Информационные технологии, автоматизация и управление в нефтегазовой отрасли

Information technologies, automation and management in the oil and gas industry

УДК 658

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ I4.0 ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

Е. Ю. Андиева¹, Е. В. Толкачева²

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ²Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия

Аннотация. В работе предложено формальное представление концепции с намеренным использованием мнемонических имен, которое формирует методологическую основу реализации I4.0 для производственных систем нефтеперерабатывающей отрасли. Концепция основана на определении и формальном представлении цифрового двойника производственной системы производства нефтепродуктов и системы управления данной производственной системой. Представление содержит новые термины и определения, существенно влияющие на представление процессов цифровизации производственных систем нефтеперерабатывающей отрасли.

Ключевые слова: индустрия 4.0 (14.0); цифровой двойник; нефтегазовая отрасль; непрерывное производство; рецептурное производство; управление сложными гетерогенными системами; управление состоянием

DEVELOPMENT OF METHODOLOGICAL BASIS 14.0 FOR PRODUCTION SYSTEMS OF OIL REFINING INDUSTRY

E. Yu. Andieva¹, E. V. Tolkacheva

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia ²Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

Abstract. The article suggests a formal presentation of the concept with the intentional usage of mnemonic names, which forms the methodological basis for the introduction of I4.0 for production systems of the oil refining industry. The concept is based on definition and formal representation of the digital twin of a production system of production of oil products and control systems of this production system. The article contains new terms and definitions that significantly affect the presentation of the processes of digitizing production systems in the oil refining industry.

Key words: industry 4.0 (I4.0); digital twin; oil and gas industry; continuous production; prescription production; management of complex heterogeneous systems; state management

№ 4, 2018

Введение

На сегодняшний день формируются методологические и технологические решения глобальной цифровизации больших и сложных экономических систем разного назначения и смешанного типа.

Выделим две очевидные особенности, приводящие к проблемам глобальной цифровой трансформации компаний нефтегазовой отрасли: первая заключается в том, что, как правило, компании имеют полный производственный жизненный цикл (ЖЦ): от разведки и добычи до переработки и сбыта, что приводит к сложной вертикальной и горизонтальной бизнес-интеграции в гетерогенной мегасистеме; вторая — весь производственный цикл, включая добычу, доставку, переработку и сбыт, имеет особенный непрерывный характер производства, с включениями особенностей рецептурного производства, что приводит к множеству альтернатив управления производственными процессами при наличии условия непрерывности.

Выделенные особенности приводят к проблеме управления сложной гетерогенной мегасистемой с точки зрения обеспечения гарантий целостности решений задач сквозного управления и к проблеме управления производством в дискретном представлении релевантной информации с целью автоматизации принятия решений.

Отметим, что Industry 4.0 (I4.0) употребляется как синоним IIoT (Industrial Internet of Things), который является производным понятием от IoT (Internet of Things). В парадигме I4.0 $^{\rm I}$ необходимо обеспечить максимально автоматическое превентивное управление требуемыми гарантиями качества нефтепродукта в связи с управлением стоимостью его производства по всей цепочке добавленной стоимости.

Первоочередной задачей разработки программных систем, обеспечивающих автономную роботизацию производственных процессов и интеллектуальную поддержку управленческих решений на основе извлечения знаний, основанных на разнородных данных, является разработка концепции системного преодоления сложности индустриальных систем, претерпевающих цифровую трансформацию.

Решение

Намеренно будем использовать мнемонические имена, в том числе в индексах. Это позволит описать многоаспектную ментальную модель на концептуальном уровне.

Для преодоления сложности представления системной структуры и управления ее поведением выделим из системы систем $SoS^{ol\&G}$ вертикально-интегрированной нефтегазовой компании производственную систему S^{Plant} , имеющую главной миссией 2 деятельность, предусматривающую производство основного актива — нефтепродукта, как обеспечивающую систему 3 управления ЖЦ некоторой системы нефтепродукта S^{ol} . Определение системы S^{ol} вызвано технологическими особенностями непрерывного и рецептурного производства, а также возможностью достижения результатов производства нефтепродукта с определенными свойствами при смешении технологий этих типов производств. Обеспечивающая система управления $S^{ControlPlant}$ производственной системой S^{Plant} должна обеспечивать эффективное управление ее ЖЦ.

Согласно определениям, далее будем различать производственную систему S^{Plant} на стадиях ее ЖЦ: концепция, разработка, реализация, эксплуатация и сопро-

¹Plattform Industrie 4.0 and Industrial Internet Consortium agree on cooperation. RAMI4.0& IIRA. – Available at: https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/PressReleases/2016/2016-03-02-kooperation-iic.html.

²ГОСТ Р ИСО 15704-2008. Промышленные автоматизированные системы. Требования к стандартным архитектурам и методологиям предприятия. − Введ. 2010-01-01. − М.: Стандартинформ, 2010. − 58 с.

³ГОСТ Р 57193-2016. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. – Введ. 2017-11-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 98 с.

вождение 4,5 . Уделим особое внимание эффективному управлению средствами управляющей системы $S^{ControlPlant}$ производственной системой S^{Plant} на стадии ее эксплуатации, с целью эффективного управления ЖЦ продукта S^{ol} на стадии его реализации.

