

УДК 65.011.56

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ АРХИТЕКТУР ЖИЗНЕСПОСОБНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Кимяев И.Т. (Москва)

### Введение

Современная производственная организация представляет собой сложный объект хозяйственной деятельности (ОХД) в виде сгруппированных в физические, территориальные или функционально-технологические домены множество взаимосвязанных объектов управления (ОУ) и управляющих подсистем, представленных, в свою очередь, в виде производственных агрегатов и технологических линий [1].

Работо- и жизнеспособность (ЖС) каждого отдельного ОУ и ОХД в целом обеспечивают две укрупненные компоненты [2]: материально-энергетическая и организационно-информационная, состоящие из вертикальных и горизонтальных материальных, информационных, энергетических, финансовых и других базовых ресурсов и потоков со множеством рециклов (обратных связей). В настоящее время организацию непрерывного, гармонизированного по единым критериям, функционирования ОХД, включая компенсацию возмущений внешней среды различного генезиса, обеспечивает административно-управленческий аппарат. Задачу поддержания ОХД на требуемом уровне ЖС административный аппарат решает посредством выработки и реализации целенаправленных управляющих воздействий на всех уровнях производственной иерархии на основании регламентов, инструкций, обусловленных функциональным наполнением базовых технологических процессов, а также эвристическими процедурами.

В помощь, а также в той или иной степени на замену входящим в административный аппарат лицам, принимающим решения (ЛПР), которые на этапе достижения актуальных производственно-технологических целей решают информационно-кибернетические задачи наблюдения, идентификации и управления в условиях влияния внешней среды, создают (синтезируют) многоуровневые интегрированные информационно-управляющие системы (ИУС). Данные системы по заложенным в них алгоритмам выполняют корректную и своевременную обработку информационных потоков, циркулирующих как в контурах управления ОХД, так и за их пределами.

Один из способов решения задачи синтеза структуры ИУС заключается в построении управленческого пространства предметной области (ПрО) ОХД в виде иерархически связанных функциональных подсистем.

С. Бир [3] предложил рассматривать иерархические ОХД как аналог живого организма, а действия и процедуры по организации жизнедеятельности фирмы (фактически – управления ею) – по аналогии с отдельными функциями живого организма с несколькими выделенными зонами ответственности.

Способность ОХД адаптироваться к изменениям внешней среды при сохранении функциональности к решению комплекса целевых задач – определена как ЖС.

Еще один способ представления иерархической ИУС для ОХД рекомендован комплектом стандартов [1].

На рис. 1 представлены две обобщенные схемы организации ИУС: слева – на базе концепции т.н. модели жизнеспособной системы, предложенной С.Биром, и справа – типовая стандартизованная структура многоуровневых ИУС с отображением места и

приблизительной оценкой<sup>1</sup> степени участия ЛПР в решениях задач управления для крупного ОХД.

Исторически управленческая иерархия в составе ИУС и ЛПР решает три основные подзадачи: получает и преобразует актуальные данные (задача наблюдения), определяет текущее состояние ПрО (задача анализа / идентификации) и формирует управленческие решения (задача управления) на всех  $L_i$ , где  $i = 1 \dots 5$ , уровнях на основе приобретенных знаний и накопленного опыта. Например, для  $L_{1..2}$  — это поддержание для ОУ физических показателей (температуры, расходы, давления, концентрации и пр.) в установленных диапазонах; для  $L_{3..4}$  — обеспечение равномерной загрузки производства путем планирования использования его ресурсов и выбора требуемых показателей его ведения и т.д.

Путем сопоставления (рис. 1) функций, реализуемых по уровням модели ЖС и стандартизированной ИУС, можно отметить, что, кроме  $S_5$ , подсистемы одной структуры имеют практически эквивалентный аналог в другой:  $S_1 \leftrightarrow L_{1,2}$ ,  $S_2 \leftrightarrow L_3$ ,  $S_3 \leftrightarrow L_4$ . Выявленная существенная эквивалентность двух подходов к описанию ИУС говорит о наличии у них глубокой онтологической близости и позволяет предположить, что при создании жизнеспособного комплекса ОХД  $\leftrightarrow$  ИУС по стандартам [1] следует включать в контуры операционно- и/или информационно технологических (ОТ/ИТ) систем алгоритмы управления, наполненные эвристическими правилами.

