МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Глонина Алевтина Борисовна

Анализ конфигураций модульных вычислительных систем для проверки выполнения ограничений реального времени

Специальность 05.13.11 —
Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена на кафедре Автоматизации систем вычислительных комплексов факультета Вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: ***Балашов Василий Викторович,*** *кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник*

Официальные оппоненты: ***Петренко Александр Константинович****, доктор физико-математических наук, профессор, Институт системного программирования РАН, заведующий отделом Технологий программирования*

Колесов Николай Викторович*, доктор технических наук, профессор, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», главный научный сотрудник*

Фуругян Меран Габибуллаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, ведущий научный сотрудник*

Защита диссертации состоится «23» сентября 2021 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.01.19 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, 2-й учебный корпус, факультет ВМК, аудитория № 238.

E-mail: ilgova@cs.msu.su

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: https://istina.msu.ru/dissertations/364890262/

Автореферат разослан «____» _____ 202__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук А.С. Антонов

Общая характеристика работы

Актуальность. В настоящее время перспективной архитектурой информационно-управляющих систем (ИУС) реального времени является модульная архитектура[1]. Модульные вычислительные системы (МВС) применяются для управления летательными аппаратами, автомобилями, поездами, медицинскими аппаратами и иными сложными техническими системами. В данной работе МВС рассматриваются на примере систем интегрированной модульной авионики (ИМА)[2]. Рабочая нагрузка на систему ИМА обычно представлена набором задач, сгруппированных в разделы. Под разделом понимается группа прикладных задач, как правило соответствующих одному приложению, и взаимодействующих посредством общей памяти. Задачи выполняются периодически: один раз за период должен выполниться экземпляр задачи, называемый работой. Для МВС должны выполняться *ограничения реального времени*: все работы должны успеть выполниться в рамках заданных директивных интервалов, определяемых периодами задач. Информационный обмен между работами разных задач осуществляется посредством передачи сообщений. Между задачами, имеющими одинаковый период, могут существовать зависимости по данным: очередная работа задачи-получателя может быть поставлена на выполнение в рамках своего директивного интервала только после получения сообщений от всех соответствующих работ задач-отправителей.

Доступ разделов к ресурсам вычислителя осуществляется согласно статическому расписанию окон выполнения разделов. Окно — интервал времени, в течение которого могут выполняться работы одного заданного раздела. Расписание окон строится при проектировании МВС, с помощью внешних по отношению к МВС инструментальных средств. В рамках окон раздела выполнением работ управляет сопоставленный разделу динамический планировщик.

Под конфигурацией МВС понимается: количество и типы вычислителей; набор разделов, в т.ч. характеристики входящих в них прикладных задач (приоритеты, периоды и т.п.) и зависимости по данным между ними; привязка разделов к вычислителям; расписание окон разделов.

---

[1] Crespo A. et al. Mixed criticality in control systems // IFAC Proceedings Volumes — Elsevier Publ., 2014. — Vol. 47. — № 3. — P. 12261–12271.

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

В данной работе рассматривается задача проверки выполнения ограничений реального времени для МВС с заданной конфигурацией. Одним из широко используемых на практике методов проверки выполнения таких ограничений является построение и анализ временной диаграммы (ВД) функционирования этой МВС при длительностях выполнения работ прикладных задач и обменов данными, равных заданным верхним оценкам. ВД содержит интервалы выполнения работ. Получив такую ВД, можно непосредственно проверить соответствие интервалов выполнения работ ограничениям реального времени. Именно этот метод используется в данной работе.

ВД функционирования МВС с заданной конфигурацией может быть построена посредством прогона имитационной модели функционирования такой МВС.

В современных летательных аппаратах на смену федеративной архитектуре ИУС пришла модульная архитектура. При проектировании МВС возникает задача проверки выполнения ограничений реального времени для конфигураций таких систем. В частности, такая задача возникает при инкрементальной разработке программного обеспечения МВС — требуется проверить, что при изменении рабочей нагрузки (добавлены новые задачи, поменялись длительности выполнения задач и/или передачи сообщений) можно использовать ранее построенное расписание окон и не требуется формировать его заново.

Степень разработанности темы. Решению задач, возникающих при проектировании ИУС реального времени, посвящен ряд работ отечественных и зарубежных исследователей. В область моделирования, верификации и выбора конфигураций таких систем (в т.ч. решения задач планирования) значительный вклад внесли работы Н. П. Бусленко, В. М. Глушкова, В. Е. Котова, В. В. Воеводина, Р. Л. Смелянского, Э. Г. Коффмана, Б. Г. Сушкова, М. Г. Фуругяна, Н. В. Колесова, В. А. Костенко, Ю. Г. Карпова, В. А. Захарова, А. К. Петренко, И. А. Ломазовой, R. Milner, C. A. R. Hoare, J. Bergstra, T. Henzinger, R. Alur и D. Dill, P. Dissaux и F. Singhoff, E. André, K. Larsen, E. Clarke, C. L. Liu и J. Layland, N. Audsley и A. Burns, и др. Разработка МВС для конкретных бортов выполняется коллективами следующих организаций: Корпорация «Иркут», Компания «Сухой», ГосНИИАС, НПП «Полет», Airbus, Boeing и др. Операционные системы для МВС разрабатываются коллективами ГосНИИАС совместно с ИСП РАН, Компании «Сухой», ИТМиВТ совместно с «СВД—Встраиваемые системы», НИИСИ РАН, РПКБ, ОКБ «Электроавтоматика».

Существует несколько подходов к решению задачи проверки выполнения ограничений реального времени для МВС с заданной конфигурацией.

Известен ряд методов, основанных на методе анализа времени отклика (RTA — Response Time Analysis). Для МВС был разработан ряд модификаций этого метода. Однако, все известные автору модификации не учитывают того, что в разных разделах системы ИМА могут использоваться различные алгоритмы планирования. В то же время эта возможность реализована в таких операционных системах для систем ИМА, как VxWorks 653 и Багет 3. Кроме того, многие модификации метода RTA не учитывают наличие зависимостей по данным, либо учитывают лишь частично.

Другим подходом к проверке выполнения ограничений реального времени для МВС с заданной конфигурацией является построение модели системы и ее формальная верификация. Этот подход позволяет учесть все аспекты функционирования МВС, однако он не применим для систем большой размерности, так как его вычислительная сложность экспоненциально зависит от количества прикладных задач в системе.

