

**Разработка экспериментальной лабораторной системы
для исследования процессов автоматического проектирования
и прототипирования с интеллектуальным управлением
мягких полимерных мехатронных конструкций**

А. У. Заммоев, Р. Н. Абуталипов

Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а

Аннотация. Разработка теоретических основ проектирования и прототипирования бионаноробототехнических систем и конструкций в киберфизических системах и средах требует решения актуальных проблем создания полноценных систем автоматического проектирования и прототипирования с интеллектуальным управлением (САППИУ). В статье представлены результаты разработки экспериментальной лабораторной САППИУ для создания мягких полимерных мехатронных конструкций, позволяющей проводить исследования процессов САППИУ и разрабатывать специализированный исследовательско-производственный комплекс для синтеза прикладных устройств и систем мягкой робототехники и биоробототехники. Полученные на практике технические и экспериментальные данные применяются при анализе процессов САППИУ и поиске возможностей развития теоретической базы САППИУ, применимой для разработки киберфизических систем и сред для создания прикладных устройств и систем бионаноробототехники.

Ключевые слова: мягкая робототехника, мягкая полимерная мехатронная конструкция, биоробототехника, бионаноробототехника, автоматическое проектирование, интеллектуальное управление, киберфизические системы и среды, виртуальное прототипирование, физическое прототипирование

Поступила 27.11.2023, одобрена после рецензирования 29.11.2023, принята к публикации 04.12.2023

Для цитирования. Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н. Разработка экспериментальной лабораторной системы для исследования процессов автоматического проектирования и прототипирования с интеллектуальным управлением мягких полимерных мехатронных конструкций // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 33–46. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-33-46

MSC: 68W50; 93B51

Original article

**Design of an experimental laboratory system
to examine the processes of automatic design
and prototyping of soft polymer mechatronic
constructions with intelligent control**

A.U. Zammoev, R.N. Abutalipov

Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street

Abstract. The development of theoretical foundations for the design and prototyping of bionanorobotic devices and systems in cyber-physical systems and environments requires solving current problems of

creating full-fledged systems for automatic design and prototyping with intelligent control (SADPIC). The article presents the results of the development of an experimental laboratory SADPIC for the creation of soft polymer mechatronic constructions, which makes it possible to conduct research on SADPIC processes and develop a specialized research and production complex for the synthesis of applied devices and systems of soft robotics and biorobotics. The technical and experimental data obtained in practice are used in the analysis processes of SADPIC and the search for opportunities for developing the theoretical basis of SADPIC, applicable for the development of cyber-physical systems and environments for the creation of applied bionanorobotic devices and systems.

Keywords: soft robotics, soft polymer mechatronic construction, biorobotics, bionanorobotics, automated design, intelligent control, cyber-physical systems and environments, virtual prototyping, physical prototyping

Submitted 27.11.2023,

approved after reviewing 29.11.2023,

accepted for publication 04.12.2023

For citation. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Design of an experimental laboratory system to examine the processes of automatic design and prototyping of soft polymer mechatronic constructions with intelligent control. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 6(116). Pp. 33–46. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-33-46

ВВЕДЕНИЕ

Поиск методов и техники реализации конвейера материального воплощения симуляции – одна из актуальных проблем бионаноробототехники (БНРТ) [1]. В процессе разработки биоинтегрированных технологий мягкой робототехники рассматривается возможность создания системы автоматического проектирования и прототипирования мягких полимерных мехатронных конструкций, которая в перспективе может быть применимой в БНРТ [2].

В связи с недостаточностью знаний о структуре и способах организации систем автоматического проектирования и прототипирования с интеллектуальным управлением (САППИУ) конструкций устройств и систем БНРТ на текущем этапе актуальность приобрел прикладной вектор исследований, основанный на применении методов и приемов материального воплощения симуляций – *sim-to-real (s2r)* [3], методов эволюционного моделирования в киберфизических системах и средах [4], принципов и методов управления и принятия решений в процессе работы конвейерной схемы материального воплощения симуляции [2]. Развитие данного прикладного вектора исследований необходимо для эффективного решения задач создания специализированного *исследовательско-производственного комплекса* (ИПК) БНРТ, интегрированного с реальной бионаносредой для осуществления познавательного-целевого моделирования, проектирования и прототипирования конструкций устройств и систем БНРТ.

Перечисленные методы и подходы в зарубежной практике уже успешно применяются для моделирования, проектирования и прототипирования мягких роботизированных систем и биоинженерных конструкций [5–8], что требует их практического освоения и использования в научных исследованиях и разработках, в т.ч. с применением аддитивных технологий 3D/4D печати синтетическими полимерными материалами (эластомеров, гелей и т.д.) и биоинженерных материалов [6], позволяющих создавать полностью 3D-биопечатные молекулярные биомшины с внешним управлением – *биоботов* [7] и синтетических вычислительно разрабатываемых организмов [8].

Методы s2r по своей идее сходны с развиваемым нами подходом к организации процессов создания объектов БНРТ в эволюционном развитии технологического базиса, которые предполагается выполнять по конвейерной схеме, реализующей специальный производственный унифицированный технологический цикл (СПУТЦ) [2] для решения задачи виртуального прототипирования и материализации прототипов.

