочек с разными временами циклов $T_{c1}, T_{c2}, \dots, T_{cm}$, где m – целое постоянное число, включающих в себя блоки оценивания различных порядков $1, 2, \dots, N_{\max}$. Каждый блок оценивания формирует вектор переменных состояния простой модели $x_{ij}, i=1, m, j=1, N_{\max}$, аппроксимирующей выходной сигнал и его связи со входами. Далее, по данной модели осуществляется аппроксимация и экстраполяция оценки выходного вектора и сравнение экстраполированной выходной величины y_e с реальным сигналом y по некоторому критерию, минимум которого дает текущую оценку координат состояния объекта (АСТС) x_1, x_2, \dots, x_m .

В процессе оценивания адаптивной системой контроля ТС АСТС можно выделить следующие критерии качества: точность оценивания; скорость получения оценки; класс наблюдаемых величин; сложность алгоритма оценивания. По результатам контроля выделяют его достоверность.

Точность оценивания или наблюдения измеряемых возмущений (дестабилизирующих факторов) характеризуется различными ошибками. При оценивании постоянных величин обычно используется среднеквадратическое отклонение, а при оценивании динамических величин – интегральные критерии от среднеквадратических ошибок. Также в некоторых случаях применяются нормы максимальных ошибок. Если в системе присутствует установившийся (квазиустановившийся) режим, то может применяться среднеквадратическая ошибка в установившемся режиме.

Если удастся определить значения ошибок, то они служат численными критериями при сравнении для определения точности алгоритма оценивания. В противном случае применяются нечеткие шкалы.

Скорость получения оценки также является важнейшим фактором функционирования алгоритма оценивания. Скорость оценивания характеризуется временем переходных процессов в блоке оценивания, после чего регулярная ошибка становится достаточно малой. Требование минимизации времени

оценивания t_e обычно входит в противоречие с необходимостью минимизации случайных погрешностей. Чем выше скорость процесса оценивания, тем меньше регулярная составляющая ошибки, но больше случайные погрешности.

Класс наблюдаемых величин обычно постулируется. Например, существуют алгоритмы оценивания постоянных параметров, переменных состояний, внешних, параметрических или структурных дестабилизирующих факторов. Кроме того, можно выделить алгоритмы оценивания регулярных и случайных величин.

Сложность алгоритма напрямую влияет на стоимость и надежность реализующего его устройства. Обычно оценивается вычислительная сложность алгоритма, но простой подсчет арифметических или логических операций не всегда отражает истинную сложность алгоритма. Кроме числа операций нужно еще учитывать используемый математический базис и возможность его аппаратной реализации.

4. Характерные черты адаптивных АСК ТС АСТС

Применение интеллектуальных технологий для реализации непрерывного контроля нескольких многопараметрических АСТС влечет необходимость сокращения избыточности ТМИ, поступающей в обрабатывающий центр данных мониторинга для ПОР, что характеризует потребность в сокращении машинного времени контроля (процесса оценивания полученной с первичных преобразователей (датчиков) ИИ). Вариантами подобных решений указанной задачи могут являться реализации: а) параллельного алгоритма контроля ТС объекта; б) гибкого алгоритма контроля ТС объекта; в) принципа снижения объема контролируемых параметров, без снижения свойств достоверности, точности и др. ниже требуемых, за счет использования комплексирования методов контроля – допускового, функционального, диагностического и профилактического.

С учетом этого, дополнительными требованиями, предъявляемыми к системам автоматизированного контроля с учетом адаптации, являются [25]:

- необходимость применения в АСК (ТМС) ТС АСТС методов адаптивной профилактики, то есть профилактики по фактическому состоянию ОК, находящегося в режиме непрерывного контроля;

- обязанности проведения всех (полный контроль) или определенной части (экспресс-контроль) профилактических проверок в прогнозирующих режимах (методы экстраполяции) и установления (на этапе проектирования ОК) профилактических допусков на контролируемые параметры;

- необходимой степени автоматизации профилактических операций в целом или только операций регистрации результатов измерения параметров и сопоставления их с профилактическими допусками.

