

DOI: 10.18721/JCSTCS.12306
УДК 004.896

МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ АЛГОРИТМЫ СОГЛАСОВАНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

В.Э. Ковалевский, В.А. Онуфриев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрена задача согласования значений ключевых показателей эффективности производства с учетом их иерархичности и взаимосвязанности. Разработана структурная схема иерархической мультиагентной системы управления производством: показаны горизонтальные (одноуровневые) и вертикальные (разноуровневые) связи между агентами. Описаны возможные ситуации для одноуровневых и разноуровневых взаимодействий агентов, таких как изменение задания со стороны руководящего программного агента, уведомление его о невозможности поддержания установленного ранее режима работы и др. Изучены алгоритмы обмена данными между ними в целях оптимизации ключевых показателей эффективности. Показана клиент-серверная архитектура связи агентов для реализации указанных алгоритмов передачи данных, в том числе для обмена данными с программируемыми логическими контроллерами на нижнем уровне. Представлена однобайтовая система команд взаимодействия.

Ключевые слова: киберфизические системы, интеллектуальные системы управления, мультиагентные системы, цифровые двойники, Industry 4.0.

Ссылка при цитировании: Ковалевский В.Э., Онуфриев В.А. Мультиагентные алгоритмы согласования ключевых показателей эффективности предприятия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 3. С. 67–80. DOI: 10.18721/JCSTCS.12306

MULTI-AGENT ALGORITHMS FOR ENTERPRISE'S KEY PERFORMANCE INDICATORS RECONCILIATION

V.E. Kovalevsky, V.A. Onufriev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

In this work the task of production key performance indicators' values reconciliation is set, that takes into account their hierarchical structure and interrelationships. The structural scheme of a hierarchical multiagent system for production control was developed where horizontal (sibling) and vertical (multilevel) connections between agents are shown. Then possible situations of sibling and multilevel interactions are described, such as changing of a task by the controlling agent, sending notifications about the impossibility of a maintaining current operation mode, and others. The agents' data exchange algorithms, which are used in order to

optimise key performance indicators are shown. The implementation of developed algorithms using client-server architecture is shown, which also includes at the bottom level data exchange between the agents and programmable logic controllers. The single bytes command system for agents interactions is described.

Keywords: cyber-physical systems, intelligent control systems, multiagent systems, digital twin, Industry 4.0.

Citation: Kovalevsky V.E., Onufriev V.A. Multi-agent algorithms for enterprise's key performance indicators reconciliation. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 3, Pp. 67–80. DOI: 10.18721/JCSTCS.12306

Введение

Современными трендами развития промышленности являются концепции Industry 4.0 [1–3], IIoT [4], Digital Twins [5–7]. Согласно им, вместо централизованной системы контроля и управления предприятием должны выступать мультиагентные децентрализованные системы, в которых на нижних уровнях действуют противоаварийное оборудование и программируемые логические контроллеры (ПЛК), а на верхних – способные работать независимо друг от друга агенты.

На современном этапе развития промышленности возрастает роль разработки единой системы заводского производственного оборудования [8] с тем, чтобы все мощности завода в конечном итоге работали на достижение общих целей, которые количественно выражаются в ключевых показателях эффективности (Key Performance Indicator – KPI) [9]. Если речь идет об управлении всем предприятием, и показатели описывают работу всего предприятия, то тогда они называются *KPI верхнего уровня*.

Конкретные цеха и иные подразделения предприятия также имеют свои KPI, но они уже лежат уровнем ниже [10]. Внизу данной иерархии показателей находятся параметры отдельных установок и их частей, режимы их функционирования, преобразуемые к значениям KPI с помощью нейросетевых моделей нижнего уровня. Очевидно, что KPI нижнего уровня должны быть согласованы с ключевыми показателями эффективности цеха, подразделения, а также KPI самого верхнего уровня.

Следовательно, в иерархии KPI показатели более высоких уровней определяют требуемое значение показателей более низких уровней и в то же время зависят от них.

В рамках данной статьи предполагается, что математические зависимости между показателями разных уровней уже найдены, например, при помощи описанного ранее подхода в [11]. При использовании мультиагентного подхода требуется предложить алгоритмы взаимодействия агентов с целью принятия решений в рамках сетевого взаимодействия [12, 13]. Сложность проектирования сквозных систем управления предприятием является достаточно высокой, из-за чего в общем случае предлагаются лишь средства сопровождения коллективного поиска решений людьми [14].

Иерархические мультиагентные системы управления

Вопрос внедрения мультиагентного подхода в работу промышленного производства давно изучается различными исследовательскими коллективами. Разные статьи предлагают задействовать этот подход для разных аспектов производства. В частности, можно выделить следующие варианты использования мультиагентных систем в производстве: планирование производственных процессов; диагностика неисправностей, управление и контроль работы; гибкая и легко масштабируемая реконфигурация сборочных линий; виртуальные производства, управление поставками и аутсорсингом. Часто мультиагентные системы управления состоят не из полностью автономных одноуровневых агентов, а из иерархии аген-

тов, в которой агент верхнего уровня получает только те данные, которые нужны ему для работы, и который координирует работу подчиненных агентов, но не диктует им какие действия выполнять.

В статье [15] приведена иерархическая распределенная система управления производством, в которой на каждом уровне производственной иерархии есть свои интеллектуальные агенты, отвечающие за работу своего уровня. Однако в этой системе обмен данными между агентами осуществляется с использованием механизма доски объявлений, и приведен пример лишь координации снизу вверх, когда в работе агента нижнего уровня возникают неполадки, и он сообщает об этом вышестоящему агенту. Обмен данными сверху вниз тоже заявлен, однако никаких подробностей не приведено и непонятно возможно ли напрямую обрабатывать данные от ERP системы, находящейся на самом верху производственной иерархии.

В статье [16] описана система энерго-распределения и энергогенерации, состоящая из многих локальных систем, генерирующих энергию. Для взаимодействия между ними используется иерархическая мультиагентная система, в которой вышестоящий агент координирует работу нескольких нижестоящих агентов. Агент верхнего уровня отвечает за взаимодействие с государственной электросетью и за подачу в неё электроэнергии из локальной системы. С верхнего уровня в систему поступают задания, которые передаются для исполнения на нижние уровни. Присутствует система диагностики и контроля, но она находится на среднем уровне иерархии, так что нижние уровни не способны самостоятельно обрабатывать возникающие ошибки и могут только передавать информацию наверх.

