



# Инструментальная система построения расписания обмена данными по каналу с централизованным управлением

Руслан Смелянский, Валерий Костенко, Василий Балашов, Вадим Балаханов

В статье представлена инструментальная система, поддерживающая автоматическое построение расписаний обмена данными по каналу с централизованным управлением MIL STD-1553B. Приведён перечень требований к системе, описаны функциональность и технологический процесс её применения. Даны примеры практического применения системы в промышленности, в том числе при проектировании судовых бортовых систем.

## ВВЕДЕНИЕ

Большинство современных бортовых вычислительных систем реального времени (ВСПВ) являются распределёнными. В их состав входят датчики, органы управления, вычислительные узлы, хранилища данных и устройства вывода, соединённые коммуникационными каналами. В бортовых системах реального времени широко используется архитектура, основанная на каналах с централизованным управлением. Примерами каналов с централизованным управлением являются MIL STD-1553B (ГОСТ Р 52070-2003, МКИО) [1], STANAG 3910 [2], FC-AE-1553 [3].

Канал обеспечивает обмен данными между устройствами, присоединёнными к нему (далее – оконечные устройства). Обмен представляет собой последовательность передач прикладных и служебных данных между оконечными устройствами. Следуя принятой терминологии, каждую передачу будем называть работой. Время начала каждой работы определяет расписание, которое строят заранее и которое не меняется в ходе функционирования бортовой системы. Расписание выполняется контроллером, который является одним из оконечных устройств. Только контроллер канала может инициировать обмен данными; другие

оконечные устройства выполняют команды, отданные контроллером (схема ведущий – подчинённый), что гарантирует отсутствие коллизий.

На расписание накладываются технологические ограничения, которые определяются особенностями оборудования и системного программного обеспечения ВСПВ. Число работ, входящих в расписание обмена, для современных бортовых ВСПВ может достигать нескольких сотен.

На сегодня хорошо осознаны невозможность ручного построения расписания для современных ВСПВ и необходимость автоматизации построения расписания, которое бы включало все работы и удовлетворяло всем наложенным ограничениям. Существующие инструментальные системы для статического планирования вычислительных задач и/или обмена данными в бортовых системах реального времени [4, 5] не поддерживают ряд практически важных ограничений на расписание (примеры ограничений приводятся далее).

В данной статье представлена инструментальная система, поддерживающая автоматическое построение расписаний обмена данными по каналу с централизованным управлением MIL STD-1553B. Описаны требования к системе, функциональность, техно-

логический процесс использования и примеры её практического применения.

## ЦИКЛИЧЕСКАЯ СХЕМА ОБМЕНА ДАННЫМИ ПО КАНАЛУ С ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

### Структура рабочей нагрузки на канал и расписания обмена

Рабочая нагрузка на канал с централизованным управлением состоит из набора сообщений, каждое из которых необходимо периодически передавать по каналу. Для каждого сообщения известна его длительность и требуемая частота передачи. Одному сообщению может соответствовать несколько работ. Длительность *интервала планирования*  $l_{int}$ , для которого должно быть построено расписание, равна наименьшему общему кратному периодов сообщений (период является обратной величиной к частоте передачи). Количество работ в рамках интервала планирования, соответствующих сообщению, равняется отношению  $l_{int}$  к периоду сообщения.

В современных судовых и авиационных ВСПВ широко используется циклическая схема вычислений и обмена данными. При циклической схеме ин-

