

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СРЕД ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Г. И. Коршунов

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия  
Санкт-Петербургский политехнический университет  
имени Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия  
kgi@pantes.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассмотрены модели физических сред для оптимизации цифрового управления в киберфизических системах, ориентированные на уровни целей в проблемной области. В статье цель киберфизических систем представлена как оптимизация взаимодействия с физическим миром на основе анализа спектра основного критерия. *Материалы и методы.* Формирование целей в проблемной области, что позволяет создавать базу знаний. Рассматриваемый подход существенно облегчается применением программных средств Python. Это позволяет избежать сложных математических вычислений и гибкую корректировку данных. Задачи управления включают достижение цели, уточнение параметров цели и декомпозицию управления в виде функций. *Результаты и выводы.* Математически физическая среда описана тремя пространственными измерениями и одним временным измерением. Интерпретация физической среды представлена как цифровая, так как кибернетическая подсистема принципиально является цифровой.

**Ключевые слова:** киберфизические системы, оптимизация, многоуровневые проблемные области, цель, цифровое управление

**Для цитирования:** Коршунов Г. И. Моделирование физических сред для оптимизации цифрового управления в киберфизических системах // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 23–28. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-3

## SIMULATION OF PHYSICAL ENVIRONMENTS FOR OPTIMIZATION OF DIGITAL CONTROL IN CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

G.I. Korshunov

Saint-Petersburg State University of Airspace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia  
kgi@pantes.ru

**Abstract.** *Background.* Models of physical environments are considered for optimizing digital control in cyber-physical systems (CPS), focused on the levels of goals in the problem area. In the article, the goal of the CPS is presented as an optimization of interaction with the physical world based on the analysis of the spectrum of the main criterion. *Materials and methods.* Formation of goals in the problem area, which allows to create a knowledge base. The considered approach is greatly facilitated by the use of Python software tools. This avoids complex mathematical calculations and flexible data adjustment. Management tasks include achieving the goal, refining the parameters of the goal and decomposition of management in the form of functions. *Results and conclusions.* Mathematically, the physical environment is described by three spatial dimensions and one temporal dimension. The interpretation of the physical environment is presented as digital, since the CP is fundamentally digital.

**Keywords:** cyber-physical systems, optimization, multilevel problem areas, goal, digital control

**For citation:** Korshunov G.I. Simulation of physical environments for optimization of digital control in cyber-physical systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):23–28. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-3

### Введение

Задачи управления включают достижение цели, уточнение параметров цели и декомпозицию управления в виде функций (операций). Цель системы может определяться достижением системы значений ее базовых параметров или достижением желаемого состояния. С понятием цели всегда

связано понятие функций, приводящих систему к ее достижению. В статье цель КФС представлена как оптимизация взаимодействия с физическим миром. Под оптимизацией здесь понимается развитие какого-либо объекта или метода к наилучшему состоянию, а под физическим миром – объекты живой и неживой природы или искусственно созданные. Поскольку основными категориями в глобальном представлении являются материя и энергия, формулирование первичной цели КФС выполняется с применением энергетических критериев. Математически физическая среда является многообразием, состоящим из событий, описанных тремя пространственными измерениями (длина, ширина, высота) и одним временным измерением. Пространственно-временной континуум (ПВК) непрерывен и с математической точки зрения представляет собой многообразие с выбранной метрикой. В статье не преследуется цель углубленного исследования соответствующих теоретических проблем. Вместе с тем в киберфизических системах (КФС) должно быть достигнуто взаимодействие между развивающейся кибернетической подсистемой (КП) и физической подсистемой – средой (ФП). В этом смысле интерпретация ПВК физической среды должна быть представлена как цифровая, так как КП принципиально является цифровой. Но компьютеры не могут напрямую справиться с величинами в ПВК в общем случае. Примером реализации может служить множество точек, покрывающее выбранную для моделирования область, например, представленную матрицами. Для таких точек в пространстве обоснованно выбирается расстояние. Достижение сбалансированного взаимодействия КП и ФП представляет собой задачу оптимизации в условиях имеющегося уровня развития КФС. В основном это касается развития КП, в том числе моделирования ФП. Эти вопросы и соответствующие цели ставились как в общем виде в работах [1–3], так и касались объектов разного уровня: сенсоров [4], разного рода сред [5], промышленных предприятий. Однако локальные цели представляются в рамках многоуровневой системы, работающей на глобальные критерии [6]. В этой работе в качестве глобальных критериев представлены термодинамическая энергоэффективность и информация. Квантовая теория информации непосредственно связывает информацию с энергией через энтропию фон Неймана, которую можно считать основной физической характеристикой энергоинформационного процесса. Эта сложная задача представлена в работах Джона фон Неймана [7, 8] и здесь не рассматривается. Что касается информации, то многоуровневые системы создаются в проблемных областях, а информация должна накапливаться и обрабатываться в базах данных и базах знаний для последующего управления ФП с учетом предотвращения деградации ее свойств. Целью работы является оптимизация цифрового управления в киберфизических системах при формализации целей на уровнях проблемной области с применением программных средств. В статье и ссылках на работы автора с соавторами представлены цели и реализации управления в проблемных областях коррозионной защиты металлических сооружений, минимизации и нейтрализации вредных выбросов и сбросов предприятий и объектов транспорта. Развивается подход к цифровому жизненному циклу создания электроники.

