

Nandanwar Anuj – Indian Institute of Technology Mandi; e-mail: anujnandanwar@gmail.com; Parashar Road, Tehsil Sadar, Near Kataula, Kamand, Himachal Pradesh; phone: +918989021051; PhD; research associate.

Rybak Larisa Alexandrovna – Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences (FRC CSC RAS); e-mail: rlbgtu@gmail.com; Moscow, Russia; phone: +79511307230; dr. of eng. sc.; chief researcher.

Dyakonov Dmitry Alekseevich – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: furno.xl@yandex.ru; Belgorod, Russia; phone: +79606958167; research engineer.

УДК 007.51

DOI 10.18522/2311-3103-2025-5-83-93

Д.Г. Макоева, И.Р. Тлупов, А.О. Шогенов

ЕСТЕСТВЕННО-ЯЗЫКОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫМИ РОБОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Исследование нацелено на исследование потенциала систем управления строительными роботами посредством естественного языка. Именно отсутствие надежных систем обработки естественного языка служит тем сдерживающим фактором, что не дает интеллектуальной робототехнике в полной мере раскрыть свои потенциал. Работа дает обзор современных роботизированных строительных систем, которые используются для облегчения и улучшения строительных и инженерных процессов и задач. Объединяет эти все системы отсутствие естественно-языкового управления. В настоящей статье мы представляем принципы, алгоритмы и методы, позволяющие интеллектуальному агенту проникать в суть контекста ситуации, разворачивающейся на поле строительных и инженерных задач. В основе подхода лежит мультиагентная нейрокогнитивная архитектура, служащая своеобразным инструментом для моделирования процесса автоматической интерпретации фраз, взятых из ограниченного подмножества естественного языка. Чтобы интеллектуальный агент смог верно интерпретировать входящее сообщение, ему необходимо безошибочно определить условия, действия, свойства и отношения, имеющие место в системе «интеллектуальный агент – окружающая среда». Только после этого агент обретает способность интерпретировать контекст текущего диалога и генерировать высказывания, необходимые для проектирования кооперативного поведения, направленного на совместное преодоление технических преград. Одной из наиболее распространенных задач, требующих своего решения в быстроразвивающейся области робототехники, является разработка диалоговой системы управления, способной координировать совместное человеко-машинное поведение и интерпретировать цели и условия миссий, изложенные на естественном языке. Система управления, опирающаяся на естественный язык, является неотъемлемой частью интеллектуальной системы, фундаментом которой служит самоорганизующаяся мультиагентная нейрокогнитивная архитектура. Ее главная цель – наладить беспрепятственное общение между человеко-машинными коллективами, для того чтобы они могли совместно ставить, описывать и успешно выполнять сложные строительные задачи. основополагающим элементом подхода является мультиагентность, позволяющая системе принятия решений робота быть гибкой, адаптивной и непрерывно расширять диапазон своих знаний, генерируя вопросы, необходимые для дальнейшей работы.

Мультиагентная система; нейрокогнитивная архитектура; естественно-языковое управление; робототехнические системы.

D.G. Makoeva, I.R. Tlupov, A.O. Shogenov

NATURAL LANGUAGE CONTROL OF CONSTRUCTION ROBOTIC SYSTEMS

The study aims to investigate the potential of natural language control systems for construction robots. It is the lack of reliable natural language processing systems that serves as a limiting factor that prevents intelligent robotics from fully realizing its potential. The work provides an overview of modern robotic construction systems that are used to facilitate and improve construction and engineering processes and tasks. What unites all these systems is the lack of natural language control. In this paper, we present principles, algorithms, and methods that allow an intelligent agent to penetrate the essence of the context of a situation unfolding in the field of construction and engineering tasks. The approach is based

on a multi-agent neurocognitive architecture, which serves as a kind of tool for modeling the process of automatic interpretation of phrases taken from a limited subset of natural language. In order for an intelligent agent to correctly interpret an incoming message, it must accurately determine the conditions, actions, properties, and relationships that take place in the "intelligent agent - environment" system. Only then does the agent gain the ability to interpret the context of the current dialogue and generate statements necessary for designing cooperative behavior aimed at jointly overcoming technical obstacles. One of the most common problems requiring a solution in the rapidly developing field of robotics is the development of a dialogue control system capable of coordinating joint human-machine behavior and interpreting goals and mission conditions set out in natural language. A control system based on natural language is an integral part of an intelligent system, the foundation of which is a self-organizing multi-agent neurocognitive architecture. Its main goal is to establish seamless communication between human-machine teams so that they can jointly set, describe and successfully complete complex construction tasks. The fundamental element of the approach is multi-agency, which allows the robot's decision-making system to be flexible, adaptive and continuously expand the range of its knowledge, generating questions necessary for further work.

Multi-agent system; neurocognitive architecture; natural language control; robotic systems.

Введение. По данным Всемирного экономического форума, в настоящее время глобальная строительная отрасль является отраслью стоимостью 15 триллионов долларов, что составляет около 10% валового внутреннего продукта (ВВП). В настоящее время многие отрасли (например, здравоохранение, биомедицина и т.д.) вложили значительные средства в изучение и внедрение цифровых технологий и искусственного интеллекта (ИИ) для повышения своей производительности и продуктивности, а также создания новых бизнес-возможностей. Строительная отрасль является одной из крупнейших отраслей, она также инвестировала достаточно времени, усилий и ресурсов для перехода к цифровым технологиям для достижения более высокой производительности и эффективности.

