

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

BRIEF PAPERS

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-362-365

УДК 004.2

**Платформа для киберфизических систем с многоуровневой организацией
и смешанной критичностью вычислительных процессов**

**Алексей Евгеньевич Платунов¹, Аркадий Олегович Ключев²,
Василий Юрьевич Пинкевич³✉, Владислав Аркадьевич Ключев⁴**

^{1,2,3,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ aeplatunov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3003-3949>

² kluchev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3892-8424>

³ vupinkevich@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-8635-5026>

⁴ vakluchev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3052-2200>

Аннотация

Представлены результаты разработки программно-аппаратной конфигурируемой платформы, предназначенной для создания сложных киберфизических систем, например, таких как многооперационные технологические и лабораторные роботизированные установки, подразумевающие параллельное выполнение прикладных заданий с учетом ограничений реального времени. Разработанная архитектура платформы позволяет сочетать системные и прикладные вычислительные процессы со смешанной по характеру требований реального времени критичностью функций. В рамках создания платформы предложены специализированные модели организации вычислительного процесса с необходимым инструментарием и языками разработки, методы создания компонентов платформы, архитектурные шаблоны проектирования целевых систем на базе платформы. Представлены планы дальнейшего развития и использования платформы.

Ключевые слова

программно-аппаратная платформа, системы со смешанной критичностью, киберфизические системы, встраиваемые системы, системы реального времени

Ссылка для цитирования: Платунов А.Е., Ключев А.О., Пинкевич В.Ю., Ключев В.А. Платформа для киберфизических систем с многоуровневой организацией и смешанной критичностью вычислительных процессов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 2. С. 362–365. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-362-365

**A platform for cyber-physical systems with multi-level organization
and mixed critical computing processes**

Alexey E. Platunov¹, Arkady O. Kluchev², Vasilii Yu. Pinkevich³✉, Vladislav A. Kluchev⁴

^{1,2,3,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ aeplatunov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3003-3949>

² kluchev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3892-8424>

³ vupinkevich@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-8635-5026>

⁴ vakluchev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3052-2200>

Abstract

The article presents results of the development of a software and hardware configurable platform designed to create complex cyber-physical systems, for example, such as multi-operational technological and laboratory robotic installations involving parallel execution of applied tasks with real-time constraints. The developed architecture of the platform allows combining system and application computing processes with a mixed nature of real-time requirements for critical functions. As part of the creation of the platform, we proposed specialized models of the computing process organization with the necessary tools and development languages, methods for creating platform components, and

architectural design patterns for target systems based on the platform. Plans for further development and use of the platform are presented.

Keywords

hardware and software platform, mixed-critical systems, cyber-physical systems, embedded systems, real-time systems

For citation: Platonov A.E., Kluchev A.O., Pinkevich V.Yu., Kluchev V.A. A platform for cyber-physical systems with multi-level organization and mixed critical computing processes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 2, pp. 362–365 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-362-365

Для сложных киберфизических систем характерно использование вычислительных компонентов, обеспечивающих выполнение широкого спектра функций, а также высокая степень интеграции вычислительных компонентов с оконечным технологическим оборудованием. На архитектуру и организацию рассматриваемых вычислительных систем существенно влияет такая особенность их функционального наполнения, как смешанная критичность — необходимость выполнять множество вычислительных задач с кардинально различающимися требованиями реального времени выполнения и устойчивости к сбоям [1]. Организация соблюдения всех необходимых временных ограничений в таких условиях при разумном уровне избыточности проектных решений является нетривиальной задачей [2, 3].

Авторы настоящей работы имеют многолетний опыт создания сложных встроенных и киберфизических систем с использованием оригинальной HLD-методологии (High Level Design Methodology) высокоуровневого проектирования встраиваемых систем [4–6]. По сравнению с традиционными маршрутами проектирования, она позволяет сокращать сроки и повышать качество создаваемых систем за счет того, что большее количество проектных решений принимаются на ранних этапах создания системы, работая с представлениями системы на абстрактных уровнях.

В работах [7, 8] сформулированы требования, рассмотрены проблемы и предложены основные архитектурные принципы создания конфигурируемой программно-аппаратной платформы систем со смешанной критичностью, предназначенной для автоматизации сложных многооперационных технологических и лабораторных роботизированных установок. В настоящей работе представлены основные результаты, полученные в процессе микроархитектурного проектирования платформы, а также описаны направления развития платформы.

Под платформой понимается совокупность взаимосвязанных в рамках единой архитектуры спецификаций, проектных решений и компонентов, зафиксированных для повторного использования.