Отметим, что всесторонние исследования всех пяти уровней моделей рис. 1 представляет собой чрезвычайно сложную и обширную задачу, и не могут быть уложены в рамки одной работы. Предмет настоящих исследований сужен до области с компонентами уровней  $L_3$  и ниже (обозначены штриховой линией).

Несмотря на обширную инженерную практику создания ИУС в соответствии с типовой структурой (рис. 1, справа), в настоящее время отсутствуют систематизированные и методологически выверенные прикладные подходы к решению задачи её синтеза в виде компонентов ОТ/ИТ-подсистем, способных к функциональному замещению административного управленческого звена в виде коллектива ЛПР.

Дополнительную сложность в решение задачи синтеза ИУС вносит потребность учитывать множественные изменения в ОХД, происходящие в течение его жизненного цикла (ЖЦ) в условиях изменений внешней среды. Данные изменения требуют регулярного решения задач как эволюционного конфигурирования, так и целенаправленной реконфигурации управляющего комплекса ЛПР  $\leftrightarrow$  ИУС. Задача конфигурации — при эволюционном развитии ОХД — целенаправленная, без радикальных изменений, адаптация актуальных видов обеспечения ИУС [3] к т.н. тренду производственно-технологических процессов по мере выполнения ремонтов оборудования и связанных с ними незначительных изменений показателей материальных и энергетических потоков и пр. Реконфигурация заключается в качественной модернизации архитектуры управленческого комплекса, после которой роли ЛПР  $\leftrightarrow$  ИУС (см. рис. 1) будут существенно перераспределены.

По результатам конфигурации / реконфигурации ИУС *интегральным критерием* успешной работы двухкомпонентной человеко-машинной структуры ЛПР  $\leftrightarrow$  ИУС можно определить способность ими поддерживать требуемую *категорию* ЖС [3, 4] ОХД на ключевых этапах его ЖЦ.

В настоящее время ЖС сложного объекта (СЛО) не имеет общепринятого формализованного представления. Исходя из целей настоящего исследования,

<sup>1</sup> Предложенная оценки степени участия ЛПР не является исчерпывающей, а лишь индикативно отражает актуальное состояние для лучших производственных практик.

определим ЖС как способность СЛО поддерживать в течение своего ЖЦ множество ключевых производственных и бизнес-показателей в диапазонах, которые обеспечивают безопасную – в части охраны труда, и эффективную – в части технико-экономических показателей, хозяйственную деятельность. В зависимости от типа ОХД и ПрО, к технико-экономическим показателям эффективности могут быть отнесены: маржинальность производства, востребованность продукции на рынке, ресурсоемкость, оборачиваемость капиталов, время вывода продукта на рынок и пр.<sup>2</sup>

Отметим, что подходы и методики, определяющие подобное конфигурирование и реконфигурирование, а также способы формализации ЖС в виде количественных и качественных показателей, находятся на начальных этапах развития [5].

Таким образом, формирование подходов и методологической базы по разработке метрик и процедур для эффективного эволюционно-итеративного изменения параметров и реконфигурирования структуры комплекса ОХД ↔ ИУС является в настоящее время актуальной научно-технической проблемой.

Ниже будет показано, что к задаче реконфигурации структуры ОХД ↔ ИУС целесообразно подходить с позиций проактивного управления сложностью ИУС, с широким привлечением современных способов моделирования.

### **Концепция управления сложностью ИУС как способ поддержания ЖС**

Создание методологической базы для решения проблемы поддержания ЖС СЛО на требуемом уровне включает в себя решение множества взаимоувязанных задач. На рис. 2 представлена концептуальная карта (схема) разработки методики формирования жизнеспособной ИУС с использованием принципов управления разнообразием, которая включает также элементы таксономических отношений между исследуемыми компонентами.

На предложенной схеме приведены основные (узловые) и входящие в них составные компоненты, а также семантические связи между ними. Данная схема отражает взаимодействие как традиционных, так и инновационных подходов и технологий формализации сложной многоструктурной ПрО, включая разнообразие среды: полимодельное описание; свёрточный подход к многокритериальному выбору; обработка слабоформализованной и нечеткой, включая экспертную, информации вероятностно-статистическим и нечетко-возможностными методами; логико-динамическое описание многоструктурных состояний и пр. [6, 7, 8]. Совокупное применение всех упомянутых подходов позволяет эффективно оперировать как количественными, так и качественными исходными данными при решении всего комплекса информационно-кибернетических задач, связанных с созданием и поддержкой комплекса ЛПР ↔ ИУС: наблюдения, идентификации, синтеза и моделирования [6].

