



УДК 658.5.012.011.56

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОБУЧАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА В КОНЦЕПЦИИ ИНДУСТРИЯ 4.0

Ф.А. Глущенко<sup>a</sup>, В. Борзых<sup>b</sup>, Дж. Верманн<sup>b</sup>, А.В. Коломбо<sup>b</sup><sup>a</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация<sup>b</sup> Университет прикладных наук г. Эмден/Лир, Эмден, 26721, Германия

Адрес для переписки: f.glushenko@gmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 02.03.18, принята к печати 12.04.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-554-560

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Глущенко Ф.А., Борзых В., Верманн Дж., Коломбо А.В. Разработка модели обучающей платформы для исследования процесса производства в концепции Индустрия 4.0 // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 3. С. 554–560. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-554-560

### Аннотация

**Предмет исследования.** Предложена образовательная платформа, созданная на базе автоматизированного производства в концепции Индустрия 4.0. Описан процесс взаимодействия компонентов автоматизированного участка. Представлено описание процесса внедрения новых компонентов в стандартизованную архитектурную модель. **Метод.** При создании автоматизированного участка производства используется современная сервис-ориентированная архитектурная модель, описывающая процесс производства как со стороны жизненного цикла, так и на различных уровнях иерархии, а также уровнях взаимодействия компонентов данного производства. Основой созданного участка является одноплатный компьютер Raspberry Pi, на котором запускается сервер обмена данными между базой данных и гравировальным участком. **Основные результаты.** В работе была спроектирована модель для следующего этапа дополнения производства с помощью комплекса 3D-принтеров. Также были определены интерфейсы взаимодействия между компонентами автоматизированного участка. **Практическая значимость.** Созданный участок производства позволяет ознакомиться с основой концепции Индустрия 4.0. Разработанная модель будет реализована для обучения студентов работе с современной промышленной автоматизацией. Кроме того, архитектура созданного участка предоставляет возможность отрабатывать новые программы по автоматизации, внедрять дополнительные компоненты производства, а также исследовать их взаимодействие с существующими.

### Ключевые слова

промышленные киберфизические системы, Индустрия 4.0, промышленная автоматизация, образование, производственная система, сервис-ориентированная архитектура

### Благодарности

Исследовательская работа была проведена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Задание № 9.9951.2017 / DAAD).

## DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL PLATFORM FOR INDUSTRY 4.0 PRODUCTION PROCESS STUDY

F.A. Glushchenko<sup>a</sup>, W. Borsych<sup>b</sup>, J. Wermann<sup>b</sup>, A.W. Colombo<sup>b</sup><sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation<sup>b</sup> University of Applied Sciences Emden/Leer, Emden, 26721, Germany

Corresponding author: f.glushenko@gmail.com

### Article info

Received 02.03.18, accepted 12.04.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-554-560

Article in Russian

**For citation:** Glushchenko F.A., Borsych W., Wermann J., Colombo A.W. Development of educational platform for Industry 4.0 production process study. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 554–560 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-554-560

### Abstract

**Subject of Research.** We propose educational platform created on the basis of the automated production in the Industry 4.0 concept. The interaction of automated production area components is described. The paper describes the process of new components integration into a standardized architectural model. **Method.** While creating an automated production area, a

modern service-oriented architectural model is used, which describes the production process both from the life cycle side and at different levels of the hierarchy, as well as the interaction levels of the components of this production. The basis of the production is a single-board Raspberry Pi computer with a server being started on it for data exchange between the database and the engraving site. **Main Results.** A model was designed for the next stage of production supplementing by a set of 3D printers. Interfaces between the components of the automated production were also identified. **Practical Relevance.** The created production area gives the possibility to get acquainted with the basis of the Industry 4.0 concept. The developed model will be implemented for training students to work with modern industrial automation. In addition, the architecture of the created production area provides an opportunity to develop new automation programs, introduce additional production components, and study their interaction with existing ones.

#### **Keywords**

industrial cyber physical systems, Industry 4.0, industrial automation, education, production system, service-oriented architecture

#### **Acknowledgements**

This work has been supported by the The Deutscher Akademischer Austauschdienst, DAAD and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Assignment No. 9.9951.2017/DAAD for partial financial support of the abroad research studies).