В статье [17] рассмотрено управление системой охлаждения корабля, в которой присутствует трехуровневая иерархия из агентов, где на верхнем уровне находится агент, декомпозирующий задания и выдающий их подчиненным агентам, а на ниж-

нем — агенты, непосредственно контролирующие оборудование. Назначение заданий осуществляется с помощью контрактного сетевого протокола (Contract Net). Задания являются конкретными действиями, которые нижестоящий агент должен выполнить. В системе присутствует схема распределения заданий, но нет диагностики и контроля работы, и агенты нижнего уровня не могут сами инициировать изменение режима работы.

Статья [18] посвящена использованию мультиагентного подхода на уровне отдельного цеха, в котором существует агент, выдающий производственные задания, агенты, отвечающие за работу оборудования, и другие вспомогательные агенты. Назначение задания определенному агенту нижнего уровня осуществляется методом аукциона. Таким образом, агенты нижнего уровня только получают задания, которые могут либо выполнить, либо отклонить, но не могут сами инициировать изменение задания. Агенты мониторинга в этой системе отвечают за визуализацию данных, а поиск и устранение ошибок во многом ложится на плечи оператора-человека. Также в данной работе отсутствует взаимодействие между разными цехами.

При разработке взаимодействия между агентами в иерархической системе управления следует учесть несколько возможных сценариев, в результате которых возникает необходимость обмена данными. Например, ситуация, в которой на уровне стратегического планирования было изменено производственное задание, и это изменение повлекло за собой изменение и пересчет KPI нижних уровней. Либо обратный сценарий, похожий на сценарий диагностики, описанный в [11], в котором система постоянно проверяет свое состояние, опираясь на фиксированные в базе знаний установки KPI, и в случае необходимости отправляет запросы на уровень выше. Однако в указанной работе система являлась централизованной, все данные поступали в единый центр, где и происходило принятие решений.

Рассмотренные выше работы исследуют различные варианты иерархической мультиагентной системы управления. Но либо в них приводится только односторонняя передача данных от агента к агенту, либо передаваемые задания слишком конкретны, либо в схеме участвует оператор-человек.

Цель нашего исследования состоит в разработке (алгоритмически и технологически) автономной системы управления, которая, используя мультиагентный подход и ключевые показатели эффективности каждого уровня производственной иерархии, обеспечивает возможность гибкого изменения производственных планов и их коррекцию в ситуациях изменения производственного задания и изменения технологической ситуации.

Для этого необходимо выполнить следующие задачи: произвести моделирование универсальной схемы распределения управляющих агентов по процессам и показателям в рамках всей производственной вертикали; разработать соответствующие цели алгоритмические модели взаимодействия между агентами; разработать протоколы обмена данными о КРІ (также при помощи алгоритмического моделирова-

ния); синтезировать систему команд для работы в рамках предложенных ситуаций.

Для создания иерархической системы, состоящей из агентов, каждый из которых отвечает за свой уровень в производственной вертикали, необходимо декомпозировать производственные процессы, разбить их на подпроцессы и т. д. до самого нижнего уровня. У каждого такого подпроцесса затем следует выявить КРІ, их предельные значения, после чего рассчитать нейросетевые модели связи КРІ соседних уровней, например, как в работах [11, 19]. Затем, используя эти данные, создать агентов, «отвечающих» за свои процессы (их показатели) в иерархии. Таким образом, каждый агент связан с определенным подпроцессом и контролирует его.

Учитывая приведенные шаги, мы предлагаем следующую смоделированную при помощи IDEF0-подхода схему распределения управляющих агентов по процессам и показателям в рамках производственной вертикали (рис. 1). На самом нижнем уровне иерархии, представленной на рис. 1, показаны процессы нижнего уровня, непосредственно управляемые также с участием ПЛК.

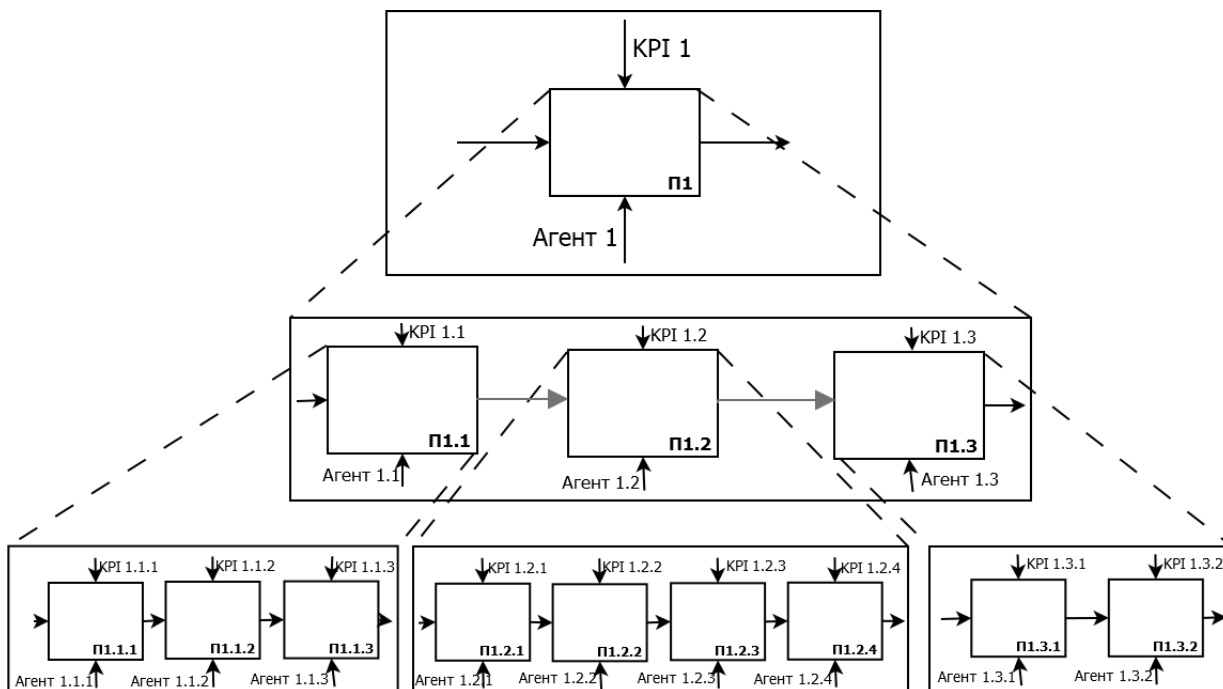


Рис. 1. Иерархическая схема распределения управляющих агентов

Fig. 1. Hierarchical distribution of control agents

После того как определена иерархическая структура распределения агентов по подпроцессам, следует разработать алгоритмы их информационного взаимодействия. Такое взаимодействие возможно как между агентами одного, так и разных уровней.

