

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ И СИСТЕМ/ RESEARCH AND DEVELOPMENT OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT AND SYSTEMS

DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14
УДК 004.9

Моделирование алгоритмов катастрофоустойчивости групп роботов на программно-аппаратной платформе «Эльбрус»

Н. А. Бочаров¹¹ ПАО «Институт электронных управляющих машин им. И. С. Брука»

В условиях эксплуатации групп наземных робототехнических комплексов (НРТК) военного назначения из-за целенаправленных действий противоборствующей стороны могут возникать многочисленные отказы, которые приводят к внезапному изменению состояния системы и, следовательно, относятся к категории катастрофических отказов. В этом случае встает вопрос обеспечения катастрофоустойчивости – способности к продолжению работы группы роботов с частичной допустимой потерей эффективности. Существенный, но до настоящего времени не решенный вопрос, касающийся НРТК, – их оснащение вычислительной техникой, разработанной на базе отечественных микропроцессоров и программного обеспечения. В статье предложены методы и алгоритмы, служащие основой для создания катастрофоустойчивых систем управления НРТК на основе вычислительных комплексов и общего программного обеспечения отечественного производства. Разработаны алгоритмы для обеспечения устойчивости бортовых систем управления к катастрофическим отказам. Получены численные результаты, показывающие увеличение времени функционирования групп роботов при возникновении катастрофических отказов. Полученные результаты улучшают возможности импортозамещения в области робототехники.

Ключевые слова: бортовые системы управления, катастрофоустойчивость, реконфигурация, робототехника, моделирование

Для цитирования:

Бочаров Н. А. Моделирование алгоритмов катастрофоустойчивости групп роботов на программно-аппаратной платформе «Эльбрус» // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 3. С. 8–14. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14

© Н. А. Бочаров, 2019



Modeling of algorithms of disaster tolerance of robot groups on hardware and software Elbrus

N. A. Bocharov¹

¹Institute of Electronic Control Computers named after I. S. Brook, Moscow, Russia

In operation of ground-based robotic systems for military purposes, due to target actions of an opposing party, numerous failures might occur that lead to a suddenly changed state of the system and, therefore, fall into the category of catastrophic failures. In this case, we face the question of providing the disaster tolerance as an ability of a group of robots to continue operations with partially lost efficiency. A significant but still unresolved issue regarding ground-based robot systems is their equipment with computing equipment developed on domestic microprocessors and software. The paper includes offered techniques and algorithms that serve as a basis for building of disaster-tolerant control systems of ground-based robot systems based on domestic computer systems and software. Authors have developed the algorithms to ensure tolerance of on-board control systems against catastrophic failures. Authors have received numerical results that show the increased operation time of groups of robots in case of catastrophic failures. The findings improve import substitution options in the field of robotics.

Keywords: on-board control systems, disaster tolerance, reconfiguration, robotics, simulation

For citation:

Bocharov N. A. Modeling of algorithms of disaster tolerance of robot groups on hardware and software Elbrus. Radio industry (Russia), 2019, vol. 29, no. 3, pp. 8–14. (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14

Введение

Исследования в области создания автономных робототехнических комплексов ведутся во многих мировых научных центрах, в том числе в российских. Развитие возможностей сенсорных систем, систем глобальной навигации, рост вычислительной мощности и совершенствование алгоритмов позволяют создавать робототехнические комплексы, обладающие широкими интеллектуальными возможностями. В последнее время большое внимание уделяется исследованиям в области групповой робототехники. Преимущества использования групп мобильных роботов – большой радиус действия, расширенный набор выполняемых функций и более высокая вероятность успешного выполнения задания за счет перераспределения целей и задач внутри группы.

При групповом использовании роботов различного назначения возникает ряд задач, связанных как с управлением, так и с организацией взаимодействия. Одной из важных является проблема отказоустойчивости и живучести. В определенных условиях эксплуатации групп роботов могут возникать многочисленные критические отказы. Эти отказы приводят к внезапному и резкому изменению состояния системы и, следовательно, относятся к категории катастрофических отказов. Парирование катастрофических отказов может быть осуществлено с использованием бортовых вычислительных сетей, способных произвести реконфигурацию системы управления группой

роботов, поэтому задача создания структуры вычислительной сети, которая обеспечит катастрофоустойчивость группы роботов, актуальна. Также существенным, но до сих пор не решенным вопросом является оснащение наземных робототехнических комплексов (НРТК) вычислительной техникой, разработанной на базе отечественных микропроцессоров и отечественного программного обеспечения [1].