### **Введение**

Грамотное использование информационных технологий является ключом для достижения значительного успеха в процессе производства. В течение всего времени существования эти технологии вовлечены в производственный процесс, и за сравнительно короткое время их влияние значительно возросло. Промышленная автоматизация с облачными вычислениями, интернет вещей, трехмерная печать и многие другие технологии дают возможность не только создавать новые продукты, но и увеличивать производительность существующих процессов. В то же время данное влияние можно обнаружить на любом из этапов жизненного цикла – от исследования рынка до утилизации [1].

Подобные изменения делают разработку бизнес-проектов намного ближе к производственному процессу: за каждым этапом изготовления продукта существует возможность наблюдать со стороны бизнес-проектирования. Для этих целей можно использовать систему планирования ресурсов предприятия (Enterprise Resource Planning, ERP), которая сможет обрабатывать потоки данных производственного процесса в реальном времени и представлять их в доступной форме [2].

Для будущих инженеров целесообразно понимать и уметь пользоваться достоинствами современных технологий – Индустрией 4.0, киберфизическими системами и сервис-ориентированной архитектурой [1]. Для решения таких задач с 2007 года в Европе начали появляться так называемые исследовательские фабрики. Основной целью таких фабрик стало решение студентами производственных задач в процессе изучения курса автоматизации производства [3].

В рамках данного подхода были представлены различные решения. Работники лаборатории производственных процессов и автоматизации университета г. Патры, Греция, представили свой концепт внедрения таких фабрик в обучающий процесс. В данном случае в течение обучения студентов происходила удаленная работа с производственным участком и его инженерами [4]. Такой подход при отсутствии прямого контакта с производством и его компонентами дает лишь базовое представление о работе на производственном участке.

Также стоит отметить решения университета прикладных наук г. Бохум, Германия, и университета прикладных наук г. Ройтлинген, Германия [5, 6]. В данном случае процесс работы студентов сводится к решению узких задач, без взаимодействия с полноценным производственным комплексом.

Новый подход был также реализован в техническом университете г. Берлин, Германия [7]. В представленной работе описана мини-фабрика, основанная на аддитивной технологии 3D-печати. При работе с такой фабрикой обучающийся сможет проанализировать жизненный цикл продукта от разработки модели до утилизации. Однако реализованная мини-фабрика не предоставляет возможности расширения производственного процесса внедрением последующих участков.

Целью создания автоматизированного участка стала не только возможность прямого взаимодействия студентов с производственными компонентами, но и создание удобной площадки, в которую обучающиеся смогут внедрять собственные производственные решения и программы. Для этой цели был разработан автоматизированный участок производства на базе кафедры Университета прикладных наук г. Эмден-Лир. Данная работа посвящена созданию образовательной платформы, которая поможет студентам включиться в современные технологии автоматизации производства.

### **Основа проектирования автоматизированного участка**

Основой для создания автоматизированного участка стало использование сервис-ориентированной архитектуры. Такая архитектура представляет собой паттерн проектирования производственного процесса, при котором разные выполняющие этот процесс системы представляют определенный функционал (сервис) [8]. Преимуществом такого подхода является возможность соединять разрозненные компоненты производства в тот момент, когда они требуются для выполнения процесса, и без необходимости уточне-

ния, как и кем этот функционал реализован. Кроме того, при таком подходе компоненты производства менее тесно связаны друг с другом, что дает возможность легко переконфигурировать производство при необходимости [9].

Сервис-ориентированная архитектура, кроме того, является удобной для внедрения киберфизических систем. В контексте киберфизических систем сервисы не только предоставляют программный функционал, но также связаны с оборудованием [10]. Это может быть применимо в различных технологиях, таких как автономное вождение, роботизация, а также в промышленной автоматизации. При объединении нескольких киберфизических систем они могут образовать свободно соединенные суперсистемы (System-of-Systems), которые могут выполнять сложные функции, недоступные для выполнения отдельной киберфизической системе [11, 12].

Распространенными технологиями внедрения сервис-ориентированной архитектуры являются простой протокол доступа к объектам (Simple Object Access Protocol, SOAP) и архитектура программного обеспечения для распределенных систем (Representational State Transfer, REST). Обе технологии построены на Интернет-протоколах, таких как TCP/IP или UDP/IP и HTTP [13].