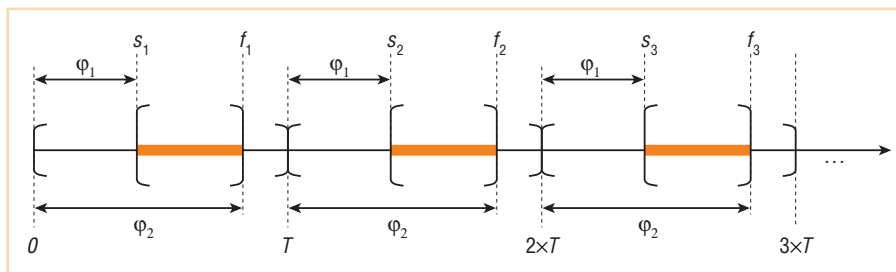


Рис. 1. Директивные интервалы работ

тервал планирования разбивается на отрезки одинаковой длины, называемые *подциклами*. В каждом подцикле может выполняться одна *цепочка работ* (цепочка работ является последовательностью работ, выполняемых друг за другом без пауз). В начале и в конце подцикла есть технологические зазоры – резервные интервалы, в которые не могут быть размещены работы. В предложенной терминологии расписание – это совокупность цепочек работ. В бортовой ВСПВ расписание выполняется циклически, с периодом, равным  $l_{инт}$ .

Для некоторых сообщений могут быть заданы фазовые сдвиги, которые сужают директивные интервалы соответствующих работ. Поясним, как директивные интервалы работ определяются по периоду и фазовым сдвигам сообщения. Пусть есть сообщение  $m$  с длительностью  $d$ , периодом  $T$  и фазовыми сдвигами  $\phi_1$  и  $\phi_2$ . Пусть  $v_1, v_2$  и  $v_3$  – первые три работы данного сообщения (общее число его работ равняется  $l_{инт}/T$ ). Характеристики этих работ вычисляются следующим образом ( $i = 1, 2, 3$ ):

- левая граница директивного интервала  $s_i = (i - 1) \times T + \phi_1$ ;
- правая граница директивного интервала  $f_i = (i - 1) \times T + \phi_2$ ;
- директивный интервал  $[s_i; f_i]$ ;
- длительность  $t_i = d$ .

На рис. 1 изображены директивные интервалы (толстые горизонтальные линии) для работ  $v_1, v_2$  и  $v_3$ . Каждая работа должна быть выполнена внутри своего директивного интервала.

Следует заметить, что набор *независимых работ* может быть смоделирован набором сообщений, каждое из которых имеет период  $l_{инт}$  и фазовые сдвиги, определяющие директивный интервал для единственной работы сообщения.

### Ограничения на корректность расписания

Корректное расписание обмена данными должно удовлетворять набору

ограничений, который включает в свой состав общие ограничения и ограничения, обусловленные технологическими требованиями к обмену данными.

1. Общие ограничения:
  - а) отсутствие коллизий (интервалы выполнения работ не должны пересекаться);
  - б) каждая работа должна выполняться внутри своего директивного интервала;
  - в) недопустимо прерывание работ.
2. Ограничения, обусловленные технологическими требованиями к обмену данными, например:
  - а) длительность подцикла;
  - б) резерв времени в начале подцикла;
  - в) резерв времени в конце подцикла;
  - г) сдвиг, на который можно сместить расписание вправо по временной оси без нарушения директивных сроков и других ограничений;
  - д) максимально допустимое число работ в цепочке;
  - е) ограничения на порядок работ в цепочке (например, работа по передаче сообщения  $m_2$  может быть размещена в цепочке только после работы по передаче сообщения  $m_1$ ).

Рис. 2 иллюстрирует ограничения 2а–2д. Конкретный набор технологических ограничений на корректность расписания определяется особенностями оборудования и системного программного обеспечения, используемого в целевой бортовой ВСПВ. Следовательно, важным требованием к алгоритму построения расписаний является возможность настройки на различные наборы ограничений.