Поскольку робототехника является одним из перспективных направлений применения вычислительных комплексов (ВК) и общего программного обеспечения (ОПО) семейства «Эльбрус» [2–8], одной из целей данной работы было исследование применимости ВК и ОПО «Эльбрус» [9] для обеспечения катастрофоустойчивости бортовых вычислительных систем.

В статье введено определение катастрофоустойчивости бортовой вычислительной системы, проведен анализ показателей катастрофоустойчивости, предложены метод адаптивного резервирования для обеспечения катастрофоустойчивости и метод мониторинга и диагностики отказов, а также алгоритм реконфигурации бортовой вычислительной сети с использованием ВК и ОПО «Эльбрус».

Понятие катастрофоустойчивости робота

В общем случае под катастрофоустойчивостью понимается способность системы (которая может состоять из нескольких подсистем) сохранить критически важные данные и продолжать выполнять свои функции после массового (возможно, целенаправ-

ленного) уничтожения ее компонентов в результате различных катаклизмов (как природного характера, так и инспирированных человеком) или, в случае нарушения ее доступности, за минимальное время восстановить свою работоспособность.

Применительно к рассматриваемой задаче, т. е. к эксплуатации групп НРТК военного назначения, под обеспечением катастрофоустойчивости будем понимать способность группы роботов к продолжению работы с частичной допустимой потерей эффективности. Увеличение времени функционирования группы роботов будет наиболее важным показателем, поскольку тактическая информация даже с частично неисправного робота может существенно повлиять на выполнение задачи всей группы. Так, например, робот с вышедшими из строя шасси или датчиками может служить в качестве ретранслятора данных или источника дополнительных вычислительных ресурсов для остальной группы.

При решении задачи катастрофоустойчивости необходимо учитывать, что помимо основного (естественного) потока отказов [10], которые являются следствием ошибок, сбоев и т. д., есть поток отказов, вызванных целенаправленными попытками нанести повреждения роботу. Такие отказы могут быть, например, результатом выстрела в робота или тарана. Этот поток назовем потоком катастрофических отказов. Введем обозначения: λ_1 – интенсивность потока естественных отказов, λ_2 – интенсивность потока катастрофических отказов. Таким образом, общий поток отказов для бортового ВК будет определяться суммой λ_1 и λ_2 .

В большинстве случаев задача обеспечения отказоустойчивости бортовых ВК уже решена, поэтому предлагаемый в данной статье метод направлен на обеспечение устойчивости к потоку катастрофических отказов. Заметим, что при эксплуатации робота в условиях боевых действий или при иной угрозе нанесения целенаправленного вреда роботу интенсивность потока катастрофических отказов будет существенно выше интенсивности потока естественных отказов, т. е. $\lambda_2 \gg \lambda_1$. Таким образом, рассматриваемая задача обеспечения катастрофоустойчивости сводится к повышению вероятности безотказной работы при высокой интенсивности потока отказов.

При такой постановке задачи можем принять, что компоненты ВК имеют достаточно высокую надежность, чтобы обеспечивать работу робота при нормальных условиях, в которых возникают только естественные отказы. Поэтому предлагаемый метод обеспечения катастрофоустойчивости будет сосредоточен на обеспечении устойчивости к катастрофическим отказам, поток которых возникает кратковременно и интенсивно.

Режимы работы наземных робототехнических комплексов

Применительно к НРТК военного назначения (ВН) в период нормальной работы будем считать, что НРТК ВН может функционировать в одном из трех режимов, характеризующихся сложившейся обстановкой и соответствующим потоком отказов:

- 1) режим подготовки. Робот движется к назначенной цели, ведет активную работу с системами технического зрения, строит подробные карты проходимости и т. д. В этом режиме поток катастрофических отказов находится практически на нулевом уровне, а поток естественных отказов – на обычном. Риск получения физического урона или несанкционированного доступа в систему управления минимален;
- 2) режим повышенной боевой готовности. Робот находится близко к зоне боевых действий и должен быть готов к переходу в режим боевых действий. В этом режиме уровень потока катастрофических отказов растет, поэтому должны быть применены соответствующие методы, обеспечивающие своевременное переключение в режим боевых действий при возросшей угрозе возникновения катастрофических отказов;
- 3) режим боевых действий. Роботу непосредственно угрожают противоборствующие элементы, велик риск получения серьезного физического урона или несанкционированного доступа в систему управления. В данном режиме показатель потока катастрофических отказов λ_2 возрастает до своего максимального значения и становится значительно больше потока естественных отказов ($\lambda_2 \gg \lambda_1$).