Тогда в парадигме 14.0 далее рассмотрим методическую основу программной системы S^{SW} клиенториентированного адаптивного управления S^{Plant} на стадии ее эксплуатации, с целью эффективного автоматического управления ЖЦ продукта (S^{oL}) на стадии его реализации, точнее — его производства.

Управление непрерывным производственным процессом, или его сегментом, в объектном представлении это управление состоянием значений его входных и выходных параметров 6 .

Нефтепродукт является основным активом ⁷, определяющим ценность ⁸ компании нефтегазовой отрасли. Цель процесса или его сегмента состоит в том, чтобы получить нефтепродукт (нефтепродукты и сопутствующие продукты) с заданными промежуточными или конечными свойствами с максимально возможным эффективным исполнением процесса. В парадигме I4.0 должно формироваться превентивное управление состоянием параметров процесса на основе интеллектуальных алгоритмов принятия решений.

Примем в качестве объекта управления в новой клиенториентированной динамической бизнес-модели I4.0 нефтепродукт, точнее — состояние значений свойств нефтепродукта на определенном производственном сегменте стадии его ЖЦ.

Будем исходить из того, что требуемое состояние значений свойств нефтепродукта должно быть гарантированным в соответствии с политикой обеспечения его качества ⁹. Очевидно, технология производства должна определять и обеспечивать гарантированное качество товарного нефтепродукта, которое представляет собой измененное состояние «сырья» в цепочке производственных процессов или их сегментов, выполнение которых обеспечивают связанные с ним ресурсы.

Согласно бизнес-модели I4.0, примем в качестве обеспечивающих активов следующие объекты ресурсы — оборудование и люди (далее по тексту «работники») ¹⁰. Гарантированное состояние значений свойств нефтепродукта обеспечивают связанные с ним в процессе или его сегменте на всех этапах ЖЦ активыресурсы.

То есть гарантированное состояние значений свойств нефтепродукта обеспечивает гарантированное состояние свойств ресурсов, точнее — гарантированные состояния значений их свойств или параметров. Управление выделенными объектами ресурсами в соответствии с технологией должно обеспечивать эффективное управление производственными процессами с целью управления достижением гарантированного состояния значений свойств товарного нефтепродукта.

⁴ΓΟCT P ИСО 15704-2008. – C. 20.

⁵ГОСТ Р 56923-2016/ISO/IEC TR 24748-3:2011. Информационные технологии (ИТ). Системная и программная инженерия. Управление жизненным циклом. Часть 3. Руководство по применению ИСО/МЭК 12207 (Процессы жизненного цикла программных средств). Введ. 2017-06-01. — М.: Стандартинформ, 2016. — 106 с.

 $^{^{6}\}Gamma OCTP$ 57193-2016. – C. 35.

 $^{^{7}\}Gamma OCT~P~55.0.01\text{-}2014/UCO~55000:2014$. Управление активами. Национальная система стандартов. Общее представление, принципы и терминология. — Введ. 2015-04-01. — М.: Стандартинформ, 2015 — 22 с

 $^{^8 \}Gamma OCT~P~56020$ -2014 Бережливое производство. Основные положения и словарь. — Введ. 2015-03-01. — М.: Стандартинформ, 2014. — 38 с.

⁹ГОСТ Р ИСО/МЭК 15026-1-2016. Системная и программная инженерия. Гарантирование систем и программного обеспечения. Часть 1. Понятия и словарь. − Введ. 2017-06-01. − М.: Стандартинформ, 2016. − 28 с.

¹⁰Collaborative Management Model (CMM). Collaborative Manufacturing Management Strategies. – Available at: http://www.cpdee.ufmg.br/~luizt/integracao/arc_cmm.pdf.

Следовательно, цель управления — обеспечение требуемого, заданного, гарантируемого состояния значений его свойств, в результате исполнения сегмента процесса производства при условии требуемого, заданного, гарантируемого состояния значений свойств (параметров) ресурсов в связи с управлением стоимостью гарантий и стоимостью их обеспечения.

Будем считать, что обозначенная цель определяет изменения и соответствующие решения в управлении производственной системой производства нефтепродуктов в новых производственных отношениях цифровой экономики.

Глобальная цифровизация процессов управления и объектов управления формирует цифровой двойник объектов управления и процессов управления.

Примем, что всякая физическая система (производственная система, нефтепродукт, объекты ресурсы) как минимум имеет три уровня представления цифровой информации о ней.

Первый уровень — это уровень объективной реальности, уровень обладания информацией. Уровень является идеальной информационной репликой физической системы о своей статической структуре и динамическом поведении.

В аспекте рассматриваемой производственной системы производства нефтепродуктов уровень является идеально точной цифровой мета-моделью динамики состояния значений свойств физических активов на протяжении всего ЖЦ продукта и процессов (сегментов процессов) по всей цепочке добавленной стоимости. Уровень обладания формирует методы, методики и технологии извлечения полезной информации, требования к цифровым моделям — множеству описаний свойств (параметров) и управлению ими. Формирует изменения и управление изменениями требуемых на основании цифровых моделей состояний значений этих свойств (параметров) как нефтепродукта (в том числе гарантируемых для потребителя), так и ресурсов, обеспечивающих его ЖЦ.