Для реализации процесса мониторинга ТС территориально-распределенных АСТС в условиях неопределенности (воздействия дестабилизирующих факторов и, как следствие, появление отказов в ОК) необходимо использование существующего технологического базиса, основанного на ряде интеллектуальных технологий [2, 23, 24, 26, 27]: *CALS*-технологии; *Web*-сервисы; *Virtualization* (виртуализация); *Mesh*-сети (ячеистая топология); *Grid Computing* (грид вычисления); *Neuro Computing* (нейрокомпьютерные вычисления); *Autonomic Computing* (автономные вычисления или

самоуправляемые системы); *Cloud Computing* (облачные вычисления); *Fog Computing* (туманные вычисления); *LXI*-технологии и др.

Проведенный анализ возможностей существующих систем и средств контроля ТС АСТС, представленного выше технологического базиса позволяют определить направления развития принципиально новых, перспективных адаптивных АСК ТС АСТС.

Отличительными особенностями (наиболее значимыми свойствами) перспективных адаптивных АСК ТС АСТС являются:

1) *Построение систем контроля на основе ТМС, интегрирующих СТС и СТИ.*

В отличие от традиционных ТМС, разделяемых по способу получения телеметрических сигналов на СТС и СТИ, предлагается следующая модель обработки сигналов тревоги, отражающая процесс интеграции существующих классов систем: сигнал тревоги формируется только в случае превышения контролируемым параметром x установленного порогового уровня $x_{г}$ (как в СТС) с последующим измерением (как в СТИ) величины выброса над порогом [28-31]. В интегрированной системе случайными величинами являются моменты t_i формирования сигналов тревоги и уровни u_i данных сигналов. Такой подход предполагает двухэтапность процесса адаптивного контроля, на первом этапе которого выполняется экспресс-контроль (оценка ограниченного числа наиболее критичных параметров), а на втором – полный контроль (оценка полного перечня параметров, подлежащих проверке).

2) *Контроль многопараметрических АСТС, наблюдаемые параметры которых имеют стохастическую взаимосвязь.*

Большинство существующих систем контроля ТС АСТС характеризуются либо методами однопараметрического допускового контроля, что не позволяет объективно определить общее ТС объекта в целом, либо – функционального контроля, что заметно снижает достоверность контроля.

При построении адаптивных систем контроля необходимо рассматривать многопараметрическую область работоспособности ОК (эллипсоидальная аппроксимация), учитывающую фактор наличия стохастической связи контролируемых параметров с учетом их критичности (приоритетности аварийных сигналов) для последующего анализа, оценивания [32-40].

3) *Адаптируемость частоты измерений относительно наблюдаемых отклонений контролируемых параметров.*

Определение допусковых областей на группу параметров АСТС позволяет учитывать их корреляцию. С увеличением частоты взаимной коррекции допусков происходит увеличение частоты «выбросов», и наоборот – с увеличением числа (частоты) выбросов возникает необходимость адаптации допусков. Таким образом, динамика изменений допусков, с учетом взаимосвязанности значений контролируемых параметров, представляет собой адаптацию пороговых значений по эллипсу. Это позволяет прогнозировать нахождение параметров ОК в заданных допусках в течение требуемого интервала времени, приводит к повышению достоверности результатов контроля и, в целом, способствует более эффективной работе АСК [41, 42].

4) *Проведение постоянного метрологического самоконтроля в процессе функционирования адаптивных АСК.*

Комплексное оценивание результатов измерений должно проводиться, и в отношении отказов ОК, и в отношении метрологических отказов самих преобразователей (датчиков). Целями метрологического самоконтроля интеллектуальных датчиков и интеллектуальных измерительных систем, встраиваемых в АСТС, являются повышение надежности АСК и достоверности результатов контроля для обеспечения технологических процессов и управления ими.