Метод адаптивного резервирования

Один из основных методов обеспечения дополнительной надежности объекта – резервирование. Метод реализуется благодаря использованию дополнительных средств и возможностей, которые являются избыточными относительно минимально необходимых для выполнения требуемых функций. Наиболее частая реализация метода резервирования – включение параллельно объекту резервирования дополнительных средств, которые полностью или частично дублируют его функции и способны взять на себя его задачи при возникновении отказа.

В рамках данной работы предполагается, что робот может эксплуатироваться в трех режимах: режиме подготовки, режиме повышенной боевой готовности и режиме боевых действий. Эти режимы отличаются интенсивностью отказов, вычислительной нагрузкой и временными ограничениями. В силу

этого предлагается использование адаптивного резервирования для вычислительных модулей (ВМ), которое предполагает смену схем резервирования в зависимости от режима функционирования робота. Режим функционирования робота определяется интенсивностью потока катастрофических отказов и характеризуется решаемыми задачами, а также временем реакции на отказ.

Выбор схемы резервирования описывается следующей системой:

$$\left\{ \begin{array}{l} r(m1) \rightarrow (\lambda = \lambda_{\min}; V = V_{\max}) = \\ = \text{теплый резерв, } t_{\pi} \geq 0 \\ r(m2) \rightarrow (\lambda_{\min} < \lambda < \lambda_{\max}; V < V_{\max}) = \\ = \text{горячий резерв, } t_{\pi} < 1 \text{ с,} \\ r(m3) \rightarrow (\lambda = \lambda_{\max}; V = \frac{V_{\max}}{n}) = \\ = \text{горячий резерв, } t_{\pi} < 0,1 \text{ с} \end{array} \right. ,$$

где $m1$ – режим подготовки; $m2$ – режим повышенной боевой готовности; $m3$ – режим боевых действий; t_{π} – время на переключение с основного вычислительного модуля на резервный; V – объем используемых вычислительных ресурсов на работу с датчиками; V_{\max} – максимальный доступный объем вычислительных ресурсов на всех вычислительных модулях; n – количество вычислительных модулей; λ – значение потока отказов; λ_{\min} – минимально возможное значение потока отказов; λ_{\max} – максимальное возможное значение потока отказов.

Поскольку параметр потока интенсивности катастрофических отказов не поддается контролю, параметры вычислительных ресурсов и времени реакции на отказ являются ключевыми для реализации метода адаптивного резервирования. Программно-аппаратное обеспечение НРТК должно иметь возможности по установке указанных параметров. Переключение между схемами резервирования происходит либо по сигналу оператора, либо в результате изменения значения оценочной функции, которая определяет наиболее подходящий режим работы на основе тактических данных.

Алгоритмы мониторинга и диагностики отказов

Диагностика отказов бортового ВК базируется на использовании средств операционной системы реального времени (ОСРВ) вычислительного модуля и специальных аппаратных средств и позволяет обнаруживать отказ, определять степень его критичности для сети и запускать реконфигурацию за минимальное время после возникновения отказа.

Для бортовых вычислительных систем, работающих в режиме жесткого РВ, отказом модуля считается ситуация, когда нет подтверждения «я живой» в течение заданного интервала времени.

В ОС «Эльбрус» точность единого времени обес-

печивается специальным внешним устройством – базовой станцией системы точного времени (БС СТВ). Без БС СТВ ВК работает с использованием собственных средств, определяющих текущее время. При инициализации операционной системы выполняется чтение текущего времени из устройства RTC (Real Time Clock, или энергонезависимые CMOS-часы). В дальнейшей работе операционная система при каждом таймерном прерывании к текущему времени прибавляет 10 мс или уточненную величину, которую получила через системный вызов `adjtimex()` в параметре `tick`. Каждую секунду БС СТВ посылает пакет данных о текущем времени с точностью до секунды по каналу RS-422 и импульс точной секунды, который принимается в ВК устройством модуля приема времени (МПВ, МПВ/М).