Промышленные производственные системы могут быть крайне сложными по причине широкого разнообразия подсистем. Подсистемы включают в себя средства обработки заготовок, системы управления этими средствами, а также системы управления производством или ERP-системы. Такой подход создает крайне неоднородную среду, где использование традиционных средств управления возможно только лишь при сложном соединении всех компонентов между собой. Это приводит к жестко иерархической и негибкой компоновке, при которой любые изменения в процессе производства приносят значительный убыток по причине реконфигурации всех отдельных компонентов [14].

Так как текущие тенденции рынка приводят к повышенному спросу на более узконаправленные продукты и уменьшению времени жизненного цикла, такой негибкий подход не является успешным решением. В связи с этим необходимо исследовать новые способы организации производственных систем [15].

Концепты киберфизических систем и сервис-ориентированной архитектуры являются также полезными и с точки зрения организации производства. Подобно концепту Интернета вещей, средства обработки и другие производственные подсистемы внедрены согласно концепту киберфизических систем, используя стандартизированные интерфейсы, основанные на Интернет-технологиях. Такой подход описывается в концепте Индустрии 4.0 [16].

Одной из задач данной работы является использование стандартизированной архитектурной модели для Индустрии 4.0 (Reference Architectural Model Industrie 4.0, RAMI 4.0), которая является базовой моделью описания составляющих концепта Индустрии 4.0 [17]. Данная модель состоит из нескольких измерений:

- уровни иерархии;
- уровни взаимодействий;
- этапы жизненного цикла/изменения объема производства

Каждый физический и нефизический объект может быть представлен как компонент Индустрии 4.0, как показано в модели RAMI 4.0 (рис. 1) [18]. Компонент производства может быть расположен внутри обычной производственной иерархии (см. также международный стандарт ISA`95<sup>1</sup>), в качестве «управляющего устройства», в том числе программируемого логического контроллера (Programmable Logic Controller, PLC) или роботизированного контроллера (Robotic Controller, RC), или же как система управления (например, ERP-система) [19]. Кроме того, компонент может быть описан на разных уровнях взаимодействия в модели RAMI. В месте, где происходит описание физического компонента, уровень интеграции описывает включение этого компонента в программный модуль, а на коммуникационном уровне описывается взаимодействие интерфейсов, помогающее определить, как компонент должен взаимодействовать с другими. Дойдя до бизнес-уровня, разные факторы одного и того же компонента описываются с разных перспектив. Вдобавок, измерение этапов жизненного цикла/объема производства описывает развитие компонента в течение времени, начиная со стадии разработки стандартных изделий и заканчивая поддержкой особых экземпляров продукта.

Модель RAMI 4.0 также определяет способ внедрения компонентов как киберфизических систем, предоставляя так называемые оболочки управления. Оболочками управления являются программные компоненты, которые объединены для создания интерфейсов взаимодействия физических компонентов. Эти интерфейсы включают в себя ключевой функционал компонента, а также различные описание и документацию о самом компоненте.

<sup>1</sup> ISA`95 – международный стандарт для разработки интерфейса между предприятиями и управляющими системами.

