

А. В. Гулай, В. М. Зайцев

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ: ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ШКАЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ В ЕЕ ТРАКТАХ

Аннотация. Рассмотрены проблемы архитектурно-функционального построения и гетерогенная сетевая структура интеллектуальной системы управления производственно-технического назначения. Комплексное исследование интеллектуальной системы основано на современной парадигме конвергенции технических, алгоритмических и программных решений. Концепция конвергенции системных решений в технологии построения интеллектуальных систем предполагает оцифровку значений физических величин при сенсорных измерениях, а также однотипное отображение и последовательное преобразование значения каждого контролируемого параметра на определенном наборе шкал. Для решения этой задачи предложен функционально полный набор шкал: естественных значений измеряемых физических параметров; результатов сенсорных преобразований физических величин; результатов измерения параметров в формате целочисленных двоичных кодов; значений параметров в формате вещественных масштабированных двоичных чисел. На указанном наборе шкал построены унифицированные алгоритмы цифровизации результатов прямых измерений непрерывных параметров и их представления в форматах ρ -разрядных целочисленных двоичных кодов, а также преобразования измеряемых параметров в форматы вещественных масштабированных двоичных чисел и их отображения на шкалу естественных значений физических параметров. Специфицированы операции с оцифрованными физическими параметрами в трактах интеллектуальной системы: калибровка результатов косвенных измерений; оцифровка дискретных сенсорных сигналов; цифровая фильтрация результатов измерений; юстировка измерительных трактов; интеллектуальное управление исполнительными механизмами. Следствием применения положений конвергенции является схожее морфологическое строение, а также схематическая однотипность реализации информационных процессов и циклов управления в системах. Результаты анализа проблемы функционального построения интеллектуальной системы могут быть использованы при создании, например, гибридных систем промышленной автоматизации.

Ключевые слова: интеллектуальная система, сенсорный контроль, измерительный тракт, оцифровка параметров, шкалирование данных

Для цитирования: Гулай, А. В. Функциональное построение интеллектуальной системы: последовательное шкалирование данных в ее трактах / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, № 1. – С. 117–128. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-117-128>

Anatoliy V. Gulay, Vladimir M. Zaitsev

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

FUNCTIONAL CONFIGURATION OF INTELLIGENT SYSTEM: SERIAL DATA SCALING IN ITS PATHS

Abstract. Problems of architectural and functional construction and a heterogeneous network structure of intelligent control system of technological and industrious assignment have been considered. Complex research of the intelligent system is based on the modern paradigm of convergence of technical, algorithmic and software solutions. The concept of convergence of system solutions in the technology of construction of intelligent systems presupposes digitizing of physical values at sensor measurements, as well as uniform depiction and successive conversion of values of each controlled parameter with a certain set of scales. For solution of this task a functionally full set of scales; natural values of measured physical parameters; results of sensor conversions of physical values; results of parameters measurement in the format of integer valued binary codes; parameter values in the format of real scaled binary numbers were proposed. Unified algorithms of digitizing results of direct measurements of continuous parameters and their representation in the format of ρ -bit integer valued binary codes, as well as conversions of measured parameters in the format of real scaled binary numbers and their depiction in the scale of natural values of physical parameters were built with this set of scales. Operations with digitized physical parameters were specified in tracts of the intelligent system: calibration of results of indirect measurements; digitizing of discrete sensor signals; digital filtration of measurement results; adjustment of measuring tracts; intellect control of executive mechanisms. The consequence of application of convergence provisions is similarity of morphological construction, as well as schematic uniformity of implementation of information processes and cycles of control in the systems.

The results of analysis of the functional construction of the intelligent system may be used, for example, for construction of hybrid systems of industrial automation.

Keywords: intelligent system, sensor control, measuring path, digitization of parameters, data scaling

For citation: Gulay A. V., Zaitsev V.M. Functional configuration of intelligent system: serial data scaling in its paths. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 117–128 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-117-128>

Введение. В процессе создания интеллектуальных систем производственно-технического назначения, например, мехатронных, робототехнических, кибернетических, возникает ряд проблем, решение которых может быть достигнуто только при комплексном использовании результатов различных научных направлений. Для этого необходимо объединение и сочетание достижений системотехники и системного анализа, инженерных решений по построению сетевых структур и обеспечению достоверности обрабатываемых сведений, адекватных математических моделей и эффективных алгоритмов переработки информации [1, 2].

Концепция конвергенции системных решений при функциональном построении интеллектуальных систем предполагает оцифровку значений измеряемых физических величин, которая реализуется с помощью комплексного использования цифровых аппаратных и специальных программных средств во всех измерительных процессах. Чрезвычайно высокую значимость операции цифровизации имеют при создании и исследовании интеллектуальных систем с широким набором различных видов входных, внутренних и выходных параметров и характеристик [3, 4]. При этом особую актуальность приобретает задача однотипного отображения и последовательного преобразования значения каждого параметра из множества контролируемых системных параметров и характеристик на определенном наборе шкал.

Соотнесение комплекса параметров с той или иной шкалой определяет состав допустимых арифметических операций и их форматов при организации обработки результатов измерений. При этом каждая шкала используется при выполнении ограниченного перечня операций по преобразованию данных. Расширение перечня операций требует перехода на иные шкалы, что должно выполняться достаточно корректно в соответствии с выбранной разрядностью аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей и разрядностью вычислительных средств. Такой переход на практике создает ряд проблем, связанных с обеспечением информационно-технической совместимости оборудования, включенного в состав измерительного тракта интеллектуальной системы.

Цель работы – рассмотрение вопросов интерпретации и адекватного представления результатов сенсорного контроля физических параметров при функционировании интеллектуальной системы. Необходимо проведение анализа операций преобразования данных, выполняемых в установленной последовательности на функционально полном наборе шкал в трактах интеллектуальной системы. Основными шкалами можно считать: шкалу естественных значений физических параметров, шкалу результатов их сенсорных преобразований, а также шкалы представления данных в формате двоичных чисел. В контексте функционального построения интеллектуальной системы представляет интерес также рассмотрение операций с оцифрованными параметрами в трактах интеллектуальной системы.