Второй уровень — уровень требуемой, заданной реальности. Это уровень создания и извлечения полезной информации на основе цифровых моделей, множества описаний (структурных моделей и моделей, описывающих поведение), о свойствах и требуемом состоянии значений этих свойств. Уровень является цифровой мета-моделью требуемой, обеспечивающей все необходимые гарантии, заданной динамики физических активов на протяжении всего ЖЦ продукта и процессов по всей цепочке добавленной стоимости. Уровень должен отражать объективную реальность с достаточной точностью моделей.

Третий уровень — уровень фактической реальности. Это уровень создания информации на основе данных, полученных в результате измерений контрольноизмерительными приборами («полевой уровень») значений состояний свойств на
основе технологий технического контроля и диагностики нефтепродукта, и ресурсов. Уровень является моментальной информационной моделью, описывающей
моментальное состояние активов, отражает фактические значения состояний свойства и формирует фактическую реальность о состоянии нефтепродукта в процессе
производства, в том числе о состоянии объектов ресурсов, используемых в сегменте процесса согласно технологии. Уровень служит для определения фактических
значений свойств с целью формирования управляющего воздействия для достижения гарантированного состояния нефтепродукта и ресурсов. Уровень должен отражать фактическую реальность, согласованную с точностью моделей, и предоставлять информацию в необходимом представлении для принятия решения в определенный момент времени.

Тогда цифровой двойник — это трехуровневая цифровая модель логики управления I4.0, которая должна быть основана на интеллектуальных алгоритмах анализа данных оценки состояния объектов системы на фактическом уровне, интеллектуальных алгоритмах оперативного реагировании в соответствии с требованиями, обеспечивающими гарантии, более того, на алгоритмах извлечения знаний из анализа данных для формирования и выполнения дополнительных улучшенных функций — самостоятельного обучения для улучшения работы системы в условиях объективной реальности.

Примем следующее более общее определение: цифровой двойник — это связная динамическая самообучающаяся совокупность цифровых моделей системы и цифровых моделей управления этой системой, используемая для формирования, извлечения полезной информации и эффективного управления на их основе с учетом особенностей программной реализации и физической среды размещения.

Самообучение цифрового двойника вносит значительные изменения в ЖЦ системы, склеивая стадии ее ЖЦ ¹¹. Кардинально меняется бизнес-модель владения обеспечивающими производственными системами, например системой «оборудование». В данной работе этот вопрос не рассматривается.

Определим динамическую совокупность цифровых моделей, объективно отражающих структуру и управление поведением системой «нефтепродукт» соответственно на уровнях:

$$S^{ol} = \langle oI, atr_i^{oI}, R, G, Ac \rangle,$$

где oI — нефтепродукт, atr_i^{oI} — множество объективно существующих состояний значений свойств, определяющих «нефтепродукт», R — отношения, определяющиеся логикой, связывающей «нефтепродукт» с определенными свойствами и их значениями, уровнем принятия решения и целью принятия решения, G — цели принятия решения (зависят от уровня принятия решений), Ac — лицо, принимающее решение (может быть «не человек» и зависит от уровня принятия решений).

Аналогично: $S^{aP} = \langle aP, atr_i^{aP}, R, G, Ac \rangle$, где aP — оборудование, atr_i^{aP} — множество объективно существующих состояний значений параметров оборудования, R — отношения, определяющиеся логикой, связывающей оборудование с определенными его параметрами и их значениями, уровнем принятия решения и целью принятия решения, G — цели принятия решения (зависят от уровня принятия решений), Ac — лицо, принимающее решение (может быть «не человек» и зависит от уровня принятия решений); $S^W = \langle W, atr_i^W, R, G, Ac \rangle$, где W — «работник», atr_i^{aP} — множество объективно существующих состояний значений его свойств, R — отношения, определяющиеся логикой, связывающей «работника» с определенными его свойствами и их значениями, уровнем принятия решения и целью принятия решения, G — цели принятия решения (зависит от уровня принятия решений), Ac — лицо, принимающее решение (может быть «не человек» и зависит от уровня принятия решений).

Выделенные таким образом системы могут встраиваться в систему S^{Plant} и $S^{ControlPlant}$ в зависимости от цели и уровня принятия решения. Такое представление позволяет склеивать цифровые двойники систем на основании R, обеспечивая одни и те же G в зависимости от Ac.

Для наиболее общего описания концепции будем рассматривать в качестве основных объектов управления только объекты «нефтепродукт», «оборудование» и «работник», занятые в процессе выделенного производственного сегмента.

Примем следующие обозначения: $oI = \{atr_1^{oI}, atr_2^{oI}, ...\}$ — нефтепродукт, начиная с его добычи на уровне объективной реальности, представленный множеством значений объективно существующих свойств atr_i^{oI} (i=1,2,...); $oI^M = \{atr_1^{oIM}, atr_2^{oIM}, ..., atr_{NoI}^{oIM}\}$ — требуемый набор значений известных и требуемых свойств atr_i^{oIM} $(i=\overline{1,N_{oI}})$ нефтепродукта, который определяет его требуемое, гарантированное состояние, где N_{oI} — количество свойств нефтепродукта в зависимости от глубины познания объективной реальности; $oI^F = \{atr_1^{oIF}, atr_2^{oIF}, ..., atr_{NoI}^{oIF}\}$ — фактический набор значений известных, тре-

¹¹ΓΟCT P 56923-2016/ISO/IEC TR 24748-3:2011. – C. 40.

