



УДК 621.0

DOI: 10.12737/article_59f074a7a5e088.16975906

А.Р. Ингеманссон, к.т.н.

(АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», пр. Ленина, б/н., Волгоград, 400071)

E-mail: aleing@yandex.ru

Разработка состава и механизмов функционирования информационно-исполнительных киберфизических систем в механообрабатывающем производстве

Установлено, что повышение эффективности машиностроительного производства за счет внедрения наукоемких информационно-исполнительных киберфизических систем должно быть реализовано, прежде всего, в механообрабатывающем производстве. Рассмотрены вопросы состава и механизма функционирования киберфизических систем и направления повышения эффективности технологических процессов механической обработки.

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

A.R. Ingemansson, Can. Eng.

(J-S Co. "FSPC "Titanium-Barricades" Lenin Avenue, Volgograd, 400071)

Development of structure and functioning mechanisms of information-executive cyberphysical systems in machining production

It is defined that mechanical engineering efficiency increase at the expense of the introduction of science intensive information-executive cyberphysical systems should be realized in mechanical engineering first. The problems of the structure and mechanism of cyberphysical systems and directions for the efficiency increase of machining engineering procedures are considered.

Keywords: mechanical engineering; industry 4.0; cyberphysical systems; machining.

Концепция «индустрия 4.0» («*industrie 4.0*») была сформулирована в 2011 г. в Германии [2], определяется как средство повышения эффективности обрабатывающей промышленности через интеграцию киберфизических систем («*cyber physical systems*», «*CPS*») в заводские процессы. Данные являются комбинацией технологического оборудования и оснащения, материалов и продуктов, которые оснащены чувствительными элементами (датчиками, сенсорами) и средствами идентификации, способными формировать массив данных о свойствах и состоянии, т.е. формировать так называемую семантическую память каждого элемента системы.

Компоненты системы посредством каналов связи способны самостоятельно обмениваться данными и принимать решения по запрограм-

мированному алгоритму, в т.ч. без участия человека, для поддержания непрерывного процесса изготовления продукции заданного количества и качества. Внедрение концепции «индустрия 4.0» в промышленность позволит обеспечить значительное повышение гибкости, надежности, экологичности и экономичности производственных процессов [1 – 4].

Разработка наукоемких решений по внедрению принципов концепции является современным направлением повышения эффективности машиностроительного производства. Преимущества от внедрения киберфизических систем должны быть реализованы, прежде всего, в механообрабатывающем производстве. На сегодняшний день на рынке технологического оборудования и оснащения доступны серийно выпускаемые обрабатывающие цен-

тры (ОЦ), оснащенные современными системами ЧПУ и различными датчиками мониторинга состояния оборудования; приборы для записи информации на мобильные средства идентификации заготовок, инструмента и оснастки; приборы для настройки инструментов вне станка (пресеттеры) и др [5].

Разработка наукоемких решений по внедрению киберфизических систем в механообрабатывающее производство является сложной, комплексной задачей. В процессе ее решения необходимо определить состав, механизм функционирования информационно-исполнительных киберфизических систем и направления повышения эффективности технологических процессов.

В состав информационно-исполнительной киберфизической системы для механообрабатывающего производства должно входить технологическое, контрольное, транспортное, складское оборудование.

Технологическое оборудование должно быть представлено металлорежущими станками с ЧПУ и обрабатывающими центрами (ОЦ) с установленными на них контактными и бесконтактными устройствами контроля и привязки к детали и контроля износа инструмента.

Контрольное оборудование должно быть представлено координатно-измерительными машинами (КИМ) и приборами для входного контроля заготовок (стационарными и портативными анализаторами химического состава и твердомерами). Следует выделить использование приборов для настройки инструмента вне станка (пресеттеров).

Складское оборудование должно быть представлено автоматизированными складами инструмента, столов-спутников (паллет) и технологической оснастки.

