

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Сигов А.С. Главный редактор журнала, академик РАН, профессор, д.ф.-м.н., президент РТУ МИРЭА

Кудж С.А. Профессор, д.т.н., ректор РТУ МИРЭА

Банис Ю.Й. Профессор, хабилированный доктор наук, проректор Вильнюсского университета, Литва

Боков А.А. Старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада

Буслаева Т.М. Профессор, д.х.н., РТУ МИРЭА

Буш А.А. Профессор, д.т.н., директор Института материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА

Вахрушев С.Б. Профессор, д.ф.-м.н., зав. лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ

Голованова Н.Б. Профессор, д.э.н., заместитель первого проректора РТУ МИРЭА

Гуляев Ю.В. Академик РАН, член Президиума РАН, профессор, д.ф.-м.н., научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Жуков Д.О. Профессор, д.т.н., зав. кафедрой интеллектуальных технологий и систем РТУ МИРЭА

Кимель А.В. Доцент, к.ф. -м.н., Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды

Козлов Г.В. Профессор, д.ф.-м.н., заместитель руководителя аппарата генерального директора АО «Концерн ВКО „Алмаз-Антей“»

Кондратенко В.С. Профессор, д.т.н., зав. кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА

Крамаров С.О. Профессор, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Сургутского государственного университета

Мишина Е.Д. Профессор, д.ф.-м.н., зав. специализированной учебно-научной лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий РТУ МИРЭА

Пасечник С.В. Профессор, д.ф.-м.н., профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА

Перно Ф. Профессор, проректор по научной работе, Центральная Школа г. Лилль, Франция

Романов М.П. Профессор, д.т.н., директор Института кибернетики РТУ МИРЭА

Савиных В.П. Член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

Скотт Дж. Профессор, член Лондонского Королевского общества, Университет Кембриджа, Великобритания

Соколов В.В. Профессор, д.ф.-м.н., советник по научной работе РТУ МИРЭА

Тимошенко А.В. Профессор, д.т.н., проректор по учебной работе РТУ МИРЭА

Фетисов Ю.К. Профессор, д.ф.-м.н., профессор кафедры нанoeлектроники РТУ МИРЭА

Харин Ю.С. Член-корреспондент НАН Беларуси, профессор, д.ф.-м.н., директор Научно-исследовательского института прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Беларусь

Цветков В.Я. Профессор, д.т.н., советник ректората РТУ МИРЭА

РЕДАКЦИЯ:

Буслаева Т.М. Профессор, д.х.н.; e-mail: buslaeva@mirea.ru

Есипова О.В. Ответственный секретарь, к.х.н., доцент; e-mail: esipova@mirea.ru

Семерня Л.Г. Технический редактор; e-mail: semernya@mirea.ru

Середина Г.Д. Зав. редакцией, к.т.н.; e-mail: seredina@mirea.ru

Адрес редакции:

Россия, 119571, Москва, пр. Вернадского, д. 86, оф. Л-119

Тел.: +7 (495) 246-05-55 (#2-88); e-mail: seredina@mirea.ru; <http://rtj.mirea.ru>

EDITORIAL BOARD

Alexander S. Sigov – Editor-in-Chief of the Journal, Academician of the Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, President of RTU MIREA

Stanislav A. Kudzh – Professor, D.Sc. (Eng.), Rector of RTU MIREA

Yuras Banis – Professor, Habilitated Doctor of Sciences, Vice-Rector of Vilnius University, Lithuania

Tatyana M. Buslaeva – Professor, D.Sc. (Chem.), RTU MIREA

Alexander A. Bush – Professor, D.Sc. (Eng.), Director of the Institute of Materials of Solid State Electronics, RTU MIREA

Sergey B. Vakhrushev – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute RAS, Professor of the Department of Physical Electronics of SPbSPU

Nataliya B. Golovanova – Professor, D.Sc. (Economics), Deputy First Vice-Rector of RTU MIREA

Yury V. Gulyaev – Academician of the Russian Academy of Sciences, Member of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS

Dmitry O. Zhukov – Professor, D.Sc. (Eng.), Head of the Department of Intelligent Technologies and Systems, RTU MIREA

Alexey V. Kimel – Associate Professor, Ph.D. (Phys.-Math.), Radboud University, Nijmegen, Netherlands

Gennady V. Kozlov – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Deputy Head of the Office of the General Director of JSC Concern “VKO Almaz-Antey”

Vladimir S. Kondratenko – Professor, D.Sc. (Eng.), Head of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA

Sergey O. Kramarov – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Surgut State University

Elena D. Mishina – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Head of the Specialized Educational and Research Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, RTU MIREA

Sergey V. Pasechnik – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA

Philippe Pernod – Professor, Dean of Research, Ecole Centrale de Lille, France

Mikhail P. Romanov – Professor, D.Sc. (Eng.), Director of the Institute of Cybernetics, RTU MIREA

Viktor P. Savinykh – Member-Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Professor, D.Sc. (Eng.), President of Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Twice Hero of the Soviet Union

James F. Scott – Professor, Fellow of the Royal Society of London, Cambridge University, UK

Viktor V. Sokolov – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Adviser on Scientific Work of RTU MIREA

Andrey V. Timoshenko – Professor, D.Sc. (Eng.), Vice Rector for Academic Affairs of RTU MIREA

Yury K. Fetisov – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Nanoelectronics, RTU MIREA

Yury S. Kharin – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Director of the Research Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Belarus

Viktor Y. Tsvetkov – Professor, D.Sc. (Eng.), Councilor of the Administration of RTU MIREA

EDITORIAL:

Tatyana M. Buslaeva – Professor, D.Sc. (Chem.). E-mail: buslaeva@mirea.ru

Olga V. Esipova – Executive Editor, Ph.D. (Chem.), Associate Professor. E-mail: esipova@mirea.ru

Larisa G. Semernya – Technical Editor. E-mail: semernya@mirea.ru

Galina D. Seredina – Managing Editor, Ph.D. (Engineering). E-mail: seredina@mirea.ru

Address:

86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia (office L-119)

Phone: +7(495)246-05-55 (#288); e-mail: seredina@mirea.ru; <http://rtj.mirea.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ИНФОРМАТИКА. ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Лобановский Ю.И.

Общий классификатор системных проблем. Часть I: Анализ, синтез, валидация и верификация 5

Лобановский Ю.И.

Общий классификатор системных проблем. Часть II: Расширенная верификация 13

РОБОТИЗИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ. ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Манько С.В., Шестаков Е.И.

Автоматический синтез сценариев походки реконфигурируемых мехатронно-модульных роботов в модификации шагающей платформы 26

СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Исаков В.Н., Тимошенко П.И.

Локальная интерполяция и аппроксимация в задачах эвристического синтеза цифровых фильтров 42

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Геча В.Я., Жиленев М.Ю., Федоров В.Б., Хрычев Д.А., Худак Ю.И., Шатина А.В.

Скорость движения изображения при оптико-электронной съемке поверхности планеты 65

Пастушков А.А., Батоврин В.К.

Выбор решений при проектировании сложных систем на основе анализа вариантов со случайными весами 78

Садовникова Е.В., Шатина А.В.

Эволюция вращательного движения спутника с гибкими вязкоупругими стержнями на эллиптической орбите 89

ЭКОНОМИКА НАУКОЕМКИХ И ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ПРОИЗВОДСТВ

Рогова В.А.

Кадровые проблемы развития высоких технологий в России в зеркале Глобального индекса инноваций 105

CONTENTS

INFORMATION SYSTEMS. INFORMATICS. PROBLEMS OF INFORMATION SECURITY

- Lobanovsky Yu.I.**
General classifier of system problems - I: Analysis, synthesis, validation and verification 5
- Lobanovsky Yu.I.**
General classifier of system problems - II: Extended verification 13

ROBOTIZED COMPLEXES AND SYSTEMS

- Manko S.V., Shestakov E.I.**
Automatic synthesis of gait scenarios for reconfigurable mechatronic modular robots in the modification of the walking platform 26

MODERN RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

- Isakov V.N., Timoshenko P.I.**
Local interpolation and approximation in tasks of heuristic synthesis of digital filter 42

MATHEMATIC MODELING

- Gecha V.Ya., Zhilenev M.Yu., Fyodorov V.B., Khrychev D.A.,
Khudak Yu.I., Shatina A.V.** 65
The image speed during the optical - electronic surfacing the planet
- Pastushkov A.A., Batovrin V.K.** 78
Selection of solutions for designing open systems based on analysis of variants with random weights
- Sadovnikova E.V., Shatina A.V.** 89
Evolution of the rotational motion of a satellite with flexible viscoelastic rods on the elliptic orbit

ECONOMY OF KNOWLEDGE-INTENSIVE AND HI-TECH ENTERPRISES AND PRODUCTIONS

- Rogova V.A.** 105
Problem of staffing for development of high technologies in Russia in the mirror of the Global innovation index

УДК 303.732

ОБЩИЙ КЛАССИФИКАТОР СИСТЕМНЫХ ПРОБЛЕМ. Часть I: АНАЛИЗ, СИНТЕЗ, ВАЛИДАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ

Ю.И. Лобановский

*ПАО «Корпорация «Иркут», Москва 125315, Россия
@Автор для переписки, e-mail: streamphlow@gmail.com*

В статье представлен верхний уровень общего классификатора системных проблем. Этот классификатор рассматривается как объект системной инженерии. В соответствии с ее современными принципами построение начато с создания функциональной структуры классификатора. Выполнена валидация требований к этой структуре. Выявлено шесть элементов верхнего уровня. Построена логическая архитектура классификатора и выполнена предварительная верификация требований к нему. Показано, что предложенная структура общего классификатора проблем в целом совпадает со структурой пяти причин экологических катастроф, описанных в книге Дж. Даймонда «Коллапс», если экологическую терминологию заменить общесистемной. Системно-инженерный подход при построении классификатора позволил создать более полную и адекватную структуру, чем простое эмпирическое рассмотрение массива соответствующих данных. Использование предлагаемого классификатора системными инженерами позволит избежать в будущем тех ошибок, которые ранее приводили к провалам при построении и/или развитии сложных систем.

Ключевые слова: проблема, классификация, системная инженерия, требования, валидация, верификация.

GENERAL CLASSIFIER OF SYSTEM PROBLEMS - I: ANALYSIS, SYNTHESIS, VALIDATION AND VERIFICATION

Yu.I. Lobanovsky

*Irkut Corporation, Moscow 125315, Russia
@Corresponding author e-mail: streamphlow@gmail.com*

The upper level of a general classifier of system problems was constructed on the basis of system principles. This classifier was considered as an object of system engineering, and in accordance with its modern principles, the construction was started with the creation of the classifier functional structure. Further, requirements for this structure were validated. At the same time, as a result of the system problems analysis, taking into account the similarity of functional structures at the system level and at the level of its environ, six elements of its

upper level were identified. Then the logical architecture of the classifier was constructed, and preliminary verification of the requirements was carried out.

It was shown that the proposed structure of the general classifier of problems with one exception coincides with the structure of 5 causes of ecological disasters described in the book by J. Diamond "Collapse", if one replaces his ecological terminology by a system-wide one. The exception is one structural element of the general classifier of problems, which was not revealed in the empirical analysis of both system and ecological problems. Thus, the system-engineering approach in constructing the classifier allowed to create a more complete and adequate structure than a simple empirical examination of relevant data array.

Classification of system problems helps to better understand the reasons why complex systems are not able to perform the tasks assigned to them. Therefore, it should be expected that the use of this classifier by system engineers will allow avoiding in the future those mistakes that led to failures in the past in the construction and/or development of complex systems.

Keywords: problem, classification, system engineering, requirements, validation, verification.

Введение

Каждому человеку, человеческим консорциям, этносам и человечеству в целом непрерывно и постоянно приходится решать самые разнообразные проблемы. Подавляющее их большинство решается хорошо известными способами на уровне инстинктов или элементарной рассудочной деятельности. Совсем немногие из возникающих проблем заставляют субъектов, их решающих, использовать свой разум. И уж совсем ничтожная доля проблем связана с осознанием поведения природных, технических или общественных явлений или объектов, описываемых, как правило, большими массивами информации. Отдельные компоненты этих явлений или объектов взаимодействуют между собой, влияют друг на друга вплоть до того, что частные «правильные» решения по этим компонентам становятся неприемлемыми, опасными или даже катастрофическими для эволюции данных явлений или объектов в целом и для субъектов, адаптирующихся к ним или управляющих ими. В таких случаях принято говорить о сложных системах, и решение связанных с ними проблем относят к теории систем. Если сложные системы относятся к технике, то соответствующие руководства, умения и практики обычно называют системной инженерией, которая используется при создании сложных систем.

Несмотря на сравнительную редкость вызовов, возникающих при осознании поведения или при построении сложных систем, ошибочные ответы на них могут приводить к серьезным проблемам на всех уровнях, иногда они могут быть и критически важными для выживания различных консорций, а то и всего человечества в целом. Поэтому совершенствование способов решения подобных проблем представляется насущной задачей. Наиболее развитыми и проработанными системными методами обладает системная инженерия [1], однако, по мнению автора настоящей работы, в ней практически не проанализированы и не систематизированы причины провалов, происходивших ранее при разработках сложных технических систем. Знание и понимание причин неудач, создание условий для предотвращения провалов в новых проектах способно значительно повысить степень их успешности.

В настоящей работе представлен общий классификатор системных проблем, рассматриваемый как некий инженерный объект и разрабатываемый в соответствии с принципами и общепринятыми практиками системной инженерии.

Функциональная архитектура классификатора

В соответствии с руководством DoD Architecture Framework 2.0 [2] для системного проектирования на концептуальном этапе рекомендуется использовать процесс «Из середины» (*Middle out Process*), начинающийся с функционального анализа рассматриваемой системы. Далее проводится анализ требований и синтез системы, то есть создание логической структуры системы. Процесс повторяется итеративно, пока не будет построена система, удовлетворяющая сформулированным в этом процессе требованиям, размещенным на построенной структуре (рисунок).

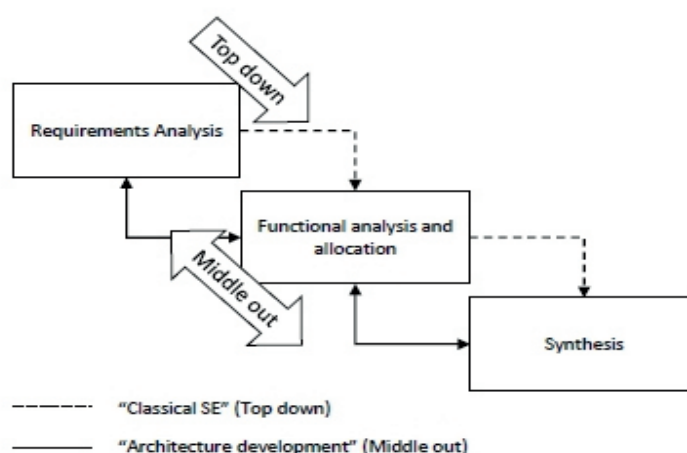


Схема проведения системного проектирования на концептуальном этапе [2].

Поскольку классификатор системных проблем должен отображать всю совокупность проблем, возникающих или могущих возникнуть вследствие отступления от системных принципов при проектировании или анализе сложных систем, то функции верхнего уровня классификатора должны описывать возможные нарушения такого процесса. Структура функций этой сложной системы достаточно прозрачна – проблемы в системе могут возникнуть как внутри нее, так и на границе между нею и ее окружением [1]. Поэтому структура разделяется на две подгруппы, каждая из которых функционально должна быть подобна другой, так как при переходе на более высокий уровень рассмотрения прежняя система становится подсистемой, и проблемы внешнего окружения становятся уже проблемами внутрисистемными, и наоборот. Структура проблем, обнаруженных на системном уровне, должна быть отображена и в системе, включающей в себя рассматриваемый объект/процесс, то есть на интерфейсе между ним и внешней средой.

Все проблемы в моделируемом/проектируемом объекте/процессе логически можно разделить следующим образом: недостаток в нем системности, противоречия между его подсистемами и превышение потребных ресурсов хотя бы одной его подсистемы над располагаемыми. То же самое с очевидными изменениями, вызванными переходом рассмотрения потенциальных проблем на уровень выше, имеет место на интерфейсе между ним и внешней средой. Поэтому после первых попыток анализа системных проблем [3]

вырисовывается следующая функциональная структура, целью использования которой является классификация системных проблем.

Действия, приводящие к внутрисистемным проблемам:

- моделирование/проектирование объекта/процесса не как системы, а как совокупности не связанных или слабо связанных между собой компонент;
- моделирование/проектирование системы, функционирование которой приводит к неразрешимым в рамках системы внутренним противоречиям;
- моделирование/проектирование системы, функционирование подсистем в которой приводит к их ресурсному тупику.

Действия, приводящие к проблемам окружения:

- моделирование/проектирование интерфейса системы как совокупности случайных, неконтролируемых или неправильно определенных связей с окружением;
- моделирование/проектирование интерфейса системы, функционирование которого приводит к неразрешимым противоречиям между системой и окружающей средой;
- моделирование/проектирование интерфейса системы, функционирование которой приводит к ее ресурсному тупику.

Из условия подобия функциональных структур на уровне системы и на уровне ее окружения возникает функциональный элемент, который не был найден при анализе и в котором системные принципы строго и последовательно не применялись [3].

Анализ требований (валидация)

В соответствии с дальнейшим ходом принятого процесса проектирования системы «Из середины» перейдем к анализу требований. Начнем с их валидации – мы должны убедиться в том, что:

- 1) набор требований правилен, полон и непротиворечив;
- 2) может быть создан образец, который удовлетворяет требованиям;
- 3) может быть достигнуто и испытано реальное решение, которое удовлетворяет требованиям [4].

Прежде всего, надо сформулировать данные требования. Так как классификатор проблем – это структурированный информационный объект, где накапливается, хранится и анализируется информация, то набор требований к нему, в целом, должен совпадать с требованиями к любой научной теории, к которым следует добавить уже упомянутое выше требование о подобии его элементов на двух соседних уровнях. Общий классификатор системных проблем должен быть:

- непротиворечивым (в первую очередь, внутренне);
- полным (охватывать все возможные системные проблемы);
- правильным (отображать существенно различные причины системных проблем в различных структурных элементах);
- на уровнях системы и ее окружения должно быть одинаковое количество структурных элементов.

Непротиворечивость классификатора следует из его функциональной структуры – очевидно, что функции из предложенного набора не пересекаются между собой. Ясно также, что в рамках предложенной структуры можно разместить любую проблему, по-

этому классификатор является полным. Однако его правильность, то есть соответствие его структуры реальным проблемам, возникающим при моделировании/проектировании систем, может быть проанализирована только при размещении этих проблем в структурах классификатора. Последнее требование о числе уровней в предложенной структуре, очевидно, выполняется.

Синтез системы – логическая архитектура классификатора

В соответствии с эмпирическим правилом системной инженерии, вытекающим из характеристик психологических возможностей человека, которое гласит, что «на одном структурном уровне классификатора целесообразно иметь 7 ± 2 структурные единицы», при построении логической архитектуры все структурные элементы разместим на одном уровне. Тогда их будет 6, и они будут являться верхним уровнем классификатора системных проблем. В данной статье этим уровнем и ограничимся. Дальнейшее углубление структуры может быть проведено, если далее появится такая потребность.

Из набора функций классификатора и принятого выше допущения вытекает следующая логическая структура общего классификатора системных проблем:

а) несистемность (отсутствие системного подхода) – неконтролируемое, и, следовательно, неблагоприятное влияние компонент объекта/процесса на их функционирование (внутренний хаос);

б) негативная эмерджентность – непознанное или не учитываемое проектантами/исследователями из-за сложности анализа неблагоприятное взаимодействие подсистем/компонент рассматриваемой системы, приводящее к ее разрушению [5];

с) внутренний ресурсный тупик – ограничение возможностей хотя бы одной из подсистем (ее характеристики не соответствуют требованиям, предъявляемым к ней системой), и это ограничение невозможно преодолеть внутри данной подсистемы при существующем технологическом уровне;

д) несистемность на надсистемном уровне – неблагоприятное влияние факторов существующего окружения на функционирование системы (неблагоприятный интерфейс системы);

е) изменение сценария – непредсказуемое, неблагоприятное и ранее не существовавшее влияние факторов изменившегося окружения на функционирование системы (неблагоприятное изменение интерфейса);

ф) внешний ресурсный тупик – ограничения возможностей системы в рамках надсистемы (то же, что и границы развития или пределы роста).

Верификация требований (первый этап)

Теперь следует продемонстрировать, что любое требование может быть удовлетворено, то есть любая сложная система или сложный процесс, которые испытывали бы серьезные проблемы и претерпели провалы и/или даже катастрофы во время прохождения своего жизненного цикла, укладываются в предлагаемую логическую структуру общего классификатора проблем. Для доказательства данного утверждения рассмотрим сначала примеры известных технических проектов и общественных процессов, завершившихся неудачно, из статьи [3], которая стала отправным пунктом при написании настоящей ра-

боты. Хотя там было рассмотрено только 7 таких систем, они естественно распределились по 5 разделам классификатора, за исключением раздела с) – внутреннего ресурсного тупика. Советская лунная программа и американская программа Constellation (Созвездие) явно относятся к разделу а) – несистемность; Саянская катастрофа – очевидный случай из раздела б) – негативная эмерджентность; проблемы советских истребителей начала Великой Отечественной войны представляют собой явный случай, укладывающийся в раздел классификатора d) – несистемность на надсистемном уровне; утрата боевой ценности македонской фаланги и линкоров дредноутного класса произошла из-за изменения сценариев боевых действий (раздел е) классификатора). И, наконец, проблемы с настоящим и будущим применением современных истребителей пятого поколения явно указывают на внешний ресурсный тупик (раздел f) классификатора) [3].

Применим предложенную структуру общего классификатора проблем к экологическим проблемам. В большой и интересной книге Дж. Даймонда «Коллапс» [6] рассмотрены экологические катастрофы, произошедшие с несколькими десятками человеческих сообществ от древности до современности, и там сформулированы 5 причин произошедшего, которые вполне можно сопоставить с 5 разделами общесистемного классификатора, на которые нашлись примеры в статье [3]. Это сопоставление проведено в таблице в ее первом и втором столбцах: в первом – разделы классификатора а), б) и d)–f), во втором – русский перевод оригинальных формулировок Дж. Даймонда (в некоторых случаях они варьируются в разных частях книги).

Применение структуры общего классификатора к экологическим проблемам

Общесистемные катастрофы	Экологические коллапсы – 1	Экологические коллапсы – 2
Несистемность (отсутствие системного подхода)	Отношение к окружающей среде/ Культурные стереотипы	Ненадлежащее отношение к окружающей среде (прогнозируемое разрушение среды обитания)
Негативная эмерджентность	Разрушение среды обитания/ Непреднамеренный экологический суицид	Непрогнозируемое (неумышленное) разрушение среды обитания
Несистемность на надсистемном уровне	Враждебные соседи	Враждебное окружение
Изменение сценария	Изменения климата	Неблагоприятные изменения природных условий
Внешний ресурсный тупик	Исчезновение дружественных торговых партнеров	Прекращение поступления извне необходимых ресурсов

Формулировки «Экологические коллапсы – 1» возникли в результате эмпирического обобщения рассмотренных в книге событий без каких-либо попыток применения системных подходов к структуре экологических проблем, поэтому, на наш взгляд, естественно, страдают некоторыми неточностями и использованием слишком частной терминологии. Представляется, что уточненные формулировки «Экологические коллапсы – 2» более полно и правильно отражают дух проблем, рассмотренных Дж. Даймондом в его книге (см. столбцы 2 и 3 таблицы). Тогда получается абсолютно полное соответствие между пятью разделами общесистемного классификатора и формулировками причин экологических коллапсов – там используются совершенно те же идеи, только выраженные словами из другой области знаний. В самом деле: ненадлежащее (несистемное) отношение к окружающей среде – это хаотическая ее эксплуатация без каких-либо попыток ограни-

читать свои хищнические инстинкты, что рано или поздно приводит к коллапсу сообщества, проводящего такую деятельность. Непрогнозируемое разрушение среды обитания относится к ситуации, когда сообщество стремится проводить свою хозяйственную деятельность на вполне рациональных принципах (то есть – системно), стремясь сохранить свою среду обитания. Однако оно не способно оценить критически важные связи между элементами этой среды, нарушение которых приводит к ее коллапсу, приход которого это сообщество совершенно не ожидает.

Враждебное окружение, которое может включать не только враждебных соседей, на экологическом уровне вполне соответствует той ситуации, когда в принципе вполне жизнеспособная система не может успешно выполнять свои функции, так как ее создатели неправильно разработали для нее интерфейс. Неблагоприятные изменения природных условий (похолодание, перманентная засуха, взрыв вулкана, изменение течения реки), очевидно, является изменением сценария, который описывает жизнь человеческого сообщества. Прекращения поступления необходимых природных ресурсов извне не только по причине исчезновения торговых партнеров, но и по любой другой, в общесистемных терминах вполне описывается как внешний по отношению к рассматриваемому сообществу ресурсный тупик.

Таким образом, все экологические коллапсы, описанные в книге Дж. Даймонда, вполне укладываются в предлагаемую общесистемную классификацию. Однако в трудах [3, 5] пропущена еще одна, шестая причина коллапсов – внутренний ресурсный тупик, которая в экологических терминах может быть сформулирована как отсутствие или истощение доступных сообществу внутренних природных ресурсов. В качестве простых примеров подобной ситуации можно указать полное исчерпание какого-нибудь источника вулканического стекла, расщепленные осколки которого использовались бы владеющим им древним племенем для производства режущих предметов, или более-менее полная выработка нефти современным человечеством из земных месторождений при отсутствии к этому времени серьезной энергетической альтернативы. Следовательно, целенаправленное использование системных методов позволяет моделировать/проектировать более полно описанные системы, что увеличивает вероятность успеха при их применении.

Таким образом, первый этап верификации требований к общему классификатору системных проблем показал, что структура его первого уровня описывает все рассмотренные на этом этапе технические, общественные и экологические проблемы, и переработки функциональной и логической структур не требуется. Необходимо провести следующий этап верификации требований на основе расширенного и открытого ко всем возможным дополнениям списка проблем.

Литература:

1. Косяков А. [и др.] Системная инженерия. Принципы и практика : Пер. с англ. под ред. В.К. Батоврина. М.: ДМК Пресс, 2014. 624 с.
2. Diehl M., Hornung M. Requirements engineering of a micro-UAY defense system // IEEE Xplore. 2017. 8 p. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7934731/> (дата обращения 02.07.2018).
3. Лобановский Ю.И. Несистемность – источник критических проблем при проек-

тировании сложных систем // Synerjetics Group. 2018. 16 с. URL: <http://www.synerjetics.ru/article/nonsystems.pdf> (дата обращения 02.07.2018).

4. Bahill A.T., Henderson S.J. Requirements development, verification, and validation exhibited in famous failures // Systems Engineering. 2005. V. 8 № 1. P. 1–14. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sys.20017> (дата обращения 02.07.2018).

5. von Bertalanffy L. General System Theory: Foundations, Development, Applications. New York: George Braziller Inc., 1968. 289 p.

6. Даймонд Дж. Д. Коллапс. М.: АСТ, 2010. 762 с. URL: <https://www.e-reading.club/book.php?book=1006586> (дата обращения 02.07.2018).

References:

1. Kossiakoff A. [et al.] Systems Engineering: Principles and Practice. Wiley, 2011. 560 p.
2. Diehl M., Hornung M. Requirements engineering of a micro-UAY defense system // IEEE Xplore. 2017. 8 p. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7934731/> (access data 02.07.2018).

3. Lobanovsky Yu.I. Non-system is the source of critical problems in the design of complex systems // Synerjetics Group. 2018. 16 p. (in Russ.) URL: <http://www.synerjetics.ru/article/nonsystems.pdf> (access data 02.07.2018).

4. Bahill A.T., Henderson S.J. Requirements development, verification, and validation exhibited in famous failures // Systems Engineering. 2005. V. 8 № 1. P. 1–14. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sys.20017> (access data 02.07.2018).

5. von Bertalanffy L. General System Theory: Foundations, Development, Applications. New York: George Braziller Inc., 1968. 289 p.

6. Diamond J. Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed. Penguin Books Ltd., 2005. 608 p.

Об авторе:

Лобановский Юрий Иоасафович, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, ПАО «Корпорация «Иркут» (Россия, 125315, Москва, Ленинградский пр-т, д. 68).

About the author:

Yury I. Lobanovsky, Ph.D. (Phys.-Math.), Leading Engineer, Irkut Corporation (68, Leningradsky prospect, Moscow, 125315, Russia).

УДК 303.732

ОБЩИЙ КЛАССИФИКАТОР СИСТЕМНЫХ ПРОБЛЕМ. Часть II: РАСШИРЕННАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ

Ю.И. Лобановский

*ПАО «Корпорация «Иркут», Москва 125315, Россия
@Автор для переписки, e-mail: streamphlow@gmail.com*

Проведена верификация верхнего уровня общего классификатора системных проблем, представленного в I части работы. Рассмотрено 60 известных из истории технических проектов, природных и общественных процессов, завершившихся неудачно – провалами, авариями и катастрофами. Они были взяты из литературы, содержащей сведения о 23 «знаменитых неудачах» и многочисленных экологических коллапсов, произошедших с различными человеческими сообществами. Остальные примеры подобраны практически случайным образом из бесконечного списка неудач, известных в истории, так, чтобы на каждый из 6 разделов рассматриваемого классификатора приходилось по 10 примеров. Все они размещены на структуре предлагаемого классификатора. Не выявлено ни одного проекта, события или процесса, которые не могли бы найти там свое естественное место. Таким образом, структура верхнего уровня общего классификатора системных проблем, состоящая из 6 элементов, является вполне адекватной для классификации любых систем, функционирование которых может привести к инцидентам, авариям или катастрофам.

Ключевые слова: проблема, классификация, системная инженерия, требования, валидация, верификация.

GENERAL CLASSIFIER OF SYSTEM PROBLEMS - II: EXTENDED VERIFICATION

Yu.I. Lobanovsky

*Irkut Corporation, Moscow, 125315, Russia
@Corresponding author e-mail: streamphlow@gmail.com*

The upper level of a general classifier of system problems was verified in this work. We examined 60 well-known technical projects, natural and social processes that ended in failure – crashes, accidents and disasters. These examples were taken from papers (where 23 "famous failures" are cited), which describe the numerous ecological collapses that occurred with different human communities, and the remaining examples were taken almost randomly from

an endless list of failures known in history, so that each of 6 sections of the classifier under consideration had 10 examples.

Keywords: problem, classification, system engineering, requirements, validation, verification

Введение

Данная публикация является продолжением работы¹, в которой описывались этапы построения общего классификатора системных проблем. В соответствии с принципами системной инженерии в настоящей статье дана расширенная верификация полученной классификационной структуры и продемонстрировано, что она является непротиворечивой, полной и правильной. Это подтверждается размещением в ней всех рассматривавшихся объектов или явлений, которые привели к инцидентам, авариям или катастрофам. Важно подчеркнуть, что не найдено проблемных объектов или явлений, которые не могли бы быть там размещены.

Верификация требований (второй этап)

Для доказательства правильности и полноты структуры классификатора рассмотрим 60 технических проектов, природных и общественных процессов, завершившихся неудачно. Семь из них уже использовались на первом этапе верификации [1]. Кроме того, 23 «знаменитые неудачи» взяты из работы [2] и еще 4 – выбраны из книги [3], как самые яркие. 26 оставшихся взяты практически случайным образом из бесконечного списка неудач, известных в истории, таким образом, чтобы на каждый из 6 классификационных разделов¹ приходилось по 10 примеров. По нашему мнению, такое их количество достаточно для окончательной верификации требований, при условии, что не будет найдено никаких примеров, которые нельзя было бы не разместить в рассматриваемой структуре классификатора общих системных проблем.

Чтобы обеспечить компактность представления результатов анализа, воспользуемся табличной формой. Событие, процесс или явление, завершившееся инцидентом, аварией или даже катастрофой, описано в первом столбце таблиц; во втором столбце указан год инцидента или примерные временные границы процесса; в третьем – кратко описана причина произошедшего и дана ссылка, по которой можно более подробно изучить это событие. Нередко в качестве причины принимается объяснение, указанное в приведенной ссылке, за исключением тех случаев, когда оно очевидно является негодным, что, по мнению автора, имеет место при описании нескольких эпизодов в работе [2] (особенно это относится к Чернобыльской катастрофе, где причина, по существу, не называется). Предположим, что причины всех инцидентов из каждой таблицы укладываются в раздел классификатора, названный в ее заголовке.

Сначала исследуем раздел классификатора а) «Несистемность (отсутствие системного подхода) – неконтролируемое, и, следовательно, неблагоприятное влияние компонент объекта/процесса на их функционирование (внутренний хаос)» (табл. 1).

Представляется, что все инциденты, к которым привел несистемный подход при их разработке и создании, вполне понятны даже при таком кратком их описании. Отметим,

¹Лобановский Ю.И. Общий классификатор системных проблем. Часть I: Анализ, синтез, валидация и верификация // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 4. С. 5–12.

что, несмотря на всё развитие системной инженерии, крупные неудачи, связанные с не-системностью инженерных разработок, не прекращаются, и, по всей видимости, их частота во времени в последние десятилетия не уменьшается.

Таблица 1. Несистемность

Событие/процесс/явление	Год(ы)	Причина
Гибель «Титаника»	1912	Использование теряющих прочность на холоде заклепок крепежа внешних листов корпуса судна, что привело к образованию недопустимо больших пробоин в нем после скользящего удара лайнера «Титаник» об айсберг [2].
Заккрытие советской лунной программы	1962–1974	Отработка подсистем лунной ракеты-носителя в целом не на наземных стендах, а путем ее «отстрела», что не позволило довести эту систему до работоспособного состояния [1].
Авария на «Аполлоне-13»	1970	Изменение параметров нагревателя кислородного бака без соответствующего изменения его документации [2].
Взрыв спейс шаттла «Челленджер»	1986	Ошибочная конструкция стыков секций твердотопливных ускорителей, собираемых на космодроме, не обеспечивающая герметичность соединения, особенно, на холоде [2, 4].
Взрыв ракеты-носителя «Ариан 5»	1996	Использование программного обеспечения предыдущей модели носителя без переработки и верификации [2].
Отказ спутника наблюдения за земной поверхностью	1997	Использование дефектного программного обеспечения в модуле ориентации [2].
Катастрофа аппарата для изучения климата Марса	1999	Использование разных единиц измерения производителем аппарата и организацией, им управлявшей [2].
Катастрофа аппарата для посадки на полюс Марса	2000	Не проведение испытаний двигательной системы аппарата в его посадочной конфигурации [3].
Перепроектирование электросистемы аэробуса A-380	2000–2006	Использование различных не стыкующихся между собой версий системы автоматизированного проектирования CATIA разными подразделениями компании Airbus ² .
Заккрытие американской лунной программы «Созвездие»	2004–2010	Сознательное нарушение системности разработки ракет-носителей в целях экономии [1].

Теперь перейдем к разделу классификатора б) «Негативная эмерджентность – непознанное или не учитываемое проектантами/исследователями из-за сложности анализа неблагоприятное взаимодействие подсистем рассматриваемой системы, приводящее к ее разрушению» (табл. 2).

Непосредственных разработчиков неудавшейся системы в случае негативной эмерджентности обычно нельзя винить в произошедшем, так как катастрофы такого типа связаны с процессами, которые были им просто неизвестны. При этом теоретическое или, по крайней мере, эмпирическое понимание этих процессов возникает после проведения научно-исследовательских работ, инициированных именно указанными катастрофами. Подобные причины возможных в будущем инцидентов следует перевести из раздела «Негативная эмерджентность» в раздел «Несистемность», и только тогда разработчики должны в полной мере нести ответственность за свою некомпетентность. Интересно отметить, что в 5 из 10 рассмотренных случаев инциденты связаны с разными видами автоколебаний – видимо, такие положительные обратные связи являются очень сложно выявляемыми до тех пор, пока сами не проявятся неожиданно для всех, кто имеет

²Wong K. What grounded the Airbus A380? [Электронный ресурс] / Cadalist, December 6, 2006. – Режим доступа: <http://www.cadalist.com/management/what-grounded-airbus-a380-5955>, свободный. – Загл. с экрана.

Таблица 2. Негативная эмерджентность

Событие/процесс/явление	Год(ы)	Причина
Засоление Междуречья Тигра и Евфрата	560-е гг. до н. э.	Использование методов мелиорации, пригодных в Египте, но непригодных в Междуречье [5].
Введение христианства на Руси и подрыв ее экспорта	988	Прекращение полюбья (ежегодных походов князей по окрестным территориям для сбора важнейшего товара русского экспорта – славянских рабов) из-за трудностей сбыта христиан собратьям по вере ³ .
Флаттер крыла самолета	1930–1945	Разрушительные автоколебания крыльев самолетов вследствие возникновения положительной обратной связи между их аэродинамическими и инерционными характеристиками ⁴ .
Взрывы ракетных двигателей	1930–1985	Возникновение высокочастотных автоколебаний в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей в процессе сгорания топлива ^{5, 6} .
Шимми носового колеса самолета	1939–1945	Автоколебания самоориентирующегося носового колеса самолета вследствие возникновения положительной обратной связи между его опорными и инерционными характеристиками [6].
Разрушение Такомского моста	1940	Разрушительные изгибно-крутильные автоколебания Такомского подвесного моста вследствие возникновения положительной обратной связи между его ветровыми и инерционными характеристиками ⁴ [2].
Затягивание в пикирование на околозвуковых скоростях полета	1943–1947	Смещение фокуса крыла самолета назад при приближении скорости полета к скорости звука [7].
Перепроектирование ракет-носителей для уменьшения их размеров	1960–2017	Ограничение размеров гигантских ракет-носителей вследствие быстрого и нелинейного увеличения акустических нагрузок при росте их масштабов ⁷ .
Чернобыльская катастрофа	1986	Паровой взрыв ядерного реактора из-за положительной реактивности его активной зоны при вскипании водяного теплоносителя [2, 8].
Саянская катастрофа	2009	Разрушительные автоколебания напорной системы Саяно-Шушенской ГЭС вследствие возникновения между ее гидродинамическими и энергетическими характеристиками положительной обратной связи [1].

отношение к системе с негативной эмерджентностью. Вдобавок, события «затягивание в пикирование» и «Чернобыльская катастрофа» также были вызваны процессами с положительной обратной связью, но развивавшимися достаточно монотонно, без заметных колебаний. Такие процессы обычно называют автокаталитическими.

Рассмотрим раздел с) «Внутренний ресурсный тупик – ограничение возможностей хотя бы одной из подсистем (ее характеристики не соответствуют требованиям, предъявляемым к ней системой), и это ограничение невозможно преодолеть внутри данной подсистемы» (табл. 3). Этот

³Мовчан А. Экономические истории. Часть 1. Как рабы разорили Русь [Электронный ресурс] // Сноб. 2014. – Режим доступа: <https://snob.ru/selected/entry/75126>, свободный. – Загл. с экрана.

⁴Кузьмина С., Карклэ П. Эолова арфа, самолеты и мосты [Электронный ресурс] // Наука и жизнь. 2009. № 5. – Режим доступа: http://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/430811, свободный. – Загл. с экрана.

⁵Валье Макс [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Валье,_Макс, свободный. – Загл. с экрана.

⁶ЖРД РД-170 (11Д521) и РД-171 (11Д520) [Электронный ресурс] // НПО Энергомаш. – Режим доступа: <http://www.lpre.de/energomash/RD-170/index.htm>, свободный. – Загл. с экрана.

⁷Разбор критики Interplanetary Transport System [Электронный ресурс] // Geektimes, 2017. – Режим доступа: <https://geektimes.ru/post/293541/>, свободный. – Загл. с экрана.

Таблица 3. Внутренний ресурсный тупик

Событие/процесс/явление	Год(ы)	Причина
Неудача с нацистской ядерной бомбой	1939–1945	Использование в качестве замедлителя исключительно тяжелой воды, не имевшейся в Германии в нужном количестве, вследствие ошибки Боте из-за его экспериментов с графитом, загрязненным бором, который является сильнейшим поглотителем нейтронов [9].
Невозможность боевого применения первого термоядерного устройства «Айви Майк»	1952	Невозможность боевого применения этого устройства была вызвана использованием дейтерия в жидком криогенном виде, а не в виде твердого соединения с литием, как в последующих термоядерных зарядах ⁸ .
Взрывы ракет-носителей с большим числом двигателей	1969–1981	Большая вероятность аварии на старте в связи с недостаточной надежностью ракетных двигателей ⁹ [1, 10]. Проблема решена в 2018 году.
Провал проекта РСjr компании IBM – предшественника ноутбуков	1983	Слишком малый размер клавиатуры [2]. Проблема была решена при создании современных ноутбуков.
Закрытие программы малозаметного палубного штурмовика А-12	1983 – 1990	Невозможность создать внешние обводы, удовлетворяющие как аэродинамическим требованиям, так и требованиям малой заметности. Невозможность создания покрытия самолета, устойчивого к воздействию морской воды ¹⁰ [1].
Массовый выход из строя холодильников компании GE с турбокомпрессорами	1986	Недолговечность ротора турбокомпрессора, выполненного для снижения затрат методом порошковой металлургии [2].
Отказ от экранопланов	1991	Невозможность создать крыло, одновременно и узкое (аэродинамически эффективное), и широкое (обеспечивающее необходимую высоту для полета с экранным эффектом над неровной поверхностью) ¹¹ [11].
Неудача с проектом «Биосфера-2»	1991–1994	Неконтролируемое размножение микроорганизмов, что привело к непрерывному снижению содержания кислорода в атмосфере комплекса «Биосфера-2» и разрушению его экосистемы ¹² .
Гибель спейс шаттла «Колумбия»	2002	Недостаточная прочность вспененного покрытия внешнего топливного бака, что привело к повреждению передней кромки крыла аппарата и его гибели при возвращении на Землю ¹³ [2].
Отказ от твердотопливной пилотируемой ракеты-носителя Ares-1	2010	Недопустимо большие для пилотируемого носителя вибрации при работе его твердотопливного ракетного двигателя ¹⁴ .

