



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-37-45>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 681.5.09

ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КАК ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МОДЕЛЬНОГО РЯДА ЕЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПРОТОТИПОВ

А.В. ГУЛАЙ, В.М. ЗАЙЦЕВ

Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 19 февраля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Перспективным направлением концептуального развития методов создания интеллектуальных систем является применение технологии последовательного построения функционально расширяющегося модельного ряда конструктивных прототипов системы. Руководящий принцип создания интеллектуальной системы по предложенной технологии заключается в том, что система высокой сложности разрабатывается и отлаживается поэтапно с использованием параллельно-последовательной схемы структурного наращивания и функционального усложнения. На каждом этапе построения она реализуется в виде аппаратно-программного комплекса – конструктивного прототипа с определенным набором выделенных составных частей и выполняемых функций. Под конструктивным прототипом системы понимается определенный вариант ее построения в виде логической или физической модели, которая включает заданный набор информационных, технических и программных средств, выполняет определенные системные функции, позволяет оценивать достигнутые уровни параметров, а также обеспечивает дальнейшее наращивание и развитие системы. В качестве обязательных прототипов уровней наиболее эффективно использование вербально-эвристических и графо-эвристических абстрактных моделей, которые отражают набор исходных требований и структуру интеллектуальной системы. Обязательным прототипом последующих уровней системной технологии является материальная модель ядра системы, объединяющего аппаратные и программные компоненты, совместное функционирование которых обеспечивает достижение требуемого набора интегративных системных свойств. Последовательность поэтапного выбора все более сложных прототипов с одновременным обогащением состава применяемых средств и выполняемых системных функций образует расширяющийся модельный ряд системы. В практике разработки систем он ограничивается определенным прототипом верхнего уровня, который удовлетворяет предварительно заданным техническим требованиям к системе. Поэтапная разработка и отладка моделей – прототипов высокой сложности с использованием параллельно-последовательной схемы их структурного наращивания и функционального усложнения является результативным технологическим направлением системного проектирования.

Ключевые слова: интеллектуальная система, конструктивная модель, модельный ряд, системное ядро.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гулай А.В., Зайцев В.М. Построение интеллектуальной системы как последовательное преобразование модельного ряда ее конструктивных прототипов. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 37-45.

INTELLIGENT SYSTEM CONSTRUCTION AS CONSEQUENT TRANSFORMATION OF THE MODEL RANGE OF ITS FUNCTIONAL PROTOTYPES

ANATOLY V. GULAY, VLADIMIR M. ZAITSEV

Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 19 February 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Application of the technology of consecutive construction of the functionally expanding model range of structural system prototypes is an advanced conceptual development direction of intellectual systems construction methods. The guiding principle of intellectual system construction under the suggested technology is that a highly sophisticated system is worked out and adjusted by stages with the use of the structural increment and functional complexity parallel-sequential scheme. At every construction step it is implemented in the form of a hardware and software complex – the structural prototype with a certain set of allocated components and performed functions. The structural prototype is understood as a certain version of its construction in the form of a logical or physical model, which includes a predetermined set of information, technical and software tools, performs system functions, makes it possible to evaluate the achieved parameter levels, as well as ensures further system build-up and development. Verbal-heuristic and graphic-heuristic models, which reflect the set of original requirements and the intelligent system structure, are used as mandatory prototypes of primary levels. The mandatory prototype of subsequent levels of the system technology includes a material model of the system nucleus, which combines hardware and software components, where joint functioning delivers the required set of integrative systematic properties. Sequential step-by-step choice of all the more complex prototypes with simultaneous enrichment of the composition of applied tools and performed system functions forms the expanded model range of the system. In the practice of systems development it is limited with a certain upper level prototype, which meets preset technical requirements to the system. Step-by-step development and adjustment of models, which are highly complicated prototypes, with the use of the parallel-sequential scheme of their structural enrichment and functional complication, is the effective technological trend of co-engineering.

Keywords: intelligent system, constructive model, model range, system core.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

For citation. Gulay A.V., Zaitsev V.M. Intelligent system construction as consequent transformation of the model range of its functional prototypes. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 37-45.