5) *Комплексное применение каналов связи в сочетании с адаптивностью к внешним воздействиям на линию связи в процессе передачи ТМИ.*

Совместное использование специализированных радиолиний различных родов связи позволит обеспечить устойчивое доведение (передачу) ТМИ от АСТС до ПУ, что достигается на основе модели радиомониторинга [42]. Такой подход позволяет провести оценку комплексного использования разнородных КС для контроля ТС АСТС при глобальных удалениях от ПУ на основе формирования структуры единой системы радиомониторинга с применением интеллектуальных технологий. В данном случае к ним относят: принципы когнитивного радио (программируемого радио с элементами когнитивных радиосистем), искусственного интеллекта и нейробионики, при обработке принимаемой ТМИ в ходе интенсивного информационного взаимодействия на основе общих баз данных распределенных систем [44-47].

С учетом рассмотренных особенностей, к основным методам адаптации АСК ТС АСТС следует отнести:

- 1) методы адаптации структуры вычислительной системы;
- 2) изменение логических функций адаптируемых элементов;
- 3) адаптивно настраиваемые и перестраиваемые логические модули;
- 4) адаптивное перераспределение программ между процессорами;
- 5) адаптивные алгоритмы балансировки нагрузки (диспетчеризации);
- 6) адаптивная коммутация (перераспределение каналов) при изменении потоков;
- 7) адаптивные алгоритмы (протоколы) маршрутизации пакетов и контроля перегрузок;
- 8) адаптивное управление настройками параметров сетевых протоколов и устройств.

Заключение

Повышение степени автоматизации систем контроля с учетом подстройки к изменению параметров объекта и среды функционирования АСТС, характеризуются резко изменяющейся, неопределенной обстановкой, что, в целом, должно стать основой синтеза универсальных адаптивных АСК. Появление адаптивных АСК знаменуют новый этап в автоматизации и интенсификации контроля функционирования сложных технических объектов – интеллектуализации, основанной на применении новых наукоемких технологий. При этом отличительными чертами данного этапа станут переход от допускового, функционального или диагностического контроля к комплексному контролю, функционирующего по адаптивному алгоритму. Адаптивные АСК, помимо обычных задач снабжения органов управления необходимой ИИ для ПОР, смогут выполнять саморегулировку объема дополнительных данных за счет комбинации структурной, временной и функциональной избыточности.