Подробный анализ моделей применительно к КФС приведен в общем виде в работе [3]. Там, в частности, приведен перечень и анализ моделей. Рассмотрены достоинства и недостатки детерминированных моделей на основе ОДУ, которые могут использоваться для моделирования динамики физических систем, а также переход к недетерминированным моделям. Представляет интерес парадигма моделирования как математика исчисления и дифференциальных уравнений и парадигма моделирования как теория императивных программ в информатике. В настоящей статье приведены результаты, оценки и ссылки на работы автора по первому подходу к моделированию и некоторые результаты, иллюстрирующие второй подход.

### **Модели на основе уравнений математической физики**

Такие модели на основе уравнений Пуассона и теплопроводности представлены в работах [10–13]. В задаче защиты от коррозии нахождение распределения поляризованного потенциала на поверхности подземных металлических трубопроводов требует знания распределения потенциала  $\phi$ , создаваемого в грунте токами, протекающими через наружную поверхность трубопровода, имеющую контакт с грунтом. Расчет распределения потенциала производится в предположении, что подземные трубопроводы расположены в однородном проводящем полупространстве с удельным сопротивлением. Среда, с которой граничит полупространство, принимается непроводящей. В этих условиях распределение потенциала  $\phi$  в проводящей среде является решением уравнения Пуассона [13, 14].

Задачи минимизации выбросов в атмосферу и сбросов в водную среду решены с применением уравнений диффузии и теплопроводности в работах [10–13]. Следует отметить, что применение та-

ких моделей связано со сложными вычислениями, а полученное выражение управления содержит влияние человеческого фактора.

### *Интеллектуальные сенсоры*

Здесь предложено рассмотреть в качестве примеров интеллектуальные сенсоры, применение которых соответствует постановке задачи цифровизации управления.

Необходимость применения интеллектуальных сенсоров как в пространстве, так и во времени для реализации КФС продиктована требованиями учета динамики и организации обработки информации с актуализацией состояний в пространстве и во времени [15, 16]. Предложенные в этих работах схемы с применением параллельных процессов и обработкой информации от разнесенных в пространстве источников включают актуализацию отдельных источников для получения общего результата. Это позволяет обеспечить распределенную неалгоритмическую обработку смешанных по форме сигналов. Построение параллельных процессов используется и при обработке информации от одного источника, а актуализация процессов и выдача результатов разнесены во времени со сбором входной информации.

В работе [17] на основе уникальных полупроводниковых сенсоров выполняется анализ и управление измерениями многокомпонентных парогазовых смесей. Это обеспечивает высокую достоверность идентификации вещества-аналита. Введение каталитических примесей, нагрев до заданных температур в полной мере не снимают основной вопрос селективной идентификации веществ в многокомпонентных смесях. Повышение селективности достигается формированием мультисенсорных систем, составленных из сенсоров различного химического состава – сенсоров, основу которых составляет диоксид олова и различные каталитические примеси. Математическая модель построена с применением вейвлет-преобразования, что обусловлено частотно-временной локализацией как аналогового, так и цифрового массива полученной при измерении информации. Вейвлет-преобразование свободно от неопределенности в частотно-временной области [19].