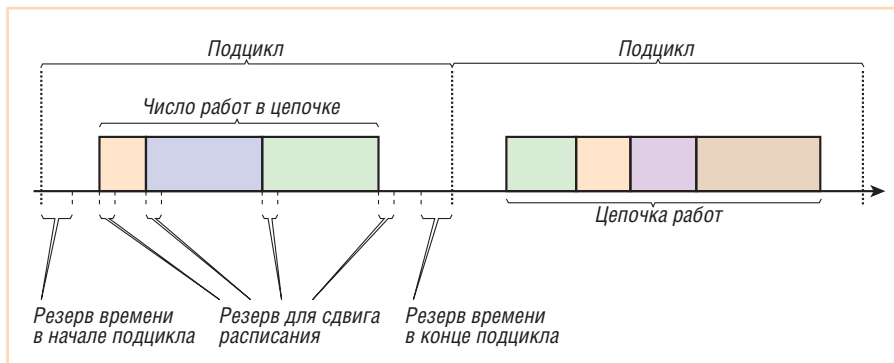


Рис. 2. Циклическая схема обмена данными

Перечисленные ограничения применяются к известным авторам бортовым ВСПВ, основанным на каналах MIL STD-1553В. Эти ограничения определяются не спецификой данного стандарта, а циклической схемой обмена данными и особенностями её реализации. Например, резерв времени в начале подцикла (см. ограничение 2б) необходим для того, чтобы перепрограммировать адаптер контроллера для выполнения следующей цепочки работ. Возможно применение этих ограничений в каналах с централизованным управлением:

- FC-AE-1553, разработанном для упрощения миграции с унаследованных систем на основе MIL STD-1553В с минимальными изменениями в логике обмена;
- STANAG 3910, в котором управляющая шина построена по стандарту MIL STD-1553В.

### СУЩЕСТВУЮЩИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ В БОРТОВЫХ ВСПВ

Существует ряд инструментальных систем [4–7], поддерживающих построение расписаний для бортовых ВСПВ. Оценим возможность применения этих систем для построения статического расписания обмена данными по каналу с централизованным управлением в рамках циклической схемы обмена данными с введёнными ограничениями на корректность расписания.

Инструментальная система [4] строит статические расписания выполнения вычислительных задач и обмена данными для систем, использующих концепцию Integrated Modular Avionics. В качестве целевой системы в [4] рассматриваются подсистемы бортовой ВСПВ самолёта Boeing 777. Эти подсистемы используют шину

Таблица 1

Применимость инструментальных систем для построения расписания обмена с учётом технологических ограничений

КРИТЕРИЙ	ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА (ИС)			
	ИС [4]	ИС [5]	RAPIDRMA	TIMEWIZ
Поддержка построения статических расписаний	+	+	-	-
Поддержка построения расписаний без прерывания работ	-	-	+	+
Поддержка циклической схемы обмена	-	-	-	-
Поддержка технологических ограничений на цепочки работ	-	-	-	-
Поддержка технологических ограничений на резервы времени в расписании	-	+	-	-

ARINC 659 для обмена данными между модулями. Расписание обмена данными подчинено расписанию выполнения вычислительных задач, которое строится в первую очередь. Алгоритм построения статического расписания обмена данными, описанный в [4], требует допустимости прерывания передачи сообщений (в то время как для каналов с централизованным управлением прерывание выполнения работ обычно недопустимо). Кроме того, этот алгоритм предполагает возможность начать передачу сообщения в любой момент времени (тем самым никакие сложные ограничения на корректность расписания не поддерживаются). Важной особенностью рассматриваемой в [4] инструментальной системы является возможность расширения подсистемы планирования посредством программных модулей, однако в статье не показано, что таким образом можно преодолеть фундаментальные ограничения алгоритма.

Инструментальная система [5] предназначена для статического планирования выполнения вычислительных задач. В данной системе ограничения на корректность расписания задают в процедурном виде. Существенными недостатками данной системы являются требование возможности прерывания задач и поддержка лишь ограничений на временные интервалы выполнения задач, при том что такие ограничения, как «не более одной цепочки работ в каждом подцикле», не относятся к этому виду ограничений.

Коммерческие программные инструменты проектирования систем реального времени, такие как RapidRMA [6] и TimeWiz [7], специализируются на анализе возможности динамического построения расписаний в VCPB и основываются на теории частотно-монотонного планирования [8], которая не учитывает введённые технологические ограничения на корректность расписания.