Алгоритмы взаимодействия разноуровневых агентов

У каждого агента в базе знаний хранится информация о требуемых значениях своих КРІ и об их предельных значениях, о требуемых значениях КРІ подчиненных ему агентов, а также их предельных значениях, и об их аналитической взаимосвязи, показывающей, как изменение любого КРІ агента нижнего уровня влияет на КРІ верхнего — и наоборот.

В этой связи рассмотрим ситуацию, когда *от агента верхнего уровня* поступает указание на необходимость изменения КРІ нижнего уровня. Например, «сверху» (от агента уровня стратегического планирования) вниз (к агенту, управляющему цехом завода) спускается указание на увеличение скорости производства продукции (собственный КРІ этого агента, зависящий от работы агентов установок цеха). Получив такое указание, агент должен определить, какие изменения в свою работу должен внести каждый из подчиненных ему агентов, чтобы вся система обеспечивала спущенное «сверху» изменение его собственных КРІ. Для этого он использует информацию, находящуюся в его базе знаний, и нейросетевую модель, описывающую взаимосвязь между его КРІ и КРІ подчиненных ему агентов. Поскольку взаимосвязи между КРІ жестко заданы моделью, то их пересчет является не оптимизационной, а простой вычислительной задачей (оптимизация будет рассмотрена в другой публикации).

Затем агент проверяет при помощи данных о предельных значениях КРІ нижестоящих агентов, способны ли они обеспечить предписанные им уровни показателей. Если (по его данным) неспособны, то он отправляет соответствующий от-

вет вверх по иерархии. Если изменение возможно, то агент отправляет запросы на изменение работы нижестоящих агентов (в форме новых уставок КРІ). Каждый из них в свою очередь должен проверить, способен ли он вместе со всей подчиненной ему структурой реализовать данное изменение задачи. В случае невозможности он выдает отказ вышестоящему агенту.

Процесс повторяется для каждого уровня иерархии. Но если на верхних уровнях проверяются потенциальные возможности соответствовать новому заданию, то в случае с агентом нижнего уровня (к которому подключены ПЛК) поступившее задание соотносится только с полученной с ПЛК технической информацией и собственными нейросетевыми моделями, приводящими технические параметры в соответствие со спускаемыми «сверху» требованиями к КРІ.

Схема взаимодействия разноуровневых агентов при иницировании изменений «сверху» представлена на рис. 2.

В то же время нужно помнить о том, что *снизу вверх* также могут поступать критические уведомления, которые могут влиять на производство в целом и иницировать сценарий изменения заданий (инициация «снизу»). К данному классу ситуаций относится отправка уведомления вышестоящему агенту о невозможности далее поддерживать текущие требуемые уровни КРІ либо, напротив, уведомление о возможности увеличения (улучшения) значения КРІ.

Однако об этих и других изменениях должны также уведомляться и агенты того же уровня иерархии, т. к. в рамках одного уровня агенты связаны более тесно: показатели таких агентов более заметно влияют на их совместную работу.

Технологические установки в рамках одного цеха должны знать о работе друг друга, поскольку, например, готовая продукция одной установки может быть исходным сырьем для другой, и в случае появления проблем на первой следующие в производственной цепочке должны быть об этом