При поступлении прерывания драйвер МПВ анализирует регистр входных прерываний МПВ. Если обнаружено, что на данный вход поступил сигнал, считываются регистр счетчика времени этого входа (корректирующий счетчик) и текущее время операционной системы. На основании этих данных пользователю будет выдано время поступления прерывания `intr_appear_nsec` на вход модуля привязки времени в операции `read()`. На резервной машине вызывается функция `ioctl(fd_in_i, MPVIO_LSTN_ALIVE, interval_mcsec)`, драйвер устанавливает режим генерации прерываний по данному входу `fd_in_i` и устанавливает режим прослушивания сигнала «я живой» по данному входу МПВ. В этом режиме контроллер МПВ не посылает сгенерированные сигналы, а использует их для обнаружения исчезновения сигналов «я живой»: если за два периода не поступит ни одного сигнала «я живой», контроллер начинает выдавать прерывания с заданной периодичностью. Параметр `interval_mcsec` задает периодичность выдаваемых сигналов «я живой».

Помимо прочего, существует проблема синхронизации начальной инициализации резервной и резервируемой машин. Чтобы отличить случай исчезновения сигнала «я живой» от ложного случая, когда прослушивание уже началось, а сигнал «я живой» еще не начал поступать, принято следующее решение. Драйвер сначала ожидает поступление сигнала «я живой», причем пропускает первые, возможно, ложные, сигналы. И только после поступления десяти сигналов драйвер включает режим контроля исчезновения сигнала «я живой» и выключает этот режим после второго прерывания об исчезновении сигнала. Вся эта последовательность действий выполняется в рамках одного вызова `ioctl()`. Следует подчеркнуть, что время обнаружения неисправности равно двойному заданному интервалу посылки (и интервалу прослушивания) сигналов «я живой».

Алгоритм реконфигурации бортовой вычислительной сети при отказе части оборудования

При возникновении отказа в резервированной вычислительной системе необходимо провести соответствующую реконфигурацию, которая будет учитывать сниженную производительность бортовой сети или отказ некоторых каналов связи. Вследствие этого появилась необходимость разработать алгоритм реконфигурации бортовой вычислительной сети при отказе части оборудования.

Под бортовой вычислительной сетью будем понимать вычислительный многомашинный комплекс, включающий в себя множество машин одного типа (класса), объединенных в целях установления конфигурации, обмена служебными сообщениями ОСРВ и сообщениями функциональных программ стандартными сетевыми средствами, а также оптическими каналами. Многомашинные комплексы, на основе которых реализуются системы реального времени (СРВ), являются специализированными локальными сетями, к которым предъявляется ряд жестких требований по составу физических каналов связи, скорости передачи информации, надежности и скорости доставки сообщений.

Концепцию архитектуры, резервируемой на основе однородных ВМ, иллюстрирует рис. 1, на кото-

ром приведен пример бортовой вычислительной сети и показаны основные связи, реализующие одну из схем резервирования.

Каждый ВМ связан со всеми другими ВМ через локальную сеть. Каналы локальной сети в первую очередь предназначены для передачи информации управления многомашинным комплексом, а также диагностической и отладочной информации о работе СРВ.

При отказе одного из основных ВМ на резервном происходит рестарт соответствующего кода функциональных программ с последней согласованной контрольной точки. При этом ОСРВ выводит отказавший ВМ из работы, а резервному, принявшему на себя функции основного, присваивает статус основного. Для этого предполагается использование аппаратно-программных средств перезапуска системы при невыполнении ядром операционной системы контрольных действий по установке системного сторожевого таймера. Сторожевой таймер – совокупность аппаратного обеспечения и программных средств, позволяющих перезапустить ОС вследствие программной или аппаратной ошибки.

В случае использования в качестве ОСРВ операционной системы «Эльбрус» процесс работы со сторожевым таймером выглядит следующим образом. Пользовательский процесс-демон через равные про-