Еще одним методом проверки выполнения ограничений реального времени для МВС с заданной конфигурацией является построение ВД функционирования этой МВС при длительностях выполнения прикладных задач и обменов данными, равных соответствующим заданным верхним оценкам. ВД должна содержать интервалы выполнения работ прикладных задач. Получив такую ВД, можно непосредственно проверить выполнение ограничений реального времени. Этот метод проверки ограничений реального времени широко применяется при решении ряда задач проектирования МВС[3,4], и именно он рассматривается в данной работе.

ВД функционирования МВС с заданной конфигурацией может быть построена посредством прогона имитационной модели функционирования этой МВС. При построении такой модели ее корректность (то есть соответствие поведения модели поведению целевой МВС) должна быть доказана математически.

---

[3] Smeliansky R. L., Bakhmurov A. G., Kapitonova A. P. Dyana: An evironment for embedded system design and analysis // Proceedings of the 32nd Annual Simulation Symposium — San Diego, California, USA, 1999. — P. 50–57.

[4] Balashov V. V., Balakhanov V. A., Kostenko V. A. Scheduling of Computational Tasks in Switched Network-Based IMA Systems // International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization. — National Technical University of Athens (NTUA) Athens, Greece, 2014. — P. 1001–1014.

Согласно современным принципам разработки программного обеспечения, модель должна иметь модульную структуру (по аналогии с целевой системой), то есть формироваться из моделей типовых компонентов МВС с возможностью включения в свой состав пользовательских моделей компонентов МВС. В результате анализа представленных в открытом доступе средств моделирования вычислительных систем не было найдено средства, в полной мере удовлетворяющего всем сформулированным требованиям. Поэтому было принято решение о разработке новых методов и средств решения поставленной задачи.

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является разработка методов и средств проверки выполнения ограничений реального времени для МВС с заданной конфигурацией.

Для достижения поставленной цели были выделены следующие задачи:

- Провести обзор задач, возникающих при проектировании МВС и требующих проверки выполнения ограничений реального времени для конфигураций МВС; сформулировать требования к методам и средствам такой проверки, а также математическому аппарату в их основе.
- Выбрать математический аппарат для описания функционирования МВС и расширить его в соответствии со сформулированными требованиями.
- Построить обобщенную модель функционирования МВС, абстрагированную от структуры МВС и используемых в разделах алгоритмов планирования.
- Доказать корректность построенной обобщенной модели.
- Предложить метод, конкретизирующий обобщенную модель для МВС с заданной конфигурацией и позволяющий при помощи полученной модели проверить выполнение ограничений реального времени для этой конфигурации МВС (с учетом конкретных алгоритмов планирования, используемых в разделах).
- Разработать инструментальную систему, реализующую предложенный метод, и выполнить экспериментальное исследование разработанного метода на данных, соответствующих реальным МВС.

Объектом исследования являются МВС и их конфигурации. **Предметом исследования** — методы проверки выполнения ограничений реального времени для МВС с заданной конфигурацией.

Научная новизна и теоретическая ценность. В данной работе используемый при моделировании функционирования МВС математический аппарат сетей временных автоматов с остановкой таймеров расширен для абстрагирования от систем переходов автоматов. Это позволило разработать обобщенную модель функционирования МВС, абстрагированную от структуры МВС и используемых в МВС алгоритмов планирования, и доказать ее корректность. Разработан метод проверки выполнения ограничений реального времени для заданной конфигурации МВС, основанный на конкретизации обобщенной модели МВС для заданной конфигурации МВС. Предложен и успешно применен подход к доказательству корректности обобщенной модели функционирования МВС. Результаты данной работы могут быть применены в качестве базы для построения и проверки корректности моделей функционирования вычислительных систем других классов (например, сочетающих элементы федеративной и модульной архитектур).

Практическая ценность работы обусловлена тем, что разработана инструментальная система с открытым исходным кодом[5], позволяющая получать ВД функционирования МВС с заданной конфигурацией и проверять выполнение ограничений реального времени для этой конфигурации МВС. Инструментальная система может быть использована как совместно с системами автоматизированного проектирования МВС, так и самостоятельно.

Методы исследования. При получении основных результатов диссертации использовались методы теории автоматов, формальной верификации моделей (Model Checking), математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обобщенная модель функционирования МВС, абстрагированная от структуры МВС и используемых в МВС алгоритмов планирования. Модель базируется на аппарате сетей временных автоматов с остановкой таймеров, расширенном в работе для абстрагирования от систем переходов автоматов. Доказана корректность обобщенной модели функционирования МВС.
2. Метод проверки выполнения ограничений реального времени для заданной конфигурации МВС. Метод конкретизирует обобщенную модель функционирования МВС для заданной конфигурации и использует

[5]https://github.com/AlevtinaGlonina/MCSSim

полученную модель при построении временной диаграммы функционирования МВС.

3. Инструментальная система проверки выполнения ограничений реального времени для конфигураций МВС, разработанная на основе предложенного метода. Экспериментальное исследование подтвердило применимость разработанного метода для анализа конфигураций МВС реальной размерности.

Апробация. Результаты, представленные в работе, докладывались на научных семинарах кафедры Автоматизации систем вычислительных комплексов факультета ВМК МГУ под руководством чл.-корр. РАН профессора Р.Л. Смелянского, а также на 8 конференциях:

1. Международной конференции «Ломоносов 2015»;
2. Всероссийской конференции «Ломоносовские чтения 2016»;
3. Международной конференции «ORM 2016»;
4. Всероссийской конференции «Ломоносовские чтения 2017»;
5. Международной конференции «РАСТ 2017»;
6. Международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России 2017»;
7. Всероссийской конференции «Ломоносовские чтения 2018»;
8. Всероссийской конференции «Тихоновские чтения 2019».

Достоверность представленных результатов обеспечивается математическими доказательствами корректности формируемых моделей. Также для всех проанализированных в экспериментальном исследовании конфигураций МВС временные диаграммы, полученные с помощью этих моделей, совпали с временными диаграммами, полученными с помощью встроенной в САПР «Планировщик ИМА»[6] модели.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 14 печатных изданиях [1–5, 7–15]. 5 публикаций [1–5] изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 3 из них [1–3] изданы в журналах, индексируемых Scopus / Web of Science / RSCI. Инструментальная система проверки выполнения ограничений реального времени для конфигураций МВС была зарегистрирована в установленном законодательством порядке [6].

---

[6]Система автоматизированного проектирования «Планировщик задач интегрированной модульной авионики боевых комплексов» / Балаханов В. А. и др. ФИПС. Св. о рег. программы для ЭВМ № 2017611547 от 06.02.2017. Правообладатель — ПАО «Компания «Сухой».