Нами предполагается, что при помощи специфической для БНРТ интеллектуальной информационно-управляющей системы – когнитивной информационно-коммуникационной системы (КИКС) БНРТ возможно организовать процессы проектирования и исследования свойств различных классов объектов в средах физической материализации, в т.ч. с учетом масштабных факторов. В работах [1, 9–14] дана оценка возможности реализации виртуального прототипирования синтетических бионаноструктур и бионаносистем как процесса эволюционной оптимизации принципиальных и технологических схем для заданных условий проектирования с использованием структурированных знаний о свойствах бионаноструктур.

В соответствии с текущим пониманием методологии проектирования и виртуального прототипирования бионаноструктур и систем БНРТ с использованием интеллектуальных информационно-управляющих систем целью нового для нас прикладного этапа исследований – *разработка технологической базы автоматического проектирования и прототипирования мягкой робототехники*, которая, помимо открытия возможностей решения одной из актуальных проблем БНРТ по поиску методов и техники реализации конвейера материального воплощения симуляции для перехода от моделирования к прототипированию объектов БНРТ, открывает перспективу для решения широкого круга прикладных задач мягкой робототехники и биоробототехники.

Воксельное представление проектов инженерных конструкций мягкой робототехники и их виртуальное прототипирование эволюционными методами может быть использовано в качестве простой экспериментальной модели реализации конвейерной схемы технологического цикла создания автоматически проектируемых объектов.

Указанные проекты конструкций для класса мягкой робототехники мы называем *мягкими полимерными мехатронными конструкциями* (МПК) [2, 15, 16]. Они состоят преимущественно из мягких полимерных материалов в композиции со встраиваемыми элементами микромеханики и микроэлектроники (такими как сенсоры, актуаторы, контроллеры и преобразователи), а также гибкими накопителями энергии и средствами коммуникаций электрических сигналов, механических усилий, движения и давления воздуха или жидкости и т.п., и проектируются для решения прикладных задач мягкой робототехники как самостоятельные устройства, так и как входящие в состав робототехнических систем более высокого уровня, в т.ч. реализуемых в комплексе с механическими системами роботов с жесткими звеньями или конструкций гибридных роботов со звеньями различной жесткости (от мягких до жестких).

Исследование процессов САППИУ, использующей методы s2g и эволюционного моделирования в рамках предложенной в работе [16] рабочей гипотезы предполагает создание экспериментальной модельной САППИУ путем разработки технологии виртуального и физического прототипирования МПК и рассмотрение на данном примере процессов проектирования архитектуры и создания прототипа исследовательско-производственного комплекса (ИПК) МПК.

Ниже представлены результаты разработки основных компонентов лабораторной системы для проведения вычислительных и физических экспериментальных исследований и пробных запусков процессов САППИУ для создания МПК относительно простой и известной тестовой задачи – проектирование конструкций самоходного движителя по горизонтальной ровной поверхности в поле гравитации, максимально удаляющихся от точки старта, и, соответственно, результаты создания таких МПК можно сравнить с результатами других исследователей.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Разработка экспериментальной лабораторной системы как основы для создания ИПК МПМК велась с использованием принципов системного подхода исходя из ранее предложенной схемы организации процессов создания объектов БНРТ в эволюционном развитии технологического базиса [1], на основе которой строится и отрабатывается методика автоматического проектирования и прототипирования МПМК с интеллектуальным управлением.

Разработка архитектуры ИПК МПМК

Основные приоритеты, задающие принципы и уровень технических решений, при разработке архитектуры ИПК МПМК:

- соответствие системным принципам и подходам, заложенным в концепте КИКС БНРТ;
- масштабируемость как в пространстве, так и во времени (цикличность эволюций);
- разделение и распределение функций за счет унификации потоков информационных, материальных и энергетических ресурсов, централизации и распараллеливания процессов, стандартизации интерфейсов;
- сочетание минимума оригинальных единиц с доступными типовыми единицами, позволяющими сократить сроки и снизить стоимость разработки и реализации;
- простота и доступность реализации технических решений оригинальных единиц.

В первом приближении ИПК МПМК должен состоять из необходимых технических средств и систем (в т.ч. аппаратной части и коммуникаций КИКС) и обладать достаточными для выполнения технологических циклов материальными ресурсами (исходное сырье и технологические материалы). В ИПК МПМК используются программное обеспечение и информационные ресурсы, интерфейсы с интеллектуальными агентами, в т.ч. и с лицами, принимающими решения (ЛПР), к которым относятся: исследователь, конструктор, экспертное сообщество, интеллектуальные агенты систем искусственного интеллекта.

КИКС, описанный для БНРТ и применимый для МПМК в ИПК, устраивает технологические, информационные и когнитивные процессы, связанные с взаимодействием технических средств в рабочем пространстве с объектами физической среды, т.е. организует и управляет функционированием подсистем киберфизической технической системы.

ИПК МПМК, начиная со стартовой конфигурации, должен решать следующие основные задачи [17]:

- исследование свойств и форм поведения простых МПМК;
- накопление знаний о свойствах и формах поведения простых МПМК;
- поиск методов создания конструкций с заданными функциональными свойствами, создающих необходимые для целей решения прикладных задач структуры и поведение;
- организация производства МПМК;
- отбор прототипов МПМК для включения в технологическую базу (базу знаний) для использования при создании объектов более высокого технологического уровня;
- осуществление контроля и управления процессами в едином информационном пространстве CALS-системы.

