



«Утверждаю»

проректор по научной работе

и инновациям ТУСУР

Рулевский В.М.

«02» 08 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) на диссертационную работу Сарамуда Михаила Владимировича «Модельно-алгоритмическое обеспечение анализа отказоустойчивости программных комплексов встраиваемых систем управления реального времени», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации (космические и информационные технологии)

Актуальность темы.

Работа посвящена решению актуальной задачи - разработке инструментов анализа надежности программных комплексов встраиваемых систем управления (СУ) реального времени. Важность повышения надежности программной составляющей обусловлена тем, что она выполняет основные функции системного управления обработкой данных, и её отказы в работе могут оказать существенное влияние на функционирование систем управления.

Особенно критична надежность ПО в системах реального времени. В случае возникновения сбоя в системах без ограничения по времени есть возможность обработать сбой, восстановить состояние системы до его возникновения и повторить вычисления. В системах реального времени подобной возможности нет, поскольку по истечении времени на выполнение данная задача будет завершена принудительно.

Средства анализа надежности существенно влияют на эффективность разработки отказоустойчивого ПО. Если не проводить анализ надежности на ранних этапах разработки, возможна ситуация, когда уже разработанная программная система при функционировании не обеспечивает заданных параметров надежности СУ, что приводит к необходимости повторной разработки ПО с использованием других моделей и алгоритмов.

Возможность анализа надежностных характеристик ПО на более ранних этапах проектирования системы делает ее разработку более предсказуемой и снижает риски.

Соискателем предложен ряд моделей, методов и их программных реализаций для анализа отказоустойчивости программных комплексов. Предложены модификации алгоритмов принятия решения в мультиверсионных системах, произведено их сравнительное тестирование в разработанной имитационной среде моделирования. Предложена дезвтрафикационная модель предсказания времени наработки на отказ. Разработана практическая реализации мультиверсионной среды исполнения реального времени.

Таким образом, тема диссертационного исследования, связанная с созданием модельно-алгоритмического обеспечения анализа отказоустойчивости программных комплексов встраиваемых систем управления реального времени, является актуальной.

Основные научные результаты и их значение для науки и практики.

Для достижения поставленной в работе цели соискателем была сформирована типовая структура мультиверсионной системы управления реального времени, в том числе ее программная составляющая, которая позволяет разработать не только имитационную среду моделирования, но и осуществить практическую реализацию на основе операционной системы реального времени.

Предложен и реализован комбинированный селективный алгоритм оценки эффективности мультиверсионных моделей, впервые позволивший получить верхнюю и нижнюю границы надежности. Для возможности получения оценок предложены модели «деревьев сбоев» и корректности.

Созданы модификации алгоритмов принятия решения в мультиверсионных системах, взвешенные алгоритмы голосования согласованным большинством с элементом забывания в четкой и нечеткой интерпретации, и $t/(n-1)$ алгоритм в нечетких компараторах.

Разработан новый инструмент предсказания времени наработки на отказ на основе дезвтрафикационной модели.

Значение для науки и практики результатов диссертационной работы заключается в достижении цели работы, направленной на повышение отказоустойчивости разрабатываемого программного обеспечения за счет получения оценок надежности программных модулей на этапе проектирования и алгоритмов принятия решения в мультиверсионных системах.

Значение для теории состоит в разработке новых методов оценки надежности мультиверсионных систем, новых взвешенных алгоритмов голосования с забыванием, методики предсказания времени наработки на отказ. Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, создают теоретическую основу для разработки новых технологий

проектирования мультиверсионного программного обеспечения сложных систем управления.

Значение для практики состоит в предложенной технологии разработки отказоустойчивых программных комплексов систем управления, которая позволяет автоматизировать процесс решения задачи компоновки состава мультиверсионного программного комплекса, выбрать алгоритмы принятия решения, сформировать требования к надежности составляющих систему программных блоков.

Применение модифицированных алгоритмов голосования не только увеличивает устойчивость мультиверсионных систем к межверсионным ошибкам, но и способствует увеличению надежности системы в целом.

Применение методики предсказания времени наработки на отказ существенно сокращает время на этапе тестирования, поскольку дает возможность тестировать систему не в масштабе реального времени, а настолько быстрее, насколько производительна тестовая платформа, что позволяет гарантировать время наработки на отказ в месяцах, затрачивая на тестирование на порядок меньшие промежутки времени.

Реализованная имитационная среда моделирования мультиверсионных программных комплексов позволяет тестировать и получать характеристики исследуемых моделей, предложенных модифицированных алгоритмов голосования, а также дает возможность их сравнения в одинаковых условиях с классическими алгоритмами.

Практические результаты диссертационной работы рекомендуются к применению на предприятиях авиакосмической отрасли, в научно-исследовательских и проектных организациях, таких как АО «ИСС», АО НПП «Радиосвязь», АО ЦКБ «Геофизика», ФГУП ГХК и др., осуществляющих разработку отказоустойчивых программных комплексов, в том числе для встраиваемых систем управления реального времени,

Публикации. Соискателем по тематике данной работы опубликовано 19 печатных работ, из них пять статей в журналах перечня ВАК РФ и шесть в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и/или Scopus. Получено четыре свидетельства о регистрации программных систем в Роспатенте.

Обзор диссертационной работы.