Введение

Введение средств интеллектуального управления и интеллектуальных компонентов в состав систем технического назначения значительно усложняет протекающие в указанных системах информационно-вычислительные процессы и обостряет проблему их построения [1–3]. Гармоничному консолидированию принципов создания систем, эффективному выполнению процессов их разработки, наладки и контроля способствует введение методов системного моделирования [4–8]. Перспективным направлением концептуального развития современных методов создания интеллектуальных систем является применение технологии последовательного построения функционально расширяющегося модельного ряда конструктивных прототипов системы. В связи с этим значительный научный интерес представляет рассмотрение условий и правил адекватного выбора и поэтапного преобразования моделей – конструктивных прототипов интеллектуальных систем.

Под конструктивным прототипом системы в данном случае понимается определенный вариант ее построения в виде логической или физической модели, которая включает заданный набор информационных, технических и программных средств, выполняет определенные

системные функции, позволяет оценивать достигнутые уровни параметров и характеристик, а также обеспечивает дальнейшее наращивание и развитие системы. Последовательность поэтапного выбора все более сложных прототипов с одновременным обогащением состава применяемых средств и выполняемых системных функций образует расширяющийся модельный ряд системы. В практике разработки систем он ограничивается определенным прототипом верхнего уровня, который удовлетворяет предварительно заданным техническим требованиям к системе.

Принципы построения модельного ряда конструктивных прототипов интеллектуальных систем

Руководящий принцип создания интеллектуальной системы по предложенной технологии заключается в том, что система высокой сложности разрабатывается и отлаживается поэтапно с использованием параллельно-последовательной схемы структурного наращивания и функционального усложнения. На каждом этапе построения она реализуется в виде аппаратно-программного комплекса – конструктивного прототипа с определенным набором выделенных составных частей и выполняемых функций. Конструктивный прототип отражает типичные и наиболее существенные свойства разрабатываемой системы, характерные для текущего i -го этапа ее развития, и задается следующей сигнатурой в виде набора уникальных операций, предикатов и отношений: $\Sigma_i = \langle P_0^{(i)}, P_1^{(i)}, P_2^{(i)}, \dots, P_k^{(i)}, C_0, C_1, C_2, \dots, C_m, \Sigma_{i-1} \rangle$, где Σ_i , Σ_{i-1} – сигнатуры i -го и $(i-1)$ -го этапов; $P_0^{(i)}, P_1^{(i)}, P_2^{(i)}, \dots, P_k^{(i)}$ – набор системных уникальных операций, предикатов и отношений i -го уровня; $C_0, C_1, C_2, \dots, C_m$ – набор системных констант и параметров. Сигнатура рекурсивна и на каждом этапе содержит в своем кортеже сигнатуру предшествующего этапа, при этом предусматривается ее определенное обогащение новыми уникальными операциями, предикатами и отношениями.

Важнейшей задачей реализации каждого шага построения интеллектуальной системы является обеспечение подобия набора выделенных составных частей моделей и их функций соответствующим элементам и функциональным свойствам создаваемой системы. При этом необходимо адекватное отражение прототипом интеллектуальной системы типичных и наиболее существенных системных аспектов, а также обеспечение выработки ею адекватных выходных реакций на входные воздействия и на возможные изменения внутренних состояний или внешних условий. В данном случае поэтапная разработка и отладка моделей – прототипов высокой сложности с использованием параллельно-последовательной схемы их структурного наращивания и функционального усложнения является результативным технологическим направлением системного проектирования.

Практическое применение рассматриваемой технологии требует определения, прежде всего, информационно-методической основы, на которой строится эта технология, по сути, принятия исходного концептуального профиля модельного ряда, который может быть использован аналитиками в прототипах на каждом из технологических этапов. Анализ обширного множества различных схем классификации моделей (см., например, [9]) позволяет рекомендовать обобщенный профиль модельного ряда, элементы которого в той или иной степени привлекаются разработчиками определенной системы (рис. 1). Следует отметить, что понятие модели, являющееся достаточно общим и универсальным, рассматривается здесь как некоторое вспомогательное средство для получения информации об определенных аспектах и свойствах создаваемой интеллектуальной системы. В то же время развитие конструктивной модели и постепенное превращение в полноценно функционирующую интеллектуальную систему, по сути, представляет собой продуктивную технологию ее построения.