Личный вклад автора. Подготовка части материалов к публикации проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Вклад соавторов публикаций заключается в следующем. В работе [2] вклад Балашова В. В. заключается в постановке задачи обоснования корректности разработанных моделей. В работах [1, 12] Бахмурову А. Г. принадлежит схема формального представления конфигурации МВС. В работе [9] вклад Балашова В. В. заключается в описании архитектуры систем ИМА, Бахмурова А. Г. — в редактуре раздела, посвященного моделированию функционирования вычислительных модулей. В работе [14] Балашову В. В. принадлежит описание структуры ИУС реального времени с архитектурой ИМА.

Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и четырех приложений. Полный объем диссертации составляет 245 страниц (127 страниц не считая приложений), включая 62 рисунка и 8 таблиц. Список литературы содержит 141 наименование.

Содержание работы

Во введении дано краткое описание задачи диссертационной работы, ее актуальности, и приведена краткая история исследований по данной теме. Также во введении аргументирована научная новизна исследований, показана практическая ценность полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения. В качестве подхода к решению задачи проверки выполнения ограничений реального времени для МВС с заданной конфигурацией выбрано построение и анализ ВД функционирования этой МВС. Такая ВД может быть получена посредством прогона имитационной модели функционирования МВС.

Первая глава содержит постановку задачи проверки выполнения ограничений реального времени для МВС.

В разделе 1.1 описана организация МВС и приведены примеры МВС. *В разделе 1.2* приведено содержательное определение конфигурации МВС и введены ограничения реального времени. *В разделе 1.3* проведен обзор и выполнен анализ задач, возникающих при проектировании МВС и требующих проверки

выполнения ограничений реального времени для конфигураций МВС. На основе этого анализа сформулированы следующие требования к инструментальным средствам имитационного моделирования МВС:

1. Возможность получения ВД, включающих события постановки на выполнение, вытеснения и завершения работ.

2. Математический аппарат в основе средства должен позволять описывать те аспекты функционирования МВС, которые существенны для проверки выполнения ограничений реального времени. В частности, необходима возможность описания алгоритмов планирования с вытеснением, зависимостей по данным между задачами, МВС с различными алгоритмами планирования в различных разделах, МВС с несколькими типами вычислительных ядер, различающихся производительностью.

3. Математический аппарат в основе средства должен предоставлять возможность проверки корректности моделей математическими методами. Такая проверка необходима, так как на этапе проектирования МВС невозможно экспериментально сравнить поведение модели с поведением реальной МВС.

4. Поддержка библиотеки моделей компонентов МВС. Различные МВС строятся из стандартизированных компонентов, поэтому и модели МВС целесообразно строить из моделей этих компонентов, образующих библиотеку моделей.

5. Автоматизация построения модели конкретной МВС по заданному описанию конфигурации МВС, а также автоматизация прогона модели.

6. Возможность включения в модель МВС и в библиотеку моделей пользовательских моделей компонентов МВС, в частности моделей планировщиков раздела.

7. Скорость построения и прогона модели, а также анализа результатов моделирования должна позволять работать с конфигурациями размерности, соответствующей реальным системам, с учетом числа конфигураций, оцениваемых при проектировании (это число может достигать нескольких сотен и более при работе оптимизационных алгоритмов).

Обзор имеющихся в открытом доступе средств моделирования МВС, также приведенный в разделе 1.3, показал, что ни одно из них в полной мере не удовлетворяет сформулированным требованиям, а их доработка более трудоемка, чем создание нового средства.

В разделе 1.4.1 приведено формальное определение конфигурации МВС, основанное на модели, предложенной в работах Р. Л. Смелянского[7].

Конфигурация МВС — это кортеж $\langle HW, WL, Bind, Sched\rangle$, где:

- HW — набор вычислительных ядер;
- $WL = \langle Part, Msg\rangle$ — описание рабочей нагрузки, где $Part$ — набор разделов, Msg — набор сообщений, соответствующих зависимостям по данным между задачами;
- $Bind : Part \to HW$ — привязка разделов к ядрам;
- $Sched$ — расписание окон разделов.

Набор вычислительных ядер HW представляется в виде $HW = \{HW_i\}_{i=1}^{N}$, $HW_i = \langle type_i, mod_i\rangle$, где N — количество ядер, $type_i$ — тип ядра, от которого зависит его производительность, mod_i — номер вычислительного модуля.

Набор разделов $Part$ представляется в виде $Part = \{Part_i\}_{i=1}^{M}$, $Part_i = \langle T_i, a_i\rangle$, где M — количество разделов, T_i — набор задач i-го раздела; a_i — номер алгоритма в наборе динамических алгоритмов планирования, которые могут использоваться для планирования работ разделов.

$T_i = \{T_{ij}\}_{j=1}^{K_i}$, где K_i — количество задач в i-ом разделе, $T_{ij} = \langle pr_{ij}, \overline{c_{ij}}, p_{ij}, o_{ij}, d_{ij}\rangle$ — атрибуты j-й задачи i-го раздела: pr_{ij} — уникальный в рамках раздела приоритет; $\overline{c_{ij}} = (c_{ij}^1, ..., c_{ij}^{N_t})$ — длительности выполнения в худшем случае (WCET) на разных типах вычислительных ядер; p_{ij} — период; o_{ij} — смещение относительно начала периода, определяющее левые границы директивных интервалов работ задачи; $d_{ij}, o_{ij} < d_{ij} \leq p_{ij}$ — смещение относительно начала периода, определяющее правые границы директивных интервалов работ задачи. $\hat{T} = \cup_{i=1}^{M} T_i$ — множество всех задач в МВС.

Набор сообщений Msg представляется в виде $Msg = \{Msg_j\}_{j=1}^{H}$, где H — количество сообщений; $Msg_j = \langle S_j, R_j, dm_j, dn_j\rangle$ — атрибуты j-го сообщения: $S_j \in \hat{T}$ — задача-отправитель; $R_j \in \hat{T}$ — задача-получатель; dm_j и dn_j — длительности передачи сообщения через память модуля и сеть соответственно.

Расписание окон выполнения разделов задается на интервале планирования с заданной длительностью L и представляются в виде $Sched = \{\{\langle start_{ij}, stop_{ij}\rangle\}_{j=1}^{N_i^w}\}_{i=1}^{M}$, где N_i^w — количество окон для i-го раздела, $start_{ij}, stop_{ij} \in \overline{0,L}, start_{ij} < stop_{ij}$ — времена начала и завершения j-го окна

[7] Смелянский Р. Л. Модель функционирования распределенной вычислительной системы с временем // Программирование. — 2013. — № 5. — С. 22–34.

i-го раздела. Окна различных разделов, привязанных к одному вычислительному ядру, не пересекаются.

В данной работе предполагается, что время дискретно: все времена и длительности, являющиеся атрибутами элементов конфигурации, задаются в квантах времени, равных, например, длительности такта процессора.