В табл. 1 приведены сводные результаты оценки применимости инструментальных систем [4–7] для статического построения расписания обмена с учётом описанных технологических ограничений на корректность расписания. Ни одна из этих систем «как есть» не подходит для решения данной задачи, причём общим недостатком систем является отсутствие поддержки циклической схемы обмена и технологических ограничений на расписание. Исходные коды рассмотренных инструментальных систем недоступны, а механизмы расширения программными модулями (в случае наличия таковых) не могут устранить базовые ограничения этих систем.

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЯ ОБМЕНА ДАННЫМИ

#### Схема процесса

Предлагаемый технологический процесс построения расписания обмена данными предполагает следующую последовательность действий/шагов:

- 1) создание проекта – наполнение базы данных информацией о структуре бортовой сети и характеристиках рабочей нагрузки на каналы передачи данных;
- 2) автоматическое построение расписания обмена данными, являющегося полным (включающим все работы) и корректным (удовлетворяющим всем ограничениям на корректность расписания);
- 3) при необходимости – ручная корректировка расписания;
- 4) в случае если нельзя построить полное и корректное расписание – автоматическая корректировка технологических ограничений таким образом, чтобы построение

- расписания с обновлёнными требованиями было возможным;
- 5) генерация программного кода, задающего расписание для устройств, присоединённых к каналу;
  - 6) генерация отчётов о входных данных (заданных на шаге 1) и построенных расписаниях для включения в документацию бортовой VCPB.

На рис. 3 показана диаграмма технологического процесса построения расписания обмена данными по отдельному каналу с централизованным управлением. Категориям данных соответствуют прямоугольники (с прерывистой границей – для входных данных, со сплошной – для выходных). Действиям соответствуют прямоугольники со скруглёнными углами и курсивной подписью. Шаг 1 технологического процесса на диаграмме не отражён.

#### Требования к инструментальной поддержке процесса

Для поддержки описанного технологического процесса инструментальная система построения расписания обмена данными должна:

- поддерживать выполнение всех шагов процесса;
- иметь модульную структуру, соответствующую шагам технологического процесса;
- обеспечивать хранение исходных данных и результатов каждого шага в базе данных;
- предоставлять графический интерфейс для взаимодействия с пользователем.

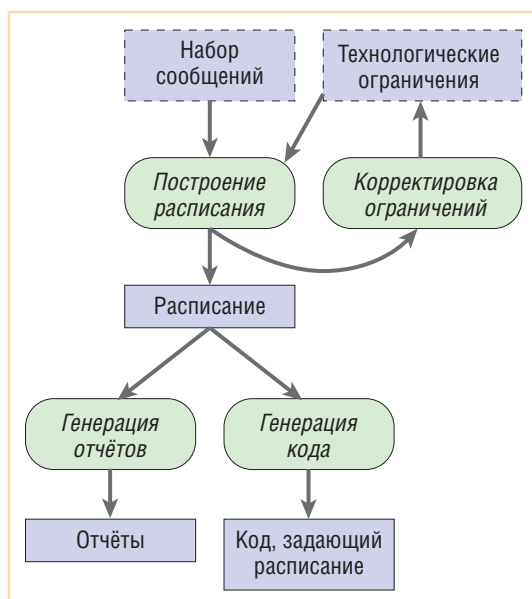


Рис. 3. Планирование обмена данными для отдельного канала

Для того чтобы инструментальная система построения расписания обмена данными была применима к разработке бортовых ВСПВ с различным оборудованием и программным обеспечением или к разработке различных подсистем сложной бортовой ВСПВ, эта система должна поддерживать настройку модулей в соответствии со спецификой целевого класса бортовых ВСПВ. В частности, необходима поддержка

- для учёта различных технологических ограничений на корректность расписания;
- настройки шаблона генерируемого программного кода;
- настройки шаблонов отчётов;
- построения расписаний для различных стандартов каналов с централизованным управлением [1–3].

Ни одна из рассмотренных ранее инструментальных систем не удовлетворяет всем перечисленным требованиям.

### ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЯ И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ

#### Инструментальная система построения расписания обмена данными

Коллективом Лаборатории вычислительных комплексов факультета вычислительной математики и кибернетики (ВМК) МГУ им. М.В. Ломоносова создана инструментальная система (ИС) «САПР циклограмм», удовлетворяющая требованиям, перечисленным в предыдущем разделе. ИС «САПР циклограмм» имеет модульную структуру (рис. 4), что позволяет путём локальных модификаций обеспечи-

- работу с различными схемами БД (на практике схема БД частично определяется требованиями организации заказчика);
- поддержку различных форматов генерируемого кода и формируемых отчётов;
- поддержку различных технологических ограничений на расписание обмена данными;
- настройку алгоритмов построения расписаний и алгоритмов корректировки технологических ограничений на специфику рабочей нагрузки на канал для конкретного класса ВСПВ.



Рис. 4. Структура инструментальной системы «САПР циклограмм»

ИС «САПР циклограмм» реализована на языке C++ с применением библиотеки графического интерфейса wxWidgets. В качестве СУБД поддерживается MySQL 5.x. ИС функционирует под управлением ОС Windows (XP и старше), а также Debian Linux. На рис. 5 и 6 приведены примеры экран-

ных окон пользовательского интерфейса ИС «САПР циклограмм».

В качестве алгоритмов построения расписания в ИС используются:

- жадные алгоритмы [9], обладающие высоким быстродействием, но требующие настройки на специфику рабочей нагрузки;
- муравьиные алгоритмы [10], автоматически настраивающиеся на специфику рабочей нагрузки, но обладающие более высокой вычислительной сложностью по сравнению с жадными алгоритмами.

Корректировка технологических ограничений на расписание выполняется алгоритмами, описанными в [11].

ИС «САПР циклограмм» поддерживает генерацию кода задания расписания для ОС РВ «Багет», применяемой в бортовых ВСПВ отечественной разработки. Генерация кода для других ОС РВ, поддерживающих выполнение статических расписаний обмена по каналу MIL STD-1553B (в частности, QNX и

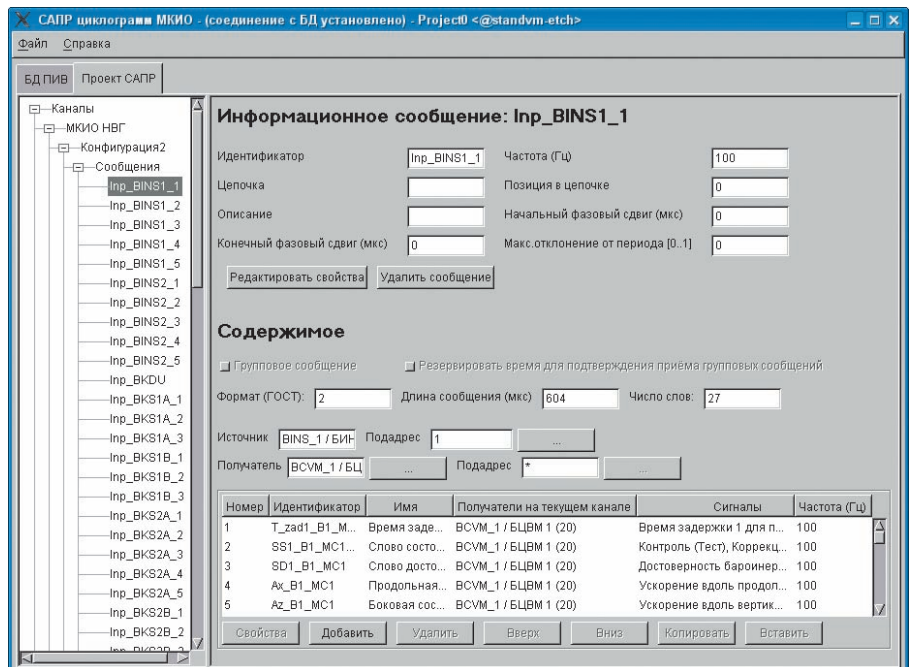


Рис. 5. Окно свойств сообщения ИС «САПР циклограмм»