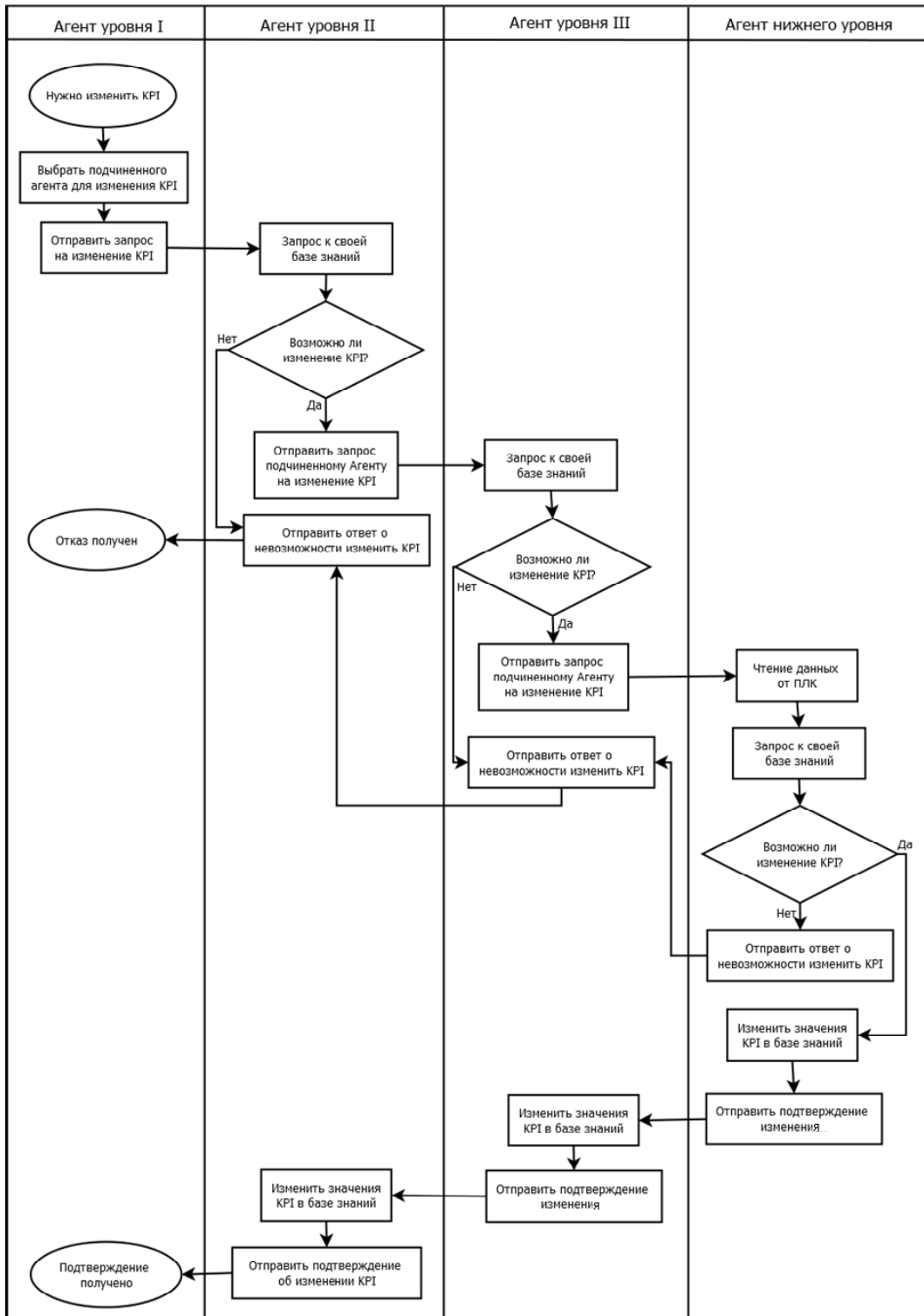


Рис. 2. Алгоритм взаимодействия разноуровневых агентов

Fig. 2. The interaction algorithm of multilevel agents

оперативно уведомлены, чтобы иметь возможность своевременно перепланировать свою работу и/или минимизировать простои в работе оборудования. Либо наоборот, если у одной установки появляется возможность производить больше продукции, тогда её агент должен уведомить другие, которые непосредственно связаны с ней в цепочке, о необходимости изменения и повышения КРІ.

На уровне завода в целом отдельные цеха также должны получать сведения о работе друг друга, поскольку продукция одного цеха может поступать для дальнейшей обработки в другой цех. Поэтому на каждом уровне существует необходимость обмена данными, и у каждого агента в базе знаний также должна храниться информация о возможных значениях КРІ предыдущего и следующего в цепочке агента.

В связи со сказанным выше рассмотрим процесс одноуровневого взаимодействия агентов, в результате которого также происходит передача запроса на изменение КРІ снизу вверх.

Алгоритмы взаимодействия одноуровневых агентов

Рассмотрим ситуацию, когда в связи с ухудшением качества исходных материалов установке требуется больше сырья, чтобы работать с теми же показателями КРІ. В этом случае её агент отправляет *запрос к агенту предшествующей установке* и запрашивает изменение его КРІ (например, передачу большего количества материала).

Агент, получивший такой запрос, в свою очередь проверяет (уточняет у своих «подчиненных») возможность изменения своего КРІ, и если такая возможность существует, то он отправляет запрос на изменение КРІ выше по иерархии. Если на верхнем уровне разрешают изменение КРІ, то агент верхнего уровня пересчитывает соответствующие значения КРІ в своей базе знаний и отправляет подтверждение подчиненному агенту. Подчиненный агент меняет свой КРІ и отправляет подтвержде-

ние агенту, который следует за ним в производственной цепочке.

Если агент, у которого запросили изменение КРІ, не может выполнить такое изменение, либо если с верхнего уровня ему не подтвердили изменение КРІ, то он отправляет отказ запросившему агенту, и тот отправляет уведомление по иерархии выше о невозможности сохранения текущего КРІ и о необходимости пересчета показателей для других агентов данной цепочки. Схема взаимодействия агентов представлена на рис. 3.

Когда повышение качества сырья позволяет установке производить больше материалов, агент отправляет запрос на изменение КРІ *следующему в производственной цепочке агенту*. В остальном схема похожа на предыдущую. Агент, получивший запрос на изменение КРІ, проверяет свою базу знаний, передает запрос выше по иерархии, а затем отправляет назад подтверждение или отказ.

Далее рассмотрим реализацию алгоритмов обмена данными между агентами.

Реализация обмена данными агент-агент

Обмен данными между агентами одного либо различных уровней иерархии в нашем случае реализован с использованием протокола ТСР/ІР. Обмен данными в таком случае осуществляется по клиент-серверной схеме. Сервер открывает соединение по определенному порту, циклически считывает поступающие на этот порт запросы и отправляет клиенту соответствующие ответы. Клиент, зная ІР-адрес сервера и порт, к которому необходимо подключиться, подключается к серверу и начинает отправлять ему запросы и получать ответы. Обмен данными происходит как прием и отправка различных наборов байт.

Каждый агент знает ІР-адреса подчиненных ему агентов, адрес вышестоящего по иерархии агента и адреса соседних по производственной цепочке агентов. У каждого агента есть как серверная часть, отвечающая за прием запросов от других агентов, так и клиентская, позволяющая такие запросы отправлять.