### *Модели оптимизации цифрового управления, ориентированные на уровни целей в проблемной области*

Объект управления представлен выделенной областью ПВК со счетным числом точек  $\{i(x, y, z, \Delta t, q)\}$ ,  $0 < i < n$ , где  $x_i, y_i, z_i, \Delta t_i$  – пространственно-временные координаты точки,  $q_i$  – значение параметра или критерия в точке,  $n$  – выбранное число точек.

В качестве параметра или критерия в зависимости от рассматриваемого уровня может быть представлена достоверность данных сенсора, концентрация компонента жидкости или газа, уровень бракованных деталей, энергоэффективность и другие объекты в рассматриваемой проблемной области. Для уточнения числа точек и их координат используется анализ спектра, полученного на основе имеющегося распределения плотности вероятности  $q$ . Анализ спектра позволяет выявить наиболее значимые процессы в физической среде и на основе определенных периодических процессов уточнить как пространственно-временные координаты точек, так и их необходимое количество для формирования цели и оптимизации управления. В случае отсутствия явных периодических процессов применяются известные приближения из работ [18–20]. Аналогично рассматриваемые цели соответствуют многоуровневой проблемной области, а полученная и откорректированная информация может представлять содержимое баз данных и знаний. Это необходимо для дальнейшего развития проблемной области в условиях неопределенности. Рассматриваемый подход существенно облегчается применением современных программных средств Python [20].

Предлагаемый подход к оптимизации цифрового управления, ориентированный на уровни целей в проблемной области, включает следующие этапы:

- 1) формирование предварительной модели объекта цифрового управления в ПВК в формате массива [20];
- 2) нахождение предварительно актуальной (или по аналогу) плотности распределения вероятности управляемого показателя, локального или глобального критерия на заданном уровне проблемной области;
- 3) выполнение спектрального анализа и определение явных или скрытых периодичностей для управляемой величины [21, 22];
- 4) моделирование цифрового управления заданной величиной на основе модели отложенных данных Python;

5) оптимизация цифрового управления в режимах обучения на основе сбора большего числа выборок для обучения, количества данных использования упрощенной или усложненной модели в базе знаний;

6) введение корректировок в первичную модель, плотность распределения вероятности, результаты спектрального анализа;

7) формирование содержания базы знаний для выбранного уровня проблемной области на основе полученных промежуточных и окончательных результатов;

8) формирование цели следующего уровня на основе функций агрегирования Python;

9) прогнозирование развития КФС в проблемной области на основе формируемой базы знаний на основе задач классификации и регрессии, кластеризации и понижения размерности, представленных возможностями Python в режимах машинного обучения.

Предлагается использование языка программирования Python в решении задач машинного обучения как наиболее гибкого и адаптированного. Программные библиотеки языка программирования Python, такие как Keras, TensorFlow, и Scikit-learn, разработанные специально для машинного обучения, позволяют повысить точность получаемых результатов, скорость, надежность работы с различными мультимодальными системами, а также простоту создания прототипов для их последующей отладки. Однако для наиболее корректной работы и запуска на любой операционной системе с представленными библиотеками при встраивании их в цифровой производственный процесс необходимо наличие установленного интерпретатора не ниже версии Python 3.8+.

### Заключение

Предложенный подход к моделированию и оптимизации управления в ФКС отличается от известных первичностью целевой направленности и представлением в многоуровневом пространстве, в качестве которого выступает проблемная область. Такой подход не исключает одноуровневого представления, однако дает возможность и динамически корректировать показатели, локальные и глобальную цель. Этому способствует применение программных средств Python. Работа с массивами данных, представляющих выбранную область в ПВК, существенно упрощает вычислительные процедуры, характерные для моделей на основе уравнений математической физики. Другим важным преимуществом является динамическое обновление данных и целей и возможность создания базы знаний для последующего управления и прогнозирования в условиях неполной определенности.

### Обсуждение

Предложенные в статье модели и подход представлены для абстрактной проблемной области. Конкретные примеры разрабатываются для проблемной области минимизации загрязнений атмосферного воздуха и проблемной области бездефектного производства. Элементы подхода реализованы на отдельных этапах жизненного цикла КФС.