Распределение информационной нагрузки между интеллектуальными компонентами. Достижение требуемого уровня эффективности интеллектуальных технических систем диктует необходимость перераспределения информационной нагрузки между центральными компьютерными средствами, первичным оборудованием трактов телеметрии и оконечным оборудованием трактов телемеханики путем организации распределенной обработки информации [5, 6]. Первичное и оконечное оборудование систем управления производственно-технического назначения включает в основном сенсорные устройства и исполнительные механизмы, которые целесообразно, по возможности, наделять интеллектуальными свойствами [7]. Такие системы допускают архитектурно-функциональную типизацию и могут быть представлены с помощью гетерогенной сетевой структуры, которая изображена на рис. 1 (ИСУ – интеллектуальное сенсорное устройство; ИИМ – интеллектуальный исполнительный механизм).

Сенсорные средства совместно с сетевым и вычислительным оборудованием обеспечивают формирование восходящих потоков телеметрической информации. Конструктивно они могут выполняться по модульному принципу в виде функционально завершенных устройств и наделяться возможностями выполнения обширного набора операций [8]. К числу таких операций относится предварительный высокоточный съем первичных измерительных данных, их оцифровка, последовательное скоростное преобразование форматов информации, отображение результатов измерений на определенных шкалах представления, их аппроксимация и надежная доставка по сетям в станции управления и диспетчеризации. По мнению специалистов-системотехников, указанное построение измерительных трактов и реализация предварительных расчетно-логических функций позволяют относить их к категории интеллектуальных сенсорных устройств. Современные технологии делают возможным создание как одномерных, так и многомерных многоканальных интеллектуальных сенсорных подсистем и модулей.

Встраивание в сенсорные устройства аналого-цифровых и дискретно-цифровых преобразователей обеспечивает формирование унитарных цифровых кодов отображения результатов измерений в системе, а наличие процессора и службы отсчетов времени позволяет выполнять автоматизированную дистанционную юстировку интеллектуальных сенсорных устройств. С помощью программных средств результаты прямых измерений могут быть использованы в сенсорных процедурах для расчета требуемых виртуальных параметров, при этом создаются условия объединения фактографических и виртуальных данных в адресуемые транзакции для последующей передачи по сетям. Такое структурно-функциональное построение системы позволяет дополнительно выполнять по внешним командам дистанционные операции контроля текущих состояний интеллектуальных сенсорных модулей. Требуемый уровень достоверности доставки телеметрических транзакций обеспечивается с помощью средств помехоустойчивого кодирования и применения механизмов решающей обратной связи путем обработки сетевыми абонентами – отправителями ответных квитанций, поступающих от получателей информации.

Одной из основных составных частей интеллектуального сенсорного устройства является многоканальный прибор предварительной обработки телеметрических данных. Такой прибор оснащается средствами программного обеспечения с необходимым набором выполняемых функций и выступает в роли мастера телеметрической сети.

Оборудование телемеханических сетей современных систем управления производственно-технического назначения, в свою очередь, целесообразно оснащать процессорами и программными средствами преобразования управленческих данных в механические перемещения рабочих органов, что позволяет создавать интеллектуальные исполнительные механизмы [9]. Применение подобных механизмов обеспечивает минимизацию их массогабаритных параметров и инерционности, достижение повышенных скоростей движения рабочих органов и безударные переключения, отработку сложных траекторий пространственного перемещения.

Нисходящие информационные потоки охватывают в основном команды, передаваемые станциями управления и диспетчеризации по телемеханическим сетям в адрес конечных исполнительных механизмов, а также команды диагностики и контроля текущего технического состояния этих устройств. Интеллектуализация управления способна обеспечить реконфигу-

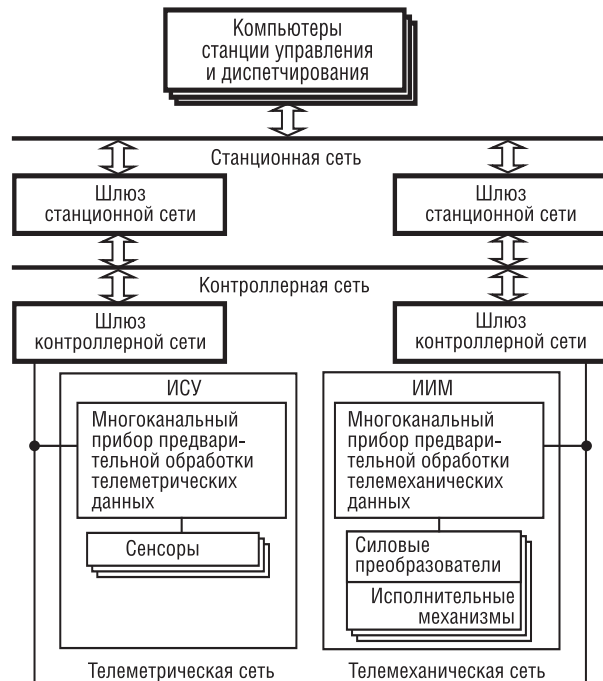


Рис. 1. Структура интеллектуальной системы производственно-технического назначения

Fig. 1. The intellectual system structure of the industrial and technical assignment

рируемость исполнительных компонентов под обработку конкретных заданий на движения рабочих органов, существенно повысить безотказность и надежность их функционирования. Для перехода от слаботочных выходных линий цифро-аналоговых и цифро-дискретных преобразователей к цепям с напряжением, достаточным для управления мощными исполнительными механизмами, могут применяться соответствующие силовые преобразователи. Основной составной частью интеллектуального исполнительного механизма является многоканальный прибор предварительной обработки телемеханических команд со средствами программного обеспечения. Указанный многоканальный прибор обработки телемеханических команд играет роль абонента-мастера телемеханической сети, может быть унифицирован и конструктивно объединен с многоканальным прибором предварительной обработки телеметрических данных.

Основные действия по тематически ориентированной обработке телеметрической информации, ее накоплению, решению расчетно-логических задач и выработке рефлекторных реакций на те или иные воздействия на основе продукционных правил, по диагностике и системной адаптации выполняют станции управления и диспетчирования. Информационное взаимодействие интеллектуальных сенсорных устройств, интеллектуальных исполнительных механизмов и станций управления реализуется через шлюзы станционных, контроллерных, телеметрических и телемеханических сетей передачи данных.

Существенное упрощение практического построения телеметрических и телемеханических сетей для систем рассматриваемой категории может обеспечить протокол HART (Highway Addressable Remote Transducer). Этот протокол предусматривает подключение оконечных составных частей в виде промышленных сенсоров, функционально завершенных датчиков, исполнительных рабочих органов и иной аппаратуры к абонентам-мастерам сетей. В протоколе находят применение проводные и беспроводные физические уровни обмена с разделением передающего и приемного каналов по времени.