буемых свойств atr_i^F ($i = \overline{1, N_{ol}}$) нефтепродукта, который определяет его фактическое состояние, где N_{oI} — также количество свойств нефтепродукта в зависимости от глубины познания объективной реальности; $aP = \{atr_1^{aP}, atr_2^{aP}, ...\}$ — оборудование, используемое на определенном сегменте соответствующего этапа ЖЦ продукта на уровне объективной реальности представленной множеством значений atr_i^{aP} (i = 1, 2, ...); существующих параметров $aP^M = \{atr_1^{aPM}$, atr_2^{aPM} , ..., $atr_{N_{aP}}^{aPM}\}$ — требуемый набор значений известных параметров atr_i^{aPM} $(i=\overline{1,N_{aP}})$ оборудования, который определяет его требуемое, гарантированное состояние, где N_{aP} — количество параметров оборудования в зависимости от глубины познания объективной реальности; $aP^F = \left\{atr_1^{aPF}, atr_2^{aPF}, ..., atr_{N_{aP}}^{aP}\right\}$ — фактический набор значений известных свойств atr_i^{aPF} ($i=\overline{1,N_{aP}}$) оборудования, который определяет его состояние, где N_{aP} — также количество свойств оборудования в зависимости от глубины познания объективной реальности; $W = \{atr_1^W, atr_2^W, ...\}$ — «работник», обеспечивающий работу на определенном сегменте соответствующего этапа ЖЦ продукта на уровне объективной реальности, представленной множеством значений объективно существующих свойств и их значений atr_i^W (i=1,2,...); $W^M = \{atr_1^{WM}, atr_2^{WM}, ..., atr_{N_W}^{MM}\}$ — требуемый набор значений известных свойств atr_i^{WM} ($i=\overline{1,N_W}$) работника, который определяет его состояние, где N_W — коли $atr_i^W (i = 1, 2, ...);$ чество свойств работников в зависимости от глубины познания объективной реальности; $W^F = \{atr_1^{WF}, atr_2^{WF}, ..., atr_{N_W}^{WF}\}$ — фактический набор значений известных свойств atr_i^{WF} $(i=\overline{1,N_W})$ работника, который определяет его состояние, где N_W — также количество свойств работника в зависимости от глубины познания объективной реальности.

Так как должен осуществиться переход от управления на основе логики принятия решений в представлении на уровне объективной реальности к управлению на основе моделей, необходимо различать уровни управляющего воздействия — на уровне заданной реальности; на уровне моделей, с целью формирования требуемого состояния; и на уровне фактической реальности, с целью приведения фактического состояния к требуемому при допущениях контроля и измерений их фактических значений.

Уточним, что согласно объектно-ориентированному подходу состояние объекта характеризуется перечнем всех возможных статических свойств данного объекта и динамическими значениями каждого из этих свойств. Динамика свойств — изменение их во времени. Однако в объектном представлении изменение свойств можно определить через воздействие объекта на другие объекты и, наоборот, относительно изменения состояния этих объектов и передачи сообщений [1].

Примем $T = \bigcup_{k=1}^K T_k$ — множество сегментов производственного процесса, где K — количество сегментов, $T_k = \{atr_1^k, atr_2^k, ..., atr_{N_T}^k\}$, N_T — количество свойств сегмента. Сегмент производственного процесса T_k — минимальное функциональное логическое объединение объектов управления — рабочая технологическая единица, которая выполняет миссию на функциональном уровне — изменения состояния нефтепродукта в соответствии с технологией.

Тогда пусть $St_i^{ol}(T_k)$ — функция вызова множества значений объективно существующих состояний значений свойств нефтепродукта atr_i^{ol} (i=1,2,...), причем управление состоянием каждого значения i-го свойства нефтепродукта осуществляется в зависимости от состояний значений всех остальных свойств нефтепродукта и ресурсов, обеспечивающих данное состояние значения i-го свойства нефтепродукта. Тогда $St^{ol}(T_k) = \{atr_1^{ol} = St_1^{ol}(T_k), atr_2^{ol} = St_2^{ol}(T_k), ...\}$ — множество функций вызова объективно существующих состояний значений свойств нефтепродукта в сегменте производственного процесса T_k . Изменение состояния нефте-

продукта в результате реализации сегмента производственного процесса T_k , как минимального функционального логического объединения объектов управления, в данном контексте — объективно существующих, идеально управляемых объектов в рабочую технологическую единицу; $St_i^{aP}(T_k)$ — функция вызова множества значений объективно существующих состояний значений параметров оборудования atr_i^{aP} (i = 1, 2, ...), тогда

$$St^{aP}(T_k) = \{atr_1^{aP} = St_1^{aP}(T_k), atr_2^{aP} = St_2^{aP}(T_k), ...\}$$

 $St^{aP}(T_k)=\{atr_1^{aP}=St_1^{aP}(T_k),atr_2^{aP}=St_2^{aP}(T_k),...\}$ множество функций вызова объективно существующих состояний значений параметров оборудования в сегменте производственного процесса T_k ; $\mathit{St}^{\mathit{W}}_i(\mathit{T}_k)$ — функция вызова множества значений объективно существующих состояний значений свойств «работника», обеспечивающего работу на определенном сегменте atr_i^W (i=1,2,...), тогда $St^W(T_k) = \{atr_1^W = St_1^W(T_k), atr_2^W = St_2^W(T_k), ...\}$ — множество функций вызова объективно существующих состояний значений

$$St^{W}(T_{k}) = \{atr_{1}^{W} = St_{1}^{W}(T_{k}), atr_{2}^{W} = St_{2}^{W}(T_{k}), ...\}$$

свойств «работника» в сегменте производственного процесса T_k .