раздел классификатора был выявлен только при полноценном системном подходе к структурированию системных проблем и никак не проявился при эмпирическом рассмотрении проблем, обративших на себя внимание на тот момент. Однако после выделения этого раздела классификатора легко обнаружилось запланированные 10 примеров для его наполнения.

⁸Ivy Mike [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Ivy_Mike, свободный. – Загл. с экрана.

⁹OTRAG [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/OTRAG>, свободный. – Загл. с экрана.

¹⁰Котов М. Лучший военный распил двадцатого века [Электронный ресурс] // Warhead, 2018. – Режим доступа: https://warhead.su/2018/01/05/luchshiy-voennyuy-raspil-dvadsatogo-veka?utm_source=warfiles.ru, свободный. – Загл. с экрана.

¹¹Советский ударный экраноплан «Лунь»: история создания, описание и технические характеристики [Электронный ресурс] // MilitaryArms.ru. – Режим доступа: <https://militaryarms.ru/voennaya-texnika/aviaciya/lun/>, свободный. – Загл. с экрана.

¹²Биосфера-2: неудавшийся эксперимент создания замкнутой экосистемы [Электронный ресурс] // Родовид, 2016. – Режим доступа: <https://rodovid.me/ecoposelenia/biosfera-2-neudachnyy-eksperiment-sozdaniya-zamknutoy-ekosistemy.html>, свободный. – Загл. с экрана.

¹³Space Shuttle Columbia disaster [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Space_Shuttle_Columbia_disaster, свободный. – Загл. с экрана.

¹⁴Klamper A. NASA Finalizes Ares 1 Vibration Fix [Электронный ресурс] // SpaceNews, 2009. – Режим доступа: <http://spacenews.com/nasa-finalizes-ares-1-vibration-fix/>, свободный. – Загл. с экрана.

Данная причина системных проблем легко структурируется далее (если это потребуется) с разделением на проблемы подсистем, которые:

- принципиально не могут быть решены в рамках данной системы (примером является крыло экраноплана, табл. 3);
- решаются заменой подсистемы на более подходящую (первым потенциально боевым твердофазным термоядерным зарядом с дейтеридом лития – так называемой «лидочкой», стала «слойка» Сахарова уже в 1953 году¹⁵);
- решаются повторным появлением прежних подсистем на более высоком уровне развития технологии (ракета-носитель «Falcon Heavy» с 27 работающими двигателями на старте, ноутбуки, малозаметные палубные самолеты типа F-35C).

Заметим, что внутренний ресурсный тупик как причина экологических проблем не была зафиксирована в книге [3], несмотря на десятки примеров коллапсов древних и современных человеческих сообществ. И это, по-видимому, вполне объяснимо: наличие внутреннего ресурсного тупика либо не позволяет системе возникнуть вообще, либо приводит к прекращению ее развития и быстрой гибели. Если что-то подобное происходило на уровне экологии ранее, то никаких заметных следов в истории не оставило. Только неудача эксперимента, проведенного на наших глазах – «Биосферы-2», дала экологический пример внутреннего системного ресурсного тупика.

Перейдем к разделу классификатора d) «Несистемность на надсистемном уровне – неблагоприятное влияние факторов существующего окружения на функционирование системы (неблагоприятный интерфейс системы)» (табл. 4).

Отметим здесь только то, что советские гидроэнергетики, спроектировав Асуанскую плотину на Ниле, как бы «отомстили» египетским мелиораторам за засоление ими Междуречья (см. табл. 2), также оказавшись в положении пришельцев, не вполне осознающих местные условия. При этом последний по времени казус отнесен не к негативной эмерджентности, а к несистемности интерфейса, потому что для гидроэнергетиков система всего хозяйства Египта не является тем, из чего они должны были исходить при проектировании ГЭС. Вышеуказанным процессом должен был бы заниматься какой-то более высокий государственный орган, которого в наличии, как следует из всего произошедшего, не оказалось, хотя было общеизвестно, что движение плодородного ила из верховьев реки вниз по течению в ее дельту – житницу страны обеспечивало урожаи в Египте в течение 5 тысяч лет. Вряд ли требовалось проводить серьезные научные изыскания для понимания того, что выключение этого природного конвейера не является хорошим проектным решением. Асуанская плотина – довольно явный пример очевидной несистемности (то есть головотяпства, как любили формулировать в Советском Союзе) на надсистемном уровне.

Таким образом, несмотря на развитие системной инженерии в последние десятилетия, ошибки, связанные с несистемностью инженерных разработок на системном и на надсистемном уровнях, не прекращаются, и их постоянно продолжают совершать, в том числе, и лидеры в системной инженерии – NASA и Airbus.

¹⁵Горелик Г. «Лидочка Гинсбург» и другие термоядерные идеи [Электронный ресурс] // Наука и жизнь. 2010. № 3. – Режим доступа: http://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431002/Lidochka_Ginzburg_i_drugie_termoyadernye_idei, свободный. – Загл. с экрана.

Таблица 4. Несистемность на надсистемном уровне

Событие/процесс/явление	Год(ы)	Причина
Советские предвоенные истребители	1939–1941	Неверные представления о характере боевых действий в будущей воздушной войне, которые привели в ее начале к неадекватной структуре истребительной авиации [1].
Легкий одномоторный бомбардировщик Су-2	1941	Невозможность эффективных действий в условиях господства в воздухе вражеской авиации, что привело к быстрому прекращению его производства ¹⁶ .
Баллистическая ракета V-2	1942–1945	Отвлечение на разработку, создание и боевое применение ресурсов, которые могли бы быть использованы на производство значительно более эффективных в войне видов оружия [12].
Коммерческий провал автомобиля «Edsel» компании Ford	1957–1959	Восьмилетние (с 1948 по 1956 год) разработки компанией Ford престижного массового автомобиля среднего класса, которые привели к созданию «пожирателя бензина», не пользовавшегося спросом на рынке [2].
Асуанская плотина и озеро Насер	1960–1970	Асуанская плотина, образовав озеро Насер, перекрыла ежегодные поступления плодородного ила из верховьев реки в ее дельту, что приводит к постепенному разрушению дельты Нила – житницы Египта, а также требует постоянного использования химических удобрений ¹⁷ .
Вьетнамская война	1965–1972	Американское общество явно продемонстрировало нежелание нести такие тяготы, которые считались вполне приемлемыми еще совсем недавно в ходе Корейской войны (1950–1953) ¹⁸ [2].
Коммерческий провал нового напитка «New Coke» компании Coca Cola	1988	Попытка компании Coca Cola расширить рынок продаж своих напитков, имитировав вкус популярного напитка компании Pepsi Cola, привела к быстрому перетеканию покупателей к конкуренту [2].
Провал миссии UNIFOR в Боснии	1992–1995	Силы ООН по защите мирного населения Боснии при всей своей подготовке оказались недостаточными количественно для эффективного противодействия местным вооруженным формированиям [2].
Коммерческая неудача спутниковой системы связи «Иридиум»	1999	Использование компанией Motorola аналоговой системы для спутниковой телефонии в условиях быстрого развития более перспективных цифровых систем привело к неудаче этой программы [2].
Потеря рынка самолетом-аэробусом A-380	2005 – н. в.	Неоправдавшиеся представления компании Airbus о трансконтинентальных пассажирских авиаперевозках через аэропорты-хабы как об оптимальном способе их организации ¹⁹ .

Рассмотрим раздел классификатора е) «Изменение сценария – непредсказуемое, неблагоприятное и ранее не существовавшее влияние факторов изменившегося окружения на функционирование системы (неблагоприятное изменение интерфейса)» (табл. 5). Он, в некотором смысле, является аналогом раздела «Негативная эмерджентность», только здесь

¹⁶Су-2: самолет, незаметный во всех смыслах слова (часть 2) [Электронный ресурс] // Военное обозрение. 2017. – Режим доступа: <https://topwar.ru/114449-su-2-samolet-nezametny-vo-vseh-smyslah-slova-chast-2.html>, свободный. – Загл. с экрана.

¹⁷Маковецкий М. Асуанская плотина: экологические последствия [Электронный ресурс] // Проза.ру. 2010. – Режим доступа: <https://www.proza.ru/2010/04/05/497>, свободный. – Загл. с экрана.

¹⁸Расстрел в Кентском университете [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Расстрел_в_Кентском_университете, свободный. – Загл. с экрана.

¹⁹Турков А. Airbus бьет рекорды и готов прекратить выпуск самолета-гиганта A380 [Электронный ресурс] // Deutsche Welle, Экономика. 2018. – Режим доступа: <http://www.dw.com/ru/airbus-бьет-рекорды-и-готов-прекратить-выпуск-самолета-гиганта-a380/a-42154885>

Таблица 5. Изменение сценария

Событие/процесс/явление	Год(ы)	Причина
Македонская фаланга	350–168 гг. до н. э.	Беспомощность сплошного строя фаланги на пересеченной местности против более гибкого расчлененно-сомкнутого строя римского легиона [1].
Поселения викингов в Гренландии	984–1435	Малый ледниковый период, который привел к резкому ухудшению жизни в Гренландии, изоляции от Европы и гибели колонии викингов [3].
Линкоры дредноутного типа	1906–1941	Бессилие пушек и брони линкоров против палубной авиации [1].
Истребитель «Зеро»	1942–1944	Господство на Тихоокеанском театре военных действий японского палубного истребителя «Зеро» над любым противником в ближних маневренных боях (Dog fights) в 1942 году и его беспомощность против атак новых американских истребителей на пикировании (Boom-zoom) в 1944 году [13].
Стратегические сверхзвуковые крылатые ракеты	1950–1964	Неконкурентоспособность стратегических сверхзвуковых крылатых ракет после появления межконтинентальных баллистических ракет и баллистических ракет морского базирования [14, 15].
Программа сверхзвукового пассажирского самолета «Конкорд»	1976–2003	Коммерческое использование самолета «Конкорд» оказалось чрезмерно дорогим в условиях резкого роста цен на топливо [2].
Программа «Спейс Шаттл»	1981–2010	Экономическая неэффективность пилотируемых носителей типа «Спейс Шаттл» при резком снижении числа запусков в связи со сложностью межполетного обслуживания и изменением приоритетов американской космической программы [16].
Кризис мировой ядерной энергетики	1986 – н. в.	Изменение критериев надежности ядерных энергетических блоков после Чернобыльской катастрофы и рост внимания общества к экологии ²⁰ .
Атака Международного центра торговли в Нью-Йорке	2001	Конструкция зданий оказалась неспособной противостоять террористической атаке с использованием крупных и почти полностью заправленных пассажирских самолетов [2].
Северо-Восточный американский энергетический коллапс	2003	Рост деревьев вблизи линий электропередач при пренебрежении эксплуатантов к необязательным стандартам по очистке линий от насаждений, что и явилось «спусковым крючком» коллапса [2].

неблагоприятные и непредсказуемые связи возникают уже между системами, то есть, при переходе на более высокий уровень рассмотрения раздел е) просто переходит в раздел б).

Кажется, что представленные примеры достаточно самоочевидны. Хочется сделать только одно замечание: японский истребитель «Зеро» преодолел путь от «абсолютного оружия – короля воздуха» к состоянию «индейки», на которую идет почти безопасная охота, за рекордно короткий срок – примерно за 2 года.

И, напоследок, перейдем к разделу классификатора ф) «Внешний ресурсный тупик – ограничения возможностей системы в рамках надсистемы (то же, что и границы развития или пределы роста)» (табл. 6).

В разделе ф) пока нашлось не слишком много примеров технических проектов, по-видимому, из-за того, что по-настоящему крупные и сложные системы такого рода стали соз-

²⁰Ожаровский А. Производство ядерной энергии в мире сокращается на 2% в год [Электронный ресурс] // Bellona. 2010. – Режим доступа: <http://bellona.ru/2010/05/07/proizvodstvo-yadernoj-energii-v-mire-s/>, свободный. – Загл. с экрана.

Таблица 6. Внешний ресурсный тупик

Событие/процесс/явление	Год(ы)	Причина
Голод и катастрофическое снижение численности населения на острове Пасхи	1400–1600	Потеря пищевых ресурсов, в первую очередь, из окрестного океана из-за отсутствия лодок, вызванного гибелью лесов, пошедших на производство веревок, стропил и салазок, нужных для постройки ритуальных комплексов в виде гигантских статуй – моаи [3].
Исчерпание «генетического ресурса» населения острова Питкэрн	1500–1700	Изоляция острова, которая привела к вымиранию его немногочисленного населения из-за отсутствия притока «свежей крови» [3].
«Тюльпанная» лихорадка, «МММ» и биткойн	1636–2018	Обрушение растущей финансовой пирамиды при выходе ее на ресурсные границы ^{21, 22, 23} .
Крах русской кампании Наполеона	1812	Невозможность обеспечить снабжение французской армии, что привело к практически полной ее потере от холода и голода, несмотря на выигрыш французами всех крупных сражений и на захват Москвы ²⁴ .
Итоги кампании 1941 года на Восточном фронте	1941	Зимнее поражение наступавших германских войск, вызванное их истощением из-за недостатка резервов, обусловленного недооценкой противника и распылением имевшихся ресурсов [17].
Карибский кризис	1962	Стремление быстро изменить соотношение сил между СССР и США в области стратегических вооружений при отсутствии на тот момент у СССР реальных экономических возможностей это сделать ^{25, 26} .
Истребители пятого поколения	1986 – н. в.	Невозможность из-за дороговизны постройки достаточно-го количества таких истребителей для обеспечения всех необходимых операций [1].
Космический телескоп «Хаббл»	1990	Отсутствие испытаний системы в целом на Земле из-за нехватки финансирования, что привело к необходимости модернизации телескопа на орбите в условиях открытого космоса [2].
Геноцид в Руанде	1994	Крайняя нехватка земли в связи с быстрым ростом населения, усугубленная этническим конфликтом племен хуту и тутси [3].
Прекращение постройки Суперколлайдера	1995	Перерасход во время строительства Суперколлайдера имевшихся средств, который привел к потере политической поддержки проекта, дальнейшему снижению финансирования и его полной остановке [2].

давать сравнительно недавно, если не считать таковым строительство больших архитектурных сооружений типа мегалитических dolmen, египетских пирамид или Великой Китайской стены. О тех временах, кажется, известно недостаточно для того, чтобы уверенно классифицировать такие объекты и их проблемы с системной точки зрения. Однако

²¹Тюльпаномания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Тюльпаномания>, свободный. – Загл. с экрана.

²²МММ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/МММ>, свободный. – Загл. с экрана.

²³Комраков А. Соцсети ополчились на криптовалюту. Трейдеры нашли признаки грядущего грандиозного обвала цены биткойна [Электронный ресурс] // Независимая газета. 19.03.2018. – Режим доступа: http://www.ng.ru/economics/2018-03-19/1_7192_bitcoin.html?id_user=Y, свободный. – Загл. с экрана.

²⁴Епатко А. Наполеон о русской кампании 1812 года [Электронный ресурс] // Наука и жизнь. 2012. № 8. – Режим доступа: <https://www.nkj.ru/archive/articles/20982/>, свободный. – Загл. с экрана.

²⁵Карибский кризис [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Карибский_кризис, свободный. – Загл. с экрана.

²⁶Макарычев М. Ёж для американцев. 45 лет назад мир оказался на пороге ядерной войны [Электронный ресурс] // Родина, 2007. – Режим доступа: <https://rg.ru/2007/10/25/cuba-krizis.html>, свободный. – Загл. с экрана.

в самое последнее время стали появляться технические системы высочайшего технологического уровня, которые все более и более часто начинают испытывать внешние ограничения, в основном пока, финансового характера (телескоп «Хаббл», Суперколлайдер, истребители пятого поколения). На системном уровне, относящемся к жизни различных человеческих сообществ и, особенно, к крупным боевым операциям, ресурсные ограничения, превращающие победу в поражение – это обыденная реальность. Отсюда следует, что системные инженеры в настоящее время должны пройти хотя бы краткий курс истории войн и военного искусства. Если бы это уже было сделано, то тяжелая судьба нового технического шедевра – большого космического инфракрасного телескопа «Джеймс Уэбб» могла бы быть заметно легче²⁷.

Заключение

Не вызывает сомнений, что 60 представленных примеров еще не являются доказательствами полноты и правильности предлагаемой структуры, а только полезными разъяснениями общих принципов ее построения. Однако тот факт, что не было найдено ни одного примера, который нельзя было бы разместить в рассматриваемой структуре, и, вероятно, их и невозможно найти в связи со способом построения структуры классификатора, является искомым доказательством. Следует также отметить, что негативная эмерджентность системы и ее эквивалент на надсистемном уровне – изменение сценария, в гуманитарной парадигме получили название «Черного лебедя», который приносит на своих крыльях совершенно неожиданную катастрофу. Остальные 4 типа событий – по-видимому, так называемые «Серые лебеди» [18].

Возможно, не всякий читатель согласится с распределением описанных 60 событий, процессов или явлений по шести разделам классификатора общих системных проблем. Отчасти это может быть связано с уровнем, на котором он их может рассматривать. Например, коллапс человеческого сообщества на острове Пасхи, вызванный потерей доступа к пищевым ресурсам окружающего остров океана, отнесен автором к внешнему ресурсному тупику. Хотя если рассмотреть экосистему острова с примыкающими к нему водами в целом, то все произошедшее должно описываться просто как проявление несистемности вследствие безумной растраты жителями острова слабо возобновляемого ресурса – леса для достижения совершенно иррациональных целей – доминирования каждого из их кланов над другими посредством чрезвычайно ресурсоемких обрядов. Как известно, своеобразная ритуально-мистическая «холодная война» на острове, выразившаяся в создании более сотни каменных платформ – аху с почти девятью сотнями огромных статуй предков – моаи, переросла в горячую войну, и все закончилась голодом, каннибализмом и полным крахом всего островного сообщества, после чего все моаи были повалены, а аху – разрушены [3]. К таким результатам приводит иногда неумение системно решать встающие перед обществом проблемы.

Системные инженеры, отвечающие за решение общественных проблем, обычно заранее точно знают уровень рассмотрения той системы, с которой они должны работать, и это упрощает определение встающих перед ними проблем, особенно при использовании предлагаемого классификатора. Очень желательно, чтобы решаемые проблемы были реальными.

²⁷James Webb Space Telescope [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/James_Webb_Space_Telescope, свободный. – Загл. с экрана.

Выводы

1. На основе системных принципов и анализа требований построен верхний уровень общего классификатора системных проблем.
2. Классификатор является непротиворечивым, полным и правильным, что подтверждено размещением в нем всех рассматривавшихся объектов или явлений, которые привели к инцидентам, авариям или катастрофам, а также тем, что не найдено проблемных объектов или явлений, которые не могли бы быть в нем размещены.
3. Классификатор применим к системным проблемам технического, экологического и общественно-политического характера.
4. Положение проблемы в системе классификации зависит от уровня науки и технологий на момент разработки данной системы. С течением времени, по мере накопления знаний, возможен переход проблем с более сложных для разработчика уровней на более простые (от незнания к беспорядку). Следовательно, систематика проблем является относительной и зависящей от времени.
5. Показано, что только обобщение эмпирического материала без использования методов системной инженерии при построении функциональных и логических описаний сложных систем не гарантирует, что созданная система будет непротиворечива, полна и правильна.

Литература:

1. Лобановский Ю.И. Несистемность – источник критических проблем при проектировании сложных систем // Synerjetics Group. 2018. 16 с. URL: <http://www.synerjetics.ru/article/nonsystems.pdf> (дата обращения 02.07.2018).
2. Bahill A.T., Henderson S.J. Requirements development, verification, and validation exhibited in famous failures // Systems Engineering. 2005. V. 8 № 1. P. 1–14. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sys.20017> (дата обращения 02.07.2018).
3. Даймонд Дж. Д. Коллапс. М.: АСТ, 2010. 762 с. URL: <https://www.e-reading.club/book.php?book=1006586> (дата обращения 02.07.2018).
4. McConnell M. Challenger – A Major Malfunction: A True Story of Politics, Greed, and the Wrong Stuff. Doubleday Religious Publishing Group, 1987. 269 p.
5. Гумилев Л.Н. Кто разрушил Вавилон? / В кн. «Этногенез и биосфера Земли». М., Рольф, 1987. 512 с. URL: <https://history.wikireading.ru/3527> (дата обращения 02.07.2018).
6. Келдыш В.М. Шимми переднего колеса трехколесного шасси // Труды ЦАГИ. 1945. Вып. 564. С. 1–34.
7. Амирьянц Г.А. Летчики-испытатели. Сергей Анохин со товарищи. М.: Машиностроение, 2001. 157 с. URL: <https://litlife.club/bd/?b=236414> (дата обращения 02.07.2018).
8. INSAG-7. Чернобыльская авария. Дополнение к INSAG-1 : Доклад Международной Консультативной группы по ядерной безопасности. Вена: Международное агентство по ядерной энергии, 1992. 148 с.
9. Bethe H.A. The German Uranium Project // Physics Today Online. 2000. V. 53. № 7. URL: <http://www-personal.umich.edu/~sanderson/214/other/news/Bethe.html> (дата обращения 02.07.2018).
10. Черток Б. Е. Ракеты и люди. Лунная гонка. Книга 4. М.: Машиностроение, 2013. 542 с.

11. Кюхеман Д. Аэродинамическое проектирование самолетов. М.: Машиностроение, 1983. 656 с.
12. Шпеер А. Воспоминания : Пер. с нем. М.: Захаров, 2010. 712 с. http://militera.lib.ru/memo/german/speer_a/index.html
13. Сакаи С., Кайдин М., Сайто Ф. Самурай! М.: Центрполиграф, 2005. 336 с.
14. Евстафьев М.Д. Долгий путь к «Буре» (о создании межконтинентальных ракет «Буря» и «Буран»). М.: Вузовская книга, 1999. 112 с. URL: <http://www.astronaut.ru/bookcase/books/evstafiev/text/> (дата обращения 02.07.2018).
15. Herken G. The Flying Crowbar // Air & Space Magazine. 1990. V. 5. № 1. P. 28. URL: <http://www.merkle.com/pluto/pluto.html> (дата обращения 02.07.2018).
16. Pielke R., Jr. Space Shuttle Value Open to Interpretation // Aviation Week & Space Technology. 1993. V. 139. № 4. P. 57–58.
17. Типпельскирх К. История Второй мировой войны. М.: АСТ, 1999. 796 с.
18. Талев Н.Н. Черный лебедь. Под знаком непредсказуемости. 2-е изд. М.: Колибри, Азбука-Аттикус, 2012. 528 с.

References:

1. Lobanovsky Yu. I. Non-system is the source of critical problems in the design of complex systems // Synerjetics Group. 2018. 16 p. (in Russ.). URL: <http://www.synerjetics.ru/article/nonsystems.pdf> (access date 02.07.2018).
2. Bahill A.T., Henderson S.J. Requirements development, verification, and validation exhibited in famous failures // Systems Engineering. 2005. V. 8 № 1. P. 1–14. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sys.20017> (access date 02.07.2018).
3. Diamond J. Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed. Penguin Books Ltd., 2005. 608 p.
4. McConnell M. Challenger – A Major Malfunction: A True Story of Politics, Greed, and the Wrong Stuff. Doubleday Religious Publishing Group, 1987. 269 p.
5. Gumilyov L.N. Who destroyed Babylon? / In book «Ethnogenesis and Biosphere of Earth». Moscow, Rolf Publ., 2001. 512 p. (in Russ.). URL: <https://history.wikireading.ru/3527> (access date 02.07.2018).
6. Keldysh V.M. Frontal wheel shimmy of three-wheeled chassis // Trudy TsAGI. 1945. Iss. 564. P. 1–34. (in Russ.)
7. Amiryants G.A. Test Pilots. Sergey Anokhin with fellow workers. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2001. 157 p. (in Russ.). URL: <https://litlife.club/bd/?b=236414> (access date 02.07.2018).
8. INSAG-7. The Chernobyl Accident, Updating of INSAG-1: A Report by the International Nuclear Safety Advisory Group. Vienne: International Nuclear Safety Advisory Group, 1992. 148 p.
9. Bethe H.A. The German Uranium Project // Physics Today Online. 2000. V. 53. № 7. URL: <http://www-personal.umich.edu/~sanders/214/other/news/Bethe.html> (access date 02.07.2018).
10. Chertok B.E. Rockets and People. Book IV. Lunar Race. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2013. 542 p. (in Russ.)

11. Küchemann D. Aerodynamic Design of Airplanes. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. 656 p. (in Russ.)
12. Speer A. Memoirs. Moscow: Zakharov Publ., 2010. 712 p. (in Russ.). URL: http://militera.lib.ru/memo/german/speer_a/index.html (access date 02.07.2018).
13. Sakai S., Saito F., Caidin M. Samurai! New York: Dutton, 1957.
14. Evstafiev M. D. Long march to «Burya» (About of making intercontinental rockets «Burya» and «Buran»). Moscow: Vuzovskaya Kniga Publ., 1999 (in Russ.). URL: <http://www.astronaut.ru/bookcase/books/evstafiev/text/> (access date 02.07.2018).
15. Herken G. The Flying Crowbar // Air & Space Magazine. 1990. V. 5. № 1. P. 28. URL: <http://www.merkle.com/pluto/pluto.html> (access date 02.07.2018).
16. Pielke R., Jr. Space Shuttle Value Open to Interpretation // Aviation Week & Space Technology. 1993. V. 139. № 4. P. 57–58.
17. Tippleskirch K. History of World War II. Moscow: AST Publ., 1999. 796 p. (in Russ.)
18. Taleb N.N. The Black Swan. Under the Sign of Unpredictability, 2-nd edition. Moscow: KoLibri, Azbuka-Attikus Publ., 2012. 528 p. (in Russ.)

Об авторе:

Лобановский Юрий Иоасафович, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, ПАО «Корпорация «Иркут» (Россия, 125315, Москва, Ленинградский пр-т, д. 68).

About the author:

Yury I. Lobanovsky, Ph.D. (Phys.-Math.), Leading Engineer, Irkut Corporation (68, Leningradsky prospect, Moscow, 125315, Russia).

УДК 004.89

АВТОМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СЦЕНАРИЕВ ПОХОДКИ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ МЕХАТРОННО-МОДУЛЬНЫХ РОБОТОВ В МОДИФИКАЦИИ ШАГАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ

**С.В. Манько,
Е.И. Шестаков[@]**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: shestakov.e.i@yandex.ru*

Реконфигурируемые мехатронно-модульные роботы, главной отличительной особенностью которых является способность к адаптации своей структуры в зависимости от специфики выполняемых задач и условий окружающей обстановки, представляют большой интерес для широкого спектра различных приложений. Один из ключевых вопросов управления движением роботов такого типа заключается в необходимости использования оригинальных алгоритмов для каждой из возможных конфигураций, многообразие которых будет определяться конструкцией мехатронных модулей, их численностью и выбранным вариантом сопряжения. Некоторые типовые конфигурации мехатронно-модульных перестраиваемых роботов допускают возможность разработки алгоритмов управления движением, инвариантных к числу звеньев в составе кинематической структуры. Однако перспективный подход к решению проблемы в общем случае связан с развитием средств и методов самообучения, позволяющих обеспечить автоматизированный синтез алгоритмов управления движением многозвенного мехатронно-модульного робота с учетом его выбранной конфигурации. В настоящей статье обсуждаются результаты поисковых исследований по применению аппарата самоорганизующихся конечных автоматов для решения задачи автоматического синтеза сценариев походки реконфигурируемых мехатронно-модульных роботов в модификации шагающей платформы. Приводятся результаты модельных экспериментов, подтверждающих работоспособность и эффективность разработанных алгоритмов.

Ключевые слова: реконфигурируемые мехатронно-модульные роботы, самообучение, интеллектуальные системы управления, конечные автоматы.

AUTOMATIC SYNTHESIS OF GAIT SCENARIOS FOR RECONFIGURABLE MECHATRONIC MODULAR ROBOTS IN THE MODIFICATION OF THE WALKING PLATFORM

**S.V. Manko,
E.I. Shestakov[@]**

*MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
[@]Corresponding author e-mail: shestakov.e.i@yandex.ru*

Reconfigurable mechatronic modular robots capable of adapting their structure depending on the specifics of the tasks performed and the environmental conditions are of great interest for a wide range of different applications. One of the key issues in controlling the movement of robots of this type is the need to use original algorithms for each of the possible configurations. The variety of configurations is determined by the structure of mechatronic modules, their number and the selected connection option. Some typical configurations of mechatronic modular robots allow the development of motion control algorithms invariant with respect to the number of modules in the kinematic structure. However, a promising approach to solving the problem is generally associated with the development of self-learning methods and tools for the automated synthesis of motion control algorithms of a multi-link mechatronic modular robot in case of chosen configuration. This article discusses the results of research on the use of self-organized finite-state machines for solving the problem of automatic synthesis of scenarios for the gait of reconfigurable mechatronic-modular robots in the modification of the walking platform. The results of model experiments confirming the efficiency and effectiveness of the developed algorithms are presented.

Keywords: reconfigurable modular robots, self-learning, intelligent control systems, finite-state machine.

Введение

Привлекательность и функциональные возможности многозвенных реконфигурируемых роботов, концепция которых появилась и стала активно развиваться на рубеже XX–XXI веков, целиком и полностью определяются интеграцией известных принципов блочно-модульного построения сложных технических систем. Комплексное сочетание модульности механических конструкций, аппаратных средств и программно-алгоритмического обеспечения обуславливает потенциальные преимущества реконфигурируемых роботов, как нового класса электромеханических устройств, создаваемых на базе типовых мехатронных элементов и обладающих уникальным набором свойств. Сюда относится их многофункциональность, повышенная проходимость и мобильность, надежность и самовосстанавливаемость, адаптивность кинематической структуры и ее оперативная модифицируемость в соответствии с особенностями прикладного применения и условиями внешней среды. Практическое воплощение подобного подхода связано с необходимостью решения ряда ключевых задач, среди которых одними из важнейших являются самообучение и автоматический синтез алгоритмов управления многозвенным мехатронно-модульным роботом для его конфигурации, синтезированной исходя из специфики текущей ситуации.

Особенности функционирования мехатронно-модульных реконфигурируемых роботов

Концепция построения мехатронных роботов с адаптивной кинематической структурой предполагает наличие однотипных модулей, объединяемых в единую многозвенную конструкцию. Типовые мехатронные модули включают в свой состав один и несколько двигателей с поворотными шарнирами и простейшими механическими передачами, интерфейсные площадки для обеспечения взаимного механического, электрического и информационного сопряжения, управляющий контроллер, различные виды датчиков и автономный источник питания. Подобная конструкция типовых модулей позволяет обеспечить

их автоматическую стыковку и расстыковку для оперативного формирования необходимой конфигурации кинематической структуры робота в зависимости от целей и условий функционирования.

Несмотря на разнообразие предлагаемых вариантов типовых мехатронных модулей, подавляющее большинство разработчиков в приложении к задачам целенаправленного перемещения многозвенных роботов с адаптивной кинематической структурой рассматривают три основных модификации их возможной компоновки, показанные на рис. 1–4 [1]:

- с конфигурацией «колеса» для движения по поверхности ровного профиля;
- со змеевидной конфигурацией для движения в условиях ограниченного пространства;
- с конфигурацией шагающей платформы для движения по поверхностям переменного профиля в условиях сложных сцен с многочисленными препятствиями и неровностями.



Рис. 1. Примеры различных конфигураций экспериментального образца многозвенного мехатронно-модульного робота с адаптивной кинематической структурой PolyBot (PARK, Xerox, USA):
а – конфигурация типа «колесо»; *б* – змеевидная конфигурация;
в – конфигурация шагающей платформы.



Рис. 2. Примеры различных конфигураций экспериментального образца многозвенного мехатронно-модульного робота с адаптивной кинематической структурой SckBot (Modlab, UPenn, USA): *а* – змеевидная конфигурация; *б* – конфигурация типа «колесо»; *в* – конфигурация шагающей платформы.

Следует отметить, что управление такими роботами в змеевидной конфигурации и конфигурации колеса может осуществляться с помощью универсальных алгоритмов, обеспечивающих волнообразную повторяемость движений мехатронных модулей в составе единой кинематической цепи для ее целенаправленного перемещения [2].

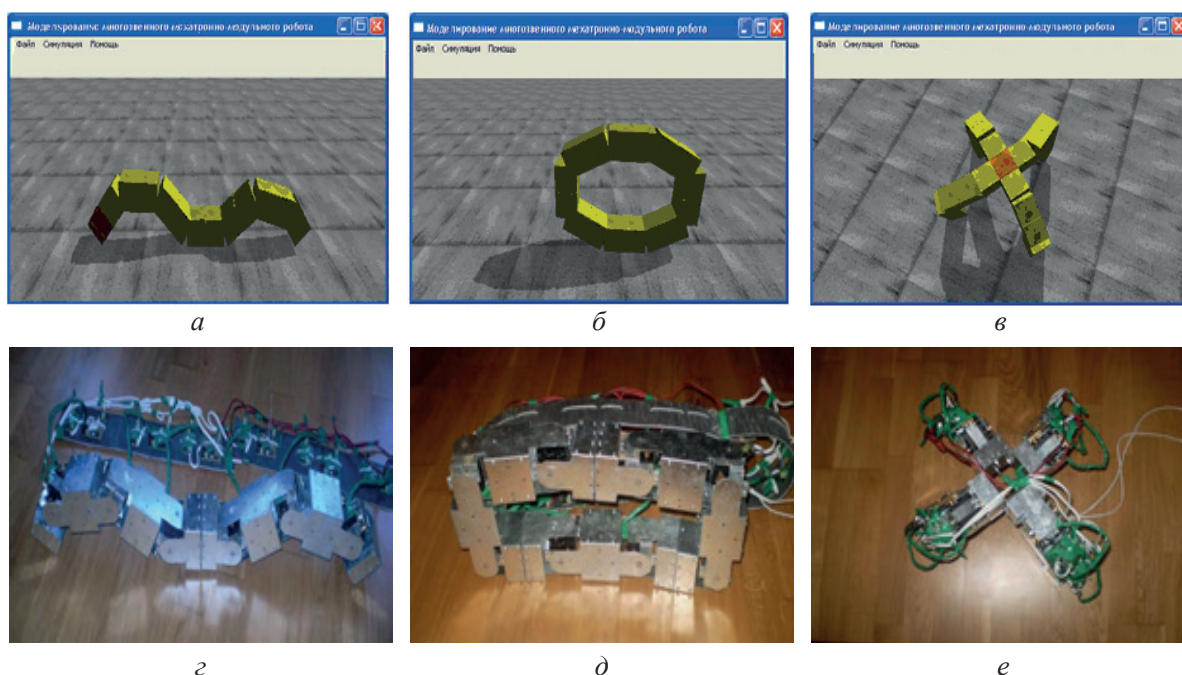


Рис. 3. Мехатронно-модульный реконфигурируемый робот с адаптивной кинематической структурой «АРАКС» (РТУ МИРЭА, Россия):

а, г – компьютерные модели и макетный образец в змеевидной конфигурации;
б, д – в конфигурации колеса; *в, е* – в конфигурации шагающей платформы.

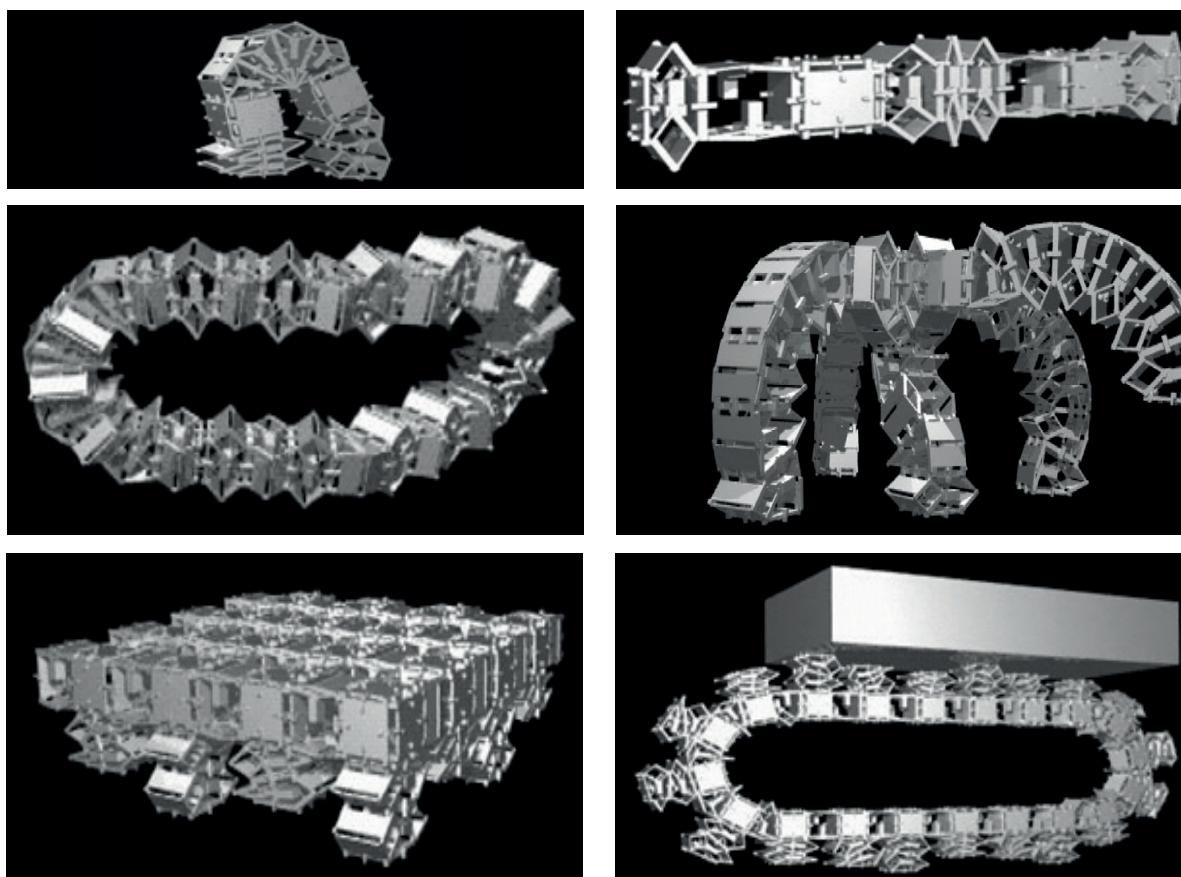


Рис. 4. Примеры различных конфигураций экспериментального образца многозвенного мехатронно-модульного робота Polypot (PARK, Xerox, USA).

Необходимость трансформации робота в конфигурацию шагающей платформы в общем случае вызвана усложнением характера внешней среды и условий проходимости (рис. 5). При этом и число конечностей шагающей платформы, и количество входящих в них сочленений должно определяться, исходя из анализа фактической обстановки с учетом величины преодолеваемых неровностей и препятствий, массогабаритных параметров полезной нагрузки и других факторов.

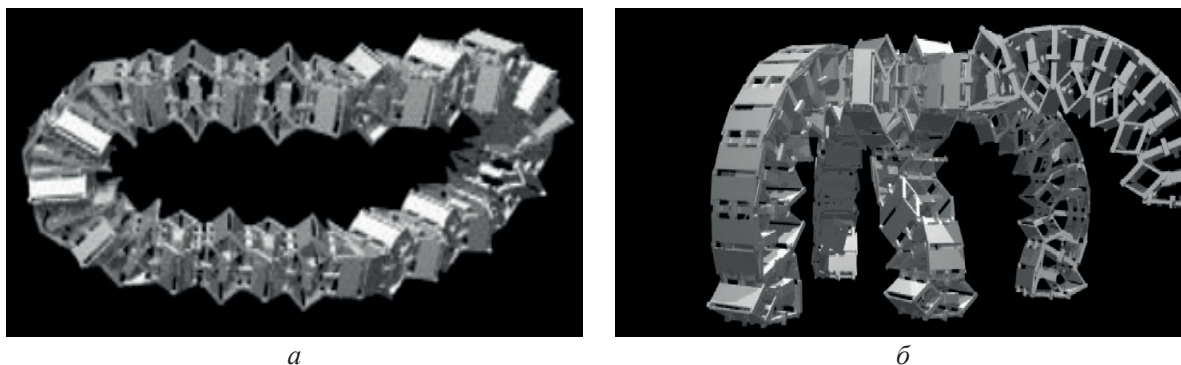


Рис. 5. Трансформация мехатронно-модульного робота с адаптивной кинематической структурой в конфигурацию шагающей платформы при усложнении характера внешней среды и условий проходимости.

Априорная неизвестность и множественность вариантов возможного построения кинематической схемы мехатронно-модульного робота в конфигурации шагающей платформы не позволяет обеспечить разработку требуемых сценариев походки и соответствующих алгоритмов управления.