Проводный вариант реализуется последовательным кодом с использованием витой пары и позволяет осуществлять питание и передачу цифровых данных по двухпроводной линии токовой петли стандарта 4–20 мА. В данном случае сохраняется совместимость с аналоговыми сенсорами. Цифровые данные передаются «поверх» токовой петли с помощью частотной модуляции тока $\pm 0,5$ мА, при этом логической единице соответствует полный период сигнала с частотой 1200 Гц, а логическому нулю – два неполных периода сигнала с частотой 2200 Гц. Скорость передачи информации составляет 1200 бит/с. Допускается использование восьмипозиционной фазовой манипуляции сигнала с несущей частотой 3200 Гц при скорости 9600 бод. Дальность связи достигает 1500 м.

Доступ к каналу организуется абонентом-мастером сети по принципу «ведущий – ведомый». Топология сети типа «звезда» используется при подключении к абоненту-мастеру до 15 сенсоров с аналоговыми выходами. При организации взаимодействия приборов исключительно с цифровыми выходами предусмотрено применение шинной топологии с 15 ведомыми абонентами и двумя абонентами-мастерами.

Беспроводный вариант реализуется с использованием радиоканалов на частотах 2400–2483,5 МГц в соответствии с беспроводным промышленным протоколом Wireless HART. При этом создается синхронизированная по времени самоорганизующаяся и самовосстанавливающаяся сеть с ячеистой архитектурой. Основу сети составляют соединения абонентов типа «точка – точка» в радиусе радиопокрытия со скачкообразным псевдослучайным изменением текущей частоты передачи – приема информации. Узлы такой сети могут наделяться функциями ретрансляторов.

Каждое информационное сообщение протокола HART структурно состоит из преамбулы, информационного тела и контрольной суммы и адресуется с помощью адресных указателей длиной от 4 до 38 бит. Сообщения в пределах структуры информационного тела могут иметь длину поля для непосредственного размещения данных до 246 байт в одном сеансе обмена.

В качестве контроллерной сети эффективно использование сети промышленного назначения Profibus DP (или PA – для работы в пожароопасных и взрывоопасных условиях). Среда передачи данных – витая пара или оптоволокно; скорость передачи информации составляет 9600 бит/с; дальность связи без повторителей электрического сигнала – до 1500 м.

Шкалирование значений системных параметров при прямых измерениях. Оцифровка значений непрерывных физических параметров при прямых измерениях. Оцифровка значений непрерывных физических параметров в интеллектуальных системах контроля и управления производственно-технического назначения предполагает комплексное применение аппаратных и программных средств во всех процессах измерений. При выполнении прямых измерений эти средства реализуют процедуры последовательного преобразования и отображения измеряемого значения каждого параметра C_i из множества контролируемых непрерывных системных параметров $\{C_i\}$, $i = 1, 2, \dots, q$ на определенном наборе шкал (рис. 2).

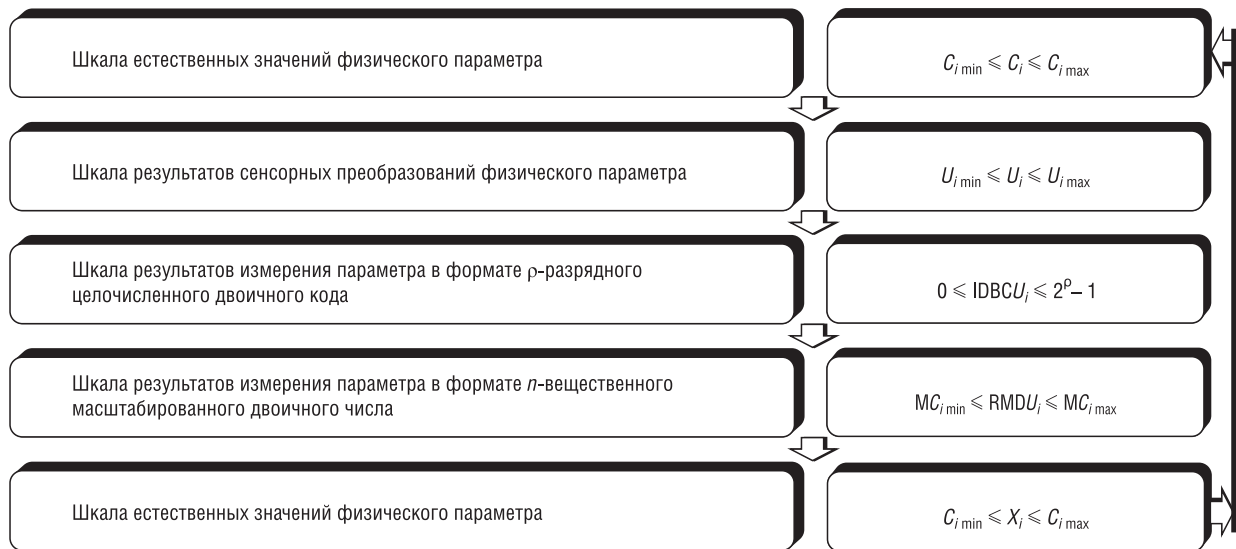


Рис. 2. Набор шкал отображения контролируемых системных параметров

Fig. 2. A set of scales for depiction of control of system parameters

Ограниченная разрядность цифровых преобразователей и реальные характеристики сенсоров, которые, как правило, обладают явными нелинейностями, ограничивают точность измерительных трактов. Это обуславливает необходимость обязательной оценки показателей точности цифровых измерителей и принятия мер по их улучшению, в том числе за счет повышения разрядности двоичного представления результатов измерений и введения операций аппроксимации.

Сенсорные преобразования при прямых измерениях физических параметров. Переход от шкалы естественных значений физического параметра, на которой располагается подлежащая измерению величина C_i , к шкале результатов сенсорных преобразований осуществляется с помощью специализированного чувствительного элемента.