Пусть $St_i^{olm}(T_k)$ — функция вызова множества требуемых состояний значения свойств нефтепродукта на основе моделей, описывающих структуру и поведение нефтепродукта в atr_i^{oIM} $(i=\overline{1,N_{oI}})$ в сегменте производственного процесса T_k ,

 $St^{olM}(T_k) = \left\{atr_1^{olM} = St_1^{olM}(T_k), atr_2^{olM} = St_2^{olM}(T_k), ..., atr_{N_{ol}}^{olM} = St_{N_{ol}}^{olM}(T_k)\right\}$ — множество функций вызова требуемых состояний значений свойств нефтепродукта в сегменте производственного процесса T_k ; $St_i^{aPM}(T_k)$ — функция вызова состояний требуемых оборудования на основе моделей, описывающих структуру и поведение оборудования atr_i^{aPM} $(i=\overline{1,N_{aP}})$, тогда $St^{aPM}(T_k)=\{atr_1^{aPM}=St_1^{aPM}(T_k),atr_2^{aPM}=St_2^{aPM}(T_k),...,atr_{N_{aP}}^{aPM}=St_{N_{aP}}^{aPM}(T_k)\}$ — множество функций вызова требуемых состояний значений параметров оборудования в сегменте производственного процесса T_k ; $St_i^{WM}(T_k)$ — функция вызова множества требуемых состояний значения свойств «работника», обеспечивающего работу на определенном

сегменте на основе моделей,
$$atr_i^{WM}$$
 $(i=\overline{1,N_W})$, тогда $St^{WM}(T_k)=\left\{atr_1^{WM}=St_1^{WM}(T_k),atr_2^{WM}=St_2^{WM}(T_k),...,atr_{N_W}^{WM}=St_{N_W}^{WM}(T_k)\right\}$ — множество функций вызова требуемых состояний значений свойств «работника» в сегменте производственного процесса T_k .

Пусть $St_i^{olf}(T_k)$ — функция вызова фактического значения состояния свойства, управление его значением atr_i^{olf} $(i = \overline{1, N_{ol}})$, набор алгоритмов, осуществляющих

управляющее воздействие на значение свойства, тогда
$$St^{olF}(T_k) = \left\{atr_1^{olF} = St_1^{olF}(T_k), atr_2^{olF} = St_2^{olF}(T_k), ..., atr_{N_{ol}}^{olF} = St_{N_{ol}}^{olF}(T_k)\right\}$$
— множество функций вызова фактических состояний значений свойств нефтепродукта в сегменте производственного процесса T_k .

Использование представления сегмента производственного процесса T_k как минимального функционального логического объединения объектов управления в рабочую технологическую единицу позволяет осуществлять операционное управление выполнения миссии на основе КРІ: управление состоянием основного актива — нефтепродукта, управление состоянием ресурсов для обеспечения состояния нефтепродукта на основе KPI — сегмента процесса T_k .

Поскольку принято, что управляющее воздействие на состояние объекта «нефтепродукт» осуществляется работниками посредством оборудования, а также учитывая, что поведение характеризует воздействие объекта на другие объекты и наоборот, относительно изменения состояния этих объектов и передачи сообщений опишем функцию управления объектами «оборудование» и «работник».

Тогда аналогично: пусть $St_i^{aPF}(T_k)$ — функция вызова фактического значения состояния параметра, управление его значением atr_i^{aPF} ($i = \overline{1, N_{aP}}$), набор алгоритмов, осуществляющих управляющее воздействие на значение параметра; $St^{aPF}(T_k) = \left\{atr_1^{aPF} = St_1^{aPF}(T_k), atr_2^{aPF} = St_2^{aPF}(T_k), ..., atr_{N_{aP}}^{aPF} = St_{N_{aP}}^{aPF}(T_k)\right\}$ — множество функций вызова фактических состояний значений параметров оборудования в сегменте производственного процесса T_k ; пусть $St_i^{WF}(T_k)$ — функция вызова фактического значения состояния свойства «работника», управление его значением, обеспечивающим работу на определенном сегменте atr_i^{WF} ($i=\overline{1,N_W}$), набор алгоритмов, осуществляющих управляющее воздействие на значение свойства, $St^{WF}(T_k) = \left\{atr_1^{WF} = St_1^{WF}(T_k), atr_2^{WF} = St_2^{WF}(T_k), ..., atr_{N_W}^{WF} = St_{N_W}^{WF}(T_k)\right\}$ множество функций вызова фактических состояний значений свойств людей, обеспечивающих работу в сегменте производственного процесса T_k .