Выполнение непрерывной информационной поддержки процессов жизненного цикла разработки прикладных технологий и продуктов МПМК в ИПК является обязательным требованием для обеспечения сбора, накопления, анализа и систематизации технических и экспериментальных данных [16, 18] и предполагается осуществлять с помощью интегрированной с КИКС специализированной для данной прикладной области CALS-подсистемы, реализуемой с использованием современных информационных технологий, в т.ч. в области искусственного интеллекта и обработки больших данных.

Проведенный анализ условий функционирования ИПК МПМК с учетом ранее выполненной начальной детализации техпроцессов прототипирования МПМК [2, 15, 17] установил, что в ИПК МПМК целесообразно организовать цикл автоматического (эволюционного) проектирования и прототипирования объектов МПМК с учетом следующих особенностей:

- на начальном этапе физическое прототипирование выполняется по жесткому технологическому регламенту, предполагающему выполнение минимального количества ручных операций, а в дальнейшем процесс физического прототипирования может являться частью процесса автоматического проектирования, предполагая поиск эффективной последовательности и параметров технологических процессов реализации изделий МПМК;

- стремление построить техпроцесс для выполнения единым комплексным автоматическим устройством – фабрикатом;

- виртуальное прототипирование выполняется специализированной ИИУС – прототипом КИКС, предложенной для БНРТ, развернутой на базе вычислительно-коммуникационного комплекса оборудования, строящегося с использованием реальных и виртуальных (hyper-V) ЭВМ и сетевого оборудования, интегрированного со всеми объектами ИПК МПМК;

- среда развертывания и испытания прототипов интегрируется в ИИУС посредством датчиков (видеопоток, датчики потребления энергии, состояния актуаторов) и исполнительных устройств (приводы актуаторов) испытательного полигона;

- подготовка (маркировка) и монтаж/демонтаж прототипов на испытательный полигон осуществляется пока вручную, а в перспективе с использованием автоматических средств идентификации образцов.

На нижнем уровне КИКС интеграция с датчиками и исполнительными устройствами может быть осуществлена посредством встраиваемых вычислительно-коммуникационных средств (микроконтроллеров и микросистем на кристалле, интегрированных с коммуникационными устройствами), позволяющими осуществлять сбор и предварительную обработку сенсорной информации с датчиков, контроль и управление исполнительными устройствами – актуаторами, а также видеосъемку процессов.

При разработке программного обеспечения и информационных ресурсов ИПК необходимо учитывать требования организации эффективного интерфейса с интеллектуальными агентами, в т.ч. систем искусственного интеллекта и экспертных систем поддержки принятия решений.

Таким образом, проведенные декомпозиция и анализ выполняемых процессов схемы организации процессов автоматического проектирования и прототипирования МПМК с интеллектуальным управлением позволили в первом приближении построить представленную на рис. 1 схему архитектуры ИПК МПМК, который должен включать:

- вычислительно-коммуникационный комплекс, который предназначен для выполнения задач управления, виртуального прототипирования и оперирования данными;

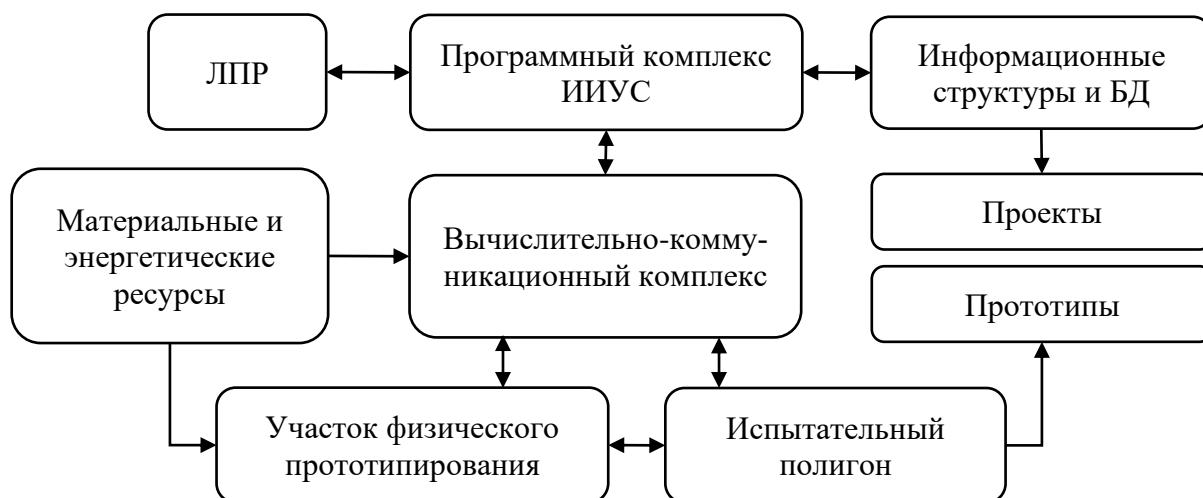


Рис. 1. Архитектура ИПК МПМК

Fig. 1. Architecture of RPC SPMC

- участок физического прототипирования, оснащенный необходимым технологическим оборудованием и оснасткой;
- испытательный полигон, представляющий реальную физическую среду функционирования разрабатываемых прототипов и оборудованный средствами приведения в действие прототипов и наблюдения за их поведением;
- программный комплекс интеллектуальной информационно-управляющей системы, оснащенный соответствующим программным обеспечением;
- БД и информационные структуры, содержащие исходную, оперативную и накапливаемую в процессе деятельности информацию.