Каждый тип сенсоров, применяемых в системах контроля и управления для преобразования непрерывных физических величин C_i в выходные сигналы U_i , характеризуется своей индивидуальной выходной статической характеристикой $U_i = W_i(C_i)$. Эта характеристика строится на основе предварительных исследований сенсоров требуемого типа путем проведения в технологическом режиме серии высокоточных измерений и их последующего осреднения. Выходная статическая характеристика сенсора представляется в решетчатой форме с помощью бинарного отношения $\{U_{ij} = W_i(C_{ij}), j = 0, 1, 2, \dots, 2n - 1, 2n\}$ ($2n$ – количество значений решетчатой функции) с шагом аргумента $h = C_{ij+1} - C_{ij}$. Формируемая таблица и ее данные принимаются за калибровочную совокупность измерений. Значения $C_{i \min}$, $C_{i \max}$ и $U_{i \min}$, $U_{i \max}$ должны соответствовать предельным минимальным и максимальным значениям входного и выходного сигналов сенсора.

Алгоритм цифровизации результатов прямых измерений непрерывных параметров и их представления в форматах p -разрядных целочисленных двоичных кодов. Переход от шкалы результатов сенсорных преобразований физического параметра к шкале его представления в формате p -разрядного целочисленного двоичного кода реализуется с помощью процесса циф-

ровизации $\text{Code}(U_i)$, который выполняется с помощью аппаратуры аналого-цифрового преобразования (АЦП). Результат цифровизации обозначим аббревиатурой $\text{IDBCU}_{\text{АЦП } i}$ (Integer Digital Binary Code), которая здесь и далее будет обозначать целочисленный цифровой двоичный код без знака:

$$\text{Code}(U_i - U_{i \min}) = \underbrace{000 \dots 000}_{\rho \text{ бит}} \text{IDPCU}_{\text{АЦП } i}.$$

При этом величина $U_{i \min}$ одновременно играет роль логического нуля шкалы, а код располагается в правой части разрядной сетки выходного регистра АЦП.

В идеальном случае при использовании АЦП с разрядностью ρ бит предельные абсолютные погрешности $\Delta_{\text{ц}} U_{i \max}$ цифровизации выходных сигналов сенсоров U_i не превышают половины единицы младшего разряда и равны

$$|\Delta_{\text{ц}} U_{i \max}| = 2^{-(\rho+1)}(U_{i \max} - U_{i \min}),$$

где разность $U_{i \max} - U_{i \min}$ представляет собой динамический диапазон выходного сигнала i -го сенсора.

Цифровой код будет содержать некоторую абсолютную погрешность $\Delta_{\text{ц}} U_i$, при этом

$$\Delta_{\text{ц}} U_{i \min} = -2^{-(\rho+1)}(U_{i \max} - U_{i \min}) \leq \Delta_{\text{ц}} U_i \leq \Delta_{\text{ц}} U_{i \max} = 2^{-(\rho+1)}(U_{i \max} - U_{i \min}).$$

Абсолютная погрешность $\Delta_{\text{ц}} U_i$, обусловленная конечной разрядностью АЦП, является случайной величиной. Анализ показывает, что в качестве модели распределения этой случайной величины может быть использовано либо усеченное нормальное распределение, либо треугольное распределение. Применительно к оценке погрешностей аналого-цифрового преобразования усеченное нормальное и треугольное распределения дают достаточно близкие результаты. Однако треугольное распределение оказывается гораздо более технологичным, при этом его функция плотности вероятности имеет вид:

$$f_i(\Delta U_i) = \{0 \text{ для } \Delta U_i < \Delta U_{i \min}; K_1 \Delta U_i + B_1 \text{ для } \Delta U_{i \min} \leq \Delta U_i \leq M(\Delta U_i); \\ K_2 \Delta U_i + B_2 \text{ для } M(\Delta U_i) \leq \Delta U_i \leq \Delta U_{i \max}; 0 \text{ для } \Delta U_i > \Delta U_{i \max}\},$$

где $\Delta U_{i \min}$, $\Delta U_{i \max}$ – минимальное и максимальное значения погрешности ΔU_i ; $M(\Delta U_i)$ – математическое ожидание значения погрешности ΔU_i ; K_1 , B_1 , K_2 , B_2 – параметры отрезков прямых, характеризующих треугольное распределение. Его высота равна $H_i = 2(\Delta U_{i \max} - \Delta U_{i \min})^{-1}$, а соответствующие параметры определяются следующими выражениями:

$$K_1 = 2(\Delta U_{i \max} - \Delta U_{i \min})^{-1}[M(\Delta U_i) - \Delta U_{i \min}]^{-1}, \\ B_1 = -2\Delta U_{i \min}(\Delta U_{i \max} - \Delta U_{i \min})^{-1}[M(\Delta U_i) - \Delta U_{i \min}]^{-1}, \\ K_2 = 2(\Delta U_{i \max} - \Delta U_{i \min})^{-1}[M(\Delta U_i) - \Delta U_{i \max}]^{-1}, \\ B_2 = -2\Delta U_{i \max}(\Delta U_{i \max} - \Delta U_{i \min})^{-1}[M(\Delta U_i) - \Delta U_{i \max}]^{-1}.$$

В силу симметричности операции цифровизации $\text{Code}(U_i - U_{i \min})$ в части формирования кода $\text{IDBCU}_{\text{АЦП } i}$ с положительной погрешностью (с избыточным значением) и с отрицательной погрешностью (с недостаточным значением) имеет место равенство $|\Delta_{\text{ц}} U_{i \min}| = |\Delta_{\text{ц}} U_{i \max}|$, а математическое ожидание абсолютной погрешности преобразования будет равно нулю: $M(\Delta_{\text{ц}} U_i) = 0$.

Второй центральный момент абсолютной погрешности определяется на интервале $[\Delta U_{i \min}; \Delta U_{i \max}]$ следующим образом:

$$M^{(2)}(\Delta_{\text{ц}} U_i) = D(\Delta_{\text{ц}} U_i) = \int_{-\Delta_{\text{ц}} U_{i \min}}^{+\Delta_{\text{ц}} U_{i \max}} f_i(\Delta_{\text{ц}} U_i) [\Delta_{\text{ц}} U_i]^2 d[\Delta_{\text{ц}} U_i] = 2^{-2(\rho+1)}(U_{i \max} - U_{i \min})^2/6.$$

Так как $D(\Delta_{\text{ц}} U_i) = M^{(2)}(\Delta_{\text{ц}} U_i) - [M(\Delta_{\text{ц}} U_i)]^2 = 0$ и $M(\Delta_{\text{ц}} U_i) = 0$, то среднеквадратическая погрешность составит:

$$\sigma(\Delta_{\text{ц}} U_i) = [D(\Delta_{\text{ц}} U_i)]^{1/2} = 2^{-(\rho+1)}(U_{i \max} - U_{i \min})/6^{1/2} = 0,408 \Delta_{\text{ц}} U_{i \max}.$$