К условному «ядру» концептуальной схемы на рис. 2 следует отнести следующие узловые компоненты: «ЖС», «ИУС», «Управление структурной динамикой» и «Архитектура» [9]<sup>3</sup>.

ЖС является свойством ОХД, поддерживается комплексом ЛПР ↔ ИУС и имеет различные категории и градации своего проявления, со своими характерными критериями и показателями, обусловленными конкретной ПрО. Данные критерии и

<sup>2</sup> Для различных сегментов хозяйственной деятельности набор конкретных технико-экономических показателей, их значимость и последовательность применения могут существенно различаться.

<sup>3</sup> Архитектура (системы) – принципиальная организация системы, воплощенная в её элементах, их взаимоотношениях друг с другом и со средой, а также принципы, направляющие её проектирование и эволюцию.

показатели отражают способность СЛО решать свои основные бизнес-задачи и являются, в свою очередь, целевыми функциями (функционалами) для отработки алгоритмов по управлению сложностью ИУС, включая структурную динамику. По результатам отработки данных алгоритмов формируются требования к архитектуре и технологиям работы ИУС (компонент «Архитектура»), которые реализуются в виде конкретного многокомпонентного и многоуровневого программно-технического комплекса.

Вследствие существующих ограничений по формату статьи, к более детальному рассмотрению примем компоненты концептуальной схемы (рис. 2) «Архитектура», «Имитационно-статистический подход» (ИСП) и «Нечетко-возможностный подход» (НВП) как имеющие высокую прикладную значимость.

В сложившейся практике из всего качественного многообразия архитектур ИУС, в зависимости от типа решаемых производственных задач, степени детализации, сложности, а также совершенства / целостности ЦД и количества охватываемых иерархий ей подконтрольного ОХД, можно выделить следующие концепции управления и соответствующие им технологии [1, 10]:

- «Автоматическое оптимальное». Представляет наиболее совершенный класс систем управления ОХД, построена на основе т.н. системы глобальной динамической оптимизации (СГДО). Охватывает уровни управления  $L_1...L_3$ , позволяет на базе мультимодельного подхода решать задачи оптимального многокритериального управления совокупностью ОУ, взаимоувязанных в рамках единого технологического цикла (домена);

- «Автоматическое многофакторное». Предполагает наличие компонентов, реализующих т.н. улучшенное управление (СУУТП) для отдельных ОУ, верхнеуровневое управление, которые выполняет коллектив ЛПР. Охватывает уровни управления  $L_1...L_2$ , позволяет на базе многофакторных контроллеров (регуляторов) обеспечивать работу ОУ в наиболее эффективных, по выбранному производственно-технологическому критерию, режимах;

- «Автоматизированное». Предполагает наличие систем базового контроля и регулирования (АСУТП), обрабатывающих сравнительно несложные законы автоматического управления, сигнализации, блокировок для основных технологических показателей. Охватывает уровни управления  $L_1...L_2$ , позволяет оперативному персоналу (ЛПР) на базе типовых ПИД-регуляторов поддерживать / стабилизировать локальные ОУ в наилучших режимах.

- «Ручное по месту». Предполагает наличие базовых информационно-измерительных систем, необходимых для непосредственного ручного управления материальными и энергетическими потоками, которое обрабатывает линейный производственный персонал (коллектив ЛПР) по предписаниям технологических регламентов. Охватывает уровни управления  $L_1...L_2$ , предполагает поддержку работы ОУ в режимах с наибольшим запасом устойчивости за счет максимального удаления от эффективных предкритических режимов.

Каждое архитектурно-технологическое решение ИУС может обеспечить для ОХД, находящегося под воздействием внешней среды, ту или иную категорию жизнеспособности: ЖС<sub>р</sub>, ЖА, ЖСА<sub>м</sub>, ЖСА<sub>о</sub> для «Ручное по месту», «Автоматизированного», «Автоматического многофакторного», «Автоматического оптимального» соответственно. При этом категории ЖС, которые обеспечивают ИУС даже с одним технологическим типом (базой) управления, могут существенно отличаться для различных паттернов воздействий внешней среды и создаваемых ими проектных или непроектных неопределенностей.