Рассматриваемая платформа внедрена в коммерческом проекте, предполагающем разработку программно-аппаратных комплексов для семейства лабораторных установок, одновременно выполняющих множество экспериментов в автоматическом режиме. Одно из требований к платформе — поддержка возможности ее конфигурирования на нескольких уровнях организации вычислительного процесса (от набора физических устройств до алгоритмов многостадийных процедур управления с ограничениями жесткого реального времени), осуществляемая в несколько этапов разными категориями специалистов.

Разработана и формализована модель организации вычислительного процесса для управления многооперационными установками с несколькими уровнями исполнения прикладных заданий, позволяющая покрывать требования установок заданного класса. В нее входят форматы входных заданий, методы организации их взаимодействия, алгоритмы планирования и выполнения. Поступающие в систему от оператора прикладные задания представляют собой цепочки управляющих процедур для последовательного и параллельного выполнения. Они проходят два основных этапа: создание расписания запуска управляющих процедур и обеспечение их выполнения. Кроме этого, в целях поддержания работоспособности система может автоматически планировать и запускать служебные процедуры.

Предложен метод выделения проектных решений и компонентов целевой системы, которые должны быть отнесены к платформе. Метод позволяет обоснованно формировать структуру платформы и требования к ее компонентам. Метод основан на:

- определении соотношения между универсальностью и минимально достаточным набором возможностей для адаптации элемента платформы к применению в целевой системе специалистом соответствующего профиля;
- ограничении возможностей доступа пользователя к микроархитектурным деталям реализации компонента платформы;
- требованиях длительности жизненного цикла компонентов платформы; типичный желаемый срок — как минимум 15–20 лет, что превышает обычный срок поддержки сторонних решений и вынуждает разрабатывать собственные решения.

Предложена классификация компонентов платформы по степени готовности к повторному использованию и требования к компонентам разных типов, что позволяет оценить состав работ и требования к квалификации исполнителей на каждом этапе конфигурирования платформы для создания целевой системы. Основные типы компонентов повторного использования: готовые реализации, конфигурируемые компоненты, абстрактные реализации, архитектурные шаблоны. После создания целевой конфигурации некоторого компонента он может пополнить библиотеку как компонент следующего уровня готовности.

Разработан архитектурный шаблон для организации и взаимодействия компонентов системы с разной степенью критичности в части требований реального времени и устойчивости к отказам. Он позволяет изолировать более критичные компоненты (например, процедуры управления оборудованием) от задержек и сбоев в работе менее критичных компонентов (например,

обслуживание пользовательского интерфейса), что повышает детерминизм и функциональную безопасность системы. Архитектурный шаблон основан на односторонней направленности потока команд и данных, необходимых для выполнения критичных функций: компоненты с более жесткими ограничениями обрабатывают поступающие запросы, но сами не обращаются к запросам к компонентам с более мягкими ограничениями. Также каждый компонент должен иметь безопасный вариант поведения в любом сценарии взаимодействия с внешними компонентами.

На уровне исполнения отдельных стадий управляющих процедур предложен специализированный (Domain Specific Language) мультипарадигменный язык MScript для описания необходимых операций и алгоритмов, а также архитектура среды исполнения программ на этом языке. Среда исполнения имеет некоторые свойства операционной системы: запуск, выполнение и взаимодействие прикладных процессов, организация доступа к целевым структурам данных и устройствам ввода-вывода. Использование системы программирования, разработанной с учетом требований конкретной платформы, позволяет реализовать все необходимые механизмы с применением выразительных программных абстракций, приближенных к потребностям прикладных программистов, одновременно изолируя их от системных механизмов для снижения количества ошибок программирования. Собственная система программирования обеспечивает длительность жизненного цикла созданных для нее программ за счет существенно меньшей зависимости от меняющихся технологий на рынке.

На уровне планирования времени выполнения стадий управляющих процедур предложена модель вычислений для организации параллельного выполнения

взаимозависимых процессов. Она позволяет обеспечить выполнение требований реального времени и оптимизировать загрузки исполнительных устройств.

На рисунке показаны основные компоненты предложенной архитектуры программно-аппаратной платформы. В ее составе выделена информационная система, которая строится по классической схеме и включает в себя модуль программного интерфейса, пользовательский web-интерфейс, прикладную информационную систему и прикладную базу данных. Управляющая система включает в себя среду исполнения процедур управления оборудованием, инструментарий, каналы разных типов для взаимодействия управляющих процессов между собой и хранилищами данных. Каналы имеют унифицированный программный интерфейс, называемый «ячейкой». Низкоуровневая часть предназначена для взаимодействия с физическим оборудованием установки.