Строительные роботы используют передовые технологии для более точного выполнения задач, для получения более качественных результатов и меньшего количества ошибок. В сфере гражданского и промышленного строительства произошла революция, что привело к значительному улучшению в области строительной робототехники. Эти передовые роботы предназначены для более точной обработки сложных задач на строительных площадках [1, 2]. В отличие от обычных методов строительства, которые преимущественно основаны на ручном труде, строительные роботы представляют преимущества с точки зрения повышения точности, эффективности и безопасности [3]. Оборудованные современными датчиками [4], актуаторами [5] и когнитивными алгоритмами [6], эти роботы превосходно ориентируются на сложных объектах, выдерживают значительные нагрузки и выполняют сложные задачи с минимальным человеческим контролем. Развитие строительной робототехники обещает сокращение несчастных случаев и травм на объекте с помощью промышленных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые могут выполнять опасные или физически тяжелые для людей работы [7, 8].

С точки зрения экономии затрат и контроля бюджета строительные роботы привлекли интерес строительных организаций из-за потенциала для увеличения производства при одновременном снижении затрат на рабочую силу [9]. Улучшенное использование ресурсов в результате их внедрения приводит к возможной экономии затрат и сокращению продолжительности проектов. Строительные роботы могут изменить методы строительства, улучшить рабочие процессы и повысить общую конкурентоспособность сектора. Строительные дроны также относительно универсальны и находят применение в различных строительных работах, таких как выемка грунта, укладка бетона, сварка и инспекция. Их эксплуатационная гибкость при выполнении работ, которые были бы трудными или опасными для человека, открывает новые возможности для строительных проектов [10]. В социальной системе, которая ставит на первое место благополучие людей, реализация мер безопасности для людей-работников считается существенной инвестицией на строительных площадках. Более того, строительные роботы могут работать в сложных условиях, таких как опасные строительные площадки или удаленные места, без спе-

специализированных защитных мер. Эта возможность значительно снижает финансовое бремя, связанное с реализацией мер предосторожности в этих экстремальных зонах. В связи с этим строительные роботы имеют значительную ценность для внедрения экономически эффективных и экологически безопасных методологий строительства.

В дополнение к их эксплуатационным преимуществам, строительные роботы способствуют устойчивости в строительном секторе [11]. Их стабильная работа сокращает количество ошибок и отходов, тем самым снижается негативное воздействие строительных проектов на окружающую среду [12].

Одна из самых востребованных сфер применения строительной робототехники – кладка кирпича. Такие роботы, как SAM (Semi-Automated Mason, полуавтоматический каменщик), могут укладывать кирпичи в несколько раз быстрее, чем люди, обеспечивая высокую точность [13, 14].

Строительные роботы могут поднимать тяжести, тем самым снижая усталость рабочих и минимизируя связанные с этим ошибки. Роботы, оснащенные технологией 3D-печати, производят революцию в строительстве. Эти системы могут «печатать» целые конструкции слой за слоем, создавая сложные формы, которые было бы трудно или невозможно достичь с помощью традиционных методов. Такие компании, как ICON и Apis Cor [15, 16], стали пионерами в области 3D-печати домов и коммерческих конструкций.

Задачи по сносу зданий, который зачастую являются опасными и трудоемкие, все чаще выполняются роботами. Такие демонтажные роботы как Brokk [17], могут безопасно демонтировать конструкции, работать в ограниченном пространстве и точно обращаться с тяжелыми инструментами, обеспечивая безопасность работников.

Сварка в строительстве часто связана с точностью и опасностью, особенно в условиях высокой нагрузки, таких как судостроение или строительство небоскребов. Роботы-сварщики могут выполнять эти задачи точно и последовательно. В модульном строительстве роботизированные сборочные линии обеспечивают точное соединение компонентов, улучшая общую целостность конструкции [18].

Дроны и роботизированные гусеничные машины используются для осмотра и обслуживания зданий. Оснащенные камерами и датчиками высокой четкости, эти роботы могут выявлять структурные проблемы, следить за ходом работ и выполнять работы по техническому обслуживанию, такие как очистка или герметизация трещин, даже в недоступных местах [13].

Автономные роботы и транспортные средства оптимизируют транспортировку материалов на строительных площадках. Автоматизированные погрузчики, роботизированные краны и конвейерные системы могут эффективно перемещать тяжелые материалы, сокращая задержки и оптимизируя рабочие процессы [13].

Естественно-языковой интерфейс к интеллектуальной строительной робототехнике на основе мультиагентного подхода. В настоящее время существует ряд проблем, связанных с развитием интеллектуальной строительной робототехники, которые обусловлены отсутствием надежных систем распознавания и понимания речи. Внедрение сложных информационных технологий требует изменения подходов к управлению автоматизированными системами для обеспечения их более эффективного использования.

Потребность в речевом общении с компьютерами и роботами является естественной и часто необходимой. Она стимулируется не только стремлением разработчиков создать комфортные условия для пользователей, но и существованием областей, где голосовые команды могут быть наиболее подходящими или даже единственно возможными в определенных ситуациях.

К настоящему времени разработаны системы распознавания и понимания речи, которые внедрены не только в программных, но и в роботизированных агентов. Однако эти системы демонстрируют высокую точность распознавания и релевантность синтеза высказываний в режиме персонального диалога с пользователем, но снижают свою эффективность в зашумленной среде [19–33].

Для решения этой проблемы в [34–36] предложены методы и алгоритмы динамической фокусировки внимания автономных программных агентов на словах и фразах, определяющих контекст конкретного диалога. Эти методы основаны на самоорганизации управляющей мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры таких агентов.

Мультиагентная нейрокогнитивная архитектура представляет собой систему, состоящую из множества интеллектуальных агентов-нейронов, взаимодействующих друг с другом посредством контрактов.