Качественный переход между типами архитектур ИУС в другую, смежную с исходной, целесообразно выполнять по факту завершения цикла из четырех информационно-кибернетических задач<sup>4</sup>. Данный переход предполагает изменения как уровня автоматизации иерархических слоев управления  $L_1...L_3$ , так и масштабов участия оперативно-технологического персонала (ЛПР) в принятии управленческих решений.

К одним из наиболее перспективных методологических подходов к моделированию (синтезу), в частности, алгоритмов работы ИУС с той или иной технологией управления, можно отнести ИСП и НВП.

Ниже (таблица 1) в обобщенном виде представлены используемые расчётные модели и предлагаемые обобщенные интерпретации результатов, полученных с их помощью ИСП и НВП. Проведенный анализ показывает, что предлагаемое комбинированное применение методик ИСП и НВП при обработке и анализе реальных технологических данных позволяет формально описать и связать структуры физических (материальных) и информационных потоков  $OU_1...OU_n$  ОХД, выявить и практически использовать декларативные и процедурные знания ЛПР о способах и методах поддержания требуемого уровня ЖС ОХД.

Более детальную информацию о теоретических и прикладных аспектах создания и использования НВП, включая множество практических примеров, можно почерпнуть в работах [7, 11].

В следующем разделе будет представлен пример синтеза структуры и расчета параметров управляющей модели ИУС с использованием методологий НВП.

Таблица 1

Методика		Описание
Хар-ка	Тип	
Вид расчетной модели для выходных переменных	ИСП	<p>Расчетное значение выходной переменной со значимыми коэффициентами аппроксимирующего полинома:</p> $y^{(k)} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i^{(k)} x_i^\circ + \sum_{j<u<n} b_{ju}^{(k)} x_j^\circ x_u^\circ + b^{(k)}_{12...n} x_1^\circ x_2^\circ \dots x_n^\circ$ <p>формируется по расчетной матрице <math>X^\circ = \ X_{ir}^\circ\ _{N \times m}</math>, <math>r = \overline{1, m}</math>,  где <math>m = n + p</math>;  <math>p</math> – количество нелинейных коэффициентов;  Значимость коэффициентов определяется по <math>t</math> – критерию Стьюдента:  <math>t = \frac{b_m}{s_{b_m}}</math>, где <math>s_{b_m}</math> – ошибка определения коэффициентов</p>
	НВП	<p>Расчетное значение нечеткой выходной переменной со значимыми коэффициентами аппроксимирующего полинома:</p> $\tilde{y}^{(k)} = \tilde{b}_0 + \sum_{j=1}^n \tilde{b}_j^{(k)} \tilde{x}_j^\circ + \sum_{j<u<n} b_{ju}^{(k)} \tilde{x}_j^\circ \tilde{x}_u^\circ + \tilde{b}^{(k)}_{12...n} \tilde{x}_1^\circ \tilde{x}_2^\circ \dots \tilde{x}_n^\circ$ <p>формируется по расчетной матрице <math>\tilde{X}^\circ = \ \tilde{x}_{ij}^\circ\ _{N \times m}</math>.</p> <p>Модель строится на основе сформированных критериев значимости и достоверности нечеткой модели, а также множества членов разложения полинома, аппроксимирующих неявные знания ЛПР об управлении компонентом ОХД.</p>

<sup>4</sup> Для реального ОХД ключевыми факторами в интегральной оценке целевых ЖС являются экономические, такие как стоимость перевода ИУС из одной категории в смежную, сроки окупаемости перевода и пр., ввиду его высоких энерго- и ресурсозатратности.

Интерпретация результатов расчета	ИСП	$y = f(x, b_0, b_1, \dots, b_n, b_{12}, \dots)$ – коэффициенты, отражающие специфику математической формализации исследуемого компонента ОХД, где $x = (x_1, x_2, \dots, x_r)$ , $r = \overline{1, m}$ – вещественные переменные, задающие факторное пространство работы ОУ как компонента ОХД. Подход заключается в процедурном использовании реальных технологических данных.
	НВП	$\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x}, \tilde{b}_0, \tilde{b}_1, \dots, \tilde{b}_n, \tilde{b}_{12}, \dots)$ – коэффициенты, отражающие количественную оценку знаний, опыта и интуицию ЛПР применительно к работе, где $\tilde{x} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_r)$ , $r = \overline{1, m}$ – нечеткие переменные, задающие факторное пространство работы ОХД на основе декларативных знаний ЛПР. Подход заключается в использовании декларативных знаний эксперта.