Проектирование экспериментальной лабораторной системы МПМК

Основу вычислительно-коммуникационного комплекса составляет ЭВМ на базе ОС с гипервизором, в которой развернуты виртуальные машины управляющего сервера, сервера БД, сервера виртуального прототипирования и системы базового информационно-аналитического сервиса (БИАС) (рис. 2). Коммуникационная сеть организуется посредством сетевого оборудования (маршрутизатор локальной сети).

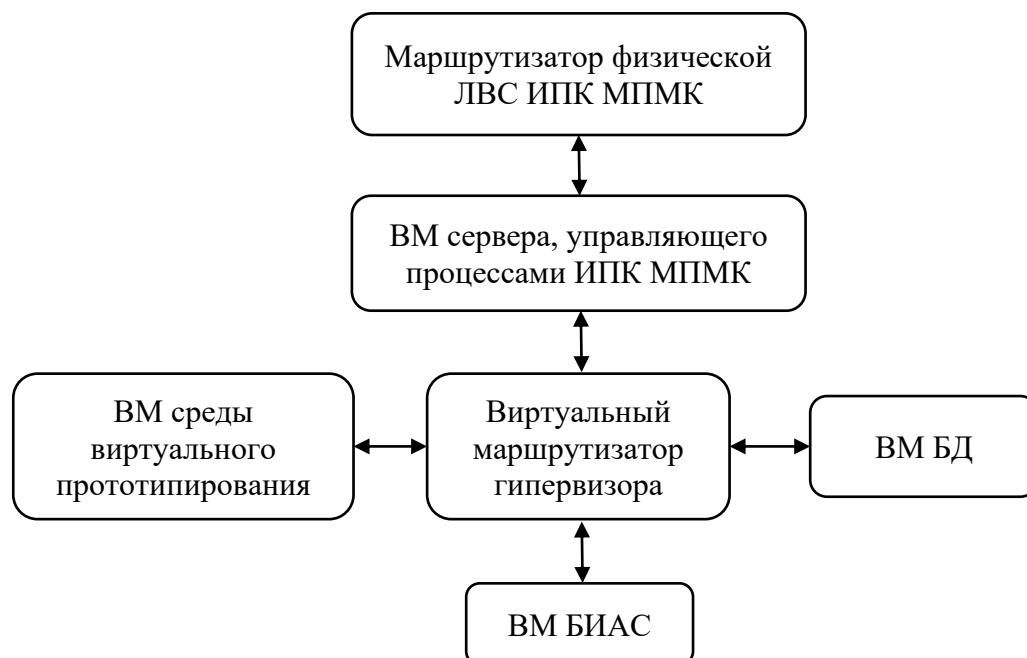


Рис. 2. Схема организации вычислительно-коммуникационного комплекса с использованием технологий виртуализации

Fig. 2. Scheme of organization of the computing and communications complex using virtualization technologies

Для выполнения описанных в работе процессов [2] на начальном этапе разработки экспериментальный участок физического прототипирования должен быть соответственно оборудован или иметь возможность доступа исполнителя к внешним услугам по следующим направлениям решаемых задач:

- 3D-печать деталей форм и технологической оснастки;
- лазерная резка деталей форм и технологической оснастки;
- ручная слесарно-механическая обработка и сборка МПМК на верстаке, оснащенный инструментами и оснасткой, а также ЭВМ автоматизированного рабочего места исполнителя (планшет/смартфон), интегрированного с КИКС (отображение заданий, ввод отчетов и состояний, событий);

- дегазация, сушка и промывка на специально спроектированной станции или с помощью набора соответствующих устройств.

Испытательный полигон содержит площадку, оснащенную системой освещения, IP-видеокамерами, принтером для печати самоклеек QR-кодов для автоматической идентификации прототипов и системой контроля и управления приводами актуаторов прототипов.

В соответствии с представленной архитектурой ИПК МПМК велась разработка экспериментальной лабораторной системы, схема которой представлена на рис. 3, согласно которой были запланированы, созданы и реализованы основные технические и программные решения, позволяющие запустить процессы САППИУ и пробные циклы СПУТЦ по материальному воплощению симуляций автоматически сгенерированных и отобранных виртуальных прототипов.



Рис. 3. Схема экспериментальной лабораторной системы для исследования процессов САППИУ и разработки ИПК МПМК

Fig. 3. Scheme of the experimental laboratory system to examine SADPIC processes and development of RPC SPMC

Разработка программного обеспечения ИПК МПМК

Программный комплекс ИПК МПМК строится в соответствии с предъявляемыми нами требованиями к действующему прототипу CALS-системы [16] и с учетом ее аппаратно-программной интеграции как подсистемы КИКС со средой физического прототипирования и испытательного полигона, реализуя рабочий прототип КИКС МПМК. При этом программный комплекс должен решать следующие основные задачи:

- информационное сопровождение процессов жизненного цикла разработки прикладных технологий и продуктов МПМК;
- развертывание и эксплуатация баз данных и баз знаний;

- журналирование, документирование и техдокументирование;
- оперативный контроль и управление процессами;
- выполнение вычислительных процессов виртуального прототипирования (численные расчеты, эволюционное моделирование, симуляция на физических движках, математический анализ и поддержка принятия решений);
- выполнение процессов базового информационно-аналитического сервиса (БИАС);
- интерфейс с интеллектуальными агентами и пользователями (ЛПР, персонал, сервисы ИИ и СППР).

