

На рис. 3 изображены графики изменения толщины полосы на выходе из третьей клетки. Кривая 1 – это реальные данные, полученные с помощью программы *IbaAnalyzer* и экспортированные в среду *Simulink*. Кривая 3 – это результат работы имитационной модели. Кривые 2 и 4 – это изменение задания толщины полосы на выходе из третьей клетки. При сравнении графиков можно заметить, что кривые 1 и 3 почти полностью идентичны. Величина отклонения толщины полосы между двумя кривыми находится в рамках $\pm 0,06$ мм, что составляет порядок ± 6 %.

На рис. 4 изображены графики изменения межклетевого натяжения между второй и третьей клетями. Кривая 1 – это реальные данные, полученные с помощью программы *IbaAnalyzer* и экспортированные в среду *Simulink*, кривая 2 – это результат работы имитационной модели. При сравнении графиков можно заметить, что кривые 1 и 2 почти полностью идентичны. Величина отклонения межклетевого натяжения полосы между двумя кривыми находится в рамках $\pm 0,03$ МПа, что составляет порядок ± 8 %.

Выводы:

1. Разработаны математическая и имитационная модели стана непрерывной холодной прокатки в режиме прохождения сварного соединения.
2. Разработан алгоритм пересчета коэффициентов входных параметров матричного уравнения (1),

учитывающий факт, что процесс прохождения сварного шва обусловлен изменением основных технологических параметров прокатки.

3. Результаты моделирования на основе порядка сорока наборов экспериментальных данных подтверждают адекватность модели при сравнении с экспериментальными данными на стане 1700 ОАО «Северсталь» (с отклонением между собой в среднем не более 5 – 8 % по параметру толщины и не более 6 – 8 % по параметру межклетевого натяжения).

Литература

1. Дружинин, Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации / Н.Н. Дружинин. – М., 1975.
2. Кожевников, А.В. Имитационная модель механической части двух смежных клетей непрерывного стана холодной прокатки / А.В. Кожевников, С.В. Белкова // Сталь. – 2012. – № 5. – С. 55 – 59.
3. Huiming, G. Modeling and simulation of finishing mill group of hot strip mill / Gao Huiming, Zeng Jianchao // Journal of System Simulation. – 2000. – № 12(1). – P. 51 – 53.
4. Imsek, B.H. Dynamic Simulation of Dual-Continuous Strip Processing Operations / B.H. Imsek // Iron and Steel Engineer. – 1997. – № 6.
5. Yingjie, G. Dynamic simulation of hydraulic AGC system in a strip mill / Gao Yingjie, Wang Yiqun, Kong Xiangdong // China Mechanical Engineering. – 1998. – № 9(7). – P. 23 – 26.

К 681.324

Е.В. Кнуга, И.О. Жаринов

СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫХ МНОГОМОДУЛЬНЫХ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Приводится анализ существующих принципов и алгоритмов организации тестирования мультипроцессорных многомодульных бортовых цифровых вычислительных систем, предлагается новый алгоритм тестирования мультипроцессора, соответствующий стандартам проектирования программного обеспечения для изделий интегрированной модульной авионики. Рассматривается структура унифицированного автоматизированного рабочего места для проверки функциональных модулей интегрированной модульной авионики.

Тестирование, вычислительные системы, интегрированная модульная авионика.

The article presents the analysis of existing principles and algorithms of test organization of multimodule multiprocessor onboard digital computing systems and a new testing algorithm of multiprocessor conforming to design standards of software for integrated modular avionics products. The authors consider the structure of the unified automated workplace for verification of functional modules of integrated modular avionics.

Testing, computing systems, integrated modular avionics.

Введение. Современные бортовые цифровые вычислительные системы (БЦВС) представляют собой сложные технические объекты, относящиеся по системе Флинна к классу мультипроцессорных систем с множественным потоком команд и множественным потоком данных и состоящие из набора конструктивно-функциональных модулей (КФМ), связанных между собой в единую локальную сеть. Для организации сетевых связей между КФМ используются

различные топологии сети, в частности [9] – [11]: «общая шина», «звезда», «двойная звезда», «полносвязная сеть» и др.