Литература

1. *Винограденко А.М., Меженев А.В., Будко Н.П.* К вопросу обоснования понятийного аппарата неразрушающего экспресс-контроля технического состояния оборудования системы связи и радиотехнического обеспечения аэродрома // *Научные технологии в космических исследованиях Земли*. 2019. Т. 11. № 6. С. 30-44. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10293.
2. *Лоскутов А.И., Козырев Г.И., Клыков В.А., Шестопалова О.Л.* Синтез адаптивных математических моделей бортовых РЭС КА на основе применения гомологических математических структур // *Математическое моделирование и прикладная математика*. Труды СПИИРАН, 2018, С. 169-194. DOI 10.15622/sp.56.8
3. *Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю.* Оценка и управление в сложных динамических системах. Монография. М.: Физматлит, 2009. 295 с.
4. *Абрамов О.В.* Функционально-параметрическое направление теории рисков: возможности и перспективы // *Вестник ДВО РАН: «Информатика и управление в технических системах»*. 2016. № 4. С. 96-101.
5. *Винограденко А.М., Будко П.А., Юров А.С., Литвинов А.И.* Способ мониторинга предаварийного состояния контролируемых объектов // *Датчики и системы*. 2014. № 9 (184). С. 8-14.
6. *Перельман И.И.* Анализ современных методов адаптивного управления с позиций приложения автоматизации технологических процессов // *Автоматика и телемеханика*. 1991. № 7. С. 3-32.
7. *Терехов В.А., Тюкин И.Ю.* Адаптивные системы управления: проблемы и тенденции // *Сб. трудов Всероссийской научной конференции «Управление и информационные технологии»*. СПб. 2003. Т. 1. С. 146-154.
8. *Astrom K., Kumar P.* Control: a Perspective // *Automatica*. 2014. № 50. С. 3-43.
9. *Albertos P., Mareels I.* Feedback and Control for Everyone. Berlin: Springer. 2010. 318 p.
10. *Astrom K., Murray R.* Feedback systems: an introduction for scientists and engineers. Princeton University Press. 2012. 408 p.
11. *Bubnicki Z.* Modern control theory. Berlin. Springer. 2005. 423 p.
12. *Baillieul J., Samed T.* Encyclopedia of systems and control. London. Springer. 2015. 1554 p.
13. *Антонюк Е.М.* Адаптивные телеизмерительные системы / Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, С.Н. Долинов, Л.Г. Журавин, Е.И. Семенов, А.В. Фремке; под ред. Фремке. Л.: Энергоиздат. 1981. 291 с.
14. *Антонюк Е.М.* Адаптивный коммутатор с параллельным анализом погрешности аппроксимации // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2015. № 8. С. 76-79.
15. *Бурый А.С., Лобан А.В., Ловцов Д.А.* Модели сжатия массивов измерительной информации в автоматизированной системе управления // *Автоматика и телемеханика*. 1998. № 5. С. 3-26.
16. *Ловцов Д.А., Лобан А.В.* Новая эффективная технология распределенной переработки измерительной информации в АСУ космическими аппаратами // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2014. № 4 (25). С. 81-88.
17. *Пилюхов В.А.* Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. Таганрог: ТТИ ЮФУ. 2009. 183 с.
18. *Колесников А.А.* Современная прикладная теория управления: синергетический подход в теории управления. Под ред. Колесникова М.: ФЦ «Интеграция». Таганрог: ТРТУ. Ч. 2. 2000. 400 с.
19. *Федоренко В.В., Рачков В.Е., Винограденко А.М.* Адаптивная радиолиния передачи дискретной информации // *Патент на изобретение RU 2425444*, опублик. 23.11.2009.
20. *Будко П.А., Жуков Г.А., Винограденко А.М., Литвинов А.И.* Комплексное использование разнородных каналов связи для управления робототехническими комплексами на базе единой системы радиомониторинга // *Научные технологии в космических исследованиях Земли*. 2017. Т. 9. № 1. С. 18-41.
21. *Будко Н.П., Будко П.А., Винограденко А.М., Емельянов А.В., Жолдасова А.Е., Жуков Г.А., Зубарев П.К., Катанович А.А., Кулешов И.А., Лисицын Ю.Д., Литвинов А.И., Мирошников В.И., Николашин Ю.Л., Салюк Д.В., Фатюхин И.Н.* Способ и устройство управления робототехническим комплексом морского базирования // *Патент на изобретение RU 2614864*, опублик. 05.02.2016.
22. *Ядыкин И.Б.* Оптимальный адаптивный синтез регуляторов заданной структуры // *Автоматика и телемеханика*. 2011. № 5. С. 161-174.
23. *Шанин Д.А., Пилюхов В.Х., Медведев В.Ю.* Построение нейросетевых регуляторов для синтеза адаптивных систем управления // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2008. № 3. Т. 6. С. 48-52.
24. *Пилюхов В.Х., Сиротенко М.Ю.* Структурно-алгоритмическая реализация системы управления автомобильным мобильным роботом с нейросетевым планировщиком перемещений // *Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Интеллектуальные САПР»*. Таганрог: Издательство ТРТУ. 2004. № 3. С. 185-191.