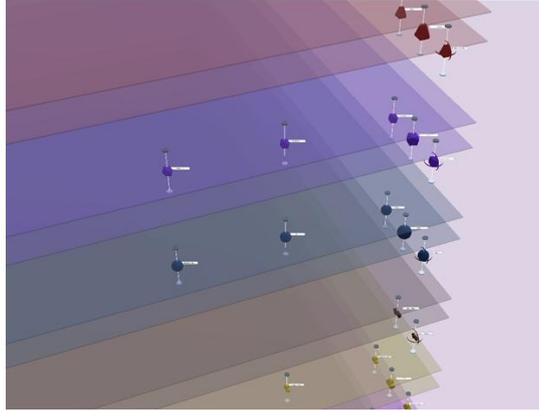


Рис. 1. Мультиагентная нейрокогнитивная архитектура

Контракты необходимы для достижения общесистемных целей, а также для взаимодействия с внешней средой и получения дополнительной энергии. В данном контексте энергия рассматривается как целевая функция агента в задаче максимизации продолжительности его жизни при ограничениях, накладываемых внешней средой. Под контрактом понимается зависимость, которая возникает и развивается, когда агенты берут на себя обязательства друг перед другом на условиях взаимовыгодного обмена энергией на знания.

Агенты-нейроны \aleph_i^j , где i – название агента, j – тип агента, для достижения внутренней цели,

$$Z = E(s_{it_c}^j) \xrightarrow{a_{it_c}^j} \max, \quad (1)$$

направленной на увеличение собственной энергии E , поддерживают взаимодействие друг с другом посредством отправки естественно-языковых сообщений. В (1) $s_{it_c}^j$ – это особая ситуация, в которой оказался агент в момент времени t_c , $a_{it_c}^j$ – это действия, которые нужно совершить, чтобы из текущей ситуации перейти к ситуации, которая приведет к увеличению энергии [36–40]. Коммуникация между агентами происходит в соответствии с договорными обязательствами – «мультиагентный контракт [36–40]. Контракт – это алгоритм, согласно которому агент-нейрон \aleph_i^j типа j делает рассылку сообщений всем агентам-нейронам \aleph_i^l типа l , в соответствии со списком рассылки m_{iq}^l . Агент \aleph_i^j получает вознаграждение в виде энергии e_n^j за заключенный контракт с агентом \aleph_i^l . Энергия – безразмерная величина. При этом возникает мультиагентное экзистенциальное отображение или ν – отображение (айн-отображение), согласно которому агенты на запрос контрагентов сообщают требуемую информацию в обмен на энергию [36–40]. Такое отображение записывается в виде

$$\aleph_i^j = \nu(\aleph_i^l) \quad (2)$$

Каждый агент-нейрон обладает собственной базой знаний, на основе которой он функционирует. Знания агента представляют собой продукцию, условная часть которой определяет начальную и конечную ситуацию, а ядро – действие, которое переводит агента из начальной ситуации в конечную [36–40]. Эти знания могут быть записаны в виде:

$$k_i^{jh} = (s_{t_i\tau_a}^{j\tau_b} \wedge s_{t_i\tau_c}^{h\tau_f}; a_{t_i\tau_d}^{jh\tau_f}), \tau_a \leq \tau_b \leq \tau_c \leq \tau_d \leq \tau_f, \quad (3)$$

где $s_{t_i\tau_a}^{j\tau_b}$ – начальная ситуация, $s_{t_i\tau_c}^{h\tau_f}$ – конечная (желаемая) ситуация, $a_{t_i\tau_d}^{jh\tau_f}$ – действие, которое должен выполнить агент, чтобы из начальной перейти в желаемую ситуацию [36–40].

При этом условная часть может содержать две и более ситуации связанные условным «и» в виде

$$L_i^j = s_{t_i\tau_a}^{j\tau_b} \wedge s_{t_i\tau_c}^{h\tau_d} \wedge \dots \wedge s_{t_i\tau_d}^{h\tau_f}, \quad (4)$$

а ядро состоять из нескольких действий и записано в виде

$$H_i^j = a_{t_i\tau_a}^{jh\tau_b} \wedge a_{t_i\tau_c}^{jh\tau_d} \wedge \dots \wedge a_{t_i\tau_d}^{jh\tau_f}. \quad (5)$$

Тогда, учитывая (4) и (5), знание (3) можно переписать в виде

$$k_i^{jh} = L_i^j \Rightarrow H_i^j. \quad (6)$$

Способность агента вступать в договорные отношения с агентами-нейронами определённого типа называется валентностью [38].

В рамках данного подхода понимание высказываний представляет собой сложный процесс, происходящий в мозге человека, который мы планируем смоделировать с помощью мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры.

В разрабатываемой нами интеллектуальной системе представлены агенты разных лингвистических типов: морфологический, синтаксический, семантический и лексический. Для представления значения в системе необходимы два вида агентов: агенты-слова и соответствующие им агенты-понятия. Агенты-слова являются хранилищем фонетической, парадигматической и синтагматической информации. Агенты-понятия хранят в своих базах знаний описание объекта, обозначаемого этим словом. Между двумя агентами, хранящими разную информацию об одной и той же единице языка, устанавливается связь. Активация одного из них влечёт за собой активацию второго [36–40].

Подробнее о механизме мультиагентной репрезентации элементов естественного языка говорится в работе [38], механизм обоснования символов и мультиагентные нейрокогнитивные модели семантики естественного языка подробно описаны в [37–39].