При разработке программной среды виртуального прототипирования и организации эволюционных вычислительных процессов автоматического проектирования МПМК, подробно рассмотренной нами в работе [17], решались вопросы организации генетического кодирования информационных моделей проектов МПМК, их симуляции как физических объектов, комплексной оценки степени приближения к поставленным целям исследования/проектирования и отбора проектов прототипов по критериям допуска к их физической материализации.

Автоматическое проектирование воксельных конструкций организовано в виде линейного конвейера, который принимает в качестве входных данных описание используемых при построении поликуба типов вокселей и цель проектирования, отражающую желаемое поведение изготовленной конструкции МПМК (рис. 4).

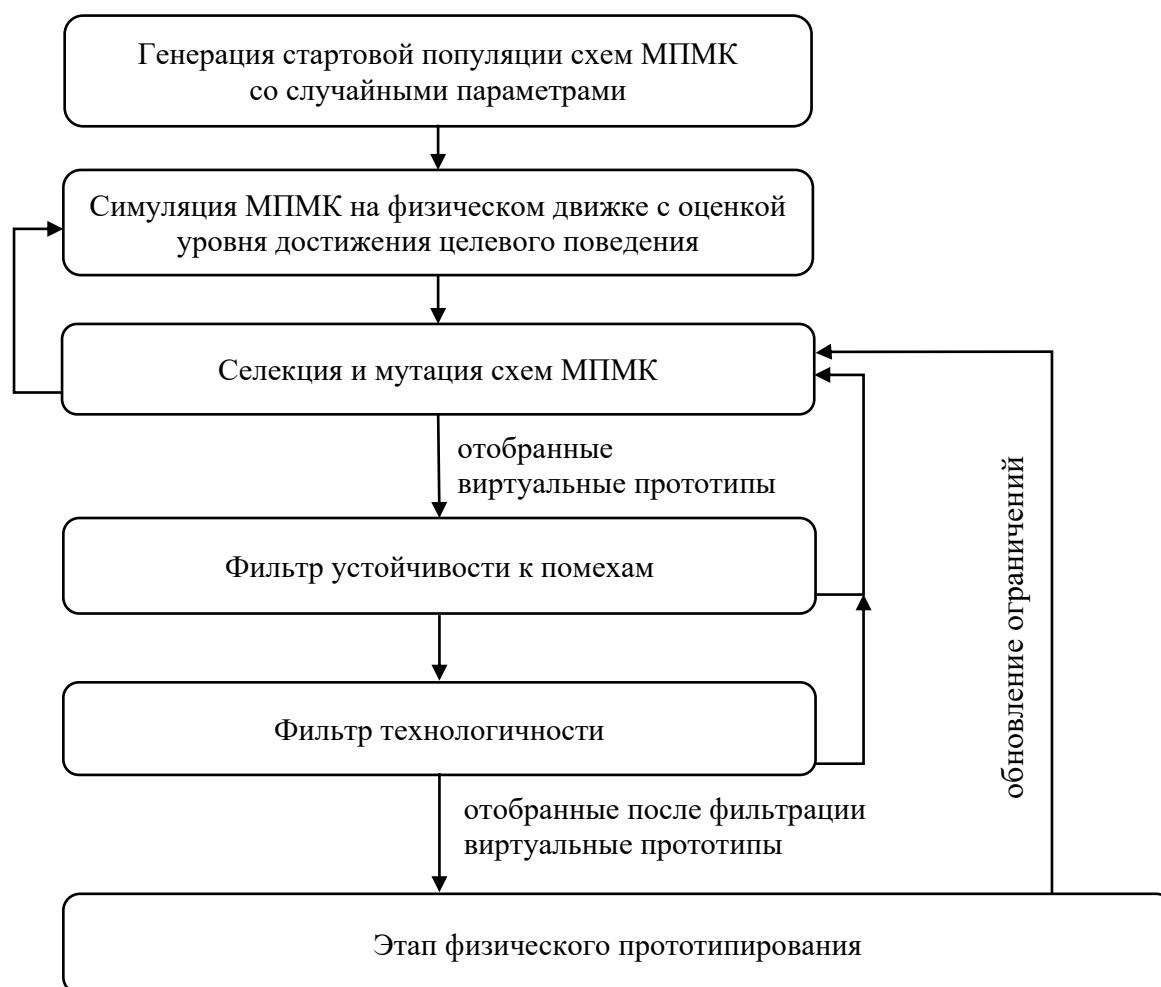


Рис. 4. Схема конвейера виртуального прототипирования МПМК

Fig. 4. Scheme of the SPMC virtual prototyping pipeline

Каждая воксельная конфигурация модели МПМК, представляемая в виде поликубов из мягких полимерных материалов с различной функциональностью, генетически кодируется с использованием *искусственных нейронных сетей, генерирующих композиционные паттерны (CPPN)*, при этом выход нейронной сети отображает пространственные координаты трехмерной декартовой решетки на одно значение, указывающее, есть ли воксел в этом месте и какого он функционального типа (например, активный или пассивный), или на иные значения параметров и режимов управления вокселя в данном месте.