Особенностью платформы является реализация программных компонентов на базе аппаратного и системного программного обеспечения общего назначения. В текущем варианте платформы используются стандартные IBM PC-совместимые компьютеры, операционная система Astra Linux и Open JDK. Программное обеспечение разработано на языках Kotlin и Java. Выбор стека технологий определяется, с одной стороны, снижением затрат на реализацию и сопровождение, а с другой — достаточно высокими требованиями по производительности компонентов платформы. Отладочный стенд для компонентов платформы и целевых систем был реализован с использованием инструментальной системы JupyterLab, фреймворка Dash, интерпретатора языка Python и приложения-обертки, которое включает программные компоненты платформы. В ходе тестирования получены оценки произво-

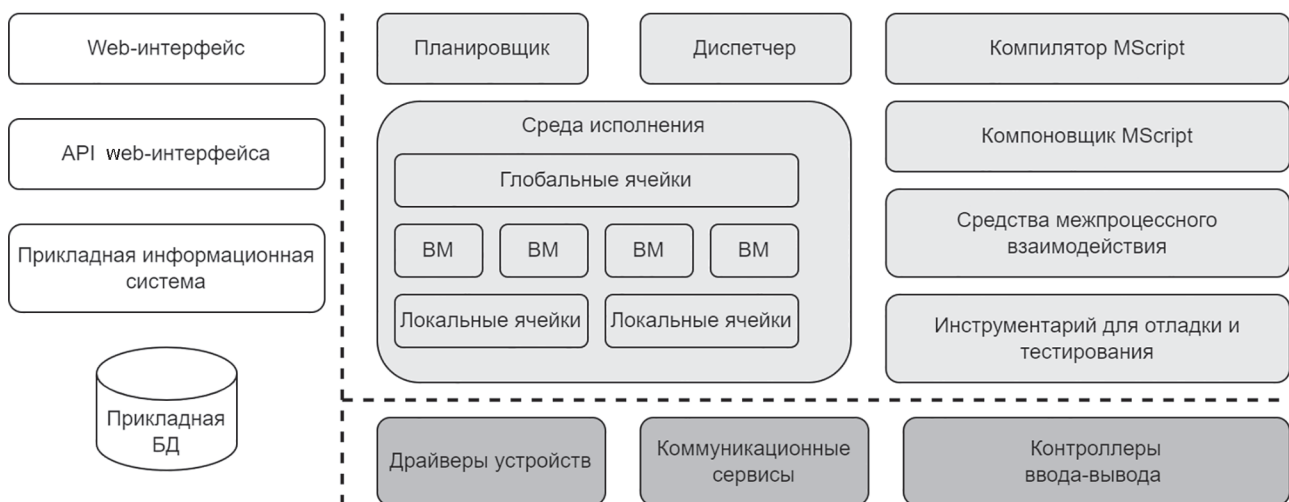


Рисунок. Архитектура платформы.

БД — база данных; BM — виртуальные машины; API — модуль программного интерфейса.

Выделены компоненты: информационной системы (белые); управляющей системы (светло-серые); низкоуровневой части (темно-серые)

Figure. Platform architecture.

БД — database; BM — virtual machines; API — application program interface module. Components highlighted: information system (white); control system (light gray); low-level components (dark gray)

длительности, подтвердившие выполнение требований реального времени в необходимом диапазоне ограничений.

На базе создаваемой платформы планируется разработка открытого проекта с близким набором функций

для расширения возможностей виртуальных лабораторий ИТМО.cLAB [9]: управление аппаратно-программной инфраструктурой, полунатурное моделирование встраиваемых систем, их внешнего окружения, объектов управления («умный дом» и другие).

Литература

1. Burns A., Robert I.D. *Mixed Criticality Systems — A Review*. Department of Computer Science, University of York, York, UK, 2022. 97 p.
2. Rouxel B., Altmeyer S., Grelck C. YASMIN: a real-time middleware for COTS heterogeneous platforms // *Proc. of the 22nd International Middleware Conference (Middleware '21)*. 2021. P. 298–309. <https://doi.org/10.1145/3464298.3493402>
3. Schuster S., Wagemann P., Ulbrich P., Schröder-Preikscha W. Proving real-time capability of generic operating systems by system-aware timing analysis // *Proc. of the 25th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)*. 2019. P. 318–330. <https://doi.org/10.1109/rtas.2019.00034>
4. Ключев А.О., Кустарев П.В., Палташев Т.Т., Платунов А.Е. Применение HLD-методологии для проектирования реконфигурируемых встраиваемых систем // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. № 4(92). С. 74–82.
5. Платунов А.Е., Пинкевич В.Ю. Перспективные автоматизированные системы управления наружным освещением на платформе LMTFusion // *Информатизация и системы управления в промышленности*. 2020. № 1(85). С. 135–138.
6. Pinkevich V.Y., Platonov A.E., Pensko A.V. The approach to design of problem-oriented reconfigurable hardware computational units // *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. 2020. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/weconf48837.2020.9131512>
7. Pinkevich V., Kluchev A., Kluchev V., Platonov A. Designing custom computing platforms for cyber-physical systems // *Proc. of the 23rd International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2023. V. 23. N 2.1. P. 65–72. <https://doi.org/10.5593/sgem2023/2.1/s07.09>
8. Pinkevich V., Kluchev A., Platonov A., Kluchev V. Organization of mixed-critical computing systems for control of multi-operational technological systems // *Proc. of the 24th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2024. V. 24. N 2.1. P. 65–72. <https://doi.org/10.5593/sgem2024/2.1/s07.09>
9. Platonov A., Kluchev A., Pinkevich V., Kluchev V., Kolchurin M. Training laboratories with online access on the ITMO.cLAB platform // *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. V. 2893.