При абсолютной погрешности цифровизации $\Delta_{ц}U_i$, обусловленной конечной разрядностью АЦП, доверительная вероятность того, что оцифрованное значение U_i будет находиться в интервале значений $U_i \pm \Delta_{ц}U_i$, равна

$$P_{\text{дов}} = \int_{-\Delta_{ц}U_i}^{+\Delta_{ц}U_i} f_{2i}(\Delta_{ц}U_i) d[\Delta_{ц}U_i] = 2[\Delta_{ц}U_i/\Delta_{ц}U_{i \text{ max}}] - [\Delta_{ц}U_i/\Delta_{ц}U_{i \text{ max}}]^2.$$

Если в качестве исходной величины задано значение доверительной вероятности $P_{\text{дов}}$, то на основании последнего выражения абсолютная погрешность $\Delta_{ц}U_i$ может быть оценена с помощью следующего соотношения:

$$\Delta_{ц}U_i = \chi \Delta_{ц}U_{i \text{ max}}, \text{ где } \chi = 1 - (1 - P_{\text{дов}})^{1/2}.$$

При $\Delta_{ц}U_i = \sigma(\Delta_{ц}U_i)$ доверительная вероятность определяется значением $P_{\text{дов}} = 0,65$, при $\Delta_{ц}U_i = 2\sigma(\Delta_{ц}U_i)$ доверительная вероятность составляет $P_{\text{дов}} = 0,96$. В случае $\Delta_{ц}U_i \rightarrow \Delta_{ц}U_{i \text{ max}}$ имеет место предельное соотношение $P_{\text{дов}} \rightarrow 1$.

Алгоритмы преобразования результатов прямых измерений параметров. Алгоритм преобразования результатов измерений параметров в форматы вещественных масштабированных двоичных чисел. При проектировании процессов обмена и процессорной цифровой обработки информации в виде естественных значений непрерывных сигналов C_i предварительно должен быть выбран формат обработки. В общем случае наиболее удобным для сложной цифровой обработки в технологическом отношении является формат с плавающей точкой $RDU(m, r)$ (Real Digital). В этом формате m – длина мантиссы со знаком в битах; r – длина порядка со знаком в битах; полная длина разрядной сетки процессора в битах определяется суммой $n = m + r$. Применение указанного формата позволяет избежать массовых и достаточно длительных процедур пересчетов операндов в наиболее часто используемых операциях сложения/вычитания, деления и иных функциональных преобразований.

Рассматриваемые преобразования форматов $IDBCU_{\text{АЦП } i} \rightarrow RDU_i(m, r)$ выполняются процессором с помощью программных средств на основе ожидаемых величин динамического диапазона $U_{i \text{ max}} - U_{i \text{ min}}$, при этом величина $U_{i \text{ min}}$ одновременно играет роль логического нуля шкалы. Цена младшего бита выходного регистра АЦП составляет $(U_{i \text{ max}} - U_{i \text{ min}})2^{-p}$.

После поступления кода $IDBCU_{\text{АЦП } i}$ от АЦП в процессор аппаратура автоматически размещает код в правой части разрядной сетки процессора с формированием процессорного слова:

$$IDBCU_{\text{п } i} = \underbrace{000\dots000}_{\substack{\text{p бит} \\ \text{n бит}}} IDBCU_{\text{АЦП } i}.$$

Определенная последовательность программных операций в процессоре позволяет получить результат измерения параметра в формате вещественного двоичного числа, при этом:

– с помощью операции **NORM** выполняется нормализация кода $IDBCU_{\text{п } i}$ путем последовательных сдвигов этого кода влево до знакового разряда с одновременным подсчетом количества произведенных сдвигов π_0 :

$$\text{NORM}[IDBCU_{\text{п } i}] = 0 \underbrace{IDBCU_{\text{АЦП } i}}_{\substack{\text{p бит} \\ \text{n бит}}} 000\dots000\dots000;$$

– путем конкатенации (операция **CON**) производится «склеивание» мантиссы и порядка и формируется представление нормализованного кода в формате с плавающей точкой:

$$\text{CON}\{\text{NORM}[IDBCU_{\text{п } i}], \pi_0\} = \pm \underbrace{IDBCU_{\text{АЦП } i}}_{\text{m бит}} 000\dots000\dots0 \pm \underbrace{000\dots000}_{\text{r бит}} \pi_0;$$

– корректируется значение порядка $\pi_1 = \pi_0 - (r - p)$ нормализованного кода в формате с плавающей точкой и образование вещественного масштабированного двоичного числа:

$$\text{RMDU}_i = \{\text{NORM}[IDBCU_{\text{п } i}], \pi_1\} = \pm IDBCU_{\text{АЦП } i} 000\dots0 \pm 000\dots000 \pi_1.$$

Следует отметить, что при $m > \rho + 1$ данная процедура не ухудшает точностных параметров процесса цифровизации.

Алгоритм отображения результатов прямых измерений на шкалу естественных значений физического параметра. Для отображения результатов измерения на шкалу естественных значений физического параметра рассчитывается величина параметра X_i с использованием следующего соотношения:

$$X_i = 2^{-\rho}(U_{i \max} - U_{i \min})\text{RMD}U_i + U_{i \min}.$$

Все операции являются инвертируемыми, и выполнение их в обратном порядке позволяет на основе величины сигнала X_i , заданного на шкале естественных значений физического параметра, рассчитать кодовое представление сигнала $\text{IDBCU}_{\text{АЦП}i}$ в формате ρ -разрядного целочисленного двоичного кода.

Алгоритмы процедуры аппроксимации результатов прямых измерений на шкале естественных значений физического параметра. Для учета нелинейностей, вызванных спецификой физических эффектов в сенсорных элементах, заменяют реальные выходные статические характеристики сенсоров аппроксимирующими зависимостями. Наиболее эффективный и сложный вариант аппроксимации заключается в применении для повышения точности измерений степенных и гармонических полиномов. Наличие процессоров в составе интеллектуальных сенсорных устройств позволяет для аппроксимации использовать линейные, параболические, кубические и иные сплайны. Они позитивно влияют на реальные точностные показатели результатов отображения $W_i(C_i) \rightarrow U_i$ при конечном шаге аргумента h выходной статической характеристики сенсора и конечном значении количества узлов аппроксимации $2n + 1$. Это требует разработки специальных программных средств и организации хранения в процессоре определенного объема табличной информации. С помощью указанных средств возможно скоростное выполнение линеаризации, параболизации и иных действий в масштабе времени производимых прямых системных измерений с учетом ограничений, налагаемых на кванты времени теоремой Котельникова–Найквиста.