25. *Будко П.А., Чихачев А.В., Баринов М.А., Винограденко А.М.* Принципы организации и планирования сильно связанной телекоммуникационной среды сил специального назначения // *T-Comm: Телекоммуникация и транспорт*. 2013. Т. 7. № 6. С. 8-12.
26. *Еришов А.В., Винограденко А.М.* Модель мониторинга технического состояния распределенных объектов контроля, учитывающая влияние случайных отказов в процессе контроля с использованием интерактивных мультисенсорных технологий // *Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019613476*, опублик. 17.01.2019.
27. *Еришов А.В., Винограденко А.М.* Модель визуализации телеметрической информации на пульте дистанционного управления с использованием мультисенсорных технологий // *Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019611661*, опублик. 31.01.2019.
28. *Fedorenko V.V., Kononov Y.G., Vinogradenko A.M., Samoilenko V.V., Samoilenko I.V.* The time probability characteristics of a telemetry signal with the variable number of bits // *Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS*. 2017. V. 2. 2017. P. 146-149.
29. *Винограденко А.М., Веселовский А.П., Бурьянов О.Н.* Оперативный контроль технического состояния электротехнических объектов / в сборнике: *Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники*. III Всероссийская научно-практическая конференция. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. С.-Петербург. 2016. С. 178-184.
30. *Винограденко А.М., Федоренко И.В., Семенов А.В.* Система для контроля технического состояния радиоэлектронных объектов // *Патент на полезную модель RU 90916*, опублик. 05.08.2009.
31. *Винограденко А.М., Федоренко И.В.* Система для контроля параметров технологических объектов // *Патент на полезную модель RU 96676*, опублик. 09.03.2010.
32. *Будко П.А., Будко Н.П., Литвинов А.И., Винограденко А.М.* Реализация кинетического метода контроля и диагностики технических средств // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2014. № 8 (162). С. 37-44.
33. *Будко П.А., Винограденко А.М., Гойденко В.К., Тимошенко Л.И.* Метод многомерного статистического контроля технического состояния радиоэлектронного оборудования на основе комплексирования показаний нескольких типов датчиков // *Датчики и системы*. 2018. № 3 (223). С. 3-11.
34. *Будко П.А., Жуков Г.А., Винограденко А.М., Гойденко В.К.* Определение аварийного состояния морского робототехнического комплекса по многоэтапной процедуре контроля на основе использования вейвлет-преобразований // *Морская радиоэлектроника*. 2016. № 4 (58). С. 20-23.
35. *Евланов Л.Г.* Контроль динамических систем. М.: Наука. 1979. 432 с.
36. *Будко Н.П., Будко П.А., Винограденко А.М., Литвинов А.И.* Способ и устройство автоматического контроля технического состояния электрооборудования // *Патент на изобретение RU 2548602*, опублик. 19.02.2014.
37. *Винограденко А.М.* Эллипсоидальная аппроксимация областей параметрической неопределенности технического состояния РТК // *Робото-техника и техническая кибернетика*. 2018. № 3 (20). С. 53-60.
38. *Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В.* Неразрушающий контроль и диагностика / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение. 2003. 656 с.
39. *Abramov O.V.* Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devices and Systems. *Automation and Remote Control*. 2016. Vol.77. No. 4. pp. 594-603.
40. *Abramov O.V., Nazarov D.A.* Condition-based maintenance by minimax criteria. *Applied Mathematics in Engineering and Reliability. Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability*. 2016. pp. 91-94.
41. *Будко П.А., Винограденко А.М., Веселовский А.П.* Адаптация допусков контролируемых параметров РЭС // *Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях*. Труды IV межвузовской научно-практической конференции. 2019. С. 141-146
42. *Винограденко А.М., Пасхальный А.В.* Эллипсоидальная адаптация области допусков многопараметрических систем // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2019. № 1 (203). С. 118-129.
43. *Будко П.А., Винограденко А.М., Литвинов А.И.* Реконфигурация каналов связи при управлении смешанными группировками робототехнических комплексов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2017. № 2 (187). С. 266-278.
44. *Винограденко А.М., Федоренко И.В., Гальвас А.В.* Многофазная организация обслуживания в информационно-телеметрических системах // *Информационные системы и технологии*. 2010. № 3 (59). С. 121-125.
45. *Будко Н.П., Будко П.А., Винограденко А.М., Дорошенко Г.П., Рожнов А.В., Минеев В.В., Мухин А.В.* Способ распределенного контроля и

