ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(3):117-129
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 004:622 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_117

МЕТАМОДЕЛЬ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В КАРЬЕРЕ

С.А. Дерябин[1], Рзазаде Ульви Азар оглы[1], Е.И. Кондратьев[1], И.О. Темкин[1]
[1] НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: deryabin.sa@misis.ru

Аннотация: Рассмотрены вопросы цифровой трансформации горнодобывающих предприятий в рамках концепции Индустрия 4.0. Целью работы является формализация предложений по унификации представления эталонной модели архитектуры системы автономного управления открытыми горными работами. Раздел 2 посвящен обсуждению способов реализации цифровой трансформации предприятий, а также формальному представлению эталонной модели архитектуры цифрового горнодобывающего предприятия открытого типа. В разделе 3 дается описание реализованной функциональной метамодели архитектуры цифрового горнодобывающего предприятия. В разделе 4 показан пример моделирования работы предложенной архитектуры. Раздел 5 посвящен обсуждению полученных результатов и дальнейшим планам авторов по развитию предложенного подхода. По результатам исследований выделены ключевые особенности, требующие учета или изменения для реализации цифровой трансформации горнодобывающих предприятий, и конкретные шаги для приведения архитектуры бизнес-процессов к дата-центричному микросервисному виду. Дано формальное представление унифицированной эталонной метамодели архитектуры цифрового горнодобывающего предприятия открытого типа, обеспечивающей автономное выполнение бизнес-процессов. Показан пример программной реализации такой метамодели, а также пример экспериментального моделирования ее работы, в рамках которого определена функциональная жизнеспособность выбранного подхода.

Ключевые слова: DEA 1.0, цифровая трансформация предприятий, Индустрия 4.0, автономное производство, интеллектуальное управление, цифровой двойник, цифровая платформа, дата-центричная микросервисная архитектура, модель архитектуры.

Благодарность: Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда, проект № 19-17-00184.

Для цитирования: *Дерябин С. А., Рзазаде Ульви Азар оглы, Кондратьев Е. И., Темкин И. О.* Метамодель архитектуры системы автономного управления транспортно-технологическими процессами в карьере // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 3. – С. 117–129. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_117.

Metamodel of autonomous control architecture for transport process flows in open pit mines

S.A. Deryabin[1], Rzazade Ulvi Azar ogly[1], E.I. Kondratev[1], I.O. Temkin[1]
[1] National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia,
e-mail: deryabin.sa@misis.ru

© С.А. Дерябин, Рзазаде Ульви Азар оглы, Е.И. Кондратьев, И.О. Темкин. 2022.

Abstract: This article focuses on digital transformation of mines within the framework of Industry 4.0. The study aims to formalize proposals on harmonization of a master model of autonomous control architecture for open pit mining. Section 2 of the article discusses implementation of digital transformation approaches and formalization of the master model of architecture of a digital open pit. Section 3 describes the implemented functional metamodel of the digital mine architecture. Section 4 illustrates the proposed architecture modeling. Section 5 holds discussion of the results and further plans of the authors on improvement of the proposed approach. The key distinctions are identified from the research findings to be taken into account or adjusted in implementation of digital transformation of mines, and the particular actions are listed to transform the business-process architecture to a data-centric microservices form. The formal representation of the unified master metamodel of a digital open pit mine architecture to ensure autonomous accomplishment of business-processes is given. The case-studies of the metamodel software implementation and experimental modeling to demonstrate the functional viability of the approach are presented.

Key words: DEA 1.0, digital transformation, Industry 4.0, autonomous production, intelligent control, digital twin, digital platform, data-centric microservices architecture, architecture model.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 19-17-00184.

For citation: Deryabin S. A., Rzazade Ulvi Azar ogly, Kondratev E. I., Temkin I. O. Metamodel of autonomous control architecture for transport process flows in open pit mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(3):117-129. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_117.

Введение

Сегодня одним из основных трендов в области развития горнодобывающей промышленности является цифровая трансформация предприятий в рамках концепции Индустрия 4.0 [1, 2]. Под термином цифровая трансформация понимается переход к качественно новому уровню реализации бизнес-процессов, предполагающему минимизацию или полное исключение (там, где это возможно) участия человека в выполнении технологических работ [3]. Имеется в виду, что реализуемые сейчас бизнес-процессы с непосредственным участием человека, в том числе при помощи информационных и автоматизированных систем, должны быть переработаны к автономно исполняемому программно-аппаратному виду [4]. Таким образом ключевым вектором цифровой трансформации горнодобывающих предприятий является разработка новых программных и программно-аппаратных интеллектуальных систем на основе современных и перспективных технологий и инструментов Индустрии 4.0 [5, 6].