Генерируемые таким образом модели МПМК используются в эволюционном отборе на основе генетического алгоритма, при котором развиваются структура и веса узлов нейронных сетей за счет мутационной модификации и отбора удачных конфигураций после оценки поведения воксельной МПМК в результате симуляции на физическом движке *Voxelyze* [19], за время, достаточное для проявления моделируемой конструкцией свойств, обеспечивающих решение поставленной прикладной задачи проектирования. Для визуализации симуляции виртуальных прототипов используется программная утилита *VoxCAD*, разработанной автором физического движка *Voxelyze*.

В результате выполнения вычислительным конвейером генетического алгоритма, начинающегося с генератора стартовой популяции случайных схем проектов МПМК, образуется множество проектов с эффективными схемами МПМК.

Ввиду наличия погрешностей моделирования высока вероятность существенных различий поведения между виртуальными и физическими прототипами. Поэтому эффективные проекты схем МПМК пропускаются через фильтр устойчивости к помехам, который позволяет проходить только тем проектам, которые сохраняют желаемое поведение в условиях шума, как простое и эффективное условие того, будет ли проект сохранять свое поведение при физическом прототипировании.

Устойчивые к шуму проекты МПМК затем пропускаются через фильтр технологичности (сложности сборки), удаляющий конструкции, которые не подходят для текущего метода сборки или вряд ли смогут масштабироваться для решения будущих более сложных задач. Правила фильтрации по факторам технологичности изготовления МПМК разрабатываются в процессе детализации и практической отработки конкретной технологии физического прототипирования МПМК. Проекты, которые успешно проходят через фильтр технологичности, затем на этапе физического прототипирования изготавливаются и оцениваются на испытательном полигоне путем сравнения реального поведения с поведением, предсказанным в симуляции.

Количественная оценка успешности переноса поведения в реальность формирует новые ограничения, которые передаются обратно в эволюционный алгоритм, который после обновления в новых циклах эволюции развивает конструкции не только производительные, но и соответствующие полученным из физической среды ограничениям, что увеличивает вероятность успеха последующих циклов автоматического проектирования и прототипирования.

Пробные запуски представленного процесса виртуального прототипирования для конфигурационного пространства $4 \times 4 \times 4$ с двумя функциональными типами вокселей показали работоспособность представленных алгоритмов, а получаемые в вычислительном процессе данные доступны для дальнейшей математической обработки и визуализации в среде симуляции и технического анализа.

Полученные в результате отбора лучшие из схем прототипов были реализованы в виде тестовых физических прототипов. При подготовке технической и технологической документации на физическое прототипирование конструктивные параметры схем прототипов были обработаны с использованием разработанной программы для автоматизированного построения 3D-моделей и спецификаций на сборку, передаваемых исполнителю участка физического прототипирования.

В процессе пусконаладки создаваемого участка физического прототипирования по полученным на этапе виртуального прототипирования схемам МПМК изготовлены пробные образцы, которые были протестированы на стендовой испытательной площадке, на которой проводилось наблюдение выполнения прототипом поставленной задачи с оценкой целевых показателей. Полученные данные показали для некоторых прототипов соответствие характера поведения в физической среде и возможность отбора их как результата автоматического проектирования конструкции. Измеренные значения показателей всех испытуемых прототипов возвращаются в генетический алгоритм и используются для обновления ограничений в эволюционном моделировании, исключая из процесса геномы неперспективных проектов и при необходимости усиливая доминирование удачных конструкций.

На следующем этапе разработки ИПК МПМК на основе разработанной экспериментальной лабораторной системы планируется создать автоматизированный испытательный полигон, оснащенный устройствами технического зрения и исполнительными устройствами для настройки систем управления прототипов, интегрированными с вычислительно-коммуникационным комплексом и его программным обеспечением КИКС, что в итоге превратит ИПК МПМК в полноценную киберфизическую среду автоматического проектирования и прототипирования МПМК.

Также актуальны и требуют реализации разработанных решений по задаче управления технологическим процессом и процессом накопления и обработки технических и экспериментальных данных:

- автоматизация технологических процессов средствами КИКС;
- использование экспертных систем и интеллектуальных систем поддержки принятия решений для управления вектором эволюционного поиска оптимальных МПМК для конкретных прикладных задач;
- формирование базы знаний о функциональных свойствах элементарных конструкций и устройств из блоков (агрегатов, модулей), построенных с их использованием;
- подготовка данных для принятия решений методами и средствами эконометрики;
- выполнение эконометрического построения моделей процесса и анализа данных по результатам эволюционного моделирования;
- работа базового информационно-аналитического сервиса (БИАС) КИКС.

Выводы

Актуальность исследования обусловлена недостаточностью теоретических и экспериментальных знаний, необходимых для создания САППИУ, необходимых для построения киберфизических систем и сред перспективных направлений робототехники: мягкой робототехники, биоробототехники, бионаноробототехники.

В процессе детализации архитектуры разрабатываемого ИПК для автоматического проектирования и прототипирования МПМК получены программные и технические решения, которые позволили спроектировать и реализовать основные компоненты лабораторной системы для проведения вычислительных и физических экспериментальных исследований процессов автоматического проектирования и прототипирования МПМК.

В процессе пусконаладки и отладки лабораторной системы выполнены тестовые запуски вычислительных и физических экспериментов и получены первые автоматически сгенерированные пробные образцы МПМК, подтверждающие работоспособность основных компонентов создаваемой экспериментальной технологической платформы.