Решетчатую функцию в данном случае целесообразно задавать на нечетном количестве точек $\{U_{ij} = W_i(C_{ij})\}$ с шагом $h = (C_{i \max} - C_{i \min})/2n$. С увеличением количества узлов аппроксимации точность представления межузловых отрезков выходной статической характеристики сенсоров возрастает, однако при этом соответствующим образом увеличиваются потребности в ресурсах памяти процессора и во времени выполнения измерений.

Для точек с нечетными индексами линейные сплайны $X_{\text{ли}i}$ определяются функциями $S(X_i, \{C_{i 2j+1}\})$:

$$X_{\text{ли}i} = S(X_i, \{C_{i 2j+1}\}) = C_{i 2j+1} + (X_i - X_{i 2j+1})k_{i 2j+1}; X_{i 2j+1} \leq X_i \leq X_{i 2j+3};$$

$$k_{i 2j+1} = (C_{i 2j+3} - C_{i 2j+1})(X_{i 2j+3} - X_{i 2j+1})^{-1} = 2h(X_{i 2j+3} - X_{i 2j+1})^{-1},$$

где $C_{i 2j+1} = W(X_{i 2j+1})$; $C_{i 2j+3} = W(X_{i 2j+3})$; шаг аргумента $h = \text{const}$. Этот вид аппроксимации крайне прост, тем не менее в ряде случаев он оказывается достаточно эффективным; с учетом этого до недавнего времени при разработке средств измерения ограничивались только его применением.

Параболические сплайны задаются при этом уравнениями следующего вида:

$$X_{\text{п}i} = S(X_i, \{C_{i 2j+1}\}) = \alpha_{ij} + (X_i - X_{i 2j+1})\beta_{ij} + (X_i - X_{i 2j+1})^2\gamma_{ij}; X_{i 2j+1} \leq X_i \leq X_{i 2j+3}.$$

В таком случае для точек с нечетными индексами коэффициенты параболизации будут иметь следующие значения:

$$\alpha_{i 2j+1} = C_{i 2j+1};$$

$$\beta_{i 2j+3} = (C_{i 2j+3} - C_{i 2j+1})h^{-1} - \beta_{i 2j+1};$$

$$\gamma_{i 2j+1} = (\beta_{i 2j+3} - \beta_{i 2j+1})(4h)^{-1},$$

где $\beta_{i 2j+1} = (C_{i 2j+3} - C_{i 2j+1})(2h)^{-1}$ – аналог первой производной в точке $C_{i 2j+1}$, $X_{i 2j+1}$.

В технологическом режиме должны быть оценены предельные абсолютные погрешности $\Delta_a X_{i \min}$, $\Delta_a X_{i \max}$ аппроксимации фактических консолидированных результатов цифрового измерения параметров C_i , а также рассчитаны математические ожидания абсолютных погрешностей $M(\Delta_a X_i)$ и среднеквадратические погрешности $\sigma(\Delta_a X_i)$:

$$M(\Delta_a X_i) = (2n + 1)^{-1} \sum_{j=0}^{2n} \{W_i(C_{ij}) - S(X_{ij})\},$$

$$\sigma(\Delta_a X_i) = \{M^{(2)}(\Delta_a X_i) - M^2(\Delta_a X_i)\}^{1/2},$$

где $M^2(\Delta_a X_i) = (2n)^{-1} \sum_{j=0}^{2n} \{W_i(C_{ij}) - S(X_{ij})\}^2$.

Таким образом, применение ρ -разрядного АЦП и программных процедур аппроксимации позволяют обеспечить абсолютную погрешность применения тракта прямого измерения $\Delta_r X_i$ параметра C_i на уровне

$$M(\Delta_r X_i) = M(\Delta_{\text{ц}} X_i) + M(\Delta_a X_i)$$

при среднеквадратической погрешности измерения

$$\sigma(\Delta_r X_i) = \{\sigma(\Delta_{\text{ц}} X_i)^2 + [\sigma(\Delta_a X_i)]^2\}^{1/2}.$$

В качестве функции плотности вероятности распределения погрешностей $\Delta_r X_i$ может быть выбрано треугольное распределение на интервале усечений с высотой распределения $H_r = 2(\Delta_r X_{i \max} - \Delta_r X_{i \min})^{-1}$, математическим ожиданием $M(\Delta_r X_i)$ и дисперсией $\sigma^2(\Delta_r X_i)$:

$$[|\Delta_r X_{i \min}| = |\Delta_{\text{ц}} U_{i \min}| + |\Delta_a X_{i \min}|;$$

$$|\Delta_r X_{i \max}| = |\Delta_{\text{ц}} X_{i \max}| + |\Delta_a X_{i \max}|].$$

Линеаризация и нелинейная аппроксимация результатов прямых измерений не исключают необходимости периодической калибровки и поверки измерительных трактов с оценкой фактических точностных характеристик.

Оцифровка дискретных сигналов в трактах интеллектуальной системы. Оцифровка дискретных сигналов предполагает преобразование наборов дискретных сигналов $\{D_1 D_2 \dots D_k\}$ во внутрипроцессорные кодовые комбинации $\{b_1 b_2 \dots b_k\}$ на основе использования дискретно-цифровых преобразователей и таблиц бинарных отношений. Таблицы бинарных отношений выполняют необходимые отображения:

$$\{D_1 D_2 \dots D_k\}_i \rightarrow X_i = \{b_1 b_2 \dots b_k\}_i.$$

При этом кортежи $\{D_1 D_2 \dots D_k\}$ однозначно преобразуются в соответствующие кодовые комбинации $\{b_1 b_2 \dots b_k\}$. Следует отметить, что рассматриваемые операции обладают свойством обратимости.

Такое построение процессов оцифровки обеспечивает организацию оперативного контроля за текущими дискретными состояниями различного рода технических средств: схем переключения, индикаторов, исполнительной арматуры и иного оборудования интеллектуальной системы.