Сегодня на месторождениях с открытым способом добычи полезного ископаемого активно осуществляются проекты в области разработки и опытного тестирования роботизированных горно-транспортных комплексов, беспилотных летательных аппаратов для маркшейдерских работ, безлюдного высокоточного ведения буровзрывных работ, а также применения отдельных методов искусственного интеллекта в задачах мониторинга, планирования и управления технологическими процессами [3, 5 — 8].

Также к сравнительно новым направлениям можно отнести создание Цифрового Двойника предприятия, представляющего собой высокоточную динамическую виртуальную модель предприятия с двусторонней управляющей связью со своим физическим визави, что на сегодня дефакто можно считать финализирующей частью цифровой трансформации [7].

При этом, несмотря на успехи в практической реализации отдельных технологий, очевидной и критически важной проблемой на пути к их масштабированию и, по сути, к действительной цифровой трансформации предприятий остаются вопросы организации эффективной интеграции всех обозначенных решений в виде целостной автономной производственной системы [9—13]. В первую очередь данная проблема связана с необходимостью внесения существенных изменений в структурно-функциональные схемы реализации бизнес-процессов предприятий, предполагающих приведение эксплуатируемых программно-аппаратных систем к дата-центричному микросервисному виду архитектуры.

Сложность переработки эксплуатируемых систем обусловлена как необходимостью дополнительных экономических вложений в уже функционирующие программные продукты, так и высокими рисками нарушения непрерывности и безопасности производственных процессов (в том числе сопряженными с этим экономическими потерями) при введении в опытную эксплуатацию «сырых» систем [14]. Второй частью проблемы является отсутствие общего понимания модели такой архитектуры и, в особенности, обобщенного унифицированного представления ее компонентов и их структурно-функциональной взаимосвязи с учетом комплексности освоения ресурсов [15].

Таким образом, данное исследование нацелено на обобщение подходов к представлению дата-центричной микросервисной модели архитектуры системы автономного управления открытыми горными работами с учетом минимизации работ по изменению эксплуатируемых систем, а также формальному представлению примера реализации такой архитектурной модели.

Пути реализации цифровой трансформации и эталонный вид архитектуры цифрового предприятия

Необходимо отметить, что каждое отдельно взятое горнодобывающее предприятие имеет уникальный набор с настройками компонентов структурно-функциональной архитектуры реализации бизнес-процессов, что серьезно усложняет формализацию унифицированных требований к архитектуре цифрового предприятия [1, 2, 4, 5, 16]. Так, на схожих по способу и технологиям добычи полезного ископаемого предприятиях, порой даже находящихся в одном холдинге, зачастую одни и те же бизнес-процессы могут осуществляться либо в ручном режиме специалистами, либо с использованием информационных, автоматизированных или автономных систем совершенно разных производителей и, как следствие, разной конфигурации. Поэтому отталкиваться от конкретных примеров архитектуры для формулирования общих требований к цифровому предприятию практически невозможно.

Если исходить из понимания действительно общих свойств, т.е. непосредственно выполняемых бизнес-процессов, то с точки зрения геотехнологий добычи полезных ископаемых, таких как, например, операции по подготовке, извлечению и транспортированию горной породы, горно-геологических и маркшейдерских работ или задач планирования и управления производственной

деятельностью и ресурсами предприятия, можно определить следующую структуру:

1. Условное разделение всей архитектуры на технологическую среду, в которой действуют различного рода технические (самосвалы, экскаваторы и др.) и гео-инфраструктурные агенты (карьерные дороги, блоки горной породы и др.), и информационно-управляющую или распределенную вычислительную среду, представляющую собой симбиотическую плохо разграничиваемую смесь информационных, автоматизированных или иных классов программных систем.

2. Выделение ключевых укрупненных информационно-управляющих контуров, непосредственно оказывающих воздействие на технологическую среду — система диспетчеризации горно-транспортного комплекса, горно-геологическая информационная система и система управления ресурсами предприятия.

3. Различные требования (и фактические возможности по их реализации) к надежности и производительности технического, программного и информационного обеспечения для технологической и информационно-управляющих сред.

4. Наличие жестких клиент-серверных вертикальных связей как между агентами технологической среды и системами информационно-управляющих контуров, так и между самими информационно-управляющими системами, при которых процессы информационного взаимодействия для реализации бизнес-процессов осуществляются с использованием проприетарных программных интерфейсов.

5. Наличие однотипных перечней информации для описания всей проблемной среды: исторических, текущих и прогнозных состояний технических и инфраструктурных агентов; исторических, текущих и прогнозных плановых показателей производства, а также наборов управляющих воздействий для достижения необходимых показателей; наборов элементарных (неделимых) функциональных задач реализуемых бизнес-процессов, показателей метрик качества их исполнения, а также присущих им перечней данных, поступающих на вход и продуцируемых на выход в результате работы.

