

Научная статья
УДК 621.91.01; 621.9.011
doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48

Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание

**Юлий Львович Чигиринский¹, д.т.н.,
Дмитрий Вадимович Крайнев², к.т.н.,
Евгений Михайлович Фролов³, к.т.н.**

^{1, 2, 3} *Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия*

¹ julio-tchigirinsky@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5620-5337>

² krainevdv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8762-4251>

³ eltar1983@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8753-5910>

Аннотация. Рассматриваются аспекты цифровизации на этапе технологической подготовки производства (ТПП). Обосновывается необходимость частичного переноса задач ТПП непосредственно на стадию обработки. Рассматриваются вопросы программно-аппаратной реализации интеллектуальных технологических систем, ориентированных на обеспечение требуемых параметров качества, вопросы организационной и программной реализации прослеживания, с использованием «цифровых двойников», качества продукции машиностроения в процессе производства и для мониторинга результатов производства на стадии эксплуатации готовых изделий. Приведена принципиальная схема интеллектуальной технологической системы на базе УЧПУ Okuma OSP-P300L.

Ключевые слова: цифровизация производства, технологическая подготовка производства, цифровые двойники, адаптивная система, интеллектуальные технологические системы, УЧПУ, надёжность процесса резания, термо-ЭДС

Для цитирования: Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Фролов Е.М. Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №8 (134). – С. 39-48. doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48

Original article

Digitalization of machine-building production: process design, production, tracking

**Julius L. Tchigirinsky¹, Dr. Sc. Tech.,
Dmitriy V. Kraynev², Can. Sc. Tech.,
Evgeniy M. Frolov³, Can. Sc. Tech.**

^{1, 2, 3} *Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia*

¹ va_demin@bk.ru

² mpt-tula@rambler.ru

Abstract. The article deals with the aspects of digitalization at the stage of process-layout preparation (PLP). The necessity of partial carry of PLP tasks directly to the processing stage is proved. The issues of software and hardware implementation of intellectual technological systems focused on ensuring the required quality parameters, arrangement and software implementation of tracking, using «digital twins», mechanical production quality in the manufacture process and output monitoring within the use of finished products, are viewed. A schematic diagram of an intelligent manufacturing system based on NC control block Okuma OSP-P300L is presented.

Keywords: production digitalization, process-layout preparation (PLP), digital twins, adaptive system, intelligent manufacturing systems, NC control block, reliability of the cutting process, thermal electromotive force (thermo-emf)

For citation: Tchigirinsky J.L., Kraynev D.V., Frolov E.M. Digitalization of machine-building production: process design, production, tracking. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.8 (133), pp. 39-48. doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48

Введение

В данной работе мы продолжаем обсуждение вопросов, связанных с практической реализацией основных положений концепции Industry 4.0 [1]. Отметим, что в последнее время представление о неограниченных возможностях информационных технологий при построении цифровых «фабрик будущего» становится более реалистичным – постепенно формируется понимание [2] того, что «перевод «в цифру» ключевых процессов по управлению, включая разработку производственных планов, формирование графиков поставок, контроль работы и состояния оборудования...» [3] не решает всех задач машиностроительного производства.

Очевидно, что абсолютно материальная продукция машиностроительного производства не может быть получена только с помощью IT-специалистов и «цифры», – требуются не менее материальные заготовки, оборудование, инструменты, оснастка. И, обязательно, специалисты – инженеры-механики, – умеющие грамотно использовать эти материальные, энергетические и иные, в том числе и информационные, ресурсы для получения требуемых результатов производства. Здесь же нужно добавить, что эффективное использование информационных технологий («цифры») возможно при условии высокого уровня формализации решаемых задач и однозначности числовой информации о материалах и процессах, используемых в производстве.

Отметим, что традиционная структура деятельности, составляющей понятие «технологическая подготовка производства» [4] сформулирована в нормативных документах достаточно укрупненно. Кроме того, основа нормативных материалов, относящихся к технологической подготовке машиностроительного производства, разработана достаточно давно – большинство действующих стандартов датированы периодом 1987...1995 г.г., – и не учитывает современных достижений в области информационных технологий. Соответственно, и понимание, и реализация задач технологического проектирования в различных информационных системах, обеспечивающих ТПП, также существенно различается.

Программные средства технологической подготовки производства

Определим классы программных систем (табл. 1), используемых для автоматизации инженерной деятельности на различных этапах подготовки производства.

В результате анализа понятий, приведенных в табл. 1, сделаем следующее заключение: наиболее близким по содержанию к общепринятому понятию «автоматизация технологической подготовки производства» является программное обеспечение класса САРР-систем, обеспечивающее возможность маршрутно-операционного проектирования и, в интеграции с САМ-системами, подготовку управляющих программ для оборудования с ЧПУ. Для интеграции программных средств рационально использовать PDM-системы.