Анализ полученных технических и экспериментальных данных позволяет строить модели процессов САППИУ, вести оптимизацию, а на базе созданной лабораторной системы вести разработку прототипа полноценного ИПК для автоматического проектирования и прототипирования МПМК, предназначенной для решения широкого спектра прикладных

задач мягкой робототехники и биоробототехники, а также использовать ее в качестве модельной системы для теоретического исследования возможностей создания аналогичной системы для БНРТ и комплексного представления знаний методов, средств и технологий, позволяющих за ограниченное время и ресурсы создавать эффективные системы автоматического проектирования и прототипирования конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н.* Поиск методов и исследование возможностей применения современных технологий виртуального прототипирования и конструирования бионженерных систем при проектировании бионаноробототехники // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2020. № 6(98). С. 34–42. DOI: 10.35330/1991-6639-2020-6-98-34-42. EDN: JNLSCR.
2. *Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н.* Мягкие полимерные мехатронные конструкции для применения биоинтегрированного подхода в мягкой робототехнике и биоробототехнике // Перспективные системы и задачи управления: Материалы XVII всероссийской научно-практической конференции и XIII молодежной школы-семинара, п. Домбай, 4–8 апреля 2022 года. Таганрог: ИП Марук М.Р., 2022. С. 302–313. EDN: RULOPE.
3. *Matas J., James S., Davison A.J.* Sim-to-real reinforcement learning for deformable object manipulation // Conference on Robot Learning. PMLR, 2018. Pp. 734–743.
4. *Заммоев А. У.* Перспективы развития методов и средств эволюционного моделирования для виртуального прототипирования бионаноробототехнических устройств и систем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 6-2(86). С. 157–164. EDN: YZKELZ.
5. *Kamm R.D., Bashir R., Arora N. et al.* Perspective: The promise of multi-cellular engineered living systems. APL bioengineering. 2018. Vol. 2. No. 4. P. 040901.
6. *Noor N., Shapira A., Edri R. et al.* 3D printing of personalized thick and perfusable cardiac patches and hearts. Advanced Science. 2019. Vol. 6. No. 11. P. 1900344.
7. *Cvetkovic C., Raman R., Chan V. et al.* Three-dimensionally printed biological machines powered by skeletal muscle. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014. Vol. 111. No. 28. Pp. 10125–10130.
8. *Kriegman S., Blackiston D., Levin M. et al.* A scalable pipeline for designing reconfigurable organisms. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020. Vol. 117. No. 4. Pp. 1853–1859.
9. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У., Нагоев З. В.* Бионаноробототехника: концептуализация, проблематика и задачи исследований // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2016. № 6(74). С. 11–17. EDN: XRUYRN.
10. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* Интеррепрезентативные сети (ИРС) и репрезентативность VR визуализации наноструктур и процессов в наносреде // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2016. № 4(72). С. 5–9. EDN: WKDXXD.
11. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* Доменная модель когнитивной инфокоммуникационной системы для интеллектуального медицинского онлайн-сервиса на базе бионаносенсорных устройств // Славянский форум. 2018. № 1(19). С. 104–113. EDN: YWXRMT.
12. *Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н.* Поиск, исследование и развитие технологий бионаноробототехники для устойчивого развития горных территорий в эпоху шестого технологического уклада // Устойчивое развитие горных территорий. 2018. Т. 10. № 3(37). С. 447–457. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-3-447-457. EDN: YONKLI.
13. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* Актуальные задачи бионаноробототехники в области виртуального прототипирования бионаноробототехники // Перспективные системы и задачи управления: Материалы XV всероссийской научно-практической конференции и XI молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах»,

Нижний Архыз, 5–9 октября 2020 года. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2020. С. 193–200. EDN: HDQFSF.

14. Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н. Доменная модель когнитивной информационно-коммуникационной системы как основа среды виртуального прототипирования устройств и систем бионаноробототехники // Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции «Цифровая трансформация науки и образования». Нальчик, 1–4 октября 2021 года. Нальчик, 2021. С. 140–148. EDN: DTKSPA.

15. Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У. Разработка элементов технологии экспериментального прототипирования мягких полимерных мехатронных конструкций // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 1(105). С. 12–24. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-12-24. EDN: VHTUQQ.

16. Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У. Проблема разработки теоретических основ проектирования и прототипирования устройств и систем бионаноробототехники в киберфизических системах и средах // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6(110). С. 28–38. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-28-38. EDN: ТТКАЕЛ.

17. Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н. Разработка техники виртуального прототипирования мягких полимерных мехатронных конструкций // Материалы XVIII всероссийской научно-практической конференции и XIV молодежной школы-семинара «Перспективные системы и задачи управления». п. Домбай, Карачаево-Черкесская Республика, 3–7 апреля 2023 года. Таганрог: Лукоморье, 2023. С. 302–313.

18. Бабешко В. Н. Информационная поддержка жизненного цикла изделий // Сборник научных трудов VIII международной научно-практической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития». Курск, 28 июня 2019 года. Том 1. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 24–26. EDN: TBUYKB.

19. Hiller J., Lipson H. Dynamic simulation of soft multimaterial 3d-printed objects. *Soft robotics*. 2014. Vol. 1. No. 1. Pp. 88–101.