Таким образом, становится очевидным, что проблемы управления реконфигурируемыми роботами в модификации шагающей платформы во многом связаны с организацией режима самообучения, направленного на автоматическое формирование сценариев походки для обоснованно выбранной кинематической схемы с установленным числом конечностей и их сочленений.

Методы и технологии самообучения в интеллектуальных системах управления автономными роботами

Одна из ключевых проблем создания интеллектуальных систем управления автономными роботами и другими типами сложных динамических объектов, действующих в условиях неопределенности, связана с организацией режимов самообучения для приобретения новых знаний о закономерностях окружающего мира и правилах целесообразного поведения в тех или иных ситуациях.

Многообразие задач самообучения, актуальных для автономной робототехники [3], связано с необходимостью поиска адекватных методов их решения. Заметим, что теория машинного обучения, как самостоятельный подраздел искусственного интеллекта, обладает достаточно обширным арсеналом специальных средств и методов [4]. Соответствующие технологии, основанные на использовании методов кластеризации, обучения с подкреплением, эволюционного и генетического программирования, регрессионного анализа, Байесовского обучения, деревьев и лесов классификации, роя частиц, самоорганизующихся нейронных сетей и др., находят свое практическое применение в целом ряде

прикладных сфер, начиная от медицинской и технической диагностики, до компьютерной безопасности и распознавания образов.

Вместе с тем результаты фундаментальных исследований в области интеллектуальных систем управления показывают, что некоторые из этих методов могут успешно использоваться для решения отдельных задач самообучения автономных роботов [5–14]. В частности, автоматический синтез алгоритмов управления движением мобильных платформ различных типов позволяют обеспечить методы эволюционного программирования [5, 6]. В свою очередь, методы деревьев и лесов классификации служат эффективным инструментом самообучения автономных роботов, например, для формирования знаний о проходимости разнородных участков маршрута движения в целях его оперативной корректировки с учетом минимизации «стоимостных» характеристик выбираемой траектории [3, 8].

Среди множества известных подходов к организации процессов самообучения определенный интерес и перспективы представляет аппарат специализированного класса конечных автоматов, главный принцип построения и функционирования которых связан со сменой состояния в зависимости от текущей глубины его хранения в памяти. Эта особенность, реализуемая тем или иным образом в автоматах подобной разновидности, позволяет обеспечить решение задач самообучения, нацеленных на выявление условий наиболее эффективного взаимодействия с внешней средой.

В классе самообучаемых автоматов с памятью можно выделить целый ряд характерных представителей. Одним из них является так называемый автомат Цетлина с линейной тактикой, диаграмма переходов которого представлена на рис. 6. На каждое выполняемое действие автомат получает ответную реакцию внешней среды в виде сигналов поощрения или штрафа. В случае положительного отклика текущее состояние автомата перезапоминается на следующем, более высоком уровне памяти. Получение отрицательного отклика обуславливает уменьшение глубины хранения текущего состояния или его кардинальную смену на самом нижнем уровне памяти.

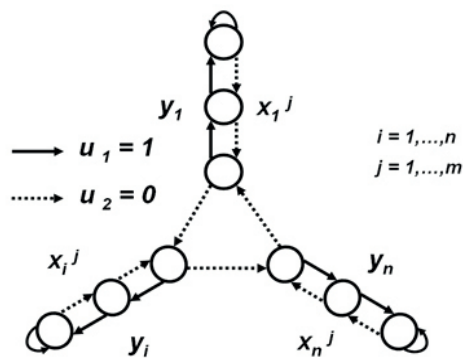


Рис. 6. Диаграмма переходов автомата Цетлина с линейной тактикой.

Следовательно, конечный автомат данного типа можно интерпретировать как динамическую систему, которая под воздействием некоторой управляющей команды u , поступающей на вход в момент времени t , изменяет свое текущее состояние x и уровень глубины j его запоминания в памяти на новое:

$$\begin{aligned} (x(t), j(t)) &= f((x(t-1), j(t-1)), u(t)), \\ y(t) &= h(x(t)), \end{aligned}$$

где f , h – функции переходов и выходов, задаваемые табл. 1.

Таблица 1. Функции переходов и выходов автомата Цетлина с линейной тактикой

Входы	Состояния		
	$x_i^j, \quad 1 < j < m$	$x_i^j, \quad j=1$	$x_i^j, \quad j=m$
$u_1 = 1$	x_i^{j+1} / y_i	x_i^{j+1} / y_i	x_i^j / y_i
$u_2 = 0$	x_i^{j-1} / y_i	x_{i+1}^j / y_{i+1}	x_i^{j-1} / y_i

Важно подчеркнуть, что глубина памяти определяет инерционные свойства автомата, позволяющие сохранить приверженность к оптимальному действию даже при наличии отдельных отрицательных откликов на его выполнение. Доказано [15, 16], что при достаточно больших значениях глубины памяти автомата его поведение стремится к наилучшему.

Доверчивый автомат Кринского по принципам своего построения и функционирования во многом аналогичен автомату Цетлина. Как показано на рис. 7а, основное отличие заключается в переходе текущего состояния автомата на максимально глубокий уровень хранения при получении положительного отклика на выполненное действие.

В свою очередь, автомат Роббинса отличается от доверчивого автомата Кринского механизмом кардинальной смены текущего состояния на новое с переходом из нижнего на самый высокий уровень памяти (рис. 7б).

Функции переходов и выходов для автоматов Кринского и Роббинса представлены, соответственно, в табл. 2, 3. Строго доказано, что, как и для автомата Цетлина, их поведение в любых стационарных средах является целесообразным.

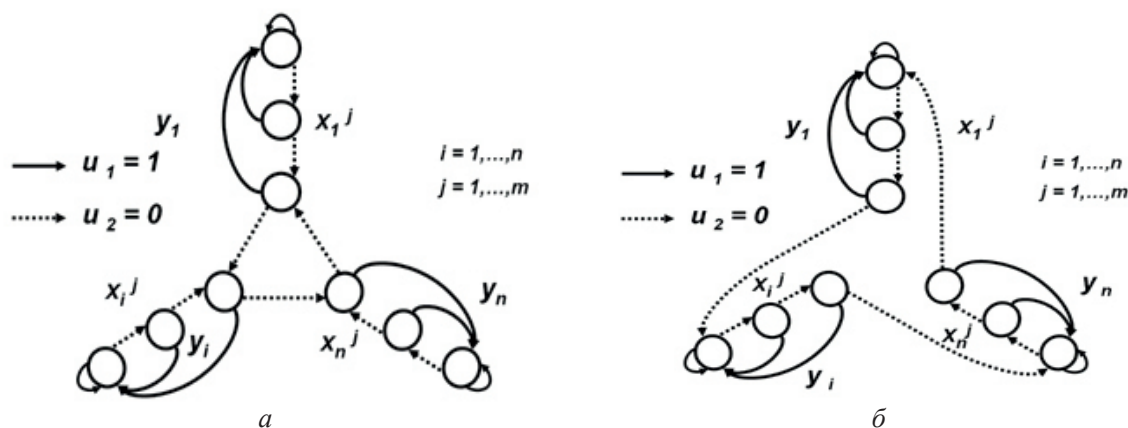


Рис. 7. Диаграммы переходов доверчивого автомата Кринского (а) и автомата Роббинса (б).

Таблица 2. Функции переходов и выходов доверчивого автомата Кринского

Входы	Состояния		
	$x_i^j, \quad 1 < j < m$	$x_i^j, \quad j=1$	$x_i^j, \quad j=m$
$u_1 = 1$	x_i^m / y_i	x_i^m / y_i	x_i^j / y_i
$u_2 = 0$	x_i^{j-1} / y_i	x_{i+1}^j / y_{i+1}	x_i^{j-1} / y_i

Таблица 3. Функции переходов и выходов доверчивого автомата Роббинса

Входы	Состояния		
	$x_i^j, \quad 1 < j < m$	$x_i^j, \quad j=1$	$x_i^j, \quad j=m$
$u_1 = 1$	x_i^m / y_i	x_i^m / y_i	x_i^j / y_i
$u_2 = 0$	x_i^{j-1} / y_i	x_{i+1}^m / y_{i+1}	x_i^{j-1} / y_i

Автоматическое формирования сценария походки реконфигурируемого мехатронно-модульного робота в конфигурации шагающей платформы

Один из вариантов постановки рассматриваемой задачи по автоматизации синтеза сценариев походки шагающей платформы может быть получен, исходя из ее интерпретации с позиций принципов построения и функционирования самоорганизующихся конечных автоматов, когда смена текущего состояния осуществляется в зависимости от глубины его хранения в памяти с учетом реакции внешней среды в виде приходящих сигналов поощрения или штрафа.

В данном контексте совокупность взаимосвязанных состояний на разных глубинах памяти автомата следует трактовать как последовательность возможных действий, выполняемых в рамках той или иной походки.

В качестве допущения будем считать, что искомые сценарии походки должны соответствовать некоторому циклическому процессу, в течение которого часть конечностей находится в движении, а часть – выполняет роль статической опоры. Таким требованиям в полной мере удовлетворяет наиболее простой и надежный вариант так называемой «осторожной» походки, когда на каждом этапе движения перемещается только одна конечность. В этом случае потеря или сохранение устойчивости шагающей платформы могут рассматриваться в качестве критериев отбора подходящего сценария походки в процессе ее автоматизированного синтеза.

Очевидное упрощение задачи, решаемой на основе применения аппарата самоорганизующихся конечных автоматов, заключается в ее декомпозиции на два этапа, связанных, соответственно, с формированием последовательности движения сочленений по перестановке отдельной конечности и порядка выполнения шагов, необходимых для перемещения платформы. Использование подобных представлений позволяет полностью определить структуру автоматов, задающих многообразие сценариев походки в качестве множества сочетаний возможных действий по их реализации. Так, типовой сценарий, регламентирующий перестановку конечности в ходе выполнения очередного шага, может быть представлен в виде последовательности элементарных поворотов ее сочленений на априорно заданную величину обрабатываемого угла Δ . Таким образом, задача автоматического синтеза сценария перестановки конечности сводится к комбинаторной постановке, допускающей применение аппарата самоорганизующихся конечных автоматов для поиска необходимого решения.

Обобщенная структура самоорганизующегося конечного автомата, обеспечивающего поиск последовательности элементарных поворотов, приводящих конфигурацию сочленений конечности из известного начального до некоторого целевого состояния опоры,

показана на рис. 8. Условно разделим данный автомат на уровни, в каждом из которых обобщенно совершается одно элементарное действие: обобщенные координаты конечности либо изменяются на величину Δ (как в отрицательном, так и в положительном направлении), либо остаются неизменными. Тогда количество состояний S_{Li} в i -ом уровне будет определяться по формуле:

$$S_{Li} = (3^N)^{(i+1)}, (i=0,1,\dots,L)$$

где N – количество сочленений в конечности;

L – количество уровней, рассчитываемое по формуле:

$$L = \frac{\|q_{\min} + q_{\max}\|}{\Delta},$$

здесь $q_{\min}$ и $q_{\max}$ – минимально и максимально возможные углы в сочленении.

Тогда общее количество состояний автомата не превышает величины S_1 :

$$S_1 = \sum_{i=0}^{L-1} S_{Li}.$$

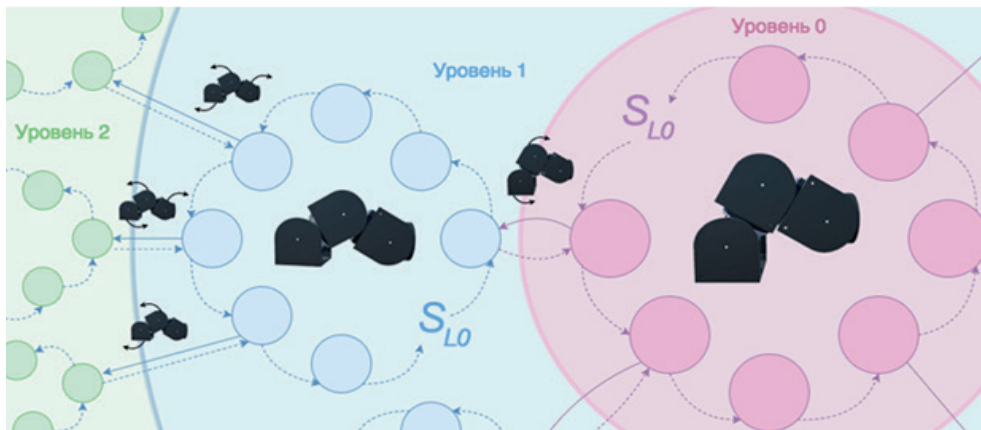


Рис. 8. Обобщенная структура самоорганизуемого автомата для формирования сценария перестановки конечности шагающей платформы.

В качестве критерия отбора искомого решения может использоваться условие соответствия текущей конфигурации сочленений конечности состоянию опоры (рис. 9). При этом, как показано на рис. 9, текущее положение конечности P по отношению к опорной поверхности не должно превышать заданного уровня ε :

$$P \leq \varepsilon,$$

где

$q_i = \kappa_i \Delta$, ($i = 1, 2, \dots, N$) – обобщенные координаты конечности;

κ_i – коэффициент пропорциональности, определяемый самоорганизуемым автоматом в процессе его функционирования;

N – количество сочленений в составе конечности;

F – функция связи обобщенных и декартовых координат конечности.



Рис. 9. Оценка соответствия текущей конфигурации конечности (а) состоянию опоры (б).

Важно отметить, что выбор значений априорно задаваемых величин угла элементарного поворота отдельного сочленения конечности Δ , а также условия соответствия ее текущей конфигурации состоянию опоры ε должен существенно сказываться не только на времени поиска подходящих сценариев, но и на динамике движения шагающей платформы. Так, увеличение этих параметров должно приводить к сокращению продолжительности поиска и одновременно – к ухудшению динамики движения в смысле значительного увеличения амплитуды колебаний центра масс платформы в вертикальной плоскости. И наоборот, уменьшение значений угла элементарного поворота Δ и допустимого превышения конечности над опорной поверхностью ε должно в общем случае обуславливать увеличение продолжительности поиска при одновременном улучшении динамики движения с уменьшением амплитуды колебаний центра масс шагающей платформы. Собственно сценарий походки должен регламентировать порядок перестановки конечностей шагающей платформы в процессе ее движения.

Структура самоорганизуемого конечного автомата, обеспечивающего автоматическое формирование последовательности перестановки конечностей для четырехногой шагающей платформы (взятой в качестве примера), представлена на рис. 10. Здесь состояния S_2 этого автомата определяются множеством вариантов перестановки конечностей в соответствии с концепцией «осторожной» походки:

$$S_2 = K!,$$

где K – количество конечностей.

Для получения всех возможных вариантов «осторожной» походки можно использовать один из известных комбинаторных алгоритмов генерации перестановок.

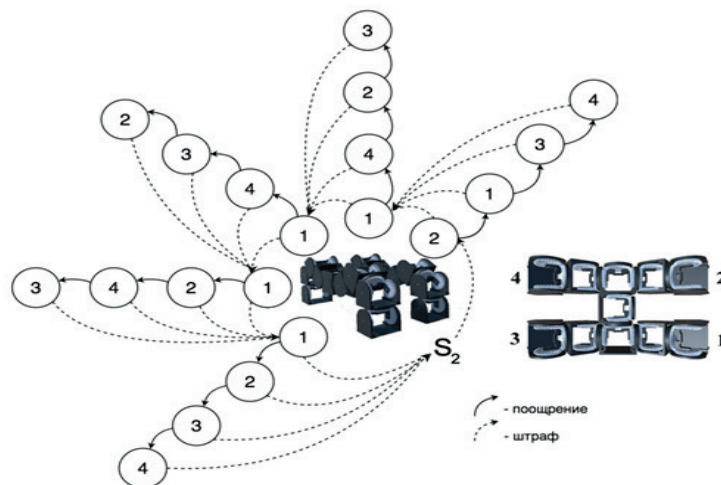


Рис. 10. Обобщенная структура самоорганизуемого конечного автомата для формирования последовательности перестановки конечностей.

В свою очередь, переходы между отдельными состояниями фактически задаются принципами построения и функционирования самоорганизующихся автоматов с учетом поступающих входных сигналов штрафа или поощрения в зависимости от потери или сохранения устойчивости платформы. Необходимая оценка устойчивости может определяться либо на программно-алгоритмическом уровне путем непосредственного расчета условий попадания/непопадания проекции центра тяжести платформы в зону площади опоры, либо в процессе и по результатам виртуального моделирования, проводимого с учетом основных законов ньютоновской физики.

Для платформы с четырьмя конечностями, приведенной в качестве примера на рис. 11, не все варианты «осторожной» походки являются равнозначными с точки зрения поддержания устойчивости. Так, при последовательном перемещении конечностей по схеме «1–2–3–4» изменение положения центра тяжести платформы на стадии выполнения 1 шага приводит к ее опрокидыванию (рис. 11а–з). В то же время другой вариант походки с перемещением конечностей по схеме «4–3–1–2» позволяет сохранить устойчивость шагающей платформы в процессе ее движения (рис. 12а–з).

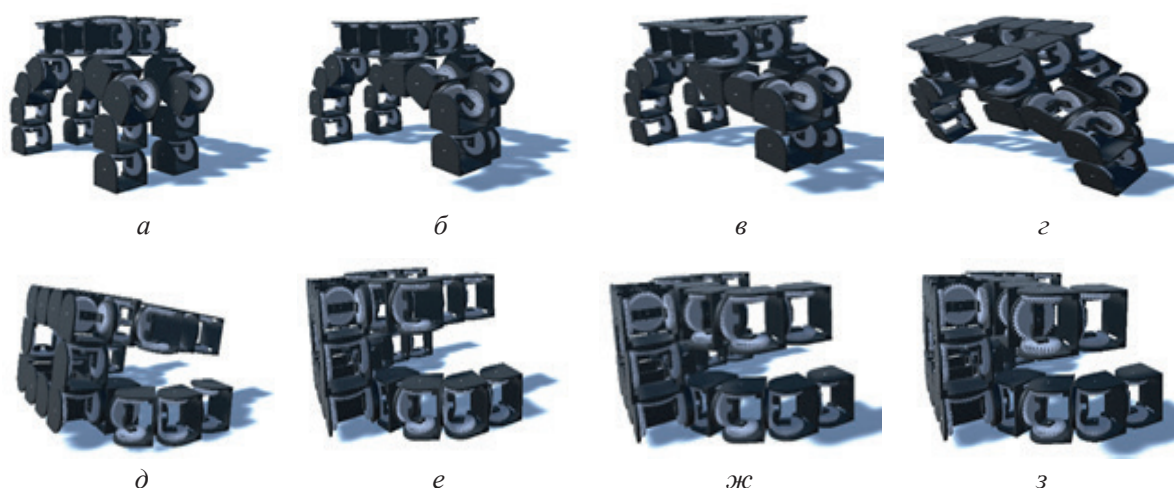


Рис. 11. Моделирование движения шагающей платформы по принципу «осторожной походки» по схеме «1–2–3–4», при которой происходит потеря устойчивости.

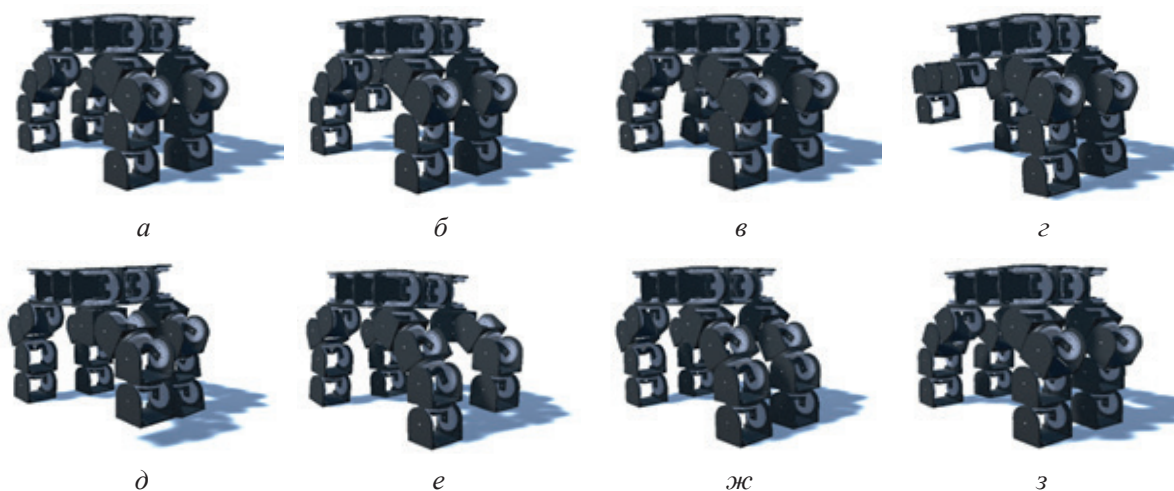


Рис. 12. Моделирование движения шагающей платформы по принципу «осторожной походки» по схеме «4–3–1–2», при которой не происходит потеря устойчивости.

Проведенная серия модельных экспериментов, фрагменты которых представлены на рис. 13, убедительно свидетельствует о возможности и эффективности использования предложенного подхода для автоматического формирования сценариев походки мехатронно-модульных реконфигурируемых роботов.

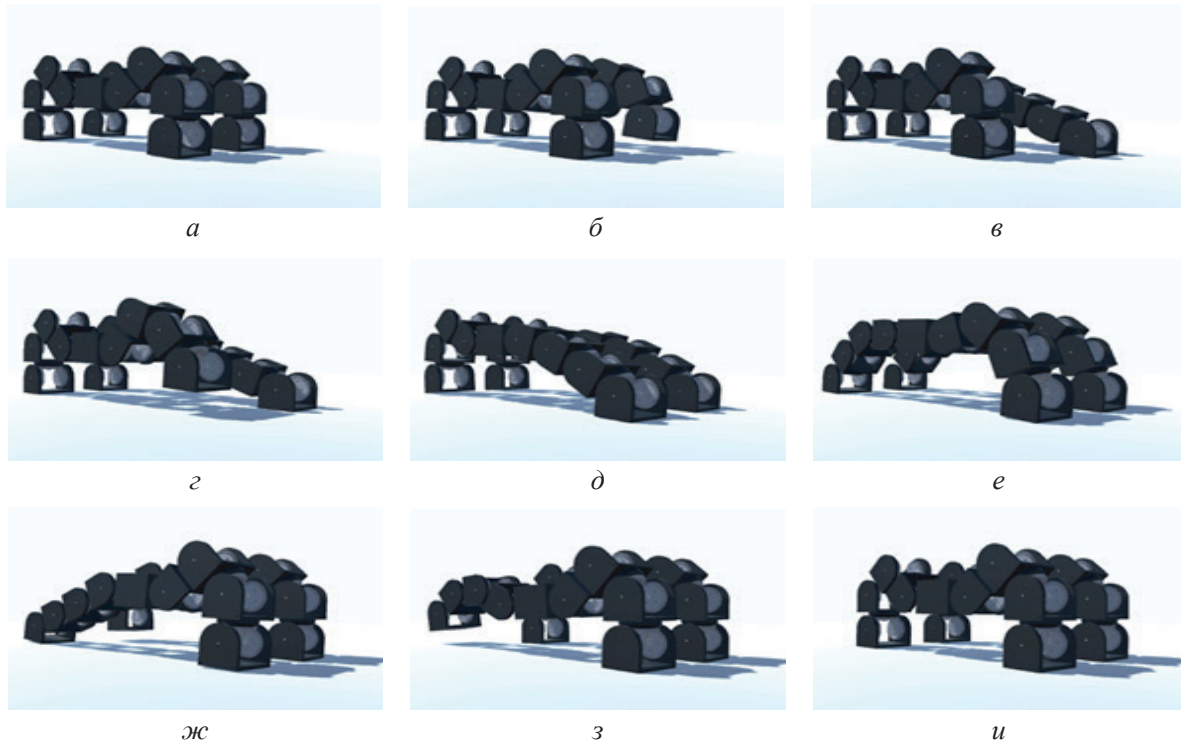


Рис. 13. Фрагменты моделирования движений шагающей платформы на основе обобщенного сценария, синтезированного в автоматическом режиме с использованием аппарата самоорганизующихся конечных автоматов.

Полученные экспериментальные результаты, суммированные в табл. 4, 5 и на рис. 14, подтверждают и само существование, и совпадение ожидаемого и фактического характера зависимостей продолжительности поиска сценариев походки и амплитуды колебаний центра масс шагающей платформы от значений угла элементарного поворота Δ сочленений конечности, а также допустимого превышения ее положения ε над опорной поверхностью.

Таблица 4. Зависимость амплитуды колебаний центра масс (см) от величин зазора и угла дискретизации

	$\varepsilon = 2.0$ см	$\varepsilon = 2.5$ см	$\varepsilon = 3.0$ см	$\varepsilon = 3.5$ см
$\Delta = 30$	0.0971	0.126	0.153	0.218
$\Delta = 20$	0.06	0.08	0.13	0.174

Таблица 5. Зависимость среднего времени обучения (с) от величин угла дискретизации и зазора

	$\varepsilon = 2.0$ см	$\varepsilon = 2.5$ см	$\varepsilon = 3.0$ см	$\varepsilon = 3.5$ см
$\Delta = 30$	181.38	161.76	27.7	26.6
$\Delta = 20$	55.25	36.28	36.1	33.4

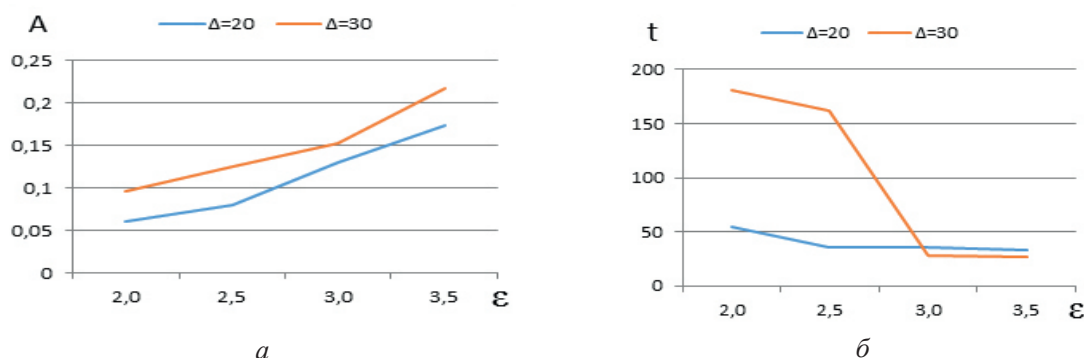


Рис. 14. Зависимость амплитуды колебаний центра масс (a) и среднего времени обучения (b) от величин зазора и угла дискретизации.

Заключение

Развитие технологий самообучения, основанных на современных методах обработки машинных форм представления знаний, открывает широкие перспективы для автоматизации синтеза и настройки интеллектуальных систем управления, для совершенствования их функциональных и адаптационных возможностей на основе анализа и обобщения собственных результатов в процессе штатной эксплуатации. Они чрезвычайно актуальны для принципиально различных приложений – от интеллектуальных систем управления приводами до автономных робототехнических систем, способных адаптировать свои моторно-двигательные, поведенческие и кооперативно-поведенческие функции к априорно непредусмотренным условиям внешней обстановки.

Материалы настоящей статьи наглядно свидетельствуют о возможности разработки и целесообразности привлечения средств самообучения, основанных на применении аппарата конечных автоматов, для автоматизации синтеза сценариев походки автономных мехатронно-модульных реконфигурируемых роботов в модификации шагающей платформы.

Литература:

1. Jing G., Tosun T., Yim M., Kress-Gazit H. An end-to-end system for accomplishing tasks with modular robots / In: Proceedings of Conference Robotics: Science and Systems, 2016.
2. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Кадочников М.В. Алгоритмы управления движением мехатронно-модульных роботов с адаптивной кинематической структурой // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 3. С. 1–10.
3. Лохин В.М., Манько С.В., Диане С.А.К., Панин А.С., Александрова Р.И. Механизмы интеллектуальных обратных связей, обработки знаний и самообучения в системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 8. С. 545–555.
4. Николаенко С.Н., Тулупьев А.Л. Самообучающиеся системы. М.: МЦНМО, 2009. 288 с.
5. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Кадочников М.В., Ситников М.С. Использование генетических алгоритмов для автоматического формирования базы знаний интеллектуальной системы управления автономным мобильным роботом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 6. С. 18–23.

6. Busch J., Ziegler J., Aue C., Ross A., Sawitzki D., Banzhaf W. Automatic generation of control programs for walking robots using genetic programming / In: Foster J.A., Lutton E., Miller J., Ryan C., Tettamanzi A. (eds.) Genetic Programming. European Conference on Genetic Programming EuroGP, 2002. Lecture Notes in Computer Science, book series. Springer, Berlin, Heidelberg. V. 2278. P. 258–267.
7. Kober J., Peters J. Reinforcement learning in robotics: A survey // In: Reinforcement Learning / Wiering M., van Otterlo M. (eds.). Adaptation, Learning, and Optimization. V. 12. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. P. 579–610.
8. Лохин В.М., Манько С.В., Диане С.А.К., Панин А.С., Александрова Р.И. Механизмы самообучения в мультиагентных робототехнических группировках на основе эволюционного леса деревьев классификации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 3. С. 156–165.
9. Kojcev R., Etxezarreta N., Hernandez A., Mayoral V. Evaluation of deep reinforcement learning methods for modular robots. arXiv preprint arXiv:1802.02395, 2018.
10. D'Angelo M., Weel B., Eiben A.E. Online gait learning for modular robots with arbitrary shapes and sizes // In: Dediu A.H., Martín-Vide C., Truthe B., Vega-Rodríguez M.A. (eds) Second International Conference on the Theory and Practice of Natural Computing (TPNC 2013), № 8273 in LNCS. Springer, Berlin. P. 45–56.
11. Varshavskaya P., Kaelbling L.P., Rus D. Learning distributed control for modular robots // In: Intelligent robots and systems, 2004. Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 28 Sept.–02 Oct. 2004. Sendai, Japan. V. 3. P. 2648–2653.
12. Zhang J., Springenberg J.T., Boedecker J., Burgard W. Deep reinforcement learning with successor features for navigation across similar environments // Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017 IEEE/RSJ International Conference. P. 2371–2378.
13. Mnih V., Badia A.P., Mirza M., Graves A., Lillicrap T.P., Harley T., Silver D., Kavukcuoglu K. Asynchronous methods for deep reinforcement learning // Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning, PMLR. 2016. P. 1928–1937.
14. Yoshida E., Murata S., Kamimura A., Tomita K., Kurokawa H., Kokaji S. Evolutionary synthesis of dynamic motion and reconfiguration process for a modular robot M-TRAN // Proceedings of the 2003 International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. 2003. P. 1004–1010.
15. Demin A.V., Vityaev E.E. Adaptive control of modular robots // In: Samsonovich A., Klimov V. (eds) Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists. BICA 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham., 2018. V. 636. P. 204–212.
16. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. М.: Наука, 1969. 316 с.

References:

1. Jing G., Tosun T., Yim M., Kress-Gazit H. An end-to-end system for accomplishing tasks with modular robots / In: Proceedings of Conference Robotics: Science and Systems, 2016.

2. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S.V., Pomanov M.P., Kadochnikov M.V. Algorithms of control by motion of multilinkmechatronic-Modular robots with adaptive kinematic structure // *Mehatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* (Mechatronics, Automation, Control). 2008. № 3. P. 1–10. (in Russ.).
3. Lokhin V.M., Manko S.V., Alexandrova R.I., Diane S.A.K., Panin A.S. Intelligent feedback, knowledge processing and self learning in control systems of autonomous robots and multi-agent robotic groups // *Mehatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* (Mechatronics, Automation, Control). 2015. V. 16. № 8. P. 545–555. (in Russ.).
4. Nikolaenko S.N., Tulupye A.L. Self-Learning Systems. Moscow: MTSNMO Publ., 2009. 288 p. (in Russ.).
5. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S.V., Kadochnikov M.V., Sitnikov M.S. Use of genetic algorithms for automatic formation of base of knowledges of intellectual control system by autonomous mobile robot // *Mehatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* (Mechatronics, Automation, Control). 2008. № 5. P. 18–23. (in Russ.).
6. Busch J., Ziegler J., Aue C., Ross A., Sawitzki D., Banzhaf W. Automatic generation of control programs for walking robots using genetic programming / In: Foster J.A., Lutton E., Miller J., Ryan C., Tettamanzi A. (eds.) *Genetic Programming. European Conference on Genetic Programming EuroGP, 2002. Lecture Notes in Computer Science*, book series. Springer, Berlin, Heidelberg. V. 2278. P. 258–267.
7. Kober J., Peters J. Reinforcement learning in robotics: A survey // In: *Reinforcement Learning / Wiering M., van Otterlo M. (eds.). Adaptation, Learning, and Optimization*. V. 12. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. P. 579–610.
8. Lokhin V.M., Manko S.V., Diane S.A.K., Panin A.S., Aleksandrova R.I. Self-learning mechanisms in the multi-robot systems based on the evolution forests and classification trees // *Mehatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* (Mechatronics, Automation, Control). 2017. V. 18. № 3. P. 159–165. (in Russ.).
9. Kojcev R., Etchezarreta N., Hernandez A., Mayoral V. Evaluation of deep reinforcement learning methods for modular robots. arXiv preprint arXiv:1802.02395, 2018.
10. D'Angelo M., Weel B., Eiben A.E. online gait learning for modular robots with arbitrary shapes and sizes // In: Dediu A.H., Martín-Vide C., Truthe B., Vega-Rodríguez M.A. (eds) *Second International Conference on the Theory and Practice of Natural Computing (TPNC 2013)*, № 8273 in LNCS. Springer, Berlin, P. 45–56.
11. Varshavskaya, P., Kaelbling, L.P., Rus, D. Learning distributed control for modular robots // In: *Intelligent robots and systems, of the 2004. Proceedings 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 28 Sept.–02 Oct. 2004. Sendai, Japan. V. 3. P. 2648–2653.
12. Zhang J., Springenberg J.T., Boedecker J., Burgard W. Deep reinforcement learning with successor features for navigation across similar environments // *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017 IEEE/RSJ International Conference. P. 2371–2378.
13. Mnih V., Badia A.P., Mirza M., Graves A., Lillicrap T.P., Harley T., Silver D., Kavukcuoglu K. Asynchronous methods for deep reinforcement learning // *Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning, PMLR*. 2016. P. 1928–1937.
14. Yoshida E., Murata S., Kamimura A., Tomita K., Kurokawa H., Kokaji S. Evolutionary

synthesis of dynamic motion and reconfiguration process for a modular robot M-TRAN // Proceedings of the 2003 International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. 2003. P. 1004–1010.

15. Demin A.V., Vityaev E.E. Adaptive control of modular robots // In: Samsonovich A., Klimov V. (eds) Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists. BICA 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham., 2018. V. 636. P. 204–212.

16. Tsetlin M.L. Studies on the Theory of Automata and Modeling of Biological Systems. Moscow: Nauka (Science) Publ., 1969. 316 p. (in Russ.).

Об авторах:

Манько Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, кафедра проблем управления Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Шестаков Евгений Игоревич, аспирант кафедры проблем управления Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Sergey V. Manko, D.Sc. (Eng.), Professor, Chair of Control Problems, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Evgeny I. Shestakov, Postgraduate Student, Chair of Control Problems, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

УДК 621.37+519.651

**ЛОКАЛЬНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ И АППРОКСИМАЦИЯ
В ЗАДАЧАХ ЭВРИСТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА
ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ**

**В.Н. Исаков[@],
П.И. Тимошенко**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: isakov@mirea.ru

Статья носит обзорный характер с элементами обобщения, но вместе с тем включает и материалы, доведенные до уровня непосредственной практической реализации. Рассмотрены подходы к эвристическому и функциональному синтезу цифровых фильтров, основанные на локальной интерполяции и аппроксимации. Идея численного дифференцирования на основе интерполяции не нова, однако глубокая связь между этим подходом и цифровой фильтрацией часто не находит отражения в литературе, ограничиваясь численным дифференцированием на основе конечных разностей. Этот пробел восполнен в настоящей работе. Получены цифровые дифференциаторы на основе локальной полиномиальной интерполяции, цифровые интеграторы на основе локальной полиномиальной и сплайновой интерполяции, а также цифровые фильтры с П-образной амплитудно-частотной характеристикой на основе полиномиальной МНК-аппроксимации. Полученные результаты могут быть использованы на практике согласно их функциональному назначению с учётом приводимых рекомендаций. Рассмотрены подходы к численному интегрированию, основанные на эффективных методах интерполяции. В работе приведено описание МНК-фильтров, получаемых при степени аппроксимирующего многочлена 0–8, исследованы их частотные свойства. Приведены сведения, достаточные для получения на их основе цифровых фильтров с П-образной амплитудно-частотной характеристикой без пульсаций в полосе пропускания. Область применения фильтров, таким образом, расширена за рамки МНК-сглаживания.

Ключевые слова: локальная интерполяция, сглаживающая аппроксимация, численное дифференцирование, численное интегрирование, цифровой фильтр, метод наименьших квадратов, фильтр Савицкого-Голея.

**LOCAL INTERPOLATION AND APPROXIMATION
IN TASKS OF HEURISTIC SYNTHESIS OF DIGITAL FILTER**

**V.N. Isakov[@],
P.I. Timoshenko**

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author e-mail: isakov@mirea.ru

The article has an overview character with elements of generalization, but at the same time it includes information brought to the level of immediate practical implementation. Approaches to heuristic and functional synthesis of digital filters based on local interpolation and approximation are considered. Digital differentiators based on local polynomial interpolation, digital integrators based on local polynomial and spline interpolation and digital filters with a U-shaped amplitude-frequency characteristic based on polynomial OLS approximation are obtained. The obtained results can be used in practice according to their functional purpose, taking into account the recommendations mentioned.

The idea of numerical differentiation based on interpolation is not new, but the deep connection between this approach and digital filtering is not often reflected in literature due to the fact that this concept is limited to numerical differentiation based on finite differences. The gap is filled in this work.

Numerical integration is usually considered on the basis of stepwise or piecewise linear or piecewise parabolic interpolation (method of rectangles, trapezoids, Simpson). However, regardless of the choice of the interpolation method, the digital integrator has a certain generalized structure, and approaches to numerical integration can be based on more effective methods of interpolation, which is shown in the article.

The OLS filters (Savitzky-Golay) are described in the literature. However, the steps for their practical implementation are clearly insufficient. Traditionally the general description of filters does not develop further 4th degree of the approximating polynomial and is often limited to the moving average filters. The frequency properties of the filters are also not fully described. In this work the description of the OLS filters obtained at the degree of the approximating polynomial 0-8 was given, their frequency properties were studied, and sufficient information was given to obtain digital filters based on them with a U-shaped amplitude-frequency characteristic without pulsations in the passband. Thus, the field of filters application is extended beyond the OLS smoothing.

Keywords: local interpolation, smoothing approximation, numerical differentiation, numerical integration, digital filter, least squares method, Savitzky-Golay filter.

Введение

При разработке различного рода радиотехнических устройств и систем возникает необходимость применения алгоритмов цифровой обработки сигналов, реализующих ту или иную функциональную процедуру. Наиболее распространенными являются функциональные процедуры дифференцирования, интегрирования, частотного разделения сигналов (фильтрации), экстраполяции, устранение шума из результатов измерения – сглаживание. В том случае, когда указанные процедуры цифровой обработки сигналов являются линейными, они реализуются цифровыми фильтрами.

Нахождение структуры и коэффициентов цифрового фильтра, обладающего заданными характеристиками – это задача синтеза. В общем случае при синтезе цифрового фильтра желаемые характеристики оказываются физически нереализуемыми по тем или иным причинам, и синтез понимается как оптимальный поиск структуры и коэффициентов такого цифрового фильтра, характеристики которого наилучшим образом (по некоторому критерию) приближаются к заданным [1–3]. Однако не исключаются и частные случаи, когда результат синтеза характеризуется заданным функциональным признаком

цифрового фильтра. При этом и сам синтез – эвристический синтез – понимается как получение результата, не являющегося гарантировано точным и оптимальным, но достаточного для ускоренного и упрощенного решения поставленной задачи. Примеры эвристического синтеза цифровых фильтров по функциональному признаку рассматриваются в [4–6].

В представленной статье систематизирован эвристический подход, а получаемые на основе методов локальной интерполяции и аппроксимации наборы фильтров доведены до уровня непосредственной практической реализации. Они могут рассматриваться и в качестве библиотек для выбора предпочтительного в рамках конкретной задачи фильтра. Отдельно следует отметить МНК-фильтры (фильтры Савицкого-Голея) [7–9], к которым приводит задача сглаживания данных методом наименьших квадратов. Предложены эти фильтры довольно давно, но их частотные свойства исследованы недостаточно полно. Зачастую под фильтрами Савицкого-Голея и вовсе понимаются фильтры скользящего среднего – наиболее простой их вид. Математические выражения для импульсных характеристик фильтров Савицкого-Голея получены до четвертой степени аппроксимирующего многочлена [8]. Нами в данной работе получены выражения для импульсных характеристик фильтров до восьмой степени аппроксимирующего многочлена. Показана возможность получения цифровых фильтров с П-образной амплитудно-частотной характеристикой путем каскадирования звеньев МНК-фильтров. С методами интерполяции и сглаживающей аппроксимации, используемыми в работе, можно ознакомиться в [10–15].