Ранее [6], сравнивая функциональные возможности наиболее распространенных САРР-систем, мы сформулировали вывод о необходимости использования в производстве адаптивных самообучающихся технологических систем [7, 8], тем более что современное металлообрабатывающее оборудование штатно оснащается сенсорными устройствами, позволяющими «в реальном времени» регистрировать состояние элементов технологической системы. Рациональная комбинация производства и его виртуального представления (рис. 1) позволяет приблизиться [9] к понятиям «цифрового производства» [1], в частности, к понятию «цифрового двойника», как средства оперативного управления технологическими системами и, в конечном итоге, эксплуатационными свойствами изготавливаемой продукции.

Отметим, что использование идеологии «цифрового двойника» предполагает частичное изменение структуры технологической подготовки производства.

Частичный перенос некоторых задач ТПП непосредственно в производство

Основной задачей технологической подготовки производства с точки зрения машиностроительного предприятия является обеспечение требуемых параметров качества выпускаемых деталей с высокой надежностью и производительностью, при соблюдении принципов ресурсосбережения и экономичности, в том числе и за счет загрузки технологического оборудования.

Решение данной задачи требует мероприятий на различных уровнях, включая организационное и методическое обеспечение. Частично она может быть решена при помощи автоматизации и внедрения программных продуктов [10], поддерживающих проектирование маршрутных технологий.

В качестве примера отечественных САРР-систем, обеспечивающих типовое проектирование, имеющих «открытую» структуру ПО и допускающих расширение функциональных возможностей в части реализации алгоритми-

ческих методов индивидуального маршрутного проектирования, использования современных методик проектирования комплекта баз и др., можно назвать системы от компаний «АДЕМ» [<https://adem.ru/products>], «АСКОН – Системы проектирования» [<https://ascon.ru/products>] или «СПРУТ-Технология» [<https://sprut.ru/sprut-technology>]. Результатом внедрения подобных систем может стать сокращение времени проектирования до 5 раз [11].

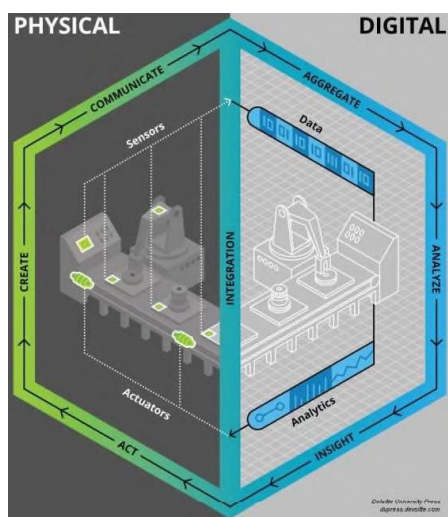
Немаловажным этапом технологической подготовки является назначение режимов, эффективность которого может быть повышена за счет автоматизации расчета режимов резания. При проектировании технологических операций назначение режимов резания базируется на выборе технологического оборудования (его возможностей, жесткости и т.д.), выборе режущего инструмента и реко-

мендациях производителя.

Производители режущего инструмента предлагают решения, ориентируясь на группы обрабатываемости сталей или же подгруппы (что уже предполагает некоторое варьирование свойств обрабатываемого материала без учета фактических отклонений химического состава, физико-механических свойств материала даже с учетом требований стандартов). Рекомендации относительно режимов резания сводятся к определенному диапазону варьирования глубины, подачи и скорости резания, т.е. определяют области допустимых значений. И в данном контексте параметрическая оптимизация позволяет, исходя из установленных требований, технологических возможностей и целевой функции, выбрать условия достижимой эффективности.

1. Программные средства автоматизации инженерного проектирования

Класс ПО	Название	Назначение, функционал	Источник
CAD	<i>Computer Aided Design</i>	создание чертежей, конструкторской и/или технологической документации и/или 3D моделей	https://www.techgidravlika.ru/view_post.php?id=45
		проектирование кривых и фигур в двумерном (2D) пространстве; или кривых, поверхностей и твердых тел в трехмерном (3D) пространстве	Madsen, David A. Engineering Drawing & Design. – Clifton Park, NY: Delmar. – 2012. – ISBN 978-1111309572.
		любое использование компьютерных технологий в проектировании, в т.ч. в проектировании технологическом	Rosenberg, M. Bobryakov, S. Elsevier's dictionary of technical abbreviations in English and Russian. – Amsterdam: Elsevier, 2005. – ISBN 978-0-44-451561-2.
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>	подготовка технологического процесса (ТП) производства изделий, ориентированная на использование ЭВМ	https://www.techgidravlika.ru/view_post.php?id=45
		разработка ТП, синтез УП для станков с ЧПУ, моделирование процессов обработки, в том числе построение траекторий относительного движения инструмента и заготовки в процессе обработки	Гончаров, П.С., Ельцов, М.Ю., Коршиков, С.Б., Лаптев, И.В., Осюк, В.А. NX для конструктора-машиностроителя. – М.: ИД ДМК Пресс, 2009. – 376 с.
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>	решение различных инженерных задач: расчёт, анализ, симуляция физических процессов и др., в т.ч. рассматриваются задачи технологического проектирования	https://www.techgidravlika.ru/view_post.php?id=45
		любое использование компьютерных технологий в проектировании, в т.ч. в проектировании технологическом	Rosenberg, M. Bobryakov, S. Elsevier's dictionary of technical abbreviations in English and Russian. – Amsterdam: Elsevier, 2005. – ISBN 978-0-44-451561-2.
CAPP	<i>Computer-Aided Process Planning</i>	маршрутно-операционное проектирование технологических процессов, включая техническое нормирование и разработку УП для станков с ЧПУ	http://www.insoftmach.ru/CAPPall.html Полянсков, Ю.В. и др. [5]
PDM	<i>Product Data Management</i>	управление комплексной информацией об объекте производства, в т.ч. документацией, инженерными и техническими данными, рабочими процессами и др.	https://www.techgidravlika.ru/view_post.php?id=45
			http://www.insoftmach.ru/CAPPall.html Полянсков, Ю.В. и др. [5]