На уровне познания объективной реальности формируются требования к состоянию свойств нефтепродуктов на основе множества моделей. В зависимости от принятия решений требования могут быть как высокоуровневые бизнестребования к экономическим показателям эффективности $S^{ControlPlant}$, так и требования на более низких уровнях принятия решений S^{Plant} , к промежуточным значениям свойств нефтепродукта и обеспечивающих его ресурсов с целью технической и технологической реализации сегментов производственного процесса. Проверка соответствия требованиям осуществляется на уровне измеренных, фактических. Необходимо обеспечить отклик изменений в режиме реального времени фактических значений известных свойств на изменения требований объективной реальности. Очевидно, моделирование такой сложной системы требует множества описаний. Такое множество описаний с различных точек зрения назовем моделью моделей описания системы. А системное представление управления моделями описаний — мета-моделью.

Предположим, что Mod_1 содержит все возможные данные — объективно существующие свойства, которые отражаются в требованиях к состоянию значений свойств нефтепродукта и ресурсов, обеспечивающих его ЖЦ. Такую модель можно условно считать прогнозной моделью на основе выявления устойчивых новых закономерностей.

Введем следующие обозначения:

 $Mod(T_k) = \{Mod^{ol}(T_k), Mod^{aP}(T_k), Mod^W(T_k)\}, \quad atr_i^{ol} \in Mod^{ol}(T_k), \quad atr_i^{aP} \in Mod^{aP}(T_k), \quad atr_i^W \in Mod^W(T_k), \quad (i = 1, 2, ...)$ — множество моделей в сегменте производственного процесса T_k .

конкретные необходимо транслировать требования модели описания состояний значений известных свойств: $Mod_1^M(T_k) = \{Mod_1^{oIM}(T_k), Mod_1^{oPM}(T_k), Mod_1^{WM}(T_k)\}, atr_i^{oIM} \in Mod_1^{oIM}(T_k) = \bigcap_{j=1}^{c^{oIM}} Mod_1^{oIM_j}(T_k) \quad (i = \overline{1, N_{oI}}), atr_i^{oPM} \in Mod_1^{oPM_j}(T_k) = \bigcap_{j=1}^{c^{oPM}} Mod_1^{oPM_j}(T_k) = \bigcap_{j=1}^{c^{oPM}} Mod_1^{oPM_j}(T_k)$ $(i = \overline{1, N_{oI}}), atr_i^{WM} \in Mod_1^{WM}(T_k) = \bigcap_{j=1}^{c^{WM}} Mod_1^{WM_j}(T_k) \quad (i = \overline{1, N_{W}}),$ где $Mod_1^{olM}(T_k)$, $Mod_1^{apM}(T_k)$, $Mod_1^{WM}(T_k)$ — мета-модель, множество описаний состояния значения известного свойства нефтепродукта и ресурсов, пересечения данных из моделей для обеспечения логики принятия решения в сегменте производственного процесса T_k ; $Mod_1^{olM_j}(T_k)$, $Mod_1^{aPM_j}(T_k)$, $Mod_1^{WM_j}(T_k)$ — модель, описание состояния значения известного свойства нефтепродукта и ресурсов; C^{olM} , C^{aPM} , C^{WM} — количество моделей известных свойств нефтепродукта и ресурсов.

Измеренные, фактические состояния значений известных свойств нефтепродукта и ресурсов

$$atr_i^{OIF} = St_i^{OIF}(T_k), atr_i^{OIF} = St_i^{OIF}(T_k), atr_i^{OIF} = St_i^{OIF}(T_k)$$

 $atr_i^{olF} = St_i^{olF}(T_k), \, atr_i^{aPF} = St_i^{aPF}(T_k), \, atr_i^{WF} = St_i^{WF}(T_k)$ в сегменте производственного процесса T_k сравниваются с требуемыми значениями известных свойств $atr_i^{olM}, \, atr_i^{aPM}, \, atr_i^{WM}$ в том же сегменте производственного процесса T_k .

На основании результатов сравнений формируется логика принятия решения об управляющем воздействии в соответствии с иерархией принятия решений.

Логика принятия решения и управляющее воздействие зависят от иерархии принятия решения. Логика принятия решений опирается на результаты сравнения фактических состояний $(St^{olf}(T_k), St^{aPF}(T_k), St^{WF}(T_k))$ и требуемых $(St^{olM}(T_k), St^{aPM}(T_k), St^{WM}(T_k))$ в сегменте производственного процесса T_k .

Тогда модели управления мета-моделью — совокупность алгоритмов, определяющих логику принятия решений Log^{H_j} на уровне H_j , j=0,1,...,S, где S — количество уровней принятия решений, которое может меняться. Следует помнить, что логика принятия решений зависит от двух значимых уровней — уровня логики информационных сервисов по формированию адаптивного управления на основе анализа больших данных и уровня логики хранения, поиска и передачи данных на основе технологий больших данных.

Уровни принятия решений для выполнения миссии:

• H_0 — совокупность алгоритмов, определяющих логику принятия решений адаптивного управления с целью формирования изменений требуемых, на основе моделей, свойств нефтепродукта и ресурсов, а также состояний их значений на основе стратегических и оперативных бизнес решений:

$$Log^{H_0}(St^{olf}(T_k), St^{aPF}(T_k), St^{WF}(T_k));$$

• H_I — совокупность алгоритмов, определяющих композиционную логику принятия решений по приведению фактических значений к модельным:

$$Log^{H_1} \circ Log^{H_0}(St^{oIF}(T_k), St^{aPF}(T_k), St^{WF}(T_k));$$

• H_2 — совокупность алгоритмов, определяющих композиционную логику принятия решений реализации управляющих воздействий по приведению фактических значений к модельным:

$$Log^{H_2} \circ Log^{H_1} \circ Log^{H_0} (St^{olf}(T_k), St^{aPF}(T_k), St^{WF}(T_k)).$$