### Синтез автоматического многофакторного управления ИУС на базе НВП

В [12] показан пример формирования ИУС на базе технологии управления «Автоматическое многофакторное» для конкретного технологического ОУ «Печь кипящего слоя» (ПКС). Основной управляющий модуль для ИУС данного ОУ выполнен на основе нечеткого логического регулятора (НЛР), синтезированного средствами НВП на основе знаний ЛПР о выработке управленческих решений в конкретных производственно-технологических ситуациях.

Для синтеза НЛР для ПКС были выбраны ключевые технологические переменные:  $CV_{1\dots n}$  и  $MV_{1\dots m}$  (таблица 2), которые в рамках процедур НВП [11] были преобразованы в лингвистические переменные (ЛП) с разбивкой на пять значений. Числовые величины ЛП были представлены в виде унимодальных нечетких чисел ( $LR$ )-типа и соответствующим образом закодированы для представления в матрице опроса экспертов.

### Входные и выходные факторы и условия опроса

Таблица 2

Переменная, обозначение	Загрузка концентрата, т/ч	Загрузка пыли, т/ч	Температура в ПКС, °С	Градиент температуры в ПКС, °С/мин	Пульсации давления, мм в ст	Время предыстории, мин
Характеристика	$CV_1 / MV_1$	$CV_2 / MV_2$	$CV_3$	$CV_4$	$CV_5$	$CV_6$
Основной уровень	10	5	1050	0	1,5	37,5
Интервал варьирования	5	2	60	1,5	0,5	12,5
Уровень верхний	5	5	990	-1,5	0,5	12,5
Уровень нижний	15	7	1110	+1,5	2	50
Кодированное обозначение	$cv_1 / -$	$cv_2 / -$	$cv_3$	$cv_4$	$cv_5$	$cv_5$

В соответствии с положениями методик НВП [11] был построен ортогональный план (матрица) опроса ЛПР (оператора-технолога), в соответствии с которым от него были получены данные о величине вырабатываемых управляющих воздействий. Путем обработки информации полностью заполненной матрицы опроса ЛПР в соответствии с принципами планированного эксперимента, при уровне значимости коэффициентов уравнений 0,05 и ошибке их определения  $s\{b_i\}=0,51$ , рассчитанной по критерию  $t$  – Стьюдента, были получены следующие зависимости:

$$\begin{aligned}
MV_1 = & 12,56 + 0,77cv_1 + 1,31cv_2 - 0,95cv_3 - 2,1cv_4 - 1,43cv_6 - 0,73cv_1 cv_2 + \\
& + 1,12cv_1 cv_3 + 1,83cv_1 cv_4 - 1,15cv_1 cv_6 - 1,72cv_2 cv_3 - 1,24cv_2 cv_4 - 0,75cv_2 cv_5 - \\
& - 0,9cv_3 cv_5 - 1,22cv_3 cv_4 + 0,56cv_5 cv_6 - 1,19cv_1 cv_2 cv_4 - 0,72cv_1 cv_2 cv_3 - \\
& - 0,55cv_1 cv_5 cv_6 - 0,53cv_2 cv_4 cv_6 - 1,63cv_2 cv_3 cv_6 - 1,23cv_3 cv_4 cv_6 \quad (1);
\end{aligned}$$

$$MV_2 = 4,8 + 1,4cv_2 - 0,55cv_6 - 0,52cv_1cv_2cv_4 - 0,58cv_1cv_2cv_3 - 0,55cv_2cv_3cv_6 \quad (2)$$

В выражениях (1), (2) представлены только значимые коэффициенты.

Обобщенная архитектура комплекса ОХД ↔ ИУС, в котором функциональные управленческие полномочия ЛПР делегируются расчетной компоненте НЛР ↔ СУУТП с БЗ в виде полиномов (1) и (2), представлена на рис. 3.