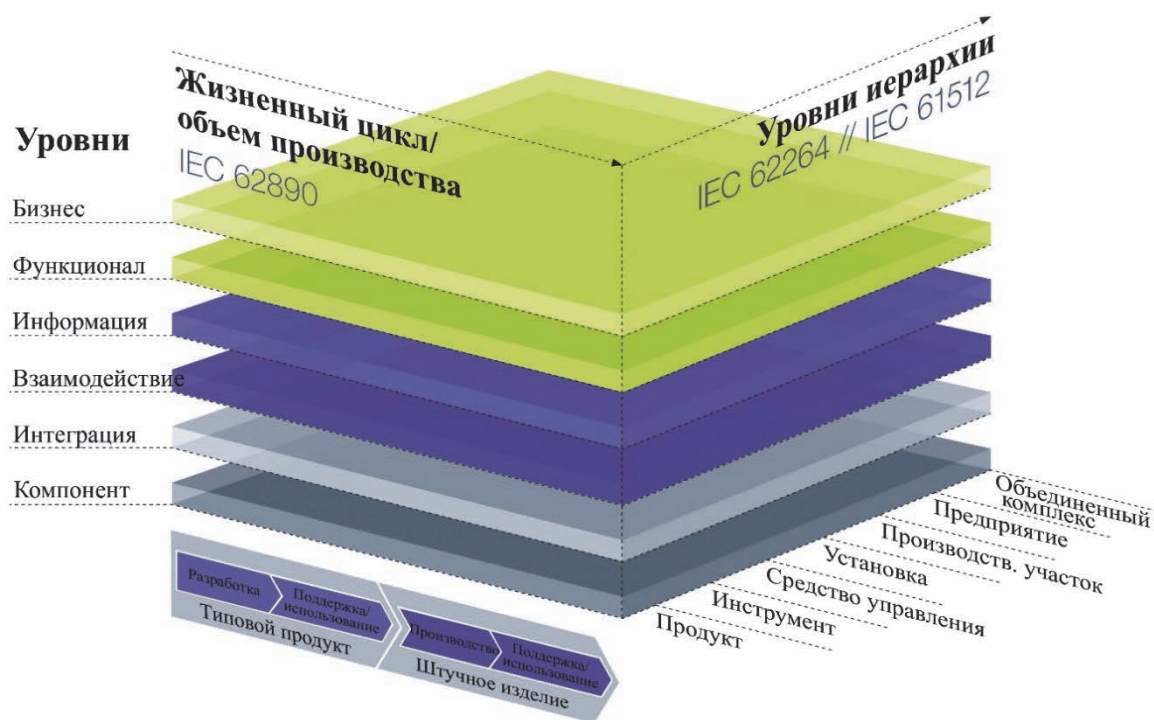


Рис. 1. Стандартизированная архитектурная модель RAMI 4.0<sup>1, 2, 3</sup>

#### Описание участка

Обучающий производственный участок был спроектирован с использованием сервис-ориентированной архитектуры на базе кафедры Университета прикладных наук г. Эмден/Лир. Данный участок будет использован для обучения студентов взаимодействию с производственными компонентами в режиме реального времени. Достоинством такого подхода является представление реального производственного процесса с открытым исходным кодом, при котором студенты смогут обрабатывать и дополнять свои разработки.

Продуктами такого производства являются индивидуальные продукты – визитные карты и офисные ручки. Технологически продукты будут выполнены посредством лазерной гравировки и 3D-печати.

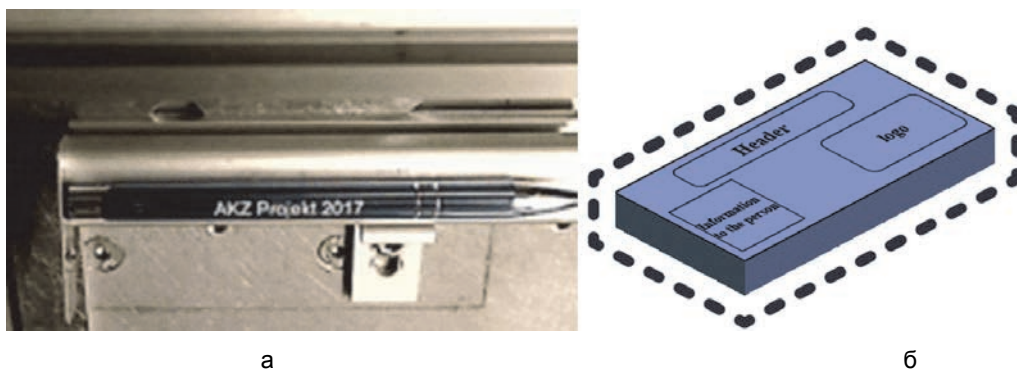


Рис. 2. Продукты участка производства: отгравированная офисная ручка (а); модель визитной карты (б)

Технической основой производственного участка стал промышленный гравировальный станок IPG YLR-200-SM, с помощью которого производится обработка заготовок – металлических пишущих ручек (рис. 2, а). Для создания среды взаимодействия заказчика с производством была использована ERP-система Transfact ([www.hs-emdenleer.de/e-pps.html](http://www.hs-emdenleer.de/e-pps.html)), которая интегрирована в реляционную базу данных Oracle. Производственная система организована с помощью технологии REST.

<sup>1</sup> IEC 62890 – стандарт Индустрии 4.0 для описания жизненного цикла.

<sup>2</sup> IEC 62264 – международный стандарт интеграции системы управления предприятием на базе ISA`95.