Мультиагентная нейрокогнитивная архитектура имеет функциональное сходство со структурой мозга. Архитектура имеет многослойную структуру (см. рис. 1), где каждый слой реализует определённую когнитивную функцию и состоит из нейронов-агентов (агнейронов) определённого типа. Основная цель агнейронов – найти путь в дереве решений, который приводит к максимизации собственной энергии путём заключения и выполнения мультиагентных контрактов.

Контракт – это алгоритм, по которому агенты взаимодействуют друг с другом. Взаимодействие происходит путём обмена сообщениями в соответствии со своими базами знаний. Знания представляют собой продукционные правила, содержащие текущее и желаемое состояние агнейрона, а также действие, которое необходимо выполнить для перехода из одного состояния в другое. Система является рекурсивной, поэтому каждый агнейрон состоит из акторов, взаимодействие которых происходит по тем же принципам.

Интеллектуальный агент воспринимает информацию через систему датчиков, а от них – к соответствующим агнейронам определённого типа. Если в архитектуре отсутствуют агенты, отвечающие за входящую информацию, они создаются по запросу специальными нейронными фабриками. [40].

В [41] утверждается, что понимание языка в МАС представляет собой сложный процесс, который включает в себя интерпретацию высказываний в терминах элементов графа проблемной ситуации, а также проверку этих процессов на полноту и непротиворечивость на уровне имитационной модели. Оба процесса имеют первостепенное значение. Первый направлен на использование всех мультиагентных групп, участвующих в

функциональном представлении слов и фраз, используемых в высказывании на естественном языке. С их помощью формируется описание текущего состояния системы «интеллектуальный агент – окружающая среда» на основе идентификации фактов. Эти факты представляются в интеллектуальной системе через агентов событийного типа и активацию причинно-следственных связей этих агентов.

Функциональное представление этих фактов в мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре невозможно осуществить без функционального представления всех элементов предикатной структуры. Наиболее распространённой формой предиката, используемой в функциональном представлении интеллектуального агента, является подтверждение того, что некоторые распознанные объекты обладают определёнными признаками и связями с другими агентами. В мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре должны быть представлены средства для функционального представления объектов, действий и атрибутов.

Эти задачи выполняются конкретными агентами, способными распознавать эти объекты, атрибуты и отношения (агент-объект, агент-действие, агент-атрибут). Можно сказать, что процесс формирования фактов об окружающей среде в нейрокогнитивной архитектуре интеллектуального агента является мультиагентным процессом, в котором множество агентов принимают участие посредством мультиагентных контактов. [42].

В контексте применения интеллектуальной системы в роботизированных системах, ряд данных, полученных об окружающей среде, можно назвать контекстом текущей ситуации. Контексты могут быть сформированы на основе ограниченного словаря, разработанного для сельскохозяйственных целей. Этот ограниченный набор может включать слова и фразы, характерные для данной области применения.

Программная реализация управления строительным роботом. Система управления на естественном языке является частью мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры, компоненты которой базируются на посту оператора и на бортовом компьютере строительного робота. Система поддерживает диалоги на естественном языке в человеко-машинных коллективах для выполнения совместных миссий.

Режим диалога используется для прояснения задач и подтверждения понимания содержания и последовательности целей, ограниченных областью использования данного робота.

Сигналы с датчиков поступают в программу с помощью использования протокола обмена данными с микроконтроллерами (UPIO – универсальный протокол ввода/вывода). На основе полученных показаний программа сможет вычислить положение робота и отправляет данные в мультиагентную архитектуру управления. Она строит модель положения робота и его манипуляторов, получает команду от системы принятия решений и формирует модель их поведения [26].

Интерфейс системы позволяет оператору взаимодействовать с роботом посредством чата. Оператор может передать роботу задание через системный чат, предоставив ему всю необходимую информацию (координацию, режим работы, тип работы и т.д.).

После получения этой информации система запускает мультиагентную обработку высказывания на естественном языке. Входная строка разделяется на символы на символическом уровне мультиагентной архитектуры. Если появляется новый символ, создаётся новое мультиагентное представление этого символа, и в следующий раз, когда эти символы появятся в системе, они будут сразу идентифицированы. После получения миссии интеллектуальной системе робота может потребоваться задать некоторые вопросы для заполнения всех необходимых данных для выполнения процедуры. Вопрос, сгенерированный системой на естественном языке, может быть отправлен оператору через тот же чат, и он может предоставить любую недостающую информацию. Когда вся необходимая информация для выполнения миссии предоставлена, робот начинает собирать информацию со своих датчиков, чтобы спланировать свои рабочие процессы.

Заключение. В статье рассматривается применение системы управления на естественном языке для строительных роботов. Система управления на естественном языке является частью интеллектуальной системы, основанной на самоорганизующейся мульт-

тиагентной нейрокогнитивной архитектуре. Основная цель системы – обеспечить взаимодействие между человеком и машиной для выполнения сложных задач в строительной сфере. Подход основан на мультиагентности, что позволяет системе принятия решений робота быть динамичной и расширять свои знания путём генерации вопросов. Обеспечивается обмен сообщениями между операторами и автономными агентами в рамках человеко-машинного коллектива. В программе реализованы функции авторизации пользователя, хранения списка миссий и управления списком роботов. Также предусмотрена возможность обмена сообщениями между участниками миссии, в качестве которых могут выступать как другие пользователи, так и автономные роботы.