ADAPTIVE CONTROL OF TECHNICAL CONDITION OF AUTONOMOUS COMPLEX TECHNICAL OBJECTS ON THE BASIS OF INTELLIGENT TECHNOLOGIES

Aleksey M. Vinogradenko, Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia, vinogradenko.a@inbox.ru

Nikita P. Budko, Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia, budko62@mail.ru

Abstract

The article is devoted to the study of processes of adaptive monitoring of technical condition of autonomous complex technical objects characterized by high cost of failure. The relevance of this direction of research is shown. The purpose of the work is to synthesize an adaptive automated system for monitoring the technical condition of autonomous complex technical objects operating under the influence of destabilizing factors, in order to maintain the operability of which, an adaptive rapid analysis of measurement information obtained during the monitoring process is required and its free transmission is required for making operational decisions by the control system. An approach to the construction of adaptive systems for monitoring the technical condition of autonomous geographically distributed objects on the basis of telemetry systems operating in express control and full control modes is presented. An example of the construction, structure of the measurement information evaluation subsystem and identification of state classes of control objects in adaptive automated control systems based on the emergency identifier is given. Characteristics of adaptive automated systems for monitoring the technical condition of autonomous geographically distributed complex technical facilities have been defined. Among the features of promising adaptive control systems for such objects are: Two-stage control process (reduction of measurement information redundancy), consideration of stochastic interdependence of controlled parameters of objects, adaptability of measurement frequency relative to observed deviations of parameters, continuous metrological self-control during operation of adaptive automated control systems, complex application of heterogeneous communication channels in combination with adaptability to external effects on the communication line during transmission of telemetry information. The main methods of adaptation of automated systems of monitoring of technical condition of autonomous complex technical objects are presented.

Keywords: autonomous complex technical objects, measuring information, adaptability, automated control systems, technical condition, identification, evaluation.