В рассматриваемом модельном потоке в первую очередь выделяются абстрактные и материальные модели. Абстрактные модели – это умозрительные образы создаваемой интеллектуальной системы и ее возможных составных частей, которые образуются в результате предварительной структурно-функциональной декомпозиции. Среди абстрактных моделей различают вербально-эвристические и математические модели. Представление различных эвристик с помощью языковых средств позволяет получить вербально-эвристическую модель разрабатываемой системы в виде наборов спецификаций априорных

умозрительных знаний о составных частях, требуемых функциях и системных свойствах, совокупность которых отображает ее желаемый функциональный и технический облик. В принятой сетевой классификационной схеме вербально-эвристические модели являются исходными прототипами. Они создаются на основе концептуальных схем предметных и проблемных областей, содержат наборы системотехнических описаний (спецификаций) важнейших аспектов построения и функционирования интеллектуальных систем. Широкое распространение получили графо-эвристические модели в виде разнообразных иерархических, сетевых и мнемонических схем со словесными комментариями, что позволяет в доступной форме графически отображать замысел создания системы, отношения между ее составными частями и варианты возможных структурных решений.



Рис. 1. Концептуальный профиль модельного ряда для построения интеллектуальной системы
Fig. 1. Conceptual profile of the model row for intellectual system construction

Математические модели используют совокупности математических соотношений (физико-математические уравнения и формулы, логические и вероятностные соотношения, оптимизационные методы исследования операций), которые формально могут определять или описывать процессы, протекающие в интеллектуальной системе или в ее составных частях. Материальные модели в большинстве случаев представляют собой физические макеты той или иной сложности, действующие аналоги или реальные образцы составных частей создаваемой системы в виде узлов, блоков, устройств и ее подсистем. Макеты в принципе могут иметь природу, отличную от природы конечных (финишных) прототипов, но должны обладать идентичным описанием процессов функционирования, а также однотипными интерфейсами и протоколами информационно-технического взаимодействия с другими составными частями интеллектуальной системы.

Конструктивная модель подобна создаваемой интеллектуальной системе в отношении выработки выходных реакций на входные воздействия и на возможные изменения ее внутренних состояний, а также в отношении поведения в различных условиях. Применение ряда конструктивных прототипов обеспечивает наследуемость их структуры и функциональных свойств, а также изменчивость в ходе развития от этапа к этапу. После создания и полной проверки конструктивного прототипа i -го этапа создаются предпосылки к отработке более сложного прототипа следующего $(i + 1)$ -го этапа. Кроме конструктивных моделей на отдельных этапах развития системы могут создаваться и использоваться различные познавательно-технологические модели. Целью их построения является локальное и комплексное исследование процессов в отдельных составных частях и в системе в целом для получения предварительных числовых характеристик процессов, а также для оценки и прогнозирования массогабаритных, электромагнитных и иных параметров системы.

Ответственность за построение эффективной схемы построения интеллектуальной системы возлагается на системных аналитиков, которые предусматривают выработку обоснованных исходных системных требований, первоначальную структурно-функциональную декомпозицию системы, выбор или разработку образцов технических средств и необходимых программных компонентов для реализации составных частей системы, а также целенаправленную последовательность отработки прототипов. Попытка ускоренного создания и наладки некоторого первоначального варианта интеллектуальной системы путем минимизации количества применяемых прототипов и максимизации набора параллельно обрабатываемых системных функций чаще всего приводит к негативным результатам и к необходимости дальнейшей детализации структуры, а также повторного выполнения комплексных наладочных работ. Это обусловлено потенциальной угрозой потери логической обзримости процессов функционирования и взаимодействия аппаратных и программных компонентов, а также объективными трудностями выявления причин возможных нарушений и некорректностей интерфейсно-протокольных связей.

Преобразование конструктивных прототипов модельного ряда при построении интеллектуальной системы

Начальным этапом построения интеллектуальной системы в процессе преобразования ее конструктивных прототипов является разработка исходного замысла, цели создания и критериев эффективности системы (рис. 2). Построение абстрактной вербальной модели составляет процедуру нулевого уровня создания интеллектуальной системы. Технические требования к системе и ее описание оформляются в виде исходного задания на проектирование, которое выступает в форме документального воплощения прототипа системы.

Прототипами первого уровня являются структурно-функциональные и другие схемы и чертежи интеллектуальных систем. При разработке этих схем производится предварительное распределение функций между аппаратными и программными средствами, определяется состав системного ядра и последовательность его развития. Под ядром понимают минимальный набор аппаратуры и программ, совместное функционирование которых обеспечивает достижение требуемого объема интегративных свойств, выделяющих создаваемую интеллектуальную систему из множества иных систем. В настоящее время какие-либо канонические правила выделения системного ядра и определения его объема отсутствуют и индивидуально определяются системными аналитиками для каждого типа интеллектуальной системы. Структурно-функциональные схемы оформляются как наборы иерархически вложенных графических документов, определяющих графо-эвристические прототипы первого уровня. В этих схемах задаются направления развития и этапность реализации макетов, математических моделей и приемов обеспечения их комплексного функционирования.