Авторы

Платунов Алексей Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 35318291200](https://orcid.org/0000-0003-3003-3949), <https://orcid.org/0000-0003-3003-3949>, aeplatonov@itmo.ru

Ключев Аркадий Олегович — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 56429748500](https://orcid.org/0000-0002-3892-8424), <https://orcid.org/0000-0002-3892-8424>, kluchev@itmo.ru

Пинкевич Василий Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 56951052900](https://orcid.org/0000-0002-8635-5026), <https://orcid.org/0000-0002-8635-5026>, vupinkevich@itmo.ru

Ключев Владислав Аркадьевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57216353396](https://orcid.org/0000-0002-3052-2200), <https://orcid.org/0000-0002-3052-2200>, vakluchev@itmo.ru

References

1. Burns A., Robert I.D. *Mixed Criticality Systems — A Review*. Department of Computer Science, University of York, York, UK, 2022. 97 p.
2. Rouxel B., Altmeyer S., Grelck C. YASMIN: a real-time middleware for COTS heterogeneous platforms. *Proc. of the 22nd International Middleware Conference (Middleware '21)*, 2021, pp. 298–309. <https://doi.org/10.1145/3464298.3493402>
3. Schuster S., Wagemann P., Ulbrich P., Schröder-Preikscha W. Proving real-time capability of generic operating systems by system-aware timing analysis. *Proc. of the 25th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)*, 2019, pp. 318–330. <https://doi.org/10.1109/rtas.2019.00034>
4. Kluchev A.O., Kustarev P.V., Paltashev T.T., Platonov A.E. HLD-methodology application for reconfigurable embedded systems design. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 4(92), pp. 74–82. (in Russian)
5. Platonov A.E., Pinkevich V.Iu. Prospective automated control systems for outdoor lighting on the LMTFusion platform. *ISUP*, 2020, no. 1(85), pp. 135–138. (in Russian)
6. Pinkevich V.Y., Platonov A.E., Pensko A.V. The approach to design of problem-oriented reconfigurable hardware computational units. *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2020, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/weconf48837.2020.9131512>
7. Pinkevich V., Kluchev A., Kluchev V., Platonov A. Designing custom computing platforms for cyber-physical systems. *Proc. of the 23rd International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2023, vol. 23, no. 2.1, pp. 65–72. <https://doi.org/10.5593/sgem2023/2.1/s07.09>
8. Pinkevich V., Kluchev A., Platonov A., Kluchev V. Organization of mixed-critical computing systems for control of multi-operational technological systems. *Proc. of the 24th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2024, vol. 24, no. 2.1, pp. 65–72. <https://doi.org/10.5593/sgem2024/2.1/s07.09>
9. Platonov A., Kluchev A., Pinkevich V., Kluchev V., Kolchurin M. Training laboratories with online access on the ITMO.cLAB platform. *CEUR Workshop Proceedings*, 2020, vol. 2893.

Authors

Alexey E. Platonov — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 35318291200](https://orcid.org/0000-0003-3003-3949), <https://orcid.org/0000-0003-3003-3949>, aeplatonov@itmo.ru

Arkady O. Kluchev — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 56429748500](https://orcid.org/0000-0002-3892-8424), <https://orcid.org/0000-0002-3892-8424>, kluchev@itmo.ru

Vasily Yu. Pinkevich — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 56951052900](https://orcid.org/0000-0002-8635-5026), <https://orcid.org/0000-0002-8635-5026>, vupinkevich@itmo.ru

Vladislav A. Kluchev — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57216353396](https://orcid.org/0000-0002-3052-2200), <https://orcid.org/0000-0002-3052-2200>, vakluchev@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 08.11.2024
Одобрена после рецензирования 23.01.2025
Принята к печати 21.03.2025

Received 08.11.2024
Approved after reviewing 23.01.2025
Accepted 21.03.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»