В разделе 1.4.2 приведено определение ВД функционирования МВС с заданной конфигурацией.

Пусть дана некоторая конфигурация МВС. Для каждой задачи T_{ij} на интервале планирования длительности L определен набор работ $W_{ij} = \{w_{ijk}\}_{k=1}^{L/p_{ij}}$. Директивный интервал работы w_{ijk} равен $[(k-1)\cdot p_{ij} + o_{ij}; (k-1)\cdot p_{ij} + d_{ij}]$.

Событием в МВС называется кортеж $e = \langle EType, Src, t\rangle$, где:

- $EType \in \{EX, PR, FIN\}$ — тип события: постановка работы на выполнение (EX); вытеснение работы с ядра (PR); завершение работы, в т.ч. по причине окончания ее директивного интервала (FIN);
- $Src \in \bigcup\limits_i \bigcup\limits_j W_{ij}$ — работа-источник события;
- $t \in \overline{0,L}$ — время события.

$E = \{EX, PR, FIN\} \times \bigcup\limits_i \bigcup\limits_j W_{ij} \times \overline{0,L}$ — множество всевозможных событий при выполнении заданной рабочей нагрузки.

Пусть $CONF$ — множество всевозможных конфигураций.

На практике при проектировании МВС предполагают, что время выполнения каждой работы на соответствующем ядре фиксировано и равно максимальному возможному, время передачи каждого сообщения также фиксировано и равно максимальному возможному, а все используемые алгоритмы планирования детерминированы и результаты их работы не зависят от факторов, не описанных в конфигурации МВС. В таких предположениях набор алгоритмов планирования A *однозначно* определяет отображение $Q : CONF \to 2^E$.

Временная диаграмма для конфигурации $conf \in CONF$ — подмножество множества E, однозначно соответствующее $conf$, и являющееся результатом интерпретации A на $conf$.

Пусть $conf \in CONF$ — некоторая конфигурация системы, а $Q(conf)$ — ВД, соответствующая $conf$. Интервалами выполнения работы w_{ijk} считаются интервалы между событиями $\langle w_{ijk}, EX, t_1\rangle$ и $\langle w_{ijk}, PR, t_2\rangle$ и интервалы между событиями $\langle w_{ijk}, EX, t_1\rangle$ и $\langle w_{ijk}, FIN, t_2\rangle$. Интервалы указанного вида не

должны содержать внутри себя других событий типов EX, PR, FIN с источником w_{ijk}.

В разделе 1.4.3 введено условие RT выполнения ограничений реального времени: для каждой работы суммарная длительность ее интервалов выполнения равна максимальной длительности ее выполнения на ядре, к которому привязан соответствующий раздел. В сформулированных в разделе 1.4.2 предположениях это условие является необходимым и достаточным. Если условие RT выполняется, то работа завершилась штатно. Иначе некоторая работа была принудительно снята с ядра по достижению правой границы ее директивного интервала и считается опоздавшей, то есть ограничения реального времени нарушены.

В разделе 1.4.4 приведена формальная постановка задачи проверки выполнения ограничений реального времени для некоторой конфигурации МВС:

Дано: конфигурация МВС $conf \in CONF$.

Требуется: Определить, выполняется ли условие RT на конфигурации $conf$.

Согласно выбранному в работе методу решения этой задачи, для проверки условия $RT(conf)$ требуется построить ВД $Q(conf)$ функционирования МВС с заданной конфигурацией. ВД $Q(conf)$ может быть построена посредством прогона имитационной модели МВС для заданной конфигурации $conf$.

Во второй главе предложена обобщенная модель функционирования МВС, абстрагированная от структуры МВС и используемых в МВС алгоритмов планирования, а также основанный на этой модели метод проверки выполнения ограничений реального времени для конфигураций МВС.

В разделе 2.1 сформулированы требования к математическому аппарату для построения модели, следующие из требований раздела 1.3 к средству моделирования МВС. Выполнен анализ следующих математических аппаратов: сети временных автоматов, сети временных автоматов с остановкой таймеров, временные сети Петри, временные сети Петри с остановкой таймеров, алгебра процессов с временем, модель с сообщениями (МС-модель). По результатам проведенного анализа для построения обобщенной модели функционирования МВС выбраны сети временных автоматов с остановкой таймеров[8] как математический аппарат, в наибольшей степени удовлетворяющий перечисленным в разделе 2.1 требованиям.

[8] Cassez F., Larsen K. The Impressive Power of Stopwatches // CONCUR 2000 — Concurrency Theory. — Berlin, Heidelberg : Springer, 2000. — P. 138–152.

Временной автомат с остановкой таймеров представляет собой конечный автомат с целочисленными переменными и таймерами. Далее для обозначения временного автомата с остановкой таймеров для краткости используется термин «автомат». Таймер — это специальная переменная, принимающая вещественные значения. Таймер может быть активным или остановленным в зависимости от значения условия его активности. Состоянием автомата называется совокупность его текущей локации, значений переменных и таймеров.

Сеть автоматов представляет собой набор автоматов, функционирующих совместно. Состояние сети автоматов определяется совокупностью состояний ее автоматов. Автоматы в составе сети автоматов взаимодействуют посредством общих переменных и синхронизаций по каналам. Если для некоторого состояния сети автоматов в одном из автоматов активен переход, помеченный отправкой сигнала по каналу, а в другом автомате сети — приемом сигнала по тому же каналу, то оба перехода выполняются как единое действие. Состояние сети автоматов определяется совокупностью состояний ее автоматов. *Вычислением сети автоматов* является всякая возможная конечная или бесконечная последовательность ее состояний.

В разделе 2.2 приведено формальное описание сетей временных автоматов с остановкой таймеров.

Раздел 2.3 содержит описание выполненного в работе расширения математического аппарата сетей временных автоматов с остановкой таймеров. Для построения предлагаемой обобщенной модели функционирования МВС, абстрагированной от структуры МВС и используемых в разделах МВС алгоритмов планирования, и доказательства корректности этой модели автором разработан новый уровень абстракции сетей временных автоматов с остановкой таймеров — *обобщенные сети временных автоматов с остановкой таймеров*. Далее приведен ряд определений, необходимых для введения определения обобщенной сети автоматов и для описания обобщенной модели функционирования МВС.

Модельное время сети автоматов — значение некоторого служебного таймера, условие активности которого всегда истинно и который никогда не обнуляется.

