



УДК 621.0
DOI: 10.12737/23487

А.Р. Ингеманссон, к.т.н.
(АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады»,
пр. Ленина, б/н., Волгоград, 400071)
E-mail: aleing@yandex.ru

Современная научная проблема повышения эффективности механообрабатывающего производства путем внедрения киберфизических систем в рамках концепции «индустрия 4.0»

Представлено современное направление повышения эффективности машиностроительного производства за счет киберфизических систем и концепции «индустрия 4.0». Выполнен обзор научных и практических разработок по теме исследования. Приведены аспекты создания информационно-исполнительных киберфизических систем для механической обработки. Установлены проблемы, определяющие актуальное направление научных исследований.

Ключевые слова: машиностроение; индустрия 4.0; киберфизические системы; механическая обработка.

A.R. Ingemansson, Can. Eng.
(“Federal Research-Production Center “Titanium-Barricades” Co., Lenin Avenue, Volgograd, 400071)

Current scientific problem of efficiency increase in mechanical operation by cyber-physical systems introduction within “industry 4.0” concept

A current direction for mechanical engineering efficiency increase at the expense of cyber-physical systems and “Industry 4.0” concept is presented. The survey of scientific and practical developments on the field of researches is carried out. The aspects of the formation of information-executive cyber-physical systems for machining are shown. The problems defining a current direction in scientific investigations are defined.

Keywords: mechanical engineering; industry 4.0; cyber-physical systems; machining.

Современные технические системы, в т.ч. серийно выпускаемое металлорежущее оборудование, оснащаются различными чувствительными элементами (датчиками, сенсорами) и средствами идентификации, способными формировать массив данных о свойствах и состоянии системы. Технические системы посредством каналов связи способны самостоятельно обмениваться данными и принимать решения по запрограммированному алгоритму, в т.ч. без участия человека. С внедрением описанного выше взаимодействия ассоциируется наступление так называемой 4-й про-

мышленной революции [1, 2], реализуемой посредством концепции «индустрия 4.0».

Концепция «индустрия 4.0» («*industrie 4.0*»), сформулированная в Германии в 2011 г. [0], определяется как средство повышения эффективности обрабатывающей промышленности через интеграцию киберфизических систем («*cyber physical systems*», «*CPS*») в заводские процессы. В данных системах технологическое оборудование и оснащение, материалы и продукты, являются активными системными компонентами, самостоятельно управляющими своими технологическими и

логистическими процессами. Они находятся в постоянном взаимодействии (обмен информацией) для поддержания непрерывного процесса изготовления продукции заданного количества и качества.

Внедрение концепции «индустрия 4.0» в промышленности позволит обеспечить значительное повышение гибкости, надежности, экологичности и экономичности производственных процессов [1 – 3].

Преимущества от внедрения киберфизических систем должны быть реализованы, прежде всего, в механообрабатывающем производстве. Повышение эффективности производства предполагается и для других переделов – сварочного, сборочного и др.

Проблеме разработки механизмов внедрения киберфизических систем в промышленное производство в рамках концепции «индустрия 4.0» посвящены работы «Центра интеллектуальных систем управления (IMS)» университета г. Цинцинатти (США) [4 – 6].

Отмечается, что современный уровень развития информационных технологий позволяет выполнять аналитические работы с большим объемом информации (т.н. *big data analytics*) [5 – 6], поступающей из производственного подразделения предприятия, в частности, от технологической системы.

Для решения проблемы структуры, иерархии и связей киберфизических систем в промышленности предложена концептуальная 5С-архитектура [4 – 5], состоящая из пяти уровней: 1.) связь (*connection*); 2.) преобразование (*conversion*); 3.) кибер-уровень (*cyber level*); 4.) познание (*cognition*); 5.) регулирование (*configuration*).

На первом уровне происходит сбор информации с чувствительных элементов системы (например, технологического оборудования) – датчиков, сенсоров и др., о ее текущем состоянии.

На втором уровне информация преобразовывается в доступные для восприятия форматы – графики, диаграммы, таблицы и др.