Все перечисленные обобщенные особенности современных горнодобывающих предприятий для осуществления цифровой трансформации должны быть учтены или, говоря, например, о пункте 4, полностью устранены. Так, основным ориентиром для обеспечения автономного выполнения бизнес-процессов является необходимость повышения интероперабельности между агентами технологической среды и информационно-управляющими системами путем приведения их всех к дата-центричному микросервисному виду архитектуры [8 — 12].

Под такой архитектурой сегодня понимается следующее:

1. Наличие унифицированных программных интерфейсов приложений для обеспечения процессов информационного взаимодействия по единому и гибкому шаблону общения.

2. Регуляризация процессов информационного взаимодействия с использованием специализированных служебных программных компонентов — интеграционных шин, брокеров и очередей сообщений.

3. Отслеживание показателей качества функционирования и управление отдельными агентами и системами в соответствии с их функциональными особенностями (точность) и технической реализацией (производительность) посредством включения в архитектуру таких служебных компонентов, как служ-

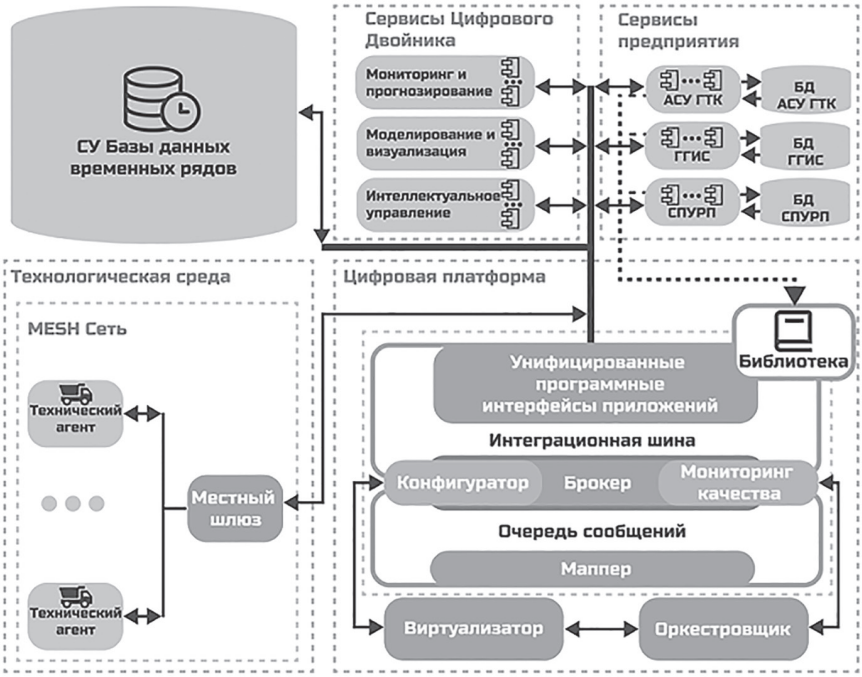

Рис. 1. Концептуальная модель эталонного вида архитектуры цифрового предприятия открытого типа
Fig. 1. Conceptual master model of digital open pit mine architecture

бы оркестровки вычислительных ресурсов и виртуализации микросервисов.

4. Организация получения первичных данных «нижнего» (исполнительного) уровня всеми заинтересованными сторонами с минимизацией нагрузки на среду передачи данных путем приведения сообщений к специфическому виду — объектов временного ряда, использования соответствующих Баз Данных Временных Рядов, а также специализированных служебных компонентов по модификации данных — мапперов.

5. Разделение всех бизнес-процессов на элементарные (неделимые) задачи — микросервисы, обладающие знаниями о собственных функциональных потребностях и возможностях (входных и выходных данных) и организованные как «черные ящики» по отношению друг к другу, т.е. работающие самостоятельно и независимо от работы и конфигурации остальных микросервисов.

Общий структурно-функциональный (концептуальный) вид эталонной архитектуры цифрового предприятия открытого типа представлен на рис. 1.

Однако, как уже отмечалось ранее, реализация всех перечисленных компонентов дата-центричной микросервисной архитектуры без внесения существенных изменений в эксплуатируемые на предприятиях системы невозможна. Вследствие этого для реализации цифровой трансформации предприятия необходимо осуществить следующие шаги:

1. Обеспечить интеграционный ландшафт путем проработки проектной технорабочей документации по приведению архитектуры предприятия в соответствие с изложенными требованиями, а также дорожных карт, отражающих перечень необходимых изменений.

2. Разработать и внедрить базовую платформенную часть архитектуры, включающую в себя все необходимые ком-

поненты, участвующие в процессах организации информационного обмена между агентами и информационно-управляющими системами.