Событие синхронизации автоматов — это тройка $e = \langle CH, A^s, t \rangle$, соответствующая содержащему синхронизацию переходу в сети автоматов, где CH — канал синхронизации, $A^s \subseteq A$ — набор автоматов, участвующих в синхронизации, t — модельное время сети автоматов. Два события синхронизации

$e_i = \langle CH_i, A_i^s, t_i \rangle$ и $e_j = \langle CH_j, A_j^s, t_j \rangle$ *совпадают*, если $CH_i = CH_j$, $A_i^s = A_j^s$ и $t_i = t_j$.

Временная диаграмма сети автоматов — набор событий синхронизации, соответствующий некоторому вычислению этой сети. Чтобы по заданному вычислению сети автоматов получить ВД сети автоматов, необходимо выбрать из этого вычисления все переходы, содержащие синхронизации, и каждому переходу поставить в соответствие событие синхронизации. Две ВД сети автоматов *эквивалентны*, если между их событиями можно установить взаимно однозначное соответствие, причем соответствующие друг другу события совпадают.

Набор переменных и действий синхронизации, посредством которых некоторый автомат взаимодействует с другими автоматами сети, называется *интерфейсом этого автомата*.

Параметризованный автомат — это автомат, в выражениях которого наряду с числами и переменными используются целочисленные параметры. Экземпляр автомата порождается по параметризованному автомату путем задания константных числовых значений для параметров этого параметризованного автомата.

В дополнение к известным понятиям автомата без параметров, называемого в данной работе экземпляром автомата, и параметризованного автомата было введено понятие базового типа автоматов. *Базовый тип автоматов* определяется только параметрами и интерфейсом, локации и переходы для него не определены. Таким образом реализуется абстрагирование от систем переходов автоматов. Параметризованный автомат *реализует* базовый тип автоматов, если интерфейс и параметры параметризованного автомата совпадают с интерфейсом и параметрами базового типа автоматов.

Поясним введенные понятия на примере моделирования планировщиков раздела. Моделью планировщика раздела, абстрагированной от используемого в разделе алгоритма планирования, является базовый тип автоматов, абстрагированный от систем переходов автоматов. Моделью планировщика раздела, функционирующего согласно алгоритму планирования с фиксированными приоритетами и вытеснением (FPPS), является параметризованный автомат. Моделью планировщика конкретного раздела в МВС с заданной конфигурацией является экземпляр автомата.

Набор базовых типов автоматов называется *обобщенной сетью автоматов*. Набор параметризованных автоматов — *параметризованной сетью автоматов*, сеть экземпляров автоматов — *экземпляром сети автоматов*.

В разделе 2.4 предложена обобщенная модель функционирования МВС, представляющая собой обобщенную сеть автоматов с остановкой таймеров. Обобщенная модель состоит из следующих базовых типов автоматов:

1. Базовый тип автоматов **`T`**, моделирующий функциональную задачу.

2. Базовый тип автоматов **`TS`**, моделирующий планировщик работ раздела.

3. Базовый тип автоматов **`CS`**, моделирующий планировщик ядра.

4. Базовый тип автоматов **`L`**, моделирующий виртуальный канал. Под виртуальным каналом понимается средство передачи сообщений в общем случае.

Для каждого базового типа автомата в обобщенной модели описан его интерфейс. Так, например, автоматы базового типа **`CS`** отправляют сигналы по каналам $\texttt{wakeup}_i$ и $\texttt{sleep}_i$, где i-й канал соответствует i-му разделу.

Средства взаимодействия, определенные для описанных базовых типов автоматов, показаны на рисунке 1. Синхронизации по каналам обозначены стрелками; направление стрелки соответствует направлению передачи сигнала — от отправителя к получателю. Переменные интерфейса обозначены пунктирными линиями; пометка «r» на конце такой линии обозначает, что переменная доступна автомату на чтение, «w» — на запись, «r/w» — на чтение и запись.

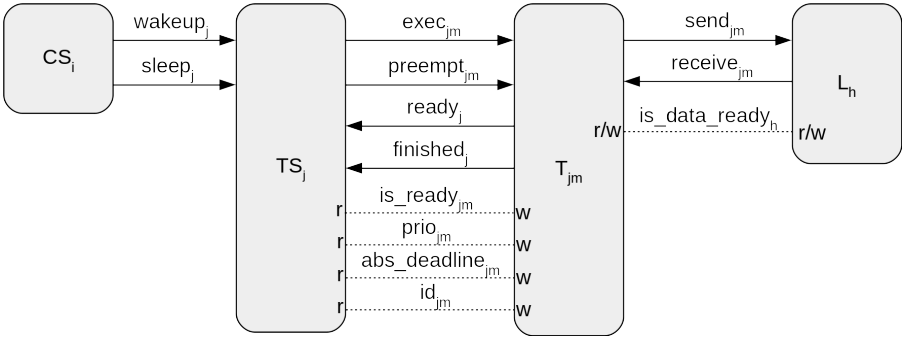

Рис. 1 — Средства взаимодействия, определенные для базовых типов автоматов в обобщенной модели функционирования МВС

В *разделах 2.5, 2.6* приведен метод проверки выполнения ограничений реального времени для заданной конфигурации МВС.

В *разделе 2.5* описан метод конкретизации обобщенной модели функционирования МВС для заданной конфигурацией МВС.

Параметризованная сеть автоматов, реализующая введенную выше обобщенную сеть автоматов, является параметризованной моделью функционирования МВС. Числовые значения параметров задают выбор составляющих конфигурации МВС и характеристики этих составляющих. Модель содержит следующие параметризованные автоматы: модели задачи, планировщика ядра, виртуального канала и нескольких планировщиков работ, работающих согласно различным алгоритмам планирования.

Для параметризованной сети автоматов и заданной конфигурации МВС может быть построен экземпляр сети автоматов, моделирующий функционирование МВС с такой конфигурацией. Построение экземпляра сети автоматов осуществляется согласно приведенному в разделе 2.5 алгоритму: создаются каналы и переменные для взаимодействия автоматов, для каждого компонента МВС порождается параметризованный автомат соответствующего типа, параметры автомата устанавливаются в соответствующие числовые значения из описания конфигурации (т.е. создается экземпляр автомата), каналы и переменные интерфейса автомата отождествляются с созданными переменными и каналами в соответствии со структурой обобщенной модели. По построению, каждой конфигурации МВС однозначно соответствует экземпляр модели МВС.

Результатом прогона экземпляра модели МВС является ВД сети автоматов.