Integration: технологии и средства обмена данными между физическим (**Physical**) – реальный производственный процесс, включающий оборудование, оснастку, заготовки, готовую продукцию, людей, занятых в производстве, – и цифровым (**Digital**) – информационная модель реального производства, – «мирами», составляющими современное цифровое производство. **Communicate:** сбор и передача информации о функционировании и состоянии цифровых производственных систем (ЦПС); **Sensors** – датчики состояния элементов технологических систем. **Aggregate:** формирование массива информации о функционировании и состоянии ЦПС; **Data** – числовые данные о функционировании и состоянии ЦПС, получаемые от датчиков и объединенные с информацией из других элементов цифровой среды предприятия (чертежи, базы данных и пр.). **Analyse, Insight:** представление результатов моделирования в форматах, позволяющих реализовать управление процессами и оборудованием ЦПС; **Analytics** – алгоритмы и результаты математической обработки массивов **Data**. **Act, Create:** процесс производства; **Actuators** – исполнительные механизмы, автоматически или при участии человека, реализующие физические процессы

Рис. 1. Цифровой двойник производственного процесса [0]

Однако количественная оценка соответствия принятых решений относительно обеспечения заданных показателей качества, установленным техническими требованиями, проблематична при отсутствии математических моделей структуры производственной системы, а также отдельных технологических процессов.

На этапе назначения технологических режимов пренебрегают рядом факторов, воздействие которых приводит к рассогласованию значений заданных параметров результата обработки и фактического результата.

Исследованиями ряда технологических научных школ: Брянска, Волгограда, Комсомольска-на-Амуре, Москвы, Перми, Челябинска и др., установлено, что существующие математические модели процессов резания достаточно полно описывают физические закономерности, но их адекватность в большинстве случаев невысока и требуется корректировка применительно к конкретным производственным условиям. Это объясняется тем, что процесс механической обработки – синергичная совокупность множества элементарных физических и химических явлений: деформационных, термических, диффузионных и т.д. Стохастический характер этой сложной системы определяется существенной неоднозначностью химического состава, теплофизических и механических свойств материалов инструмента и обрабатываемой заготовки.

Кроме того, имеет место некорректная организация деятельности технологических подразделений, отвечающих за входной контроль и адаптацию технологических решений к условиям конкретного производства, несогласование рекомендаций производителей инструмента, справочно-методических реко-

мендаций, нормативных указаний технологической службы предприятий, а также отсутствие полноценной обратной связи из зоны резания. Это еще раз подтверждает, что проблематика построения и развития систем адаптивного управления является актуальной.

Обобщая данные различных источников, в частности [12], можно утверждать, что применение систем адаптивного управления позволяет повысить стойкость режущего инструмента на 25...35 %, производительность – на 30...240 % и снизить брак до 100 %. Но, несмотря на единодушие практически всех исследователей о необходимости построения систем адаптивного управления, существуют некоторые расхождения относительно принципов, как в отношении аппаратной, так и алгоритмической части.

Так, авторы [13, 14] предлагают управлять режимами обработки ориентируясь на значения оптимальной скорости резания v_0 , непосредственно связанными через оптимальную температуру контакта θ_0 , обозначенную с механо-физико-химическими константами обрабатываемого и инструментального материала. Положение о постоянстве оптимальной температуры, выдвинутое профессором А.Д. Макаровым [15], носит характер всеобщности и может быть положено в основу ускоренного метода определения оптимальных сочетаний подач и скоростей резания, соответствующих максимальной размерной стойкости инструмента.

В работе [16] предлагаются математические модели управления для адаптивной технологической системы, связывающие параметры управляемого процесса (шероховатости R_a , остаточные напряжения и микротвёрдости поверхностного слоя) с его входными воздействиями (режимы механической обработки).

Однако с учетом упомянутой выше неоднозначности химического состава, теплофизических и механических свойств материалов инструмента и обрабатываемой заготовки возникает вопрос о методе определения фактических значений θ_0 и v_0 , текущей температуры в зоне резания и т.д. для конкретной контактной пары.

Разброс режущих свойств распространенных твердосплавных пластин определяется свойствами твердосплавной матрицы (хим. составом; структурой; гранулометрическим составом), покрытиями (составом; толщиной отдельных слоев и покрытия в целом; технологией нанесения), а также варьированием элементного состава в объеме инструмента. Аналогичная ситуация прослеживается и по свойствам обрабатываемого материала в целом и по свойствам поверхностного слоя – с учетом метода получения заготовки и наличия как поверхностных, так и скрытых внутренних дефектов и неоднородности свойств даже в рамках партии поставки.