Третий уровень служит архивом для хранения собираемой информации от производственного подразделения. Следует отметить, что на сегодняшний день исследователями отмечается положительная роль так называемых «облачных хранилищ» и «облачных вычислений», позволяющих выполнять операции с большими объемами информации за счет объединения в сеть группы вычислительных машин. Термин «облачный» – это общепринятое наименование объединенных сетью ЭВМ с

целью масштабирования вычислительных и архивных возможностей для работы с большими массивами данных.

На четвертом уровне путем сравнения текущих характеристик системы с имеющимися закономерностями ее функционирования формируются варианты для принятия решений. При этом, на основе получаемой информации, закономерности (например, модели) функционирования системы дополняются и уточняются.

На пятом уровне принимается наиболее рациональное решение.

Функционирование системы, выстроенной на основе 5С-архитектуры, демонстрируется на примере заготовительного участка, состоящего из ленточнопильных станков с ЧПУ. Массив информации формируется датчиками вибро-акустической эмиссии и температуры, установленными на станках, а также данными о скорости пилы, времени резания и др., фиксируемыми системой ЧПУ.

На уровне «преобразования» ЭВМ производит преобразование данных в принятые для анализа форматы (например, нагрузка на пиле в процентном значении от максимально допустимой). Данные передаются на «облачный сервер» по проводной или беспроводной сети. На третьем этапе посредством так называемого «адаптивного метода группирования» [6] текущие характеристики процесса резки заготовок (режимы резания, уровень нагрузки на пиле и др.) группируются в зависимости от отработанного пилой времени.

На четвертом и пятом уровнях информация используется для принятия решений о корректировке режимов резания. Например, для относительно новой пилы возможно использование более высоких режимов резания с обеспечением необходимого качества реза, а для пилы, отработавшей определенный период времени, необходимы щадящие режимы для обеспечения качества реза. Следует отметить, что в описанном примере авторам не удалось исключить необходимость участия оператора в процессе принятия решений – он оценивает качество реза и состояние пильного полотна.

В работе [5] приведен дополнительный аспект положительного эффекта от внедрения киберфизических систем в производство, а именно использование их информативной способности для задач прогнозирования и управления работоспособностью технологического оборудования (*PHM – Prognostics and Health Management*). Предложена система, собирающая информацию с чувствительных

элементов технологического оборудования на всем жизненном цикле – от введения в эксплуатацию до списания.

Необходимо отметить, что представленные в работах [4 – 6] положения являются преимущественно концептуальными и не описывают конкретных алгоритмов функционирования киберфизических систем в машиностроении, в частности в механообрабатывающем производстве.

Проблемам внедрения киберфизических систем и концепции «индустрия 4.0» в промышленное производство посвящен ряд работ исследователей из КНР – [3], [7] и др.

В работе [3] предложена архитектура «цифровой фабрики» (*digital factory, smart factory*), состоящая из четырех уровней – физического уровня, уровня промышленной информационной сети, кибер-уровня и уровня контроля и принятия решений.

Физический уровень включает в себя технологическое, транспортное, контрольное и др. оборудование, заготовки, детали и прочее, которые объединены в промышленную информационную сеть и способны взаимодействовать друг с другом для достижения заданной цели.

На уровне промышленной информационной сети обеспечивается не только взаимодействие между объектами физического уровня, но и связь физического с кибер-уровнем.

Кибер-уровень («уровень облачных вычислений») обеспечивает обработку и хранение данных, полученных с физического уровня, для передачи на уровень контроля и принятия решений.

Уровень контроля и принятия решений связывает человека с «цифровой фабрикой». Заинтересованное лицо способно осуществлять мониторинг и диагностику процессов и принимать решения. Следует отметить необходимость учета еще одного аспекта, не приведенного в работе [3], а именно внесение в систему алгоритмов функционирования без участия человека.