<sup>3</sup> IEC 61512 – международный стандарт пакетного управления, используемого в производственных процессах и терминологии.

На первом этапе заказчик помещает информацию через интерфейс обработки поступающих заказов, реализованный с помощью ERP-системы. Процесс производства начинается после достижения заказом базы данных, где происходит сравнение нового заказа с сохраненными. Содержанием этой информации может быть как обычный текст для гравировки, так и набор персональных данных для создания напечатанной визитной карты (рис. 2, б).

ERP-система отслеживает новые заказы и после проверки начинает взаимодействие с участками производства. Если содержанием заказа является текст для гравировки, то у оператора гравировальной установки на пульте управления появляется новый заказ. В случае заказа визитной карты система взаимодействует с модулем обработки 3D, который занимается постоянным мониторингом доступных принтеров, а также обработкой полученной в заказе информации. При доступных для работы 3D-принтерах заказ отправляется в печать.

Участок производства состоит из нескольких промышленных киберфизических систем (Industrial Cyber-Physical System, ICPS) (рис. 3).

Целью создания ICPS 3D-принтера является организация умной системы, состоящей из нескольких принтеров, которая открывает возможность печати визитной карты. В этой системе из полученной в заказе информации происходит формирование \*.STL модели по заданному шаблону. После создания модели происходит проверка доступных принтеров, и в случае положительного ответа задание отправляется на печать.

ICPS Гравировального станка использует пульт управления машиной в качестве интерфейса взаимодействия. Интерфейс представляет собой веб-страницу, на которой изображены все заказы, находящиеся в работе.

ICPS Базы данных состоит из реляционной базы данных Oracle и оболочки управления базой данных. Все заказы, поступающие в производственную систему, получают в этой базе данных идентификационный номер для дальнейшего контроля производственного процесса. С помощью оболочки управления базой данных появляется возможность исследования производственного процесса с бизнес-уровня.

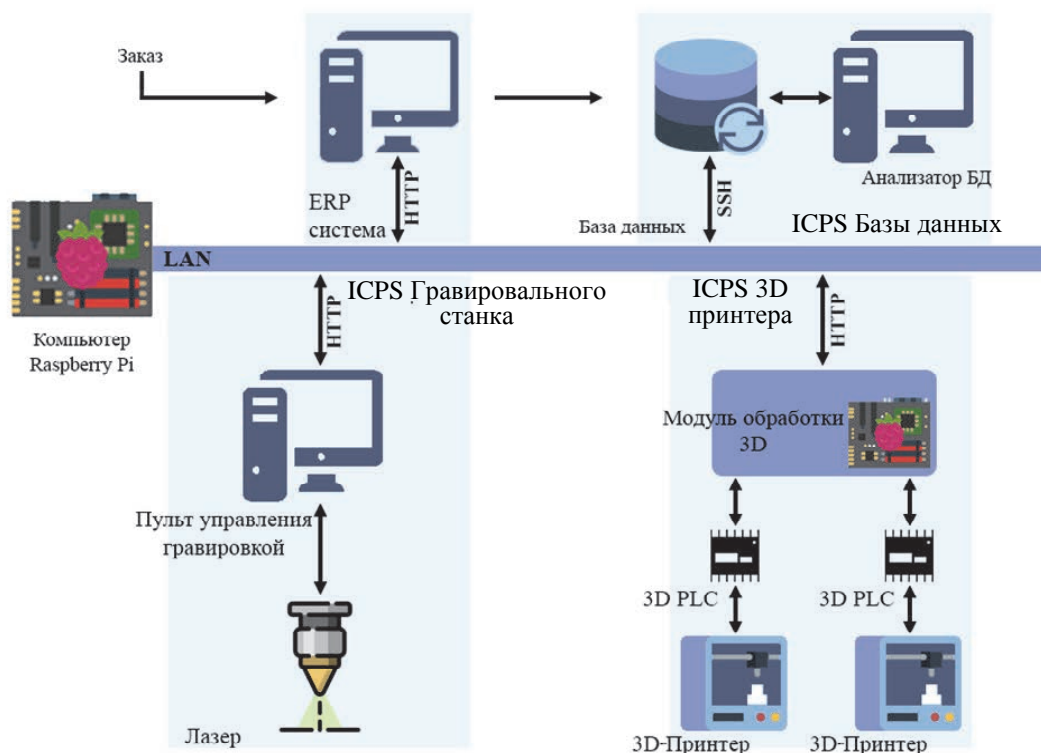


Рис. 3. Планировка разрабатываемой производственной системы

Все компоненты системы подключены к единой локальной сети. На компьютере Raspberry Pi запускается сервер с программами взаимодействия компонентов производственной системы.