Определить фактическое количественное значение отдельных показателей возможно разрушающими методами исследований в лабораторных условиях, в том числе и металлографическими методами, но это достаточно трудоемко и практически нереализуемо в производственных условиях.

Таким образом, модернизация ТПП выводит на первый план вопросы мониторинга процессов механической обработки, состояния режущего инструмента, обрабатываемой детали и параметров обработанной поверхности. В «общем виде» этот тезис нашел отражение и в программных документах концепции «Индустрия 4.0», и Национальной Технологической Инициативы [1], и в подавляющем большинстве работ, посвященных цифровизации.

В работе [17] верно отмечено, что большинство существующих систем мониторинга могут быть использованы только в лабораторных условиях, поскольку установка датчиков, фиксирующих геометрические отклонения обработанной поверхности, состояния режущей кромки, а также обеспечение необходимых мер их защиты на производстве практически неосуществимы. Средства же косвенного измерения не дают достаточной достоверности.

Говоря о развитии современного технологического оборудования, в частности станков с ЧПУ, нельзя не отметить наличие целого ряда систем контроля и диагностики. Это и системы компенсации тепловых деформаций, активный контроль вибраций,

контроль усилий на приводах, контроль эффективной мощности резания и др.

В современных системах слово «контроль» не является смысловым аналогом английского «control» («управление»), а подразумевает только мониторинг. Штатные диагностические системы технологического оборудования с ЧПУ от ведущих мировых производителей (Yamazaki Mazak Corporation; Haas Automation Inc.; DMG MORI COMPANY LIMITED и др.) способны оповещать об аварийной ситуации с остановом процесса. Вышеназванные системы используются для оценки работоспособности станка, в качестве индикаторов аварийных ситуаций и минимизации поломок, но не могут обеспечить эффективное управление процессом обработки на «интеллектуальном» уровне.

Таким образом, в настоящее время сложилась ситуация, когда при современном техническом уровне развития диагностических средств, применимых на технологических операциях, их ресурс и возможности задействованы лишь отчасти и создан инструментарий практического решения отдельных задач построения адаптивной системы.

Для оценки динамики процесса резания, мониторинга состояния режущего инструмента и обработанной поверхности могут быть применены каналы косвенной оценки, а обеспечение высокой надежности и информативности возможно за счет интеграции в единую систему нескольких информационных каналов применимых в производственных условиях.

В ВолГТУ в качестве показателя работоспособности инструмента в сочетании с конкретным конструкционным материалом (интегральный показатель работоспособности пластины с заготовкой) предложено рассматривать сигнал термо-ЭДС естественной термодомы. Метод показал свою работоспособность и при применении твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями и даже модифицированным покрытием [18].

Сигнал термо-ЭДС позволяет косвенно оценить термодинамические характеристики контактной пары и температурную напряженность процесса резания. Метод позволяет прогнозировать стойкость инструмента, на основании установленного периода стойкости рассчитывать требуемую скорость резания и прогнозировать параметры качества поверхности [19]. Рассматриваемый информационный канал может выступить в качестве средства предварительной оценки контактной пары и адаптации режимов резания под кон-

критические условия. С целью интеграции метода в производственное оборудование были разработаны устройства съема сигнала термо-ЭДС при использовании унифицированной инструментальной оснастки [20].

В качестве же инструмента оперативной диагностики предлагается использование динамически изменяющихся сигналов, например, по силам резания [21], которые снимаются как мониторинговые сигналы и могут подвергаться дальнейшей обработке, т.е. выступают в качестве обратной связи для изменения условий обработки.

Данный информационный канал позволяет отследить силовую нагруженность процесса, состояние режущего инструмента, поверхностного слоя, случайные изменения физико-механических характеристик обрабатываемого материала, колебания припуска и др., а также компенсировать отклонения размеров, возникающие в следствии нежёсткости и геометрической формы обрабатываемой детали.

Безусловно, существует определенная корреляционная связь не только между уровнем сил резания, но и (даже в большей степени) их стабильностью и параметрами качества обработанной поверхности. Однако с целью повышения надежности и информативности предложенные выше диагностические каналы следует дополнить мониторингом вибрационных характеристик процесса резания.

Интеграция адаптивной системы, основанной на предлагаемой методологии, возможна за счет модернизации унифицированной станочной оснастки и применения соответствующих промышленно выпускаемых датчиков, анализаторов и не требует серьезного переоборудования производственного оборудования. При этом предлагаемый инструментарий позволяет решить проблему неопределенности входных технологических параметров, а также оперативно компенсировать текущее рассогласование показательных характеристик процесса резания в соответствии с заданными требованиями.

Таким образом, целесообразно осуществить частичный перенос задач технологической подготовки производства на стадию обработки, где на основе имеющихся математических моделей технологического процесса, а также с помощью оперативной информации с комплекса диагностических датчиков может осуществляться поэтапная оптимизация режимов резания и выработка управляющих воздействий адаптивной системы с целью обеспечения значений заданных параметров качества.