Уровни принятия решений для операционного управления выполнения миссии:

• H_3 — совокупность алгоритмов, определяющих композиционную логику принятия решений, объединенных по уровню управления минимальной единицей управления (например, задвижкой):

$$Log^{H_3} \circ Log^{H_2} \circ Log^{H_1} \circ Log^{H_0}(St^{olf}(T_k), St^{aPF}(T_k), St^{WF}(T_k));$$

• H_4 — совокупность алгоритмов, определяющих композиционную логику принятия решений, объединенных по уровню управления минимальным узлом управления с обеспечением требуемой эффективности операционного управления, а также с учетом взаимосвязанных управляющих воздействий на минимальные единицы управления (например, «набором» задвижек):

$$Log^{H_4} \circ Log^{H_3} \circ Log^{H_2} \circ Log^{H_1} \circ Log^{H_0}(St^{olf}(T_k), St^{aPF}(T_k), St^{WF}(T_k));$$

• H_5 — совокупность алгоритмов, определяющих композиционную логику принятия решений, объединенных по уровню управления частью установки с обеспечением требуемой эффективности операционного управления, а также с учетом взаимосвязанных управляющих воздействий на минимальные узлы управления:

$$Log^{H_5} \circ Log^{H_4} \circ Log^{H_3} \circ Log^{H_2} \circ Log^{H_1} \circ Log^{H_0} (St^{olf}(T_k), St^{aPF}(T_k), St^{WF}(T_k)).$$

Уровни принятия решений для оперативного управления выполнения миссии:

• H_6 — совокупность алгоритмов, определяющих композиционную логику принятия решений, объединенных по уровню управления установкой с обеспечением оперативного управления эффективностью, а также с учетом взаимосвязанных управляющих воздействий на части установки, при необходимости:

$$Log^{H_6} \circ Log^{H_5} \circ Log^{H_4} \circ Log^{H_3} \circ Log^{H_2} \circ Log^{H_1}$$

 $\circ Log^{H_0} (St^{olf}(T_k), St^{aPF}(T_k), St^{WF}(T_k));$

• H_7 — совокупность алгоритмов, определяющих логику принятия решений, объединенных по уровню управления группой установок с обеспечением опера-

тивного управления эффективностью, а также с учетом взаимосвязанных управляющих воздействий на установки:

$$Log^{H_7} \circ Log^{H_6} \circ Log^{H_5} \circ Log^{H_4} \circ Log^{H_3} \circ Log^{H_2} \circ Log^{H_1} \circ Log^{H_0} (St^{olf}(T_k), St^{aPf}(T_k), St^{Wf}(T_k));$$

• H_8 — совокупность алгоритмов, определяющих композиционную логику принятия решений, объединенных по уровню управления заводом с обеспечением оперативного управления эффективностью. Данный уровень является промежуточным уровнем между уровнями системы производства, выполняющей миссию, и уровнем управления производственной системой — управление миссией на основе KPI:

$$Log^{H_8} \circ Log^{H_7} \circ Log^{H_6} \circ Log^{H_5} \circ Log^{H_4} \circ Log^{H_3} \circ Log^{H_2} \circ Log^{H_1} \circ Log^{H_0} (St^{olf}(T_k), St^{aPF}(T_k), St^{WF}(T_k));$$

Уровни принятия решений для стратегического управления выполнения миссии:

• H_9 — совокупность алгоритмов, определяющих композиционную логику принятия решений, объединенных по уровню управления блоком. Такое организационное деление обусловлено значимо разным видом деятельностей вертикально организованной нефтегазовой компании, имеющей в своем ЖЦ разведку и добычу, переработку и логистику сбыта:

$$Log^{H_9} \circ Log^{H_8} \circ Log^{H_7} \circ Log^{H_6} \circ Log^{H_5} \circ Log^{H_4} \circ Log^{H_3} \circ Log^{H_2} \circ Log^{H_1} \circ Log^{H_0} (St^{olf}(T_k), St^{aPF}(T_k), St^{WF}(T_k));$$

• H_{I0} — совокупность алгоритмов, определяющих композиционную логику принятия решений, объединенных по уровню управления взаимодействием блоков с учетом прогностических изменений требований, формируемых внешней средой:

с учетом прогностических изменений требований, формируемых внешней средой:
$$Log^{H_{10}} \circ Log^{H_{9}} \circ Log^{H_{8}} \circ Log^{H_{7}} \circ Log^{H_{6}} \circ Log^{H_{5}} \circ Log^{H_{4}} \circ Log^{H_{3}} \circ Log^{H_{2}} \\ \circ Log^{H_{1}} \circ Log^{H_{0}} \big(St^{olf} (T_{k}), \, St^{aPF} (T_{k}), \, St^{WF} (T_{k}) \big).$$

Очевидно, требования к фактическому состоянию нефтепродукта и ресурсов соответственно, уточняются объективной реальностью, которая проявляет себя посредством воздействия внешней среды на состояние управляемой системы и логика принятия решений представляет из себя аналогичную композицию, реализуя адаптивное управление. Также логика принятия решений может формироваться между любыми уровнями иерархии систем.