3. Переработать или заменить эксплуатируемые системы на системы с микросервисной архитектурой, т.е. разделить бизнес-процессы на отдельные независимые элементарные функциональные блоки.

4. Включить в архитектуру службы контроля качества и управления функциональными микросервисами.

5. Осуществить интеграцию недостающих функциональных микросервисов, обеспечивающих автономное исполнение бизнес-процессов, включая роботизированные элементы, модули интеллектуального управления, а также Цифрового Двойника предприятия.

DEA — метамодель архитектуры цифрового предприятия

В соответствии с изложенными в разделе 2 предложениями по реализации цифровой трансформации предприятия нами была разработана функциональная программная метамодель архитектуры (рис. 2), представляющая собой прототипную версию цифрового горнодобывающего предприятия открытого типа и обладающая следующими характерными особенностями:

1. Ввиду сложности предопределения и фактической невозможности переработки эксплуатируемых систем, непосредственно участвующих в основном технологическом процессе — добыче полезного ископаемого, в разработанной модели ключевые агенты и системы представлены не в микросервисном виде, а в виде сервисов — укрупненных модулей. Такими модулями являются:

• AETechnicalAgent — технические агенты, под которыми подразумеваются роботизированные машины горнотранспортного комплекса (самосвалы и экскаваторы), действующие внутри технологической среды, собирающие и предоставляющие первичные данные;

• AEAHS — система диспетчеризации горнотранспортного комплекса (АСУ ГТК), отвечающая за мониторинг состояния и управление техническими агентами;

• AEMGIS — горно-геологическая информационная система (ГГИС), условно отвечающая за задачи определения геоструктуры карьера и оценки запасов месторождения;

• AEERP — система планирования и управления ресурсами предприятия (СПУРП), выполняющая задачи управления производством «высокого» уровня.

Все перечисленные агенты и системы в разработанной метамодели являются функционирующими компонентами и непосредственно осуществляют условный (не полный) информационной обмен в ходе реализации бизнес-процесса. При этом каждый из агентов и систем обладают знаниями о собственных функциональных возможностях (конфигурации), о которых они сообщают соответствующим служебным компонентам модели для публикации или получения данных, необходимых или получаемых в ходе осуществления собственных функций.

Предложенная модель предполагает следующие унифицированные типы сообщений от сервисов:

• AvailableData — объявление о возможности публикации данных;

• ReqiredData — объявление о перечне и структуре необходимых данных;

• GetStatus — запрос о возможности получения данных;

• SetConfig — запрос на установку конфигурации сервиса;

• GetInConfig — запрос на получение конфигурации структуры входных данных;

• GetOutConfig — запрос на получение конфигурации структуры выходных данных;

• Command — не детерминированная команда.

В соответствии с типом агента или системы каждый из сервисов осуществляет публикацию данных, продуцируемых по результатам его работы и агрегирующихся в платформенной части модели по соответствующим топикам (темам) данных, к которым могут подключаться другие сервисы для получения таких данных:

• TechnicalAgentData — топик, объявленный техническим агентом;

• AHSData — топик, объявленный системой диспетчеризации горнотранспортного комплекса;

• MGISData — топик, объявленный горно-геологической информационной системой;

• ERPData — топик, объявленный системой планирования и управления ресурсами предприятия.

Каждый из сервисов (агентов и систем) также обладает информацией о собственном качественном состоянии функционирования, программный вид которой на данный момент реализован следующим образом:

export enum ServiceStateTypes {

— Normal — штатный режим работы;

— NotSet — не настроен;

— CorruptedModule — имеются препятствия для штатной работы;

— Fatal — критическая ошибка }.

2. Платформенная часть архитектуры (Цифровая платформа) AEBus представляет собой набор служебных компонентов и библиотек, непосредственно обеспечивающих эффективное взаимодействие функциональных сервисов (агентов и систем).