### Образовательное использование

Главной задачей созданного автоматизированного участка является использование его в качестве учебной площадки для студентов Университета прикладных наук г. Эмден/Лир. Благодаря структуре этого участка в нем задействованы разные области изучаемых программ. Данная площадка соединяет компоненты, встречающиеся в таких курсах, как приборостроение, электротехника, управление бизнесом, а

также техническое руководство. Технологии, используемые для интеграции систем и создания возможности обмена данными, изучаются в курсе информационных технологий. Производственная система также содержит в себе и логистические решения.

При работе с автоматизированным участком обучающиеся на начальных этапах смогут разобрать конкретный экземпляр использования архитектуры RAMI 4.0 при создании производства. Для этого данный участок будет полностью расписан в соответствии с указанной архитектурой, что позволит обучающимся выбрать интересующее направление в соответствии с уровнями RAMI 4.0.

Последующая работа будет подразумевать внедрение собственных программных решений в реализацию работы участка, как, например, взаимодействие ICPS Гравировального станка с ICPS 3D-принтера или же отдельное взаимодействие ICPS 3D-принтера с базой данных. На данном этапе возможно также внедрение облачных технологий, позволяющих использовать не только облачную платформу в качестве сервиса (предоставляя обработку 3D-моделей в облаке), но и систему как сервис с облачной визуализацией текущих процессов.

При внедрении данного участка в различные изучаемые курсы также можно показать важность междисциплинарных работ. Для решения новых производственных задач на таком участке будут задействованы работники различных направлений, что дополнительно укажет на важность четкого понимания интерфейсов между различными компонентами.

В дополнение к этому производственный участок создает подходящую платформу для проектов и исследовательской работы студентов. При выполнении новых работ у данной системы появляется гарантированная возможность совершенствоваться с помощью дополнительно подключенных компонентов с последующим созданием сложной суперсистемы. Таким образом, можно продемонстрировать преимущества, связанные с реконфигурируемостью и гибкостью подхода Индустрия 4.0.

### Заключение

Созданный автоматизированный участок при своем незначительном масштабе позволяет ознакомиться с архитектурой подхода Индустрия 4.0. Использование различных подходов в процессе организации производства дает возможность прямого изучения современных технологий промышленной автоматизации, а также внедрения собственных разработок на базе существующего производства. Для создания данного участка были проведена разработка управляющих программ на базе компьютеров Raspberry Pi. Для последующих работ будет задействован комплекс 3D-печати.

### Литература

1. Barry D.K. *Web Services, Service-Oriented Architectures, and Cloud Computing*. 2<sup>nd</sup> ed. Morgan Kaufmann, 2013. 244 p.
2. Maditinos D., Chatzoudes D., Tsairidis C. Factors affecting ERP system implementation effectiveness // *Journal of Enterprise Information Management*. 2011. V. 25. N 1. P. 60–78. doi: 10.1108/17410391211192161
3. ElMaraghy H., ElMaraghy W. Learning integrated product and manufacturing systems // *Procedia CIRP*. 2015. V. 32. P. 19–24. doi: 10.1016/j.procir.2015.02.222
4. Rentzos L., Mavrikios D., Chryssolouris G. A two-way knowledge interaction in manufacturing education: the teaching factory // *Procedia CIRP*. 2015. V. 32. P. 31–35. doi: 10.1016/j.procir.2015.02.082
5. Faller C., Feldmuller D. Industry 4.0 learning factory for regional SMEs // *Procedia CIRP*. 2015. V. 32. P. 88–91. doi: 10.1016/j.procir.2015.02.117
6. Hummel V., Hyra K., Ranz F., Schuhmacher J. Competence development for the holistic design of collaborative work systems in the Logistics Learning Factory // *Procedia CIRP*. 2015. V. 32. P. 76–81. doi: 10.1016/j.procir.2015.02.111
7. Muschard B., Seliger G. Realization of a learning environment to promote sustainable value creation in areas with insufficient infrastructure // *Procedia CIRP*. 2015. V. 32. P. 70–75. doi: 10.1016/j.procir.2015.04.095
8. Candido G., Colombo A.W., Barata J., Jammes F. Service-oriented infrastructure to support the deployment of evolvable production systems // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2011. V. 7. N 4. P. 759–767. doi: 10.1109/TII.2011.2166779
9. Colombo A.W., Bangemann T., Karnouskos S. et al. *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach*. Springer, 2014. 245 p. doi: 10.1007/978-3-319-05624-1
10. Khaitan S.K., McCalley J.D. Design techniques and applications of cyberphysical systems: a survey // *IEEE Systems Journal*.