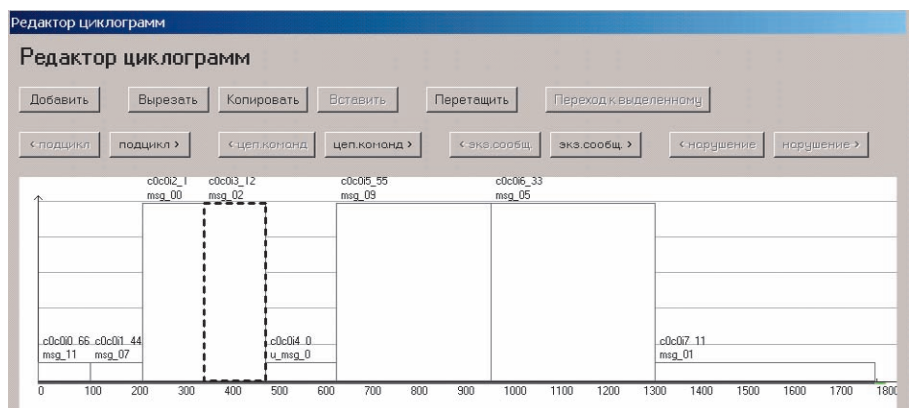


Рис. 6. Окно редактора расписаний ИС «САПР циклограмм»



VxWorks), обеспечивается за счёт настройки шаблона генерируемого кода. Шаблон ориентирован на табличную форму задания расписания. Для поддержки иной формы задания расписания (например, процедурной) достаточно внести в программный модуль генерации кода локальные модификации, не затрагивающие прочие модули ИС.

Расписания, построенные ИС «САПР циклограмм», совместимы с адаптерами MIL STD-1553B, поддерживающими выполнение цепочек работ. Такие адаптеры поставляются фирмами DDC, Condor Engineering, «Элкус» и предназначены для функционирования под управлением ОС PV QNX, VxWorks, а также ОС Linux с расширениями реального времени.

### Примеры применения инструментальной системы

В данном разделе описаны два примера промышленного применения ИС «САПР циклограмм».

#### Построение расписаний обмена данными для авиационных бортовых систем

С 2007 года ИС «САПР циклограмм» применяется для проектирования информационно-управляющих систем современных летательных аппаратов. ИС интегрирована в общий технологический процесс проектирования бортовой ВСПВ; она получает начальные данные из баз данных проекта заказчика и генерирует программный код, определяющий расписание, в требуемом формате. ИС «САПР циклограмм» на данный момент применена в двух разработках, в каждой из которых использовано несколько каналов MIL STD-1553B. Некоторые из этих каналов характеризуются высокой нагрузкой (более 60%) и разнообразием частот сообщений (6 и более), что делает построение расписания для них нетривиальной задачей.

ИС «САПР циклограмм» интегрирована со стендом испытаний бортовой ВСПВ [12], используемым для тестирования бортовых систем. При работе стенда обмен данными выполняется в соответствии с расписаниями, построенными ИС; необходимые данные загружаются в стенд из базы данных проекта. Стенд построен на базе промышленных ЭВМ FASTWEL/ДОЛОМАНТ с применением адапте-

ров MIL STD-1553B производства ЗАО «Элкус».

#### Построение расписаний обмена данными для судовых бортовых систем

ИС «САПР циклограмм» была адаптирована и использована для проектирования судовых бортовых ВСПВ. В ходе адаптации был расширен набор поддерживаемых технологических требований и добавлена поддержка нескольких форматов баз данных проекта.