Операции с оцифрованными параметрами в трактах интеллектуальной системы.
Калибровка результатов косвенных измерений параметров. Косвенные измерения применяются во всех случаях, когда прямые измерения текущих значений параметров по техническим или организационным причинам выполнены быть не могут. Особое место в сенсорном контроле занимают процессы определения значений виртуальных параметров, которые в принципе не предполагают проведение их прямых измерений. Текущие значения виртуальных параметров подлежат расчету на основании прямых измерений иных параметров.

Для проведения косвенных измерений применяется следующая аналитическая модель:

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n),$$

где Y – косвенно измеряемая величина; $F(X)$ – функциональная зависимость; X_1, X_2, \dots, X_n – результаты прямых измерений независимых параметров.

При выполнении косвенных измерений всегда необходима калибровка результатов, то есть действия, совокупность которых обеспечивает подтверждение состоятельности результатов измерений и пригодности средств измерений к их применению по прямому функциональному назначению.

Математическое ожидание ΔY и дисперсия DY погрешности измерения, а также среднеквадратическая погрешность $\sigma(Y)$ могут быть рассчитаны в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned}\Delta Y &= (\partial F/\partial X_1)\Delta X_1 + (\partial F/\partial X_2)\Delta X_2 + \dots + (\partial F/\partial X_n)\Delta X_n, \\ D(Y) &= (\partial F/\partial X_1)^2 D(X_1) + (\partial F/\partial X_2)^2 D(X_2) + \dots + (\partial F/\partial X_n)^2 D(X_n), \\ \sigma(Y) &= [(\partial F/\partial X_1)^2 (\sigma(X_1))^2 + (\partial F/\partial X_2)^2 (\sigma(X_2))^2 + \dots + (\partial F/\partial X_n)^2 (\sigma(X_n))^2]^{1/2},\end{aligned}$$

где ΔX_i , $D(X_i)$, $\sigma(X_i)$ – математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратическая погрешность результатов прямого измерения независимых параметров.

Цифровая фильтрация измеряемых сигналов в системе. Линейная цифровая фильтрация входной последовательности сигналов $\{X_i[n\Delta t]\}$ обеспечивает выделение или подавление определенных частот в его спектре. Здесь $n = 0, 1, 2, \dots$; Δt – интервал отсчетов по времени. Цифровая фильтрация основана на операциях интегральной свертки сигнала и требуемой импульсной (весовой) характеристики $h(t)$ с образованием выходной последовательности $\{X_{\Phi_i}[n\Delta t]\}$. Импульсная характеристика должна соответствовать реакции фильтра на сигнал в виде функции Дирака – единичного импульса $\delta(t)$ бесконечно малой длительности. Она является обратным преобразованием Лапласа L^{-1} от передаточной функции фильтра $\Phi(p)$:

$$h(t) = L^{-1}[\Phi(p)].$$

Процесс фильтрации реализуется с помощью дискретной свертки, при этом программные средства процессора обеспечивают выполнение следующих операций:

– вычисление последовательности конечных сумм $X_{\Phi_i}[k\Delta t]$ для трансверсальных фильтров с конечными импульсными характеристиками:

$$X_{\Phi_i}[k\Delta t] = \sum_{q=0}^Q h_i[q\Delta t] X_i[(k-q)\Delta t];$$

– вычисление последовательности сумм вида

$$X_{\Phi_i}[k\Delta t] = \sum_{q=0}^Q b_i[q] X_i[(k-q)\Delta t] - \sum_{r=1}^R a_i[r] X_{\Phi_i}[(k-r)\Delta t]$$

для рекурсивных фильтров с z -образом импульсной передаточной функции

$$\Phi(z) = \left\{ \sum_{q=0}^Q b_q z^{-q} \right\} \left\{ 1 + \sum_{r=1}^R a_r z^{-r} \right\}^{-1},$$

где Q, R – порядки использования в фильтре отсчетов соответственно входных сигналов и сигналов обратной связи; b_q, a_r – коэффициенты фильтрации.

Юстировка измерительных трактов интеллектуальной системы. Юстировка трактов измерений предполагает выполнение комплекса мероприятий по приведению всех компонентов тракта в состояния, обеспечивающие их правильную работу, надежность и устойчивость функционирования, а также требуемую точность измерений с доведением погрешностей до значений согласно заданным техническим требованиям.

Юстировка трактов выполняется в несколько этапов:

– ввод в процессор компонентов программного обеспечения и их размещение в постоянной памяти с последующим расчетом контрольных сумм блоков программ;

– ввод в процессор и обработка предписаний с целью предварительного задания условно-постоянной (редко изменяющейся) информации для реализации процессов измерения и преобразования;

– формирование контрольных сумм блоков условно-постоянной информации и их запись в постоянную память процессора;

– физическая коммутация каналов передачи сенсорной информации и результатов цифровых измерений;

– выполнение тестовых проверок аппаратуры, программных средств и условно-постоянной информации.

Условно-постоянная информация дифференцируется по измерительным трактам, и для каждого канала измерения параметра C_i включает, например: индивидуальный тип параметра; для непрерывных параметров – индивидуальные значения размахов $C_{i \min}$, $C_{i \max}$ и $U_{i \min}$, $U_{i \max}$; совокупность точек решетчатого представления выходной статической характеристики сенсора $\{U_{ij} = W_i(C_{ij})\}$ с шагом h ; тип сплайнов для аппроксимации измерений; для дискретных параметров – таблицы преобразований $\{D_1 D_2 \dots D_k\}_i \rightarrow X_i = \{b_1 b_2 \dots b_k\}_i$. Предписания позволяют организовать ввод в процессор, хранение и корректировку условно-постоянных данных в виде короткей отношений «параметр – условно-постоянные атрибуты».

Контроль работоспособности аппаратно-программных компонентов интеллектуальной системы. В объеме программного обеспечения процессора целесообразно реализовать базовый тест для проверки работоспособности важнейших аппаратных компонентов, каналов информационного обмена, целостности программ и целостности условно-постоянных данных. Базовый тест выполняется в ходе юстировки измерительных трактов, а также после каждого включения аппаратуры. Целесообразна внутренняя структуризация программного состава базового теста и обеспечение возможности проведения отдельных проверок по внешним запросам оператора. В зависимости от конкретного состава измеряемых параметров и темпа выполнения измерительных процессов должен быть определен состав проверок, которые могут выполняться в режиме тайм-аут.