Большинство интеллектуальных систем разрабатываются с использованием нейронных сетей. К сожалению, этот подход имеет ряд недостатков. Главный из них – проблема переобучения. Нейронные сети имеют тенденцию запоминать предыдущие ответы и поведение, поэтому они не могут быть чувствительны к незначительным изменениям входных данных и условий, которые могут привести к неверным решениям и действиям. Вторым недостатком нейронных сетей является невозможность отслеживания процесса принятия решений. Обе эти проблемы можно решить с помощью мультиагентной системы. Использование двунаправленного чата позволяет давать подробные инструкции и задавать уточняющие вопросы в случае неопределённости условий. 3D-моделирование позволяет нам отслеживать процесс «ментальной обработки», происходящей в мультиагентной системе, и корректировать его при необходимости. Более того, это взаимодействие можно рассматривать как формальное представление обработки естественного языка.

В дальнейшем планируется проведение экспериментальных исследований с целью проверки предлагаемого подхода к обучению интеллектуальной системы робота распознавать, понимать и генерировать ограниченный набор языковых единиц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Liu Y. et al.* Robotics in the construction sector: Trends, advances, and challenges // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2024. – Vol. 110, No. 2. – P. 72.
2. *Rathore M.M. et al.* The role of AI, machine learning, and big data in digital twinning: A systematic literature review, challenges, and opportunities // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 32030-32052.
3. *Aghimien D.O. et al.* Mapping out research focus for robotics and automation research in construction-related studies: A bibliometric approach // *Journal of Engineering, Design and Technology*. – 2020. – Vol. 18, No. 5. – P. 1063-1079.
4. *Li G. et al.* Skin-inspired quadruple tactile sensors integrated on a robot hand enable object recognition // *Science Robotics*. – 2020. – Vol. 5, No. 49. – P. eabc8134.
5. *Suzumori K., Faudzi A.A.* Trends in hydraulic actuators and components in legged and tough robots: a review // *Advanced Robotics*. – 2018. – Vol. 32, No. 9. – P. 458-476.
6. *Zhang J., Wang M.* A survey on robots controlled by motor imagery brain-computer interfaces // *Cognitive Robotics*. – 2021. – Vol. 1. – P. 12-24.
7. *Akinlolu M. et al.* A bibliometric review of the status and emerging research trends in construction safety management technologies // *International Journal of Construction Management*. – 2022. – Vol. 22, No. 14. – P. 2699-2711.
8. *Akinosho T.D. et al.* Deep learning in the construction industry: A review of present status and future innovations // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – Vol. 32. – P. 101827.
9. *Gharbia M. et al.* Robotic technologies for on-site building construction: A systematic review // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – Vol. 32. – P. 101584.
10. *Maskuriy R. et al.* Industry 4.0 for the construction industry: Review of management perspective // *Economies*. – 2019. – Vol. 7, No. 3. – P. 68.
11. *Forcael E. et al.* Construction 4.0: A literature review // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, No. 22. – P. 9755.
12. *Biswal P., Mohanty P.K.* Development of quadruped walking robots: A review // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2021. – Vol. 12, No. 2. – P. 2017-2031.
13. *Yogesh G.* Construction Robotics: Revolutionizing the Building Industry // *Journal of Architectural Engineering Technology*. – 2024. – Vol. 13, No. 418.
14. Электронный ресурс. – URL: <https://cdn.thomasnet.com/ccp/00142951/263811.pdf> (дата обращения: 10.09.2024).
15. Электронный ресурс. – URL: <https://iconbuild.com/robotics> (дата обращения: 19.10.2024).
16. Электронный ресурс. – URL: <https://apis-cor.com/> (дата обращения: 10.02.2025).