Касательно транспортного оборудования – для участков с автоматизацией на уровне гибких производственных систем (ГПС) в информационно-исполнительную структуру должно быть вовлечено и транспортно-загрузочное оборудование (робокары и промышленные роботы).

Рассмотрим информативную способность элементов информационно-исполнительной киберфизической системы.

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 про-

изводственной 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 и инструментальных сборок. Кроме этого, в некоторых ГПС (например, фирмы «Fastems» (Финляндия) [6]) КИМ используется для определения габаритов заготовки, установленной на столе-спутнике, до запуска ее в обработку для исключения выполнения привязки к заготовке на станке. 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.

Автоматизированные склады инструмента, столов-спутников и технологической оснастки участвуют в обмене информацией о наличии необходимых заготовок, количестве обработанных деталей, об объемах израсходованного инструмента и др. Столы-спутники и инструментальные сборки способны индивидуально идентифицироваться, например, по *RFID*-меткам.

Рассмотрим механизм функционирования информационно-исполнительной киберфизической системы для механообрабатывающего производства.

На этапе получения производственным подразделением заготовок система должна функционировать в зависимости от вида заготовки и ее поставщика. Необходимо разделить заготовки под последующую механическую обработку на две группы.

Первая группа – заготовки в виде штамповок, поковок и отливок. Как правило, для таких заготовок нормативной документацией (НД) ограничиваются механические свойства в определенных пределах.

Вторая группа – заготовки, получаемые с участков резки сортового металлопроката, с участков термического (плазменного, газового и лазерного) и гидроабразивного раскроя,

а также после операций холодно-листовой штамповки. Для данного типа заготовок распространены случаи как наличия повышенных требований к механическим свойствам согласно НД, так и наличие обобщенных требований к состоянию поставки.

При наличии на предприятии собственного литейного или кузнечно-прессового производства заготовки в виде поковок и отливок контролируются ОТК цеха-изготовителя на предмет соответствия НД механических свойств (в частности твердости), химического состава, геометрических размеров. В информационно-исполнительной киберфизической системе необходимая для последующего технологического передела информация (номер чертежа детали, фактическая твердость) записывается на *RFID*-метку, которую можно расположить, например, на необрабатываемой поверхности заготовки. Следует отметить, что важным свойством *RFID*-меток является возможность расположения их на детали на определенном промежутке технологического процесса и удаления в нужный момент.

В случае поступления заготовок в виде поковок и отливок со стороннего предприятия принято проводить входной контроль на предприятии-получателе заготовок. В этом случае сотрудник ОТК также устанавливает *RFID*-метку на заготовку и заносит на нее необходимую информацию (номер чертежа детали, фактическую твердость).

Необходимо отметить, что на *RFID*-метку можно записать и другую информацию, содержащуюся в сертификате качества (паспорте) поставщика, например, номер плавки и садки термообработки. Информация позволяет отслеживать параметры объекта (детали) на протяжении всех этапов его создания и, при необходимости, при эксплуатации, что является элементом *PLM*-системы. Данная информация позволяет, например, вести рекламационную работу с поставщиком заготовки и полностью избавиться от сертификатов качества (паспортов) в традиционной бумажной форме.

Для заготовок второй группы объем контроля механических свойств, как правило, ограничен. Кроме этого, не редко проверка выполняется не для каждой конкретной заготовки, а на выборке для всей партии. В данном случае целесообразно оснащение *RFID*-меткой не каждой заготовки, а тары, в которой транспортируется партия заготовок. В случае указания в НД высоких требований к заготовке по механическим свойствам целесообразно

оснащение *RFID*-меткой каждой заготовки.

На следующем этапе заготовки перемещаются на склад механического цеха или непосредственно на рабочее место для выполнения механической обработки. На складе с *RFID*-метки считывается информация о номере чертежа детали и формируется информация о количестве поступивших заготовок. Следует отметить, что на данном этапе возможно формирование связи с *ERP*-системой предприятия (*Enterprise Resource Planning*), чтобы обеспечивать необходимый приток материалов для бесперебойного производства при сохранении минимально необходимых запасов.