Авторы [1], [3] приводят пример прототипа «цифровой фабрики», реализующей концепцию «индустрия 4.0». В «Немецком центре исследования искусственного интеллекта» (*DFKI*, г. Кайзерслаутерн, Германия) создана экспериментальная линия для химического концерна «*BASF*» (Германия) по производству полностью индивидуальных (под заказ) шампуней и жидких мыл. После размещения производственного заказа, пустая тара, снабженная радиочастотным идентификатором (*RFID*-

чипом), сообщает оборудованию производственной линии информацию о том, какой тип мыла, аромат и цвет необходим заказчику. Перемещаясь по конвейеру, она останавливается и заполняется на тех позициях, которые удовлетворяют заданию. Решение принимается путем считывания оборудованием линии информации с *RFID*-чипа, расположенного на таре. Участие человека заключается лишь во внесении производственных заказов в систему.

В работе [3] отмечается, что на базе факультета механики и автоматизации «Южно-Китайского технологического университета» (*SCUT*, г. Гуанчжоу, КНР) создается свой прототип производственной линии, базирующейся на киберфизических системах. Ее основные принципы следующие: заготовки оснащены *RFID*-чипами; использование промышленных роботов; использование конвейерной системы, обладающей возможностью считывания и записи информации на *RFID*-чипы; использование промышленной беспроводной информационной сети и «облачных хранилищ и вычислений»; центральный монитор и местные терминалы для контроля и управления.

Авторами [3] обозначен ряд проблем, требующих решения для внедрения концепции «индустрия 4.0» в промышленность. Среди них: разработка структуры и алгоритма взаимодействия элементов киберфизической системы для обеспечения взаимодействия и принятия решений с минимальным вмешательством человека; определение минимального и достаточного объема параметров, характеризующих технологический процесс производства изделия, для мониторинга и управления; создание и изучение функционирования самоуправляемых систем путем их моделирования; создание гибких модульных технических систем, способных взаимодействовать друг с другом.

Необходимо отметить, что решение указанных проблем связано с технологией и автоматизацией машиностроительного производства и составляет содержание актуального направления научных исследований.

Разработки по внедрению концепции «индустрия 4.0» в машиностроительное производство выполняются и лидирующими мировыми производителями металлообрабатывающего оборудования, осознающими потенциальные возможности роста эффективности механообрабатывающего производства. Так станкостроительной компанией «*DMG Mori*» (Германия – Япония) разработана исполни-

тельная производственная система «*Celos*», которая позиционируется в рамках концепции «индустрия 4.0» [8].

Основной функционал системы соответствует исполнительным системам производства – MES-системам, т.е. заключается в оперативном планировании и диспетчеризации. Работы по реализации киберфизических систем в механообрабатывающем производстве выполняются производителем обрабатывающих центров (ОЦ) – компанией «*Heller*» (Германия). В сфере интересов находится проблема необходимости получения производственной системой индивидуальной информации о каждой заготовке и работы с массивом информации о заготовках и инструментах с обратной связью с системой планирования и производственным участком.

Одна из разработок посвящена проблеме оптимизации заполнения инструментального магазина ОЦ с целью сокращения доли вспомогательного времени при выполнении операций. На основе анализа состава партии заготовок, планируемых к обработке, формируется оптимальный состав и порядок расположения инструментов в магазине ОЦ [9]. Проработки по использованию принципов концепции «индустрия 4.0» выполняются фирмой «*Salvaghnini*» (Италия) при создании гибких производственных систем (ГПС) для холоднолистовой штамповки и гибки.

Работы по созданию средств автоматизации, чувствительных датчиков, сенсоров выполняются фирмами «*Festo*», «*Balluff*» (Германия) и др. В области программного обеспечения существенный объем работ по внедрению концепции «индустрия 4.0» выполняется фирмой «*Siemens*» (Германия) [10], [11] и др.

Приведенные работы носят преимущественно концептуальный или фрагментарный характер, поскольку в них отсутствует детальная проработка вопросов выделения и содержательного анализа информационной составляющей из сигналов, получаемых с измерительных элементов (датчиков, сенсоров и т.д.). Поэтому формирование состава, структуры, алгоритмов функционирования информационно-исполнительных киберфизических систем в механообрабатывающем производстве является актуальной научной проблемой.