### Заключение

В статье показано, что для организации эффективной работы сложного объекта хозяйственной деятельности, гармонизированной, например, по единым технико-экономическим критериям, а также обеспечения компенсации возмущений внешней среды различного генезиса целесообразно обеспечить возможность целенаправленных, проактивных структурно-архитектурных изменений системы.

Отмечено, что формирование подходов к решению данной актуальной научно-технической проблемы требует привлечения различной теоретико-методологической базы, которая позволит комплексно решить основные информационно-кибернетические подзадачи наблюдения, анализа, моделирования и выбора. В качестве наглядного примера привлечения разносторонней теоретической базы приведена обобщенная концептуальная карта. Единым, интегральным критерием успешности решения задачи управления разнообразием был принят т.н. уровень жизнеспособности ОХД, который включает множество ключевых производственных и бизнес-показателей, и, в зависимости от типа ОХД, такими показателями могут быть: сохранение жизни и здоровья персонала, маржинальность производства, востребованность продукции на рынке, ресурсоемкость, оборачиваемость капиталов, время вывода продукта на рынок и пр.

Отмечено, что поэтапное переустройство управляющих комплексов заключается в целенаправленном изменении степени участия «коллективного ЛПР» в принятии управленческих решений, что позволяет последовательно и планомерно поддерживать жизнеспособность подконтрольного СлО, повышает возможности к гибкой адаптации к изменениям внутренних и внешних условий путем реализации сбалансированного управления.

Создание и последовательный запуск контуров переустройства / реконфигурации ИУС тесно связаны с разработкой – пока не существующего – подхода к планомерному и эволюционному замещению «коллективного» ЛПР как естественной управляющей подсистемы на эквивалентные логико-динамические модельно-алгоритмические комплексы.

В качестве одного из прикладных подходов перераспределения роли ЛПР в принятии решений в периметре ИУС и ОХД был предложен инновационный принцип комбинации имитационно-статистического и нечетко-возможностного моделирования и пр., для того, чтобы обеспечить эффективную реконфигурацию управляющих и управляемых подсистем под воздействием возмущений внешней среды.

### Литература

1. ГОСТ Р МЭК 62264-1-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Интеграция систем управления предприятием. Часть 1. Модели и терминология. Enterprise-control system integration. Part 1. Models and terminology.

2. **Кимяев И.Т., Соколов Б.В.** Проблемы и методические подходы к повышению жизнеспособности производственных объектов на основе концепции эволюционного управления // Информационные технологии. – 2023. – Том 29, № 1. – С. 23-32.
3. **Бир С.** Кибернетика и менеджмент / Пер. с англ. – М.: КомКнига, 2010. – 280 с.
4. **Kimyaev I.T., Spesivtsev A.V.** (2022). Ontological and Fuzzy-Possibility Approach to the Synthesis of the DM Functional Equivalent for Management of Hierarchical Systems // Silhavy R. (eds) Artificial Intelligence Trends in Systems. CSOC 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 502. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-09076-9\\_53](https://doi.org/10.1007/978-3-031-09076-9_53).
5. **Полищук Ю.В.** Информационная технология применения квазиструктурированной информации при управлении большими производственными системами с контролем информационной энтропии: дис. ... докт. тех. наук. – Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2021.
6. **Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. – М.: РАН, 2018. – 314 с.
7. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
8. **Кимяев И.Т., Спесивцев А.В.** Нечетко-возможностный подход как инструмент управления сложностью интегрированных информационно-управляющих систем объектов // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2022. – № 11. – С. 813–817.
9. ГОСТ Р 57100-2016/ISO/IEC/IEEE 42010:2011 Национальный стандарт Российской Федерации. Системная и программная инженерия. Описание архитектуры. Systems and software engineering. Architecture description.
10. ГОСТ Р ИСО 15746-1-2016. Интеграция возможностей усовершенствованного управления технологическими процессами и оптимизации для производственных систем. Часть 1. Структура и функциональная модель. 2016.
11. **Спесивцев А.В.** Формализация и использование явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния сложных объектов. / Автореферат дис. ... докт. тех. наук. – С.-Пб., 2019.
12. **Кимяев И.Т.** Интеллектуальная система управления процессом обжига сульфидного никелевого концентрата в кипящем слое (На примере печи Обжигового цеха Никелевого завода ОАО «Норильская горная компания»): дис. ... канд. тех. наук. – М., МГИСиС, 2001.