### References

1. Barry D.K. *Web Services, Service-Oriented Architectures, and Cloud Computing*. 2<sup>nd</sup> ed. Morgan Kaufmann, 2013, 244 p.
2. Maditinos D., Chatzoudes D., Tsairidis C. Factors affecting ERP system implementation effectiveness. *Journal of Enterprise Information Management*, 2011, vol. 25, no. 1, pp. 60–78. doi: 10.1108/17410391211192161
3. ElMaraghy H., ElMaraghy W. Learning integrated product and manufacturing systems. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 32, pp. 19–24. doi: 10.1016/j.procir.2015.02.222
4. Rentzos L., Mavrikios D., Chryssolouris G. A two-way knowledge interaction in manufacturing education: the teaching factory. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 32, pp. 31–35. doi: 10.1016/j.procir.2015.02.082
5. Faller C., Feldmuller D. Industry 4.0 learning factory for regional SMEs. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 32, pp. 88–91. doi: 10.1016/j.procir.2015.02.117
6. Hummel V., Hyra K., Ranz F., Schuhmacher J. Competence development for the holistic design of collaborative work systems in the Logistics Learning Factory. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 32, pp. 76–81. doi: 10.1016/j.procir.2015.02.111
7. Muschard B., Seliger G. Realization of a learning environment to promote sustainable value creation in areas with insufficient infrastructure. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 32, pp. 70–75. doi: 10.1016/j.procir.2015.04.095
8. Candido G., Colombo A.W., Barata J., Jammes F. Service-oriented infrastructure to support the deployment of evolvable production systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2011, vol. 7, no. 4, pp. 759–767. doi: 10.1109/TII.2011.2166779
9. Colombo A.W., Bangemann T., Karnouskos S. et al. *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach*. Springer, 2014, 245 p. doi: 10.1007/978-3-319-05624-1
10. Khaitan S.K., McCalley J.D. Design techniques and