На следующем этапе в соответствии с планом-графиком производства выдается задание на изготовление партии деталей.

Предварительно информация адресуется на участок настройки инструментов вне станка. На основе данных из технологического процесса (ТП) подготавливаются инструментальные наладки (сборки) для выполнения операций механической обработки. ТП хранятся в центральной базе и вызываются на персональный компьютер (ПК) на рабочем месте слесаря по инструменту.

Измерение длин и диаметров инструментальныхборок осуществляется с использованием пресеттера. Информация записывается на *RFID*-метку, которая крепится на инструментальную оправку. Комплект инструментальныхборок направляется к ОЦ для установки в инструментальный магазин. Сканер *RFID*-меток, используемый на ОЦ, считывает параметры инструментальныхборок (длина, диаметр) и направляет их в стойку ЧПУ станка, тем самым сокращается время на наладку ОЦ.

В зависимости от описанных выше особенностей используемых заготовок на рабочем месте оператора ОЦ могут поступать заготовки с установленными на них *RFID*-метками или одноименные заготовки в таре с установленной на ней *RFID*-меткой. При наличии участка подготовки столов-спутников (паллет) *RFID*-метка устанавливается непосредственно на паллету и несет информацию о закреплённой на ней заготовке.

При поступлении комплекта заготовок на рабочее место наладчик или оператор ОЦ путем считывания сканером номера чертежа детали с *RFID*-метки получает текст управляющей программы в стойку ЧПУ станка. *RFID*-метка может быть установлена на таре с одноименными заготовками, на самой заготовке (на необрабатываемой поверхности или, при

отсутствии таких, удалена перед обработкой) или на столе-спутнике (паллете) с установленной заготовкой.

Управляющие программы хранятся в центральной базе и вызываются на рабочее место путем считывания номера чертежа с *RFID*-метки, установленной на заготовке. Управляющие программы должны быть подготовлены так, чтобы по информации о фактической твердости заготовки, считанной с *RFID*-метки, автоматически пересчитывались стартовые режимы резания. Данный аспект позволяет обеспечивать заданную работоспособность инструмента при колебании фактической твердости обрабатываемых заготовок в партии поставки.

Привязка к заготовке, подлежащей механической обработке может выполняться несколькими способами. В первом случае на участке подготовки столов-спутников используется КИМ. Выполняются обмеры геометрических параметров, определяющих процесс обработки, для заготовки, установленной на паллете. Информация записывается на *RFID*-метку и, впоследствии, считывается на рабочем месте ОЦ для выполнения операции механической обработки. При втором способе используются устройства привязки детали на станке, например контактные щупы «*Renishaw*» (Англия), «*Blum*» (Германия), «*Hexagon*» (Швеция).

В процессе операции механической обработки, 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.

Оценка состояния режущего инструмента по уровню мощности на главном приводе применяется для режимов и условий предварительной обработки. Для реализации этой функции известны программные продукты «*Omatic*» (Израиль) [9] и др. Лазерный контроль позволяет обнаруживать такие повреждения режущих кромок, как сколы. Для лазерного контроля используются устройства фирм «*Renishaw*» (Англия), «*Blum*» (Германия), «*Hexagon*» (Швеция), устанавливаемые в рабочей зоне ОЦ. Преимуществом мониторинга состояния инструмента по сигналу виброакустической эмиссии является возможность оценки износа на полусточных и чистовых режимах резания [10, 11, 12].

Информация о времени, отработанном ка-

ждым инструментом из магазина ОЦ, может направляться системой для хранения и анализа работоспособности различных марок режущего инструмента, потребности предприятия в инструменте и др.