К моделям – прототипам второго уровня целесообразно отнести аналитические модели и раздел процедурных знаний, в том числе необходимые физико-математические уравнения, алгебраические, логические и вероятностные соотношения между факторными и результативными параметрами системы, а также оптимизационные методы исследования операций.

Прототипом третьего уровня является рационально выбранная модель ядра системы. Практика создания систем различного функционального назначения показала, что наилучшие результаты построения системного ядра достигаются в том случае, если первоначально в качестве технических и программных средств применяются серийно изготавливаемые аналоги с последующим их замещением штатными компонентами. Аналоги должны, прежде всего, обеспечивать функциональную составляющую и как прототипы могут не удовлетворять требованиям по реальным температурным, механическим, электромагнитным и иным воздействиям и условиям функционирования. Математические средства ядра подлежат полной отладке, обеспечивающей проверку его функций и создающей возможность взаимодействия с предполагаемым системным окружением, которое выступает в роли «технической обвязки» ядра.



Рис. 2. Алгоритм построения интеллектуальной системы при последовательном конструктивном преобразовании компонентов ее модели

Fig. 2. An algorithm for constructing intelligent system with a sequential constructive transformation of the components of its model

Дальнейшие прототипы и их целевое использование определяются конкретной схемой построения интеллектуальной системы. В общем случае предусматривается последовательное замещение аналогов и макетов штатными техническими средствами с доведением их состава до требований, предусмотренных заданием на проектирование. Целью создания моделей более высоких уровней путем наращивания и развития ядра интеллектуальной системы является достижение функциональной полноты ее опытного образца. Предлагаемая технология последовательного построения функционально расширяющегося модельного ряда конструктивных прототипов системы не допускает хаотического чередования этапов и требует развития процессов по определенной схеме. Эта схема может предусматривать предварительное выделение наиболее ответственных составных частей системы в самостоятельные ветви индивидуального прототипирования, которые затем объединяются в некоторое структурно-функциональное ядро и охватываются общим технологическим процессом создания системы. Этот процесс завершается после проверки последнего конструктивного прототипа, полностью отвечающего первоначально установленным системным требованиям.

Особую роль в создании интеллектуальных систем по предлагаемой технологии играет прототипирование математических моделей и средств программного обеспечения. Анализ подавляющего большинства системотехнических приложений математики показывает, что применяемые в них математические рассуждения существенно, а порой принципиально, отличаются от классических строгих правил с твердым соблюдением ее основополагающих ортодоксальных принципов. В ряде случаев даже при строгих с математических позиций постановках системотехнических задач возникает необходимость в использовании приемов, неприемлемых с точки зрения «чистой» математики. Такими приемами могут быть, например: применение аппарата нечетких множеств и нечеткой логики; игнорирование «хрупкости» оптимальных решений в условиях приближенных результатов измерений параметров и конечной разрядности процессоров. Объективно проявляется противоречие следующего характера: на этапе создания интеллектуальной системы для получения установочных параметров управления осуществляется построение и исследование математических моделей с целью более полного и адекватного учета специфики построения системы и протекающих процессов, но в дальнейшем необходимо выполнение реальных действий и введение допущений, не отвечающих положениям строгой математики.

Специфика математических решений ряда системотехнических задач заключается в том, что получаемые решения в принципе не могут обладать строгой математической доказательностью. Это обусловлено недостаточной полнотой описания объектов управления, среды функционирования и управляющей системы, принятием системными аналитиками компромиссов, предположений и допущений. Тем не менее математическое решение должно быть выполнено правильно и должно удовлетворять установленным ограничениям, в том числе по используемому времени и по вводимым ресурсам. Такие решения чаще всего будут рациональными, а в отдельных случаях – субоптимальными или даже оптимальными. В последнее время ситуация, сложившаяся в вопросах математического моделирования (в том числе интеллектуальных систем), привела к появлению понятия «технического» уровня математической строгости. Это обусловлено попытками преодоления тенденции абсолютизации математических моделей и положений в тех случаях, когда на практике без этого можно обойтись. Например, в практических случаях при контроле, оценке и преобразовании физических величин имеется достаточно много источников погрешностей, которые математическая модель не в состоянии учесть.