БЦВС выполняют в составе объекта — летательного аппарата (ЛА) — сложные функциональные задачи. Отказ БЦВС создает предпосылки к возникновению летного происшествия, поэтому необходимо осуществлять контроль работоспособности (тестирование) БЦВС во время полета на предмет выяв-

ления неисправностей и при отказе отдельного КФМ реконфигурировать БЦВС за счет реализованного в системе аппаратно-программного резервирования.

Согласно концепции интегрированной модульной авионики (ИМА) [6], [8], [12], [16], каждый КФМ в составе БЦВС содержит вычислительный узел поддержки модуля (УПМ), одной из функций которого является управление и контроль состояния исправности модуля. УПМ обеспечивает управление встроенными средствами проверки, регистрацию состояния исправности, формирование и сохранение контекста параметров диагностики, системное управление средствами резервирования для парирования выявляемых неисправностей.

Каждый КФМ в составе интегрированной БЦВС содержит аппаратные и программные ресурсы [4], [5], [13] для обеспечения заданного в техническом задании уровня обнаружения неисправностей. В настоящее время в практике авиационного приборостроения приняты три вида тестового контроля БЦВС:

1) тест начального включения электропитания, который проводится в начале работы каждого КФМ (при подаче напряжения питания);

2) непрерывный тест, который проводится в фоновом режиме работы во время функционирования каждого КФМ и БЦВС в целом;

3) инициированный тест, который проводится при получении внешней команды от другого объекта (другой КФМ из состава БЦВС при перекрестной проверке единой вычислительной системы, оператор при проверке БЦВС на заводе-изготовителе, технический персонал при обслуживании ЛА), при этом выполнение бортовой задачи прерывается, выполняется подпрограмма тестирования, и затем КФМ возвращается к выполнению бортовой задачи.

В БЦВС распространено два вида контроля: последовательный и параллельный. Последовательный контроль осуществляется следующим образом. Сначала проводится тестирование всех узлов одного модуля: центрального процессора (ЦП), оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), постоянного запоминающего устройства (ПЗУ), разовых команд (РК), каналов ввода / вывода (КВВ). Затем, когда первый модуль протестирован, запускается тестирование следующего модуля и так далее, пока не будут протестированы все модули, входящие в состав БЦВС. Параллельный контроль значительно сокращает время проверки БЦВС, так как тестирование проводится одновременно для всех КФМ.

Целью настоящей работы является определение принципов организации параллельного непрерывного контроля мультипроцессорных многомодульных БЦВС с использованием специально разработанного авторами алгоритма тестирования, придающего БЦВС повышенные значения показателей надежности, а также определение структуры автоматизированного рабочего места для проведения тестирования аппаратуры класса ИМА в процессе производства.

Организация последовательного и параллельного контроля функциональных узлов КФМ

На современном этапе развития авиационного оборудования усложнение задач, выполняемых БЦВС, введение новых структурных и схемотехнических решений привело к появлению различных подходов к организации тестирования БЦВС. При усложнении процедур тестового контроля используемые сегодня схемы проверки БЦВС не удовлетворяют принципам построения перспективных БЦВС [1] – [3], [7], [14], [17], [18]:

– реализация в вычислителе последовательной схемы проверки оказывается ресурсоемкой и неподходящей для устройств, работающих в реальном масштабе времени, по критерию минимизации директивного времени исполнения бортовой задачи;

– реализация в вычислителе параллельной схемы проверки осуществляется одновременно для всех КФМ, однако внутренние узлы модуля проверяются по-прежнему по последовательной схеме.

Алгоритм цикла тестирования для последовательной схемы проверки и для параллельной схемы проверки мультипроцессорной многомодульной БЦВС, в составе которой используются четыре вычислительных модуля (МВ), представлен на рис. 1а, б соответственно.

Как следует из анализа рис. 1, тест КФМ состоит из процедур выполнения «подтестов» отдельных узлов модуля. Для каждого из узлов выполняются специализированные тесты [15]:

– для проверки процессора используют тест команд и тест прерываний. Тест команд проверяет правильность выполнения каждой команды из состава системы команд микропроцессора, при этом используются все виды адресации. Тест прерываний проверяет правильность работы микропроцессора со стеком, правильность реакции на возможные виды прерываний, поддерживаемые системой, в том числе – на «аварийные» прерывания (т.н. исключения), например, при обращении по несуществующему физическому адресу абонента на шине;