Во *введении* представлена общая характеристика проблемы, обоснована актуальность выбранной темы, определены цель и задачи исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В *первой главе* диссертационной работы автором рассмотрены теоретические и практические аспекты проектирования отказоустойчивых систем управления, надежности характеристик программных модулей, механизмов обеспечения надежности программ с помощью введения избыточности, рассмотрены различные модели надежности ПО. Проведено исследование методов повышения надежности программных систем, в том

числе, анализ моноверсионных моделей и мультиверсионных, произведен сравнительный анализ рассмотренных моделей, сделаны выводы.

Во *второй главе* рассмотрена модель системы управления и ее программной составляющей. Проведен анализ необходимости применения ОС на целевых аппаратных платформах. Произведен сравнительный анализ существующих операционных систем реального времени, приведено обоснование выбора FreeRTOS. Проанализирована логика работы выбранной ОСРВ, сформулированы необходимые модификации. В результате сформирована блочно-модульная структура типового программного комплекса системы управления.

В *третьей главе* предложен комбинированный селективный алгоритм для решения задачи выбора применяемых в блоке принятия решения моделей повышения отказоустойчивости ПО. Для оценки нижней границы надежности предложен модифицированный алгоритм расчета «деревьев сбоев». Алгоритм расширен для возможности учитывать и аппаратные и программные сбои. Для расчета верхней границы надежности предложена методика расчета параметра корректности.

Полученный алгоритм реализован программно и обеспечивает моделирование СУ с программной избыточностью, позволяя задавать ее надежность характеристики. Приведены результаты работы программных инструментов, сделаны выводы.

В *четвертой главе* исследованы базовые алгоритмы голосования, сделан вывод о недостаточной устойчивости существующих алгоритмов к межверсионным ошибкам. Предложены модификации базовых алгоритмов голосования согласованным большинством и нечеткого голосования согласованным большинством, необходимые для повышения надежности блока принятия решения. Впервые предложена нечеткая модификация $t/(n-1)$ алгоритма, она заключается во введении нечеткой логики в компараторы.

Модифицированные алгоритмы были реализованы в программном инструменте – имитационной среде, с целью их проверки и сравнения эффективности. Исследованы результаты работы имитационной среды моделирования, сделаны выводы.

В *пятой главе* представлена разработанная имитационная среда, реализующая все рассмотренные мультиверсионные модели и модифицированные алгоритмы голосования в них. Представлены и проанализированы результаты моделирования.

Реализована мультиверсионная среда исполнения реального времени на основе ОСРВ FreeRTOS v10, в ней реализован блок принятия решения, выделенные очереди, функции, реализующие предложенные модели и алгоритмы, которые запускаются в виде отдельных потоков. Исследованы результаты выполнения реальной задачи. Результаты показали применимость и эффективность предложенных подходов и решений.

Предложена дезэвтрофикационная модель предсказания времени наработки на отказ и ее программная реализация. Проведено исследование

экспериментальных данных о результатах тестирования программного обеспечения на достаточно крупной выборке (397 точек).

В *заключении* сформулированы основные выводы и результаты, полученные в диссертационной работе.

Замечания

Практическая реализация мультиверсионной среды исполнения была протестирована на наборе из 100 распознанных голосовых команд и 500 результатах работы алгоритмов оптимизации. Возможно ли увеличение количества тестовых данных в случае расширения практической реализации данной программной системы, а также в случае другой прикладной задачи?

Также, касаясь практической реализации, следует отметить, что она описана в несколько сжатом виде, хотя автором отмечается наличие программных комплексов, прошедших регистрацию в Роспатенте.

Вопрос увеличения количества тестовых данных относится и к предложенной автором деэвтрафикационной модели предсказания времени наработки на отказ. Следовало сравнить результат для различных протестированных программных систем.

Касаясь оформления диссертации, следует отметить, что рисунок 5 на странице 45 отпечатан в неверной ориентации, что влияет на его информативность для читателя. В графиках на страницах 135-138, 153-157, 167 и 179 используются цвета линий в качестве легенды, но при печати линии практически неразличимы.

Заключение

Диссертационная работа Сарамуда Михаила Владимировича является завершенной научно-квалификационной работой, содержит новые научные результаты и выполнена на актуальную тему. Указанные выше замечания не снижают научной значимости и практической ценности диссертационной работы.

Предложенные в работе модели и методы имеют существенное значение для разработки специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

Утверждения диссертации и достоверность полученных результатов подтверждается итогами моделирования в имитационной среде и реализованной мультиверсионной средой исполнения реального времени, проведенными тестами системы на реальной задаче. Полученные результаты полностью соответствуют цели и задачам диссертации.

Основные положения и результаты работы прошли всестороннюю апробацию на девяти международных конференциях.

Автореферат корректно отражает содержание диссертации. Оформление автореферата и диссертации соответствует требованиям ВАК РФ.

Диссертационная работа удовлетворяет требованиям ВАК РФ,

предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации (космические и информационные технологии), а ее автор - Сарамуд Михаил Владимирович - заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Диссертация и отзыв на нее заслушаны, обсуждены и одобрены на заседании научно-технического семинара НИИ Автоматики и электромеханики ТУСУР. На заседании присутствовало 12 человек. Результаты голосования: за – 12, против – 0, воздержавшихся – 0, протокол № 7 от «24» июля 2018 г.

Председатель семинара,
заместитель директора по научной работе
НИИ АЭМ ТУСУР
к.т.н., доцент

И.В. Целебровский