В разделе 2.6 приведен алгоритм построения ВД функционирования МВС по ВД соответствующей сети автоматов. Изначально ВД функционирования МВС пуста. Для каждого события синхронизации автоматов по одному из каналов $\texttt{exec}_{jk}$, $\texttt{preempt}_{jk}$, $\texttt{finished}_j$, $j \in \overline{1, M}$, $k \in \overline{1, K_j}$, входящего в ВД сети автоматов, порождается событие в МВС. При этом тип события (EX, PR, FIN) однозначно определяется каналом синхронизации; работа-источник события — автоматом-моделью функциональной задачи, участвующим в синхронизации; время события — временем синхронизации. Сформированное таким образом событие помещается в ВД функционирования МВС.

Полученная ВД функционирования МВС используется для проверки введенного в разделе 1.4.3 условия выполнения ограничений реального времени.

В разделе 2.7 описаны разработанные параметризованные автоматы, представляющие собой модели планировщика ядра, функциональной задачи и виртуального канала, а также модели трех часто используемых в МВС планировщиков

работ раздела: с фиксированными приоритетами и вытеснением, с фиксированным приоритетами без вытеснения, планировщик, работающий по стратегии EDF с вытеснением.

В разделе 2.8 для разработанной параметризованной модели функционирования МВС приведены оценки сложности построения и прогона экземпляра модели в зависимости от характеристик соответствующей конфигурации МВС. Так в обозначениях раздела 1.4.1 сложность построения экземпляра модели имеет асимптотическую оценку $O(H + \sum_{i=1}^{M} K_i + \sum_{i=1}^{M} N_i^w)$, а сложность прогона — $O(L \cdot (H + \sum_{i=1}^{M} K_i)^2)$.

Третья глава посвящена обоснованию корректности обобщенной модели функционирования МВС.

В разделе 3.1 введено понятие корректности моделей МВС и описан общий подход к обоснованию корректности формируемых моделей.

Из стандартов на МВС с архитектурой ИМА и описаний схем планирования автором были выделены требования к функционированию МВС, применимые к ВД моделей, то есть представимые в виде ограничений на порядок происходящих в моделях событий и на длительность интервалов между ними. Кроме того, были выделены применимые к ВД моделей требования детерминированности, соответствующие стандартам на МВС и, как правило, учитываемые на этапе проектирования. ВД модели МВС с заданной конфигурацией считается корректной, если для этой ВД выполнены все выделенные требования. Модель МВС с заданной конфигурацией (то есть экземпляр сети автоматов) является *детерминированной*, если ВД, построенные по всем возможным вычислениям этой сети, эквивалентны. *Модель МВС* с заданной конфигурацией считается *корректной*, если она является детерминированной и все возможные ее ВД корректны. Детерминированность модели позволяет использовать любое вычисление сети автоматов для проверки выполнения ограничений реального времени, в отличие от подхода формальной верификации моделей, предполагающего анализ *всех* вычислений. Далее под требованием к модели МВС в целом понимается требование к ее ВД. Под требованием к модели компонента МВС — требование к последовательностям событий синхронизации, происходящих с участием этой модели. При этом в общем случае требование к некоторой модели компонента МВС должно выполняться при любом поведении других моделей, взаимодействующих с этой моделью.

Обобщенная модель функционирования МВС считается *корректной*, если корректны все модели конкретных МВС, формируемые на ее основе из корректных моделей компонентов МВС.

Автором предложен следующий подход к обоснованию корректности моделей МВС (экземпляров сетей автоматов), формируемых согласно предложенному в разделе 2.5 методу:

1. Для каждого базового типа автомата, входящего в состав обобщенной модели МВС, на основе перечисленных выше источников выделяется набор требований, которым должны удовлетворять все параметризованные автоматы, реализующие данный базовый тип.

2. Доказывается, что если для всех параметризованных автоматов, входящих в состав параметризованной модели МВС, выполняются требования, сформулированные для соответствующих базовых типов автоматов, то параметризованная модель МВС удовлетворяет всем выделенным требованиям корректности к модели в целом, а также является детерминированной.

3. Проверяется выполнение требований к параметризованным автоматам, входящих в состав параметризованной модели МВС. Проверка выполнения этих требований проводится автоматически с помощью верификатора.

4. На основании п.п. 2 и 3 делается вывод о корректности параметризованной модели МВС.

Чтобы при добавлении в параметризованную модель нового параметризованного автомата полученная параметризованная модель была корректной, достаточно убедиться (с использованием верификатора), что все требования, сформулированные для соответствующего базового типа автомата, для данного автомата выполняются, то есть выполнить действия п.3 для добавляемого автомата. Действия п.п. 1 и 2 производятся однократно и были выполнены автором для предложенной обобщенной модели функционирования МВС. Действия п.3 были выполнены для всех построенных автором параметризованных автоматов.

Также было проверено выполнение ряда требований корректности, специфичных для отдельных построенных параметризованных автоматов.

С использованием описанного выше подхода и утверждений, доказанных в разделах 3.2—3.4, доказано следующее утверждение:

Предложенная в настоящей работе обобщенная модель функционирования МВС является корректной.

Раздел 3.2 посвящен верификации моделей компонентов МВС. Исходя из вида требований корректности к этим моделям, для их верификации был выбран подход автоматов-наблюдателей[9], описанный *в разделе 3.2.1*. Автомат-наблюдатель соответствует одному требованию корректности и представляет собой автомат, имеющий интерфейс для взаимодействия с исходным автоматом и функционирующий в композиции с исходным автоматом. Автомат-наблюдатель имеет некоторую «плохую» локацию, такую что любая не удовлетворяющая требованию последовательность синхронизаций гарантированно приводит автомат-наблюдатель в «плохую» локацию. Таким образом, проверка выполнения требования сводится к проверке недостижимости этой локации.

Недостижимость «плохой локации» должна быть доказана для всех значений параметров автоматов-моделей МВС из диапазонов их значений. Однако, на практике эти диапазоны могут быть очень велики, а также их границы могут быть заранее не известны. Из-за этого при верификации пространство состояний в общем случае настолько велико, что выполнить верификацию за приемлемое время невозможно. Поэтому были выделены классы автоматов, для которых диапазоны перебираемых при верификации значений параметров можно существенно сократить. Для каждого класса автоматов были сформулированы и доказаны утверждения о допустимости сокращения диапазонов значений параметров при верификации. Примером таких утверждений является следующее доказанное утверждение (временной параметр — параметр, используемый только в сравнениях с таймерами):

Утверждение. *Пусть параметризованный автомат имеет один не останавливаемый таймер t и k временных параметров $p_1, ..., p_k$. Пусть в сравнениях с таймером t могут использоваться только параметры $p_1, ..., p_k$, и, возможно, константа 0. Тогда для любой локации автомата верно, что если она не достижима при любых целых неотрицательных значениях временных параметров, не превышающих k, то она не достижима при любых целых неотрицательных значениях временных параметров.*

Также были сформулированы и доказаны аналогичные утверждения для других классов автоматов и других видов параметров — всего семь основных

[9] André É. Observer Patterns for Real-Time Systems // Proceedings of the 2013 18th International Conference on Engineering of Complex Computer Systems. — 2013. — P. 125–134.