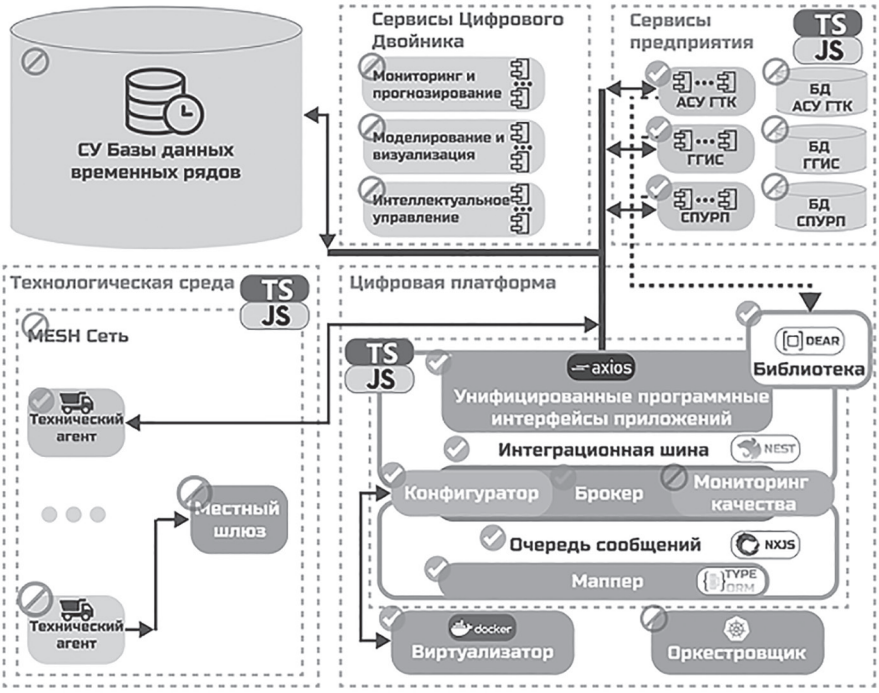

Рис. 2. Действующая метамодель архитектуры цифрового предприятия DEA 1.0
Fig. 2. Acting metamodel of digital mine architecture in DEA 1.0

Сервис «Интеграционная шина» содержит фактически реализованные унифицированные программные интерфейсы приложений (агентов и систем), а также единую библиотеку методов, к которой обращаются агенты и системы для осуществления подключения к общей схеме передачи сообщений.

Библиотека программных интерфейсов приложений содержит несколько типов возможного подключения — для сервисов (действующих и не переработанных систем) и для микросервисов (для новых или переработанных систем).

В интерфейсе ServiceApiInterface реализована типовая концепция CRUD (Create, read, update and delete), которая позволяет производить создание, чтение, обновление или удаление данных в системе. Данный интерфейс расширяет класс AppService (либо иную аналогичную технологию выполнения асинхронных/высоконагруженных операций). Он может быть использован для эксплуатируемых систем без внесения существенных изменений в их программную реализацию.

Интерфейс MicroServiceApiInterface унифицирует взаимодействие с любым микросервисом, предоставляя единую точку доступа к данным, конфигурации и типам сущностей. Данный интерфейс может (и должен) быть использован для всех существующих или разрабатываемых и включаемых в архитектуру микросервисов.

Интерфейс ServiceState обеспечивает внутреннее взаимодействие служебных компонентов платформы для управления функциональными сервисами и микросервисами.

Сервис «Брокер, очередь сообщений и маппер» состоит из нескольких отдельных микросервисов, осуществляющих функции организации связи между сервисами (формирование пайплайна), прослушивания запросов на данные и сообщений о публикации данных, формирования очередей сообщений, манипуляцию (добавление, удаление и т.д.) сообщениями в очередях и модификацию содержащихся в сообщениях данных для приведения их из поступающих форматов структуры данных от одних микросервисов к требуемым форматам других.

Метамодель архитектуры, а также подробное описание всех компонентов, включая методы и инструменты библиотеки, размещены на репозитории GitHub в открытом доступе под лицензией MIT (доступна для скачивания и свободного использования https://github.com/kinozal1/DEAMetamodel/).

Моделирование работы

Процесс функционирования разработанной программной метамодели архитектуры (рис. 3), которой дано название Digital Enterprise Architecture 1.0 (Архитектура Цифрового Предприятия), осуществляется следующим образом:

1. Происходит инициализация сервисов цифровой платформы — AEBus.

2. Сервисы AEBus готовы к работе и ожидают подключения микросекрвисов.

3. Происходит инициализация микросервисов AETechnicalAgent, AEAHS, AEERP, AEMGIS. Микросервису известна своя начальная конфигурация и адрес брокера платформы. После инициализации производится регистрация микросервиса, и он сообщает о своей конфигурации по следующей структуре:

```
export class RegisterService {
name: string; // название сервиса
address: string; // адрес
port: number; // порт
type: ServiceTypeTypes; // тип
}
```

4. После регистрации брокер платформы сохраняет представление о каждом из микросервисов по следующему формату:

Рис. 3. Фрагмент визуализации работы метамодели
Fig. 3. Fragment of metamodel operation visualization

export class ServiceInfo {
id: number; // идентификационный номер
name: string; // название
available: boolean; // доступность
instance: any; // экземпляр
config: any; // конфигурация
quality: number; // качество
type: ServiceTypeTypes; // тип
port: number; // порт
address: string; // адрес
}

Далее весь процесс осуществляется в асинхронном режиме в циклическом виде:

5. Сервис AETechnicalAgent регистрирует событие о публикации данных:

{
topic: TopicTypes.TechnicalAgentData, // название топика
event: MessageTypes.AvailableData, // сообщение о публикации данных (перечне и их структуре)
sender: ServiceTypeTypes.AETechnicalAgent, // имя отправителя сообщения
}

6. Брокер добавляет событие в очередь и проверяет наличие подписчиков на данный топик TechnicalAgentData.