17. Электронный ресурс. – URL: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/product-information/welding-automation/robotic-welding> (дата обращения: 15.12.2024).
18. Электронный ресурс. – URL: <https://www.brokk.kz/> (дата обращения: 23.11.2024).
19. *Stenman M.* Automatic speech recognition. An evaluation of Google Speech. – 2015.
20. Электронный ресурс "Cloud Speech-to-Text," Google. – URL: <https://cloud.google.com/speech-to-text/> (дата обращения: 19.01.2022).
21. *Reis A., Paulino D., Paredes H., Barroso I., Monteiro M.J., Rodrigues V.* Using intelligent personal assistants to assist the elderly: an evaluation of Amazon Alexa, Google Assistant, Microsoft Cortana, and Apple Siri // 2-nd International Conference on Technology and Innovation in Sports, Health and Wellbeing (TISHW). – 2018. – P. 1-5.
22. *Brill T., Munoz L., Richard J.* Siri, Alexa, and other digital assistants: A study of customer satisfaction with artificial intelligence applications // *Journal of Marketing Management*. – 2019. – Vol. 35, No. 15-16. – P. 1401-1436.
23. *Tulshani A.S., Dhage S.N.* Survey on Virtual Assistant: Google Assistant, Siri, Cortana, Alexa // *Communications in Computer and Information Science*. – 2019. – 968. – P. 190-201.
24. *Гаврилович Н.В., Сейтвелиева С.Н.* Анализ коммерческих систем распознавания речи с открытым API // *Таврический научный обозреватель*. – 2016. – № 6 (11). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-kommercheskih-sistem-raspoznavaniya-rechi-s-otkrytym-api> (дата обращения: 23.01.2022).
25. Microsoft Corporation. Exploring New Speech Recognition and Synthesis APIs in Windows Vista. Microsoft. – URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/archive/msdn-magazine/2006/january/exploring-speech-recognition-and-synthesis-apis-in-windows-vista> (дата обращения: 24.04.2022).
26. *Rodemann T.* Towards Speech Acquisition in Natural Interaction on ASIMO // *Journal of the Robotics Society of Japan*. – 2010. – 28.1. – P. 18-22.
27. *Heracleous P., Yoneyama A.* A comprehensive study on bilingual and multilingual speech emotion recognition using a two-pass classification scheme // *PloS one*. – 2019. – Vol. 14, No. 8. – P. 220-386.
28. *Bogdanov A., Dudorov E., Kutlubaev I., Permyakov A., Pronin A.* Control System of a Manipulator of the Anthropomorphic Robot FEDOR // 12th International Conference on Developments in e-Systems Engineering. IEEE, INSPEC Accession Number 9557273. – 2019. – P. 449-453.
29. *Stolcke A., Droppo. J.* Comparing Human and Machine Errors in Conversational Speech Transcription // *Interspeech*. – 2017. – P. 137-141.
30. *Saon G., Kurata G., Sercu T., Audhkhasi K., Thomas S., Dimitriadis D., Cui X., Ramabhadran B., Picheny M., Lim L.-L., Roomi B., Hall P.* English Conversational Telephone Speech Recognition by Humans and Machines // *INTERSPEECH*. – 2017
31. *Glenn M.L. et al.* Transcription Methods for Consistency, Volume and Efficiency // *LREC*. – 2010.
32. *Marti A., Cobos M., Lopez J.* Automatic Speech Recognition in Cocktail-Party Situations: A specific Training for Separated Speech // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 2012. – P. 1529-1535.
33. *Golumbic E.M. Z. et al.* Mechanisms underlying selective neuronal tracking of attended speech at a "cocktail party" // *Neuron*. – 2013. – Vol. 77, No. 5. – P. 980-991.
34. *Nagoev Z., Gurtueva I., Malyshev D., Sundukov Z.* Multi-agent Algorithm Imitating Formation of Phonemic Awareness // In: Samsonovich A. (eds) *Biologically Inspired Cognitive Architectures BICA 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2020. – P. 364-369.
35. *Nagoev Z., Gurtueva I., Anchekov M.* Generalized Structure of Active Speech Perception Based on Multiagent Intelligence // *Studies in Computational Intelligence*. – 2022. – P. 319-326
36. *Nagoev Z., Nagoeva O., Pshenokova I., Bzhikhatlov K., Gurtueva I., Kankulov S.* Multi-agent neural-like models for the integration of multimodal medical examination data // *ВЕСВ*. – 2022.
37. *Нагоев З.В., Нагоева О.В.* Обоснование символов и мультиагентные нейрокогнитивные модели семантики естественного языка. Обоснование символов и мультиагентные нейрокогнитивные модели семантики естественного языка. – Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2022. – 150 с.
38. *Макоева Д., Нагоева О., Гуртуева И.* Formal Representation of natural language elements in multi-agent system based of self-organization of distributed neurocognitive architectures // *Procedia Computer Science*. – 2022. – Vol. 213. – P. 631-635.
39. *Анчехов М.И., Бжикхатлов К.Ч., Канкулов С.А., Нагоев З.В., Нагоева О.В.* Мультиагентный алгоритм обоснования символов конвенционального языка на основе ситуативно обусловленного развития нейрокогнитивной архитектуры // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. – 2022. – № 6 (110). – С. 48-60.
40. *Анчехов М.И., Бжикхатлов К.Ч., Нагоев З.В., Пшенокова И.А.* Онтоэпизоциофилогенетическое развитие систем общего искусственного интеллекта на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. – 2022. – № 6 (110). – С. 61-75.

41. *Нагоев З.В.* Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. – Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2013. – С. 16.
42. *Пиенюкова И.А., Бжухатлов К.Ч., Ксолов А.М., Заммоев А.У.* Интеллектуальная система принятия решений для активной защиты растений // Информационное общество. – 2023. – № 3. – С. 38-46.