Для участков механической обработки необходимо обеспечить достаточный и оперативный поток информации, характеризующей технологический процесс изготовления детали. В такую информационно-исполнительную киберфизическую систему на производствен-

ном участке должны быть вовлечены металлорежущие станки и ОЦ с установленными на них контактными и бесконтактными устройствами контроля и привязки к детали и контролю износа инструмента; координатно-измерительная машина (КИМ); прибор для настройки инструмента вне станка (пресеттер); приборы для входного контроля заготовок (стационарные и портативные анализаторы химического состава и твердомеры); автоматизированные склады инструмента, столов-спутников (паллет) и технологической оснастки. Для участков с автоматизацией на уровне гибких производственных систем в информационно-исполнительную структуру должно быть вовлечено и транспортно-загрузочное оборудование (робокары и промышленные роботы).

Каждый элемент данной информационно-исполнительной системы должен сообщать информацию о ходе технологического процесса для принятия системой управления решений по запрограммированному алгоритму.

Металлорежущие станки с ЧПУ и ОЦ способны выдавать оперативную информацию об отработке управляющей программы, текущих режимах резания и количестве обработанных деталей. Так называемые мониторы состояния режущего инструмента, используемые в производственной практике, способны свидетельствовать о его состоянии по уровню мощности на главном приводе станка, сигналам виброакустической эмиссии, а также путем лазерного контроля состояния режущих кромок.

Современные станки снабжаются акселерометрами, позволяющими по информации о частоте и амплитуде вибрационных колебаний судить об износе узлов и деталей оборудования. Термодатчики, установленные, например, на шпиндельном узле, позволяют выполнять компенсацию температурных деформаций узлов станка. КИМ способны направлять информацию о геометрических размерах обработанных деталей, в т.ч. для корректировки настройки станка. Пресеттеры формируют данные о геометрических параметрах (диаметр, длина) инструментальных сборок. Приборы для входного контроля заготовок способны сообщать информацию для назначения и корректировки стартовых режимов резания. Столы-спутники и инструментальные сборки способны индивидуально идентифицироваться, например, по RFID-меткам [12, 13].

Таким образом, внедрение концепции «индустрия 4.0» за счет создания информационно-исполнительных киберфизических систем

является средством повышения эффективности машиностроительного производства, в частности механообработки. Известные на сегодняшний день научные и практические работы носят преимущественно концептуальный или фрагментарный характер. Поэтому формирование состава, структуры, алгоритмов функционирования информационно-исполнительных киберфизических систем в механообрабатывающем производстве является актуальным направлением научных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Wahlster, W.** Industry 4.0: The Semantic Product Memory as a Basis for Cyber-Physical Production Systems / Talk or presentation, 27, May, 2013; Zurich. – режим доступа : https://www.ida.lui.se/ida30/program/Wolfgang_Wahlster-IDA30-20130924-Industrie_4_0_Active_Semantic_Memories_for_Smart_Factories.pdf.
2. **Bartevyan, L.** Industry 4.0 – Summary report / L. Bartevyan // DLG-Expert report. – 2015. – Vol. 5. – P. 1-8.
3. **Wang, S.** Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. / S. Wang, etc // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2016. – Vol. 2016. P. 23-33.
4. **Lee, J.** Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance and service innovation / J. Lee, etc // The Fourth International Conference on Through-life Engineering Services. Procedia CIRP 38, 2015, P. 3-7.
5. **Lee, J.** A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems / J. Lee, B. Bagheri, H. A. Kao // Manufacturing Letters. – 2015. – Vol. 3. – P. 18-23.
6. **Yang, S.** A Unified Framework and Platform for Designing of Cloud-based Machine Health Monitoring and Manufacturing Systems / S. Yang, etc // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2015. – Vol. 137. P. 040914-1 – 040914-6.
7. **Wan, J.** From Machine-to-Machine Communications towards Cyber-Physical Systems / J. Wan, etc // ComSIS. – 2013. – Vol. 10/3. P. 1105-1128.
8. Celos и программные решения DMG Mori // DMG Mori Journal. – 2016. – № 1. – С. 14-19.
9. **Kurringer, M.** Industry 4.0 / M. Kurringer // Heller Company Press News. – 2016. – режим доступа : <https://www.heller.biz/en/company/press/news/article/industry-40>.
10. **Хубер, А.С.** Концепция «Индустрия 4.0». Цифровая фабрика / А. С. Хубер // PLM эксперт. Инновации в промышленности. – 2016. – № 7. – С. 36-43.
11. **Heuchemer, B.** Production of the future / B. Heuchemer // Motion world. – 2013. – Vol. 7. – P. 4-6.
12. **Ингеманссон, А.Р.** Повышение эффективности машиностроительного производства за счет киберфизических систем и концепции «индустрия 4.0» // Научно-технические