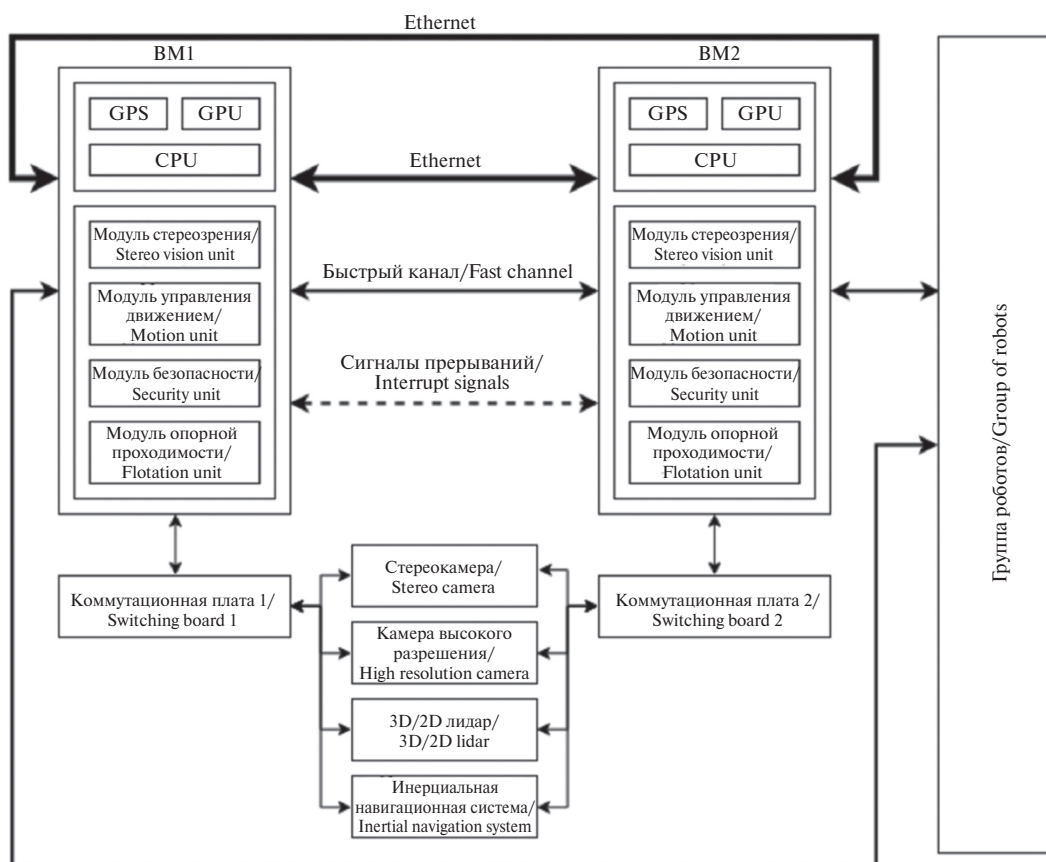


Рисунок 1. Пример бортовой вычислительной сети и основные функциональные связи: GPS – система глобального позиционирования; GPU – графический процессор; CPU – центральный процессор
Figure 1. Example of on-board computer network and main functional links: GPS – a global positioning system, GPU – a graphics processing unit, CPU – a central processing unit

межутки времени уведомляет драйвер сторожевого таймера через специальное устройство /dev/watchdog о том, что он до сих пор работоспособен. При получении такого уведомления драйвер программирует сторожевой таймер таким образом, чтобы отложить перезагрузку операционной системы на некоторое время. Если по какой-то причине уведомления не произошло, сторожевой таймер перезагрузит операционную систему по истечении заданного интервала.

Перенос вычислений с основной машины на резервную может выполняться как автоматически (в случае отказа основной), так и оператором; восстановление же конфигурации после ремонта осуществляется только по командам оператора.

К сети на основе ВМ с помощью стандартных сетевых средств типа Ethernet, а также посредством быстрых каналов могут подключаться машины других типов, использование которых позволит реализовать в конкретных СРВ разветвленные связи с различными устройствами.

Моделирование алгоритмов обеспечения катастрофоустойчивости

Для моделирования разработанных алгоритмов был разработан и реализован комплекс, состоящий из моделей группового управления роботами, технического зрения, мониторинга отказов, реконфигурации бортовой вычислительной сети, задачи обеспечения катастрофоустойчивости группы роботов. Определен критерий эффективности, зависящий от режима эксплуатации робота:

$$\text{eff} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=0}^n \text{eff}_i}{n}, & r = m1 \\ \frac{2 \frac{\sum_{i=0}^n \text{eff}_i}{n} + \frac{\sum_{i=0}^n \text{eff}_i}{n}}{2}, & r = m2. \\ \frac{\sum_{i=0}^n \text{eff}_i}{n}, & r = m3 \end{cases}$$

Для оценки эффективности распределенной вычислительной сети группы роботов был проведен эксперимент с использованием разработанной модели. Средствами модели имитировалась серия катастрофических отказов фиксированной длины в случайных ВМ. Были рассмотрены три конфигурации, соответствующие различным вариантам использования разработанных алгоритмов:

- 1) алгоритмы обеспечения катастрофоустойчивости не используются;
- 2) используется алгоритм мониторинга и диагностики отказов;

- 3) используются алгоритм мониторинга и диагностики отказов и алгоритм реконфигурации при отказе.