REFERENCES

1. *Liu Y. et al.* Robotics in the construction sector: Trends, advances, and challenges, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2024, Vol. 110, No. 2, pp. 72.
2. *Rathore M.M. et al.* The role of AI, machine learning, and big data in digital twinning: A systematic literature review, challenges, and opportunities, *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 32030-32052.
3. *Aghimien D.O. et al.* Mapping out research focus for robotics and automation research in construction-related studies: A bibliometric approach, *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2020, Vol. 18, No. 5, pp. 1063-1079.
4. *Li G. et al.* Skin-inspired quadruple tactile sensors integrated on a robot hand enable object recognition, *Science Robotics*, 2020, Vol. 5, No. 49, pp. eabc8134.
5. *Suzumori K., Faudzi A.A.* Trends in hydraulic actuators and components in legged and tough robots: a review, *Advanced Robotics*, 2018, Vol. 32, No. 9, pp. 458-476.
6. *Zhang J., Wang M.* A survey on robots controlled by motor imagery brain-computer interfaces, *Cognitive Robotics*, 2021, Vol. 1, pp. 12-24.
7. *Akinlolu M. et al.* A bibliometric review of the status and emerging research trends in construction safety management technologies, *International Journal of Construction Management*, 2022, Vol. 22, No. 14, pp. 2699-2711.
8. *Akinosho T.D. et al.* Deep learning in the construction industry: A review of present status and future innovations, *Journal of Building Engineering*, 2020, Vol. 32, pp. 101827.
9. *Gharbia M. et al.* Robotic technologies for on-site building construction: A systematic review, *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 32. [101584].
10. *Maskuriy R. et al.* Industry 4.0 for the construction industry: Review of management perspective, *Economies*, 2019, Vol. 7, No. 3, pp. 68.
11. *Forcael E. et al.* Construction 4.0: A literature review, *Sustainability*, 2020, Vol. 12, No. 22, pp. 9755.
12. *Biswal P., Mohanty P.K.* Development of quadruped walking robots: A review, *Ain Shams Engineering Journal*, 2021, Vol. 12, No. 2, pp. 2017-2031.
13. *Yogesh G.* Construction Robotics: Revolutionizing the Building Industry, *Journal of Architectural Engineering Technology*, 2024, Vol. 13, No. 418.
14. Available at: <https://cdn.thomasnet.com/ccp/00142951/263811.pdf> (accessed 10 September 2024).
15. Available at: <https://iconbuild.com/robotics> (accessed 19 October 2024).
16. Available at: <https://apis-cor.com/> (accessed 10 February 2025).
17. Available at: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/product-information/welding-automation/robotic-welding> (accessed 15 December 2024).
18. Available at: <https://www.brokk.kz/> (accessed 23 November 2024).
19. *Stenman M.* Automatic speech recognition. An evaluation of Google Speech6 2015.
20. "Cloud Speech-to-Text," Google. Available at: <https://cloud.google.com/speech-to-text/> (accessed 19 January 2022).
21. *Reis A., Paulino D., Paredes H., Barroso I., Monteiro M.J., Rodrigues V.* Using intelligent personal assistants to assist the elderly: an evaluation of Amazon Alexa, Google Assistant, Microsoft Cortana, and Apple Siri, *2-nd International Conference on Technology and Innovation in Sports, Health and Wellbeing (TISHW)*, 2018, pp. 1-5.
22. *Brill T., Munoz L., Richard J.* Siri, Alexa, and other digital assistants: A study of customer satisfaction with artificial intelligence applications, *Journal of Marketing Management*, 2019, Vol. 35, No. 15-16, pp. 1401-1436.
23. *Tulshan A.S., Dhage S.N.* Survey on Virtual Assistant: Google Assistant, Siri, Cortana, Alexa, *Communications in Computer and Information Science*, 2019, 968, pp. 190-201.
24. *Gavrilovich N.V., Seytvelieva S.N.* Analiz kommercheskikh sistem raspoznavaniya rechi s otkrytym API [Analysis of commercial speech recognition systems with an open API], *Tavrisheskiy nauchnyy obozrevatel' [Tavrisheskiy Scientific Observer]*, 2016, No. 6 (11). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-kommercheskikh-sistem-raspoznavaniya-rechi-s-otkrytym-api> (accessed 23 January 2022).
25. Microsoft Corporation. Exploring New Speech Recognition and Synthesis APIs in Windows Vista. Microsoft. Available at: <https://learn.microsoft.com/en-us/archive/msdn-magazine/2006/january/exploring-speech-recognition-and-synthesis-apis-in-windows-vista> (accessed 24 April 2022).
26. *Rodemann T.* Towards Speech Acquisition in Natural Interaction on ASIMO, *Journal of the Robotics Society of Japan*, 2010, 28.1, pp. 18-22.

27. *Heracleous P., Yoneyama A.* A comprehensive study on bilingual and multilingual speech emotion recognition using a two-pass classification scheme, *PLoS one*, 2019, Vol. 14, No. 8, pp. 220-386.
28. *Bogdanov A., Dudorov E., Kutlubaev I., Permyakov A., Pronin A.* Control System of a Manipulator of the Anthropomorphic Robot FEDOR, *12th International Conference on Developments in e-Systems Engineering*. IEEE, INSPEC Accession Number 9557273, 2019, pp. 449-453.
29. *Stolcke A., Droppo J.* Comparing Human and Machine Errors in Conversational Speech Transcription, *Interspeech*, 2017, pp. 137-141.
30. *Saon G., Kurata G., Sercu T., Audhkhasi K., Thomas S., Dimitriadis D., Cui X., Ramabhadran B., Picheny M., Lim L.-L., Roomi B., Hall P.* English Conversational Telephone Speech Recognition by Humans and Machines, *INTERSPEECH*, 2017
31. *Glenn M.L. et al.* Transcription Methods for Consistency, Volume and Efficiency, *LREC*, 2010.
32. *Marti A., Cobos M., Lopez J.* Automatic Speech Recognition in Cocktail-Party Situations: A specific Training for Separated Speech, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, pp. 1529-1535.
33. *Golumbic E.M. Z. et al.* Mechanisms underlying selective neuronal tracking of attended speech at a "cocktail party", *Neuron*, 2013, Vol. 77, No. 5, pp. 980-991.
34. *Nagoev Z., Gurtueva I., Malyshev D., Sundukov Z.* Multi-agent Algorithm Imitating Formation of Phonemic Awareness, In: *Samsonovich A. (eds) Biologically Inspired Cognitive Architectures BICA 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, pp. 364-369.
35. *Nagoev Z., Gurtueva I., Anchekov M.* Generalized Structure of Active Speech Perception Based on Multiagent Intelligence, *Studies in Computational Intelligence*, 2022, pp. 319-326
36. *Nagoev Z., Nagoeva O., Pshenokova I., Bzhikhatlov K., Gurtueva I., Kankulov S.* Multi-agent neural-like models for the integration of multimodal medical examination data, *BECB*, 2022.
37. *Nagoev Z.V., Nagoeva O.V.* Obosnovanie simbolov i mul'tiagentnye neyrokognitivnye modeli semantiki estestvennogo yazyka [Justification of Symbols and Multi-Agent Neurocognitive Models of Natural Language Semantics. Justification of Symbols and Multi-Agent Neurocognitive Models of Natural Language Semantics]. Nal'chik: Izd-vo KBNTS RAN, 2022, 150 p.
38. *Makoeva D., Nagoeva O., Gurtueva I.* Formal Representation of natural language elements in multi-agent system based of self-organization of distributed neurocognitive architectures, *Procedia Computer Science*, 2022, Vol. 213, pp. 631-635.
39. *Anchekov M.I., Bzhikhatlov K.Ch., Kankulov S.A., Nagoev Z.V., Nagoeva O.V.* Mul'tiagentnyy algoritm obosnovaniya simbolov konvetsional'nogo yazyka na osnove situativno obuslovlennogo razvitiya neyrokognitivnoy arkhitektury [Multi-agent algorithm for substantiating conventional language symbols based on situationally determined development of neurocognitive architecture], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2022, No. 6 (110), pp. 48-60.
40. *Anchekov M.I., Bzhikhatlov K.Ch., Nagoev Z.V., Pshenokova I.A.* Ontoepisotsiofilogeneticheskoe razvitie sistem obshchego iskusstvennogo intellekta na osnove mul'tiagentnykh neyrokognitivnykh arkhitektur [Ontoepisociophylogenetic development of general artificial intelligence systems based on multi-agent neurocognitive architectures], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2022, No. 6 (110), pp. 61-75.
41. *Nagoev Z.V.* Intellektika, ili Myshlenie v zhivyykh i iskusstvennykh sistemakh [Intelligence, or Thinking in living and artificial systems]. Nal'chik: Izd-vo KBNTS RAN, 2013, pp. 16.
42. *Pshenokova I.A., Bzhikhatlov K.Ch., Ksalov A.M., Zammoev A.U.* Intellektual'naya sistema prinyatiya resheniy dlya aktivnoy zashchity rasteniy [Intelligent Decision-Making System for Active Plant Protection], *Informatsionnoe obshchestvo* [Information Society], 2023, No. 3, pp. 38-46.