– для проверки ПЗУ используют подпрограмму подсчета контрольной суммы и ее сравнения с заданным значением. ПЗУ может проверяться целиком или по секторам, соответственно, значение контрольной суммы может быть одно или несколько, по числу проверяемых секторов. При этом во время штатного функционирования КФМ ячейки памяти ПЗУ этого КФМ не модифицируются;

– для проверки ОЗУ в каждую ячейку заносится определенный код (тест «бегущей единицы» или «бегущего нуля»), который считывается из той же ячейки памяти и сравнивается с записанным ранее. Отдельно проводится тест адресов. Во время нормального функционирования модуля тестирование может проводиться только той части ОЗУ, которая не задействована для решения бортовой задачи;

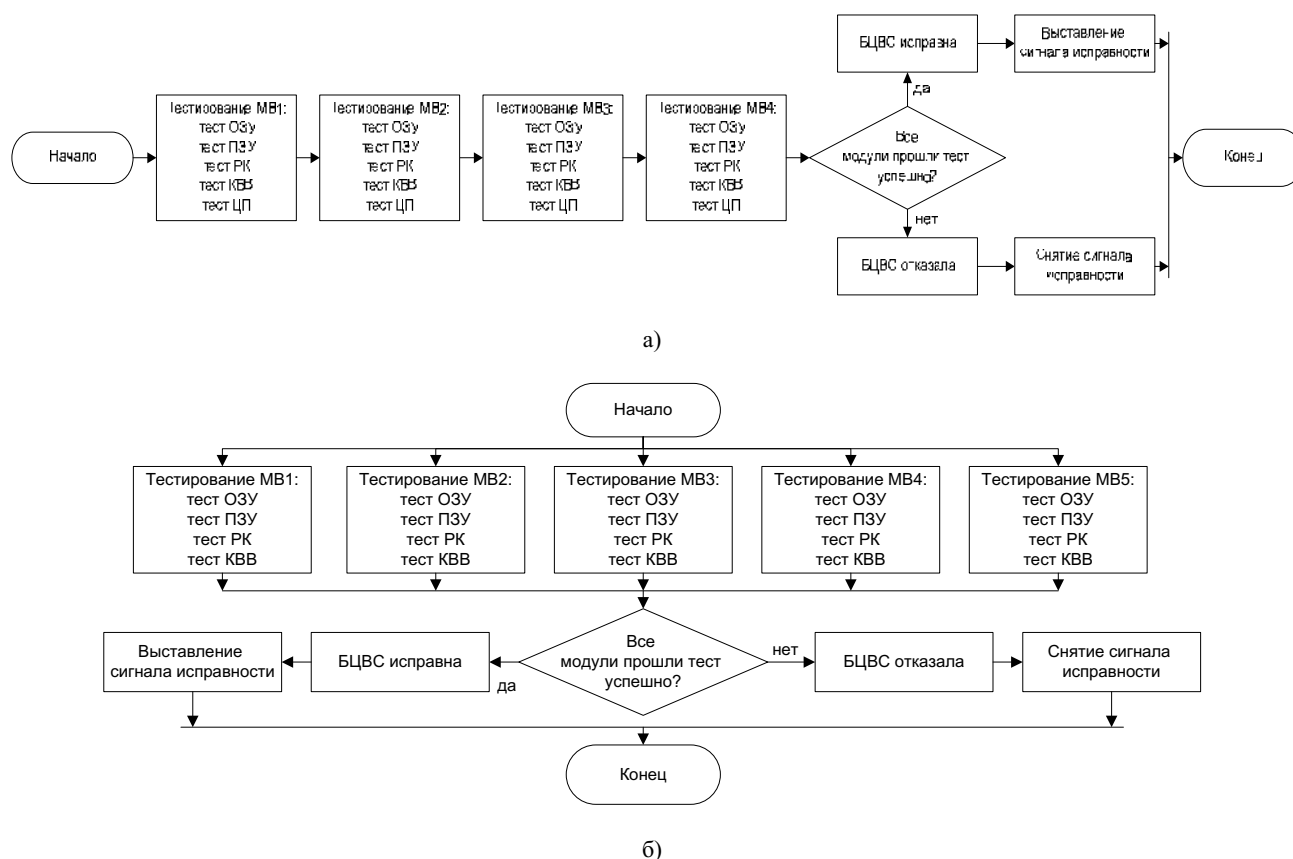


Рис. 1. Алгоритм цикла тестирования мультипроцессорной многомодульной БЦВС:
а) при реализации последовательной схемы проверки; б) при реализации параллельной схемы проверки

– для проверки КВВ необходимо обеспечить коммутацию однотипных входных и выходных приемопередатчиков модуля с целью передачи и приема тестовой кодовой посылки. В такой схеме проверки с петлевой обратной связью реализуется проверка всего приемопередающего тракта модуля. Во время штатного функционирования модуля тестирование КВВ может осуществляться только с использованием межмашинного ресурса с передачей по межмашинным каналам связи тестовых кодовых посылок, использованием битов четности кода и др.

2. Алгоритм выявления отказавших компонентов функциональных модулей

Для наглядности рассматривается упрощенное схематическое решение БЦВС, подробно описанное в [9], [11], [12]. Структура БЦВС основана на комбинационной схеме сетевых топологий «полно-связная сеть» и «двойная звезда»: БЦВС разделена на две подсистемы, состоящих из модуля постоянной памяти (МПП) и 4 функциональных модулей (ФМ). Структурная схема одной подсистемы БЦВС представлена на рис. 2.

Каждый КФМ имеет коммутацию с остальными модулями БЦВС по отдельной линии связи, что позволяет отказаться от проведения внутреннего контроля каждого модуля и организовать инициирование внешнего функционального контроля. Внешний функциональный контроль повышает уровень пол-

ноты контроля за счет использования различных участков памяти, каналов ввода / вывода, сетевого интерфейса. При этом для организации внешнего контроля схема проверки, состоящая из одного модуля,

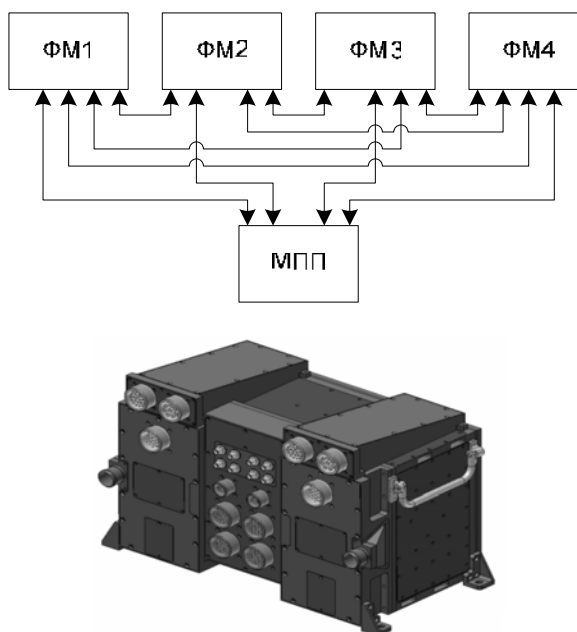


Рис. 2 Упрощенная структурная схема БЦВС
(на примере одной подсистемы) и фото БЦВС класса ИМА

тестирующего соседний модуль, оказывается недостаточный. Необходимо, чтобы каждый модуль проходил три фазы проверки от разных модулей одной подсистемы БЦВС. Затем результат тестирования определяется по схеме мажорирования результатов тестирования КФМ во всех трех фазах проверки.

Таким образом, каждый КФМ инициирует тестирование по определенному параметру для трех других модулей подсистемы. Следует заметить, что все три фазы тестирования основаны на выполнении функциональной задачи, исполняемой в полете этим КФМ. Три ФМ передают проверяемому КФМ разные данные, которые модуль обрабатывает, получает результат для каждого из предъявленных тестов и передает результат обратно тому модулю, который инициировал тест. Алгоритм прохождения такого контроля одним ФМ представлен на рис. 3 и представляет собой реализацию следующих процедур:

1. Первый сторонний ФМ (например, ФМ2) инициирует функциональный тест для проверяемого модуля ФМ1. ФМ1 выполняет данный тест, формирует результат и передает его модулю ФМ2.

2. ФМ1 инициирует функциональный тест для ФМ2. ФМ2 выполняет тест и передает результат в ФМ1. ФМ1 сравнивает полученный ФМ2 результат с эталонным результатом, содержащимся в памяти модуля ФМ1. Затем ФМ1 передает модулю-арбитру результат прохождения ФМ2 тестового контроля: если эталонный результат совпадает с полученным от ФМ2 результатом, значит ФМ2 исправен и может продолжать выполнять бортовую задачу, если не совпадает – модуль ФМ2 неисправен.

3. Следующий сторонний ФМ (например, ФМ3) инициирует функциональный тест для ФМ1. ФМ1 выполняет тест, формирует результат и передает его модулю ФМ3.

4. ФМ1 инициирует функциональный тест для ФМ3, получает от него результат, сравнивает результат с эталонным значением и передает модулю-арбитру результат прохождения теста для ФМ3: исправен или не исправен ФМ3.

5. Следующий сторонний ФМ (в данном случае ФМ4) инициирует функциональный тест для ФМ1. ФМ1 выполняет данный тест, формирует результат и передает его модулю ФМ4.

6. ФМ1 инициирует функциональный тест для ФМ4, получает от него результат, сравнивает его с эталонным значением и передает модулю-арбитру результат прохождения ФМ4 теста: исправен или не исправен ФМ4.

Параллельно с этим при получении сторонними модулями, которые инициировали тест для ФМ1, т.е. ФМ2, ФМ3 и ФМ4, результатов от ФМ1 эти модули сравнивают полученный результат с эталонным, который находится в их ячейках памяти и направляют результат — исправен или неисправен модуль ФМ1 модулю-арбитру. На рис. 3 представлен алгоритм тестирования только для одного модуля, остальные модули проходят тестирование аналогичным образом, в том числе и модуль-арбитр.

Таким образом, все ФМ в одной подсистеме

БЦВС проходят по три фазы тестирования, инициированные разными сторонними модулями одной подсистемы, и инициируют тестирование трех других ФМ.

После того, как модуль-арбитр, роль которого в представленной схеме (рис. 2) выполняет МПП, получает все результаты прохождения всеми ФМ тестов, МПП анализирует эти результаты и, либо формирует интегральный сигнал исправности БЦВС, либо (при обнаружении отказавшего модуля) запускает процедуру реконфигурации вычислительной системы.

Алгоритм анализа модулем-арбитром результатов выполнения тестов для одного функционального модуля представлен на рис. 4. Арбитр анализирует данные тестов от трех модулей, инициирующих тест для одного функционального модуля, и если от двух из них была получена информация о несовпадении контрольных значений выполнения тестов, модуль считается отказавшим. Результаты тестирования для остальных функциональных модулей анализируются по аналогичной схеме.

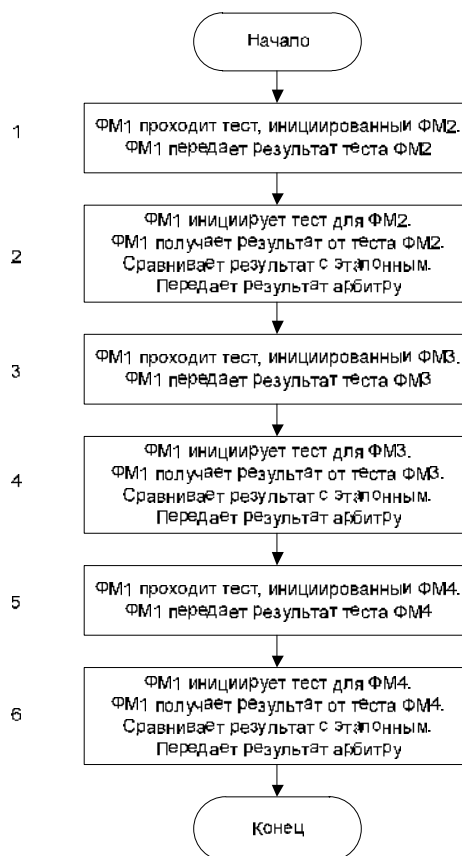


Рис. 3. Алгоритм работы функционального модуля в режиме тестового контроля (пример тестирования для одного ФМ)

3. Автоматизированное рабочее место проверки КФМ

В процессе производства вычислительных модулей изготовители сталкиваются с проблемой контроля качества выпускаемой продукции. Традиционно

контроль качества продукции на авиаприборостроительном предприятии осуществляется посредством проверки каждого изготовленного изделия в составе автоматизированного рабочего места (АРМ).

АРМ должно обеспечивать:

- имитацию процессов информационного обмена по интерфейсам SpaceWire для всех типов модулей по последовательным каналам (ПК) связи, разовым командам (РК), мультиплексному каналу информа-

ционного обмена (МКИО) для модулей ввода / вывода, по интерфейсу Fibre Channel для модуля графического и модуля-коммутатора;

- контроль процесса тестирования;
- загрузку программного обеспечения, тестирование и ведение файлов отчета по результатам выполнения тестов каждого модуля.

Структура АРМ представлена на рис. 5.

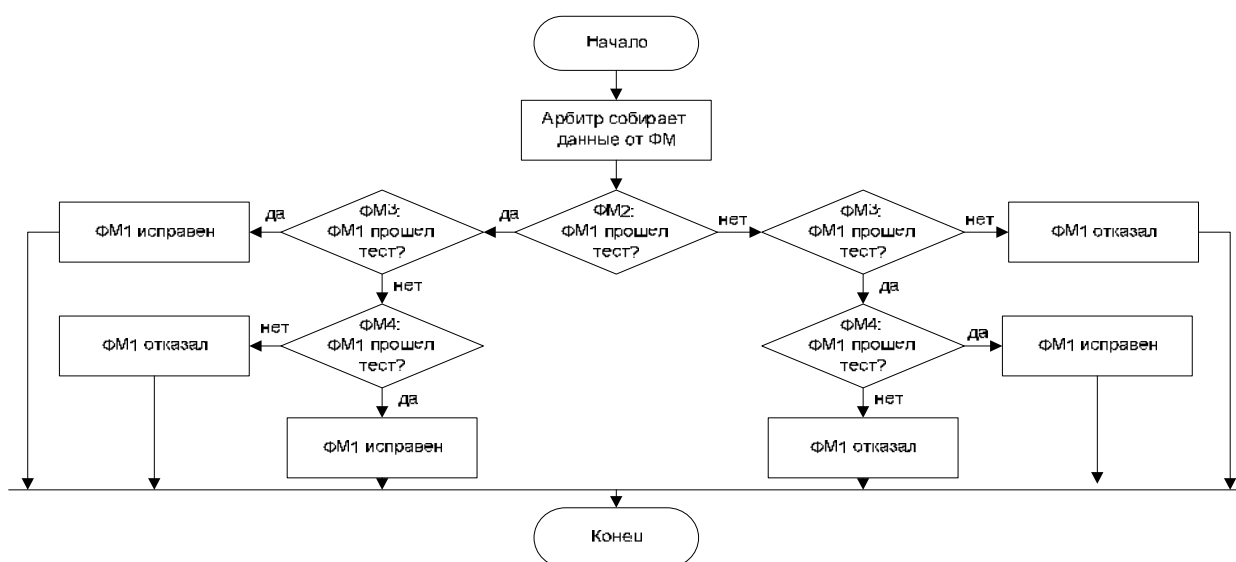


Рис. 4. Алгоритм анализа результатов тестирования для одного функционального модуля модулем-арбитром

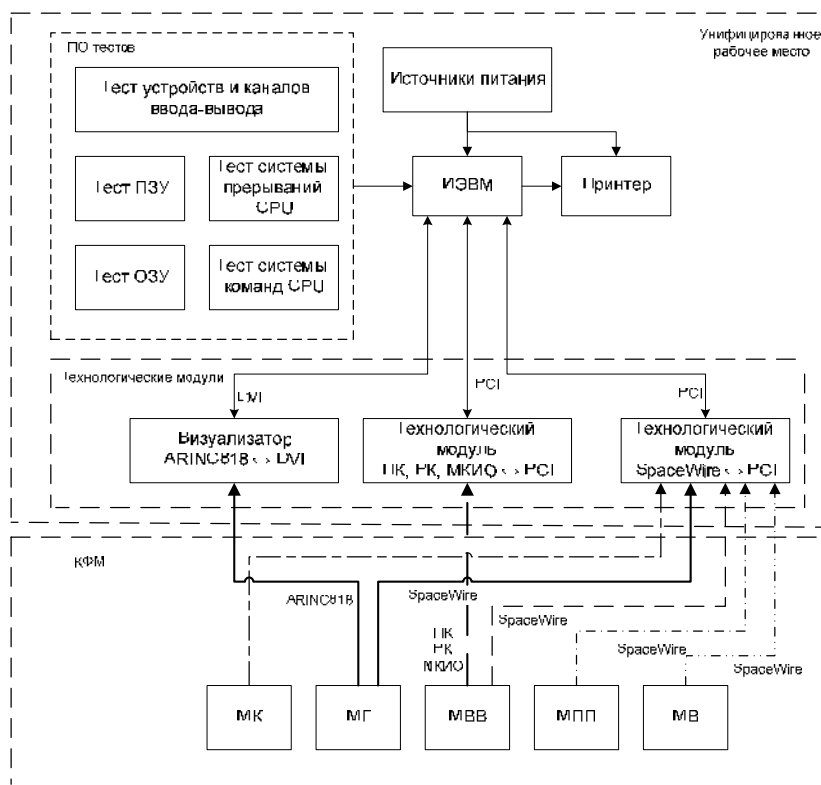


Рис. 5. Структурная схема унифицированного автоматизированного рабочего места для проверки модулей класса ИМА (DVI – Digital Visual Interface)

АРМ содержит:

- инструментальную электронно-вычислительную машину (ИЭВМ), обеспечивающую установку инструментальных и программных средств;
- технологическое оборудование (технологические модули, обеспечивающие сопряжение интерфейсов КФМ и интерфейсов ИЭВМ, комплект соединительных жгутов для соединения рамы с установленным КФМ с технологическим оборудованием и источником питания);
- программное обеспечение для тестирования каждого модуля, принтер для вывода на печать результатов тестирования;
- источник питания для подачи напряжения питания на КФМ;
- комплект эксплуатационной документации, содержащий инструкции для проверки и загрузки тестового программного обеспечения.

В унифицированном рабочем месте используются компоненты технологического оборудования, специфичные по отношению к типу тестируемого модуля. Для модуля вычислительного (МВ) и модуля коммутатора (МК) требуется только технологический модуль, обеспечивающий сопряжение шины PCI ИЭВМ и интерфейса SpaceWire. Для модуля ввода / вывода (МВВ) дополнительно необходим технологический модуль для сопряжения каналов ПК, РК и МКИО с интерфейсом ИЭВМ. Для графического модуля (МГ) необходим технологический модуль для сопряжения линии связи SpaceWire и шины PCI, а также визуализатор для сопряжения интерфейса Fibre Channel и DVI. Визуализатор подключается непосредственно к монитору с выходом на интерфейс DVI. Отличие в схемах связи модулей ИМА и технологического оборудования показаны на рис. 5 различными типами линий.

Тестирование на унифицированном АРМ начинается с подачи напряжения питания. Затем загружается ИЭВМ и запускается необходимое для тестирования модуля программное обеспечение. Во время тестирования модуля проверяются все его компоненты: ячейки памяти ОЗУ, ячейки памяти ПЗУ, система команд процессора, система прерываний процессора, узлы, устройства и каналы ввода / вывода. Все результаты тестирования выдаются на экран ИЭВМ, а также заносятся в специальный файл отчета.

Заключение

В процессе исследования были проанализированы существующие виды тестового контроля бортовых цифровых вычислительных систем. На сегодняшний день в большинстве практических приложений вычислительная система тестируется в фоновом режиме по параллельной схеме проверки путем внутреннего контроля конструктивно-функциональных модулей и по последовательной схеме проверки на заводе-изготовителе. Однако такой способ контроля не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к перспективным типам вычислителей, разрабатываемых в рамках концепции интегрированной

модульной авионики. Используемая схема тестирования при обнаружении отказа одного модуля формирует сигнал отказа (снимает сигнал исправности) всей вычислительной системы, что исключает возможность реконфигурации авиационного комплекса на внутрисистемном уровне.

Предложенные авторами принципы проверки бортовой цифровой вычислительной системы, включающие схемотехнические решения и алгоритм проверки, основаны на организации внешнего функционального контроля сторонними модулями одной подсистемы мультивычислителя, что повышает полноту и достоверность контроля и позволяет реализовать свойство реконфигурации вычислительной системы. Такой способ контроля реализован практически при использовании перспективной вычислительной системы «Крейт», разработанной и исследуемой в настоящее время в ФГУП «Санкт-Петербургское ОКБ «Электродвигатель».

Автоматизированные рабочие места проверки КФМ в концепции интегрированной модульной авионики должны обеспечивать высокий уровень контроля аппаратных компонентов модуля, модульное построение программного обеспечения с разделением тестирования каждого компонента, открытость архитектуры рабочего места. Основной особенностью предлагаемого унифицированного рабочего места является обеспечения возможности изменения объема контроля и сложности проверки внутренних узлов изделия на аппаратном и программном уровне с возможностью контроля изделий одного класса.

Литература

1. Богатырев, В.А. К распределению функциональных ресурсов в отказоустойчивых многомашинных вычислительных системах / В.А. Богатырев // Приборы и Системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 12. – С. 1 – 5.
2. Богатырев, В.А. Организация межмашинного обмена в дублированных вычислительных комплексах / В.А. Богатырев, И.Ю. Голубев, В.Ф. Безубов // Известия вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55. – № 3. – С. 8 – 13.
3. Видин, Б.В. Декомпозиционные методы в задачах распределения вычислительных ресурсов многомашинных комплексов бортовой авионики / Б.В. Видин, И.О. Жаринов, О.О. Жаринов // Информационно-управляющие системы. – 2010. – № 1. – С. 2 – 5.
4. Гатчин, И.Ю. Реализация жизненного цикла «проектирование-производство-эксплуатация» бортового оборудования на предприятиях авиационной промышленности / [И.Ю. Гатчин и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 2. – С. 141 – 143.
5. Гатчин, Ю.А. Модели и методы проектирования интегрированной модульной авионики / [И.Ю. Гатчин и др.] // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2010. – № 1. – С. 12 – 20.
6. Гатчин, Ю.А. Основы проектирования вычислительных систем интегрированной модульной авионики / Ю.А. Гатчин, И.О. Жаринов. – М., 2010.
7. Гатчин, Ю.А. Архитектура программного обеспечения автоматизированного рабочего места разработчика бортового авиационного оборудования / Ю.А. Гатчин, И.О.

Жаринов, О.О. Жаринов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 2. – С. 140 – 141.

8. Жаринов, О.О. Принципы построения крейта бортовой многопроцессорной вычислительной системы для авионики пятого поколения / О.О. Жаринов, Б.В. Видин, Р.А. Шек-Иовсепянц // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2010. – № 4. – С. 21 – 27.

9. Захарова, О.Л. Алгоритмы и программные средства тестирования бортовых цифровых вычислительных систем интегрированной модульной авионики / [О.Л. Захарова и др.] // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 3. – С. 19 – 29.

10. Книга, Е.В. Принципы построения комбинированной топологии сети для перспективных бортовых вычислительных систем / Е.В. Книга, И.О. Жаринов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 6. – С. 92 – 98.

11. Книга, Е.В. Классификация и структура конструктивно-функциональных модулей бортовых цифровых вычислительных систем интегрированной модульной авионики / Е.В. Книга, И.О. Жаринов // Сборник докладов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск, 2014. – Т. 2. – С. 189 – 190.

12. Книга, Е.В. Принципы организации архитектуры перспективных бортовых цифровых вычислительных систем в авионике / [Е.В. Книга и др.] // Научно-технический

вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2. – С. 163 – 165.

13. Копорский, Н.С. Организация вычислительного процесса в многомашинном бортовом вычислительном комплексе / Н.С. Копорский, Б.В. Видин, И.О. Жаринов // Известия вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – № 6. – С. 41 – 50.

14. Кузнецова, О.А. Оценка надежности структурно избыточных комплексов авионики с учетом среднего времени между восстановлениями при отказах / О.А. Кузнецова // Известия вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55. – № 3. – С. 65 – 69.

15. Кучерявый, А.А. Бортовые информационные системы: Курс лекций / А.А. Кучерявый. – Ульяновск, 2004.

16. Парамонов, П.П. Принципы построения отраслевой системы автоматизированного проектирования в авиационном приборостроении / П.П. Парамонов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 6. – С. 111 – 117.

17. Парамонов, П.П. Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении / П.П. Парамонов, И.О. Жаринов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2. – С. 1 – 17.

18. Сабо, Ю.И. Критерий подобия проектных решений требованиям технического задания в авионике / Ю.И. Сабо, И.О. Жаринов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2010. – № 3. – С. 57 – 63.