7. Сервис AEAHS регистрирует события о необходимости данных (a) и, после их получения и обработки, — события о публикации данных (b) и (c):

a. {
topic: TopicTypes.TechnicalAgentData, // название топика
event: MessageTypes.RequiredData, // сообщение на получение данных (перечне и их структуре)
sender: ServiceTypeTypes.AEAHS, // имя отправителя сообщения
}
b. {
topic: TopicTypes.MGISData, // название топика
event: MessageTypes.AvailableData, // сообщение о публикации данных (перечне и их структуре)
sender: ServiceTypeTypes.AEAHS, // имя отправителя сообщения
}
c. {
topic: TopicTypes.ERPData, // название топика
event: MessageTypes.AvailableData, // сообщение о публикации данных (перечне и их структуре)

sender: ServiceTypeTypes.AEAHS, // имя отправителя сообщения

}

8. Брокер добавляет события в очереди, проверяет наличие совпадений в очередях издателей и подписчиков. Находит совпадение между доступностью данных из микросервиса AETechnical Agent (техническим агентом) и необходимостью получения данных сервисом AEAHS (системой диспетчеризации ГТК). Инициирует получение данных из очереди AETechnicalAgentData, преобразование их по требуемому формату и передачу в сервис AEAHS.

9. Сервис AEMGIS регистрирует событие о необходимости данных:

{

topic: TopicTypes.MGISData, // название топика

event: MessageTypes.RequiredData, // сообщение на получение данных (перечне и их структуре)

sender: ServiceTypeTypes.AEMGIS, // имя отправителя сообщения

}

10. Брокер добавляет событие в очередь, проверяет наличие совпадений в очередях издателей и подписчиков. Находит совпадение с сервисом AEAHS. Инициирует получение данных из AEAHS, преобразование и передачу данных в сервис AEMGIS.

11. Сервис AEERP регистрирует событие о необходимости данных:

{

topic: TopicTypes.ERPData, // название топика

event: MessageTypes.RequiredData, // сообщение на получение данных (перечне и их структуре)

sender: ServiceTypeTypes.AEERP, // имя отправителя сообщения

}

12. Брокер добавляет событие в очередь, проверяет наличие совпадений в очередях издателей и подписчиков. Находит совпадение с сервисом AEAHS. Инициирует получение данных из AEAHS, преобразование и передачу данных в сервис AEERP.

Обсуждение

Основной идеей предложенного подхода с использованием унифицированной библиотеки является возможность гибкой интеграции микросервисов и организации их информационного взаимодействия в действующей архитектуре по общим стандартам (интерфейсам) без существенных изменений в программной реализации эксплуатируемых систем на предприятиях. Реализация библиотеки подразумевает хранение единых шаблонов абстракций микросервисов, при помощи которых предоставляется возможность последующего расширения существующей архитектуры для включения недостающих микросервисов, обеспечивающих автономность предприятия. Каждый объект микросервисного взаимодействия (интерфейсы, объекты данных, логика модификации данных) хранится во внешней обобщенной библиотеке и при необходимости подключается каждым микросервисом отдельно.

Предложенная метамодель архитектуры цифрового предприятия в целом соответствует дата-центричному микросервисному подходу, т.к. в ней заложены все необходимые служебные компоненты, отвечающие за организацию информационного взаимодействия микросервисов, а также учитываются особенности разработки отсутствующих перспективных микросервисов, в том числе относящихся к Цифровому Двойнику предприятия. В то же время, на данном этапе в модели не реализована База Данных Временных Рядов (БДВР), необходимая для повышения производительности процессов передачи больших объемов данных, однако предложенный подход учитывает такую особенность и в будущем

БДВР может быть легко имплантирована в существующую архитектуру. В дальнейшем планируется расширение разработанных библиотек, доработка отсутствующих служебных компонентов, отвечающих за мониторинг качества работы микросервисов, оркестровку и виртуализацию, а также исследование функционирования платформенной части модели под высокой производительной нагрузкой с целью уточнения архитектуры.

Заключение

По результатам проведенной работы достигнуто следующее:

• Проведен анализ обобщенной структурно-функциональной архитектуры бизнес-процессов современных горнодобывающих предприятий, в рамках которого выделены ключевые особенности, требующие учета или изменения для реализации цифровой трансформации.