Фактографическая информация поступает в систему от сенсорного оборудования, которое имеет конечные значения точности преобразования контролируемых величин. Кроме того, передаточные характеристики сенсоров и сенсорных модулей подвергаются линеаризации, а получаемые данные – оцифровке. Указанные факторы приводят к тому, что сведениям и данным, на основе которых интеллектуальная система формирует управленческие решения, должны быть поставлены в соответствие определенные значения доверительных вероятностей, допускающих количественную оценку. Именно эти оценки объективно определяют рациональную границу математической строгости моделей и, следовательно, используемых теоретических ограничений и огрублений системных процессов. При этом необходимо также учитывать тот факт, что достоверность и надежность системных решений принципиально не может превышать уровня доверия к исходной информации.

Следует также отметить, что в технологии моделирования особое значение имеет создание программных симуляторов для обеспечения процессов отработки прототипов. Создание этих технологических средств предусматривается схемой построения интеллектуальных систем. Опыт разработки симуляторов показывает, что в качестве их основы целесообразно использовать гибкие программные решения, которые допускают настройку требуемых параметров системными аналитиками.

Многоуровневая иерархическая архитектура системотехнических знаний, которые отражают основные аспекты построения интеллектуальной системы, формируется в виде логически связанных слоев ее системотехнических описаний [9]. Структура этих описаний обеспечивает возможность практического создания интеллектуальной системы. Совокупность требований к создаваемой интеллектуальной системе включает: морфологические и процессуальные требования и описания, изложение функций, свойств, условий жизнедеятельности и возмущающих факторов, а также информационно-параметрические требования и описания.

Морфологическое описание предназначено для отображения внутреннего состава системы, ее компонентов и объектов, то есть ее внутреннего построения. Это описание в общем случае должно содержать перечень элементов, системных компонентов и подсистем, включая программные средства. Кроме того, оно включает ту часть состава управляемых объектов, которая необходима для обеспечения взаимодействия их с системой.

Процессуальное описание содержит перечисление и смысловое назначение всех основных и вспомогательных процессов, протекающих в системе и обеспечивающих обработку или преобразование вещества, энергии и информации. В этом описании важную роль играют понятия системных операций, событий и состояний, которые необходимы для понимания особенностей построения системных процессов. Взаимодействие системы с внешней средой и взаимодействие составных частей системы друг с другом осуществляется с помощью конкретных системных процедур.

Описание функциональных свойств и функций системы содержит вербальное перечисление и смысловое изложение ее функциональных особенностей. Для каждой функции раскрывается цель или назначение, способ выполнения или алгоритм реализации, исходные

материальные, энергетические или информационные ресурсы, результаты обработки или преобразования вещества, энергии или информации. При этом степень детализации функционального описания системы определяется его конкретным назначением.

Описание условий жизнедеятельности и возмущающих факторов отражает сведения об особенностях пространственного размещения системы, об ожидаемых механических, климатических и электромагнитных воздействиях, а также другие вопросы обеспечения функционирования основных компонентов системы и протекания в ней сложных явлений. Возможно формирование требований по построению малогабаритных переносных составных частей и самой системы в целом, по размещению средств системы в помещениях разного типа, по монтированию ее на транспортной платформе. Фактически это определяет ожидаемые механические ударные и вибрационные нагрузки на систему. Отдельную часть описания составляют климатические условия работы системы.

Информационно-параметрическое описание содержит подробное перечисление и смысловое назначение форматов информации и параметров функционирования как самой системы, так и всех ее основных и вспомогательных компонентов. Часть форматов информации и параметров функционирования, как правило, задается в виде исходных требований, остальные сведения формируются на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований или на основе результатов моделирования.