References

1. Vinogradenko A.M., Mezhenov A.V., Budko N.P. (2019). To the question of substantiation of the conceptual apparatus nondestructive express control of technical condition equipment of communication system and aerodrome radio engineering support. *H&ES Research*. Vol. 11. No. 6. 2019. Pp. 30-44. DOI 10.24411/2409-5419-2018-10293. (in Russian)
2. Loskutov A., Kozyrev G., Klyikov V., Shestopalova O. (2018). Synthesis of adaptive mathematical models of on-board spacecraft avionics based on application of homological mathematical structures. *Mathematical modeling and applied mathematics*, pp. 169-194. DOI 10.15622/sp.56.8. (in Russian)
3. Pshihopov V., Medvedev M. (2009). Evaluating and managing complex dynamic systems. Moscow: Fizmatlit, pp. 295. (in Russian)
4. Abramov O. (2016). Functional-parametric direction of risk theory: opportunities and perspectives. *Informatics and management in technical systems*. No. 4, pp. 96-101. (in Russian)
5. Vinogradenko A., Budko P., Yurov A., Litvinov A. (2014). Monitoring method of pre-accident state of monitored objects. *Sensors and systems*. No. 9 (184), pp. 8-14. (in Russian)
6. Perel'man I. (1991). Analysis of modern adaptive control methods from the point of view of process automation application. *Automation and remote control*. No. 7, pp. 3-32. (in Russian)
7. Terehov V., Tyukin I. (2003). Adaptive management systems: challenges and trends. *Management and information technology*. Vol. 1, pp. 146-154. (in Russian)
8. Astrom K., Kumar P. (2014). Control: a Perspective. *Automatica*. No. 50, pp. 3-43. (in Russian)
9. Albertos P., Mareels I. (2010). *Feedback and Control for Everyone*. Berlin: Springer. 318 p.
10. Astrom K., Murray R. (2012). *Feedback systems: an introduction for scientists and engineers*. Princeton University Press. 408 p.
11. Bubnicki Z. (2005). *Modern control theory*. Berlin: Springer. 423 p.
12. Baillieul J., Samad T. (2015). *Encyclopedia of systems and control*. London: Springer. 1554 p.
13. Antonyuk E. (1981). Adaptive telemetering systems. Moscow: Energoizdat. 291 p. (in Russian)
14. Antonyuk E. (2015). Adaptive switch with parallel approximation error analysis. *News of St.Petersburg State University*. No. 8, pp. 76-79. (in Russian)
15. Buriy A., Loban A., Lovtsov D. (1998). Models of measurement data array compression in automated control system. *Automation and remote control*. No. 5, pp. 3-26. (in Russian)
16. Lovtsov D., Loban A. (2014). New efficient technology of distributed processing of measuring information in ACS by spacecraft. *Bulletin of NGO S. Lavochkina*. No. 4 (25), pp. 81-88. (in Russian)
17. Pshihopov V. (2009). *Position-path control of mobile objects*. SFU. 183 p. (in Russian)
18. Kolesnikov A. (2000). Modern applied management theory: a synergistic approach in management theory. *Integration*. Vol. 2. 400 p. (in Russian)
19. Fedorenko V., Rachkov V., Vinogradenko A. Adaptive radio link of discrete information transmission. Patent Russia no. 2425444, 23.11.2009. (in Russian)
20. Budko P., Zhukov G., Vinogradenko A., Litvinov A. (2017). Complex use of heterogeneous communication channels for the management of robotic complexes on the basis of a single radio monitoring system. *H&ES Research*. Vol. 9. No. 1, pp. 18-41. (in Russian)