Программно-аппаратная реализация интеллектуальных технологических систем

Выше было отмечено, что в настоящее время задачи формирования заданных характеристик обработанной поверхности, геометрической точности, а также работоспособности инструмента и стабильности процесса решаются на этапе ТПП на основе рекомендаций производителей металлорежущего инструмента, либо методиками нормирования, использующими эмпирические коэффициенты. При подобном подходе в виду значительного разброса свойств как обрабатываемого, так и инструментального материалов [8] велика вероятность назначения не адекватных реальной производственной ситуации режимов обработки.

Для достижения поставленной выше цели решались несколько задач, среди которых основными являлись выбор информационного сигнала, по величине которого можно судить о протекании процесса резания, и интерфейса передачи автоматически рассчитанных режимов резания в УЧПУ станка. При этом было поставлено ограничение на недопустимость существенных изменений конструкции оборудования и собственно системы ЧПУ.

В ходе выбора интерфейса были проанализированы возможности серийных УЧПУ для интеграции интеллектуальной системы назначения режимов обработки на основе информации из зоны резания [20]. Все современные системы управления станком типа PCNC построены на ядре, имеющим закрытую архитектуру. Тем не менее, практически все производители позволяют пользователям своего оборудования в разной степени взаимодействовать с УЧПУ для расширения их возможностей.

Так, Fagor Automatio, Bosch Rexroth, Beckhoff, Heidenhain, Siemens дают возможность через фирменные интерфейсы получить доступ различной степени к ядру системы. Некоторые производители, например Okuma, позволяют осуществить информационный обмен со сторонним программным обеспечением и измерительными датчиками через переменные, доступ к которым может быть получен через интерфейс RS-232C. Возможность обращения к этим переменным из программ обработки позволяет вести управление процессом резания в режиме реального времени. Данный способ интеграции ядра УЧПУ со сторонними приложениями и измерительными устройствами представляется наиболее удобным, так как не требует приобретения дополнительного программного обеспечения и предлагает стандартизованный открытый интерфейс

информационного обмена.

В качестве сигнала из зоны резания используется величина термо-ЭДС, являющаяся интегральным показателем условий протекания процесса резания [20, 22, 23].

Принципиальная схема интеллектуальной технологической системы назначения режимов резания на базе серийного УЧПУ Okuma OSP-P300L представлена на рис. 2.

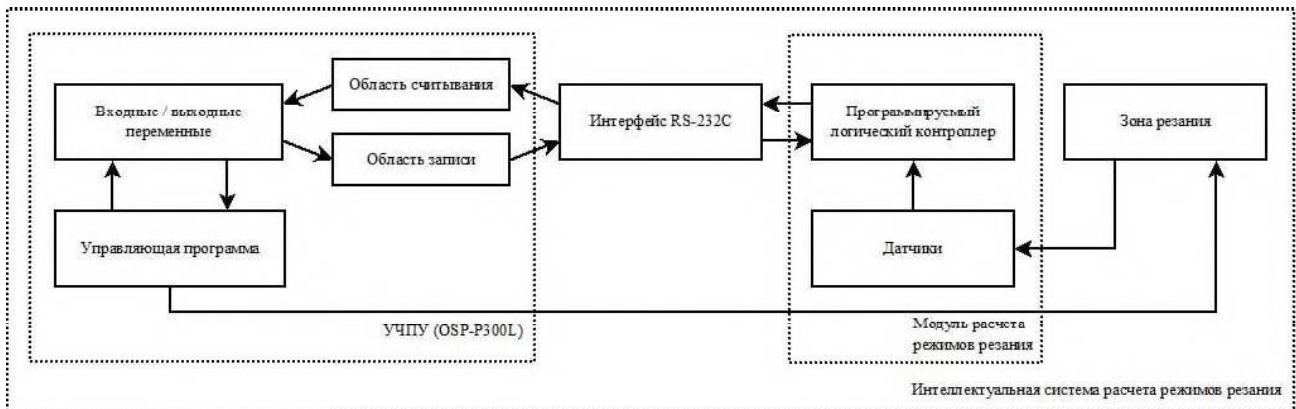
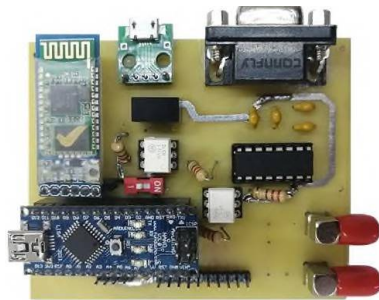


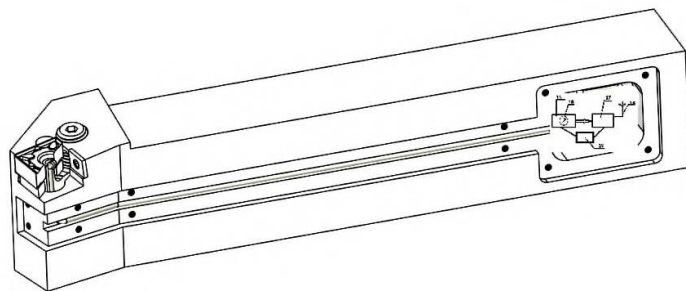
Рис. 2. Принципиальная схема интеллектуальной технологической системы на базе УЧПУ Okuma OSP-P300L