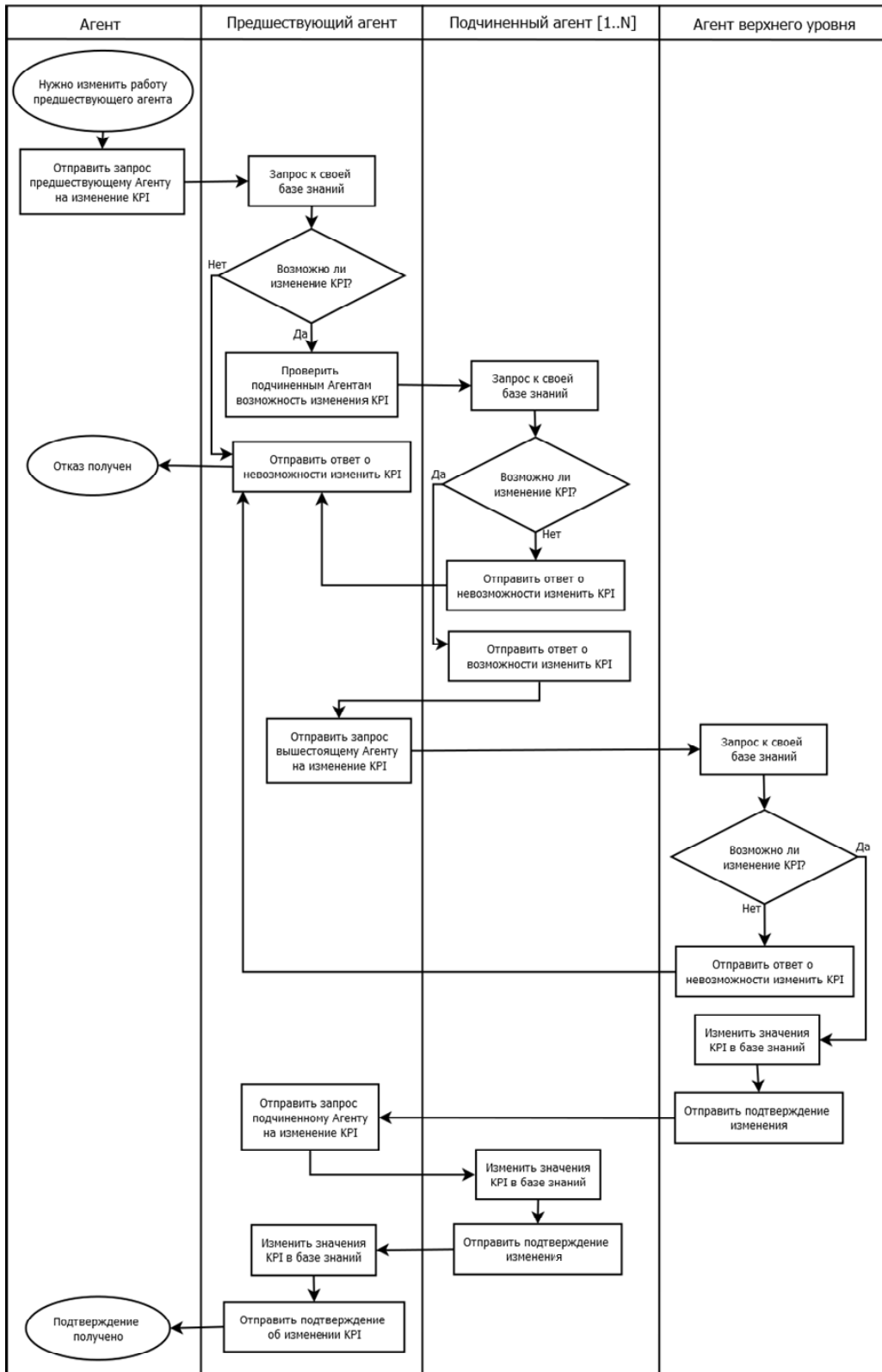


Рис. 3. Алгоритм взаимодействия одноуровневых агентов
 Fig. 3. Algorithm of interaction of single-level agents

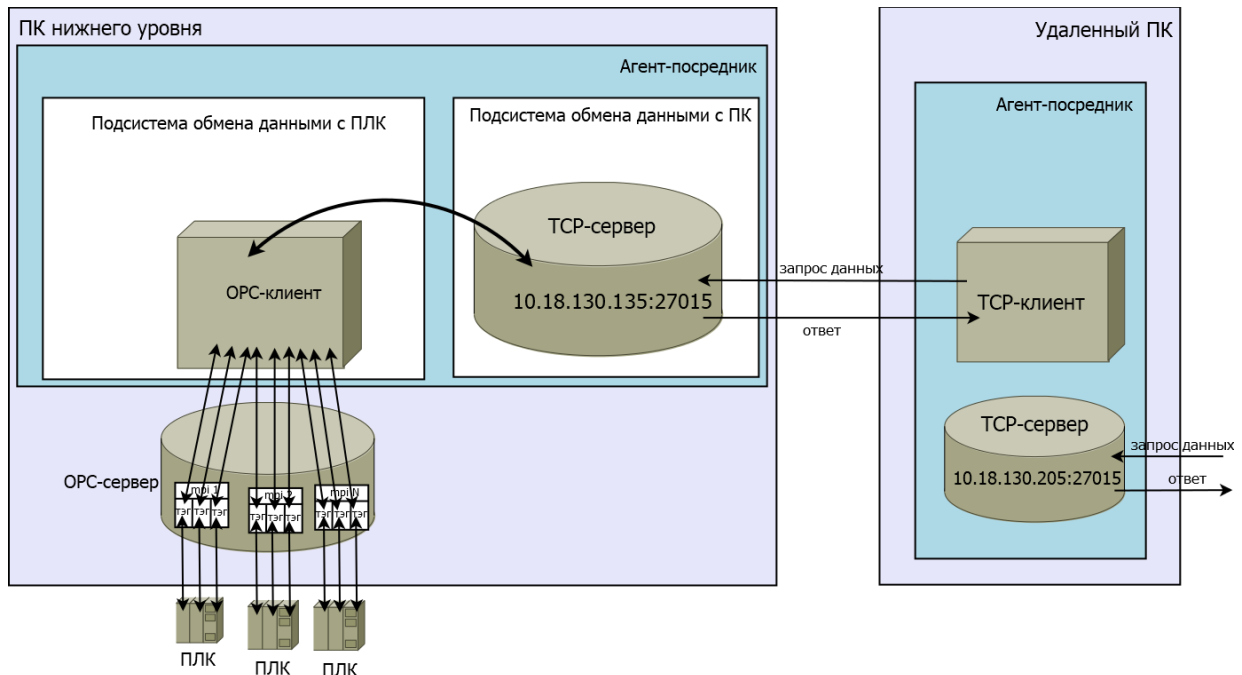


Рис. 4. Структурная схема агента нижнего уровня

Fig. 4. The block diagram of the agent lower level

Схема клиент-серверного взаимодействия с удаленным компьютером и общая схема агента нижнего уровня, и его взаимодействие с ПЛК и удаленным ПК представлены на рис. 4.

Приведем разработанную систему обмена данными, в которой запросы агентов и ответы на них представлены в форме определенных последовательностей байтов.

Первый байт пакета характеризует цель запроса:

- 01 – команда на изменение КРІ у нижестоящего с проверкой возможности изменений;
- 02 – ответ (подтверждение/отказ) на команду на изменение КРІ;
- 03 – команда на изменение КРІ у следующего/предыдущего по цепочке;
- 04 – запрос на разрешение у вышестоящего на изменение своего КРІ;
- 05 – критические уведомления о максимально возможном поддерживаемом значении КРІ;
- 06 – команда на изменение КРІ без проверок и подтверждений.

Далее в пакете указывается объект, над которым нужно произвести действие (в случае команды), либо объект, о котором получатель будет оповещен (в случае уведомления).

Такой объект обозначается уникальным в рамках всей системы идентификатором, для чего, в зависимости от количества таких объектов, может быть отведено различное количество байтов. В нашем случае идентификатор представляет собой однобайтовое целое число, например:

- 78 – температуры;
- 163 – расход;
- 250 – скорость конвейерной ленты.