2015. V. 9. N 2. P. 350–365. doi: 10.1109/JSYST.2014.2322503
11. Boardman J., Sauser B. System of Systems - the meaning of // Proc. IEEE/SMC Int. Conf. on System of Systems Engineering. Los Angeles, USA, 2006. doi: 10.1109/SYSOSE.2006.1652284
  12. Maier M.W. Architecting principles for systems-of-systems // INCOSE International Symposium. 1996. V. 6. N 1. P. 565–573. doi: 10.1002/j.2334-5837.1996.tb02054.x
  13. AlShahwan F., Moessner K. Providing SOAP web services and restful web services from mobile hosts // Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Internet and Web Applications and Services (ICIW). Barcelona, Spain, 2010. P. 174–179. doi: 10.1109/ICIW.2010.33
  14. Leitao P., Colombo A.W., Karnouskos S. Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges // Computers in Industry. 2016. V. 81. P. 11–25. doi: 10.1016/j.compind.2015.08.004
  15. Bangemann T. et al. State of the art in industrial automation / In: Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems. Springer, 2014. P. 23–47. doi: 10.1007/978-3-319-05624-1\_2
  16. Jamshidi M. System of systems – innovations for 21<sup>st</sup> century // Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Industrial and Information Systems. Kharagpur, India, 2008. P. 6–7. doi: 10.1109/ICIINFS.2008.4798321
  17. Flatt H. et al. Analysis of the Cyber-Security of industry 4.0 technologies based on RAMI 4.0 and identification of requirements // Proc. Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation. Berlin, 2016. 4 p. doi: 10.1109/ETFA.2016.7733634
  18. Hankel M., Rexroth B. The Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) // ZVEI. 2015. 2 p.
  19. Zarte M., Pechmann A., Wermann J., Gosewehr F., Colombo A.W. Building an Industry 4.0-compliant lab environment to demonstrate connectivity between shop floor and IT levels of an enterprise // Proc. IECON. Florence, Italy, 2016. P. 6590–6595. doi: 10.1109/IECON.2016.7792956
  - applications of cyberphysical systems: a survey. *IEEE Systems Journal*, 2015, vol. 9, no. 2, pp. 350–365. doi: 10.1109/JSYST.2014.2322503
  11. Boardman J., Sauser B. System of Systems - the meaning of. *Proc. IEEE/SMC Int. Conf. on System of Systems Engineering*. Los Angeles, USA, 2006. doi: 10.1109/SYSOSE.2006.1652284
  12. Maier M.W. Architecting principles for systems-of-systems. *INCOSE International Symposium*, 1996, vol. 6, no. 1, pp. 565–573. doi: 10.1002/j.2334-5837.1996.tb02054.x
  13. AlShahwan F., Moessner K. Providing SOAP web services and restful web services from mobile hosts. *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Internet and Web Applications and Services, ICIW*. Barcelona, Spain, 2010, pp. 174–179. doi: 10.1109/ICIW.2010.33
  14. Leitao P., Colombo A.W., Karnouskos S. Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges. *Computers in Industry*, 2016, vol. 81, pp. 11–25. doi: 10.1016/j.compind.2015.08.004
  15. Bangemann T. et al. State of the art in industrial automation. In *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems*. Springer, 2014, pp. 23–47. doi: 10.1007/978-3-319-05624-1\_2
  16. Jamshidi M. System of systems – innovations for 21<sup>st</sup> century. *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Industrial and Information Systems*. Kharagpur, India, 2008, pp. 6–7. doi: 10.1109/ICIINFS.2008.4798321
  17. Flatt H. et al. Analysis of the Cyber-Security of industry 4.0 technologies based on RAMI 4.0 and identification of requirements. *Proc. Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation*. Berlin, 2016, 4 p. doi: 10.1109/ETFA.2016.7733634
  18. Hankel M., Rexroth B. The Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). *ZVEI*, 2015, 2 p.
  19. Zarte M., Pechmann A., Wermann J., Gosewehr F., Colombo A.W. Building an Industry 4.0-compliant lab environment to demonstrate connectivity between shop floor and IT levels of an enterprise. *Proc. IECON*. Florence, Italy, 2016, pp. 6590–6595. doi: 10.1109/IECON.2016.7792956

### Авторы

**Глущенко Федор Алексеевич** – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-6279-0093, f.glushchenko@gmail.com

**Борзых Вальдемар** – научный помощник, Университет прикладных наук г. Эмден/Лир, Эмден, 26721, Германия, ORCID ID: 0000-0002-9606-4222, waldemar.borsych@stud.hs-emden-leer.de

**Вермани Дзефффри** – научный помощник, Университет прикладных наук г. Эмден/Лир, Эмден, 26721, Германия, Scopus ID: 56913295700, ORCID ID: 0000-0001-5006-1862, jeffrey.wermann@hs-emden-leer.de

**Коломбо Армандо Вальтер** – доктор наук, профессор, профессор, Университет прикладных наук г. Эмден/Лир, Эмден, 26721, Германия, Scopus ID: 25625988000, ORCID ID: 0000-0003-1431-7589, armando\_walter-colombo@t-online.de

### Authors

**Fedor A. Glushchenko** – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-6279-0093, f.glushchenko@gmail.com

**Waldemar Borsych** – Scientific assistant, University of Applied Sciences Emden/Leer, Emden, 26721, Germany, ORCID ID: 0000-0002-9606-4222, waldemar.borsych@stud.hs-emden-leer.de

**Jeffrey Wermann** – Scientific assistant, University of Applied Sciences Emden/Leer, Emden, 26721, Germany, Scopus ID: 56913295700, ORCID ID: 0000-0001-5006-1862, jeffrey.wermann@hs-emden-leer.de

**Armando Walter Colombo** – D.Sc., Full Professor, University of Applied Sciences Emden/Leer, Emden, 26721, Germany, Scopus ID: 25625988000, armando\_walter-colombo@t-online.de