### Список литературы

1. Lee E. A., Seshia S. A. Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach. Second ed. MIT Press, 2017.
2. Arseniev D. G., Overmeyer L., Kälviäinen H., Katalinić B. Cyber-Physical Systems and Control // Springer Nature. 2020. Vol. 95.
3. Lee E. Fundamental Limits of Cyber-Physical Systems Modeling // ACM Transactions on Cyber-Physical Systems. 2016. № 1. P. 1–26. doi:10.1145/2912149.
4. Lee E. A. The past, present and future of cyber-physical systems: a focus on models // Sensors (Basel). 2015. Vol. 15. P. 4837–4869.
5. Korshunov G. I., Frolova E. A. Systems analysis of physical processes: its application in the creation of cyber-physical systems // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Vol. 184. P. 417–429.
6. Korshunov G. I., Polyakov S. L. Information and thermodynamic fundamentals of cyber physical systems modeling // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515. P. 022065.
7. Von Neumann J. Математические основы квантовой механики. Принстон : Изд-во Принстонского университета, 1955. ISBN 978-0-691-02893-4.
8. Von Neumann J. Thermodynamik quantenmechanischer Gesamtheiten // Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse. 1927. № 102. P. 273–291.

9. Beckman I. Computer science. Lecture course. Entropy and information. 2009. URL: <http://profbeckman.narod.ru/InformLekc.htm>
10. Sol'nitsev R. I., Korshunov G. I. Mathematical models of control systems "nature-technogenics" // Известия вузов. Приборостроение. 2012. № 12. С. 5–11.
11. Сольнищев Р. И., Коршунов Г. И. Система управления «природа–техногеника». СПб. : Политехника, 2013.
12. Korshunov G. I., Solnitsev R. I., Zhilnikova N. A., Polyakov S. L. Models of Cyber-Physical Control Systems for Pollution Minimization Technologies // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. P. 442–450. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7970486>
13. Коршунов Г. И., Сольнищев Р.И., Фролова Е. А. Обеспечение качества и создание интеллектуальных систем коррозионной защиты трубопроводного транспорта энергоносителей // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 92–101. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-11
14. Korshunov G. I., Frolova E. A. Systems Analysis of Physical Processes: Its Application in the Creation of Cyber-Physical Systems // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Vol 184. doi:10.1007/978-3-030-65857-1\_35
15. Bondarenko P. N., Safyannikov N. M. Organization of soft coordination of streaming informational processes' interaction with states' actualization in space // 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements : proceedings (SCM 2017, 6 July 2017). 2017. P. 31–33.
16. Бондаренко П. Н. Структурная организация устройств с актуализацией состояний во времени // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер.: Информатика, управление и компьютерные технологии. 2016. № 4. С. 7–12.
17. Белозерцев А. И., Эль-Салим С. З. Эмпирическая модель идентификации вещества многокомпонентных парогазовых смесей // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3. С. 10–17. doi:10.21685/2307-4205-2017-3-2
18. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М. : Советское радио, 1968. Кн. 2.
19. Novoseltseva M. Use of proper c-fractions for analysis of multi-frequency signals with hidden periodicities // Large-Scale Systems Control. 2013. Vol. 41. P. 93–112.
20. Прохоренков А. М., Качала Н. М. Использование методов нечеткой логики для определения классификационных характеристик случайных процессов // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2006. Т. 9, № 3. С. 514–521.
21. Вандер П. Дж. Python для решения сложных задач: наука о данных и машинное обучение. СПб. : Питер, 2020. 576 с.
22. Леонидов В. В. Конспект лекций «Вейвлет-преобразование» : учеб. пособие. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016.