Далее следует один или несколько байтов, содержащих информацию, касающуюся объекта, идентификатор которого указан ранее. В случае запроса на изменение в этих байтах должно содержаться требуемое значение показателя, в случае ответа на команду – подтверждение ее выполнения или отказ.

Приведем пример пакетов данных, которыми обмениваются агенты в системе, в случае, который был рассмотрен выше, ко-

гда в связи с ухудшением качества исходных материалов установке требуется больше сырья, и ее агент отправляет *запрос к агенту предшествующей установки* и запрашивает изменение его КРІ.

Вначале агент отправляет запрос на изменение КРІ к агенту предшествующей установки:

03	250	70
----	-----	----

Агент предшествующей установки в свою очередь отправляет запрос на изменение КРІ своим подчиненным агентам:

01	85	17	...	01	163	23
----	----	----	-----	----	-----	----

Подчиненные агенты отправляют ответы вышестоящему агенту:

02	85	1	...	02	163	1
----	----	---	-----	----	-----	---

Получив положительный ответ от подчиненных агентов, агент предшествующей установки в свою очередь запрашивает разрешение на изменение КРІ у вышестоящего агента:

04	250	70
----	-----	----

Получив от него положительный ответ, агент посылает команду на изменение КРІ своим подчиненным

06	85	17	...	06	163	23
----	----	----	-----	----	-----	----

и уведомляет агента следующей установки о том, что КРІ был изменен:

02	250	1
----	-----	---

Данная схема представляет собой пример обмена данными между агентами трех уровней, в которой агент нижнего уровня непосредственно получает данные с ПЛК. Для реализации этой схемы необходимо, чтобы агенты нижнего уровня имели техническую возможность не только получения данных непосредственно с ПЛК, но и

обмена данными с другими агентами. Для этого они должны иметь в своем составе, например, модуль Wi-Fi или поддержку проводного сетевого интерфейса.

Реализация обмена данными агент-ПЛК

К настоящему времени различными исследовательскими группами уже создан целый ряд фреймворков, программных библиотек и иного инструментария для разработки мультиагентных систем. Большинство таких библиотек разработано на языке Java (например AnyLogic, Cougaar, JADE), обеспечивающим большую гибкость разработки. Однако такие средства подходят больше для моделирования различных взаимодействующих между собой систем, чем для использования в реальных проектах. Там, где существуют повышенные требования к быстродействию и ограничения на объем используемой памяти, больше подходит язык C++ [15].

В связи с этим специальный программный агент-посредник, отвечающий за обмен данными по предложенному алгоритму как между разными уровнями производственной иерархии, так и внутри одного уровня, разработан на языке C++. Такой агент находится в каждом узле иерархии и отвечает за сбор и передачу данных на другие уровни либо на том же уровне.

На нижнем уровне иерархии промышленного производства находятся отдельные установки, которые непосредственно выполняют задачи по обработке исходных материалов для получения требуемой продукции. Контроль и управление отдельными элементами, входящими в состав установки, осуществляется с помощью ПЛК. ПЛК обеспечивают функционирование оборудования согласно заложенной производственной программе, но сами при этом не являются агентами иерархической системы управления.

В связи со сказанным выше, у агента-посредника, находящегося на нижнем уровне иерархии, реализованы две подсистемы: помимо подсистемы обмена данными

ми с другими агентами ему также необходима подсистема обмена данными с ПЛК.

Мы реализовали два варианта подсистемы обмена данными с ПЛК, чтобы была возможность при создании агента нижнего уровня выбрать наиболее подходящий для конкретного случая способ взаимодействия с ПЛК. В зависимости от выбранной подсистемы используется тот или иной способ обмена данными с ПЛК, однако функционирование агента в целом остается одинаковым вне зависимости от выбранного способа обмена данными.

В первом случае агент использует для работы подсистемы обмена данными с ПЛК свободно распространяемую библиотеку libNoDave, разработанную для оборудования фирмы Siemens [16].

В ней реализованы специализированные драйверы для прямого обмена данными с ПЛК через различные интерфейсы (в данном случае был использован USB-интерфейс). Эта библиотека обеспечивает выполнение команд чтения / записи данных по определенным адресам в памяти ПЛК.

Во втором случае агент использует технологию OPC (OLE for Process Control), подразумевающую наличие OPC-сервера и OPC-клиента. Использование данной технологии является унифицированным, поскольку в этом случае при разработке нет необходимости привязываться к деталям реализации конкретного контроллера, ведь за непосредственную связь с ПЛК в такой схеме отвечает OPC-сервер, в качестве которого было использовано приложение, разработанное в среде SIMATIC WinCC Flexible.

Структурная схема агента нижнего уровня, использующего для обмена данными с ПЛК технологию OPC представлена на рис. 4.

В OPC-сервере прописаны специальные метки (тэги), связанные с определенными ячейками памяти в ПЛК. Агент нижнего уровня при помощи OPC-клиента, обеспечивающего доступ для чтения и записи значений тэгов на OPC-сервере, может их как изменять (что озна-

чает передачу в ПЛК новой информации), так и считывать (получая тем самым с ПЛК технологические данные).

Также для работы OPC-сервера в нем были заданы необходимые сведения о подключении к ПЛК. В OPC-сервере было создано несколько соединений, чтобы считывать данные из разных ПЛК.

В итоге, например, тэг 4В1 (датчик уровня резервуара 4) имеет адрес I0.0, а тэг 4М2 (управление насосом четвертого резервуара) – Q0.1, где I и Q обозначают соответственно область входов и выходов ПЛК.

Реализованный таким образом агент нижнего уровня способен как обмениваться с ПЛК технической информацией, так и запрашивать/уведомлять об изменении КРІ других агентов.

В процессе разработки агенты верхних уровней реализуются нами на одноплатных компьютерах Raspberry Pi 3b, а программа-агент нижнего уровня запущена на ПК, подключенном к ПЛК.

Для отработки предложенных алгоритмов агенты нижнего уровня реализованы как программные модули, запущенные на ПК со следующими характеристиками: Intel Pentium Dual CPU E2200 2.20GHz, 3Гб. ОЗУ, работающие под управлением ОС Windows 7 и имеющие модуль Wi-Fi для обмена данными с другими агентами. Агенты верхних уровней реализованы на одноплатных компьютерах Raspberry Pi 3b, также имеющих в своем составе модули Wi-Fi для обмена данными. База знаний каждого агента, которая содержит необходимые сведения о КРІ и их предельно допустимых значениях, хранится в виде файлов в формате N3/TURTLE (язык представления знаний, входящий в состав среды RDF). Информация о взаимосвязях между различными КРІ представляет собой нейросетевые модели, которые хранятся в виде матрицы значений.