Современные станки снабжаются акселерометрами, позволяющими по информации о частоте и амплитуде вибрационных колебаний судить об износе узлов и деталей оборудования [10;12]. Термодатчики, установленные, например, на шпиндельном узле, позволяют выполнять компенсацию температурных деформаций узлов станка [7]. В случае возникновения тенденции к отклонению в худшую сторону предварительно заданных параметров, свидетельствующих о состоянии узлов оборудования, система должна направлять уведомление службе главного механика предприятия для принятия соответствующих мер. Следует дополнительно отметить, что в случае возникновения необходимости незапланированной остановки оборудования для осуществления ремонта информация может быть направлена информационно-исполнительной киберфизической системой в *MES*- или *APS*-систему предприятия для оперативной корректировки производственных расписаний.

На следующем этапе осуществляется контроль обработанной детали. Следует выделить два направления контроля деталей с использованием измерительных устройств, оснащенных программным обеспечением.

Первое направление – это контроль детали непосредственно на станке в закрепленном состоянии. Способ применяется в случаях, когда деталь имеет поверхности сложной пространственной формы, которые закоординированы от базовых точек элементов технологической оснастки. К таким деталям относятся, например, сложные пресс-формы, изготавливаемые на пятиосевых ОЦ. Контроль осуществляется чувствительными щупами, устанавливаемыми через оправку в шпиндель станка. Среди серийно выпускаемого программно-аппаратного обеспечения известны продукты фирмы «*Hexagon*» (Швеция) [8]. Кроме этого, фирмой «*Hexagon*» выпускается система *RWP 20.50-TP* измерения температуры заготовки на станке при помощи датчика, также устанавливаемого в шпиндель через оправку.

Второе направление – это контроль деталей с использованием КИМ. Контроль выполняет рабочим органом КИМ, имеющим высокую степень подвижности. Контроль осуществляется по управляющей программе, используя

шей модель детали согласно КД, а результаты контроля обрабатываются и архивируются ПК.

Оба направления контроля деталей позволяют передавать информацию на основе, которой должна производиться корректировка настройки станка или инструментальных наладок. Кроме этого, на основе этих данных службой ОТК предприятия должен производиться анализ динамики дефектов при изготовлении продукции. Анализ данных с измерительных устройств, также позволяет оперативно выявлять и устранять неисправности металлорежущего оборудования.

Использование информационно-исполнительных киберфизических систем обеспечивает повышение эффективности технологических процессов механической обработки по следующим направлениям:

- уменьшение подготовительно-заключительного времени технологической операции за счет использования информации с *RFID*-меток о параметрах инструментальных сборок;

- повышение эффективности и надежности процесса резания за счет использования информации с *RFID*-меток о фактической твердости заготовок;

- повышение качества обработки за счет корректировки параметров технологического процесса на основе информации с измерительных устройств, оснащенных программным обеспечением;

- повышение эффективности использования режущего инструмента за счет информации о мониторинге состояния процесса обработки и повышение эффективности инструментального обеспечения производства за счет анализа объективной информации о работоспособности используемых режущих инструментов;

- повышение эффективности эксплуатации и обслуживания технологического оборудования за счет анализа объективной информации о его состоянии;

- повышение эффективности политики предприятия в области качества за счет анализа объективной информации, поступающей на этапах запуска в производство, изготовления и контроля готовой продукции.

Кроме этого, использование информационно-исполнительных киберфизических систем обеспечивает возможность повышения эффективности деятельности машиностроительного предприятия за счет связи с системой планирования ресурсов предприятия (*ERP*-

системой), системами диспетчеризации и планирования производственных графиков (*MES*-или *APS*-системами) и системой сопровождения жизненного цикла изделия (*PLM*-системой).

Выводы

Повышение эффективности машиностроительного производства за счет внедрения наукоемких информационно-исполнительных киберфизических систем должно быть реализовано, прежде всего, в механообрабатывающем производстве.

В состав данной системы для механообрабатывающего производства должно входить технологическое, контрольное, транспортное, складское оборудование.

Разработан и предложен механизм функционирования системы и определены направления повышения эффективности технологических процессов механической обработки за счет ее внедрения.