Интеллектуальное управление исполнительными механизмами в системе. В высокоточных системах контроля и управления в качестве исполнительного оборудования часто применяются электрические двигатели разных типов, прежде всего двигатели постоянного тока, включая коллекторные двигатели, шаговые двигатели вращения и линейные шаговые двигатели. Особую категорию исполнительной арматуры составляют силовые и слаботочные коммутирующие системы.

В настоящее время разработан набор технических методов управления различными параметрами электродвигателей с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения питания при допустимых погрешностях движения механических узлов. Скорость вращения коллекторного двигателя с ШИМ-управлением и его пусковой момент пропорциональны скважности серии импульсов $\vartheta = \tau/T$, где $\tau = \tau(\text{IDBC}_{\text{вых}})$ – длительность импульса как функция выходного целочисленного цифрового двоичного кода управления $\text{IDBC}_{\text{вых}}$; $T = \text{const}$ – период следования импульсов. При этом достигается высокая точность и гибкость управления, сокращаются потери мощности на регулируемом компоненте, обеспечиваются требуемые пусковые моменты.

Известны разнообразные дискретные расписания переключения позиционирующих обмоток шаговых двигателей с минимизацией проскальзываний и алгоритмы управления коммутирующей арматурой. Информационные технологии позволяют построить эффективное логико-программное управление на основе таблиц $\{\text{IDBC}_{\text{вых}}\}_i \rightarrow \{D_1 D_2 \dots D_k\}_i$.

По сигналам датчиков процессорные программы формируют требуемые последовательности целочисленных цифровых двоичных кодов IDBC , которые подлежат последующему цифро-аналоговому или цифро-дискретному преобразованию. За счет применения каналов сенсорных измерений целесообразно оперативно формировать и использовать сигналы обратной связи, что позволяет строго контролировать текущее состояние или позиционирование рабочих органов и способствует повышению точности работы исполнительных механизмов.

Заключение. Концепция конвергенции системных решений в технологии построения интеллектуальных систем предполагает оцифровку значений физических величин при сенсорных измерениях, а также однотипное отображение и последовательное преобразование значения каждого контролируемого параметра на определенном наборе шкал. Для решения этой задачи предложен функционально полный набор шкал: естественных значений измеряемых физических параметров; результатов сенсорных преобразований физических величин; результатов измерения параметров в формате целочисленных двоичных кодов; значений параметров в формате вещественных масштабированных двоичных чисел.

На указанном наборе шкал построены унифицированные алгоритмы цифровизации результатов прямых измерений непрерывных параметров и их представления в форматах ρ -разрядных целочисленных двоичных кодов, преобразования измеряемых параметров в форматы вещественных масштабированных двоичных чисел и их отображения на шкалу естественных значений физических параметров. Специфицированы операции с оцифрованными физическими параметрами в трактах интеллектуальной системы: калибровка результатов косвенных измерений; оцифровка дискретных сенсорных сигналов, цифровая фильтрация результатов измерений, юстировка измерительных трактов; интеллектуальное управление исполнительными механизмами.

Список использованных источников

1. Hant, E. *Artificial Intelligence* / E. Hant. – New York: Academic Press, 1975. – 864 p.
2. Russel, S. *Artificial Intelligence: A Modern Approach* / S. Russel, P. Norvig. – New Jersey: Pearson Education, 2020. – 1136 p.
3. Сергиенко, А.Б. *Цифровая обработка сигналов* / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
4. Smit, S. *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists* / S. Smit. – San-Diego: Technical Publishing, 2002. – 643 p.
5. Гулай, А.В. *Архитектура интеллектуальных систем* / А.В. Гулай, В.М. Зайцев. – Минск: ИВЦ Минфина, 2018. – 367 с.
6. Гулай, А.В. Интеллектуальные мехатронные системы с дистанционной организацией транзакций: особенности построения / А.В. Гулай, В.М. Зайцев // Доклады БГУИР. – 2015. – № 7. – С. 92–98.
7. Федотов, А.В. Использование методов теории автоматического управления при разработке мехатронных систем / А.В. Федотов. – Омск: Из-во ОмГТУ, 2007. – 84 с.
8. Гулай, А.В. Дистанционное отображение сенсорной информации в базе данных интеллектуальной мехатронной системы / А.В. Гулай, В.М. Зайцев // Электроника-инфо. – 2015. – № 2. – С. 51–55.
9. Гулай, А.В. Программное управление исполнительными органами в интеллектуальных мехатронных системах / А.В. Гулай, В.М. Зайцев // Теоретическая и прикладная механика. – 2015. – Вып. 30. – С. 161–168.

References

1. Hant E. *Artificial Intelligence*. New York, Academic Press, 1975. 864 p.
2. Russel S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. New Jersey, Pearson Education, 2020. 1136 p.
3. Sergienko A. B. *Digital Signal Processing*. St. Petersburg, Piter Publ., 2002. 608 p. (in Russian).
4. Smit S. *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. San-Diego, Technical Publishing, 2002. 643 p.
5. Gulai A. V., Zaitsev V.M. *Architecture of Intelligent Systems*. Minsk, Data-Processing Centre of the Ministry of Finance, 2018. 367 p. (in Russian).
6. Gulai A. V., Zaitsev V.M. Intellectual mechatronic systems with remote organization of transactions: design features. *Doklady BGUIR = Reports BSUIR*, 2015, no. 7, pp. 92–98 (in Russian).
7. Fedotov A. V. *Use of Automatic Control Theory Methods While Developing Mechatronic Systems*. Omsk, Publ. House of Omsk State Technical University, 2007. 84 p. (in Russian).
8. Gulai A. V., Zaitsev V.M. The sensory information remote display in the intelligent mechatronic system database. *Elektronika-info* [Electronics-info], 2015, no. 2, pp. 51–55 (in Russian).
9. Gulai A. V., Zaitsev V.M. Software control of the executive bodies of intelligent mechatronic systems. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika = Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, no. 30, pp. 161–168 (in Russian).

Информация об авторах

Гулай Анатолий Владимирович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Интеллектуальные и мехатронные системы», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: is@bntu.by

Зайцев Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: is@bntu.by

Information about the authors

Anatoliy V. Gulay – Ph. D. (Engineering), Head of the Department “Intelligent and Mechatronic Systems”, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: is@bntu.by

Vladimir M. Zaitsev – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: is@bntu.by