Эксперимент проводился на ВК на базе микропроцессора «Эльбрус-4С». Усредненные результаты моделирования для трех конфигураций представлены на рис. 2.

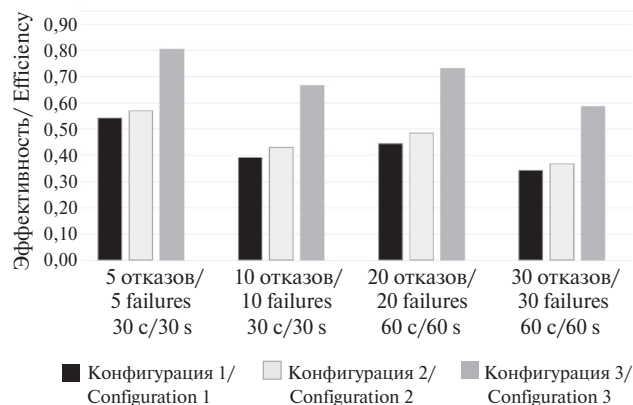


Рисунок 2. Усредненные результаты моделирования для трех конфигураций
Figure 2. Average results from three simulated configurations

На основании проведенного эксперимента можно сделать вывод, что использование метода мониторинга и диагностики отказа вместе с методом реконфигурации бортовой вычислительной сети повышает эффективность распределенной вычислительной системы группы роботов на 50–71% по установленному критерию.

Выводы

В статье рассмотрены алгоритмы обеспечения катастрофоустойчивости бортовых систем управления группы НРТК. Авторами было введено определение катастрофоустойчивости робота, рассмотрены способы ее обеспечения с использованием избыточности разного типа. Предложен метод обеспечения катастрофоустойчивости с использованием средств адаптивного резервирования. На его основе разработаны соответствующие алгоритмы, учитывающие особенности ВК и ОПО «Эльбрус» отечественного производства. Показано, что модифицированная разработанными методами распределенная вычислительная сеть группы роботов имеет эффективность по установленному критерию на 50–71% больше, чем классическая при наличии возможностей для адаптивного резервирования.

Использование отечественных вычислительных средств и сертифицированного ОПО «Эльбрус» позволяет говорить о перспективах решения задач импортозамещения в области робототехники.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №17-29-03297).

ACKNOWLEDGMENT

The Russian Foundation for Basic Research supported the study (project no. 17-29-03297).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бычков И. Н., Глухов В. И., Трушкин К. А. Доверенная программно-аппаратная платформа «Эльбрус». Отечественное решение для АСУ ТП КВО // Информатизация и системы управления в промышленности. 2014. № 1 (49). С. 66–71.
2. Бычков И. Н., Лобанов И. Н., Молчанов И. А. Вычислительная техника на основе аппаратно-программной платформы «Эльбрус» для перспективных информационных систем // Приборы. 2018. № 8. С. 14–20.
3. Глухов А. В., Прилипко В. А., Красовский В. Е. Разработки управляющей вычислительной техники в ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука» на базе российских микропроцессоров // Приборы. 2018. № 8. С. 8–13.
4. Парамонов Н. Б., Ржевский Д. А., Перекаатов В. И. Доверенная программно-аппаратная среда «Эльбрус» бортовых вычислительных средств робототехнических комплексов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. 2015. № 1.
5. Производительность вычислительной техники с процессором «Эльбрус-8с» на задачах робототехнического комплекса / Н. А. Бочаров, Н. Б. Парамонов, Г. С. Тимофеев, О. Ю. Панова // Наноиндустрия. 2018. № 82. С. 79–84.
6. Парамонов Н. Б., Егоров Г. А., Семенихин С. В. Предпроектное моделирование систем управления наземных роботов на вычислительных комплексах Эльбрус // Приборы. 2016. № 7 (193). С. 11–16.
7. Ким А. К., Перекаатов В. И., Ермаков С. Г. Микропроцессоры и вычислительные комплексы семейства «Эльбрус». СПб.: Питер, 2013. 272 с.
8. Оценка быстродействия системы распознавания на VLIW архитектуре на примере платформы Эльбрус / Е. Е. Лимонова, Н. А. Бочаров, Н. Б. Парамонов, Д. С. Богданов, В. В. Арлазаров, О. А. Славин, Д. П. Николаев // Программирование. 2019. № 1. С. 15–21.
9. Микроархитектура восьмиядерного универсального микропроцессора «Эльбрус-8С» / Д. М. Альфонсо, Р. В. Деменко, А. С. Кожин, Е. С. Кожин, Р. Е. Колычев, В. О. Костенко, Н. Ю. Поляков, Е. В. Смирнова, Д. А. Смирнов, П. А. Смольянов, В. В. Тихорский // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 3. С. 6–13.
10. Калявин В. П. Надежность и диагностика. СПб.: Элмор, 1998. 230 с.