1. Цифровые дифференциаторы

Цифровые дифференциаторы осуществляют оценку производной аналогового сигнала по его дискретным значениям. Методика оценивания производной основана на построении интерполирующей функции и последующем ее дифференцировании. Интерполирующая функция на каждом частном интервале $t \in [t_k - 0,5T, t_k + 0,5T]$, $k \in \mathbb{Z}$ описывается выражением:

$$\psi(t) = \sum_{m=-M}^M x[k+m] \varphi_0(t-t_{k+m}),$$

где $\{x[n]\}$ – обрабатываемый сигнал, M – порядок интерполяции, $t_n = nT$, $n \in \mathbb{Z}$ – моменты дискретизации, T – период дискретизации, $\varphi_0(t)$ – порождающая функция интерполяционного базиса.

В случае локальной полиномиальной интерполяции порождающая функция интерполяционного базиса имеет вид:

$$\varphi_0(t) = \sum_{i=0}^M \prod_{\substack{n=-M+i, \\ n \neq 0}}^{M+i} \left(1 - \frac{|t|}{nT}\right) \text{rect}\left(\frac{|t| - iT}{T}\right). \quad (1)$$

Приближенный расчет отсчета l -й производной сигнала $x^{(l)}[k]$ в момент t_k может быть выполнен, как

$$x^{(l)}[k] \approx \psi^{(l)}(t_k) = \sum_{m=-M}^M x[k+m] \varphi_0^{(l)}(t_k - t_{k+m}).$$

Имея в виду, что $t_k - t_{k+m} = kT - (k+m)T = -mT$, обозначим коэффициенты алгоритма оценки l -й производной сигнала как

$$d_m^{(l)} = \varphi_0^{(l)}(-mT), \quad (2)$$

тогда алгоритм оценки производной получим в виде:

$$\psi^{(l)}(t_k) = \sum_{m=-M}^M x[k+m]d_m^{(l)}. \quad (3)$$

Поскольку порождающая функция чётно-симметрична, дополнительно заметим, что

$$d_m^{(l)} = -d_{(-m)}^{(l)}; \quad d_0^{(l)} = 0, \quad l - \text{нечётное};$$

$$d_m^{(l)} = d_{(-m)}^{(l)}, \quad l - \text{чётное};$$

$$\sum_{m=-M}^M d_m^{(l)} = 0.$$

Коэффициенты алгоритма дифференцирования удобно определять для единичного периода дискретизации $T = 1$. В таком случае будем обозначать их $\tilde{d}_m^{(l)}$. Так как изменение периода дискретизации приводит к масштабированию порождающей функции, при котором в ее выражении t заменяется на t/T , то

$$d_m^{(l)} = \frac{\tilde{d}_m^{(l)}}{T^l}.$$

Как видно из (3), для получения численной оценки производной на основе регулярной интерполяции порядка l в некоторый момент времени $t_k = kT$ требуются элементы сигнала $x[k-M], \dots, x[k], \dots, x[k+M]$. Однако при последовательной обработке значений сигнала $\{x[n]\}_{n \in \mathbb{Z}}$ в реальном времени отсчеты $x[k+1], \dots, x[k+M]$ недоступны в момент времени. Поэтому оценка производной сигнала может быть получена только с запаздыванием на M тактов, необходимых для накопления отсутствующих отсчетов (рис. 1).

Сигнал на выходе дифференцирующего фильтра представляет собой отсчеты производной интерполирующей функции $\psi(t)$ с запаздыванием на M тактов:

$$y[n] = \psi^{(l)}((n-M)T).$$

Подставляя производную интерполирующей функции в виде (3), запишем

$$y[n] = \sum_{m=-M}^M d_m^{(l)} x[n-M+m] = \sum_{m=-M}^M d_m^{(l)} x[n-(M-m)].$$

В последней сумме сделаем замену $k = M - m$, тогда получим

$$y[n] = \sum_{m=0}^{2M} a_k x[n-k],$$

где $a_k = d_{M-k}^{(l)}$, $k = 0, \dots, 2M$.

Таким образом, численная оценка производной реализуется нерекурсивным цифровым фильтром порядка $N = 2M$ (рис. 2).

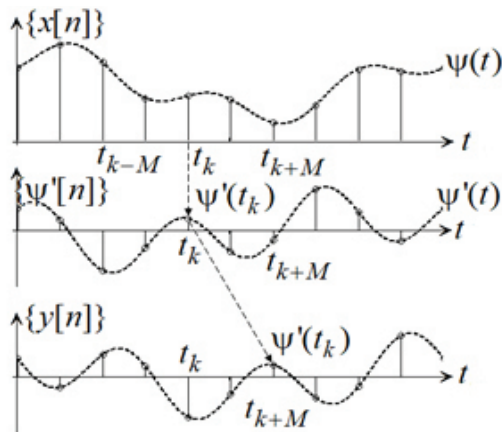


Рис. 1. Сигналы на входе и выходе дифференцирующего цифрового фильтра.

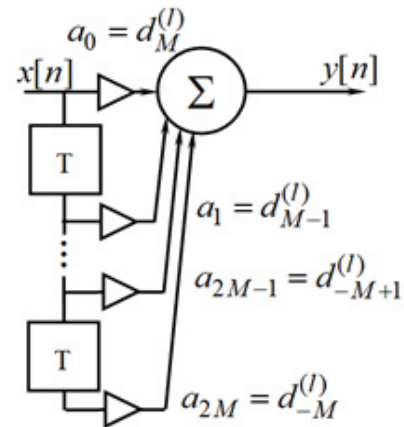


Рис. 2. Структура цифрового дифференциатора.

Коэффициенты дифференциаторов $\tilde{d}_m^{(l)}$, полученные на основе (1) и (2), приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты и граничные частоты цифровых дифференциаторов

M	l	$K_{\text{идоп}}=0,01,$ $\omega(T)_{\text{гр}},$ рад	$K_{\text{идоп}}=0,001,$ $\omega(T)_{\text{гр}},$ рад	$\tilde{d}_{-3}^{(l)}$	$\tilde{d}_{-2}^{(l)}$	$\tilde{d}_{-1}^{(l)}$	$\tilde{d}_0^{(l)}$	$\tilde{d}_1^{(l)}$	$\tilde{d}_2^{(l)}$	$\tilde{d}_3^{(l)}$
1	1	0.25	0.08			-1/2	0	1/2		
	2	0.35	0.11			1	-2	1		
2	1	0.76	0.44		1/12	-2/3	0	2/3	-1/12	
	2	1.00	0.57		-1/12	4/3	-5/2	4/3	-1/12	
	3	0.20	0.07		-1/2	1	0	-1	1/2	
	4	0.25	0.08		1	-4	6	-4	1	
3	1	1.10	0.74	-1/60	3/20	-3/4	0	3/4	-3/20	1/60
	2	1.40	0.92	1/90	-3/20	3/2	-49/18	3/2	-3/20	1/90
	3	0.66	0.37	1/8	-1	13/8	0	-13/8	1	-1/8
	4	0.78	0.43	-1/6	2	-13/2	28/3	-13/2	2	-1/6
	5	0.18	0.06	-1/2	2	-5/2	0	5/2	-2	1/2
		0.20	0.06	1	-6	15	-20	15	-6	1

Как показатель качества дифференциатора введем относительную ошибку аппроксимации частотной характеристики идеального дифференциатора:

$$K_{\text{и}}^{(l)}(\omega T) = \frac{|(j\omega)^l - H_{\text{д}}^{(l)}(\omega)|}{\omega^l} = \frac{|(j\omega T)^l - T^l H_{\text{д}}^{(l)}(\omega)|}{(\omega T)^l},$$

где $H_{\text{д}}^{(l)}(\omega)$ – частотная характеристика дифференциатора.

Коэффициент искажений $K_{\text{и}}^{(l)}(\omega T)$ удобно рассматривать как функцию нормированной частоты ωT . Граничная частота $(\omega T)_{\text{гр}}$ характеризует интервал $[0, (\omega T)_{\text{гр}}]$, в пределах которого коэффициент искажений не превышает некоторого порогового значения:

$$K_{\text{и}}^{(l)}(\omega T) \Big|_{\omega T < (\omega T)_{\text{гр}}} \leq K_{\text{и, доп}}$$

Анализ коэффициента искажений может быть положен в основу выбора метода численного дифференцирования и/или запаса по частоте дискретизации: необходимо добиться, чтобы значение коэффициента искажений не превышало некоторого допустимого уровня в пределах полосы частот, где локализован спектр сигнала $\omega_m T < (\omega T)_{\text{гр}}$. Граничные частоты дифференциаторов также приведены в табл. 1.

2. Цифровые интеграторы сигналов

Цифровые интеграторы осуществляют оценку интеграла аналогового сигнала $x(t)$ по его дискретным значениям. Интеграл аналогового сигнала представим в виде:

$$i[n] = \int_0^{t_n} x(t) dt = \sum_{k=0}^{n-1} s[k], \quad (4)$$

где $s[k] = \int_{t_k}^{t_{k+1}} x(t) dt$ — интеграл на интервале дискретизации, $t_n = nT$.

Методика оценивания интеграла основана на построении интерполирующей функции $\psi(t)$ и последующем ее интегрировании. Если используется регулярная интерполяция порядка M , интерполирующая функция на каждом частном интервале $t \in [t_k, t_{k+1}]$, $k \in Z$ описывается выражением:

$$\psi(t) = \sum_{m=-M}^{M+1} x[k+m] \varphi_0(t - t_{k+m}).$$

Оценка интеграла на интервале $t \in [t_k, t_{k+1}]$, $k \in Z \cup \{0\}$, получаемая по $\psi_k(t)$:

$$s[k] = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \psi_k(t) dt = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \sum_{m=-M}^{M+1} x[k+m] \varphi_0(t - t_{k+m}) dt = \sum_{m=-M}^{M+1} x[k+m] \int_{t_k}^{t_{k+1}} \varphi_0(t - t_{k+m}) dt.$$

В последнем интеграле сделаем замену переменной $t' = t - t_{k+m}$, тогда запишем

$$s[k] = \sum_{m=-M}^{M+1} x[k+m] \int_{-t_m}^{-t_{m-1}} \varphi_0(t') dt'.$$

Обозначив

$$\alpha_m = \int_{-t_m}^{-t_{m-1}} \varphi_0(t) dt, \quad m = -M, \dots, M+1, \quad (5)$$

алгоритм оценки интеграла аналогового сигнала на частном интервале дискретизации сможем переписать в виде:

$$s[k] = \sum_{m=-M}^{M+1} \alpha_m x[k+m] \quad (6)$$

Введенные интегралы (5) представляют собой интегралы от соответствующих сегментов порождающей функции (она изображена на рис. 3) и характеризуют «вклад» соответствующих отсчетов сигнала в результат интегрирования на интервале дискретизации.

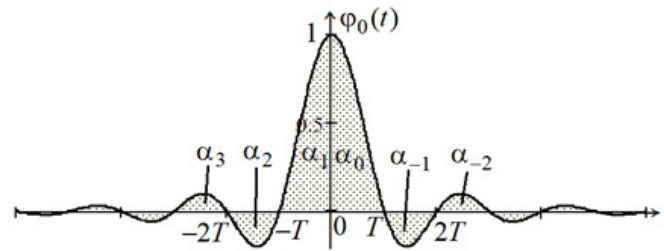


Рис. 3. Интегральные сегменты порождающей функции.

Вернемся к выражению (4) и рассмотрим следующую разность:

$$i[n] - i[n-1] = \sum_{k=0}^{n-1} s[k] - \sum_{k=0}^{n-2} s[k] = s[n-1],$$

или

$$i[n] = s[n-1] + i[n-1].$$

Как видно из (6), для расчета $s[n-1]$ потребуются значения сигнала $x[n-M-1], \dots, x[n+M]$, однако, при последовательной обработке значений сигнала в реальном времени в момент времени t_n элементы $x[n+1], \dots, x[n+M]$ недоступны. Отсюда очевидно, что оценка интеграла может быть выполнена только с запаздыванием на M тактов:

$$y[n] = i[n-M] = s[n-M-1] + i[n-M-1],$$

или, с учетом того, что $i[n-M-1] = y[n-1]$ и выражения (6),

$$y[n] = \sum_{m=-M}^{M+1} \alpha_m x[n-(M-m+1)] + y[n-1].$$

Введем индекс суммирования $l = M - m + 1$, тогда

$$y[n] = \sum_{l=0}^{2M+1} a_l x[n-l] + y[n-1], \quad (7)$$

где:

$$a_l = \alpha_{M-l+1} = \int_{-t_{M-l+1}}^{-t_{M-l}} \Phi_0(t) dt, \quad l = 0, \dots, 2M+1. \quad (8)$$

Полученное разностное уравнение (7) описывает рекурсивный цифровой фильтр (рис. 4), с коэффициентами нерекурсивной части выражения (8). Очевидно, цифровой интегрирующий фильтр является условно устойчивым. Коэффициенты (8), получаемые на основе различных методов интерполяции, рассмотренных в [11–13], суммированы в табл. 2 для единичного периода дискретизации $\tilde{a}_l$ (пересчет для любого периода дискретизации может быть выполнен по формуле $a_l = \tilde{a}_l T$).

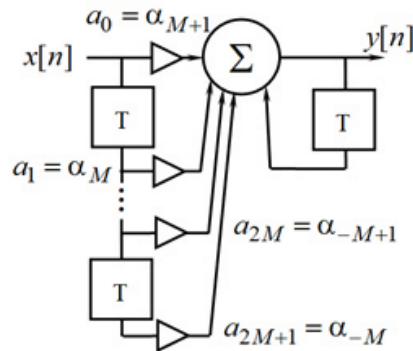


Рис. 4. Схема цифрового интегратора.

Таблица 2. Нормированные коэффициенты некоторых интеграторов

Интерполяция	M	$\tilde{a}_0$	$\tilde{a}_1$	$\tilde{a}_2$	$\tilde{a}_3$	$\tilde{a}_4$	$\tilde{a}_5$
Локальная полиномиальная интерполяция	0	0.5000	0.5000				
	1	-0.0417	0.5417	0.5417	-0.0417		
	2	0.00765	-0.0647	0.55705	0.55705	-0.0647	0.00765
Сплайновая 1 степени гладкости	1	-0.0451	0.5451	0.5451	-0.0451		
	2	0.0124	-0.0762	0.5638	0.5638	-0.0762	0.0124
Сплайновая 2 степени гладкости	1	-0.0446	0.5446	0.5446	-0.0446		
	2	0.0130	-0.0778	0.5648	0.5648	-0.0778	0.0130

3. Интерполирующие цифровые фильтры

Интерполяция сигналов может рассматриваться не только как переход от дискретного сигнала к аналоговому, но и как повышение частоты дискретизации.

Рассмотрим повышение частоты дискретизации сигнала в целое число раз (рис. 5). Исходный дискретный сигнал $\{x[n]\}_{n=0}^{+\infty}$ имеет период дискретизации T . Повышение частоты дискретизации в целое число раз L основано на построении регулярной интерполирующей функции

$$\psi(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} x[n] \varphi_0(t - nT)$$

и последующей ее дискретизации с периодом $\tilde{T}$, таким, что $T = L\tilde{T}$:

$$\psi(k\tilde{T}) = \sum_{n=0}^{+\infty} x[n] \varphi_0(k\tilde{T} - nT).$$

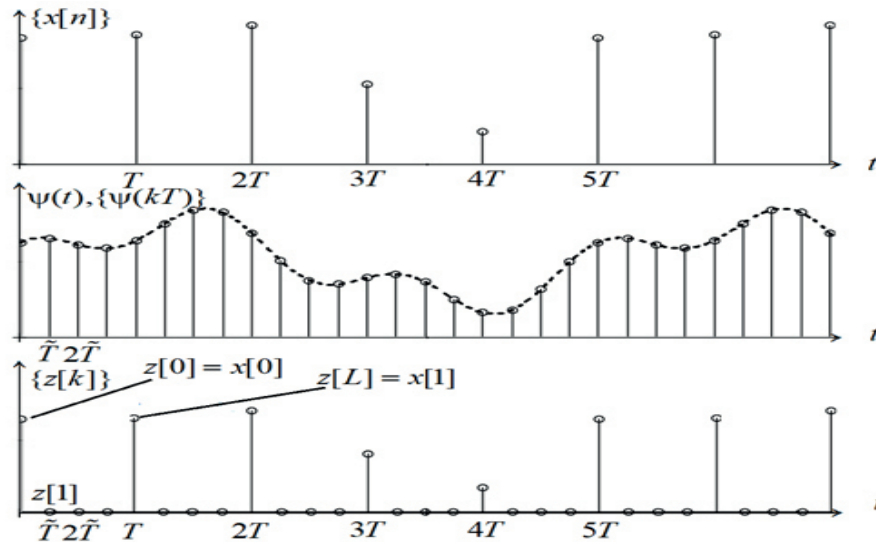


Рис. 5. Повышение частоты дискретизации в целое число раз.

Введем вспомогательный сигнал $\{z[k]\}_{k=0}^{+\infty}$ с периодом дискретизации $\tilde{T}$, такой, чтобы

$$z[k] = \begin{cases} x[n], & k = nL \\ 0, & k \neq nL \end{cases}.$$

Тогда последнее выражение сможем переписать в виде:

$$\psi(k\tilde{T}) = \sum_{n=0}^{+\infty} z[nL]\varphi_0(k\tilde{T} - nL\tilde{T}) = \sum_{m=0}^{+\infty} z[m]\varphi_0(k\tilde{T} - m\tilde{T}) = \sum_{m=0}^{+\infty} z[m]\varphi_0((k-m)\tilde{T}) = z * \varphi_0[k].$$

Таким образом, значения $\psi(k\tilde{T})$ получаются в результате свертки дискретного сигнала $\{z[k]\}_{k=0}^{+\infty}$ и последовательности отсчетов порождающей функции $\{\varphi_0(k\tilde{T})\}_{k=-(M+1)}^{M+1}$, иначе — функция $\psi(k\tilde{T})$ может быть получена на выходе цифрового КИХ-фильтра с импульсной характеристикой $\{\varphi_0(k\tilde{T})\}_{k=-(M+1)}^{M+1}$ при воздействии $\{z[k]\}_{k=0}^{+\infty}$.

Необходимо подчеркнуть, что цифровой фильтр с импульсной характеристикой $\{\varphi_0(k\tilde{T})\}_{k=-(M+1)}^{M+1}$ физически нереализуем, но можно реализовать цифровой фильтр с импульсной характеристикой, получаемой путем сдвига $\{\varphi_0(k\tilde{T})\}_{k=-(M+1)}^{M+1}$ на $M+1$ интервалов дискретизации T (рис. 6):

$$h[k] = \varphi_0(k\tilde{T} - (M+1)T) = \varphi_0((k - (M+1)L)\tilde{T}) \quad (9)$$

Это означает, что интерполированный сигнал может быть получен на выходе цифрового фильтра с задержкой на $M+1$ интервалов дискретизации T :

$$y[k] = \psi(k\tilde{T} - (M+1)T) = \psi((k - (M+1)L)\tilde{T}).$$

Цифровой фильтр с импульсной характеристикой (9) называется интерполирующим. Для повышения частоты дискретизации в целое число L раз сначала формируется вспомогательный дискретный сигнал путем добавления $L-1$ нулевых отсчетов между каждым отсчетом исходного, затем вспомогательный сигнал воздействует на интерполирующий фильтр. Если частоту дискретизации требуется уменьшить в целое число D раз,

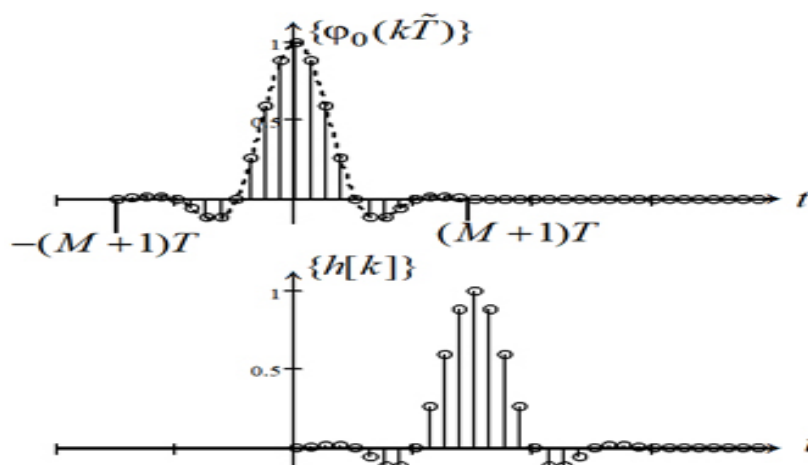


Рис. 6. Дискретизация порождающей функции и импульсная характеристика интерполирующего цифрового фильтра.

применяют прореживание (децимацию). При этом в составе сигнала оставляют только отсчеты, отстоящие друг от друга на D интервалов дискретизации. Если же частоту дискретизации необходимо изменить в нецелое число раз A , используют сначала интерполяцию в L раз, а затем – прореживание в D раз, так, что $A = \frac{L}{D}$.

4. МНК-фильтры (фильтры Савицкого-Голея)

МНК-фильтры реализуют сглаживание сигнала на основе скользящего метода наименьших квадратов. Суть процедуры обработки сигнала отражена на рис.7.

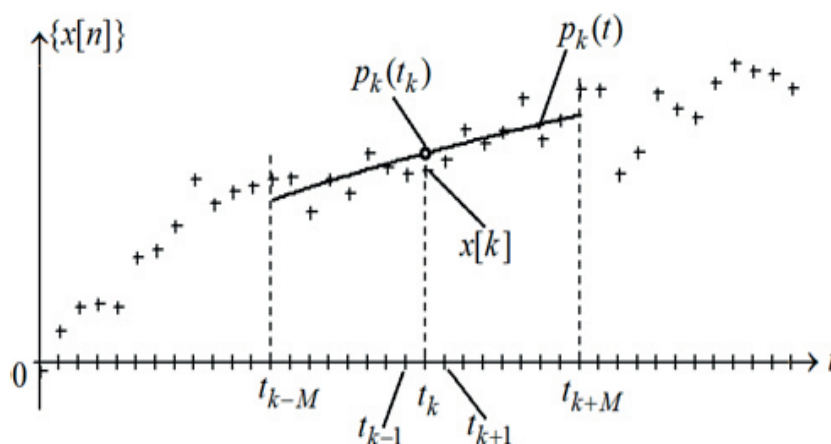


Рис. 7. Принцип скользящей МНК-фильтрации.

Для наглядности элементы обрабатываемого дискретного сигнала $\{x[n]\}$ изображены на рис. 7 крестиками и ассоциируются, например, с результатами каких-либо измерений. Для каждого момента времени $t_k = kT$ строится степенной многочлен:

$$p_k(t) = \alpha_0 + \alpha_1(t - t_k) + \dots + \alpha_N(t - t_k)^N = \sum_{i=0}^N \alpha_i(t - t_k)^i, \quad (10)$$

Его коэффициенты выбирают таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений этого многочлена от текущего, а также $M \geq (N-1)/2$ предшествующих и M последующих отсчетов была минимальной:

$$\varepsilon_k(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_N) = \sum_{n=k-M}^{k+M} (x[n] - p_k(t_n))^2 \rightarrow \min. \quad (11)$$

Разумеется, набор коэффициентов $\{\alpha_i\}_{i=0}^{N-1}$ для каждого момента t_k времени индивидуален, однако для уменьшения громоздкости это не учитывается в их обозначении.

Значение выходного сигнала в момент времени t_k полагается равным значению построенного многочлена

$$p_k(t_k) = \alpha_0. \quad (12)$$

Изменение периода дискретизации формально соответствует изменению масштаба времени. Если найден многочлен $p_k(t)$ для единичного периода дискретизации, то для произвольного периода дискретизации необходимо заменить в его выражении t на t/T . Подобная замена, как видно из (10), никак не отражается на коэффициенте α_0 , который нас в конечном итоге и интересует (выражение 12). Поэтому в дальнейшем без ограничения общности можем рассматривать $T = 1$.

В точке минимума (см. выражение 11) ее частные производные должны быть равны нулю:

$$\frac{\partial \varepsilon_k}{\partial \alpha_i} = -2 \sum_{n=k-M}^{k+M} (x[n] - p_k(t_n)) \frac{\partial p_k(t_n)}{\partial \alpha_i} = 0, \quad i = 0, \dots, N. \quad (13)$$

Учитывая, что частные производные $\frac{\partial p_k(t_n)}{\partial \alpha_i} = (t_n - t_k)^i$, а также подставляя (10), системе (13) приведем к виду:

$$\sum_{n=k-M}^{k+M} \sum_{m=0}^N \alpha_m (t_n - t_k)^{m+i} = \sum_{n=k-M}^{k+M} x[n] (t_n - t_k)^i, \quad i = 0, \dots, N.$$

Поменяем теперь слева порядок суммирования и подставим единичный период дискретизации:

$$\sum_{m=0}^N \alpha_m \sum_{n=k-M}^{k+M} (n-k)^{m+i} = \sum_{n=k-M}^{k+M} x[n] (n-k)^i, \quad i = 0, \dots, N.$$

Выписывая в развернутом виде суммы по n и вводя новую индексацию, получим

$$\sum_{m=0}^N \alpha_m A_{im} = \sum_{n=0}^{2M} x[k-M+n] B_{in}, \quad i = 0, \dots, N, \quad (14)$$

где $A_{im} = \sum_{n=0}^{2M} (n-M)^{m+i}$, $B_{in} = (n-M)^i$.

Решая систему уравнений (14) методом Крамера, найдем:

$\alpha_0 = \frac{\Delta_{\alpha_0}}{\Delta}$, где $\Delta = \|[A_{im}]\|$ – главный определитель системы;

$$\Delta_{\alpha_0} = \begin{vmatrix} \sum_{n=0}^{2M} x[k-M+n]B_{0n} & A_{01} & \dots & A_{0N} \\ \sum_{n=0}^{2M} x[k-M+n]B_{1n} & A_{11} & \dots & A_{1N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{n=0}^{2M} x[k-M+n]B_{Nn} & A_{N1} & \dots & A_{NN} \end{vmatrix} =$$

$$= \sum_{n=0}^{2M} x[k-M+n]B_{0n}\Delta_{00} + \sum_{n=0}^{2M} x[k-M+n]B_{1n}\Delta_{10} + \dots + \sum_{n=0}^{2M} x[k-M+n]B_{Nn}\Delta_{N0},$$

где Δ_{i0} , $i = 0, \dots, N$ – алгебраические дополнения элемента с индексами $i, 0$ в определителе Δ_{α_0} (это определители, получаемые из Δ_{α_0} вычеркиванием нулевого столбца и i -ой строки с учетом шахматного правила знаков).

Объединив суммы в последнем выражении, получим в общем виде решение системы (14):

$$\alpha_0[k] = \sum_{n=0}^{2M} a_n x[k-M+n], \quad (15)$$

где $a_n = \frac{1}{\Delta} (B_{0n}\Delta_{00} + B_{1n}\Delta_{10} + \dots + B_{Nn}\Delta_{N0})$.

При последовательном поступлении значений входного сигнала элементы $x[k+1], \dots, x[k+M]$ в момент времени t_k еще не доступны, поэтому значение выходного сигнала фильтра, равное α_0 , может быть получено только с запаздыванием не менее, чем на M тактов:

$$y[k] = \alpha_0[k-M] = \sum_{n=0}^{2M} a_n x[k-2M+n] = \sum_{n=0}^{2M} a_n x[k-n] \quad (16)$$

Полученный алгоритм (16) соответствует КИХ-фильтру порядка $2M$, коэффициенты которого, при реализации по нерекурсивной схеме, описываются выражением (15) и определяют импульсную характеристику $h[n] = a_n$, $n = 0, \dots, 2M$.

В простейшем частном случае при $N = 0$:

$$a_n = \frac{1}{2M+1}.$$

Обозначив для удобства $L = 2M + 1$ – нечетное количество отсчетов, единовременно обрабатываемых алгоритмом, перепишем (16) в виде:

$$y[k] = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} x[k-n].$$

Оно представляет собой разностное уравнение, описывающее нерекурсивный цифровой фильтр с единичными коэффициентами (рис. 8а), называемый также фильтром скользящего среднего. Название фильтра подчеркивает, что выходной сигнал фильтра получается путем усреднения (получения среднего арифметического) L элементов входного сигнала.

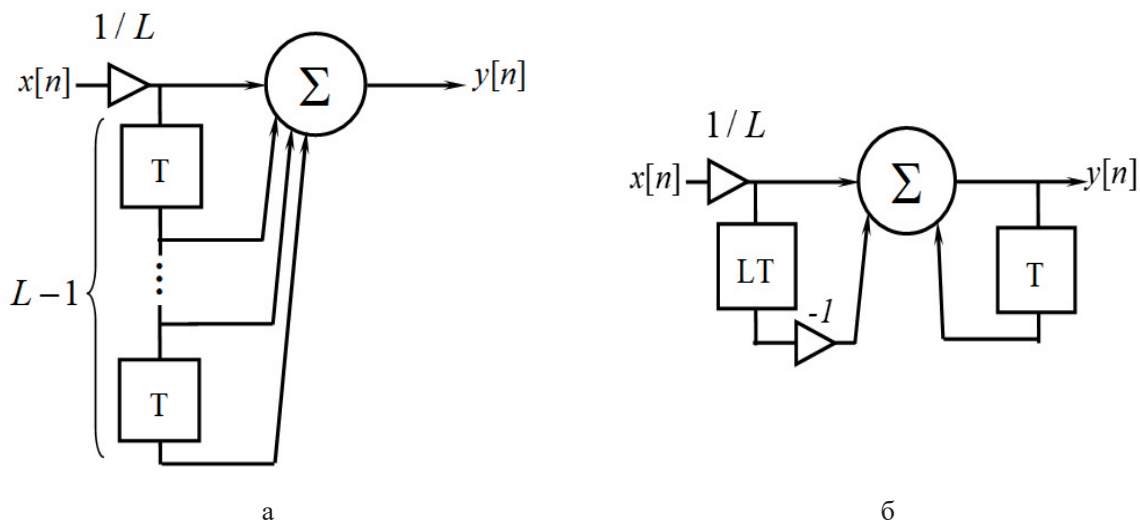


Рис. 8. Схема фильтра скользящего среднего: нерекурсивного (а) и рекурсивного (б).

Импульсная характеристика фильтра скользящего среднего представляет собой дискретный прямоугольный импульс (рис. 9) из L элементов. Системную функцию найдем как z -изображение импульсной характеристики:

$$H(z) = \frac{1}{L} \frac{1-z^{-L}}{1-z^{-1}}. \quad (17)$$

Системной функции в форме (17) соответствует условно-устойчивая структура цифрового фильтра, показанная на рис. 8б.

Отличительной чертой и важным достоинством цифровых фильтров скользящего среднего является отсутствие умножений, что обуславливает их быстроедействие.



Рис. 9. Импульсная характеристика фильтра скользящего среднего.

Частотная характеристика фильтра имеет вид:

$$H_d(\omega) = H(e^{j\omega T}) = \frac{1}{L} \frac{1 - e^{-jL\omega T}}{1 - e^{-j\omega T}} = \frac{1}{L} \frac{\sin(L\omega T / 2)}{\sin(\omega T / 2)} e^{-j\frac{L-1}{2}\omega T},$$

амплитудно-частотная характеристика:

$$|H_d(\omega)| = \frac{1}{L} \left| \frac{\sin(L\omega T / 2)}{\sin(\omega T / 2)} \right|,$$

фазо-частотная характеристика:

$$\varphi_{H_d}(\omega) = \frac{\pi}{2} \left(1 - \operatorname{sign} \left(\frac{\sin(L\omega T / 2)}{\sin(\omega T / 2)} \right) \right) \operatorname{sign}(\omega T) - \frac{L-1}{2} \omega T.$$

Фазо-частотная характеристика линейна и соответствует задержке выходного сигнала относительно входного на M тактов. Амплитудно-частотная характеристика показана на рис. 10 при некоторых значениях M . Зависимость обладает выраженным главным лепестком. Уровень боковых лепестков составляет $-10 \div -15$ дБ и изменяется в зависимости от M .

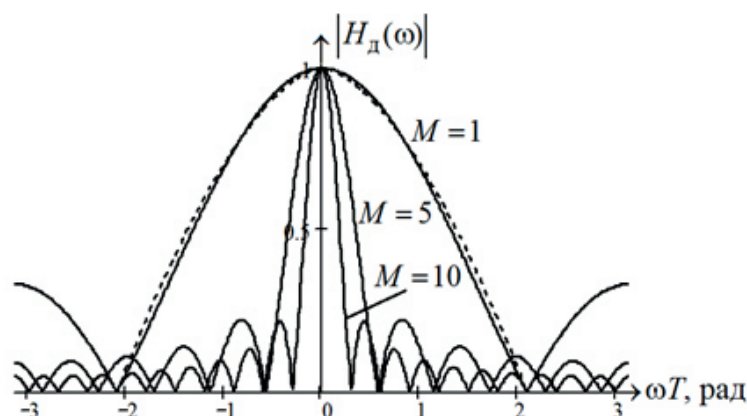


Рис. 10. Амплитудно-частотная характеристика фильтра скользящего среднего при $M = 1, 5, 10$.

Ширина главного лепестка

$$\Delta\omega_0 T = \frac{4\pi}{2M+1}.$$

Сам главный лепесток грубо аппроксимируется следующим выражением:

$$|H_d(\omega)| \approx \left| 1 - \left(\frac{2|\omega T|}{\Delta\omega_0 T} \right)^{1,65} \right|, \quad -\frac{\Delta\omega_0 T}{2} < \omega T < \frac{\Delta\omega_0 T}{2}.$$

График аппроксимирующей функции также показан на рис. 10 пунктиром. Аппроксимация может быть использована для оценки ширины главного лепестка по любому заданному уровню.

При последовательном соединении K звеньев в виде фильтров скользящего среднего результирующая амплитудно-частотная характеристика представляет собой результат перемножения характеристик звеньев $|H_d^K(\omega)|$, и уровень боковых лепестков уменьшается более, чем на 10 дБ на звено. При соединении, например, пяти последовательных звеньев составляет менее -50 дБ. На рис. 11 показаны графики результирующей амплитудно-частотной характеристики при последовательном соединении $K = 5$ звеньев.

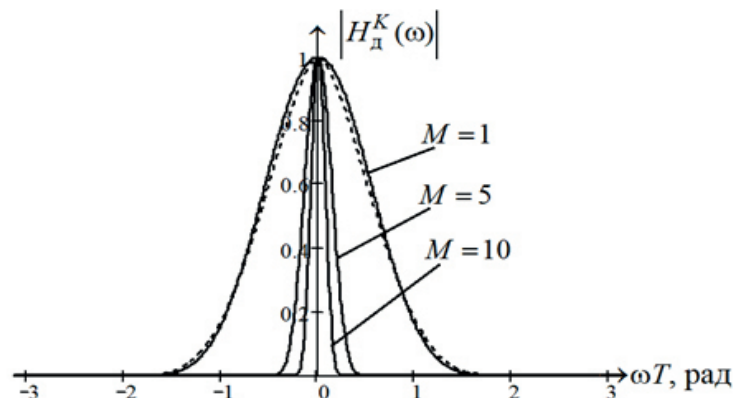


Рис. 11. Результирующая амплитудно-частотная характеристика при последовательном соединении фильтров скользящего среднего.

В общем случае импульсная характеристика МНК-фильтров описывается выражением:

$$h[n] = \begin{cases} \chi_0 + \chi_2(n-M)^2 + \chi_4(n-M)^4 + \dots + \chi_N(n-M)^N, & 0 \leq n \leq 2M, \\ 0, & n < 0, n > 2M \end{cases}, \quad (18)$$

где N – четное.

Импульсные характеристики фильтров при нечетных N совпадают с импульсными характеристиками фильтров при $N - 1$. Полные выражения для импульсных характеристик фильтров довольно громоздки, поэтому ниже приводятся выражения для коэффициентов, входящих в (18):

при $N = 2$

$$\chi_0 = 3 \frac{3M^2 + 3M - 1}{8M^3 + 12M^2 - 2M - 3}; \quad \chi_2 = -\frac{15}{8M^3 + 12M^2 - 2M - 3} \quad (19)$$

при $N = 4$

$$\chi_0 = \frac{15}{4} \frac{15M^4 + 30M^3 - 35M^2 - 50M + 12}{32M^5 + 80M^4 - 80M^3 - 200M^2 + 18M + 45}; \quad (20a)$$

$$\chi_2 = -\frac{525}{4} \frac{2M^2 + 2M - 3}{32M^5 + 80M^4 - 80M^3 - 200M^2 + 18M + 45}; \quad (20б)$$

$$\chi_4 = \frac{1}{4} \frac{945}{32M^5 + 80M^4 - 80M^3 - 200M^2 + 18M + 45}. \quad (20в)$$

при $N = 6$

$$\chi_0 = \frac{35}{4} \frac{35M^6 + 105M^5 - 280M^4 - 735M^3 + 497M^2 + 882M - 180}{128M^7 + 448M^6 - 1120M^5 - 3920M^4 + 2072M^3 + 7252M^2 - 450M - 1575}; \quad (21a)$$

$$\chi_2 = -\frac{735}{4} \frac{15M^4 + 30M^3 - 90M^2 - 105M + 101}{128M^7 + 448M^6 - 1120M^5 - 3920M^4 + 2072M^3 + 7252M^2 - 450M - 1575}; \quad (21б)$$

$$\chi_4 = \frac{8085}{4} \frac{3M^2 + 3M - 10}{128M^7 + 448M^6 - 1120M^5 - 3920M^4 + 2072M^3 + 7252M^2 - 450M - 1575}; \quad (21в)$$

$$\chi_6 = \frac{1}{4} \frac{15015}{128M^7 + 448M^6 - 1120M^5 - 3920M^4 + 2072M^3 + 7252M^2 - 450M - 1575}. \quad (21г)$$

при $N = 8$

$$\chi_0 = \frac{945}{64} \frac{105M^8 + 420M^7 - 2030M^6 - 7560M^5 +}{512M^9 + 2304M^8 - 10752M^7 - 48384M^6 +} \quad (22a)$$

$$\frac{+10969M^4 + 35028M^3 - 17684M^2 - 36528M + 6720}{+63168M^5 + 284256M^4 - 103328M^3 - 464976M^2 + 22050M + 99225};$$

$$\chi_2 = -\frac{17325}{32} \frac{42M^6 + 126M^5 -}{512M^9 + 2304M^8 - 10752M^7 - 48384M^6 +} \quad (22б)$$

$$\frac{-651M^4 - 1512M^3 + 2625M^2 + 3402M - 2630}{+63168M^5 + 284256M^4 - 103328M^3 - 464976M^2 + 22050M + 99225};$$

$$\chi_4 = \frac{945945}{64} \frac{105M^8 + 420M^7 - 2030M^6 - 7560M^5 +}{512M^9 + 2304M^8 - 10752M^7 - 48384M^6 +} \quad (22в)$$

$$\frac{6M^4 + 12M^3 - 66M^2 - 72M + 145}{+63168M^5 + 284256M^4 - 103328M^3 - 464976M^2 + 22050M + 99225};$$

$$\chi_6 = -\frac{675675}{32} \frac{105M^8 + 420M^7 - 2030M^6 - 7560M^5 +}{512M^9 + 2304M^8 - 10752M^7 - 48384M^6 +} \quad (22г)$$

$$\frac{6M^2 + 6M - 35}{+63168M^5 + 284256M^4 - 103328M^3 - 464976M^2 + 22050M + 99225};$$

$$\chi_8 = \frac{3828825}{64} \frac{512M^9 + 2304M^8 - 10752M^7 - 48384M^6 +}{+63168M^5 + 284256M^4 - 103328M^3 - 464976M^2 + 22050M + 99225} \cdot \frac{1}{+63168M^5 + 284256M^4 - 103328M^3 - 464976M^2 + 22050M + 99225} \cdot \quad (22д)$$

При $N > 8$ расчет импульсной характеристики МНК-фильтров может быть запрограммирован на основе более общего выражения (15). Примеры импульсных и амплитудно-частотных характеристик при различных степенях полинома $N = 2, 4, 6, 8$ и порядке сглаживающей аппроксимации $M = 10$ приведены на рис. 12–15. Импульсная характеристика рассматриваемых фильтров четно-симметрична, поэтому их реализация потребует не более $M + 1$ умножений.

МНК-фильтры являются фильтрами нижних частот. Частотная характеристика имеет выраженный главный лепесток и боковые лепестки.

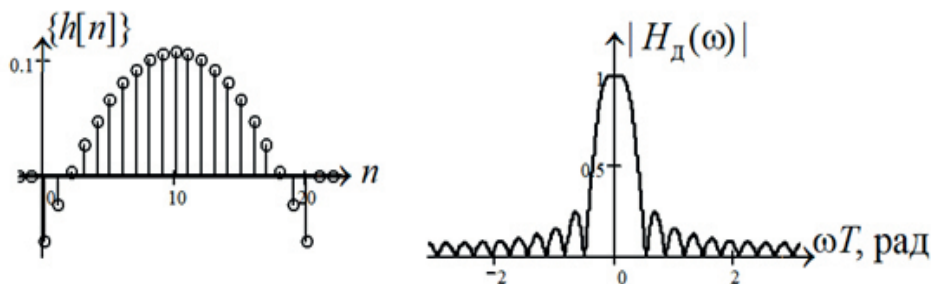


Рис. 12. Импульсная и амплитудно-частотная характеристики МНК-фильтра при $N = 2$ и $M = 10$.