Заключение

Перспективным направлением концептуального развития процессов создания интеллектуальных систем является применение технологии последовательного построения функционально расширяющегося модельного ряда их конструктивных прототипов. В связи с этим рассмотрены руководящие принципы построения эволюционного ряда моделей – прототипов интеллектуальных систем: обязательное подобие изучаемых систем и их моделей в части набора выделенных составных частей и выполняемых функций; адекватное отражение прототипом разрабатываемой интеллектуальной системы ее типичных и наиболее существенных свойств; обеспечение выработки прототипом адекватных выходных реакций на входные системные воздействия и на возможные изменения внутренних состояний или внешних условий; поэтапная разработка и отладка моделей – прототипов любой сложности с использованием параллельно-последовательной схемы их структурного наращивания и функционального усложнения. Определены обязательные прототипы нулевого и первого уровней в виде вербально-эвристических и графо-эвристических абстрактных моделей, а также обязательный прототип второго и третьего уровней в виде материальной модели ядра системы. Показано, что конструктивно-эволюционное моделирование не допускает хаотического чередования этапов и требует развития процессов по определенной схеме, которая предварительно разрабатывается системными аналитиками.

Список литературы

1. Казиев В.М. *Введение в анализ и моделирование систем*. Москва: Бинум; 2014.
2. Советов Б.Я., Яковлев С.А. *Моделирование систем*. Москва: Высшая школа; 2009.
3. Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. *Практическое моделирование сложных динамических систем*. Санкт-Петербург: БХВ; 2001.
4. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. *Теория и практика эволюционного моделирования*. Москва: Физматлит; 2003.
5. Jamshidi M. Tools for intelligent control: fuzzy controllers, neural networks and genetic algorithms. *Philosophical transactions. Series A. Mathematical, physical, and engineering sciences*. 2003;361:1781-1808.
6. Рапопорт Э.Я. *Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами*. Москва: Высшая школа; 2003.
7. Малахов Н.А., Жигулевцев Ю.Н. Структурно-параметрическое моделирование динамических объектов и систем управления в реальном времени. *Современные наукоемкие технологии*. 2018;12-1:108-114.

8. Tolk A. Learning something right from models that are wrong: Epistemology of Simulation. *Concepts and Methodologies in Modeling and Simulation*. Springer; 2015:87-106.
9. Гулай А.В., Зайцев В.М. *Архитектура интеллектуальных систем*. Минск: ИВЦ Минфина; 2018.

References

1. Kaziev V.M. [*Introduction to system analysis and modeling*]. Moscow: Binom; 2014. (In Russ.)
2. Sovetov B.YA., Yakovlev S.A. [*System modeling*]. Moscow: Vysshaya shkola; 2009. (In Russ.)
3. Ben'kovich E.S., Kolesov YU.B., Senichenkov YU.B. [*Practical modeling of complex dynamic systems*]. St. Petersburg: BHV; 2001. (In Russ.)
4. Emel'janov V.V., Kurejchik V.V., Kurejchik V.M. [*Theory and practice of evolutionary modeling*]. Moscow: Fizmatlit; 2003. (In Russ.)
5. Jamshidi M. Tools for intelligent control: fuzzy controllers, neural networks and genetic algorithms. *Philosophical transactions. Series A. Mathematical, physical, and engineering sciences*. 2003;361:1781-1808.
6. Rapoport E.YA. *Structural modeling of objects and control systems with distributed parameters*. Moscow: Vysshaya shkola; 2003. (In Russ.)
7. Malahov N.A., Zhigulevcev YU.N. [On-line structural and parametric modeling of dynamic objects and control systems]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high technologies*. 2018;12-1:108-114. (In Russ.)
8. Tolk A. Learning something right from models that are wrong: Epistemology of Simulation. *Concepts and Methodologies in Modeling and Simulation*. Springer; 2015:87-106.
9. Gulaj A.V., Zajtsev V.M. [*Architecture of the intelligent systems*]. Minsk: IVTs Minfina; 2018. (In Russ.)

Вклад авторов

Оба автора в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

Both authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Гулай А. В., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой интеллектуальных и мехатронных систем Белорусского национального технического университета.

Зайцев В. М., к.т.н., доцент, доцент кафедры интеллектуальных и мехатронных систем Белорусского национального технического университета.

Information about the authors

Gulay A. V., PhD, Associate Professor, Head of the Intelligent and Mechatronic Systems Department of the Belarusian National Technical University.

Zaitsev V. M., PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Intelligent and Mechatronic Systems Department of the Belarusian National Technical University.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 65,
Белорусский национальный технический университет
тел. +375-29-251-46-42;
e-mail: is@bntu.by
Гулай Анатолий Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti ave., 65
Belarusian National Technical University
tel. +375-29-251-46-42;
e-mail: is@bntu.by
Gulay Anatoly Vladimirovich