технологии на современном этапе развития машиностроения: материалы VIII МНТК 19-21 мая 2016г., Москва – М.: Техполиграфцентр, 2016. – С. 74–77.

13. **Ингеманссон, А.Р.** Актуальность внедрения концепции «индустрия 4.0» в современное машиностроительное производство // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 7 (61). – С. 45–48.

REFERENCES

1. Wahlster, W. Industry 4.0: The Semantic Product Memory as a Basis for Cyber-Physical Production Systems / Talk or presentation, 27, May, 2013; Zurich. – режим доступа : https://www.ida.lui.se/ida30/program/Wolfgang_Wahlster-IDA30-20130924-Industrie_4_0_Active_Semantic_Memories_for_Smart_Factories.pdf.
2. Bartevyan, L. Industry 4.0 – Summary report / L. Bartevyan // DLG-Expert report. – 2015. – Vol. 5. – P. 1-8.
3. Wang, S. Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. / S. Wang, etc // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2016. – Vol. 2016. P. 23-33.
4. Lee, J. Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance and service innovation / J. Lee, etc // The Fourth International Conference on Through-life Engineering Services. Procedia CIRP 38, 2015, P. 3-7.
5. Lee, J. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems / J. Lee, B. Bagheri, H. A. Kao // Manufacturing Letters. – 2015. – Vol. 3. – P. 18-23.
6. Yang, S. A Unified Framework and Platform for Designing of Cloud-based Machine Health Monitoring and Manufacturing Systems / S. Yang, etc // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2015. – Vol. 137. P. 040914-1 – 040914-6.
7. Wan, J. From Machine-to-Machine Communications towards Cyber-Physical Systems / J. Wan, etc // ComSIS. – 2013. – Vol. 10/3. P. 1105-1128.
8. Celos и программные решения DMG Mori // DMG Mori Journal. – 2016. – № 1. – С. 14-19.
9. Kurringer, M. Industry 4.0 / M. Kurringer // Heller Company Press News. – 2016. – режим доступа : <https://www.heller.biz/en/company/press/news/article/industry-40>.
10. Хубер, А.С. Концепция «Индустрия 4.0». Цифровая фабрика / А. С. Хубер // PLM эксперт. Инновации в промышленности. – 2016. – № 7. – С. 36-43.
11. Heuchemer, B. Production of the future / B. Heuchemer // Motion world. – 2013. – Vol. 7. – P. 4-6.
12. Ingemansson, A.R. Mechanical engineering efficiency increase due to cyber-physical systems and concept of “Industry 4.0” // *High Technologies at Modern Stage of Mechanical Engineering Development: Proceedings of the VIII-th Inter. Sc.-Tech. Conf. May 21, 2016, Moscow* – М.: Techpolygraphcenter, 2016. – pp. 74–77.
13. Ingemansson, A.R. Urgency in “Industry 4.0” concept introduction in modern mechanical engineering // *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – № 7 (61). – pp. 45–48.

Рецензент д.т.н П.Ю. Бочкарев