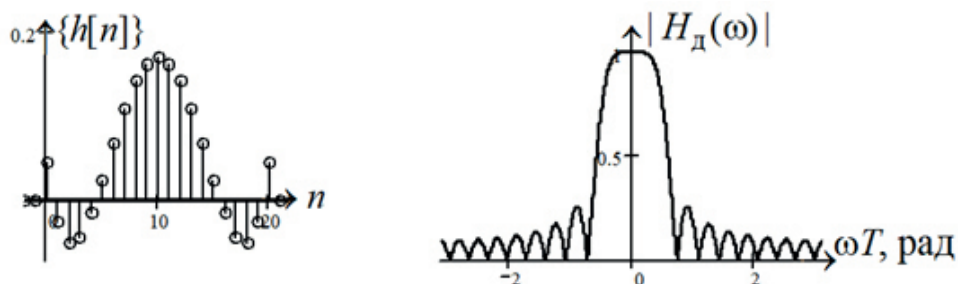


Рис. 13. Импульсная и амплитудно-частотная характеристики МНК-фильтра при $N = 4$ и $M = 10$.

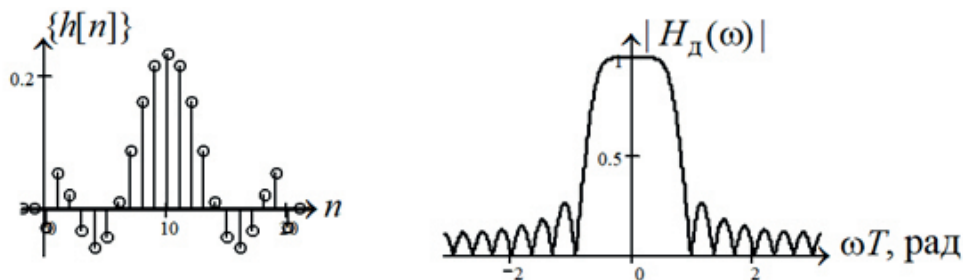


Рис. 14. Импульсная и амплитудно-частотная характеристики МНК-фильтра при $N = 6$ и $M = 10$.

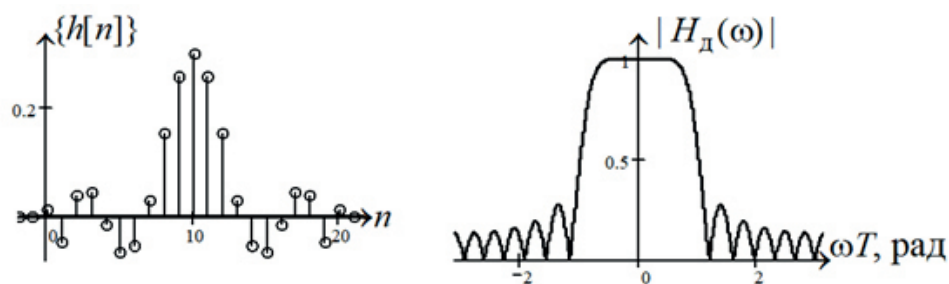


Рис. 15. Импульсная и амплитудно-частотная характеристики МНК-фильтра при $N = 8$ и $M = 10$.

Увеличение степени многочлена сопровождается расширением области частот, в которой амплитудно-частотная характеристика практически равномерна и не имеет пульсаций. Ширина главного лепестка зависит от N и M : увеличение степени полинома N приводит к расширению главного лепестка, увеличение порядка аппроксимации M приводит к уменьшению ширины главного лепестка. Уровень первого бокового лепестка $L_{\min}$ слабо зависит от N и M . Значения ширины главного лепестка $\Delta\omega_0 T$ и уровень первого бокового лепестка $L_{\min}$ приведены в табл. 3. Для ориентировочных расчетов можно предложить аппроксимацию

$$\Delta\omega_0 T \approx \frac{A(N)}{M},$$

где $A(N) = 10; 15; 20; 15$ для $N = 2, 4, 6, 8$, соответственно.

Таблица 3. Ширина главного лепестка и уровень первого бокового лепестка амплитудно-частотной характеристики МНК-фильтра

M	$N = 2$		$N = 4$		$N = 6$		$N = 8$	
	$\omega_0 T$, рад	$L_{\min}$, дБ	$\omega_0 T$, рад	$L_{\min}$, дБ	$\omega_0 T$, рад	$L_{\min}$, дБ	$\omega_0 T$, рад	$L_{\min}$, дБ
5	2.028	-11.80	2.919	-11.0	3.935	-10.20	5.268	-8.00
6	1.714	-12.00	2.416	-11.3	3.236	-10.90	4.156	-10.05
7	1.467	-12.06	2.094	-11.5	2.762	-11.20	3.490	-10.70
8	1.270	-12.13	1.840	-11.6	2.412	-11.30	3.008	-10.97
9	1.142	-12.17	1.650	-11.7	2.150	-11.42	2.660	-11.18
10	1.046	-12.20	1.508	-11.8	1.914	-11.48	2.380	-11.29
11	0.952	-12.22	1.346	-11.8	1.744	-11.56	2.158	-11.35
12	0.888	-12.24	1.256	-11.8	1.618	-11.58	1.968	-11.41
13	0.812	-12.25	1.157	-11.9	1.492	-11.62	1.816	-11.46
14	0.761	-12.26	1.078	-11.9	1.396	-11.67	1.686	-11.49
15	0.698	-12.27	1.012	-11.9	1.270	-11.70	1.586	-11.52
16	0.666	-12.28	0.952	-11.9	1.206	-11.71	1.486	-11.55
17	0.635	-12.28	0.889	-12.0	1.142	-11.72	1.396	-11.57
18	0.604	-12.29	0.826	-12.0	1.078	-11.74	1.301	-11.62
19	0.572	-12.29	0.794	-12.0	1.015	-11.75	1.240	-11.64
20	0.509	-12.29	0.762	-12.0	0.952	-11.76	1.178	-11.67

Таблица 3. Окончание

M	$N = 2$		$N = 4$		$N = 6$		$N = 8$	
	$\omega_0 T$, рад	$L_{\min}$, дБ	$\omega_0 T$, рад	$L_{\min}$, дБ	$\omega_0 T$, рад	$L_{\min}$, дБ	$\omega_0 T$, рад	$L_{\min}$, дБ
21	0.508	-12.30	0.722	-12.0	0.921	-11.77	1.136	-11.67
22	0.480	-12.30	0.698	-12.0	0.889	-11.77	1.078	-11.68
23	0.468	-12.30	0.672	-12.0	0.826	-11.78	1.015	-11.68
24	0.444	-12.31	0.635	-12.0	0.826	-11.78	0.988	-11.68
25	0.416	-12.31	0.604	-12.0	0.770	-11.79	0.952	-11.68

Подавление амплитудно-частотной характеристики вне главного лепестка может быть улучшено при последовательном соединении K звеньев. При добавлении одного звена результирующее подавление вне главного лепестка улучшается более, чем на -10 дБ. Амплитудно-частотные характеристики результирующего фильтра из $K = 5$ звеньев при различных степенях полинома $N = 2, 4, 6, 8$ и порядке сглаживающей аппроксимации $M = 10$ показаны на рис. 16, 17. Каскадированные МНК-фильтры являются фильтрами с П-образной амплитудно-частотной и линейной фазо-частотной характеристиками.

Главный лепесток амплитудно-частотной характеристики результирующего фильтра может быть описан выражением:

$$H_d(\omega) \approx \left| 1 - \left| \frac{2\omega T}{\Delta\omega_0 T} \right|^\alpha \right|^{K\beta}, \quad -\frac{\Delta\omega_0 T}{2} \leq \omega T \leq \frac{\Delta\omega_0 T}{2}. \quad (23)$$

Параметры аппроксимирующей функции α и β приведены в табл. 4.

Таблица 4. Параметры α, β

N	2	4	6	8
α	3.4	4.5	6.1	7.0
β	1.5	1.5	1.8	1.8

Относительную ширину переходной полосы $\delta\omega$ находят из (23):

$$\delta\omega \approx \frac{\omega_\Pi - \omega_c}{\omega_c} = \left(\frac{1 - \frac{1}{L_\Pi^{K\beta}}}{1 - \frac{1}{L_c^{K\beta}}} \right)^{\frac{1}{\alpha}},$$

где ω_c, ω_Π – частоты среза и подавления; L_c, L_Π – уровни среза и подавления.

Диаграмма зависимости относительной ширины переходной полосы от количества звеньев фильтра показана на рис. 18.

Относительная ширина переходной полосы в исследованном диапазоне слабо зависит от количества звеньев K и порядка аппроксимации M . Поэтому количество звеньев подбирают, исходя из требуемого подавления, параметр N – из требуемой ширины переходной полосы, а выбор M должен обеспечить требуемую полосу пропускания. Не исключен и другой выбор параметров, учитывающий, что полоса пропускания, вообще говоря, зависит от двух параметров: N и M .

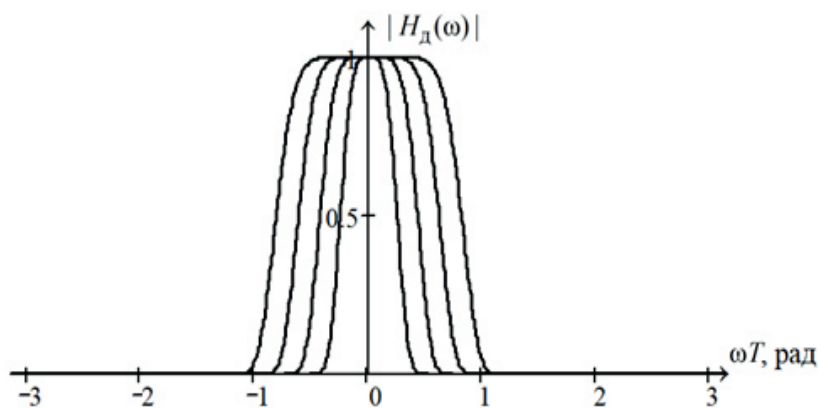


Рис. 16. Результирующая амплитудно-частотная характеристика при $N = 2, 4, 6, 8$; $M = 10$; $K = 5$.

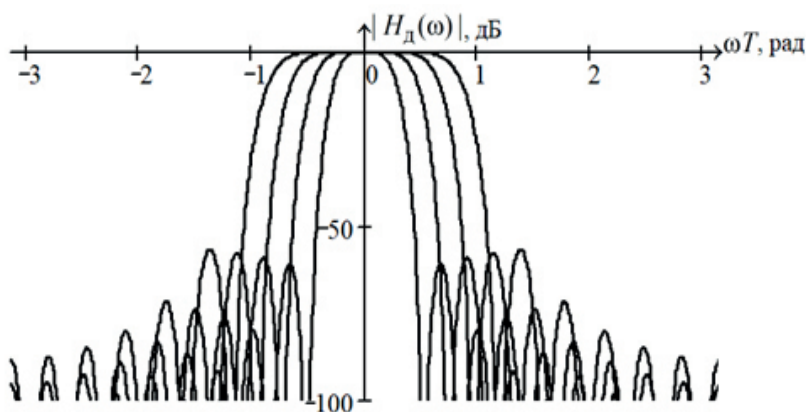


Рис. 17. Результирующая амплитудно-частотная характеристика (в децибелах) при $N = 2, 4, 6, 8$; $M = 10$; $K = 5$.

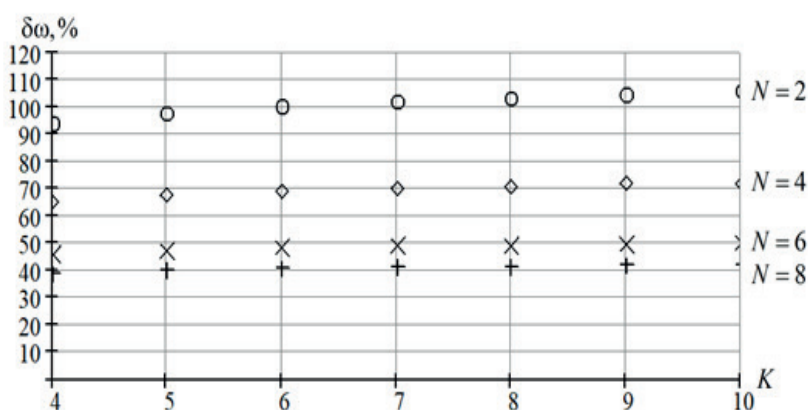


Рис. 18. Зависимость относительной ширины переходной полосы результирующего фильтра от количества звеньев (уровень полосы пропускания -3 дБ, уровень подавления -40 дБ).

Заключение

Рассмотрен подход к эвристическому синтезу дифференцирующих, интегрирующих и сглаживающих цифровых фильтров, а также фильтров с линейной фазочастотной характеристикой и П-образной амплитудно-частотной характеристикой, согласно которому получаемые цифровые фильтры представляют собой результирующий эффект нескольких этапов, предполагающих восстановление обрабатываемого сигнала, выполнение требуемой процедуры с полученным аналоговым сигналом и последующей дискретизацией. С использованием различных методов локальной интерполяции и аппроксимации предложены некоторые виды цифровых фильтров в соответствии с их функциональным назначением. Полученные результаты представлены в форме, предполагающей их непосредственное использование в задачах обработки сигналов.

Предложенные цифровые фильтры могут применяться в задачах экономического, финансового и статистического анализа данных, а также в задачах обработки данных физического или химического эксперимента.

Литература:

1. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е изд. : Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2008. 992 с.
2. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ. М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. 656 с.
3. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 848 с.
4. Antoniou A. Digital Filters: Analysis and Design. McGraw-Hill, 1979. 524 p.
5. Каппелини В., Константи́нидис А.Дж., Эмилиани П. Цифровые фильтры и их применение: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
6. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры: Пер. с англ. / Под ред. А.М. Трахтмана. М.: Сов. радио, 1980. 224 с.
7. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures // Anal. Chem. 1964. V. 36. № 8. P. 1627–1639. doi:10.1021/ac60214a047
8. Madden H.H. Comments on the Savitzky–Golay convolution method for least-squares-fit smoothing and differentiation of digital data // Anal. Chem. 1978. V. 50. № 9. P. 1383–1386. doi:10.1021/ac50031a048.
9. Никонов А.В., Давлетшин Р.В., Яковлева Н.И., Лазарев П.С. Фильтрация методом Савицкого-Голая спектральных характеристик чувствительности матричных фотоприемных устройств // Успехи прикл. физики. 2016. Т. 4. № 2. С. 198–205.
10. Денисенко А.Н., Исаков В.Н. Применение различных методов восстановления непрерывных сигналов по их дискретным значениям // Радиотехника. 2001. № 10. С. 16–20.
11. Исаков В.Н. Сходимость при регулярной интерполяции и локальные интерполяционные базисы // Наукоемкие технологии. 2013. № 4. С. 40–46.
12. Исаков В.Н. Оптимальная регулярная локальная сплайновая интерполяция сигналов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2016. № 4. С. 24–31.
13. Исаков В.Н. Фундаментальные интерполяционные базисы и спектральный ана-

лиз при локальной интерполяции обобщенными сплайнами // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 1 (6). С. 144–154.

14. Денисенко А.Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника: Справочное пособие. М.: Горячая линия-Телеком, 2005. 704 с.

15. Битюков В.К., Симачков Д.С. Источники вторичного электропитания: Учебник. М.: Инфра-Инженерия, 2017.

References:

1. Ifeachor E.C., Jervis B.W. Digital Signal Processing: A Practical Approach, Second edition : transl. from English. Moscow: Publ. House «Vilyams», 2008. 992 p. (in Russ.)

2. Lyons R.G. Digital Signal Processing : transl. from English. Moscow: Binom-Press Publ., 2006. 656 p. (in Russ.)

3. Rabiner L.R., Gold B. Theory and Application of Digital Signal Processing : transl. from English. Moscow: Mir Publ., 1978. 848 p. (in Russ.)

4. Antoniou A. Digital Filters: Analysis and Design. McGraw-Hill, 1979. 524 p.

5. Cappellini V., Constantinides A.G., Emilani P. Digital filters and their applications. London: Academic Press, 1978. 393 p.

6. Hamming R.W. Digital filters: transl. from English. Moscow: Sovetskoe Radio Publ., 1980. 224 p. (in Russ.)

7. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures // Anal. Chem. 1964. V. 36. № 8. P. 1627–1639. doi:10.1021/ac60214a047

8. Madden H.H. Comments on the Savitzky–Golay convolution method for least-squares-fit smoothing and differentiation of digital data // Anal. Chem. 1978. V. 50. № 9. P. 1383–1386. doi:10.1021/ac50031a048.

9. Nikonov A.V., Davletshin R.V., Yakovleva N.I., Lazarev P.S. Savitzky-Golay smoothing method of FPA photodiodes spectral response // Uspekhi Prikladnoi Fiziki (Advances in Applied Physics). 2016. V. 4. № 2. P. 198–205. (in Russ.)

10. Denisenko A.N., Isakov V.N. The application of various methods for reconstructing continuous signals from their discrete values // Radiotekhnika (Radioengineering). 2001. № 10. P. 16–20. (in Russ.)

11. Isakov V.N. Convergence of regular interpolation and local interpolation bases // Naukoemkie tekhnologii (Science Intensive Technologies). 2013. № 4. P. 40–46. (in Russ.)

12. Isakov V.N. Optimum regular local spline interpolation of signals // Vestnik Kontserna VKO «Almaz – Antey» (Herald of Concern of Air and Space Defense "Almaz-Antey"). 2016. № 4. P. 24–31. (in Russ.)

13. Isakov V.N. Fundamental interpolating bases and spectral analysis at local interpolation with generalized splines // Vestnik MGTU MIREA. 2015. № 1 (6). P. 144–154. (in Russ.)

14. Denisenko A.N. Signals. Theoretical Radio Engineering: Handbook. Moscow: Goryachaya Liniya-Telecom Publ., 2005. 704 p. (in Russ.)

15. Bitjukov V.K., Simachkov D.S. Sources of secondary power supply. Moscow: Infra-Inzheneriya Publ., 2017. (in Russ.)

Об авторах:

Исаков Владимир Николаевич, старший преподаватель кафедры теоретической радиотехники и радиофизики Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Тимошенко Полина Игоревна, студентка кафедры теоретической радиотехники и радиофизики Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Vladimir N. Isakov, Senior Lecturer, Chair of Theoretical Radio Engineering and Radio Physics, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Polina I. Timoshenko, Student, Chair of Theoretical Radio Engineering and Radio Physics, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

УДК 531.1:629.78

СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СЪЕМКЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАНЕТЫ

**В.Я. Геча¹,
М.Ю. Жиленев¹,
В.Б. Федоров²,
Д.А. Хрычев²,
Ю.И. Худак²,
А.В. Шатина^{2,@}**

¹АО «Корпорация «ВНИИЭМ», Москва 107078, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

@Автор для переписки, e-mail: shatina_av@mail.ru

В работе получена формула для расчета скорости движения изображения в плоскости фиксации изображения при космической съемке поверхности планеты с помощью бортовой оптико-электронной аппаратуры. Рассмотрена идеальная задача: Земля моделируется абсолютно твердым однородным шаром, равномерно вращающимся вокруг неподвижной оси, а центр масс спутника описывает фиксированную кеплеровскую орбиту, в одном из фокусов которой расположен центр Земли. Ось визирования имеет направление в надир, т.е. проходит через центр Земли. Главный фокус «космического фотоаппарата» находится в центре масс спутника P , а плоскость фиксации изображений перпендикулярна оси визирования и расположена на фокусном расстоянии d за точкой P . Полученная аналитическая формула для расчета поля скоростей движения точек изображения в рассматриваемой модельной задаче при съемке в надир имеет фундаментальное значение для решения обратной задачи – при восстановлении «смазанного» изображения. Формула важна для расчета и оптимизации параметров применяемых на практике компенсаторов «смаза» изображения. Кроме того, полученная формула полезна для верификации численных алгоритмов, моделирующих эффект «смаза». Она может использоваться при планировании рабочих программ дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: спутник, кеплеровская орбита, скорость движения изображения, надир, космический аппарат, дистанционное зондирование Земли.

THE IMAGE SPEED DURING THE OPTICAL-ELECTRONIC SURFACING THE PLANET

V.Ya. Gecha¹,
M.Yu. Zhilenev¹,
V.B. Fyodorov²,
D.A. Khrychev²,
Yu.I. Khudak²,
A.V. Shatina^{2,@}

¹"VNIIE Corporation" JC, Moscow 107078, Russia

²MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author e-mail: shatina_av@mail.ru

In this paper, a formula is obtained for calculating the velocity of an image in the plane of image fixation during a space survey of the planet's surface with the aid of an on-board optoelectronic device. The ideal task is considered: the Earth is modeled by an absolutely rigid homogeneous ball, rotating uniformly around the fixed axis, and the satellite's center of mass describes a fixed Keplerian orbit, in one of the focal points of which the center of the Earth is located. The axis of sight has a direction in the nadir, i.e. passes through the center of the Earth. The main focus of the "cosmic camera" is in the center of mass of the satellite P , and the plane of fixation of the images is perpendicular to the viewing axis and is located at the focal distance d behind the point P .

The obtained analytical formula for calculating the velocity field of motion of image points in the model problem under consideration when shooting in a nadir is of fundamental importance for solving the inverse problem when reconstructing a "blurred" image. The formula is important for calculating and optimizing the parameters of the compensators used in practice to "smear" the image. In addition, the resulting formula is useful for verifying numerical algorithms that model the "smear" effect. It can be used in planning work programs for remote sensing of the Earth.

Keywords: satellite, Keplerian orbit, speed of image movement, nadir, spacecraft, remote sensing of the Earth.

Надежная качественная и количественная информация о поле скоростей движения точек первичного изображения при съемке поверхности планеты с помощью бортовой оптико-электронной аппаратуры (БОЭА) является исходной базой для получения снимков высокого пространственного разрешения. Основным препятствием для достижения высокого пространственного разрешения деталей на итоговых снимках, получаемых с помощью БОЭА малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли (МКА ДЗЗ), является эффект «смаза» первичного изображения. Главными причинами «смаза» являются движение спутника по орбите и вращение Земли вокруг своей оси, но на картину «смаза» также оказывает принципиальное влияние закон управления движением главной оптической оси БОЭА, вращение плоскости фиксации изображения вокруг этой оси.

Исследования по дистанционному зондированию Земли с помощью космических аппаратов имеют важное практическое значение. При этом используются численные ме-

тоды, численно-аналитические методы, методы визуального программирования [1–3]. Аналитическая формула для расчета поля скоростей движения точек изображения в рассматриваемой модельной задаче имеет фундаментальное значение, так как без глубокого теоретического анализа нельзя понять суть физического явления, предсказать поведение системы. В частности, полученная формула может быть использована для решения обратной задачи при восстановлении «смазанного» изображения [4].

1. Орбитальное движение спутника. Системы координат

Рассмотрим модельную задачу о движении спутника (материальной точки K) в гравитационном поле Земли, которую будем считать однородным твердым телом сферической формы радиуса r_0 , равномерно вращающимся вокруг своей оси с угловой скоростью ω . В таком случае спутник движется по кеплеровской эллиптической орбите, в одном из фокусов которой находится центр Земли O .

Введем три правые системы координат (рис. 1): геоцентрическую инерциальную систему (ИСК) $OXYZ$; гринвичскую вращающуюся вместе с Землей систему (ГСК) $Ox_1x_2x_3$; орбитальную систему (ОСК) $Kxyz$.

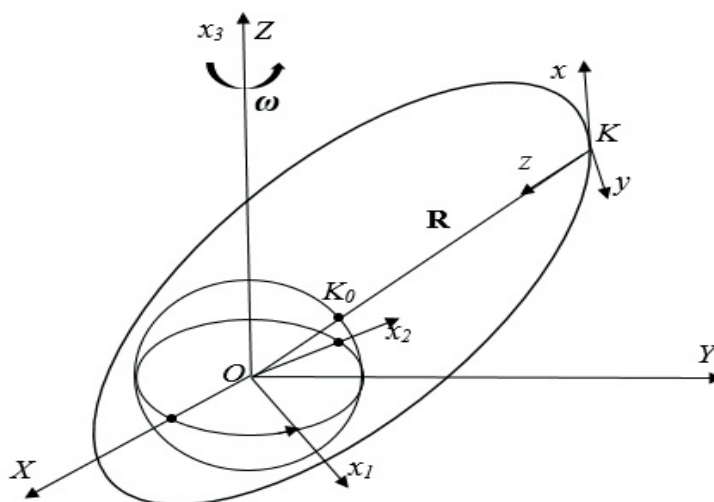


Рис. 1. Постановка задачи. Системы координат.

Начало ИСК совпадает с центром Земли O . Ось OX направлена в точку весеннего равноденствия данной эпохи, ось OZ направлена по оси вращения планеты перпендикулярно плоскости экватора к Северному полюсу мира. Ось OY дополняет ИСК до правой системы координат. Ось Ox_3 ГСК совпадает с осью OZ ИСК. Ось Ox_1 лежит в плоскости среднего гринвичского меридиана. Согласно рассматриваемой постановке задачи, вектор угловой скорости вращения Земли

$$\omega = \omega \cdot \mathbf{k} ,$$

где $\mathbf{k} = (0,0,1)$ – орт оси OZ в ИСК;

$\omega = 7,29211 \cdot 10^{-5} (\text{рад/с})$ – средняя угловая скорость вращения Земли.

Ось Kz ОСК направлена из точки K в точку O ; ось Ky – вдоль нормали к плоскости мгновенной орбиты (противоположно орбитальной угловой скорости), а ось Kx дополняет ОСК до правой системы.

Обозначим радиус-вектор точки K через $\mathbf{R}$, а орты ОСК – $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$. Тогда

$$\mathbf{R} = \overrightarrow{OK},$$

$$\mathbf{e}_3 = -\mathbf{R}/R, \quad \mathbf{e}_2 = -\frac{\mathbf{R} \times \dot{\mathbf{R}}}{|\mathbf{R} \times \dot{\mathbf{R}}|}, \quad \mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_2 \times \mathbf{e}_3, \quad R = |\mathbf{R}|. \quad (1)$$

Положение спутника K на орбите задано, если заданы постоянные параметры орбиты a, e, i, h, g и зависящая от времени истинная аномалия ϑ : здесь a – большая полуось, e – эксцентриситет, i – наклонение, h – долгота восходящего узла, g – долгота перигея π от восходящего узла (π – ближайшая к центру Земли точка орбиты спутника), ϑ – угол в плоскости орбиты, который отсчитывается от направления на перигей до текущего радиус-вектора точки K (рис. 2).

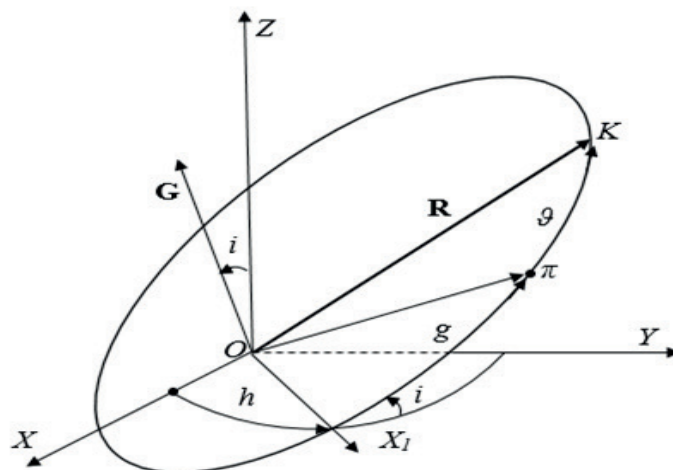


Рис. 2. Элементы кеплеровской орбиты: i – наклонение орбиты спутника; h – долгота восходящего узла (угол между осью OX и линией OX_1 пересечения плоскости орбиты спутника с плоскостью OXY); g – долгота перигея π от восходящего узла, ϑ – истинная аномалия.

Истинная аномалия ϑ является решением дифференциального уравнения [5, 6]:

$$\dot{\vartheta} = \frac{(1 + e \cos \vartheta)^2}{(1 - e^2)^{3/2}} n, \quad n = \sqrt{\mu a^{-3}}, \quad \mu = f M_{\oplus}, \quad (2)$$

где n – среднее движение спутника по орбите;

f – универсальная гравитационная постоянная;

$M_{\oplus}$ – масса Земли ($f = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$, $M_{\oplus} = 5,9736 \cdot 10^{24} \text{ кг}$).

Длина вектора $\mathbf{R}$ выражается формулой [5, 6]:

$$R = \frac{a(1-e^2)}{1+e\cos\vartheta} . \quad (3)$$

Единичный вектор $\mathbf{e}_3 = -\mathbf{R} / R$ в ИСК имеет координаты [5, 6]:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_3 &= (e_{3x}, e_{3y}, e_{3z}), \\ e_{3x} &= -\cos h \cos(g + \vartheta) + \sin h \cos i \sin(g + \vartheta), \\ e_{3y} &= -\sin h \cos(g + \vartheta) - \cos h \cos i \sin(g + \vartheta), \\ e_{3z} &= -\sin i \sin(g + \vartheta). \end{aligned} \quad (4)$$

Из выражений (1)–(4) для координат векторов $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ в ИСК получим:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_1 &= (e_{1x}, e_{1y}, e_{1z}), \quad \mathbf{e}_2 = (e_{2x}, e_{2y}, e_{2z}), \\ e_{1x} &= -\cos h \sin(g + \vartheta) - \sin h \cos i \cos(g + \vartheta), \\ e_{1y} &= -\sin h \sin(g + \vartheta) + \cos h \cos i \cos(g + \vartheta), \\ e_{1z} &= \sin i \cos(g + \vartheta), \\ e_{2x} &= -\sin h \sin i, \quad e_{2y} = \cos h \sin i, \quad e_{2z} = -\cos i. \end{aligned}$$

Справедливы равенства:

$$\dot{\mathbf{e}}_3 = -\dot{\vartheta} \mathbf{e}_1, \quad \dot{\mathbf{e}}_1 = \dot{\vartheta} \mathbf{e}_3, \quad \dot{\mathbf{e}}_2 = 0 . \quad (5)$$

Переход от ОСК $Kxyz$ к ИСК $OXYZ$ определяется матрицей:

$$A = \begin{pmatrix} e_{1x} & e_{2x} & e_{3x} \\ e_{1y} & e_{2y} & e_{3y} \\ e_{1z} & e_{2z} & e_{3z} \end{pmatrix} .$$

2. Скорость движения точек изображения при орбитальной съемке планет в надир

Для нахождения скорости движения точек изображения при орбитальной съемке планет рассмотрим условную физическую модель «космический фотоаппарат», главный

фокус которого находится в центре масс спутника – точке K , а плоскость фиксации изображений π_D точек Земли перпендикулярна лучу OK и проходит через точку K_1 , расположенную на луче OK на расстоянии d за точкой K , т.е. $KK_1 = -d \cdot \mathbf{e}_3$.

Построим систему координат $K_1x'y'z'$ с осями, параллельными осям ОСК $Kxyz$ (рис. 3). Плоскость π_D совпадает с плоскостью $K_1x'y'$.

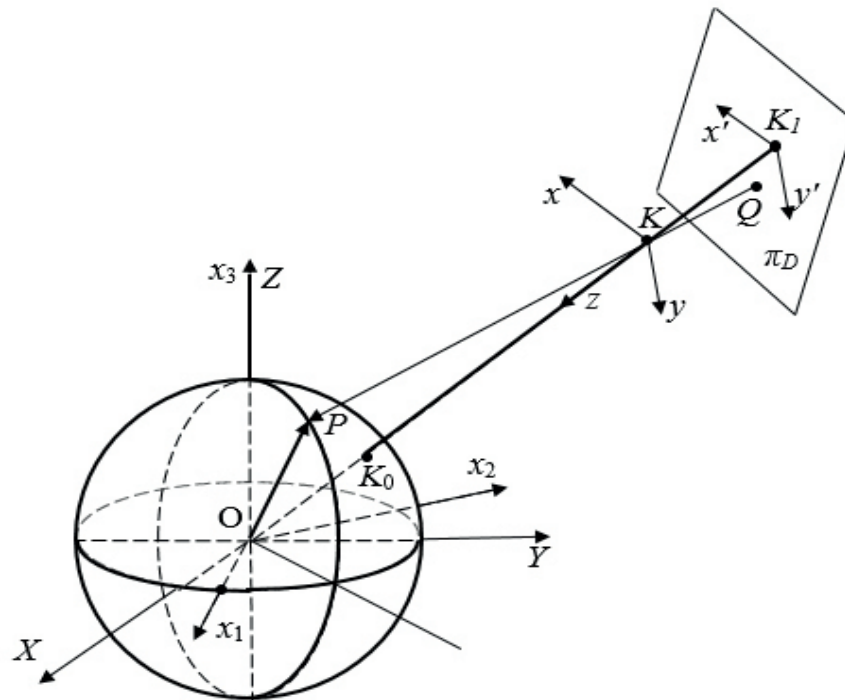


Рис. 3. Схема взаимного расположения подспутниковой точки K_0 и произвольной точки P из области, высекаемой конусом обзора на поверхности Земли, и их изображений K_1 и Q в плоскости изображений π_D .

Зафиксируем в момент времени t_0 точку Q с координатами (x, y) в плоскости $K_1x'y'$, соответствующую некоторой точке P на поверхности Земли, попадающей в угол обзора нашего «фотоаппарата». Точка P получается при пересечении прямой KQ с поверхностью Земли – сферой с центром в точке O и радиусом r_0 .

Математическая задача, эквивалентная построению поля скоростей «смаза» исходного изображения, получаемого БОЭА МКА, состоит в нахождении скорости точки Q в момент времени t_0 в подвижной системе координат $K_1x'y'z'$.

Абсолютная скорость $\mathbf{V}_Q$ точки Q равна геометрической сумме переносной $\mathbf{V}_e$ и относительной $\mathbf{V}_r$ скоростей [7]:

$$\mathbf{V}_Q = \mathbf{V}_e + \mathbf{V}_r, \mathbf{V}_Q = \dot{\mathbf{R}}_{OQ}, \mathbf{V}_e = \dot{\mathbf{R}}_{OK_1} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_{K_1Q}, \mathbf{V}_r = A\dot{\mathbf{r}}_{K_1Q}, \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\Omega} = -\dot{\theta}\mathbf{e}_2, \mathbf{R}_{K_1Q} = x\mathbf{e}_1 + y\mathbf{e}_2. \quad (7)$$

Запись $\mathbf{R}_{AB}$ обозначает вектор $\overline{AB}$, задаваемый в ИСК, а $\mathbf{r}_{AB}$ – этот же вектор в подвижной системе координат $K_1x'y'z'$ (или в ОСК $Kxyz$). Относительная скорость $\mathbf{V}_r$

точки Q – искомая скорость точки Q в плоскости фиксации изображений π_D . С учетом (6) и (7) получаем:

$$\mathbf{V}_r = \dot{\mathbf{R}}_{K_1Q} - x\dot{\vartheta}\mathbf{e}_3. \quad (8)$$

Вектор $\mathbf{R}_{K_1Q}$ представим в виде:

$$\mathbf{R}_{K_1Q} = d\mathbf{e}_3 + \lambda\mathbf{R}_{PK}, \quad \lambda = -\frac{d}{(\mathbf{R}_{PK}, \mathbf{e}_3)}. \quad (9)$$

Значение параметра λ получено из условия ортогональности векторов $\mathbf{R}_{KK_1} = -d\mathbf{e}_3$ и $\mathbf{R}_{K_1Q}$. С учетом (5)

$$\dot{\mathbf{R}}_{K_1Q} = -d\dot{\vartheta}\mathbf{e}_1 + \dot{\lambda}\mathbf{R}_{PK} + \lambda\dot{\mathbf{R}}_{PK}, \quad (10)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{d}{(\mathbf{R}_{PK}, \mathbf{e}_3)^2} \left\{ (\dot{\mathbf{R}}_{PK}, \mathbf{e}_3) + (\mathbf{R}_{PK}, \dot{\mathbf{e}}_3) \right\}. \quad (11)$$

После подстановки (10) в (8) вектор $\mathbf{V}_r$ преобразуется к виду:

$$\mathbf{V}_r = -d\dot{\vartheta}\mathbf{e}_1 - x\dot{\vartheta}\mathbf{e}_3 + \dot{\lambda}\mathbf{R}_{PK} + \lambda\dot{\mathbf{R}}_{PK}. \quad (12)$$

Уравнение прямой KQ имеет вид: $\mathbf{R}_u = \overline{OK} + \overline{KQ} \cdot u$, то есть

$$\mathbf{R}_u = -R \cdot \mathbf{e}_3 + (x \cdot \mathbf{e}_1 + y \cdot \mathbf{e}_2 - d \cdot \mathbf{e}_3) \cdot u.$$

Значение параметра u , отвечающее точке P , находится из следующего условия:

$$(\mathbf{R}_u, \mathbf{R}_u) = r_0^2 \Leftrightarrow R^2 + 2 \cdot R \cdot d \cdot u + (x^2 + y^2 + d^2) \cdot u^2 = r_0^2.$$

Отсюда:

$$u_{0,1} = \frac{-R \cdot d \pm \sqrt{R^2 d^2 - (x^2 + y^2 + d^2)(R^2 - r_0^2)}}{x^2 + y^2 + d^2}. \quad (13)$$

Большой корень u_0 отвечает точке P , а меньший u_1 – точке пересечения прямой KQ с противоположной к P полусферой поверхности Земли.

Итак:

$$\mathbf{R}_{OP} = -R \cdot \mathbf{e}_3 + (x \cdot \mathbf{e}_1 + y \cdot \mathbf{e}_2 - d \cdot \mathbf{e}_3) \cdot u_0. \quad (14)$$

Так как в подвижной ГСК $Ox_1x_2x_3$ координаты точки P остаются неизменными, то абсолютная скорость точки P имеет вид:

$$\dot{\mathbf{R}}_{OP} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}_{OP}, \quad (15)$$

Координаты вектора $\boldsymbol{\omega}$ в ОСК: $A^{-1}\boldsymbol{\omega} = \omega(e_{1z}, e_{2z}, e_{3z})^T$. Откуда

$$\boldsymbol{\omega} = \omega(e_{1z}\mathbf{e}_1 + e_{2z}\mathbf{e}_2 + e_{3z}\mathbf{e}_3). \quad (16)$$

Так как $\mathbf{R}_{PK} = -R\mathbf{e}_3 - \mathbf{R}_{OP}$, то, согласно выражениям (14), (15), (2), (3), (5), получим:

$$\mathbf{R}_{PK} = -(x \cdot \mathbf{e}_1 + y \cdot \mathbf{e}_2 - d \cdot \mathbf{e}_3) \cdot u_0, \quad (17)$$

$$\dot{\mathbf{R}}_{PK} = -R\dot{\mathbf{e}}_3 + R\dot{\vartheta}\mathbf{e}_1 - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}_{OP}, \quad (18)$$

$$\dot{R} = \frac{ane \cdot \sin \vartheta}{\sqrt{1-e^2}}, \quad R\dot{\vartheta} = \frac{an(1+e \cos \vartheta)}{\sqrt{1-e^2}}.$$

Таким образом, в правой части выражения (12) вектор $\mathbf{R}_{PK}$ определяется равенством (17), $\dot{\mathbf{R}}_{PK}$ – равенством (18), в котором для выражения $\mathbf{R}_{OP}$ используется формула (14), а для $\boldsymbol{\omega}$ – (16). Величины λ , $\dot{\lambda}$ определяются равенствами (9) и (11).

Проекции V_x , V_y вектора $\mathbf{V}_r$ на оси K_1x' , K_1y' найдем, вычислив скалярные произведения $V_x = (\mathbf{V}_r, \mathbf{e}_1)$, $V_y = (\mathbf{V}_r, \mathbf{e}_2)$. В результате получим:

$$V_x = -\frac{an(1+e \cos \vartheta)}{u_0 \sqrt{1-e^2}} - \frac{dn(1+e \cos \vartheta)^2}{(1-e^2)^{3/2}} + \omega \left[y \sin i \sin(g + \vartheta) + d \cdot \cos i + \frac{R \cos i}{u_0} \right] + qx, \quad (19)$$

$$V_y = -\omega \cdot \sin i \cdot \left[x \sin(g + \vartheta) - d \cdot \cos(g + \vartheta) - \frac{R \cos(g + \vartheta)}{u_0} \right] + qy,$$

$$q = -\frac{1}{d} \left[\frac{(1+e \cos \vartheta)^2 nx}{(1-e^2)^{3/2}} - \omega \cdot (x \cos i + y \sin i \cos(g + \vartheta)) - \frac{ane \sin \vartheta}{u_0 \sqrt{1-e^2}} \right]:$$

здесь R , u_0 определяются равенствами (3) и (13), соответственно.

При съемке «в надир» подспутниковой точки в случае круговой орбиты без учета скорости вращения Земли в формуле (19) следует принять $x = 0$, $y = 0$, $e = 0$, $\omega = 0$. Тогда с учетом (2)

$$V_x = \frac{d}{(R-r_0)} \frac{r_0}{R} \sqrt{\frac{\mu}{R}}. \quad (20)$$

Эта формула отличается от похожей формулы, анонсированной в [8], наличием в правой части выражения (20) множителя r_0 / R , учитывающего, в частности, непрерывное

вращение главной оптической оси БОЭА МКА в плоскости орбиты для ее постоянного визирования в центр Земли для съемки в надир.