REFERENCES

1. Bychkov I. N., Glukhov V. I., Trushkin K. A. Elbrus Trusted Hardware-software Solution. Homemade Solution for AODB Critical Assets. *Informatizatsiya i sistemy upravleniya v promyshlennosti*, 2014, no. 1 (49), pp. 66–71. (In Russian).
2. Bychkov I. N., Lobanov I. N., Molchanov I. A. Computing Equipment Based on Elbrus Hardware-software Solution for Advanced Information Systems. *Pribory*, 2018, no. 8, pp. 14–20. (In Russian).
3. Glukhov A. V., Prilipko V. A., Krasovskii V. E. Development of Control Computing Equipment by PJSC «INEUM named after I.S. Brook» based on Russian microprocessors. *Pribory*, 2018, no. 8, pp. 8–13. (In Russian).
4. Paramonov N. B., Rzhetskii D. A., Perekatov V. I. Trusted software and hardware environment Elbrus on-board computing means robotic complexes. *Voprosy radioelektroniki*, Ser. EVT, 2015, no 1. (In Russian).
5. Bocharov N. A., Paramonov N. B., Timofeev G. S., Panova O. Yu. Performance of Computing Equipment with Elbrus-8c Processor with Robotic System's Tasks. *Nanoindustriya*, 2018, no. 82. pp. 79–84. (In Russian).
6. Paramonov N. B., Egorov G. A., Semikhin S. V. Pre-design Simulation of Control Systems of Ground-based Robot Systems on Elbrus Computing Complexes. *Pribory*, 2016, no. 7 (193), pp. 11–16. (In Russian).
7. Kim A. K., Perekatov V. I., Ermakov S. G. *Mikroprotsessory i vychislitelnye komplekсы semeystva Elbrus* [Microprocessors and Computing Complexes of the Elbrus Family]. St. Petersburg, Piter Publ., 2013, 272 p. (In Russian).
8. Limonova E. E., Bocharov N. A., Paramonov N. B., Bogdanov D. S., Arlazarov V. V., Slavin O. A., Nikolaev D. P. Evaluated Speed-of-response of Recognition System on VLIW Architecture, the Case of the Elbrus Solution. *Programmirovaniye*, 2019, no. 1, pp. 15–21. (In Russian).
9. Alfonso D. M., Demenko R. V., Kozhin A. S., Kozhin E. S., Kolychev R. E., Kostenko V. O., Polyakov N. Yu., Sмирнова E. V., Smirnov D. A., Smolyanov P. A., Tikhorskii V. V. Eight-core “Elbrus-8c” processor microarchitecture. *Voprosy radioelektroniki*, 2016, no. 3. pp. 6–13. (In Russian).
10. Kalyavin V. P. *Nadezhnost i diagnostika* [Reliability and diagnostics]. St. Petersburg, Elmor Publ., 1998, 230 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Бочаров Никита Алексеевич, начальник отдела, ПАО «Институт электронных управляющих машин им. И. С. Брука», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: +7 (499) 135-53-36, e-mail: bocharov.na@phystech.edu.

AUTHOR

Nikita A. Bocharov, head of department, Institute of Electronic Control Computers named after I. S. Brook, 24, ulitsa Vavilova, Moscow, 119334, Russia, tel.: +7 (499) 135-53-36, e-mail: bocharov.na@phystech.edu.

Поступила 29.04.2019; принята к публикации 20.05.2019; опубликована онлайн 21.08.2019.
Submitted 29.04.2019; revised 20.05.2019; published online 21.08.2019.