• Предложены конкретные итеративные шаги, необходимые для осуществления цифровой трансформации предприятий в части приведения архитектуры бизнес-процессов к дата-центричному микросервисному виду.

• Дано формальное представление унифицированной эталонной метамодели архитектуры цифрового горнодобывающего предприятия открытого типа, обеспечивающей автономное выполнение бизнес-процессов.

• Показан пример программной реализации такой метамодели, а также пример экспериментального моделирования ее работы, в рамках которого определена функциональная жизнеспособность выбранного подхода.

Вклад авторов

Дерябин С.А. — генерация идеи исследования, концептуализация и подготовка публикации.

Рзазаде У.А. — программная разработка модели, проведение моделирования.

Кондартьев Е.И. — подготовка материалов для публикации.

Темкин И.О. — постановка задачи и анализ результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лукичев С. В.*, *Наговицын О. В.* Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности: прошлое, настоящее, будущее // Горный журнал. — 2020. — № 9. — С. 13—18. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.01.

2. *Владимиров Д. Я.*, *Клебанов А. Ф.*, *Кузнецов И. В.* Цифровая трансформация открытых горных работ и новое поколение карьерной техники // Горная промышленность. — 2020. — № 6. — С. 10—12.

3. *Клебанов А. Ф.* Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации // Горная промышленность. — 2020. — № 1. — С. 8—11.

4. *Sychev A. E.*, *Zaytseva E. V.*, *Tolkachyov P. S.* Economic digitalization: contradictions and prospects / Socio-economic Systems: Paradigms for the Future. Studies in Systems, Decision and Control. 2021, vol. 314, pp. 353–359. DOI: 10.1007/978-3-030-56433-9_37.

5. *Наговицын О. В.*, *Возняк М. Г.* К вопросам управления роботизированным горнодобывающим предприятием // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5(1). — С. 326—335. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_326.

6. *Paredes D., Fleming-Muñoz D.* Automation and robotics in mining: Jobs, income and inequality implications // Extractive Industries and Society. 2021, vol. 8, no. 1, pp. 189—193. DOI: 10.1016/j.exis.2021.01.004.

7. *Temkin I., Myaskov A., Deryabin S., Konov I., Ivannikov A.* Design of a digital 3D model of transport–technological environment of open-pit mines based on the common use of telem-

etric and geospatial information // Sensors. 2021, vol. 21, no. 18, article 6277. DOI: 10.3390/s21186277.

8. *Темкин И. О.*, *Клебанов Д. А.*, *Дерябин С. А.*, *Конов И. С.* Построение интеллектуальной геоинформационной системы горного предприятия с использованием методов прогнозной аналитики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3. — С. 114–125. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-114-125.

9. *Liua C., Su Z., Xu X., Lu Y.* Service-oriented industrial internet of things gateway for cloud manufacturing // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2022, vol. 73, article 102217. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102217.

10. *Resende C., Folgado D., Oliveira J., Franco B., Moreira W., Oliveira A. C. Junior, Cavaleiro A., Carvalho R.* TIP4.0: Industrial internet of things platform for predictive maintenance // Sensors. 2021, vol. 21, no. 14, article 4676. DOI: 10.3390/s21144676.

11. *Sahal R.*, *Breslin J. G.*, *Ali M. I.* Big data and stream processing platforms for Industry 4.0 requirements mapping for a predictive maintenance use case // Journal of Manufacturing Systems. 2020, vol. 54, pp. 138—151. DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.11.004.

12. *Kozma D., Varga P., Larrinaga F.* Dynamic multilevel workflow management concept for industrial IoT systems // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2021, vol. 18, no. 3, pp. 1354—1366. DOI: 10.1109/TASE.2020.3004313.

13. *Martínez P. L.*, *Dintén R.*, *Drake J. M.*, *Zorrilla M.* A big data-centric architecture metamodel for Industry 4.0 // Future Generation Computer Systems. 2021, vol. 125, pp. 263—284. DOI: 10.1016/j.future.2021.06.020.

14. *Гончаренко С. Н.*, *Коростелев Д. Б.* Методы и модели комплексной оценки системных связей показателей результативности природоохранной политики и принятия управленческих решений в сфере природопользования // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 11. — С. 70–76. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-70-76.

15. *Khairutdinov A., Ubysz A., Adigamov A.* The concept of geotechnology with a backfill is the path of integrated development of the subsoil // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 684, article 012007. DOI:10.1088/1755-1315/684/1/01200.

16. *Kongar-Syuryun Ch., Ubysz A., Faradzhov V.* Models and algorithms of choice of development technology of deposits when selecting the composition of the backfilling mixture // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 684, article 012008. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012008. ГИАБ

REFERENCES

1. Lukichev S. V., Nagovitsin O. V. Digital transformation of mining industry: Past, Present and Future. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 9, pp. 13—18. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.01.