21. Budko P., Budko N., Vinogradenko A., Emel'yanov A., Zholdasova A. Method and control device of marine-based robotic complex. Patent Russia no. 2614864, 05.02.2016. (in Russian)
22. Yadyikin I. (2011). Optimal adaptive synthesis of regulators of a given structure. *Automation and remote control*. No. 5, pp. 161-174. (in Russian)
23. Shanin D., Pshihopov V., Medvedev V. (2008). Building neural network regulators to synthesize adaptive control systems. *Information-measuring and control systems*. No 3. Vol. 6, pp. 48-52. (in Russian)
24. Pshihopov V., Syrotenko M. (2004). Structural-algorithm implementation of automotive mobile robot control system with neural network movement scheduler. *TRTU News*. No 3, pp. 185-191. (in Russian)
25. Budko P., Chihachev A., Barinov M., Vinogradenko A. (2013). Principles of organization and planning of strong telecommunication environment of special forces. *T-Comm*. Vol. 7. No. 6, pp. 8-12. (in Russian)
26. Ershov A., Vinogradenko A. Model for monitoring the technical condition of distributed control objects, taking into account the impact of accidental failures in the control process using interactive multi-sensor technologies. Computer program registration certificate Russia no. 2019613476, 17.01.2019. (in Russian)
27. Ershov A., Vinogradenko A. Model for monitoring the technical condition of distributed control objects, taking into account the impact of accidental failures in the control process, using interactive multi-sensor technologies. Computer program registration certificate Russia no. 2019613476, 17.01.2019. (in Russian)
28. Fedorenko V.V., Kononov Y.G., Vinogradenko A.M., Samoilenko V.V., Samoilenko I.V. (2017). The time probability characteristics of a telemetry signal with the variable number of bits. *Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, "CTS-2017"*. Vol 2, pp. 146-149. (in Russian)
29. Vinogradenko A., Veselovskiy A., Bur'yanov O. (2016). Operational monitoring of technical condition of electrical objects. *Modern problems of creation and operation of weapons, military and special equipment*, pp. 178-184. (in Russian)
30. Vinogradenko A., Fedorenko I., Sememenko A. System for monitoring of technical condition of radio-electronic objects. Patent Russia no. 90916, опубл. 05.08.2009. (in Russian)
31. Vinogradenko A., Fedorenko I. System for monitoring of process objects parameters. Patent Russia no. 96676, 09.03.2010. (in Russian)]
32. Budko P., Budko N., Litvinov A., Vinogradenko A. (2014). Implementation of kinetic method of control and diagnostics of hardware. *Mechatronics, automation, management*. No. 8 (162), pp. 37-44. (in Russian)
33. Budko P., Vinogradenko A., Goydenko V., Timoshenko L. Method of multidimensional statistical control of technical condition of the radio-electronic equipment on the basis of the integration of indications of several types of sensors. *Sensors & systems*. No. 3 (223), pp. 3-11. (in Russian)
34. Budko P., Zhukov G., Vinogradenko A., Goydenko V. (2016). Determination of the emergency state of the marine robotics complex by a multi-stage control procedure based on the use of waket transformations. *Sea radio electronics*. No. 4 (58), pp. 20-23. (in Russian)
35. Evlanov L. (1979). *Control of dynamic systems*. Science. 432 p. (in Russian)
36. Budko P., Budko N., Vinogradenko A., Litvinov A. Method and device for automatic control of technical condition of electrical equipment. Patent Russia no. 2548602, 19.02.2014. (in Russian)
37. Vinogradenko A. (2018). Ellipsoidal approximation of parametric uncertainty of technical condition of robotic systems. *Robotics and technical cybernetics*. No. 3 (20), pp. 53-60. (in Russian)
38. Klyuev V, Sosnyn F., Kovalyov A. (2003). Nondestructive testing and diagnosis. *Mechanical engineering*. 656 p. (in Russian)
39. Abramov O. (2016). Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devices and Systems. *Automation and Remote Control*. Vol.77. No. 4, pp. 594-603. (in Russian)
40. Abramov O., Nazarov D. (2016). Condition-based maintenance by minimax criteria. *Applied Mathematics in Engineering and Reliability. Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability*, pp. 91-94. (in Russian)
41. Budko P., Vinogradenko A., Veselovskiy A. (2019). Adaptation of tolerances of controlled parameters of avionics system. *Proceedings of the 4th International Conference on Problems of technical support of troops in modern conditions*, pp. 141-146. (in Russian)
42. Vinogradenko A., Pashal'niy A. (2019). Ellipsoidal adaptation of the tolerance area of multi-variable systems. *News of SFU*. No. 1 (203), pp. 118-129. (in Russian)
43. Budko P., Vinogradenko A., Litvinov A. (2017). Reconfiguration of communication channels during control of mixed groups of robotic complexes. *News of SFU*. No. 2 (187), pp. 266-278. (in Russian)
44. Vinogradenko A., Fedorenko I., Gal'vas A. (2010). Multiphase maintenance in telemetry systems. *Information systems and technologies*. No. 3 (59), pp. 121-125. (in Russian)
45. Budko P., Budko N., Vinogradenko A., Doroshenko G. Method of distributed control and adaptive control of multilevel system and device for its implementation. Patent Russia no. 2450335, 11.07.2011. (in Russian)
46. Budko P., Bur'yanov O., Vinogradenko A., Veselovskiy A. (2017). Model of automated system of monitoring of technical condition of ground robotics systems. *Proceedings of the 2st International Conference on Problems of technical support of troops in modern conditions*, pp. 145-149. (in Russian)
47. Budko P., Fedorenko V., Vinogradenko A., Kuzhnetsov S. Method of multilevel complex control of technical condition of radio-electronic systems. Patent Russia no. 2694158, 01.11.2018. (in Russian)

Information about authors:

Aleksey M. Vinogradenko, PhD, Docent, Doctoral Candidate Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia

Nikita P. Budko, Applicant at the Department of Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia