

УДК 681.518.5

С. А. Паньчев, соискатель, **А. И. Паньчев**, канд. техн. наук, доцент,
А. В. Максимов, канд. техн. наук, доцент, **А. Г. Байбуз**, начальник учебной части
Южный федеральный университет, Россия
Тел.: +7(8634)371733; E-mail: aipanychev@sfedu.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ИНВАРИАНТНОГО ПОДХОДА В САМОДИАГНОСТИКЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

В статье описано применение инвариантного подхода к самодиагностике информационных каналов системы автоматизированного управления технологическими процессами на примере мониторинга распределенной системы управления. Приведена структура встроенной распределенной функциональной системы контроля и диагностики с аналитической избыточностью. Предложен мажоритарно-динамической метод реконфигурации распределенной системы управления, обеспечивающий контроль в реальном времени, безэталонную самодиагностику и локализацию отказавшего модуля за три этапа реконфигурирования.

Ключевые слова: распределенная система управления, PCY, DCS, диагностика, инвариантный подход, реконфигурирование.

S. A. Panychev, A. I. Panychev, A. V. Maksimov, A. G. Baybuz

INVARIANT APPROACH APPLICATION IN A DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM SELF-DIAGNOSTICS

The application of an invariant approach to information channels self-diagnostics of automated process control system on the example of monitoring a distributed control system is described. The structure of a built-in distributed functional monitoring and diagnostics system with analytical redundancy is given. A majority-dynamic method of a distributed control system reconfiguration is proposed, which provides real-time monitoring, standardless diagnostics and the failed module localization in three stages of reconfiguration.

Keywords: distributed control system, DCS, diagnostics, invariant approach, reconfiguration.

1. Введение

Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) является основополагающим фактором автоматизации технологических процессов и производств в машиностроении и включает в себя большое число подсистем. Одна из важных функций информационной подсистемы АСУ ТП состоит в диагностике состояния технологического оборудования: определении факта и желательно причины его нештатной работы, вероятностном прогнозировании сбоев и отказов, оценки степени их опасности для дальнейшей эксплуатации оборудования [1, 2].

В настоящее время многие АСУ ТП строятся на основе распределенных систем управления (PCY, DCS – Distributed Control System). В общем случае под PCY понимают систему управления технологическим процессом, состоящую из устройств, которые разнесены в пространстве, независимы друг от друга и взаимодействуют между собой для выполнения общей задачи. Основными элементами PCY являются микропроцессорные устройства, обычно это программируемые логические контроллеры (ПЛК), и интеллектуальные модули ввода-вывода информации, что обеспечивает распределённую систему ввода-вывода и децентрализацию обработки данных [3].

Современные PCY представляют собой открытые модульные системы, состоящие из серийно выпускаемых компонентов, которые соответствуют

общепризнанным стандартам. Существуют две основные концепции организации РСУ: мультипроцессорная и мультикомпьютерная. В первом случае вычислительные средства РСУ используют оперативную и долгосрочную память совместно, что означает создание единого адресного пространства. Во втором случае каждый компьютер работает со своей памятью, при этом объединяющая контроллеры сеть имеет шинную или коммутируемую архитектуру. В гомогенных РСУ используется одна соединяющая компьютеры сеть с единой технологией, в гетерогенных распределенных системах реализуются несколько сетей, в общем случае различных технологий [4].

Таким образом, структура РСУ характеризуется такими свойствами, как магистральность, модульность, микропрограммируемость, регулярность и однородность элементов. Эти свойства обеспечивают распределение задач между параллельно работающими процессорами, повышенную устойчивость к отказам и сбоям, так как отказ одного из контроллеров не влияет на работоспособность других, достаточно простое наращивание и реконфигурирование системы, относительную простоту каждого из модулей системы.

Немаловажной характеристикой РСУ также является её максимальная приспособленность к самодиагностике, что обеспечивает не только отказоустойчивость самой АСУ ТП, но и повышает надежность и безопасность диагностируемого ею технологического оборудования.

2. Постановка задачи и анализ методов решения

С целью сокращения аппаратной, структурной, информационной, временной избыточности, обеспечивающих отказоустойчивость и повышающих надежность технологического оборудования, поставим задачу разработки структуры и алгоритма работы встроенной функциональной системы контроля и самодиагностики (СКД) среднего иерархического уровня АСУ ТП – гомогенной мультикомпьютерной распределенной системы управления.

Основанные на инвариантном подходе методы диагностирования информационных систем рассмотрены в [5]. Основное содержание теории инвариантов в отношении объекта диагностирования сводится к выявлению изменений его характеристик при ненормальном функционировании.

Выделяют три основных метода реализации инвариантного подхода:

- модель диагностируемого объекта;
- наблюдатель состояния;
- введение аналитической избыточности.

Использование модели диагностируемого объекта положено в основу таких методов, как контроль на основе дублирования и мажоритарный контроль.

Принципы инвариантного подхода с помощью модели-эталона и на основе избыточной аналитики поясняются логическими схемами на рис. 1.

Контроль с помощью физической эталонной модели (рис. 1, а) реализуется посредством физического дублирования, то есть введения аппаратной избыточности. Эталоном в данном случае является второй экземпляр диагностируемого объекта с такими же входными сигналами X . В данном случае инвариант Δ определяется суммой по модулю 2 измеряемых выходных сигналов основного Y и дублирующего Z объекта: $\Delta = Y \oplus Z$. Критерием отсутствия неисправностей или вычислительных ошибок в диагностируемом объекте является равенство инварианта нулю: $\Delta = 0$. Основанные на этом принципе функциональные СКД универсальны, просты в настройке и эксплуатации, не сопряжены с большими вычислительными затратами.

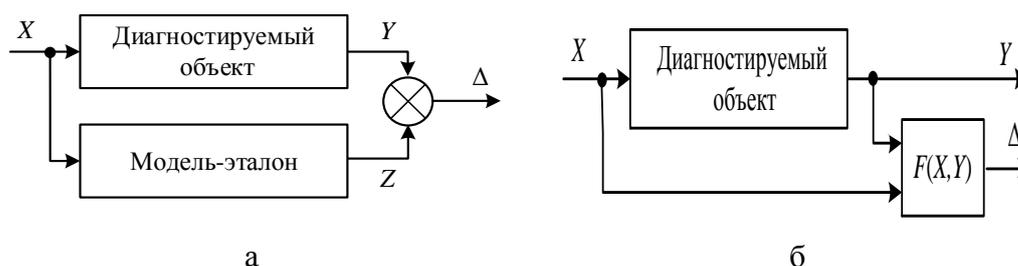


Рисунок 1. Принципы инвариантного подхода к диагностике:

а – с помощью эталонной модели; б – на основе аналитической избыточности

Для уменьшения аппаратной избыточности в качестве эталона используют математическую модель диагностируемого объекта $F(X,Y)$, вводя тем самым аналитическую избыточность (рис. 1, б). Однако на практике трудно установить аналитическую зависимость между измеряемыми входными сигналами X и выходными сигналами Y диагностируемой системы, что является причиной неустойчивости и ошибочности результатов контроля посредством аналитической модели.

Метод диагностики посредством дублирования будет эффективен, если РСУ реализована на принципах однородности, регулярности и магистральности на основе перепрограммируемых типовых модулей. Кроме того, архитектура РСУ должна быть наделена свойством реконfigurирования с целью маскирования некорректно реализуемых функций для обеспечения её живучести.

Следует отметить, что использовать инвариантный подход при диагностике на основе математической модели всей АСУ ТП, состоящей из множества подсистем, затруднительно или зачастую даже невозможно ввиду существенной сложности её модели. Вместо этого для обнаружения неисправностей целесообразно применять модели частей АСУ ТП. Дело в том, что централизованная диагностика сталкивается с нехваткой времени для проведения измерений и выполнения вычислений. Но главная проблема – это невозможность создания модели АСУ ТП из-за отсутствия адекватного системного математического инструментария.

Реализация инвариантного подхода к диагностике заключается в создании пар «диагностируемый объект – его эталонный модуль». Поскольку СКД является распределенной по функциональной топологии РСУ, для её реализации необходимы [6-9]:

- коммутационная среда;
- подсистема управления реконfigurацией по принципу инвариантного подхода;
- функциональные контрольные точки;
- контроллеры прерывания;
- блок принятия решения перехода от функции контроля к функции диагностики;
- блоки адресов отказавших пар «диагностируемый модуль – эталонный модуль».

3. Разработка структуры СКД и алгоритма самодиагностики РСУ

В [10-15] изложены основные положения синтеза реконfigurлируемых систем функционального контроля и диагностики бортового радиоэлектронного оборудования, в частности бортовых вычислительных систем, архитектура которых во многом аналогична структуре среднего иерархического уровня РСУ, объединяющего ПЛК и модули ввода-вывода информации.

Адаптируем полученные в указанных работах результаты к задаче самодиагностики состояния распределенных АСУ ТП. Полагаем, что РСУ представляет собой систему N архитектурно объединенных магистралью однородных микропроцессорных модулей.

Ввиду однородности всех модулей РСУ мониторинг её состояния можно обеспечить посредством введения в дерево функций системы дополнительной функции контроля и диагностики. Функция мониторинга реализуется встроенной распределенной функциональной СКД, работа которой основана на реконфигурации архитектуры РСУ.

Возможный вариант обобщенной структуры такой системы контроля и самодиагностики РСУ приведена рис. 2. Однородные модули $1, 2, \dots, N$ выполняют основные функции РСУ, их функциональные связи на рисунке не показаны. Встроенная СКД может реализовать инвариантность мониторинга как на основе физического эталона в соответствии с рис. 1,а, так с использованием эталона в виде математической модели (рис. 1,б).

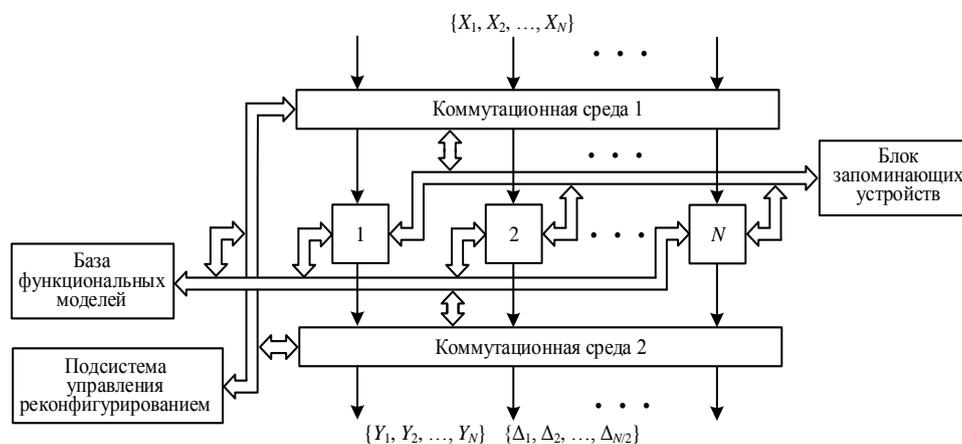


Рисунок 2. Структура встроенной распределенной функциональной СКД

Для этого в состав СКД включены:

- две коммутационные среды (КС1, КС2), обеспечивающие требуемую комбинацию соединений входов и выходов микропроцессоров;
- подсистема управления реконфигурированием (ПУР);
- база функциональных моделей $F(X_i, Y_i)$ всех модулей, $i = 1, \dots, N$ (БФМ);
- блок запоминающих устройств (БЗУ), предназначенный для временного хранения слова состояния модуля, используемого в качестве эталона в текущем сеансе диагностирования;
- магистраль диагностирования, обеспечивающая взаимодействие СКД с основной частью РСУ.

Этап контроля работоспособности ПЛК, позволяющий обнаружить наличие отказа в контроллерах РСУ, заключается в следующей процедуре реконфигурации структуры РСУ (рис. 3):

- по команде ПУР в КС1 входы соседних модулей объединяются попарно, в случае нечетного числа модулей необходимо предусмотреть ввод в архитектуру РСУ дополнительного (резервного) модуля;
- на объединенные входы каждой пары подается сигнал, присутствовавший в момент начала контроля на входе модуля с нечетным номером в паре;

- состояния модулей с четным номером в паре сохраняются в БЗУ;
- по команде ПУР в КС2 формируется вектор инвариантов $\{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{N/2}\} = \{Y_1 \oplus Y_2, Y_3 \oplus Y_4, \dots, Y_{N-1} \oplus Y_N\}$, который сохраняется в БЗУ для использования на следующих этапах диагностики;
- индикатором наличия отказа в РСУ является дизъюнкция всех парциальных инвариантов $\Delta_{det} = \bigvee_{j=1}^{N/2} \Delta_j$.

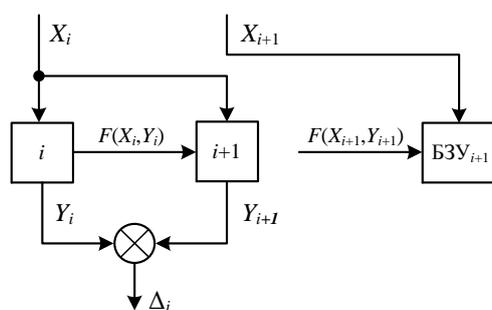


Рисунок 3. Фрагмент реконфигурированной структуры РСУ на этапе контроля

Если в результате выполнения данных процедур инвариант этапа обнаружения $\Delta_{det} = 0$, то все модули РСУ работоспособны, и структура системы возвращается к первоначальному виду. Если инвариант $\Delta_{det} = 1$, то по крайней мере один модуль РСУ неисправен.

Следующий этап самодиагностики – локализация отказа – на основе инвариантного подхода может быть выполнен несколькими методами, требующими различного времени для проведения процедуры самодиагностики:

- метод сканирующего контроля, максимальное число тактов для фиксации отказавшего элемента равно N ;
- метод дихотомии, число тактов анализа для выявления неисправного элемента составляет от $\log_2 N$ до $\log_2 N + 2$;
- метод Фибоначчи, число тактов локализации отказа не превышает $\log_2 N$;
- метод «золотого сечения», число тактов локализации отказа не превышает $\log_2 N$.

Более эффективной является процедура локализации неисправного модуля, основанная на попарном сравнении работоспособности элементов РСУ. Для этого выполняется реконфигурирование РСУ из следующих соображений (рис. 4):

- по сохраненному в БЗУ вектору инвариантов этапа обнаружения неисправности по признаку $\Delta_i = 1$ отыскивается i -я пара модулей, содержащая неисправный элемент;
- по команде ПУР в КС1 перегруппировываются $(i-1)$ -я, i -я и $(i+1)$ -я пары модулей, чтобы сравнить работоспособность отказавшей i -ой пары с граничными элементами из предыдущей и последующей пар;
- по команде ПУР на объединенные входы каждой вновь образованной пары подается входной сигнал модуля нечетным номером в паре;
- состояния модулей с четным номером в паре сохраняются в БЗУ;
- по команде ПУР все остальные модули, не участвующие в этом этапе диагностики, возвращаются в штатное рабочее состояние;

– по команде ПУР в КС2 на выходах двух образованных пар формируются инварианты $\Delta_i = Y_i \oplus Y_{i-1}$, $\Delta_{i+1} = Y_{i+1} \oplus Y_{i+2}$.

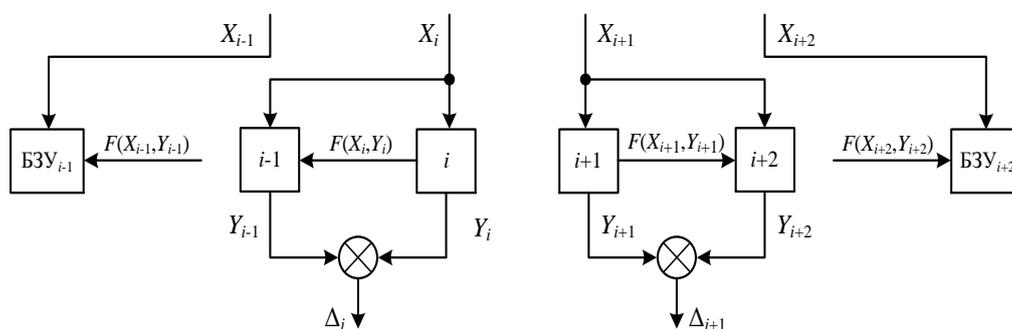


Рисунок 4. Фрагмент реконфигурированной структуры РСУ на этапе локализации отказавшего модуля

Если дизъюнктивный индикатор двух анализируемых пар $\Delta_{loc} = \Delta_j \vee \Delta_{j+1} = 0$, то это означает, что во время этапа обнаружения возник кратковременный сбой, отсутствующий на втором этапе диагностики. В этом случае структура РСУ возвращается в штатное состояние. Получение инварианта на этапе локализации неисправности $\Delta_{loc} = 1$ означает, что в системе произошел отказ. Для локализации неисправного модуля анализируются парциальные инварианты Δ_j и Δ_{j+1} и определяется номер M пары с зафиксированным отказом $\Delta_M = 1$, при этом номер отказавшего модуля равен $2M-1$.

На заключительном этапе производится восстановление системы. С целью минимизации аппаратной избыточности в РСУ могут отсутствовать резервные элементы. Вследствие многофункциональности модулей функции отказавшего модуля с помощью адаптивного алгоритма могут быть перераспределяется между остальными работоспособными модулями. Вместе с этим, возможно замещение отказавшего модуля по методу скользящего резервирования.

Таким образом, предложенный алгоритм обнаружения отказа и локализации неисправного элемента осуществляется за три этапа реконфигурирования РСУ и не зависит от количества модулей N .

4. Обсуждение результатов

Присущие современным РСУ свойства однородности, магистральности и многофункциональности позволяют реализовать систему функционального контроля и самодиагностики с заданным уровнем аппаратной или аналитической избыточности. Это достигается выбором того или иного алгоритма реконфигурации архитектуры РСУ в соответствии с инвариантным подходом, основанным на кратковременном дублировании однородных микропроцессорных модулей.

Работоспособность отдельных модулей РСУ оценивается по выходным сигналам пар элементов, выполняющих одинаковую информационную задачу. Если сформированный кодовый вектор инвариантов $\{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{N/2}\}$ не содержит единичных элементов, то РСУ признается работоспособным. При наличии единичных элементов осуществляется новая реконфигурация для образования новых пар с соседними работоспособными модулями.

Результатом выполнения мониторинга является определение адреса отказавшего модуля, удаление его из архитектуры РСУ, и замещение методом скользящего

резервирования или перераспределение функций отказавшего модуля между остальными, остающимися в работе.

Циклы мониторинга состояния РСУ могут начинаться по таймеру, в соответствии с прогнозируемым для модулей временем наработки до отказа. Другим вариантом начала цикла мониторинга может быть факт обнаружения перегрузки по одному из контролируемых физических каналов РСУ.

Встроенные СКД предназначены для идентификации отказа из реализуемого перечня функций и выполнения реконфигурации архитектуры для обеспечения её живучести. Модификации в системе могут происходить как через постоянные, так и через переменные промежутки времени. Они могут быть детерминированными или случайными, синхронными или асинхронными.

Структура РСУ должна изменяться, поскольку меняются функции: целевые, основные, выдвигаемые воздействием окружающей среды. Например, микроконтроллерные модули могут изменять свою архитектуру вследствие изменения трафика входных данных. Без учета входного потока задач можно говорить о временах использования системы по каждой функции и оценивать надежность с учетом времени выполнения системой всех её функций.

Основной сложностью в изучении многофункциональных систем является то, что исследование проводится без учета как потока входных задач, поступающих в систему, так и последствий отказов. Выходом из этой ситуации можно предложить разработку и исследование модели системы, позволяющей осуществить анализ потерь информации, вызванных маскированием функций, реализуемых типовыми модулями, реконфигурированием многофункциональной системы.

5. Выводы

В работе описан мажоритарно-динамический метод реконфигурации РСУ, основанный на инвариантном подходе к контролю и диагностике АСУ ТП. Предложенный алгоритм самодиагностики позволяет локализовать отказавший модуль за три такта реконфигурации без увеличения аппаратной, структурной, информационной, временной избыточности.

Рассмотренный подход реализуем при выполнении следующих требований к РСУ: архитектура системы отвечает условиям магистральности, модульности, микропрограммируемости, регулярности и однородности элементов; поступающие на обработку задания независимы, их поток является пуассоновским; выполняемые в системе задачи являются информационно однотипными; время выполнения заданий процессорами имеет экспоненциальное распределение; вероятность одновременного возникновения в нескольких контроллерах однотипных сбоев или отказов исчезающе мала. Вопросы усложнения алгоритма самодиагностики для случаев наличия нескольких отказавших модулей РСУ требуют дальнейшего исследования.

Предложенный вариант самодиагностики РСУ может стать одним из аппаратно-программных звеньев улучшения отказоустойчивости и повышения надежности технологического оборудования в машиностроении.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Емельянов, Д. С. Концепция создания интеллектуальной автоматизированной системы управления технической подготовки производства машиностроительного предприятия // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=14253> (дата обращения: 15.06.2020).

2. Бурдо, Г. Б. Основные принципы создания систем автоматизации проектирования и управления в машиностроительных производственных системах / Г. Б. Бурдо, Н.А. Семенов // Программные продукты и системы. – 2019. – Т. 32. – № 1. – С. 134-140. – DOI: 10.15827/0236-235X.125.134-140, <https://www.bookasutp.ru/> [Электронный ресурс] (дата обращения: 15.06.2020).

3. Елизаров, И. А. Технические средства автоматизации / И. А. Елизаров, Ю.Ф. Мартемьянов, А. Г. Схиртладзе, С. В. Фролов // Программно-технические комплексы и контроллеры: учебное пособие. – М.: Издательство Машиностроение-1, 2004. – 180 с.

4. Сажин, С. Г. Методы диагностики информационно-измерительных каналов АСУТП. Инвариантный подход / С.Г. Сажин, В. П. Луконин, Н. А. Бахметова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – № 2. – С. 51-53.

5. Беззубов, В. Ф. Управляющая вычислительная система высокой надежности с реконфигурацией / В.Ф. Беззубов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2010. – № 3. – Т. 8. – С. 46-60.

6. Щербаков, Н. С. Построение универсальной встроенной иерархической системы диагностирования сложных радиоэлектронных комплексов / Н. С. Щербаков, Т. Г. Самхарадзе, В. М. Рыбин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. – № 4. – С. 46-50.

7. Агеев, А. М. Супервизорный метод управления технических систем с избыточностью / А. М. Агеев, А. М. Бронников, В. Н. Буков, И. Ф. Гамаюнов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2017. – № 3. – С. 72-82.

8. Филиппов, А. К. Основы математического моделирования динамически реконфигурируемых систем обработки информации / А.К. Филиппов // Проектирование и технология электронных средств. – 2008. – № 1. – С. 38-44.

9. Гузик, В. Ф. Статистическая диагностика неравновесных объектов / В.Ф. Гузик, В. И. Кидалов, А. П. Самойленко. – СПб.: Судостроение, 2009. – 304 с.

10. Гузик, В. Ф. Комплексование аппаратно-программных средств контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата / В.Ф. Гузик, А. П. Самойленко, А. И. Панычев, С. А. Панычев // Инженерия для освоения космоса. Сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного Форума с международным участием. – Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. – С. 150-153.

11. Panychev, S. A., Guzik V. F., Samoilenko A. P., Panychev A. I. The prerequisites of forming a risk management system in the design of facilities space application // MATEC Web of Conferences 102, 01030 (2017) V International Forum for Young Scientists "Space Engineering". DOI: 10.1051/mateconf/201710201030/.

12. Guzik V. F., Samoilenko A. P., Panychev A. I., Panychev S. A. Reconfiguring of structure as self diagnosis tool of on-board computers // 15th East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2017 IEEE. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110106.

13. Samoilenko, A. P., Panychev A. I., Maksimov A. V., Baibuz A. G. Invariant Approach in Monitoring Condition of Onboard Radio Electronic Equipment // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570133.

14. Самойленко, А. П. Синтез реконфигурируемых систем функционального контроля и диагностики бортового радиоэлектронного комплекса / А.П. Самойленко, С. А. Панычев, А. И. Панычев, О. А. Усенко, А. Г. Байбуз. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2020. – 204 с.

Поступила в редколлегию 30.04.2020 г.