Каждая из целевых бортовых ВСПВ содержит более восьми каналов MIL STD-1553B. В соответствии с иерархической организацией ВСПВ каналы имеют различные роли:

- центральный канал с наиболее сложной рабочей нагрузкой;
- периферийные каналы, соединяющие устройства в рамках подсистем;
- локальные каналы, соединяющие между собой основное и резервное устройства в паре с «горячим» резервированием.

С помощью системы ИС «САПР циклограмм» были успешно построены расписания для всех типов каналов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная в данной статье инструментальная система «САПР циклограмм» применяется для построения расписаний обмена данными по каналам стандарта MIL STD-1553B в авиационных и судовых бортовых ВСПВ. Применение ИС «САПР циклограмм» позволило автоматизировать решение задачи построения расписаний, а также формирование программного кода, задающего расписание, и отчётов для включения в документацию на ВСПВ.

В настоящее время коллективом разработчиков ИС «САПР циклограмм» ведутся работы по расширению применяемых в ИС алгоритмов

- для построения расписаний по перспективным бортовым каналам с централизованным управлением, в частности FC-AE-1553;
- построения совместных расписаний выполнения вычислительных задач и обмена данными. ●

### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 52070–2003. Интерфейс магистральной последовательной системы электронных модулей. — М.: Изд-во стандартов, 2003. — 23 с.
2. Guide to Digital Interface Standards for Military Avionic Applications: Technical report

ASSC/110/6/2-ISSUE 3. — Avionics Systems Standardization Committee (ASSC). — 2006. — 249 p.

3. Information technology — Fibre Channel — Part 312: Avionics environment upper layer protocol MIL-STD-1553B Notice 2 (FC-AE-1553): Technical Report TR 14165-312:2009. — International Organization for Standardization (ISO). — 2009. — 84 p.
4. Lee Y.-H., Kim D., Younis M., Zhou J. Scheduling tool and algorithm for integrated modular avionics systems // Proc. 19th Digital Avionics Systems Conference, October 2000. — Vol. 1. — Pp. 1C2/1–1C2/8.
5. Goltz H.-J., Pieth N. A Tool for Generating Partition Schedules of Multiprocessor Systems // Proc. 23rd Workshop on (Constraint) Logic Programming, September 2009. — Pp. 67–176.
6. Rapid RMA: The Art of Modeling Real-Time Systems [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.tripac.com/rapid-rma>.
7. Douglass B.P. Doing Hard Time: Developing Real-Time Systems with UML, Objects, Frameworks, and Patterns // Addison-Wesley, 1999.
8. Liu C. L., Layland J. W. Scheduling Algorithms for Multiprogramming in a Hard-Real-Time Environment // Journal of the ACM. — 1973. — Vol. 20. — No. 1. — Pp. 46–61.
9. Костенко В.А. Алгоритмы построения расписаний для одноприборных систем, входящих в состав систем реального времени // Методы и средства обработки информации: труды Третьей всероссийской научной конференции. — М.: Издательский отдел факультета ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова, 2009. — С. 245–258.
10. Balashov V.V., Balakhanov V.A., Kostenko V.A et al. A technology for scheduling of data exchange over bus with centralized control in onboard avionics systems // Proc. Institute of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. — 2010. — Vol. 224. — No. 9. — Pp. 993–1004.
11. Балашов В.В. Обеспечение совместности требований к расписанию обмена по каналу с централизованным управлением [текст]: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.11 / МГУ им. М.В. Ломоносова. — М., 2010. — 171 с.
12. Стенд полунатурного моделирования для разработки встроенных вычислительных систем реального времени / Балашов В.В., Бахмутов А.Г., Волканов Д.Ю. и др. // Труды Четвёртой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2009). — СПб.: ОАО «ЦТСС», 2009. — С. 215–220.

E-mail: breeze256@mail.ru