За получение и обработку информации о процессе резания отвечают два блока: датчики для фиксации параметров протекания процесса и программируемый логический контроллер (ПЛК). Выполнение расчетов на базе ПЛК позволяет обеспечить гибкость разрабатываемой системы, т.е. дает возмож-

ность интегрировать ее с другими УЧПУ без внесения принципиальных изменений в архитектуру. Аппаратная платформа представляет собой резец с датчиком термо-ЭДС и передатчиком сигнала [24, 25], а также модуль оптимизации режимов резания на базе микроконтроллера (рис. 3)



а)



б)

Рис. 2. Часть прототипа (а) и общий вид резца (б) для измерения термо-ЭДС

В качестве алгоритмической базы интеллектуальной системы назначения режимов резания выбран метод коррекции режимов резания механической обработки, называемый методом пробного прохода [20, 22, 23].

Расчетный блок системы использует алгоритмы параметрической оптимизации режимов резания методами линейного программирования. Целевые функции выбираются различными, исходя из целей управления процессом обработки. В качестве оценочной функции на стадии черновой обработки используется производительность. На стадии полустойковой/чистой лезвийной обработки в качестве целевой функции принимается минимальная погрешность формы и расположения поверхностей. В случае отделочной обработки в качестве оценочной функции выбрана величина получаемой шероховатости, оцениваемая по параметру Ra .

Предлагаемое решение может рассматриваться в качестве варианта реализации цифрового двойника (см. рис. 1), как основы цифровой производственной системы, ориентированной на обеспечение комплекса эксплуатационных свойств изделия на стадии технологического проектирования и последующей механической обработки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. План мероприятий («дорожная карта») «Технет» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы // 14 февраля 2017 г. – URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/02_february/15/Dorozhnaya_karta_TechNet.pdf.
2. Цифровизация промышленности. Обзор // – TAdvisor. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> Статья: Цифровизация промышленности. Обзор TAdvisor.
3. Процессы управления производством систематизируют с помощью новой программной платформы от «Росэлектроники» // Технология машиностроения. – URL: <https://mashnews.ru/proczessyi-upravleniya-proizvod->

stvom - sistematiziruyut-s-pomoshhyu-novoj-programmnoj-platformy - ot - roselektroniki.html?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop.

4. **ГОСТ Р 50995.3.1-96.** Технологическое обеспечение создания продукции. Технологическая подготовка производства. – Введ. 01.07.97. – М.: Госстандарт России, 1997. – 20 с.

5. **Интеграция CAPP-, PDM-, ERP-систем** в единое информационное пространство производственного предприятия / Ю.В. Полянский, А.С. Кондратьева и др. // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2013. – Т.15. – №4 (3). – С. 628-633.

6. **Чигиринский, Ю.Л.** Современное состояние и тенденции развития технологической подготовки машиностроительного производства // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – №8 (110). – С. 29-35.

7. **Автоматизация управления параметрами качества** поверхностного слоя и эксплуатационными свойствами деталей машин при обработке резанием / А.Г. Сулов, Д.И. Петреши и др. // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2019. – №8 (98). – С. 28-36.

8. **Как научить систему ЧПУ решать технологическую задачу по выбору надежных значений параметров процесса металлообработки** / А.Л. Плотников, Ю.Л. Чигиринский и др. // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2022. – №3 (129). – С. 32-39.

9. **Aaron Parrott, Lane Warshaw.** Industry 4.0 and the digital twin technology. Manufacturing meets its match. URL: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>.

10. **Иванов, В.К.** К решению основной задачи управления технологической подготовкой машиностроительного производства // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2021. – №2. – С. 73-78. – DOI: 10.25686/2542-114X.2021.2.73.

11. **Аверченков, А.В., Колошкина, И.Е., Шентунов, С.А.** Формирование компетенций специалистов в научно-технических технологиях подготовки производства // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2019. – №6 (96). – С. 22-30.

12. **Ракунов, Ю.П., Абрамов, В.В.** Современные направления разработки методов автоматизированного назначения режимов резания металлов унифицированным инструментом // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2017. – №3 (58). – С. 68-76.

13. **Ракунов, Ю.П., Абрамов, В.В.** Положительные свойства оптимальных температур и скорости резания токарной обработки // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2018. – №6. – С. 123-128.

14. **Сальников, В.С., Хоанг, В.Ч.** Анализ процессов управления режимами резания по температурному критерию // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – №1. – С. 172-178.

15. **Макаров, А.Д.** Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

16. **Сулов, А.Г., Петреши, Д.И.** Определение закона управления для адаптивной технологической системы при обеспечении заданных параметров качества поверхностного слоя деталей машин при механической обработке // СТИН. – 2010. – №1. – С. 30-36.