Заключение

Разработанные алгоритмы и их реализация направлены на согласование работы программных агентов, участвующих в про-

цессе управления предприятием на всех уровнях: от ПЛК до ERP. Рассмотрены, разумеется, не все возможные возникающие ситуации при их взаимодействии, однако представленного материала достаточно для адаптации предложенного решения для произвольной системы управления производством.

В данной статье также предполагается, что любой из вышестоящих агентов обла-

дает информацией о предельно возможных значениях KPI всех непосредственно подчиненных ему агентов, однако задачу этих расчетов и передачи сведений еще предстоит решить. Также в дальнейшем необходимо реализовать прототип системы на микропроцессорных отладочных платах, для чего, возможно, потребуется модифицировать алгоритмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bassi L.** Industry 4.0: Hope, hype or revolution? // IEEE 3rd Internat. Forum on Research and Technologies for Society and Industry. 2017. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/RTSI.2017.8065927
2. **Kannengiesser U., Müller H.** Multi-level, viewpoint-oriented engineering of cyber-physical production systems: An approach based on Industry 4.0, system architecture and semantic web standards // 44th Euromicro Conf. on Software Engineering and Advanced Applications. 2018. Pp. 331–334. DOI: 10.1109/SEAA.2018.00061.
3. **Cheng G.-J., Liu L.-T., Qiang X.-J., Liu Y.** Industry 4.0 development and application of intelligent manufacturing // Internat. Conf. on Information System and Artificial Intelligence. 2016. Pp. 407–410. DOI: 10.1109/ISAI.2016.0092
4. **Mumtaz S., Alshaily A., Pang A., Rayes A., Tsang K.F., Rodriguez J.** Massive Internet of Things for industrial applications: Addressing wireless IoT connectivity challenges and ecosystem fragmentation // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2017. Vol. 11(1). Pp. 28–33. DOI: 10.1109/MIE.2016.2618724
5. **Vachálek J., Bartalský L., Rovný O., Šišmišová D., Morhác M., Lokšnk M.** The digital twin of an industrial production line within the Industry 4.0 concept // 21st Internat. Conf. on Process Control. 2017. Pp. 258–262. DOI: 10.1109/PC.2017.7976223
6. **Yusen X., Bondaletova N.F., Kovalev V.I., Komrakov A.V.** Digital twin concept in managing industrial capital construction projects life cycle // 11th Internat. Conf. on Management of Large-Scale System Development. 2018. Pp. 1–3. DOI: 10.1109/MLSD.2018.8551867
7. **Tao F., Zhang M.** Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing // IEEE Access. 2017. No. 5. Pp. 20418–20427. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2756069
8. **Eckhardt A., Müller S., Leurs L.** An evaluation of the applicability of OPC UA publish subscribe on factory automation use cases // IEEE 23rd Internat. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation. Turin, 2018. Pp. 1071–1074. DOI: 10.1109/ETFA.2018.8502445
9. **Габдрашитова Э.И., Гамилова Д.А.** Оценка производственного потенциала нефтесервисных предприятий // Наукоеведение. 2014. № 3 // URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/30EVN314.pdf> (Дата обращения: 28.03.2019).
10. **Буренина И.В., Варакина В.А.** Система единых показателей оценки эффективности деятельности вертикально-интегрированных нефтяных компаний // Наукоеведение. 2014. № 1 // URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/12EVN114.pdf> (Дата обращения: 28.03.2019).
11. **Kostenko D., Kudryashov N., Maistrishin M., Onufriev V., Potekhin V., Vasiliev V.** Digital twin applications: diagnostics, optimisation and prediction // Proc. of the 29th DAAAM Internat. Symp. Vienna, Austria, 2018. Pp. 574–581. DOI: 10.2507/29th.daaam.proceedings.083
12. **Ефремов А.Ю., Максимов Д.Ю.** Сетецентрическая система управления – что вкладывается в это понятие? // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения. Труды III Всерос. конф. с междунар. участием. М.: ИПУ РАН, 2012. С. 158–161.
13. **Скобелев П.О., Царев А.В.** Сетецентрический подход к созданию больших мульти-агентных систем для адаптивного управления ресурсами в реальном времени // Управление большими системами. Матер. Междунар. науч.-практ. мультikonf. 2011. М.: ИПУ РАН, 2011. 267 с.
14. **Скобелев П.О.** Ситуационное управление и мультиагентные технологии: коллективный поиск согласованных решений в диалоге // Онтология проектирования. Самара: Новая техника, 2013. Т. 8. № 2. С. 26–47.
15. **Zhang L., Zhang Y.** Research on hierarchical distributed coordination control in process industry based on multi-agent system // 2010 Internat. Conf. on Measuring Technology and Mechatronics Auto-

mation. Changsha City, 2010. Pp. 96–100. DOI: 10.1109/ICMTMA.2010.683

16. **Zheng G., Li N.** Multi-agent based control system for multi-microgrids // 2010 Internat. Conf. on Computational Intelligence and Software Engineering. Wuhan, 2010. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/CISE.2010.5676818

17. **Shao Y., Wu Y., Chen Y.** Design and research of multi-agent control system for central cooling system // 2014 IEEE 3rd Internat. Conf. on Cloud Computing and Intelligence Systems. Shenzhen, 2014. Pp. 218–221. DOI: 10.1109/CCIS.2014.7175732

18. **Wei C., Mei J.J.C., Shaoting G.** Design of workshop production management control system based on multi-agent // 2016 IEEE 11th Conf. on

Industrial Electronics and Applications. Hefei, 2016. Pp. 427–430. DOI: 10.1109/ICIEA.2016.7603622

19. **Бессонов А.А.** Многокритериальная нейрорезолюционная оптимизация нелинейных функций // Системы обработки информации. 2012. № 9 (107). С. 5–10.

20. **Theiss S., Vasyutynskyy V., Kabitzsch K.** AMES – A resource-efficient platform for industrial agents // IEEE Internat. Workshop on Factory Communication Systems. Dresden, 2008. Pp. 405–413.

21. LibNoDave – свободно распространяемая библиотека, для коммуникации с ПЛК Simatic S7 // URL: <http://libnodave.sourceforge.net/> (Дата обращения: 28.03.2019).