ся между любыми уровнями иерархии систем. Фактическая эффективность управления S^{Plant} , $S^{ControlPlant}$ и выше в системе иерархии $SoS^{ol&G}$, выражается набором ключевых индикаторов эффективности $KPI^F = \bigcup_{j=4}^S \bigcup_{l=1}^{P_j} KPI_l^{H_j}$, где H_j — уровень принятия решений; S — количество уровней принятия решений, которое может меняться; P_j — количество KPI на уровне принятия решения H_j .

Каждый ключевой индикатор $\mathit{KPI}_l^{H_jF}$ характеризуется набором свойств $\mathit{KPI}_l^{H_jF} = \left\{ \mathit{atr}_1^{\mathit{KPI}_l^{H_jF}}, \mathit{atr}_2^{\mathit{KPI}_l^{H_jF}}, ..., \mathit{atr}_{N_l^{H_j}}^{\mathit{KPI}_l^{H_jF}} \right\}$, где $N_l^{H_j}$ — количество атрибутов

КРІ l-го типа на уровне принятия решений H_j , отражающих фактическое состояние ценности компании. Тогда пусть

$$St^{KPI_{l}^{H_{j}F}}(T_{k}) = \left\{ atr_{1}^{KPI_{l}^{H_{j}F}} = St_{1}^{KPI_{l}^{H_{j}F}}(T_{k}), atr_{2}^{KPI_{l}^{H_{j}F}} = St_{2}^{KPI_{l}^{H_{j}F}}(T_{k}), ..., atr_{N_{l}^{H_{j}}}^{KPI_{l}^{H_{j}F}} \right\}$$

$$= St_{N_{l}^{H_{j}}}^{KPI_{l}^{H_{j}F}}(T_{k})$$

— функция управления фактическим состоянием значений свойств КРІ l-го типа на уровне принятия решений H_j ; $St^{KPI}{}^{H_j}{}^F(T_k) = \bigcup_{l=1}^{P_j} St^{KPI}{}^{H_j}{}^F(T_k)$ — множество функций управления фактическим состоянием значений всех КРІ на уровне принятия решений H_j .

Таким образом, управление фактическим состоянием нефтепродукта и ресурсов, соответственно, является композиционным результатом фактического эффективного управления выполнения миссии согласно KPI.

В результате как минимум три связные модели управления мета-моделями, содержащими множество моделей описания структуры и ее поведения, порождают еще один уровень модели управления, цифровой двойник — мета-мета-модель моделей описания. Для того чтобы в дальнейшем осуществлять сложное управление мета-мета-моделью, не утратив системную целостность в процессах глобальной цифровизации, следует предусмотреть значительно возрастающую сложность управления возможными изменениями архитектур моделей и, тем более, архитектурных решений внутри моделей. Цифровой двойник зависит от особенностей его программной реализации и физической среды исполнения. Поэтому неотъемлемой его составляющей становится задача различения представления ЖЦ информации в формировании решений S^{SW} .

Выволы

Предложенное определение и формальное представление цифрового двойника производственной системы производства нефтепродуктов поддерживает много-уровневую сложносвязную систему оптимизации управления производством нефтепродуктов (изменение состояния нефтепродукта от «сырой нефти» до товарного), обусловленную технологией непрерывного (технологический маршрут использования оборудования) и рецептурного производства (смешение) при условии адаптивного диспетчерского управления и многоуровневую сложносвязную систему достижения такого управления через управляющее воздействие на обеспечивающие его ресурсы управления (изменение состояния оборудования для обеспечения изменения технологии, технологического маршрута и обеспечения требуемого смешения). Выявлена особенность использования цифрового двойника, которая приводит к кардинальным изменениям бизнес-модели владения.

Предложенная методология согласована с трехмерной моделью концепции референтной архитектуры [2] и очевидно связывает решения по управлению ЖЦ продукта с решениями по управлению ЖЦ производственной системы.

Предложенное выделение систем и представление их цифровых двойников позволяют предусмотреть «склеивание», обеспечить интероперабельность и вариабельность цифрового двойника производственной системы и далее обеспечить интероперабельность и вариабельность ее цифрового двойника в системе систем вертикально ориентированной компании нефтегазовой отрасли.

Библиографический список

- 1. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма [и др.]; пер. с англ. А. Слинкин; науч. ред. Н. Шалаев. СПб.: Питер, 2014. 366 с.
- 2. Andieva E. Y., Kapelyuhovskaya A. A. New Approaches to Digital Transformation of Petrochemical Production, AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1. P. 1–6. Available at: http://aip.scitation.org/toc/apc/1876/1?expanded=1876.

Сведения об авторах

Андиева Елена Юрьевна, к. т. н., доцент кафедры прикладной математики и фундаментальной информатики, Омский государственный технический университет, г. Омск, тел. 89059223333, e-mail: 55_elena@mail.ru

Толкачева Елена Викторовна, к. т. н., доцент, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск, тел. 89139730329, e-mail: tolkacheva_ev@mail.ru

Information about the authors

Andieva E. Yu., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Applied Mathematics and Fundamental Informatics, Omsk State Technical University, phone: 89059223333, e-mail: 55_elena@mail.ru

Tolkacheva E. V., Candidate of Engineering, Associate Professor, Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, phone: 89139730329, e-mail: tolkacheva_ev@mail.ru