На рис. 4–7 представлены поля скоростей в фокальной плоскости в прямоугольнике $\Pi = \{(x, y): -60 \leq x \leq 60, -40 \leq y \leq 40\}$ светочувствительных элементов размером 120×80 мм для различных значений истинной аномалии ϑ . Параметры задачи имеют следующие значения:

$$a = r_0 + h_0;$$

$$r_0 = 6,378 \cdot 10^6 \text{ м} - \text{радиус Земли};$$

$$h_0 = 3 \cdot 10^5 \text{ м} - \text{высота полета спутника над поверхностью Земли};$$

$$\mu = 3,985586 \cdot 10^{14} \text{ м}^3 \text{ с}^{-2} - \text{гравитационная постоянная};$$

$$\omega = 7,29211 \cdot 10^{-5} (\text{рад/с}) - \text{средняя угловая скорость вращения Земли};$$

$$e = 0,01 - \text{эксцентриситет};$$

$$i = \pi/3 - \text{наклонение орбиты спутника};$$

$$g = 0 - \text{долгота перигея } \pi \text{ от восходящего узла};$$

$$d = 1,5 \text{ м} - \text{фокусное расстояние}.$$

Для наглядности в каждой узловой точке прямоугольника построен не сам вектор скорости, а разность соответствующего вектора скорости и вектора скорости в центре прямоугольника.

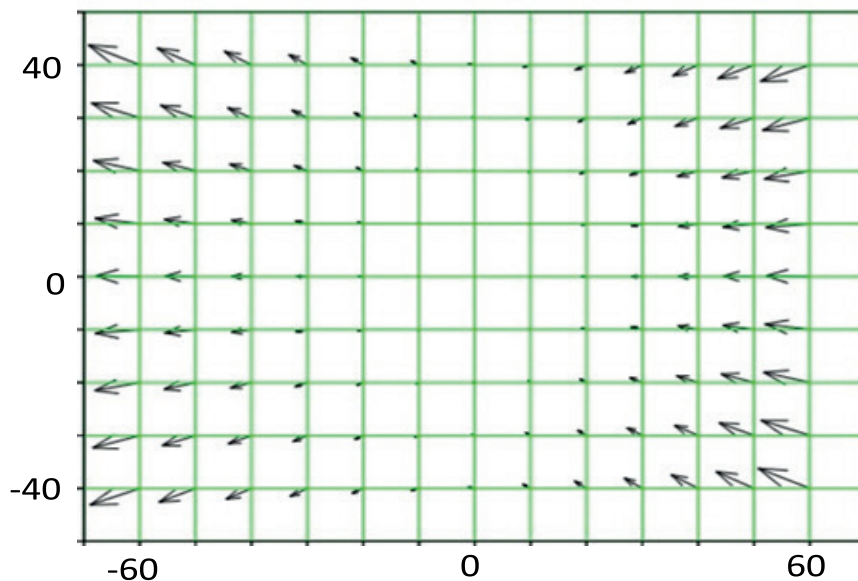


Рис. 4. Поле скоростей при $\vartheta=0$:

$$V_x(0,0) = 46,921 \text{ мм/с}, \quad V_y(0,0) = -2,591 \text{ мм/с},$$

$$V_x(60,-40) - V_x(0,0) = -4,901 \cdot 10^{-3} \text{ мм/с},$$

$$V_y(60,-40) - V_y(0,0) = 2,011 \cdot 10^{-3} \text{ мм/с}$$

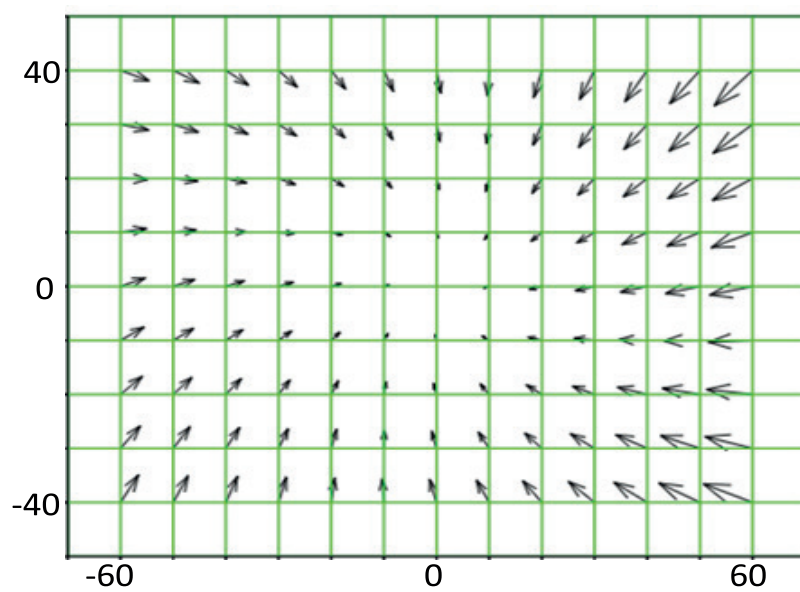


Рис. 5. Поле скоростей при $\vartheta = \pi/2$:

$$\begin{aligned} V_x(0,0) &= 35,814 \text{ мм/с}, \quad V_y(0,0) = 0 \text{ мм/с}, \\ V_x(60,-40) - V_x(0,0) &= -2,273 \cdot 10^{-2} \text{ мм/с}, \\ V_y(60,-40) - V_y(0,0) &= 8,327 \cdot 10^{-3} \text{ мм/с} \end{aligned}$$

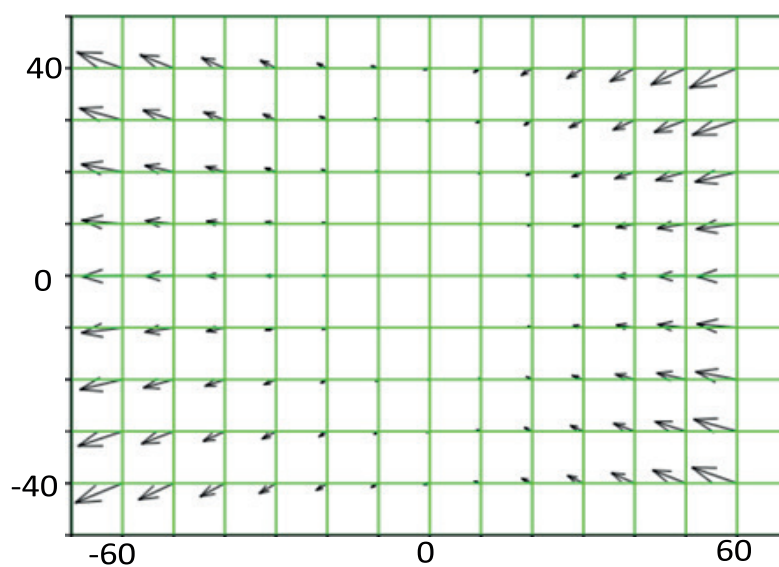
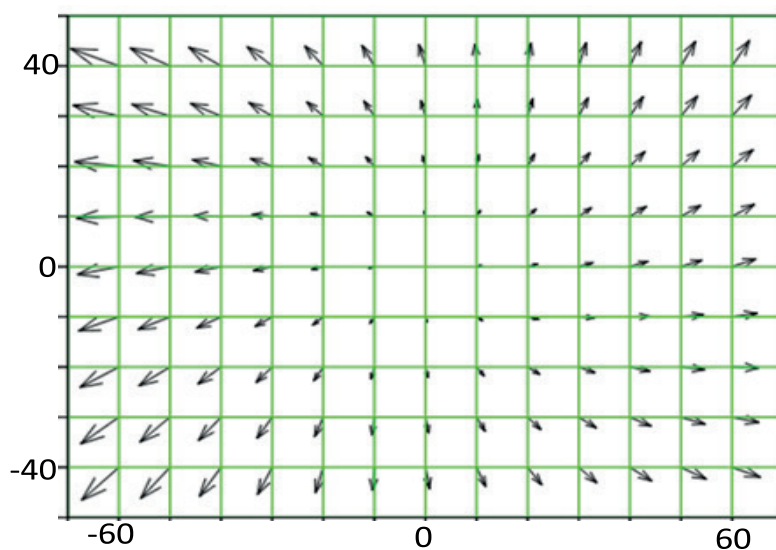


Рис. 6. Поле скоростей при $\vartheta = \pi$:

$$\begin{aligned} V_x(0,0) &= 28,628 \text{ мм/с}, \quad V_y(0,0) = 1,647 \text{ мм/с}, \\ V_x(60,-40) - V_x(0,0) &= -4,545 \cdot 10^{-3} \text{ мм/с}, \\ V_y(60,-40) - V_y(0,0) &= 1,573 \cdot 10^{-3} \text{ мм/с} \end{aligned}$$

Рис. 7. Поле скоростей при $\vartheta = 3\pi / 2$:

$$V_x(0,0) = 35,814 \text{ мм/с}, \quad V_y(0,0) = 0 \text{ мм/с},$$

$$V_x(60,-40) - V_x(0,0) = 1,329 \cdot 10^{-2} \text{ мм/с},$$

$$V_y(60,-40) - V_y(0,0) = -4,742 \cdot 10^{-3} \text{ мм/с}$$

Заключение

В представленной работе с помощью аналитических методов теоретической и небесной механики получены в явном виде формулы для координат вектора скорости движения изображения при дистанционном зондировании Земли с помощью бортовой оптико-электронной аппаратуры. Показана зависимость скорости движения изображения в заданной точке плоскости фиксации изображений от параметров орбиты центра масс спутника (большой полуоси, эксцентриситета, наклона, долготы перигея от восходящего узла, истинной аномалии), фокусного расстояния. Полученные формулы позволяют проследить изменение скорости движения изображения в центре прямоугольника светочувствительных элементов, а также в любой другой точке этого прямоугольника при движении МКА по кеплеровской орбите, построить поле скоростей. Результаты работы могут использоваться на этапе составления задания по дистанционному зондированию Земли, обеспечивая экономию ресурсов орбитальных комплексов.

Литература:

1. Бутырин С.А. Кинематический синтез программного углового движения космического аппарата при оптико-электронной съемке Земли // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2007. Т. 9. № 3. С. 664–670.
2. Бутырин С.А. Программный комплекс для расчета и визуализации маршрутов оптико-электронной съемки Земли // Вестник Самарского государственного технического университета. 2007. Т. 2. С. 11–17.

3. Маштаков Я.В., Ткачев С.С. Построение углового движения спутника ДЗЗ при отслеживании маршрутов на поверхности Земли // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 20. 31 с.
4. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В. Обратные задачи обработки фото-изображений / Некорректные задачи естествознания. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 185–195.
5. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1975. 800 с.
6. Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы. М.: Физматлит, 2010. 588 с.
7. Вильке В.Г. Теоретическая механика: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2016. 311 с.
8. Жиленев М.Ю., Винтаев В.Н. Формула расчета движения изображения при орбитальной съемке планет оптико-электронной аппаратурой // Телекоммуникации (Telecommunications and Radio Engineering). 2011. № 7. С. 2–7.

References:

1. Butyrin S.A. Kinematic synthesis of the software angular motion of the spacecraft in the optoelectronic survey of the Earth // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk (Bulletin of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences). 2007. V. 9. № 3. P. 664–670. (in Russ.)
2. Butyrin S.A. Software complex for calculation and visualization of routes of optical-electronic survey of the Earth // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk (Bulletin of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences). 2007. V. 2. P. 11–17. (in Russ.)
3. Mashtakov Ya.V., Tkachev S.S. Construction of the angular motion of an Earth remote sensing satellite while tracing the routes on the Earth's surface // Preprints of Keldysh Institute of Applied Mathematics RAN. 2014. № 20. 31 p. (in Russ.)
4. Tikhonov A.N., Goncharsky A.V., Stepanov V.V. Inverse problems of image processing / In: Incorrect Tasks of Natural Science. Moscow: MSU Publishing House, 1987. P. 185–195. (in Russ.)
5. Duboshin G.N. Celestial Mechanics. Main tasks and methods. Moscow: Nauka Publ., 1975. 800 p. (in Russ.)
6. Murray C.D., Dermott S.F. Solar System Dynamics. Cambridge University Press, 1999. 606 p.
7. Vilke V.G. Theoretical Mechanics: a textbook and a practical work for academic baccalaureate. Moscow: Yurait Publ., 2016. 311 p. (in Russ.)
8. Zhilenev M.Yu., Vintaev V.N. The formula for calculating the image motion of the planets with orbital shooting optoelectronic equipment // Telecommunications (Telecommunications and Radio Engineering). 2011. № 7. P. 2–7. (in Russ.)

Об авторах:

Геча Владимир Яковлевич, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора, главный конструктор открытого акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна» (ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ») (107078, Россия, Москва, Хоромный тупик, д. 4, стр. 1).

Жиленев Михаил Юрьевич, старший научный сотрудник открытого акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна» (ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ») (107078, Россия, Москва, Хоромный тупик, д. 4, стр. 1).

Федоров Виктор Борисович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Хрычев Дмитрий Аркадьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Худак Юрий Иосифович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Шатина Альбина Викторовна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Vladimir Ya. Gecha, D.Sc. (Eng.), Professor, Deputy General Director, Chief Designer of Open Joint Company «A.G. Iosifian Research and Production Corporation “Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes”» (“VNIEM Corporation” JC) (4/1, Khoromny tupik, Moscow 107078, Russia).

Mikhail Yu. Zhilenev, Senior Researcher of Open Joint Company A.G. Iosifian Research and Production Corporation “Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes” (“VNIEM Corporation” JC) (4/1, Khoromny tupik, Moscow 107078, Russia).

Viktor B. Fyodorov, Ph.D. (Phys.-Math.), Docent, Associate Professor of the Chair of Higher Mathematics, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Dmitry A. Khrychev, Ph.D. (Phys.-Math.), Docent, Associate Professor of the Chair of Higher Mathematics, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Yury I. Khudak, D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Higher Mathematics, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Albina V. Shatina, D.Sc. (Phys.-Math.), Docent, Professor of the Chair of Higher Mathematics, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

УДК 519.816

ВЫБОР РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВАРИАНТОВ СО СЛУЧАЙНЫМИ ВЕСАМИ

**А.А. Пастушков[@],
В.К. Батоврин**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: Al.Pastushkov@mail.ru

В работе предложен новый однопараметрический подход к выбору оптимальных решений при проектировании сложных систем, основанный на анализе дерева вариантов со случайными весами (здесь вес – это некоторая неотрицательная величина: например, стоимость, масса, потребление энергии и т.д.). В его основе лежит утверждение о том, что дерево вариантов образует матроид, на котором оптимальное решение может быть найдено с использованием «жадного» алгоритма. При неотрицательных значениях математического ожидания и дисперсии веса элементов дерева вариантов можно рассматривать как составляющие векторов, принадлежащих полукольцу. Показано, что при соответствующем определении операций сложения и умножения на полукольце можно задать функцию, удовлетворяющую аксиомам нормы и совпадающую по структуре с выражением для верхней границы доверительного интервала. После определения веса элементов дерева через введенную функцию нормы найдена оценка верхней границы доверительного интервала дерева вариантов с минимальным весом. Описанный подход может быть использован на различных этапах проектирования сложных систем, включая, в том числе, разработку профилей систем. Он позволяет повысить обоснованность принимаемых решений.

Ключевые слова: сложная система, оптимизация структуры, «жадный» алгоритм, матроид, кольцо, полукольцо, матричные алгебры над полукольцами.

SELECTION OF SOLUTIONS FOR DESIGNING OPEN SYSTEMS BASED ON ANALYSIS OF VARIANTS WITH RANDOM WEIGHTS

**A. A. Pastushkov[@],
V.K. Batovrin**

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author e-mail: Al.Pastushkov@mail.ru

A new one-parameter approach to the selection of optimal solutions for the design of complex systems is proposed. The approach is based on the analysis of a tree of variants with random weights (here weight is a certain non-negative quantity: for example, cost, mass, energy consumption, etc.). At the root of the method suggested in the work lies the fact that the tree of variants forms a matroid, on which the optimal solution can be found using the "greedy" algorithm. The basis of the method proposed in the paper is the fact that in case of non-negative values of the mathematical expectation and variance of the elements of the variants tree they can be considered as components of vectors belonging to a semiring. It is shown that the appropriate definition of the operations of addition and multiplication makes it possible to define a function on the semiring. This function satisfies the norm axioms of vectors and coincides in structure with the expression for the upper bound of the confidence interval. After determining the weight of the tree elements through the introduced norm function the upper bound of the confidence interval of the variant tree with the minimum weight was found. The approach suggested in the work can be used at various stages of designing complex systems, including, among other things, the development of system profiles, and makes it possible to increase the validity of the decisions made.

Keywords: complex system, structure optimization, "greedy" algorithm, matroid, ring, semiring, matrix algebras over semirings.

Введение

При проектировании сложных систем, как правило, возникает необходимость выбора варианта системы, обладающей той или иной оптимальной характеристикой. Поскольку современные системы состоят из большого числа элементов, при этом каждый из элементов, как правило, имеет множественное исполнение, то выбор оптимального варианта системы в общем случае сводится к переборной или NP-полной задаче. Известно, что данные задачи не могут быть решены за приемлемый отрезок времени, что делает актуальным разработку методов, имеющих полиномиальную сложность и, следовательно, конечное время решения оптимизационной задачи.

Наиболее эффективный подход к оптимизации сложной системы, по нашему мнению, заключается в представлении системы в виде некоторой иерархии с последующей оптимизацией уже иерархической структуры. В ряде случаев подобные иерархические структуры являются объектами стандартизации: например, применительно к разработке любого воздушного, морского и наземного транспорта или оборудования действуют общепризнанные рекомендации ASD1000 [1]. В других случаях иерархическую структуру создаваемой системы определяют в рамках процесса описания архитектуры, как это предусмотрено стандартом ISO/IEC/IEEE 42010 [2].

Вопросам, связанным с оптимизацией на иерархических структурах и сетях, посвящен обширный круг работ [3–7] (см. также библиографию, приведенную в этих работах). Они в основном связаны с созданием теории управления организационными системами или с управлением в сетях. В частности, рассмотрены практические применения разработанной теории к задаче управления технологическим процессом, обсуждается задача о распределении ограниченных ресурсов в системе с устойчивой иерархией. Методы оптимизации на иерархиях практически не применяются для оптимизации технических систем. Хотя в [7] и описаны иерархические и сетевые структуры, но процесс оптимизации на них рассматривается, как NP-полная задача. При таком подходе для реальных систем

задача оптимизации невыполнима. Известен приближенный метод, предназначенный для решения NP-полных задач дискретного программирования с булевыми переменными [8]. Однако в основном для оптимизации технических систем используют методы математического программирования [9, 10], и, как следствие, процесс поиска системы с оптимальными характеристиками весьма сложен, а в большинстве случаев является приближенным.

Цель настоящей работы – решение однопараметрической задачи поиска иерархической структуры с оптимальным весом применительно к технической системе.

Допустим, что система может быть представлена в виде объединения n блоков. При этом каждый блок имеет m альтернативных вариантов исполнения (первый уровень декомпозиции). Пусть каждый блок первого уровня декомпозиции имеет также несколько альтернативных вариантов, образуя второй уровень декомпозиции и т.д., пока подобное разбиение блоков возможно. В результате такой декомпозиции будет получена некоторая иерархическая структура.

Наиболее часто в качестве метода анализа иерархических структур (МАИ) используется метод, разработанный Т. Саати [12], который применим при наличии одного или нескольких критериев оптимизации [13] и который можно обобщить на случай стохастических и интервальных экспертных оценок. Строгое обоснование МАИ впервые дано В.Д. Ногиным [13, 14]. Однако указанные в этих работах условия корректности МАИ будут выполняться далеко не для всех практически важных задач. Следует также отметить, что обычно оптимальная иерархическая структура определяется с использованием «жадного» алгоритма, когда единственно оптимальное решение выбирается локально в каждом узле. Такие алгоритмы в общем случае не могут обеспечить оптимальность всего дерева в целом [14, 15].

Другим примером, близким к методу анализа иерархических структур, является метод стохастического сетевого планирования [16], но в этом случае приходится искать не системы, обладающие той или иной оптимальной характеристикой, а последовательность узлов, имеющих оптимальную характеристику. Сродни предлагаемому в настоящей работе методу является метод доверительной оценки трудоемкости алгоритмов [17, 18].

Рассмотрим алгоритм построения оптимальной иерархической структуры с минимальным весом для случаев узлов с детерминированными и случайными весами.

Выбор решений при проектировании сложных систем на основе анализа вариантов со случайными весами

Рассмотрим полученную путем последовательной декомпозиции блоков объекта иерархическую структуру. Каждому блоку припишем некоторую неотрицательную величину $\omega_{\text{вес}}$, а каждому элементу, соединяющему блоки A_i , A_j , вес c_{ij} . Тогда изделие с минимальным весом можно собрать, с учетом весов соединяющих элементов, выбирая на смежных уровнях декомпозиции блоки с минимальным суммарным весом.

Рассмотрим случай, когда веса блоков и межблочных соединений являются детерминированными величинами. Предположим, что каждый блок $a_{i,j}^k$, где i – номер группы, j – номер блока в группе, k – номер уровня декомпозиции, может быть реализован в m^1 вариантах. Дан вес для каждого варианта блока $\omega_{i,j}^k$ и каждого элемента соединения блоков $c_{i,j}^k$.

¹В данном случае m – это максимальное число вариантов; если для некоторого блока число вариантов меньше m , то вес данного варианта в зависимости от контекста задачи будет принимать значение либо 0, либо ∞ ; так, при поиске объекта с минимальным весом, вес отсутствующего варианта блока принимается равным ∞ .

Обратимся к порядку образования веса объекта при последовательной схеме соединения блоков, представленной на рис. 1.

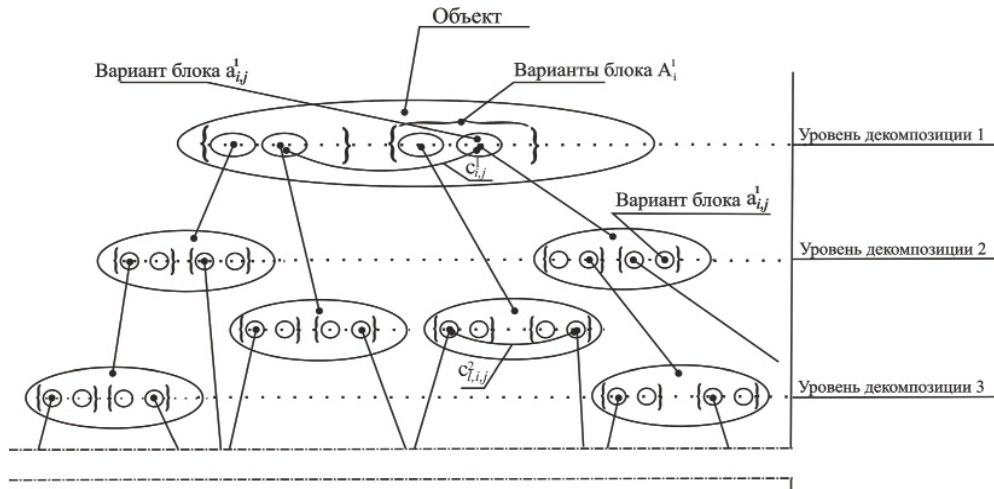


Рис. 1. Дерево вариантов для схемы соединения блоков объекта $a_{i,j}^k$, где i – номер блока; j – номер варианта блока; k – номер уровня декомпозиции; $c_{i,j}^k$ – вес соединения блоков i и j на уровне декомпозиции k .

Рассмотрим теперь алгоритм выбора оптимального набора блоков, комплектующих изделие с минимальным весом.

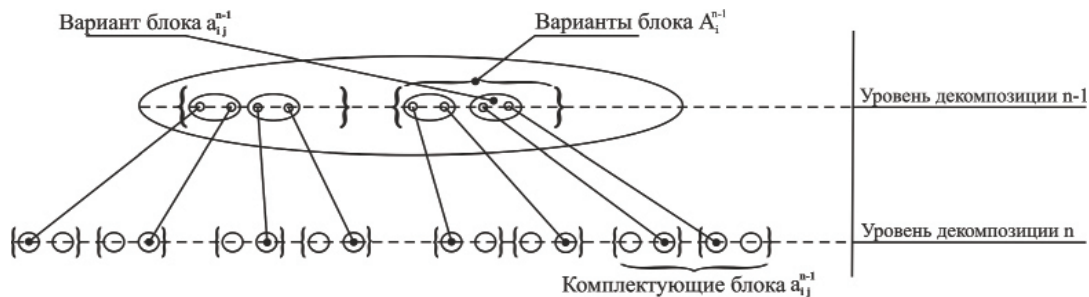


Рис. 2. Схема выбора оптимального набора блоков.

Рассмотрим следующий «жадный» алгоритм. В каждой из групп вариантов, находящихся на нижнем уровне декомпозиции n , выберем комплектующие объекты с минимальным весом. Сложим этот вес с весами соединительных элементов соответствующих блоков в предыдущих группах $n-1$ уровня и найдем в каждой из групп вариантов блок с минимальным суммарным весом. Затем продelaем те же операции на уровнях детализации $n-1$, $n-2$ и т.д. до первого уровня. В результате получим дерево от корня до листьев, вес которого будет минимальным (рис. 3).

Отметим, что множество всех вариантов является ациклическим графом, состоящим из множества непересекающихся деревьев. Обоснование рассмотренного выше алгоритма следует из теоремы, приведенной в [19].

Теорема. Пусть J – некоторый набор подмножества конечного множества E . (E, J) является матроидом тогда и только тогда, когда J удовлетворяет следующим условиям:

- 1) $\emptyset \in J$;

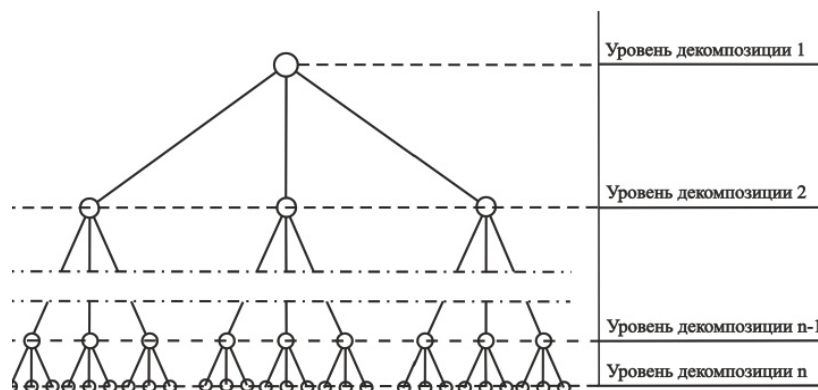


Рис. 3. Дерево вариантов.

2) если $I \in J, R \subset I$, то $R \in J$;

3) для произвольной положительной весовой функции «жадный» алгоритм строит множество максимального веса на J .

Покажем, что полученный результат удовлетворяет последней теореме:

1) Пустое множество является ациклическим, следовательно, содержится в J . Первое условие выполняется.

2) Любое подмножество ациклического графа является ациклическим. Второе условие теоремы также выполняется.

3) Третье условие теоремы выполняется в соответствии с алгоритмом построения дерева вариантов с минимальным весом.

Обратимся теперь к случаю, когда вес некоторых или всех узлов дерева есть величина случайная. Положим, что веса каждого узла распределены по нормальному закону² и представляют собой случайные независимые величины, тогда вес каждого i -го узла можно охарактеризовать двумя параметрами: m_i – математическим ожиданием и σ_i – средним квадратическим отклонением³.

В качестве весовой функции i -го узла возьмем функцию

$$\omega_i = m_i + t_P \sqrt{\sigma_i^2}$$

Тогда в качестве оценки верхней границы для минимального суммарного веса дерева с заданной вероятностью P_{dov} можем взять верхнюю границу доверительного интервала

$$G_{\theta} \leq \sum_i m_i + t_P \sqrt{\sum_i \sigma_i^2},$$

где суммирование ведется по всем выбранным блокам;

t_P – граница доверительного интервала, определяемая из выражения [20]

$$P_{dov} = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_P} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt.$$

²На самом деле достаточно потребовать, чтобы выполнялись условия для применения центральной предельной теоремы.

³Если вес некоторого узла – величина неслучайная, то для него σ_i считается равным нулю.

Если допустить, что $P_{dov} > 0.69$, тогда $t_p > 1$.

Алгоритм построения дерева с минимальным случайным весом

Алгоритм можно построить так же, как и для случая дерева с узлами, имеющими детерминированный вес. Однако здесь на каждом уровне k при сравнении весов узлов в качестве суммарного веса с учетом веса узлов соединения будем брать величину

$$\sum_j m_{\min,j}^k + t_p \sqrt{\sum_j (\sigma_{\min,j}^k)^2},$$

где $m_{\min,j}^k, \sigma_{\min,j}^k$ определяются из условия:

$$m_{\min,j}^k + t_p \sigma_{\min,j}^k = \min_i (m_{i,j}^k + t_p \sigma_{i,j}^k).$$

Тогда для максимального значения верхней границы доверительного интервала суммы весов на уровне k будет справедлива следующая оценка:

$$G_{\theta}^k \leq \sum_j m_{\min,j}^k + t_p \sqrt{\sum_j (\sigma_{\min,j}^k)^2}.$$

Докажем правомерность этого алгоритма.

Пусть задано полукольцо R_+ неотрицательных действительных чисел, тогда множество $S(a, +, *, 0, 1)$ упорядоченных пар неотрицательных действительных чисел является полукольцом [21–23]. Рассмотрим на S операцию прямого сложения [24] с действиями:

$$a_i + a_j = (a_{1,i} + a_{1,j}, a_{2,i} + a_{2,j}),$$

$$a_i \cdot a_j = (a_{1,i} \cdot a_{1,j}, a_{2,i} \cdot a_{2,j}).$$

Зададим на множестве S функцию:

$$\omega(a_i) = a_{1,i} + t \sqrt{a_{2,i}}, \quad t > 1,$$

тогда функция ω от суммы и произведения будет равна

$$\omega(a_i + a_j) = a_{1,i} + a_{1,j} + t \sqrt{a_{2,i} + a_{2,j}},$$

$$\omega(a_i \cdot a_j) = a_{1,i} a_{1,j} + t \sqrt{a_{2,i} a_{2,j}}$$

Покажем, что функция ω на S , при $t \geq 1$, удовлетворяет всем аксиомам нормы. Действительно:

$$1) \|a_i\| \geq 0,$$

$$\|a_i\| = a_{1,i} + t a_{2,i} \geq 0, \text{ т.к. } a_{1,i}, a_{2,i}, t \geq 1;$$

$$2) \|\lambda a_i\| = |\lambda| \|a_i\|,$$

$$\|\lambda \mathbf{a}_i\| = \|\lambda a_{1,i}, \lambda a_{2,i}\| = \|\lambda(a_{1,i}, a_{2,i})\| = |\lambda| \|(a_{1,i}, a_{2,i})\| = |\lambda| (a_{1,i} + t\sqrt{a_{2,i}}),$$

$$3) \quad \|\mathbf{a}_i + \mathbf{a}_j\| \leq \|\mathbf{a}_i\| + \|\mathbf{a}_j\|,$$

$$\|\mathbf{a}_i + \mathbf{a}_j\| = a_{1,i} + a_{1,j} + t\sqrt{a_{2,i} + a_{2,j}},$$

$$\|\mathbf{a}_i\| + \|\mathbf{a}_j\| = a_{1,i} + t\sqrt{a_{2,i}} + a_{1,j} + t\sqrt{a_{2,j}} = (a_{1,i} + a_{1,j}) + t(\sqrt{a_{2,i}} + \sqrt{a_{2,j}}),$$

так как $\sqrt{a_{2,i} + a_{2,j}} \leq (\sqrt{a_{2,i}} + \sqrt{a_{2,j}})$, то $\|\mathbf{a}_i + \mathbf{a}_j\| \leq \|\mathbf{a}_i\| + \|\mathbf{a}_j\|$;

$$4) \quad \|\mathbf{a}_i \mathbf{a}_j\| \leq \|\mathbf{a}_i\| \cdot \|\mathbf{a}_j\|,$$

$$\|\mathbf{a}_i \mathbf{a}_j\| = a_{1,i}a_{1,j} + t\sqrt{a_{2,i}a_{2,j}},$$

$$\begin{aligned} \|\mathbf{a}_i\| \cdot \|\mathbf{a}_j\| &= (a_{1,i} + t\sqrt{a_{2,i}}) \cdot (a_{1,j} + t\sqrt{a_{2,j}}) = a_{1,i}a_{1,j} + t\sqrt{a_{2,i}a_{1,j}} + t\sqrt{a_{2,j}a_{1,i}} + \\ &+ t^2\sqrt{a_{2,i}a_{2,j}}, \end{aligned}$$

откуда при $t > 1$ следует, что

$$\|\mathbf{a}_i \mathbf{a}_j\| \leq \|\mathbf{a}_i\| \cdot \|\mathbf{a}_j\|.$$

Поставим в соответствие прямой сумме элементов полукольца весовую функцию ω , совпадающую с его нормой, то есть

$$\omega(\mathbf{a}_i + \mathbf{a}_j) = \|\mathbf{a}_i + \mathbf{a}_j\| = a_{1,i} + a_{1,j} + t\sqrt{a_{2,i} + a_{2,j}}$$

или в общем случае

$$\omega\left(\sum_{k=1}^n \mathbf{a}_k\right) = \sum_{k=1}^n a_{k,1} + t\sqrt{\sum_{k=1}^n a_{k,2}}.$$

Положив в последнем выражении $a_{1,j} = m_{\min,j}^k$, $a_{2,j} = (\sigma_{\min,j}^k)^2$ и $t = t_p \geq 1$, получим с заданной вероятностью P_{dov} оценку верхней границы для минимального суммарного веса дерева:

$$G_{\theta} \leq \sum_{j,k} m_{\min,j}^k + t_p \sqrt{\sum_{j,k} (\sigma_{\min,j}^k)^2},$$

где суммирование выполняется сначала по индексу j , а затем по индексу k .

Построенный таким образом алгоритм является оптимальным: действительно, поскольку множество всех вариантов деревьев иерархий является матроидом (следствие

теоремы [19]), а алгоритм поиска дерева с минимальным весом является «жадным», то в соответствии с теоремой Радо-Эдмондса [25] алгоритм построения дерева с минимальным весом будет оптимальным.

Оценим сложность предложенного алгоритма. Предположим (для простоты), что система может быть представлена в виде объединения m блоков. При этом каждый блок имеет m альтернативных вариантов исполнения (первый уровень декомпозиции). Каждый блок первого уровня декомпозиции имеет также m альтернативных вариантов исполнения и т.д. Вес соединения блоков примем равным нулю.

Алгоритм нахождения дерева с минимальным весом состоит из двух операций:

- нахождение блока с минимальным весом;
- суммирование блоков с минимальными весами.

Оценка сложности операции нахождения блока с минимальным весом в каждой группе из m альтернативных блоков имеет вид:

$$S_{\min} \leq m^2.$$

Число групп блоков на уровне декомпозиции k , при высказанных предположениях, равно $n_k = m^{k-1}$. Тогда оценка сложности операции нахождения минимальных блоков на уровне k имеет вид:

$$S_{\min}^k \leq m^2 m^{k-1},$$

и оценка сложности операции нахождения блоков с минимальным весом по всем n уровням выглядит, как

$$S_{\min}^{\Sigma} \leq m^2 \sum_{i=1}^n m^{i-1} = m^2 \frac{m^n - 1}{m - 1}.$$

При выполнении условия $m \gg 1$ получим

$$S_{\min}^{\Sigma} \leq m^2 m^{n-1} = m^{n+1}.$$

Указанную величину можно взять в качестве оценки сложности алгоритма. Сложность алгоритма является полиномиальной, и, следовательно, задача нахождения системы с минимальным весом решается за конечное время.

Заключение

Предложенный в работе алгоритм позволяет произвести оптимизацию изделия по одному параметру – весу объекта (массе, энергопотреблению, стоимости и т.д.). В связи с этим при отборе вариантов необходимо задавать допустимые пределы изменения неоптимизируемых параметров. Следует отметить, что определение допусков для отдельных блоков в общем случае – задача нетривиальная, но в первом приближении ее можно решить, исходя из опыта, накопленного при производстве предыдущих вариантов изде-

лия. Важно иметь в виду, что на практике возможно получение нескольких объектов с одинаковым (почти одинаковым) минимальным весом. Тогда при выборе единственного объекта следует сравнивать между собой другие неоптимизируемые параметры объекта.

Литература:

1. S1000D-B6865-01000-00 International specification for technical publications using a common source database. 2016. Iss. 4.2. Режим доступа: <http://public.s1000d.org/Downloads/Pages/S1000DDownloads.aspx>, свободный.
2. ISO/IEC/IEEE 42010:2011 Systems and software engineering. Architecture description. Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/50508.html>, свободный.
3. Губко М.В. Математические модели оптимизации иерархических структур. М.: Ленанд, 2008. 360 с.
4. Губанов Д.А., Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Социальные сети: Модели информационного влияния, управления и противоборства. М.: Физматлит, 2010. 228 с.
5. Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Губко М.В. Introduction to theory of control in organizations. Boca Raton, USA: CRC Press, 2015. 346 с.
6. Новиков Д.А. Комплексные модели системной оптимизации производственно-экономической деятельности предприятия // Управление большими системами. 2017. Вып. 65. С. 118–152.
7. Кузнецов А.В. Распределение ограниченных ресурсов в системе с устойчивой иерархией (на примере перспективной системы военной связи) // Управление большими системами. 2017. Вып. 66. С. 68–93.
8. Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем. СПб.: НИЦ «Моринтех», 2001. 432 с.
9. Мезенцев Ю.А. Практические аспекты реализации эффективного алгоритма решения задач оптимальной комплектации // Доклады АН ВШ РФ. 2013. № 1(20). С. 26–34.
10. Островский Г.М., Волин Ю.М. Технические системы в условиях неопределенности. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 319 с.
11. Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомоллов А.С., Филимонюк Л.Ю. Модели и алгоритмы управления процессом сварки роботизированными технологическими комплексами по критерию качества производимой продукции // Управление большими системами. 2018. Вып. 71. С. 98–122.
12. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
13. Ногин В.Д. Логическое обоснование принципа Эджворта-Парето // Журн. вычисл. математ. и математ. физики. 2002. Т. 42. № 7. С. 950–956.
14. Ногин В.Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев // Журн. вычисл. математ. и математ. физики. 2004. Т. 44. № 7. С. 1259–1268.
15. Подинковский В.В., Подинковская О.В. О некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. 2011. № 1. С. 8–13.
16. Голенко-Гинзбург Д.И. Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками. Воронеж: Научная книга, 2010. 284 с.
17. Петрушин В.Н., Ульянов М.В. Информационная чувствительность компьютерных алгоритмов. М.: Физматлит, 2010. 224 с.

18. Ульянов М.В., Петрушин В.Н., Кривенцов А.С. Доверительная трудоемкость – новая оценка качества алгоритмов // Информ. технологии и вычислит. системы. 2009. № 2. С. 23–37.
19. Oxley J.G. Matroid Theory. Oxford University Press, 1993. 532 p.
20. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1979. 496 с.
21. Шитов Я.Н. О совпадении факторизационного ранга и ранга Гондрана–Мину матриц над полукольцом // Фундамент. и прикл. математика. 2011/2012. Т. 17. № 6. С. 223–232.
22. Шматков В.Д. Изоморфизмы и автоморфизмы матричных алгебр над полукольцами // Фундамент. и прикл. математика. 2014. Т. 19. Вып. 6. С. 251–260.
23. Гутерман А.Э., Крейнс Е.М. Монотонные линейные отображения матриц над полукольцами // Фундамент. и прикл. математика. 2016. Т. 21. № 1. С. 105–122.
24. Шафаревич И.Р. Основные понятия алгебры. Ижевск: Ижевская республиканская типография, 1999. 348 с.
25. Липский В. Комбинаторика для программиста. М.: Мир, 1988. 200 с.

References:

1. S1000D-B6865-01000-00 International specification for technical publications using a common source database. 2016. Iss. 4.2. Access mode: <http://public.s1000d.org/Downloads/Pages/S1000DDownloads.aspx>
2. SO/IEC/IEEE 42010:2011 Systems and software engineering. Architecture description. Access mode: <https://www.iso.org/standard/50508.html>
3. Gubko M.V. Mathematical models of optimization of hierarchical structures. Moscow: Lenand Publ., 2008. 360 p. (in Russ.)
4. Gubanov D.A., Novikov D.A., Chkhartishvili A.G. Social networks: Models of information influence, governance and confrontation. Moscow: Fizmatlit, 2010. 228 p. (in Russ.)
5. Burkov V.N., Korgin N.A., Novikov D.A., Gubko M.V. Introduction to the theory of control in organizations. Boca Raton, USA: CRC Press, 2015. 346 p.
6. Novikov D.A. Complex models of system optimization of industrial and economic activity of the enterprise // Upravleniye bol'shimi sistemami (Management of Large Systems). 2017. Iss. 65. P. 118–152. (in Russ.)
7. Kuznetsov A.V. Distribution of limited resources in a system with a stable hierarchy (on the example of a prospective military communications system) // Upravleniye bol'shimi sistemami (Management of Large Systems). 2017. Iss. 66. P. 68–93. (in Russ.)
8. Gaykovich A.I. Fundamentals of the theory of designing complex technical systems. Saint-Petersburg: SRC "Morintekh", 2001. 432 p. (in Russ.)
9. Mezentsev Yu.A. Practical aspects of implementing an effective algorithm for solving optimal configuration problems // Reports of the Academy of Sciences of Higher School of the Russian Federation. 2013. № 1(20). P. 26–34. (in Russ.)
10. Ostrovsky G.M., Volin Yu.M. Technical systems under conditions of uncertainty. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2008. 319 p. (in Russ.)
11. Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., Ivaschenko V.A., Fominykh D.S., Bogomolov A.S., Filimonuk L.Yu. Models and algorithms for controlling the welding process by robotic technological complexes by the criterion of the quality of the products produced // Upravleniye bol'shimi sistemami (Management of Large Systems). 2018. Iss. 71. P. 98–122. (in Russ.)