утверждений и ряд вспомогательных. Формулировки и доказательства утверждений приведены в приложении Б. Поскольку все разработанные автором модели компонентов МВС принадлежат выделенным классам автоматов, то выбор значений параметров при верификации осуществлялся согласно этим утверждениям, что позволило выполнить верификацию всех моделей за приемлемое время.

В разделе 3.2.2 приведены требования корректности к моделям компонентов МВС. Также в этом разделе проиллюстрирован порядок построения автоматов-наблюдателей на примере автомата-наблюдателя, соответствующего следующему требованию к моделям планировщиков работ разделов:

Для любого раздела верно, что в каждый момент времени на вычислителе может выполняться не более одной работы этого раздела.

Остальные автоматы-наблюдатели описаны в приложении В.

В разделе 3.3 сформулированы и доказаны требования корректности к модели МВС в целом. Выполнение этих требований доказано автором путем строгих логических рассуждений на основе информации о структуре модели, а также на основе выполнения требований к моделям компонентов МВС и требований корректности к входным данным модели. Примером требования корректности к модели МВС в целом является следующее требование:

Для любых двух задач верно, что если одна задача зависит по данным от другой, то время начала выполнения каждой работы задачи-получателя данных не меньше времени завершения соответствующей работы задачи-отправителя данных плюс время передачи данных.

В разделе 3.4 доказана детерминированность моделей, формируемых согласно предложенному методу из корректных моделей компонентов МВС.

В четвертой главе описана разработанная автором инструментальная система, в которой реализован предложенный метод проверки выполнения ограничений реального времени для конфигураций МВС.

В разделе 4.1 сформулированы требования к инструментальной системе.

В разделе 4.2 представлены состав и схема работы реализованной системы.

Моделью каждого компонента МВС является параметризованный автомат с остановкой таймеров. Разработанные автором автоматы формируют *библиотеку автоматных моделей*, входящую в состав инструментальной системы. Для этих автоматов проверено выполнение всех необходимых требований корректности. Библиотека автоматных моделей может быть пополнена новыми

(пользовательскими) моделями. Для добавления автомата в библиотеку необходимо проверить, что для него выполняются все соответствующие требования корректности. В состав разработанного средства входит *набор автоматов-наблюдателей* для проверки этих требований. Для создания, редактирования и верификации параметризованных автоматов используется средство UPPAAL.

Каждой автоматной модели соответствует программная модель — представление автомата в виде кода на языке C++. Программная модель получается из автоматной модели с помощью разработанного автором *кодогенератора*. Таким образом, библиотеке автоматных моделей соответствует *библиотека программных моделей*. В программных моделях используются объекты разработанной автором *библиотеки моделирования сетей временных автоматов с остановкой таймеров*: локации, переходы, таймеры и т.д.

Параметризованная программная модель МВС представляет собой программу, использующую библиотеку моделирования сетей временных автоматов с остановкой таймеров и библиотеку программных моделей компонентов МВС, и выполняющую следующие действия:

1. Построение модели МВС по описанию конфигурации системы в соответствии с методом, предложенным в разделе 2.5.

2. Прогон построенной модели, в процессе которого формируется ВД сети автоматов.

3. Построение по ВД сети автоматов искомой ВД функционирования МВС в соответствии с алгоритмом, приведенным в разделе 2.6.

В разделе 4.3 подробно описана библиотека моделирования временных автоматов с остановкой таймеров.

Раздел 4.4 посвящен интеграции разработанной инструментальной системы с САПР «Планировщик ИМА». Эта САПР предназначена для решения следующей задачи. Задается описание МВС с архитектурой ИМА, содержащее характеристики ее вычислительных модулей. Также задается описание рабочей нагрузки, содержащее характеристики функциональных задач, сгруппированных в разделы, и характеристики сообщений. Необходимо сформировать конфигурацию МВС, так чтобы для этой конфигурации выполнялись ограничения реального времени. Для решения описанной задачи в САПР «Планировщик ИМА» используются различные оптимизационные алгоритмы.

Автором была реализована следующая схема интеграции САПР «Планировщик ИМА» и разработанной инструментальной системы. На этапе работы

оптимизационного алгоритма, требующем проверки выполнения ограничений реального времени для некоторой конфигурации, генерируется XML-файл с описанием этой конфигурации. Затем запускается параметризованная программная модель МВС, принимающая на вход сгенерированный файл. Результатом работы модели является XML-файл с ВД функционирования МВС. Этот файл разбирается в САПР «Планировщик ИМА», и на основе его данных осуществляется проверка выполнения ограничений реального времени.

В пятой главе приведены результаты экспериментального исследования разработанных методов и средств.

В разделе 5.1 сформулированы цели экспериментального исследования:

1. Сравнить с теоретическими оценками порядок зависимости времени построения и прогона модели конкретной МВС от характеристик ее конфигурации.

2. Оценить производительность и масштабируемость по количественным характеристикам конфигурации МВС разработанных методов и средств, а также подтвердить их пригодность для анализа систем реальной размерности.

3. Сравнить по производительности разработанную параметризованную модель МВС с моделью, встроенной в САПР «Планировщик ИМА».

Для проведения экспериментов было сформировано 10 наборов конфигураций МВС, различающихся числом задач, сообщений, разделов, ядер, окон, длительностью интервала планирования, границами директивных интервалов работ. В рамках каждого набора варьировалась выбранная числовая характеристика конфигурации МВС, например, число задач. Все конфигурации сформированы на основе данных, соответствующих реальной системе ИМА.

В разделе 5.2 проанализированы результаты экспериментов: исследованы зависимости времени построения и прогона экземпляра модели МВС от характеристик конфигурации этой МВС, а также выполнено сравнение разработанного средства со встроенной в САПР «Планировщик ИМА» моделью по времени проверки выполнения ограничений реального времени.

В разделе 5.3 сформулированы выводы из экспериментального исследования. Зависимости длительности построения/прогона экземпляра модели от характеристик конфигурации соответствуют своим теоретическим оценкам, что подтверждено с использованием методов математической статистики. Для конфигураций размерности, соответствующей реальным МВС, время проверки ограничений реального времени составило менее 5 с, что позволяет использовать разработанное средство в цикле работы поисковых алгоритмов, перебирающих

большое число потенциальных конфигураций (например, эволюционных алгоритмов).