Статья поступила в редакцию 04.04.2019.

REFERENCES

1. **Bassi L.** Industry 4.0: Hope, hype or revolution? *IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry*, 2017, Pp. 1–6. DOI: 10.1109/RTSI.2017.8065927

2. **Kannengiesser U., Müller H.** Multi-level, viewpoint-oriented engineering of cyber-physical production systems: An approach based on Industry 4.0, system architecture and semantic web standards. *44th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications*, 2018, Pp. 331–334. DOI: 10.1109/SEAA.2018.00061.

3. **Cheng G.-J., Liu L.-T., Qiang X.-J., Liu Y.** Industry 4.0 development and application of intelligent manufacturing. *International Conference on Information System and Artificial Intelligence*, 2016, Pp. 407–410. DOI: 10.1109/ISAI.2016.0092

4. **Mumtaz S., Alshaily A., Pang A., Rayes A., Tsang K.F., Rodriguez J.** Massive Internet of Things for industrial applications: addressing wireless IIoT connectivity challenges and ecosystem fragmentation. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2017, Vol. 11(1), Pp. 28–33. DOI: 10.1109/MIE.2016.2618724

5. **Vachálek J., Bartalský L., Rovný O., Šišmišová D., Morháč M., Lokšnk M.** The digital twin of an industrial production line within the Industry 4.0 concept. *21st International Conference on Process Control*, 2017, Pp. 258–262. DOI: 10.1109/PC.2017.7976223

6. **Yusen X., Bondaletova N.F., Kovalev V.I., Komrakov A.V.** Digital twin concept in managing industrial capital construction projects life cycle. *11th International Conference on Management of Large-Scale System Development*, 2018, Pp. 1–3. DOI: 10.1109/MLSD.2018.8551867

7. **Tao F., Zhang M.** Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access*, 2017, No. 5, Pp. 20418–20427. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2756069

8. **Eckhardt A., Müller S., Leurs L.** An evaluation of the applicability of OPC UA publish subscribe on factory automation use cases. *IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Turin, 2018, Pp. 1071–1074. DOI: 10.1109/ETFA.2018.8502445

9. **Gabdrashitova E.I., Gamilova D.A.** Otsenka proizvodstvennogo potentsiala nefteservisnykh predpriyatii [Assessment of the productive capacity of oilfield service companies]. *Naukovedenie. Online Journal Science studies*, 2014, No. 3. Available: <https://naukovedenie.ru/PDF/30EVN314.pdf> (Accessed: 28.03.2019). (rus)

10. **Burenina I.V., Varakina V.A.** Sistema yedinykh pokazateley otsenki effektivnosti deyatel'nosti vertikalno-integrirovannykh neftyanykh kompaniy [The single indicator system of performance assessment of vertically integrated oil enterprises]. *Naukovedenie. Online Journal Science studies*, 2014, No. 1. Available: <https://naukovedenie.ru/PDF/12EVN114.pdf> (Accessed: 28.03.2019). (rus)

11. **Kostenko D., Kudryashov N., Maystrishin M., Onufriev V., Potekhin V., Vasiliev V.** Digital twin applications: diagnostics, optimisation and prediction. *Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium*, Vienna, Austria, 2018, Pp. 574–581. DOI: 10.2507/29th.daaam.proceedings.083

12. **Yefremov A.Yu., Maksimov D.Yu.** Setetsentricheskaya sistema upravleniya – chto vkladyvayetsya v eto ponyatiye? [The network-centric

control system – what is included in this concept?]. *Trudy III Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem: Tekhnicheskiye i programmnyye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya* [3rd All-Russian Conference with International Participation: *Technical and Software Tools for Control, Monitoring and Measurement Systems*]. Moscow: IPU RAN Publ., 2012, Pp 158–161. (rus)

13. **Skobelev P.O., Tsarev A.V.** Setsetricheskij podkhod k sozdaniyu bolshikh multiagentnykh sistem dlya adaptivnogo upravleniya resursami v realnom vremeni [The network-centric approach to creation of big multi-agent system for adaptive real-time resource management]. *Proceedings of the International Scientific and Practical Multi-Conference on Control of Big Systems*, Moscow: IPU RAN Publ., 2011, 267 p. (rus)

14. **Skobelev P.O.** Situatsionnoye upravleniye i multiagentnyye tekhnologii: kollektivnyy poisk soglasovannykh resheniy v dialoge [Situation-driven decision making and multi-agent technology: finding solutions in dialogue]. *Ontologiya proyektirovaniya* [Ontology of Design], Samara: New Technology, 2013, Vol. 8(2), Pp. 26–47. (rus)

15. **Zhang L., Zhang Y.** Research on hierarchical distributed coordination control in process industry based on multi-agent system. *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Changsha City, 2010, Pp. 96–100. DOI: 10.1109/ICMTMA.2010.683

16. **Zheng G., Li N.** Multi-agent based control system for multi-microgrids. *2010 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering*, Wuhan, 2010, Pp. 1–4. DOI: 10.1109/CISE.2010.5676818

17. **Shao Y., Wu Y., Chen Y.** Design and research of multi-agent control system for central cooling system. *2014 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems, Shenzhen*, 2014, Pp. 218–221. DOI: 10.1109/CCIS.2014.7175732

18. **Wei C., Mei J.J.C., Shaoting G.** Design of workshop production management control system based on multi-agent. *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications*, Hefei, 2016, Pp. 427–430. DOI: 10.1109/ICIEA.2016.7603622

19. **Bessonov A.A.** Mnogokriterialnaya neyroevolyutsionnaya optimizatsiya nelineynykh funktsiy [Multiobjective neuroevolutionary optimization of nonlinear functions]. *Sistemi obrobki informatsii* [Information Processing Systems], 2012, Vol. 9(107), Pp. 5–10. (rus)

20. **Theiss S., Vasyutynskyy V., Kabitzsch K.** AMES – A resource-efficient platform for industrial agents. *IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, Dresden, 2008, Pp. 405–413.

21. LibNoDave – A free communication library for Simatic S7 PLCs, Available: <http://libnodave.sourceforge.net/> (Accessed: 28.03.2019).

Received 04.04.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

КОВАЛЕВСКИЙ Владислав Эдуардович
KOVALEVSKY Vladislav E.
 E-mail: vladkov@spbstu.ru

ОНУФРИЕВ Вадим Александрович
ONUFRIEV Vadim A.
 E-mail: ovavadim@gmail.com