12. Saati T., Kerns K. Analytical Planning. Organization of systems. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 1991. 224 p. (in Russ.)
13. Nogin V.D. A logical substantiation of the Edgeworth-Pareto principle // Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki (Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics). 2002. V. 42. № 7. P. 950–956. (in Russ.)
14. Nogin V.D. A simplified version of the method of analyzing hierarchies based on a non-linear convolution of the criteria // Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki (Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics). 2004. V. 44. № 7. P. 1259–1268. (in Russ.)
15. Podinkovsky V.V., Podinkovskaya O.V. On the incorrectness of the method of analyzing hierarchies // Problemy upravleniya (Problems of Management). 2011. № 1. P. 8–13. (in Russ.)
16. Golenko-Ginzburg, D.I. Stochastic network models of planning and development management. Voronezh: Nauchnaya kniga Publ., 2010. 284 p. (in Russ.)
17. Petrushin V.N., Ulyanov M.V. Information sensitivity of computer algorithms. Moscow: Fizmatlit Publ., 2010. 224 p. (in Russ.)
28. Ulyanov M.V., Petrushin V.N., Kriventsov A.S. Confidence-based laboriousness – a new assessment of the quality of algorithms // Inform. tekhnologii i vychislit. sistemy (Information Technology and Computing Systems). 2009. № 2. P. 23–37. (in Russ.)
19. Oxley J.G. Matroid Theory. Oxford University Press, 1993. 532 p.
20. Pugachev V.S. Theory of Probability and Mathematical Statistics. Moscow: Nauka Publ., 1979. 496 p. (in Russ.)
21. Shitov Ya.N. On the coincidence of the factorization rank and the Gondran-Mina rank of matrices over a semiring // Fundamental'naya i prikladnaya matematika (Fundamental and Applied Mathematics). 2011/2012. V. 17. № 6. P. 223–232. (in Russ.)
22. Shmatkov V.D. Isomorphisms and automorphisms of matrix algebras over semirings // Fundamental'naya i prikladnaya matematika (Fundamental and Applied Mathematics). 2014. V. 19. № 6. P. 251–260. (in Russ.)
23. Guterman A.E., Kreines E.M. Monotone linear maps of matrices over semirings // Fundamental'naya i prikladnaya matematika (Fundamental and Applied Mathematics). 2016. V. 21. № 1. P. 105–122. (in Russ.)
24. Shafarevich I.R. Basic concepts of algebra. Izhevsk: Izhevsk Republican Printing House, 1999. 348 p. (in Russ.)
25. Lipsky V. Combinatorics for the programmer. Moscow: Mir Publ., 1988. 200 p. (in Russ.)

Об авторах:

Пастушков Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского д. 78).

Батоврин Виктор Константинович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского д. 78).

About the authors:

Alexander A. Pastushkov, Ph.D. (Eng.), Docent, Associate Professor of the Chair of Information Systems, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Viktor K. Batovrin, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of the Chair of Information Systems, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

УДК 531.391

ЭВОЛЮЦИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СПУТНИКА С ГИБКИМИ ВЯЗКОУПРУГИМИ СТЕРЖНЯМИ НА ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ОРБИТЕ

**Е.В. Садовникова,
А.В. Шатина[@]**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: shatina_av@mail.ru

В настоящей работе исследуется вращательное движение искусственного спутника в центральном ньютоновском поле сил. Спутник моделируется симметричным твердым телом с жестко прикрепленными по оси симметрии гибкими вязкоупругими стержнями и со сферическим тензором инерции. Рассмотрена ограниченная постановка задачи, когда центр масс спутника движется по заданной кеплеровской эллиптической орбите. Она является модельной для изучения вращательного движения искусственных спутников Земли со штыревыми радиоантеннами длиной в сотни метров. Для решения поставленной задачи используется метод разделения движений и усреднения для механических систем с бесконечным числом степеней свободы. Получена усредненная система дифференциальных уравнений в переменных Андуайе, описывающая эволюцию вращательного движения спутника. Найдены частные решения эволюционной системы уравнений. Построены фазовые портреты для каждого такого класса решений. Показано, что в процессе диссипативной эволюции, вызванной рассеянием энергии в стержнях, угол между вектором кинетического момента вращательного движения спутника и нормалью к плоскости орбиты уменьшается до нуля. Также обнаружены новые классы стационарных движений, когда ось симметрии спутника составляет произвольный угол с нормалью к плоскости орбиты, или модуль угловой скорости вращения спутника не зависит от орбитальной угловой скорости радиус-вектора его центра масс.

Ключевые слова: спутник, кеплеровская эллиптическая орбита, переменные Андуайе, метод усреднения, диссипативная эволюция движения.

EVOLUTION OF THE ROTATIONAL MOTION OF A SATELLITE WITH FLEXIBLE VISCOELASTIC RODS ON THE ELLIPTIC ORBIT

**E.V. Sadovnikova,
A.V. Shatina[@]**

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author e-mail: shatina_av@mail.ru

The rotational motion of an artificial satellite in the central Newtonian force field is investigated. The satellite is modeled as a symmetric solid with rigid viscoelastic rods rigidly attached along the symmetry axis and with a spherical inertia tensor. A limited statement of the problem is considered: the center of mass of the satellite moves along a given Keplerian elliptic orbit. As is known, some artificial Earth satellites (AES) have whip radio antennas for a length of hundreds of meters. The problem considered in this paper is a model for studying the rotational motion of this type of satellites.

To solve this problem, the method of separation of motions and averaging is used for mechanical systems with an infinite number of degrees of freedom. We obtain an averaged system of differential equations in the Andoyer variables, which describes the evolution of the satellite's rotational motion. Partial solutions of the evolutionary system of the equations are found. For each such class of solutions phase portraits are built. It is shown that in the process of dissipative evolution caused by energy dissipation in rods, the angle between the vector of the angular momentum of the satellite's rotational motion and the normal to the orbital plane decreases to zero. Besides, new classes of stationary motions are found: the axis of symmetry of the satellite makes an arbitrary angle with the normal to the orbit plane, or the module of the angular velocity of the satellite rotation does not depend on the orbital angular velocity of the radius vector of its center of mass.

Keywords: satellite, Kepler elliptic orbit, Andoyer variables, averaging method, dissipative evolution of motion.

Целью работы является исследование вращательного движения спутника с жестко прикрепленными по оси симметрии гибкими вязкоупругими стержнями и со сферическим тензором инерции в центральном ньютоновском поле сил на эллиптической орбите. Использован асимптотический метод разделения движений и усреднения для механических систем с бесконечным числом степеней свободы [1]. Ранее указанным методом решали задачу о поступательно-вращательном движении такого спутника в центральном ньютоновском поле сил [2] и изучали вращательное движение динамически симметричного спутника с вязкоупругими стержнями на круговой орбите [3].

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью анализа вращательного движения планет, спутников, космических объектов относительно центра масс, без чего невозможно решение ряда геофизических и динамических задач, связанных с освоением космического пространства. С целью описания вращательного движения используются канонические переменные Андуайе, которые являются переменными «действие–угол» в соответствующей невозмущенной задаче, когда деформации в вязкоупругих стержнях отсутствуют.

1. Постановка задачи. Уравнения движения

Рассмотрим модель спутника, представляющего собой симметричное твердое тело, вдоль оси симметрии которого расположены два гибких вязкоупругих стержня, который движется в центральном ньютоновском гравитационном поле на эллиптической орбите. Введем инерциальную систему координат $OXYZ$ с началом в притягивающем центре, совпадающем с одним из фокусов эллипса. Для описания вращательного движения спутника введем подвижную систему координат $Sx_1x_2x_3$, жестко связанную со спутником (рис.1). Точка S – центр масс спутника при отсутствии деформации стержней, когда стержни

прямолинейны и расположены вдоль оси Cx_3 . При отсутствии деформации в стержнях главные центральные моменты инерции спутника относительно осей Cx_1, Cx_2, Cx_3 равны между собой. Система координат $C\xi_1\xi_2\xi_3$ на рис. 1 – это система осей Кёнига с осями, параллельными соответствующим осям неподвижной системы координат $OXYZ$.

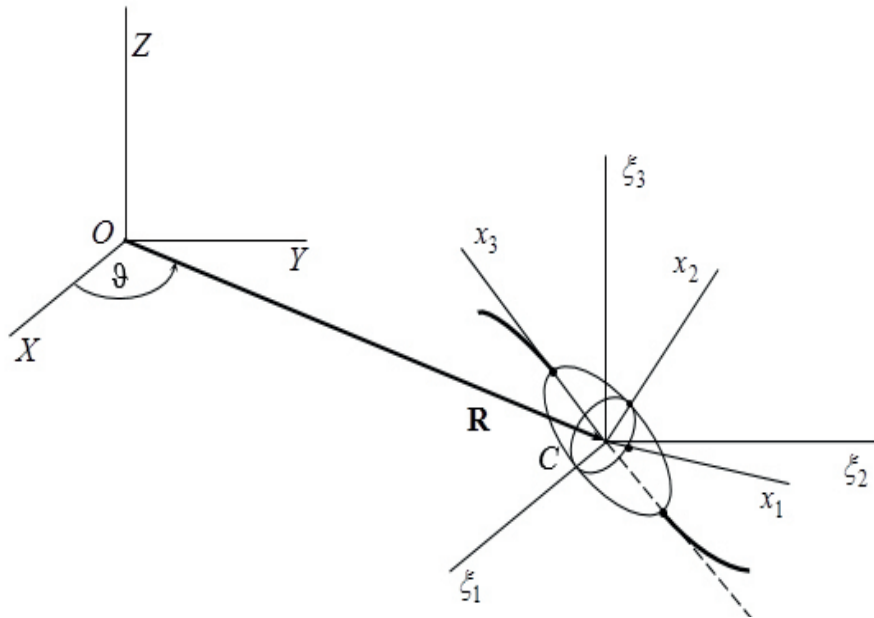


Рис. 1. Системы координат

Радиус-вектор точки стержня в системе координат $Cx_1x_2x_3$, согласно линейной теории изгиба тонких нерастяжимых стержней, имеет вид:

$$\mathbf{r} + \mathbf{u}, \mathbf{u} = u_1(s, t)\mathbf{e}_1 + u_2(s, t)\mathbf{e}_2,$$

$$\mathbf{r} = s\mathbf{e}_3, s \in K = [-b-d \leq s \leq -b] \cup [b \leq s \leq b+d],$$

где $u_i(s, t) (i=1,2)$ – отклонение сечения стержня с координатой s при изгибе, $\mathbf{e}_i$ – единичный вектор по оси $Cx_i (i=1,2,3)$, b и d – постоянные.

Пусть $\mathbf{R}$ – радиус-вектор точки C , а V – область в евклидовом пространстве E^3 , занимаемая твердым телом и двумя недеформированными стержнями. Координаты вектора $\mathbf{R}$ в системе координат $OXYZ$ имеют вид:

$$\mathbf{R} = (R \cos \vartheta, R \sin \vartheta, 0),$$

$$R = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos \vartheta}, \dot{\vartheta} = \frac{(1+e \cos \vartheta)^2 n}{(1-e^2)^{3/2}}, n = \sqrt{\frac{\gamma}{a^3}}, l = n(t-t_0), \quad (1)$$

где ϑ – истинная аномалия, a – большая полуось орбиты точки C , e – эксцентриситет, n – среднее движение центра масс C по орбите, l – средняя аномалия, $\gamma = GM_0$, G – универсальная гравитационная постоянная, M_0 – масса притягивающего центра, t – текущий

момент времени, t_0 – начальный момент времени. Величины a , e , n являются постоянными, а истинная аномалия ϑ и средняя аномалия – функциями времени. Точкой сверху в (1) обозначена производная по времени.

Радиус-вектор точки M спутника в системе координат $OXYZ$ имеет вид:

$$\mathbf{R}_M = \mathbf{R} + \Gamma(\mathbf{r} + \mathbf{u}),$$

где $\mathbf{r} \in V$, $\mathbf{u} \equiv 0$ для точек твердого тела, а Γ – оператор перехода от системы координат $Cx_1x_2x_3$ к системе осей Кёнига $C\xi_1\xi_2\xi_3$.

Скорость точки M спутника определяется равенством

$$\mathbf{v}_M = \dot{\mathbf{R}}_M = \dot{\mathbf{R}} + \Gamma[\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{r} + \mathbf{u}) + \dot{\mathbf{u}}], \quad (2)$$

где $\boldsymbol{\omega}$ – угловая скорость системы координат $Cx_1x_2x_3$, $\boldsymbol{\omega} \times (\cdot) = \Gamma^{-1}\Gamma(\cdot)$.

Кинетическая энергия спутника с учетом (2) представляется функционалом следующего вида:

$$\begin{aligned} T = & \frac{1}{2} \int_V \mathbf{v}_M^2 d\mu = \frac{1}{2} m \dot{\mathbf{R}}^2 + \frac{1}{2} (\hat{J} \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}) + \\ & + \frac{1}{2} \int_K \left\{ [\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{r} + \mathbf{u})]^2 + \dot{\mathbf{u}}^2 + 2(\Gamma^{-1} \dot{\mathbf{R}}, \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u} + \dot{\mathbf{u}}) + 2(\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{r} + \mathbf{u}), \dot{\mathbf{u}}) \right\} \rho ds, \end{aligned} \quad (3)$$

где μ – мера на области V , m – масса спутника, ρ – линейная плотность стержней, которую считаем постоянной, $\hat{J}$ – тензор инерции твердого тела спутника без стержней относительно системы координат $Cx_1x_2x_3$.

Потенциальная энергия гравитационного поля имеет вид:

$$\Pi = -\gamma \int_V \frac{d\mu}{\sqrt{[\mathbf{R} + \Gamma(\mathbf{r} + \mathbf{u})]^2}}. \quad (4)$$

Обозначим через $\mathbf{R}_0$ единичный вектор, направленный по радиус-вектору $\mathbf{R}$. Введем обозначения для компонент вектора $\Gamma^{-1}\mathbf{R}_0$ в системе координат $Cx_1x_2x_3$: $\Gamma^{-1}\mathbf{R}_0 = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$.

С учетом того, что $|\mathbf{r} + \mathbf{u}| \ll R$, преобразуем функционал (4), сохраняя квадратичные члены по $(\mathbf{r} + \mathbf{u})/R$ и линейные по $\mathbf{u}/R$ к виду:

$$\Pi = -\frac{\gamma m}{R} + \frac{\gamma}{R^2} \int_K (\Gamma^{-1}\mathbf{R}_0, \mathbf{u}) \rho ds - \frac{3\gamma}{R^3} \int_K (\Gamma^{-1}\mathbf{R}_0, \mathbf{r}) (\Gamma^{-1}\mathbf{R}_0, \mathbf{u}) \rho ds. \quad (5)$$

Функционалы потенциальной энергии упругих деформаций и диссипативных сил, согласно линейной теории изгиба вязкоупругих стержней, зададим выражениями:

$$E[\mathbf{u}] = \frac{N}{2} \int_K \left[\left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial s^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial s^2} \right)^2 \right] ds ,$$

$$D[\dot{\mathbf{u}}] = \frac{\chi N}{2} \int_K \left[\left(\frac{\partial^3 u_1}{\partial t \partial s^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^3 u_2}{\partial t \partial s^2} \right)^2 \right] ds ,$$

где N – изгибная жесткость стержня, χ – коэффициент рассеяния энергии в стержнях при изгибе.

Вращательное движение спутника будем описывать каноническими переменными Андуайе. Построим вектор кинетического момента вращательного движения спутника $\mathbf{G}$ в точке C и перпендикулярную вектору $\mathbf{G}$ плоскость CMN , которая пересекает плоскость $C\xi_1\xi_2$ по прямой CM , а плоскость Cx_1x_2 по прямой CN (рис. 2). Длину вектора $\mathbf{G}$ обозначим через I_2 , а его проекции на оси Cx_3 и $C\xi_3$ соответственно через I_1 и I_3 . Угол между осью $C\xi_1$ и прямой CM обозначим через φ_3 , угол между прямыми CM и CN – через φ_2 , угол между прямой CN и осью Cx_1 – через φ_1 . Угол δ_1 на рис. 2 – это угол, который составляет вектор $\mathbf{G}$ с осью $C\xi_3$, а δ_2 – угол, который составляет вектор $\mathbf{G}$ с осью Cx_3 . Согласно определению величин I_1, I_2, I_3 :

$$\cos \delta_1 = \frac{I_3}{I_2}, \quad \cos \delta_2 = \frac{I_1}{I_2}.$$

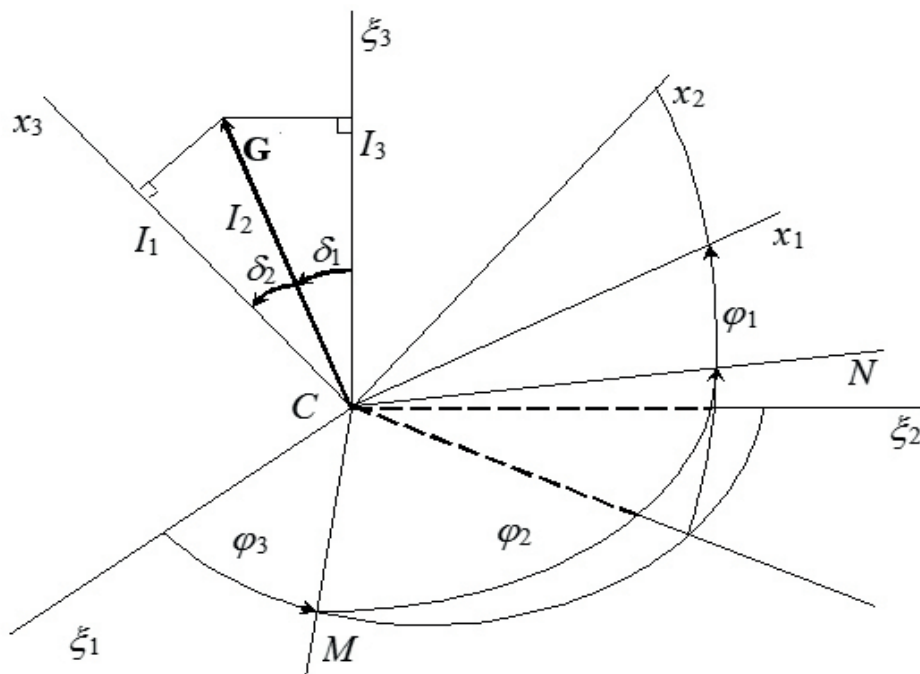


Рис. 2. Переменные Андуайе.

Переменные $I_1, I_2, I_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ называются переменными Андуайе [4].

Переход от системы координат $C\xi_1\xi_2\xi_3$ к системе координат $Cx_1x_2x_3$ в переменных Андуайе осуществляется посредством пяти последовательных поворотов на углы

$\varphi_3, \delta_1, \varphi_2, \delta_2, \varphi_1$ вокруг осей $C\zeta_3, CM$, вектора кинетического момента $\mathbf{G}$ и осей CN и Cx_3 соответственно.

Оператор Γ в переменных Андуайе можно представить в виде произведения пяти ортогональных матриц:

$$\Gamma = \Gamma_3(\varphi_3)\Gamma_1(\delta_1)\Gamma_3(\varphi_2)\Gamma_1(\delta_2)\Gamma_3(\varphi_1),$$

где

$$\Gamma_3(\varphi_k) = \begin{pmatrix} \cos \varphi_k & -\sin \varphi_k & 0 \\ \sin \varphi_k & \cos \varphi_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \Gamma_1(\delta_j) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 \cos \delta_j - \sin \delta_j & & \\ 0 \sin \delta_j & \cos \delta_j & \end{pmatrix}, k = 1, 2, 3, j = 1, 2.$$

Компоненты вектора $\mathbf{G}$ в системе координат $Cx_1x_2x_3$ в переменных Андуайе имеют вид:

$$\mathbf{G} = (\sqrt{I_2^2 - I_1^2} \sin \varphi_1, \sqrt{I_2^2 - I_1^2} \cos \varphi_1, I_1).$$

Функционал Рауса определяется равенством:

$$\mathbf{R} = \sum_{k=1}^3 I_k \dot{\varphi}_k - T + \Pi + E[\mathbf{u}].$$

В поставленной задаче он имеет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}[\mathbf{I}, \boldsymbol{\varphi}, \dot{\mathbf{u}}, \mathbf{u}, \vartheta] = & \frac{I_2^2}{2A} - \int_K (\mathbf{u} \times \Gamma^{-1} \dot{\mathbf{R}} + \mathbf{r} \times \dot{\mathbf{u}}, J_0^{-1} \mathbf{G}) \rho ds + \\ & + \int_K (J_0^{-1} \mathbf{G}, \mathbf{r})(J_0^{-1} \mathbf{G}, \mathbf{u}) \rho ds - \int_K (\Gamma^{-1} \dot{\mathbf{R}}, \dot{\mathbf{u}}) \rho ds - \\ & - \frac{ma^2 n^2 (1 + 2e \cos \vartheta + e^2)}{2(1 - e^2)} - \frac{\gamma m}{R} + \frac{\gamma}{R^2} \int_K (\Gamma^{-1} \mathbf{R}_0, \mathbf{u}) \rho ds - \\ & - \frac{3\gamma}{R^3} \int_K (\Gamma^{-1} \mathbf{R}_0, \mathbf{r})(\Gamma^{-1} \mathbf{R}_0, \mathbf{u}) \rho ds + \mathbf{R}^* + E[\mathbf{u}] \end{aligned}$$

Здесь $\mathbf{I} = (I_1, I_2, I_3)$, $\boldsymbol{\varphi} = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$, $\mathbf{r} = s\mathbf{e}_3 = (0, 0, s)$, $J_0^{-1} \mathbf{G} = (G_1, G_2, G_3)$,

$$G_1 = \frac{\sqrt{I_2^2 - I_1^2}}{A} \sin \varphi_1, G_2 = \frac{\sqrt{I_2^2 - I_1^2}}{A} \cos \varphi_1, G_3 = \frac{I_1}{A},$$

A – главный центральный момент инерции спутника с недеформированными стержнями относительно оси Cx_i ($i = 1, 2, 3$), $J_0 = \text{diag}(A, A, A)$. В $\mathbf{R}^*$ входят члены второго и более высоких порядков по компонентам векторов $\mathbf{u}$ и $\dot{\mathbf{u}}$.

Уравнения движения рассматриваемой механической системы выписываются в форме уравнений Рауса:

$$\dot{I}_k = -\nabla_{\varphi_k} \mathbf{R}, \quad \dot{\varphi}_k = \nabla_{I_k} \mathbf{R}, \quad k = 1, 2, 3, \quad (6)$$

$$-\frac{d}{dt} \nabla_{\dot{\mathbf{u}}} \mathbf{R} + \nabla_{\mathbf{u}} \mathbf{R} + \nabla_{\dot{\mathbf{u}}} D = 0. \quad (7)$$

2. Эволюция вращательного движения спутника

Будем считать жесткость N стержней большой. Это означает, что низшая частота собственных колебаний стержня намного больше начальной угловой скорости спутника. Тогда мал безразмерный параметр $\varepsilon_0 = \omega_0^2 d^4 \rho N^{-1}$, где ω_0 – константа, ограничивающая модуль начальной угловой скорости спутника, d – длина стержня, ρ – его линейная плотность. Можно выбрать масштабы основных единиц так, чтобы $\omega_0^2 d^4 \rho = 1$, тогда $\varepsilon = N^{-1} \ll 1$.

Если $\varepsilon = 0$, то будем полагать $\mathbf{u} = 0$, то есть стержни не деформируются, и данная механическая система движется как твердое тело. Уравнения невозмущенного движения в этом случае выглядят следующим образом:

$$\dot{I}_1 = 0, \quad \dot{I}_2 = 0, \quad \dot{I}_3 = 0, \quad \dot{\varphi}_1 = 0, \quad \dot{\varphi}_2 = \omega_2, \quad \dot{\varphi}_3 = 0, \quad \omega_2 = I_2 / A. \quad (8)$$

Из уравнения (7) найдем вектор-функцию $\mathbf{u}$, описывающую вынужденные колебания вязкоупругих стержней под действием гравитационных сил и сил инерции переносного движения. Согласно методу разделения движений [1, 5], это решение строится на невозмущенном движении (8). В данном случае оно представляется в виде:

$$\mathbf{u} = \varepsilon \Psi(s) [\mathbf{e}_1 (f_1 - \chi \dot{f}_1) + \mathbf{e}_2 (f_2 - \chi \dot{f}_2)], \quad (9)$$

$\Psi(s)$ – нечетная функция аргумента s , имеющая вид многочлена пятой степени [2, 3], $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ – орты осей Cx_1, Cx_2 ,

$$f_1 = \rho \left\{ -G_1 G_3 + \frac{3\gamma_1 \gamma_3 (1 + e \cos \vartheta)^3 n^2}{(1 - e^2)^3} \right\},$$

$$f_2 = \rho \left\{ -G_2 G_3 + \frac{3\gamma_2 \gamma_3 (1 + e \cos \vartheta)^3 n^2}{(1 - e^2)^3} \right\},$$

$$\begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} = \Gamma_3(-\varphi_1)\Gamma_1(-\delta_2)\Gamma_3(-\varphi_2)\Gamma_1(-\delta_1)\Gamma_3(\vartheta - \varphi_3) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – координаты вектора $\Gamma^{-1}\mathbf{R}_0$ в системе координат $Sx_1x_2x_3$. Точкой сверху в (9) обозначена производная по времени, которая вычисляется в силу невозмущенной системы уравнений (8).

Вектор-функцию (9) далее подставляем в правые части системы уравнений (6). В результате получается возмущенная система уравнений движения спутника в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений седьмого порядка относительно переменных Андуайе $I_1, I_2, I_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ и истинной аномалии ϑ . Полученная система имеет стандартный вид для проведения процедуры усреднения по «быстрым» угловым переменным φ_2, l , где l – средняя аномалия, линейно зависящая от времени согласно (1).

Средняя аномалия l связана с истинной аномалией ϑ посредством соотношений, указанных в [6, 7]:

$$l = w - e \sin w, \quad (10)$$

$$\cos w = \frac{e + \cos \vartheta}{1 + e \cos \vartheta}, \quad (11)$$

где w – эксцентрическая аномалия, а уравнение (10) называется уравнением Кеплера.

Операция усреднения состоит в вычислении интеграла

$$\langle (\cdot) \rangle_{\varphi_2, l} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} (\cdot) d\varphi_2 dl.$$

Так как зависимость от переменной l в правых частях возмущенной системы уравнений осуществляется неявно через истинную аномалию ϑ по формулам (10), (11) и

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial l} = \frac{(1 + e \cos \vartheta)^2}{(1 - e^2)^{3/2}},$$

то

$$\langle (\cdot) \rangle_{\varphi_2, l} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} (\cdot) \frac{(1 - e^2)^{3/2}}{(1 + e \cos \vartheta)^2} d\varphi_2 d\vartheta.$$

Усреднение по быстрым угловым переменным φ_2, l приводит к системе дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{aligned} \dot{I}_k &= \varepsilon \chi d_1 \rho^2 n^5 H_k(I_1, I_2, I_3, \varphi_3), \quad k = 1, 2, 3, \\ \dot{\varphi}_3 &= \varepsilon d_1 \rho^2 n^4 [\Psi_{31}(I_1, I_2, I_3) + e^2 \Psi_{32}(I_1, I_2, I_3, \varphi_3)] + \varepsilon \chi d_1 \rho^2 n^5 \Psi_{33}(I_1, I_2, I_3, \varphi_3), \\ d_1 &= \int_K s \Psi(s) ds > 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Поскольку $\chi n \ll 1$, $e^2 \ll 1$, то переменную φ_3 можно считать быстрой угловой переменной. Поэтому дополнительно можно провести усреднение системы уравнений (12) по угловой переменной φ_3 . Таким образом, усреднение правых частей возмущенной системы уравнений движения сводится к вычислению интеграла:

$$\langle (\cdot) \rangle_{\varphi_2, \varphi_3, l} = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} (\cdot) \frac{(1-e^2)^{3/2}}{(1+e \cos \vartheta)^2} d\varphi_2 d\varphi_3 d\vartheta. \quad (13)$$

В результате усреднения правых частей возмущенной системы уравнений согласно (13) получаем систему дифференциальных уравнений 3-го порядка, описывающую изменения «медленных» переменных Андуайе I_1, I_2, I_3 :

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 = & \frac{9\varepsilon\chi\rho^2 d_1 n^4}{32(1-e^2)^6} \{4nF_2(e)[2 \cos 2\delta_2 \cos \delta_2 \sin 2\delta_1 \sin \delta_1 + \\ & + \sin 2\delta_2 \cos \delta_1 \sin \delta_2 (1 + \cos^2 \delta_1)] - \\ & - \omega_2 F_1(e)(1-e^2)^{3/2} [4 \cos 2\delta_2 \cos \delta_2 \sin^2 \delta_1 (1 + 3 \cos^2 \delta_1) + \\ & + \sin 2\delta_2 \sin \delta_2 (3 + 2 \cos^2 \delta_1 + 3 \cos^4 \delta_1)]\}, \\ \dot{I}_2 = & \frac{9\varepsilon\chi\rho^2 d_1 n^4}{16(1-e^2)^6} \{4nF_2(e) \cos \delta_1 [\sin^2 \delta_1 (\cos^2 \delta_2 + \cos^2 2\delta_2) + \\ & + \sin^2 \delta_2 (1 + \cos^2 \delta_1) (1 + \cos^2 \delta_2)] - \\ & - \omega_2 F_1(e)(1-e^2)^{3/2} [\sin^2 \delta_1 (1 + 3 \cos^2 \delta_1) (\cos^2 \delta_2 + \cos^2 2\delta_2) + \\ & + \sin^2 \delta_2 (1 + \cos^2 \delta_2) (3 + 2 \cos^2 \delta_1 + 3 \cos^4 \delta_1)]\}, \\ \dot{I}_3 = & \frac{9\varepsilon\chi\rho^2 d_1 n^4}{16(1-e^2)^6} \left\{ nF_2(e) \left[\sin^2 2\delta_1 \cos^2 \delta_2 + \sin^2 \delta_2 (1 + \cos^2 \delta_1)^2 + \right. \right. \\ & + 4(\sin^2 \delta_1 \cos^2 \delta_2 + \cos^2 \delta_1 \sin^2 \delta_2) + \\ & + \sin^2 \delta_2 \cos^2 \delta_2 (18 \sin^4 \delta_1 + 1 + 6 \cos^2 \delta_1 + \cos^4 \delta_1) + \\ & + 4 \cos^2 2\delta_2 \sin^2 \delta_1 (1 + \cos^2 \delta_1) \left. \right] - 4\omega_2 F_1(e)(1-e^2)^{3/2} \cos \delta_1 \times \\ & \times [\sin^2 \delta_1 (\cos^2 \delta_2 + \cos^2 2\delta_2) + \sin^2 \delta_2 (1 + \cos^2 \delta_1) (1 + \cos^2 \delta_2)] \}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$F_1(e) = 1 + 3e^2 + \frac{3}{8}e^4, \quad F_2(e) = 1 + \frac{15}{2}e^2 + \frac{45}{8}e^4 + \frac{5}{16}e^6.$$

На следующем шаге, принимая во внимание (14), перейдем к безразмерным переменным и безразмерному времени. В качестве безразмерных переменных возьмем

$$x_1 = \cos \delta_1, \quad x_2 = \cos \delta_2, \quad x_3 = \frac{\omega_2}{n}.$$

Теперь выполним переход к безразмерному времени $\tau = t\delta$, где

$$\delta = \frac{9\varepsilon\chi\rho^2 d_1 n^4}{16A}.$$

Обезразмеренная система уравнений движения спутника, описывающая эволюцию вращательного движения, имеет вид:

$$\begin{aligned} x'_1 &= \frac{(1-x_1^2)}{x_3} \{ \Phi_2(e) [5 + 3x_1^2 + 6x_2^2(1-3x_1^2) - 3x_2^4(1-5x_1^2)] - \\ &\quad - \Phi_1(e)x_3x_1[4 - 9x_2^2(1-x_1^2) + x_2^4(11-15x_1^2)] \}, \\ x'_2 &= \frac{x_2}{x_3} \{ 4\Phi_2(e)x_1[3(x_1^2-1) + 2x_2^2(3-4x_1^2) + x_2^4(5x_1^2-3)] - \\ &\quad - \Phi_1(e)x_3[3(3x_1^4-2x_1^2-1) + 4x_2^2(1+3x_1^2-6x_1^4) + x_2^4(15x_1^4-6x_1^2-1)] \}, \\ x'_3 &= 4\Phi_2(e)x_1[2 + 3x_2^2(x_1^2-1) + x_2^4(3-5x_1^2)] - \\ &\quad - \Phi_1(e)x_3[4(1+x_1^2) + 3x_2^2(3x_1^4-2x_1^2-1) + x_2^4(1+6x_1^2-15x_1^4)] \end{aligned} \quad (15)$$

$$\Phi_1(e) = \frac{F_1(e)}{(1-e^2)^{9/2}}, \quad \Phi_2(e) = \frac{F_2(e)}{(1-e^2)^6}.$$

3. Частные решения эволюционной системы уравнений.

Фазовые портреты

Можно выделить следующие частные решения полученной системы уравнений (15):

- 1) $x_2 \equiv 0$ – ось симметрии спутника ортогональна вектору кинетического момента $\mathbf{G}$;
- 2) $x_1 \equiv 1$ – вектор кинетического момента $\mathbf{G}$ ортогонален плоскости орбиты, вращение спутника прямое;
- 3) $x_1 \equiv -1$ – вектор кинетического момента $\mathbf{G}$ ортогонален плоскости орбиты, вращение спутника обратное;
- 4) $x_2 \equiv 1$ или $x_2 \equiv -1$ – ось симметрии Sx_3 спутника направлена по вектору $\mathbf{G}$, т.е. ось

симметрии спутника совпадает с точностью до бесконечно малых более высокого порядка с его осью вращения.

В первом случае первое и третье уравнения системы (15) примут вид:

$$\begin{aligned} x_1' &= \frac{(1-x_1^2)}{x_3} \{ (5+3x_1^2)\Phi_2(e) - 4x_1x_3\Phi_1(e) \}, \\ x_3' &= 8x_1\Phi_2(e) - 4x_3(1+x_1^2)\Phi_1(e) \end{aligned} \quad (16)$$

На рис. 3 представлен фазовый портрет системы дифференциальных уравнений (16). Пунктирными кривыми изображены особые точки этой системы.

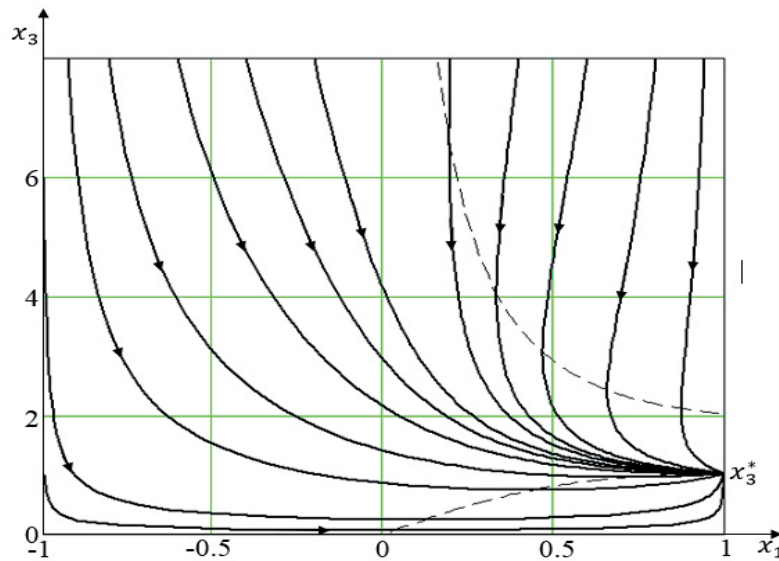


Рис. 3. Фазовый портрет системы дифференциальных уравнений (16).

Интегральные кривые стягиваются в точку $(1, x_3^*)$, где $x_3^* = \Phi_2(e)/\Phi_1(e)$ (отношение функций эксцентриситета). Это означает, что движение спутника стремится к прямому вращению вокруг нормали к плоскости орбиты. Стержни лежат в плоскости орбиты, а угловая скорость собственного вращения равна орбитальной, умноженной на x_3^* . В случае круговой орбиты угловая скорость собственного вращения будет совпадать с орбитальной.

Отрицательные значения x_1 соответствуют обратным вращениям спутника. Как видно из фазового портрета (рис. 3), вращение спутника из обратного переходит в прямое с последующим переходом в асимптотически устойчивое положение равновесия $x_1 = 1, x_3 = x_3^*$.

Второе частное решение соответствует значению $x_1 \equiv 1$. В этом случае вектор кинетического момента $\mathbf{G}$ ортогонален плоскости орбиты. Вращение спутника прямое. Угол δ_1 равен нулю. Тогда второе и третье уравнения системы (15) примут вид:

$$\begin{aligned} x_2' &= -\frac{8x_2^3(1-x_2^2)}{x_3} \{ \Phi_2(e) - x_3\Phi_1(e) \}, \\ x_3' &= 8(1-x_2^4) \{ \Phi_2(e) - x_3\Phi_1(e) \}. \end{aligned} \quad (17)$$

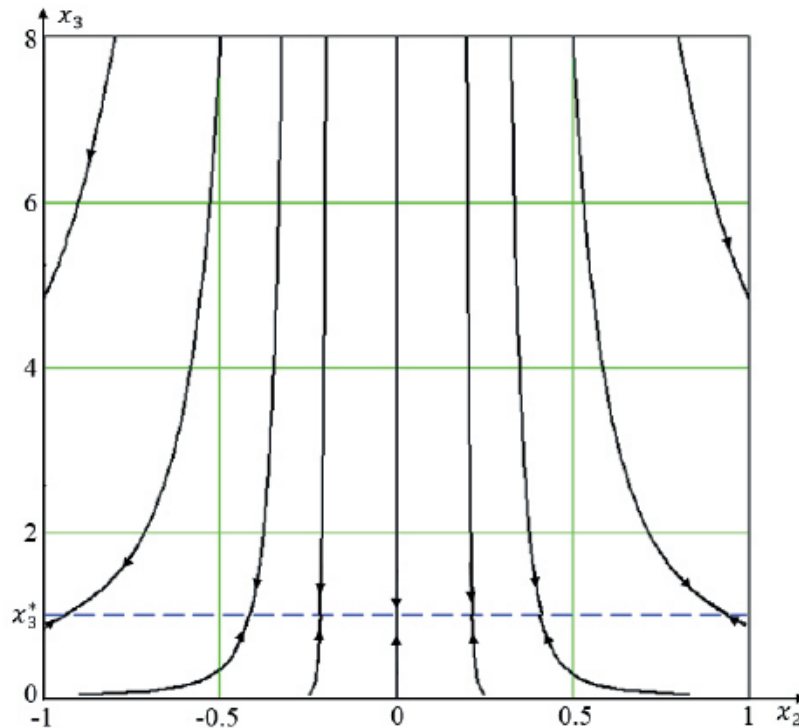


Рис. 4. Фазовый портрет системы уравнений (17).

На рис. 4 изображен фазовый портрет системы (17). Здесь мы имеем несколько множеств, состоящих из стационарных точек:

- а) точки отрезка $x_2 = s, x_3 = x_3^* (s \in [-1; 1])$;
- б) луч $x_2 = -1, x_3 = s (s \geq 0)$;
- в) луч $x_2 = 1, x_3 = s (s \geq 0)$.

В случае а) соответствующие стационарные решения асимптотически устойчивы при $s \in (-1; 1)$, а в случаях б) и в) – при $s > x_3^*$. Случай а) соответствует вращению спутника, при котором модуль вектора угловой скорости равен среднему движению центра масс спутника по орбите, умноженному на x_3^* . При этом ось Cx_3 образует некоторый угол с нормалью к плоскости орбиты, отличный от 0 и π , который определяется начальными значениями задачи.

Третье частное решение соответствует значению $x_1 \equiv -1$. Вектор кинетического момента $\mathbf{G}$ ортогонален плоскости орбиты. Вращение спутника обратное. Тогда второе и третье уравнения системы (15) запишутся так:

$$\begin{aligned} x_2' &= \frac{8x_2^3(1-x_2^2)}{x_3} \{\Phi_2(e) + x_3\Phi_1(e)\}, \\ x_3' &= -8(1-x_2^4) \{\Phi_2(e) + x_3\Phi_1(e)\}. \end{aligned} \quad (18)$$

На рис. 5 изображен фазовый портрет системы дифференциальных уравнений (18). Модуль угловой скорости собственного вращения монотонно убывает, а ось симметрии спутника, по которой направлены стержни, стремится совпасть с нормалью к плоскости

орбиты. Стационарное значение модуля вектора угловой скорости определяется начальными значениями системы (18).