2. Vladimirov D. Ya., Klebanov A. F., Kuznetsov I. V. Digital transformation of open-pit mining and a new generation of quarry equipment. *Russian Mining Industry*. 2020, no. 6, pp. 10—12. [In Russ].

3. Klebanov A. F. Automation and robotization of open-pit mining: the experience of digital transformation. *Russian Mining Industry*. 2020, no. 1, pp. 8—11. [In Russ].

4. Sychev A. E., Zaytseva E. V., Tolkachyov P. S. Economic digitalization: contradictions and prospects. *Socio-economic Systems: Paradigms for the Future. Studies in Systems, Decision and Control*. 2021, vol. 314, pp. 353–359. DOI: 10.1007/978-3-030-56433-9_37.

5. Nagovitsyn O. V., Voznyak M. G. Robotic mine management. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5(1), pp. 326—335. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_326.

6. Paredes D., Fleming-Muñoz D. Automation and robotics in mining: Jobs, income and inequality implications. *Extractive Industries and Society*. 2021, vol. 8, no. 1, pp. 189—193. DOI: 10.1016/j.exis.2021.01.004.

7. Temkin I., Myaskov A., Deryabin S., Konov I., Ivannikov A. Design of a digital 3D model of transport–technological environment of open-pit mines based on the common use of telem-

etric and geospatial information. *Sensors*. 2021, vol. 21, no. 18, article 6277. DOI: 10.3390/s21186277.

8. Temkin I. O., Klebanov D. A., Deryabin S. A., Konov I. S. Construction of intelligent geoinformation system for a mine using forecasting analytics techniques. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3, pp. 114–125. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-114-125.

9. Liua C., Su Z., Xu X., Lu Y. Service-oriented industrial internet of things gateway for cloud manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022, vol. 73, article 102217. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102217.

10. Resende C., Folgado D., Oliveira J., Franco B., Moreira W., Oliveira A. C. Junior, Cavaleiro A., Carvalho R. TIP4.0: Industrial internet of things platform for predictive maintenance. *Sensors*. 2021, vol. 21, no. 14, article 4676. DOI: 10.3390/s21144676.

11. Sahal R., Breslin J. G., Ali M. I. Big data and stream processing platforms for Industry 4.0 requirements mapping for a predictive maintenance use case. *Journal of Manufacturing Systems*. 2020, vol. 54, pp. 138—151. DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.11.004.

12. Kozma D., Varga P., Larrinaga F. Dynamic multilevel workflow management concept for industrial IoT systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2021, vol. 18, no. 3, pp. 1354—1366. DOI: 10.1109/TASE.2020.3004313.

13. Martínez P. L., Dintén R., Drake J. M., Zorrilla M. A big data-centric architecture metamodel for Industry 4.0. *Future Generation Computer Systems*. 2021, vol. 125, pp. 263—284. DOI: 10.1016/j.future.2021.06.020.

14. Goncharenko S. N., Korostelev D. B. Methods and models for integrated estimation of system connection between the nature protection policy efficiency and managerial solutions in the field of use of natural resources. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 11, pp. 70–76. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-70-76.

15. Khairutdinov A., Ubysz A., Adigamov A. The concept of geotechnology with a backfill is the path of integrated development of the subsoil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 684, article 012007. DOI:10.1088/1755-1315/684/1/01200.

16. Kongar-Syuryun Ch., Ubysz A., Faradzhov V. Models and algorithms of choice of development technology of deposits when selecting the composition of the backfilling mixture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 684, article 012008. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дерябин Сергей Андреевич[1] — зав. лабораторией,
e-mail: deryabin.sa@misis.ru, ORCID ID: 0000-0003-3165-7032,
Рзазаде Ульви Азар оглы[1] — старший преподаватель,
Кондратьев Егор Игоревич[1] — лаборант,
Темкин Игорь Олегович[1] — д-р техн. наук, зав. кафедрой,
[1] НИТУ «МИСиС».
Для контактов: Дерябин С.А., e-mail: deryabin.sa@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.A. Deryabin[1], Head of Laboratory,
e-mail: deryabin.sa@misis.ru, ORCID ID: 0000-0003-3165-7032,
Rzazade Ulvi Azar ogly[1], Senior Lecturer,
E.I. Kondratev[1], Laboratory Assistant,
I.O. Temkin[1], Dr. Sci. (Eng.), Head of Chair,
[1] National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: S.A. Deryabin, e-mail: deryabin.sa@misis.ru.

Получена редакцией 24.11.2021; получена после рецензии 29.12.2021; принята к печати 10.02.2022.
Received by the editors 24.11.2021; received after the review 29.12.2021; accepted for printing 10.02.2022.