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. **Ингеманссон, А.Р.** Актуальность внедрения концепции «индустрия 4.0». в современное машиностроительное производство // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 7(61). – С. 45-48.
5. **Ингеманссон, А.Р.** Современная научная проблема повышения эффективности механообрабатывающего производства путем внедрения киберфизических систем в рамках концепции «индустрия 4.0» // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 12(66). – С. 40-44.
6. **Fastems.** Автоматизация механических производств: технический каталог. – 2016. – № 3. – 32 с.
7. **Hwacheon.** Токарное и фрезерное оборудование: технический каталог. – 2015. – 293 с.
8. **Hexagon.** Измерение на станках: технический каталог. – 2016. – 36 с.
9. **Системы** адаптивного управления Omatic ACM для металлообрабатывающих станков с ЧПУ: техническая спецификация. – 2016. – 29 с.

10. Григорьев, С.Н. Диагностика автоматизированного производства / С. Н. Григорьев [и др.]; под ред. С. Н. Григорьева. – М.: Машиностроение, 2011. – 600 с.

11. Козочкин, М.П., Сабиров, Ф.С., Попиков, А.Н. Виброакустическая диагностика при твердом точении // Вестник МГТУ «Станкин». – 2009. – № 1. – С. 23–29.

12. Залого, В.А., Зинченко, Р.Н., Шаповал, Ю.В. Современное состояние вопроса о диагностике состояния режущего инструмента при фрезеровании // Резание и инструмент в технологических системах. – 2013. – Вып. 83. – С. 118–126.

13. Козочкин, М.П., Сабиров, Ф.С. Задачи технической диагностики при создании и эксплуатации технологического оборудования // Вестник УГАТУ. – 2012. – № 4. – С. 98–104.

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. – access mode: [https://www.ida.lui.se/ida30/program/Wolfgang_Wahlster-IDA30-20130924-](https://www.ida.lui.se/ida30/program/Wolfgang_Wahlster-IDA30-20130924-Indus-trie_4_0_Active_Semantic_Memories_for_Smart_Factories.pdf)

Indus-trie_4_0_Active_Semantic_Memories_for_Smart_Factories.pdf.

2. Barteveyan, L. Industry 4.0 – Summary report / L. Barteveyan // 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. Ingemansson, A.R. Topicality of “Industry 4.0” concept introduction in modern mechanical engineering // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No. 7(61). – pp. 45-48.

5. Ingemansson, A.R. Current scientific problem of efficiency increase in machining production through cyberphysical system introduction within the limits of “Industry 4.0” concept // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. No.12 (66). – pp. 40-44.

6. Fastems. *Machining Production Automation*: Technical Catalogue. – 2016. – No.3. – pp. 32.

7. Hwacheon. *Turning and Milling Equipment*: Technical Catalogue. – 2015. – pp. 293.

8. Hexagon. *Measuring on Machines*: Technical Catalogue. – 2016. – pp. 36.

9. *Systems of Adaptive Control Omativе ACM for NC Mechanical Equipment*: Technical Specification. – 2016. – pp. 29.

10. Grigoriev, S.N. *Automated Production Diagnostics* / S.N. Grigoriev [et al.]; under the editorship of S.N. Grigoriev. – М.: Mechanical Engineering, 2011. – pp. 600.

11. Kozochkin, M.P., Sabirov, F.S., Popikov, A.N. Vibroacoustic diagnostics at hard turning // *Bulletin of MSTU “STANKIN”*. – 2009. – No.1. – pp. 23-29.

12. Zaloga, V.A., Zinchenko, R.N., Shapoval, Yu.V. Problem current state in cutter state diagnostics at milling // *Cutting and Tool in Technological Systems*. – 2013. Edition 83. – pp. 118-126.

13. Kozochkin, M.P., Sabirov, F.S. Technical diagnostics problems at engineering equipment creation and operation // *Bulletin of USATU*. – 2012. – No.4. – pp. 98-104.

Рецензент д.т.н. В.В. Васильцов