17. **Лапшина, Е.А., Хаймович, А.И.** Разработка системы мониторинга операции механической обработки // Вестник Международного института рынка. – 2020. – №2. – С. 114-118.

18. **Tikhonova, Z., Kravnev, D., Frolov, E.** Thermo-

Emphas Method for Testing Properties of Replaceable Contact Pairs // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 019) Conference proceedings ICIE 019, Sochi, Russia: Springer International Publishing, Switzerland AG, 2020. – P. 1097-1105. – DOI: 10.1007/978-3-030-22063-1_117. – EDN YEAGZO.

19. **Тихонова, Ж.С., Плотников, А.Л., Фролов, Е.М.** Повышение эффективности использования твердосплавного инструмента с износостойким покрытием при токарной обработке сталей путем предварительного диагностирования его режущих свойств // Инновационные технологии машиностроения в транспортном комплексе: Материалы XI МНТК ассоциации технологов-машиностроителей, Калининград, 10-13 сентября 2019 г. – Калининград: Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, 2020. – С.332-337.

20. **Адаптация метода управления режимами резания к промышленным условиям** / Е.М. Фролов, А.В. Рогачев и др. // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2021. – №1(248). – С. 38-41.

21. **Система адаптивного управления процессом механической обработки** / Ж.С. Тихонова, П.А. Чемогонов и др. // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2021. – №1 (248). – С. 31-34. – DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-31-34. – EDN KFHLCA.

22. **Пат. 2063307** Российская Федерация, МКИ 25/06. Способ определения допустимой скорости резания при механической обработке детали твердосплавным инструментом / А.Л. Плотников; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 94010673/08; заявл. 29.03.1994; опубл. 10.07.1996, Бюл. № 19.

23. **Сергеев, А.С., Тихонова, Ж.С., Уварова, Т.В.** Method for measuring thermo-EMF of a «tool-workpiece» natural thermocouple in chip forming machining // MATEC Web of Conferences. Vol. 129: Int. Conf. on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017) (Sevastopol, Russia, September 11-15, 2017) / eds.: S. Bratan [et al.]. – [Publisher: EDP Sciences], 2017. – 5 p. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/43/mateconf_icmtmte2017_01044.pdf

24. **Пат. 201938** Российская Федерация, МКИ В 23 В 25/06. Автономный модуль для измерения ЭДС резания / Е.М. Фролов, А.В. Рогачев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2020126791; заявл. 11.08.2020; опубл. 21.01.2021, Бюл. № 3. 8

25. **Пат. 201939** Российская Федерация, МКИ В 23 В 25/06. Резец сборный с элементами для измерения ЭДС резания / Е.М. Фролов, А.В. Рогачев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2020126868; заявл. 11.08.2020; опубл. 21.01.2021, Бюл. № 3. 6

REFERENCES

1. Action plan («roadmap») «Technet» (advanced manufacturing technology) of the National technology initiative. Approved by the Presidium of the Council for economic modernization and innovative development of Russia, protocol no 1, 14 February 2017. Available at: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/02_february/15/Dorozhnaya_karta_TechNet.pdf.

2. «Digitalization of industry». Overview // TAdviser. Available at: <https://www.tadviser.ru/index.php/> Статья: Цифровизация промышленности. Обзор TAdviser.