REFERENCES

1. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Search for methods and research into the possibilities of using modern technologies for virtual prototyping and design of bioengineering systems in the design of bionanodevices and bionanorobotics systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2020. No. 6(98). Pp. 34–42. DOI: 10.35330/1991-6639-2020-6-98-34-42. EDN: JNLSCR. (In Russian)

2. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Soft polymer mechatronic structures for the application of a biointegrated approach in soft robotics and biorobotics. *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya* [Perspective systems and control problems]: Materials XVII vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XIII molodezhnoy shkoly-seminara. Dombay, Taganrog: IP Maruk M.R., 2022. Pp. 302–313. EDN: RULOPE. (In Russian)

3. Matas J., James S., Davison A.J. Sim-to-real reinforcement learning for deformable object manipulation. *Conference on Robot Learning*. 2018. Pp. 734–743.

4. Zammoev A.U. Prospects for the development of methods and means of evolutionary modeling for virtual prototyping of bionanorobotic devices and systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2018. No. 6-2(86). Pp. 157–164. EDN: YZKELZ. (In Russian)

5. Kamm R.D., Bashir R., Arora N. et al. Perspective: The promise of multi-cellular engineered living systems. *APL bioengineering*. 2018. Vol. 2. No. 4. P. 040901.

6. Noor N., Shapira A., Edri R. et al. 3D printing of personalized thick and perfusable cardiac patches and hearts. *Advanced Science*. 2019. Vol. 6. No. 11. P. 1900344.

7. Cvetkovic C., Raman R., Chan V. et al. Three-dimensionally printed biological machines powered by skeletal muscle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. Vol. 111. No. 28. Pp. 10125–10130.

8. Kriegman S., Blackiston D., Levin M. et al. A scalable pipeline for designing reconfigurable organisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. Vol. 117. No. 4. Pp. 1853–1859.

9. Abutalipov R.N., Zammoev A.U., Nagoev Z.V. Bionanorobotics: conceptualization, problems and research tasks. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2016. No. 6(74). Pp. 11–17. EDN: XRUYRN. (In Russian)

10. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Interrepresentational networks (IN) and representativeness of VR visualization of nanostructures and processes in the nanoenvironment. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2016. No. 4(72). Pp. 5–9. EDN: WKDXXD. (In Russian)

11. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Domain model of a cognitive infocommunication system for an intelligent medical online service based on bionano-sensory devices. *Slavyanskiy forum* [Slavic Forum]. 2018. No. 1(19). Pp. 104–113. EDN: YWXRMT. (In Russian)

12. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Search, research and development of bio-nanorobotics technologies for the sustainable development of mountain territories in the era of the sixth technological structure. *Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy* [Sustainable development of mountain territories]. 2018. Vol. 10. No. 3(37). Pp. 447–457. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-3-447-457. EDN: YOHKLJ. (In Russian)

13. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Current problems of bionanorobotics in the field of virtual prototyping of bionanodevices. *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya* [Advanced systems and control problems]: *Materialy XV vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XI molodezhnoy shkoly-seminara "Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh"*. Nizhniy Arkhyz, 5–9.10.2020. Rostov-on-Don: SFU, 2020. Pp. 193–200. EDN: HDQFSF. (In Russian)

14. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Domain model of a cognitive information and communication system as the basis for an environment for virtual prototyping of devices and bionanorobotics systems. *Tsifrovaya transformatsiya nauki i obrazovaniya: Sbornik nauchnykh trudov II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Nal'chik, 1–4.10.2021. Pp. 140–148. EDN: DTKSPA. (In Russian)

15. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Development of elements of technology for experimental prototyping of soft polymer mechatronic structures. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022. No. 1(105). Pp. 12–24. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-12-24. EDN: VHTUQQ. (In Russian)

16. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. The problem of developing theoretical foundations for the design and prototyping of bionanorobotics devices and systems in cyberphysical systems and environments. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022. No. 6(110). Pp. 28–38. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-28-38. EDN: TTKAEL. (In Russian)

17. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Development of technology for virtual prototyping of soft polymer mechatronic structures. *Materialy XVIII vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XIV molodezhnoy shkoly-seminara «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya*. Dombay, 3–7.04.2023. Taganrog: Lukomor'e, 2023. Pp. 302–313. (In Russian)

18. Babeshko V.N. Information support for the life cycle of products. *Cbornik nauchnykh trudov VIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Tekhnika i tekhnologii: puti innovatsionnogo razvitiya»*. Kursk, 28.06.2019. Southwestern State University. Vol. 1. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2019. Pp. 24–26. EDN: TBUYKB. (In Russian)

19. Hiller J., Lipson H. Dynamic simulation of soft multimaterial 3d-printed objects. *Soft robotics*. 2014. Vol. 1. No. 1. Pp. 88–101.

Информация об авторах

Заммоев Аслан Узейрович, канд. техн. наук, зав. совместной лабораторией «Андроидная техника» и «Бионаноробототехника», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

zammoev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7966-3557>

Абуталипов Ренат Надельшаевич, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. совместной лаборатории «Андроидная техника» и «Бионаноробототехника», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

bnt_nat_2016@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0187-563X>

Information about the authors

Zammoev Aslan Uzeyrovich, Candidate of Technical Sciences, Head of the joint laboratory “Android Technology” and “Bionanorobotics”, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;

zammoev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7966-3557>

Abutalipov Renat Nadelshaeovich, Candidate of Technical Sciences, Senior researcher of the joint laboratory “Android Technology” and “Bionanorobotics”, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;

bnt_nat_2016@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0187-563X>