### References

1. Lee E.A., Seshia S.A. *Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach. Second ed.* MIT Press, 2017.
2. Arseniev D.G., Overmeyer L., Kälviäinen H., Katalinić B. Cyber-Physical Systems and Control. *Springer Nature*. 2020;95.
3. Lee E. Fundamental Limits of Cyber-Physical Systems Modeling. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 2016;(1):1–26. doi:10.1145/2912149
4. Lee E.A. The past, present and future of cyber-physical systems: a focus on models. *Sensors (Basel)*. 2015;15:4837–4869.
5. Korshunov G.I., Frolova E.A. Systems analysis of physical processes: its application in the creation of cyberphysical systems. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;184:417–429.
6. Korshunov G.I., Polyakov S.L. Information and thermodynamic fundamentals of cyber physical systems modeling. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515:022065.
7. Von Neumann J. *Matematicheskie osnovy kvantovoy mekhaniki = Mathematical foundations of quantum mechanics*. Princeton: Izd-vo Princstonskogo universiteta, 1955. (In Russ.). ISBN 978-0-691-02893-4.
8. Von Neumann J. Thermodynamik quantenmechanischer Gesamtheiten. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*. 1927;(102):273–291.
9. Beckman I. Computer science. Lecture course. Entropy and information. 2009. Available at: <http://profbeckman.narod.ru/InformLekc.htm>
10. Sol'nitsev R.I., Korshunov G.I. Mathematical models of control systems "nature-technogenics". *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = Izvestiya vuzov. Instrumentation*. 2012;(12):5–11.
11. Sol'nitsev R.I., Korshunov G.I. *Sistema upravleniya «priroda–tekhnenika» = Control system "nature-technogenics"*. Saint Petersburg: Politekhnik, 2013. (In Russ.)
12. Korshunov G.I., Solnitsev R.I., Zhilnikova N.A., Polyakov S.L. Models of Cyber-Physical Control Systems for Pollution Minimization Technologies. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022:442–450. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7970486>

13. Korshunov G.I., Sol'nitsev R.I., Frolova E.A. Quality assurance and the creation of intelligent corrosion protection systems for pipeline transport of energy carriers. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):92–101. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-11
14. Korshunov G.I., Frolova E.A. Systems Analysis of Physical Processes: Its Application in the Creation of Cyber-Physical Systems. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;184. doi:10.1007/978-3-030-65857-1\_35
15. Bondarenko P.N., Safyannikov N.M. Organization of soft coordination of streaming informational processes' interaction with states' actualization in space. *20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements: proceedings (SCM 2017, 6 July 2017)*. 2017:31–33.
16. Bondarenko P.N. Structural organization of devices with actualization of states in time. *Izvestiya SPbGETU «LETI». Ser.: Informatika, upravlenie i komp'yuternye tekhnologii = Izvestiya SPbSETU "LETI". Ser.: Informatics, management and computer technologies*. 2016;(4):7–12. (In Russ.)
17. Belozertsev A.I., El'-Salim S.Z. Empirical model of substance identification of multicomponent vapor-gas mixtures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(3):10–17. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2017-3-2
18. Levin B.R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki = Theoretical foundations of statistical radio engineering*. Moscow: Sovetskoe radio, 1968;bk. 2. (In Russ.)
19. Novoseltseva M. Use of proper c-fractions for analysis of multi-frequency signals with hidden periodicities. *Large-Scale Systems Control*. 2013;41:93–112.
20. Prokhorenkov A.M., Kachala N.M. Using fuzzy logic methods to determine the classification characteristics of random processes. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Murmansk State Technical University*. 2006;9(3):514–521. (In Russ.)
21. Vander P.Dzh. *Python dlya resheniya slozhnykh zadach: nauka o dannykh i mashinnoe obuchenie = Python for solving complex problems: data science and machine learning*. Saint Petersburg: Piter, 2020:576. (In Russ.)
22. Leonidov V.V. *Konspekt lektsiy «Veyvlet-preobrazovanie»: ucheb. posobie = Lecture notes "Wavelet transform" : textbook*. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2016. (In Russ.)

#### Информация об авторах / Information about the authors

##### **Геннадий Иванович Коршунов**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инноватики и управления качеством, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67); профессор Высшей школы киберфизических систем и управления, Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого (Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)  
E-mail: kgi@pantes.ru

##### **Gennady I. Korshunov**

Doctor of technical sciences, professor, professor of the sub-department of innovation and quality control, Saint Petersburg State University of Airspace Instrumentation (67 Bolshaya Morskaya street, Saint Petersburg, Russia); professor of the higher school of cyber-physical systems and management, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (29 Politekhnicheskaya street, Saint Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 21.01.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 17.02.2023**

**Принята к публикации/Accepted 25.02.2023**