3. «Production management processes are systematized using a new software platform from Ruselectronics» // *Technology of Machinery*. – URL : https://mashnews.ru/proцessyi-upravleniya-proizvodstvom-sistemiziruyut-s-pomoshhyu-novoj-programmnoj-platforymi-ot-roselektro-niki.html?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop.
4. Technological support for products development and production. Technological preparation of production : GOST R 50995.3.1-96 (State Standard R 50995.3.1-96), introduced 01.07.97, Moscow : Gosstandart Rossii, 1997, 20 p.
5. Polyanskov Yu.V., Kondrat'eva A.S., Chernikov M.S. Blyumenshtein A.A. [Integration of CAPP, PDM, ERP-systems in the common information space of manufacturing enterprise], *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2013, vol. 15, no. 4 (3), pp. 628-633.
6. Chigirinsky, Yu. L. Contemporary state and modern trends in the development of machine-building production planning/Science intensive technologies in mechanical engineering, 2020, no.8 (110), pp.29-35.
7. Control automation of surface layer quality parameters and machinery operation properties at cutting / A. G. Suslov, D. I. Petreshin, O. N. Fedonin, V. A. Khandozhko // *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2019, no. 8 (98), pp.28-36.
8. How to teach a CNC system to solve a process task when choosing reliable values of the metalworking process parameters / A. L. Plotnikov, Yu. L. Chigirinsky, Zh. S. Tikhonova, E. M. Frolov, D. V. Krainev /*Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2022, no. 3 (129), pp. 32-39. – DOI : 10.30987/2223-4608-2022-3-32-39.
9. Aaron Parrott, Lane Warsaw. Industry 4.0 and the digital twin technology. *Manufacturing meets its match*. URL : <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>
10. Ivanov, V. K. To the solution of the main task of control of machine-building production planning / *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies*, 2021, no. 2, pp. 73-78. – DOI :10.25686/2542-114X.2021.2.73. – EDN OLKCXN.
11. Averchenkov, A.V., Koloshkina, I. E., Sheptunov S. A. Skill set formation of specialists in high-tech technologies of preproduction / *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2019, no.6 (96), pp. 22-30.
12. Rakunov, Yu. P., Abramov V. V. Modern trends in the development of methods for automatized metal cutting modes selection using a normalized tool / *Progressive technologies and systems of mechanical engineering*, 2017, no.3(58), pp. 68-76.
13. Rakunov, Yu. P. Benefits of optimal temperature and cutting speeds of turning. (2018) *Computer-aided design in mechanical engineering*. No. 6, pp. 123-128.
14. Sal'nikov, V. S., Hoang, V. Ch. Analysis of processes of control of cutting modes by temperature criterion. (2013) *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. No. 1, pp. 172-178.
15. Makarov, A. D. Optimization of cutting processes. (1976) Moscow, Mashinostroenie, 278 p.
16. Suslov, A. G., Petreshin, D. I. Control law for an adaptive technological system to maintain surface-layer quality in machining. (2010) *Russian Engineering Research*, v. 30, No. 4, pp. 418-423. – DOI : 10.3103/S1068798X10040234
17. Lapshina, E. A., Haimovich, A. I. Development of a system for monitoring the machining operation. (2020) *Bulletin of the International Market Institute*. No. 2, pp. 114-118.
18. Tikhonova, Zh. S., Kraynev, D. Frolov, E. M. Thermo-Emf as Method for Testing Properties of Replaceable Contact Pairs / *Proceedings of the 5th Int. Conf. on Industrial Engineering (ICIE 019) Conf. proceedings ICIE 019, Sochi, Russia: Springer International Publishing, Switzerland AG, 2020. – pp. 1097-1105. – DOI : 10.1007/978-3-030-22063-1_117*.
19. Tikhonova, Zh. S., Plotnikov, A. L. and Frolov, E. M. Improving the efficiency of using a hard-alloy tool with a wear-resistant coating during turning of steels by preliminary diagnosing its cutting properties. (2020) *Innovative engineering technologies in the transport complex : Materials of the XI Int. Sc. Tech. Conf by the Engineering Technologists Association, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, September 10-13, 2019, pp. 332-337*.
20. Frolov, E. M., Rogachev, A. V., Fadeev, V. G. and Semenyaka, S. S. Adaptation of the cutting mode control method to industrial conditions. (2021) *Bulletin of Volgograd State Technical University, Series «Progressive Technologies in Mechanical Engineering»*. No. 1 (248), pp. 38-41. DOI : 10.35211/1990-5297-2021-1-248-38-41.
21. Tikhonova, Zh. S., Chemogonov, P. A., Frolov, E. M. and Krainev, D. V. Adaptive control system of the machining process. (2021) *Bulletin of Volgograd State Technical University, Series «Progressive Technologies in Mechanical Engineering»*. No. 1 (248), pp. 31-34. DOI : 10.35211/1990-5297-2021-1-248-31-34.
22. Pat. 2063307 Russian Federation, MKI 6 V 23 V 25/06. A method for determining the per-missible cutting speed when machining a part with a carbide tool / A. L. Plotnikov ; applicant and patent holder of the Volgograd State Technical University, no. 94010673/08 ; application no. 29.03.1994 ; publ. 10.07.1996, Bul. No. 19.
23. Method for measuring thermo-EMF of a «tool-workpiece» natural thermocouple in chip forming machining / A.S. Sergeev, Zh. S. Tikhonova, T. V. Uvarova/ *MATEC Web of Conferences*. Vol. 129 : *Int. Conf. on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017) (Sevastopol, Russia, September 11-15, 2017) / eds.: S. Bratan [et al.]. – [Publisher: EDP Sciences], 2017, 5 p. Available at:*

https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/43/mateconf_icmtmte2017_01044.pdf 4

24. Pat. 201938 Russian Federation, MCI B 23 B 25/06. Autonomous module for measuring cutting EMF / E. M. Frolov, A.V. Rogachev ; applicant and patent holder of the Volgograd State Technical University, no. 2020126791; application no. 11.08.2020 ; publ. 21.01.2021, Bul. no. 3. 8

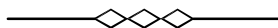
25. Pat. 201939 Russian Federation, MCI B 23 B 25/06. A prefabricated cutter with elements for measuring the cutting EMF / E. M. Frolov, A.V. Rogachev; applicant and patent holder of the Volgograd State Technical University, no. 2020126868 ; application no. 11.08.2020 ; publ. 21.01.2021, Bul. no. 3. 6

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.05.2022; одобрена после рецензирования 16.05.2022; принята к публикации 24.05.2022.

The article was submitted 11.04.2022; approved after reviewing 16.05.2022; assepted for publication 24.05.2022.



Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка С.В. Морозов. Редактор Д.А. Петраченко. Технический редактор С.В. Морозов.

Сдано в набор 18.08.2022. Выход в свет 30.08.2022.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет»

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16