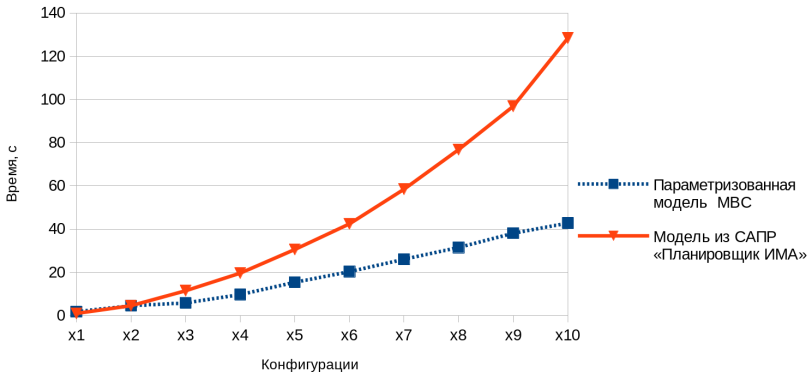

Рис. 2 — Сравнение времени работы разработанной параметризованной модели МВС и встроенной в САПР «Планировщик ИМА» модели

На рисунке 2 приведены результаты сравнения разработанной параметризованной модели МВС и встроенной в САПР «Планировщик ИМА» модели по времени работы (включая время построения модели конкретной МВС). Конфигурация «x1» соответствует одной из реальных бортовых МВС. На конфигурациях небольшой размерности время работы моделей примерно одинаково. Однако, с ростом размерности конфигураций разработанная модель начинает работать заметно быстрее, чем модель из САПР «Планировщик ИМА». ВД, построенные с помощью обеих моделей, совпадают.

В заключении сформулированы основные результаты работы и приведены возможные направления развития предложенного подхода.

В приложении А подробно описаны разработанные автором модели компонентов МВС. **В приложении Б** сформулированы и доказаны утверждения о выборе значений параметров и переменных, использующиеся при верификации моделей компонентов МВС. **В приложении В** описаны разработанные автоматы-наблюдатели, использующиеся для проверки выполнения требований корректности к моделям компонентов МВС. **В приложении Г** представлены результаты экспериментов в табличном виде.

Публикации по теме диссертации

Публикации в журналах, индексируемых в базах Scopus, WoS, RSCI

1. Glonina A., Bahmurov A. Stopwatch automata-based model for efficient schedulability analysis of modular computer systems // Parallel Computing Technologies (PaCT). Lecture Notes in Computer Science. — Cham: Springer, 2017. — Vol. 10421. — P. 289–300. *Scopus, WoS; WoS IF=0.402*

2. Глонина А. Б., Балашов В. В. О корректности моделирования модульных вычислительных систем реального времени с помощью сетей временных автоматов // Моделирование и анализ информационных систем. — 2018. — Т. 25, № 2. — С. 174–192. *RSCI; РИНЦ IF=0.456* (Glonina A. B., Balashov V. V. On the correctness of real-time modular computer systems modeling with stopwatch automata networks // Automatic Control and Computer Sciences. — 2018. — Vol. 52, № 7. — P. 817–827. *Scopus, WoS ESCI*)

3. Глонина А. Б. Инструментальная система проверки выполнения ограничений реального времени для конфигураций модульных вычислительных систем // Вестник Московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. — 2020. — № 3. — С. 16–29. *RSCI; РИНЦ IF=0.312*

Публикации в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

4. Глонина А. Б. Обобщенная модель функционирования модульных вычислительных систем реального времени для проверки допустимости конфигураций таких систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». — 2017. — Т. 6, № 4. — С. 43–59. *РИНЦ IF=0.304*

5. Глонина А. Б. Программное средство моделирования модульных вычислительных систем для проверки допустимости их конфигураций // Программные продукты и системы. — 2017. — Т. 30, № 4. — С. 574–582. *РИНЦ IF=0.460*

Свидетельство о регистрации прав на программное обеспечение

6. Глонина А. Б. Инструментальная система проверки выполнения ограничений реального времени для конфигураций модульных вычислительных систем. ФИПС. Св. о рег. программы для ЭВМ № 2020611082 от 23.01.2020.

Иные публикации

7. Глонина А. Б. Масштабирование результатов верификации моделей компонентов модульных вычислительных систем // «Тихоновские чтения»: научная конференция. Тезисы докладов. — М.: МАКС Пресс, 2019. — С. 34.

8. Глонина А. Б. Обобщенная модель функционирования модульных вычислительных систем реального времени для проверки допустимости конфигураций таких систем // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции — М.: Изд-во МГУ, 2017. — С. 800–814.

9. Глонина А. Б., Балашов В. В., Бахмуров А. Г. Подход к использованию имитационного моделирования при решении задач синтеза и планирования в модульных вычислительных системах // Программные системы и инструменты. — М.: Изд-во ф-та ВМК МГУ, 2014. — Т. 15 — С. 116–136.

10. Глонина А. Б. Обобщенная модель функционирования модульных вычислительных систем для проверки выполнения ограничений реального времени // «Тихоновские чтения»: научная конференция. Тезисы докладов. — М.: МАКС Пресс, 2018. — С. 93.

11. Глонина А. Б. Программное средство моделирования модульных вычислительных систем для проверки ограничений реального времени // «Ломоносовские чтения»: науч. конф. Тезисы докл. — М.: МАКС Пресс, 2018. — С. 42.

12. Глонина А. Б., Бахмуров А. Г. Математическая модель функционирования модульных ВС РВ для проверки допустимости конфигураций таких систем // «Ломоносовские чтения»: научная конференция. Тезисы докладов. — М.: МАКС Пресс, 2017. — С. 74.

13. Глонина А. Б. Автоматическое построение имитационных моделей модульных ИУС РВ // «Ломоносовские чтения»: научная конференция. Тезисы докладов. — М.: Изд-во ф-та ВМК МГУ, 2016. — С. 99–100.

14. Глонина А. Б., Балашов В. В. Использование автоматически построенных имитационных моделей при проектировании ИУС РВ с архитектурой ИМА // VIII Московская международная конференция по исследованию операций (ORM2016). — М.: ФИЦ ИУ РАН, 2016. — Т. 2 — С. 168–169.

15. Глонина А. Б. Применение имитационного моделирования при решении задач синтеза и планирования для модульных вычислительных систем // Сборник тезисов XXII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2015», секция «Вычислительная Математика и Кибернетика». — М.: Изд-во ф-та ВМК МГУ, 2015. — С. 93–94.

Глонина Алевтина Борисовна

Анализ конфигураций модульных вычислительных систем для проверки выполнения ограничений реального времени

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать ___.___._____. Заказ № _____
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.
Типография _____