Макоева Дана Гисовна – Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: makoevadana@mail.ru; г. Нальчик, Россия; к. филол. н.; зав. лабораторией «Компьютерная лингвистика».

Тлупов Ислам Резуанович – Научно-образовательный центр Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук; e-mail: tlup94@mail.ru; г. Нальчик, Россия; аспирант кафедры «Мультиагентные интеллектуальные робототехнические системы».

Шогенов Асланбек Олегович – Научно-образовательный центр Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук; e-mail: qw20erty@mail.ru; г. Нальчик, Россия; аспирант кафедры «Мультиагентные интеллектуальные робототехнические системы».

Makoeva Dana Gisovna – Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: makoevadana@mail.ru; Nalchik, Russia; cand. of philol. sc.

Tlupov Islam Resuanovich – Scientific and Educational Center Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: tlup94@mail.ru; Nalchik, Russia; post-graduate student of the Department of Multi-Agent Intellectual Robotics Systems.

Shogenov Aslanbek Olegovich – Scientific and Educational Center Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: qw20erty@mail.ru; Nalchik, Russia; post-graduate student of the Department of Multi-Agent Intellectual Robotics Systems.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2025-5-93-103

В.И. Шлаев

МОДУЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПО ЗАДАНЫМ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Рассматривается решение задачи разработки преобразователей по заданным амплитудно-частотным характеристикам. Основная проблема заключается в проведении большого количества измерительных мероприятий с изменением параметров преобразователей для достижения необходимых амплитудно-частотных характеристик, что приводит к большим временным и ресурсным затратам на разработку. Проводится анализ основных параметров преобразователей, влияющих на заданные амплитудно-частотные характеристики. Анализируются существующие подходы, методы и алгоритмы при создании преобразователей требуемых характеристик. Описывается разработка модуля прогнозирования параметров электромеханических преобразователей, основанного на заданных амплитудно-частотных характеристиках. Задачи исследования включают создание структурно-параметрической и математической моделей для расчета характеристик преобразователей на стадии проектирования. Описывается алгоритм обучения модели на основе экспериментальных данных, полученных в ходе проведения измерений. Использование методов машинного обучения для предсказания параметров приводит к минимизации количества проводимых экспериментов и снижению затрат на разработку преобразователей. Предложенный подход основывается на использовании зависимости между конструктивными параметрами преобразователей и их частотными характеристиками. Для повышения точности прогнозирования применяется алгоритм градиентного бустинга. Представлены этапы подготовки данных для обучения модели. Описывается процесс обучения модели. Результаты демонстрируют значительное сокращение времени моделирования преобразователей: применение модуля позволяет ускорить процесс в несколько раз по сравнению с экспериментальным подходом. Прогнозирование характеристик на основе модели обеспечивает сопоставимую точность при большем объеме данных. Выводы исследования подтверждают эффективность предлагаемого подхода в разработке преобразователей, снижая временные и финансовые затраты, повышая точность моделирования и применимость в условиях ограниченных ресурсов.

Электромеханический преобразователь; амплитудно-частотная характеристика; прогнозирование параметров; машинное обучение; математическое моделирование; градиентный бустинг; оптимизация проектирования.

V.I. Shlaev

THE MODULE FOR PREDICTING CONVERTER PARAMETERS BASED ON SPECIFIED AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS

The article discusses the solution of the problem of developing converters based on specified amplitude-frequency characteristics. The main problem is to carry out a large number of measuring measures with changes in the parameters of the transducers to achieve the necessary amplitude-frequency characteristics, which leads to high time and resource costs for development. The analysis of the main parameters of the converters affecting the specified amplitude-frequency characteristics is carried out. The existing approaches, methods and algorithms for creating converters of the required characteristics are analyzed. The development of a module for predicting the parameters of electromechanical converters based on specified amplitude-frequency characteristics is described. The research objectives include the creation of structural-parametric and mathematical models for calculating the characteristics of converters at the design stage. An