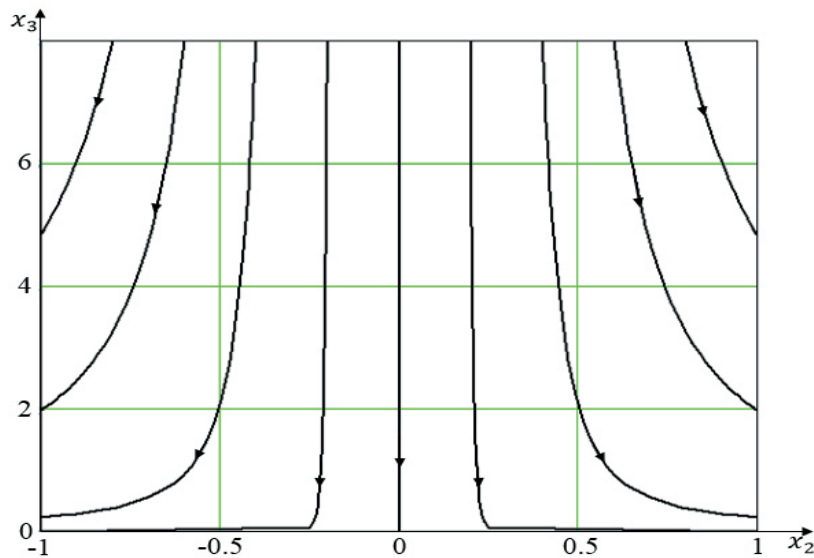


Рис. 5. Фазовый портрет системы уравнений (18).

Четвертое частное решение соответствует значению $x_2 \equiv 1$ или $x_2 \equiv -1$. Это означает, что ось симметрии Sx_3 спутника сонаправлена с вектором кинетического момента $\mathbf{G}$, т.е. с точностью до членов более высокого порядка малости ось симметрии спутника, по которой направлены стержни, совпадает с его осью вращения. Угол δ_1 в данном случае равен нулю или π . Тогда первое и третье уравнения системы (15) примут вид:

$$\begin{aligned} x_1' &= \frac{2(1-x_1^2)}{x_3} \{4\Phi_2(e) - 3x_1x_3(1-x_1^2)\Phi_1(e)\}, \\ x_3' &= 2(1-x_1^2) \{4\Phi_2(e)x_1 - x_3(1+3x_1^2)\Phi_1(e)\}. \end{aligned} \quad (19)$$

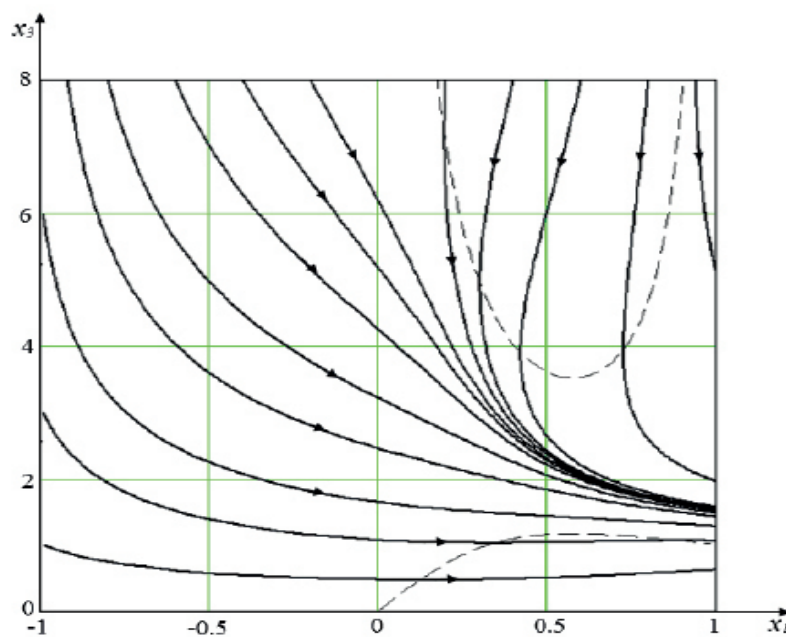


Рис. 6. Фазовый портрет системы уравнений (19).

На рис. 6 изображен фазовый портрет системы уравнений (19). Движение по фазовым траекториям устремляется к точкам прямой $x_1 = 1$. Следовательно, ось симметрии спутника, по которой направлены стержни, совпадающая с осью вращения, стремится совпасть с нормалью к плоскости орбиты. Движение спутника стремится к прямому вращению вокруг нормали к плоскости орбиты. При этом модуль угловой скорости вращения спутника определяется начальными условиями задачи.

Эффект стабилизации спутника в окрестности вращений вокруг нормали к плоскости орбиты, совпадающей с осью наибольшего его момента инерции, был установлен ранее для ряда других моделей спутников с внутренней диссипацией [1, 8–14].

Заключение

Асимптотическим методом разделения движений и усреднения получена эволюционная система обыкновенных дифференциальных уравнений третьего порядка. Она описывает изменение модуля вектора угловой скорости спутника и углов, которые вектор кинетического момента вращательного движения спутника составляет с нормалью к плоскости орбиты и осью симметрии спутника в нерезонансном случае. Найдены классы движений спутника, моделируемого симметричным твердым телом с жестко прикрепленными по оси симметрии вязкоупругими стержнями и сферическим центральным тензором инерции при отсутствии деформаций в стержнях. Построены фазовые портреты, описывающие эволюцию движения спутника.

Литература:

1. Вильке В.Г. Аналитическая механика систем с бесконечным числом степеней свободы. Ч. 1, 2. М.: Изд-во мех.-мат. факультета МГУ, 1997. Ч. 1. – 216 с. Ч. 2. – 160 с.
2. Вильке В.Г., Шатина А.В. Эволюция движения симметричного спутника с гибкими вязкоупругими стержнями в центральном ньютоновском поле сил // Космические исследования. 1999. Т. 37. Вып.3. С. 289–295.
3. Шатина А.В. Эволюция вращательного движения симметричного спутника с гибкими вязкоупругими стержнями // Космические исследования. 2002. Т. 40. № 2. С. 178–192.
4. Вильке В.Г. Механика систем материальных точек и твердых тел. М.: Физматлит, 2013. 268 с.
5. Вильке В.Г. Разделение движений и метод усреднения в механике систем с бесконечным числом степеней свободы // Вестник МГУ. Сер. 1. Математика, механика. 1983. Вып. 5. С. 54–59.
6. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1975. 800 с.
7. Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы. М.: Физматлит, 2010. 588 с.
8. Черноушко Ф.Л. О движении твердого тела, содержащего сферический демпфер // ПМТФ. 1968. № 1. С. 73–79.
9. Белецкий В.В. Движение спутника относительно центра масс в гравитационном поле. М.: Изд-во МГУ, 1975. 308 с.
10. Маркеев А.П. Об одном частном случае движения динамически симметричного упруговязкого тела в центральном ньютоновском гравитационном поле // Космические

исследования. 1990. Т. 28. Вып. 5. С. 643–650.

11. Сидоренко В.В. Эволюция вращательного движения планеты с жидким ядром // *Астроном. вестник*. 1993. Т. 27. № 2. С. 119–127.

12. Досаев М.З., Самсонов В.А. Об устойчивости вращения тяжелого тела с вязким наполнителем // *Прикл. математика и механика*. 2002. Т. 66. Вып. 3. С. 427–433.

13. Амелькин Н.И. Об асимптотических свойствах движений спутников в центральном поле, обусловленных внутренней диссипацией // *Прикл. математика и механика*. 2011. Т. 75. № 2. С. 204–223.

14. Адуенко А.А., Амелькин Н.И. Асимптотические свойства движений тяжелого волчка с внутренней диссипацией // *Прикл. математика и механика*. 2014. Т. 78. № 1. С. 1–16.

References:

1. Wilke V.G. Analytical mechanics of systems with an infinite number of degrees of freedom. Parts 1, 2. Moscow: Publ. of the Faculty of Mechanics and Mathematics of the Moscow State University, 1997. Part 1. – 216 p. Part 2. – 160 p. (in Russ.)

2. Wilke V.G., Shatina A.V. Evolution of the motion of a symmetric satellite with flexible viscoelastic rods in the central Newtonian force field // *Kosmicheskiye issledovaniya (Cosmic Investigations)*. 1999. V. 37. Iss. 3. P. 289–295. (in Russ.)

3. Shatina A.V. Evolution of the rotational motion of a symmetric satellite with flexible viscoelastic rods // *Kosmicheskiye issledovaniya (Cosmic Investigations)*. 2002. V. 40. Iss. 2. P. 178–192. (in Russ.)

4. Wilke V.G. Mechanics of systems of material points and rigid bodies. Moscow: Fizmatlit Publ., 2013. 268 p. (in Russ.)

5. Wilke V.G. Separation of motions and the method of averaging in the mechanics of systems with an infinite number of degrees of freedom // *Vestnik MGU. Ser. 1. Matematika, mekhanika (Bulletin of MSU. Series 1. Mathematics, Mechanics)*. 1983. Iss. 5. P. 54–59. (in Russ.)

6. Duboshin G.N. Celestial Mechanics. Main tasks and methods. Moscow: Nauka Publ., 1975. 800 p. (in Russ.)

7. Murray C.D., Dermott S.F. Solar System Dynamics. Cambridge University Press, 1999. 606 p.

Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы. М.: Физматлит, 2010. 588 с.

8. Chernous'ko F.L. On the motion of a rigid body containing a spherical damper // *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika (Applied Mechanics and Technical Physics)*. 1968. № 1. P. 73–79. (in Russ.)

9. Beletsky V.V. The motion of the satellite relative to the center of mass in the gravitational field. Moscow: MSU Publishing House, 1975. 308 p. (in Russ.)

10. Markeev A.P. On a particular case of motion of a dynamically symmetric elastic-viscous body in a central Newtonian gravitational field // *Kosmicheskiye issledovaniya (Cosmic Investigations)*. 1990. V. 28. Iss. 5. P. 643–650. (in Russ.)

11. Sidorenko V.V. Evolution of rotational motion of a planet with a liquid core // *Astronomicheskiy vestnik. (Astronomical Herald)*. 1993. V. 27. № 2. P. 119–127. (in Russ.)

12. Dosayev M.Z., Samsonov V.A. On the stability of rotation of a heavy body with a viscous filler // *Prikladnaya matematika i mekhanika (Applied Mathematics and Mechanics)*.

2002. V. 66. № 3. P. 427–433. (in Russ.)

13. Amelkin N.I. On the asymptotic properties of the motions of satellites in the central field due to internal dissipation // *Prikladnaya matematika i mekhanika* (Applied Mathematics and Mechanics). 2011. V. 75. № 2. P. 204–223. (in Russ.)

14. Aduenko A.A., Amelkin N.I. Asymptotic properties of motions of a heavy top with internal dissipation // *Prikladnaya matematika i mekhanika* (Applied Mathematics and Mechanics). 2014. V. 78. № 1. P. 1–16. (in Russ.)

Об авторах:

Садовникова Екатерина Владимировна, магистрант, Институт кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Шатина Альбина Викторовна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Ekaterina V. Sadovnikova, Graduate Student, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Albina V. Shatina, D.Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, Professor of the Chair of Higher Mathematics, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

УДК 330.354

**КАДРОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ
В РОССИИ В ЗЕРКАЛЕ ГЛОБАЛЬНОГО
ИНДЕКСА ИННОВАЦИЙ**

В.А. Рогова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
@Автор для переписки, e-mail: va_rogova@mirea.ru

В статье определена роль и место высоких технологий на современном этапе общественного развития, раскрыта роль и значение инноваций в повышении технологического уровня национальной экономики, обоснована взаимосвязь интенсивности инновационной деятельности и уровня инновационной активности с темпами развития высоких технологий. Анализ данной взаимосвязи дает возможность использования индекса инноваций как индикатора развития высоких технологий, и этот вывод обосновывается толкованием содержания самого понятия «высокие технологии», имманентным признаком которых являются инновации. На основе Глобального индекса инноваций, направленного на исследование экономических процессов, анализируются позиции, занимаемые Россией по обобщающему показателю, который в настоящее время рассматривается как индикатор уровня технологического развития национальной экономики и в целом – уровня экономического развития. Рассмотрение сущности высоких технологий и факторов технологического развития позволяет выделить в качестве ключевых два фактора: расходы на исследования и разработки (НИОКР) и качество человеческих ресурсов, прежде всего, инженерно-технических работников и исследователей. Результаты исследования наглядно подтверждают такие кадровые проблемы, как нехватка молодых специалистов по научным и инженерным специальностям, относительно невысокая результативность их интеллектуальной деятельности, низкая эффективность инноваций, препятствующая повышению технологического уровня экономики.

Ключевые слова: высокие технологии, инновации, инновационная активность, ресурсы инноваций, инженерные кадры, инженерное образование.

**PROBLEM OF STAFFING FOR DEVELOPMENT
OF HIGH TECHNOLOGIES IN RUSSIA IN THE MIRROR
OF THE GLOBAL INNOVATION INDEX**

V.A. Rogova

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
@Corresponding author e-mail: va_rogova@mirea.ru

The article defines the role and the place of high technologies at the current stage of social development, describes the role and the value of innovation for technological improvement of national economy, justifies relationship between level and intensity of innovative activity and rate of high technologies development. The analysis of such interrelation gives the chance of use the innovation index as indicator of development of high technologies. This conclusion is proved by intrinsic interpretation of the "high technologies" term, which is characterized by innovations. Basing on the Global Innovation Index, which is a study aimed at understanding economic process, author analyses positions held by Russia within general indicator, which is now regarded as indicator of technological level of national economy and level of economic development in general. Consideration of the essence of high technologies and drivers for technology development makes it possible to define two crucial factors: expenditure on R&D and the quality of human resources (mostly engineers, technicians and researchers). Research findings vividly illustrate problems of staffing such as the lack of young professionals in science and engineering, relatively poor performance of their intellectual activity, low efficiency of innovation that impede technological upgrading of economy.

Keywords: high technologies, innovation, innovation activity, resources of innovation, engineering personnel, engineering education.

Современный этап общественного и, прежде всего, экономического развития характеризуется ключевым значением высоких технологий, основным идентификационным признаком которых является относительно высокий уровень затрат на научные исследования и разработки. К высоким технологиям, как правило, относят те технологии, в которых непосредственно использованы новейшие достижения фундаментальных и прикладных наук, то есть наукоемкие технологии. Независимо от того, о чем идет речь – о продукции, способе производства, методе управления и пр. – если при их разработке и создании были использованы новые технологические знания, то такие объекты будут отнесены к высокотехнологичным. Согласно определению (применительно к отрасли), данному Организацией экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), к высокотехнологичным относятся отрасли, удовлетворяющие следующим критериям:

- предприятия производят инновационные продукты;
- для производства продуктов используются инновационные производственные процессы;
- уровень расходов на исследования и разработки в денежном обороте составляет более 5%.

По перечисленным выше критериям, помимо высокотехнологичного, выделяют еще три уровня технологичности: среднетехнологичные, отрасли высокого и низкого уровня и низкотехнологичные отрасли. Названные признаки справедливы и когда мы говорим о высокотехнологичном продукте, и высокотехнологичном виде деятельности, и высокотехнологичном производстве, и высокотехнологичной экономике. Правда, с момента принятия предложенного ОЭСР определения некоторые страны установили свои значения по критерию удельного веса расходов на НИОКР, что привело, в конечном счете, к общему пересмотру критериального значения и установлению его на уровне 7%.

Несмотря на то, что понятие «высокие технологии» появилось и стало употребляться учеными и практиками со второй половины XX в., феномен, описываемый данным понятием, на сегодняшний день еще не исследован достаточно полно, а среди специалистов до сих пор нет единого мнения в его понимании и определении [1–6]. Однако, несмотря

на наличие дискуссионности, не подвергается сомнению тот факт, что высокие технологии являются основой современной экономики, и наиболее высоких результатов развития достигают именно те страны, где высока доля высокотехнологичных производств и высок удельный вес выпускаемой высокотехнологичной продукции. Все развитые страны активно осваивают передовые технологии, внедряя их в производство, постепенно «подтягивая» технологический уровень и смежных отраслей и производств. Сейчас большинство сфер современной экономики в той или иной мере строят свое развитие на использовании высоких технологий. В то же время, если для собственно высокотехнологичных отраслей и видов деятельности характерно «внутреннее» происхождение нововведений, то для отраслей и видов деятельности более низкого технологического уровня это преимущественно результат заимствования новых технологий.

По мнению С.Ю. Глазьева, развитие экономики не может происходить иначе, чем путем последовательной смены технологических укладов [7, 3]. Экономика, основанная на высоких технологиях, как этап общественного развития, как правило, связывается с шестым технологическим укладом, который начинает формироваться в экономически развитых странах – США, Японии и др., составляя 5% экономики, и по прогнозам специалистов, вступит в фазу зрелости в течение ближайших 20 лет. Сегодня основную долю производительных сил ведущих стран составляет пятый технологический уклад, на долю которого приходится более 60% [8].

Россия, более половины экономики которой относится к четвертому технологическому укладу, а почти треть – к третьему, по соотношению уровней технологического развития существенно уступает развитым странам. Доля технологий пятого уклада у нас пока составляет примерно 10%, да и то только в наиболее развитых отраслях: в военно-промышленном комплексе и в авиакосмической промышленности [8]. При таком положении необходимость развития высоких технологий и перехода к шестому технологическому укладу предопределяется для нашей страны, прежде всего, фактором технологической отсталости [9]. Повышение технологического уровня – это вопрос конкурентных позиций, значимого места в мировой экономике, наконец – это вопрос выживания. «... Нам нельзя догонять, – говорит академик РАН Е.Н. Каблов – необходимо сделать резкий рывок и выйти на новый уровень развития, используя в совокупности собственные достижения и опыт передовых держав мира» [8, 10].

Об имеющемся отставании в технологическом уровне экономики говорит также тот факт, что по экспорту высокотехнологичных товаров Россия занимает лишь 44-ю позицию в мире (6.6 млрд. долларов (3.41%) внешнеторгового оборота). Для сравнения отметим, что экспорт высокотехнологичных товаров Китая, возглавившего мировой рейтинг по данному показателю в 2016 г., составил 496 млрд. долларов (29.38% от внешнеторгового оборота страны) [11]. Такая статистика не позволяет говорить, что Россия – это страна высоких технологий. Конечно, определенные успехи есть, но этих успехов явно недостаточно, чтобы войти в число мировых лидеров.

Как следует из большинства определений высоких технологий, неотъемлемым их признаком являются инновации, в результате которых обеспечивается новизна, создание передовых, ранее неизвестных, продуктов. Без инноваций достичь высокотехнологичного уровня невозможно. Признание в качестве определяющего фактора экономического

развития нововведений, которые способствуют повышению технологического уровня экономики, привело к формированию новой парадигмы развития, основанного на использовании знаний и инноваций как важнейшего экономического ресурса.

Высокая инновационная активность, которая реализуется в инновационных производственных технологиях, инновационных материалах, инновационных изделиях и пр., является одним из ключевых признаков высоких технологий. Из существующих видов инноваций конкурентоспособность экономики, а, значит, и возможность ее относительно более динамичного роста, обеспечивают преимущественно научно-технические и технологические инновации. По расчетам специалистов, в развитых странах более 50% прироста валового внутреннего продукта обеспечивается именно инновациями, роль и значимость которых в современном мире трудно переоценить. Инновации сегодня являются не только генератором экономического роста, но и способствуют созданию новых отраслей экономики, повышению конкурентоспособности, укреплению обороноспособности, решению целого ряда политических и социальных проблем. Именно с инновациями, освоением новых производственных, организационных, социальных и иных технологий в настоящее время связывают основные перспективы развития экономики и общества в целом.

Значимая зависимость развития высоких технологий от инноваций позволяет использовать показатели последних лет для характеристики не только собственно инновационной активности и инновационной деятельности, но и для оценки уровня развития технологий и уровня экономического развития в целом. Одним из таких обобщающих показателей в настоящее время является Глобальный индекс инноваций (GII), определение которого, по сути, представляет собой весьма масштабное исследование национальной экономики по значительному числу макроэкономических показателей, характеризующих и основные ресурсы инноваций, и их результаты. Оценивая количественно основные факторы, условия, ресурсы инновационной деятельности, данный индекс позволяет выявить слабые и сильные стороны инновационной активности, рассмотреть складывающиеся взаимосвязи и зависимости. Возможность сравнить показатели конкретной страны с аналогичными показателями других стран позволяет достаточно точно определить место той или иной национальной экономики в современной мировой экономической системе. Значимость инноваций на современном этапе экономического развития столь высока, что разделять экономическое и инновационное развитие страны невозможно, так они тесно взаимосвязаны [3, 10].

Результаты исследования национальных экономики в 2017 г. показали, что по Глобальному индексу инноваций (GII) Россия заняла лишь 45-ю строчку из 127 стран, опустившись на 2 позиции по сравнению с прошлым годом. Среди 35 ведущих европейских государств наша страна заняла в 2017 г. 31-е место [11]. Таким образом, позиции нашей страны не только весьма далеки от экономических лидеров, но и имеют тенденцию к ухудшению. Очевидно, что причины существенного отставания нашей страны от основных лидеров технологического развития имеют системный характер, а значит, требуют и системного решения. По нашему мнению, все многообразие факторов, определяющих технологический уровень национальной экономики, может быть сведено к двум: расходы на НИОКР (этот показатель отражает заинтересованность и государства, и бизнеса, и их

готовность к поддержке передового и нового, и наличие возможностей для поддержки и пр.) и качество человеческих ресурсов.

Поскольку рассмотрение первого из указанных факторов не входит в предметную область нашего исследования, укажем лишь, что доля внутренних затрат на НИОКР в РФ в 2017 г. составила 1.1% от валового внутреннего продукта (Россия по указанному показателю занимает 27 позицию в мире). Показатель страны-лидера по затратам на НИОКР – Израиля – составляет 4.3% ВВП, у занимающей вторую позицию Южной Кореи – 4.2% ВВП [11]. Однако, очевидно, что любые затраты на исследования и разработки будут бесполезными, если данный ресурс не обеспечен высококвалифицированными кадрами.

Действительно, одним из экономических условий развития инновационной деятельности, повышения инновационной активности, а значит, и развития экономики инновационного типа, основанной на разработке и производстве современных наукоемких изделий, является наличие высококвалифицированных кадров, владеющих знаниями и навыками на уровне современных достижений науки и техники. Во многом от того, каковы будут количественные и качественные характеристики человеческих ресурсов, зависит, насколько быстро экономика России перейдет на инновационный путь развития [12]. Без соответствующего кадрового обеспечения решение задач наращивания производственно-экономического потенциала, повышения социально-экономической эффективности и многих других становится труднодостижимым. Неслучайно, говоря о возможностях инновационного развития, специалисты отводят кадровому вопросу решающую роль и особое место [2]. Именно признание в инновационном развитии ключевой роли человеческих ресурсов привело к переходу к новой модели экономического развития, основанной не столько на эффективном использовании ресурсов, сколько на постоянном генерировании нового знания, позволяющего получать от инноваций новые дополнительные эффекты.

Выделим из числа показателей, входящих в Глобальный индекс инноваций, показатели, относящиеся к характеристике человеческих ресурсов.

Как следует из данных, приведенных в табл.1, позиции России практически по всем из приведенных показателей (кроме научно-технических публикаций) достаточно высоки, и по некоторым из них наша страна стоит выше экономически развитых стран.

Прежде всего, важно подчеркнуть, что в целом уровень развития высшего образования в России достаточно высок. Однако наша страна входит в тройку мировых лидеров только по показателю численности женщин с высшим образованием. А вот по удельному весу выпускников образовательных организаций высшего образования по научным и инженерным специальностям (в которых особенно нуждается российская экономика) – 28.1% в 2017 году – Россия заняла 13-е место [11]. Формально по данному показателю Россия стоит выше основных экономически развитых стран, опережая США (85-е место), Швецию (25-е место), Нидерланды (86-е место), Данию (53-е место) и другие страны. Анализируя позиции различных стран, можно сказать, что относительно высокое место по данному показателю скорее свидетельствует о «слабости» экономики, нежели о ее успехах. Топовые позиции в рейтинге по данному показателю как раз занимают страны, не относящиеся к мировым экономическим лидерам, экономики которых нуждаются в укреплении инженерного корпуса трудовых ресурсов. Экономически развитые страны

Таблица 1. Показатели человеческих ресурсов, учитываемые при расчете Глобального индекса инноваций

Наименование показателя	Значение показателя	Рейтинг России по показателю
Валовый коэффициент охвата высшим образованием	78.65	17
Удельный вес выпускников вузов по научным и инженерным специальностям, %	28.11	13
Работники, занятые в сфере наукоемких услуг (в % от численности рабочей силы)	44.35	15
Численность исследователей (на 1 млн. человек)	3131.11	29
Научно-технические публикации	8.84	70
Индекс Хирша для цитируемых документов	421.00	22
Число патентных заявок на полезные модели, поданных национальными заявителями в патентные ведомства страны	3.06	8
Число патентных заявок на изобретения, поданных национальными заявителями в патентные ведомства страны	794	15

по данному показателю находятся значительно ниже России, что, по нашему мнению, свидетельствует о том, что проблема инженерно-технических кадров в перечисленных выше странах стоит не столь остро, как в нашей стране, а эффективность деятельности инженерно-технических работников более высокая, вследствие чего потребность в них ниже.

Вероятнее всего, выпуск инженеров и исследователей из образовательных организаций высшего образования включен в качестве одного из показателей ресурсов инноваций неслучайно. Как известно, экономическая функция образования состоит в воспроизводстве профессионально-квалификационной структуры трудовых ресурсов. В результате подготовки и выпуска специалистов с высшим образованием создается основа специалистов с высшим образованием, создается основа для пополнения инженерного корпуса, обновления и омоложения кадрового состава. Выступая на заседании Совета при Президенте Российской Федерации по науке и образованию 23 июня 2014 г., В.В. Путин отметил, что «для России, для нашей экономики, для промышленности, для агропромышленного комплекса – вопрос (инженерного образования) определяющий. Сегодня лидерами глобального развития становятся те страны, которые способны создавать прорывные технологии и на их основе формировать собственную мощную производственную базу. Качество инженерных кадров становится одним из ключевых факторов конкурентоспособности государства и, что принципиально важно, основой его технологической, экономической независимости» [4]. Подчеркивая важность инженерного образования для решения технологических задач российской экономики, ряд специалистов дали уточнение экономической функции образовательных организаций, имеющих техническую направленность, определив ее как ресурсно-стратегическую, реализация которой позволяет формировать национальный стратегический кадровый запас высококвалифицированных специалистов.

Особую значимость в составе человеческих ресурсов приобретают работники специальностей STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics), которые в наибольшей степени необходимы для разработки передовых технологических решений. Используя принятую терминологию, следует говорить об инженерно-технических кадрах и иссле-

дователях, включая выпускников инженерно-технических специальностей.

Весьма информативен показатель численности исследователей (в пересчете на полную занятость) в расчете на миллион населения. Здесь ведущие позиции занимают страны, высоко стоящие по Глобальному индексу инноваций: Израиль, Дания, Швеция, Финляндия, Япония. Россия по данному показателю занимает лишь 29-ю позицию, уступая в «разы» странам с более высоким уровнем технологического развития. Так, в Израиле на 1 млн. населения приходится 8255.4 исследователей, а в Российской Федерации – лишь 3131.1.

Кроме рассмотренных, к показателям, характеризующим обеспеченность трудовыми ресурсами, следует добавить показатель численности работников, занятых в сфере наукоемких услуг, по которому Россия занимает 15-ю позицию в мировом рейтинге. Из показателей, характеризующих результативность деятельности инженерных и исследовательских кадров, выделим место нашей страны по числу патентных заявок на полезные модели/изобретения, поданных национальными заявителями в патентные ведомства страны – 8/15; по созданию знаний – 22-я позиция; по индексу Хирша для цитируемых документов – 22-я.

Практически все из рассмотренных показателей учитываются при расчете субиндекса ресурсов инноваций и входят в группу ресурсов «Человеческий капитал и наука». Согласно существующей методологии расчета индекса, в состав выделяемых ресурсов инноваций входят и иные составляющие, в числе которых показатели развития институтов, инфраструктуры, состояния и развития внутреннего рынка и развития бизнеса. Тем не менее, именно человеческий капитал является важнейшим ресурсом развития высоких технологий, носителем знаний, навыков и умений (табл. 2).

По совокупности показателей, входящих в группу «Человеческие ресурсы и наука», Россия занимает 23-е место в мире по качеству человеческого капитала и исследовательскому потенциалу. Анализируя позиции России по человеческому капиталу и науке, можно сделать вывод, что данный вид ресурсов инноваций является сильной стороной национальной экономики. Кроме показателя научно-технических публикаций, по всем другим показателям данной группы частные рейтинги выше сводного по ресурсам.

Таблица 2. Сравнительная характеристика стран по показателям ресурсов инноваций

Страна	Субиндекс ресурсов инноваций		Человеческие ресурсы и наука (рейтинг отдельных показателей)			
	Рейтинг	Величина индекса	Выпуск из вузов по научным и инженерным специальностям	Численность исследователей	Работники, занятые в сфере наукоемких услуг	Научно-технические публикации
Сингапур	1	72.25	нет данных	6	2	28
Швеция	2	69.72	25	4	5	6
Швейцария	3	69.60	45	17	3	3
Финляндия	4	68.93	16	5	10	5
США	5	68.57	85	20	28	38
Российская Федерация	43	38.76	13	29	15	70

Надо отметить, что за последние три года – с 2014 по 2017 гг. Российская Федерация улучшила свои позиции в рейтинге по субиндексу ресурсов инноваций, поднявшись с 52-й позиции на 43-ю. Вполне сопоставимы показатели нашей страны по человеческим ресурсам и науке, то есть имеющийся разрыв не является критическим. Вместе с тем, хотелось бы отметить, что данные табл. 2 свидетельствуют о том, что объемные показатели (показатели численности) не позволяют достаточно обстоятельно выделить имеющиеся проблемы. Например, по показателю количества исследователей Россия не так уж сильно отстает от США, однако по результативности инновационной деятельности разрыв весьма существен.

Несмотря на достаточно высокие позиции России в мире по целому ряду показателей, относимых к ресурсам инноваций, которые, по мнению экспертов, являются сильными сторонами национальной инновационной системы, многие отечественные специалисты полагают, что сегодня российская экономика не обеспечена в требуемом количестве и качестве соответствующими современным требованиям кадрами. Ресурсы инженерных кадров советского периода уже практически исчерпаны, а требуемого воспроизводства инженерно-технических кадров не только в количественном, но прежде всего, в качественном отношении, не происходит. И данный факт называют в числе основных причин медленного перехода к экономике инновационного типа. Не случайно существует мнение, что нашей стране необходима национальная стратегия подготовки кадров для высокотехнологичных отраслей, включающая переподготовку кадров для модернизации предприятий, подготовку научно-педагогических кадров мирового класса, а также подготовку рабочих, специалистов и научных работников разных специальностей.

Наличие серьезных проблем обнаруживается при сопоставлении позиций России по субиндексу ресурсов инноваций, их результатах и эффективности, а также при рассмотрении динамики показателей (табл. 3). Занимая высокое место в мире по уровню образования, в том числе высшего, достаточно высокое по выпуску инженерных и исследовательских кадров, по результативным индикаторам Россия существенно отстает от стран-лидеров, что в определенной степени свидетельствует о невысоком качестве используемых человеческих ресурсов и как следствие – низкой результативности инновационной деятельности.

Таблица 3. Динамика позиций России по Глобальному индексу инноваций за период с 2015 по 2017 гг.

Год	ГИ	Ресурсы инноваций	Результаты инноваций	Эффективность инноваций
2015	48	52	49	60
2016	43	44	47	69
2017	45	43	51	75

По результатам Global Innovation Index 2017 (ГИ 2017) наша страна в 2017 г. находилась по показателям результативности в области науки и технологии лишь на 45-м месте, потеряв пять позиций по сравнению с 2016 г., а по совокупному показателю, отражающему объем и качество инвестиций в новые технологии, Россия заняла лишь 95-е место [11]. Анализ значений индекса за ряд лет указывает на то, что положительная динамика

по показателям ресурсов инноваций сопровождается ухудшающимся положением по результативности и эффективности инноваций, то есть существует проблема использования ресурсов.

Если обратиться к показателю численности выпускников вузов по инженерным и научным специальностям, то станет понятным, что проблема возникает на этапе трудоустройства. Далеко не все молодые специалисты идут работать по специальности, что существенно снижает величину кадрового ресурса. Так, по данным выборочного обследования выпускников вузов, проведенного Росстатом, трудоустройство на первую работу по специальности, полученной в вузе, среди специалистов в области науки и техники составило 87.7%, что ниже аналогичного показателя трудоустройства молодых специалистов во всех других областях деятельности (здравоохранение, образование, ИКТ) [3]. «...Технические вузы готовят будущих офисных работников, сотрудников банков, других контор, что, собственно говоря, неплохо, но для этого есть и другие направления подготовки специалистов» [4]. В результате предприятия недополучают требуемых специалистов, воспроизводится проблема нехватки инженерных кадров, снижается внешняя эффективность деятельности образовательных организаций. По всей вероятности все причины все причины сложившегося положения, которое сохраняется на протяжении уже достаточно длительного периода, можно обозначить как непривлекательность инженерной и научно-исследовательской деятельности, в результате чего возникают проблемы привлечения выпускников вузов и молодых ученых для работы на производстве и, прежде всего, в высокотехнологичном секторе экономики. Справедливости ради надо сказать, что в последние годы наметился некоторый перелом, хотя проблема по-прежнему сохраняется.

Проблема «количества» усугубляется и проблемой «качества». 61% экспертов Ассоциации инженерного образования России считают его качество удовлетворительным (61.5%), «хорошим» его назвали 11.5 % экспертов, а 23.1% экспертов оценили качество инженерного образования как «низкое». Более 50% экспертов, участвовавших в оценке качества инженерного образования, охарактеризовали состояние инженерного дела в России как неудовлетворительное [5]. Проблема осложняется тем, что современный этап научно-технического развития характеризуется постоянно сокращающейся продолжительностью жизненного цикла изделий и быстрым устареванием технических знаний, что делает необходимым постоянное развитие компетенций инженерно-технических работников, а значит, усложняются задачи образовательных организаций. По мнению западных специалистов, при существующих темпах научно-технического развития большинству работающих необходимо менять специальность и квалификацию в течение трудовой жизни не менее 4–5 раз, чтобы идти в ногу с изменениями в производстве. В такой ситуации вузы по уровню организации образовательной деятельности попросту отстают от развития производства, что снижает способность молодых исследователей и инженеров эффективно решать стоящие перед ними задачи. По мнению работодателей, разрыв между желаемым и фактическим уровнем компетенций молодых специалистов является существенным. При этом в числе препятствий к эффективной профессиональной деятельности выделяется отсутствие «способности к самостоятельной работе», «опыта взаимодействия с реальным сектором» (разрыв в 1.5 раза), недостаточные «ком-

муникативные навыки» (разрыв в 1.4 раза), отсутствие широкого контекстного мышления и комплексного представления об отрасли, понимания экономических закономерностей ее функционирования (разрыв в 1.4 раза).

При достаточно высокой численности исследователей количество публикаций по научно-технической тематике крайне мало, что, скорее всего, свидетельствует о квалификации исследователей. Весьма показательными при анализе исследовательских кадров являются данные об интенсивности исследовательской кооперации между вузами и предприятиями. При обозначении очень интенсивного сотрудничества 7-балльной оценкой показатель России составил 3.68 и поставил ее на 44-е место в мире. При этом наиболее высокая оценка была присвоена Швейцарии, получившей 5.8 баллов. Невысокая интенсивность совместных исследований свидетельствует о значительной оторванности науки от производства, слабости прикладной науки, что в последующем сказывается на показателях результативности и эффективности инноваций.

Подводя итоги вышесказанному, следует подчеркнуть, что среди многообразия определений высоких технологий есть немало таких, в которых в качестве их сущностных характеристик указываются ноу-хау, сильное мышление, совокупность научных знаний и опыта, что подчеркивает значимость человеческого капитала как основы технологического развития [6]. Это означает, что продвижение по намеченному пути, повышение инновационной активности и эффективности инноваций требует соответствующего кадрового обеспечения, наличия на промышленных предприятиях, в научных организациях достаточного количества высококвалифицированных специалистов в области высоких технологий, владеющих на высоком уровне методами теоретических и экспериментальных исследований и инженерных разработок. Инженерно-техническая подготовка на современном уровне, новаторское мышление, которое необходимо развивать в молодых специалистах, как и способность создавать новое, становятся новыми факторами экономического и технического прогресса в условиях становления инновационной экономики – экономики, основанной на знаниях. Однако основная проблема развития высоких технологий кроется в недостаточно высоком качестве имеющихся кадровых ресурсов и крайне слабой реализации имеющегося потенциала. Очевидно, что без решения этих проблем (даже при наличии всех других видов ресурсов) ожидать технологического скачка и существенного увеличения высокотехнологичного сектора в структуре национальной экономики вряд ли возможно.

Литература:

1. Голованова Н.Б., Сороко А.В., Рябков О.А. [и др.] Экономика высокотехнологичных предприятий: учебное пособие. М.: Московский технологический университет (МИРЭА), 2017. 160 с.
2. Круглов В.Н., Пауков С.А. Ресурсное обеспечение инновационной деятельности: кадровый аспект // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2016. Т. 49. С. 33–41. URL: <http://e-koncept.ru/2016/76631.htm>
3. Федеральная служба государственной статистики [сайт]. URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/science_and_innovations//
4. Заседание Совета при Президенте по науке и образованию. 23 июня 2014 года

[Электронный ресурс]. URL: www.Kremlin.ru/events/president/news/45962

5. Экспертный семинар «Качество инженерного образования в России» [Электронный ресурс]. URL: <http://aeer.ru/ru/trening21.htm>

6. Шполянская А.А. Высокотехнологичные отрасли: определение и условия развития // Молодой ученый. 2015. № 22. С. 518–522. URL: <https://moluch.ru/archive/102/22775/> (дата обращения: 26.07.2018).

7. Глазьев С.Ю. Теория долгосрочного технико-экономического развития. М.: Владар, 1993. 310 с.

8. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/17800/>

9. Паршин М.А., Круглов Д.А. Переход России к шестому технологическому укладу: возможности и риски // Современные научные исследования и инновации. 2014. № 5. Ч. 2. [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/05/33059>.

10. Горфинкель Р.А. Экономика инноваций. Учебник, изд. 2-е. М.: Издательский дом «Вузовский учебник», 2018. 336 с.

11. <https://www.globalinnovationindex.org>

12. Докашенко Л.В., Боброва В.В. Роль человеческих ресурсов в развитии инновационной экономики // Вестник Оренбургского университета. 2011. № 13(132). С. 141–146.

References:

1. Golovanova N.B., Soroko A.V., Ryabkov O.A. [et al.] Economics of high-tech enterprises. Moscow: Moscow Technological University (MIREA), 2017. 160 p. (in Russ.)

2. Kruglov V.N., Paukov S.A. Resource support of innovative activity: personnel aspect // «Kontsept» (Scientific and methodical electronic magazine "Concept"). 2016. V. 49. P. 33–41. URL: <http://e-koncept.ru/2016/76631.htm> (in Russ.)

3. Federal Service of State Statistics [site]. URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/science_and_innovations/ (in Russ.)

4. Meeting of the Presidential Council for Science and Education. June 23, 2014. [Electronic resource]. URL: www.Kremlin.ru/events/president/news/45962 (in Russ.)

5. Expert seminar "Quality of engineering education in Russia". [Electronic resource]. URL: <http://aeer.ru/ru/trening21.htm> (in Russ.)

6. Shpolyanskaya A.A. High-tech industries: Definition and conditions of development // Molodoy uchenyy (Young Scientist). 2015. № 22. P. 518–522. URL: <https://moluch.ru/archive/102/22775/> (access date: 26.07.2018) (in Russ.)

7. Glazyev S.Yu. The theory of long-term technical and economic development. Moscow: VlaDar Publ., 1993. 310 p. (in Russ.)

8. Kablov E.N. The sixth technological order // Nauka i zhizn' (Science and Life). 2010. № 4. [Electronic resource]. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/17800/> (in Russ.)

9. Parshin M.A., Kruglov D.A. Transition of Russia to the sixth technological order: Opportunities and risks // Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii (Modern Scientific Research and Innovations). 2014. № 5. Part 2. [Electronic resource]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/05/33059> (in Russ.)

10. Gorfinkel R.A. Economics of innovations. 2nd edition. Moscow: Publishing House

"Vuzovskiy uchebnyk" ("University textbook"), 2018. 336 p. (in Russ.)

11. <https://www.globalinnovationindex.org>

12. Dokashenko L.V., Bobrova V.V. The role of human resources in the development of innovative economy // Vestnik Orenburgskogo universiteta (Bulletin of the Orenburg University). 2011. № 13(132). P. 141–146. (in Russ.)

Об авторе:

Рогова Вера Александровна, аспирант кафедры экономики и инновационного предпринимательства Института экономики и права ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the author:

Vera A. Rogova, Postgraduate Student of the Chair of Economics and Innovative Entrepreneurship, Institute of Economics and Law, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).