

Ю. Л. Чигиринский, А. Л. Плотников, И. В. Фирсов, А. А. Жданов

**К ВОПРОСУ О НЕОБХОДИМОСТИ СОЗДАНИЯ
ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: alex_128@mail.ru

В работе рассматриваются вопросы, связанные с разработкой цифровых двойников технологических процессов механической обработки деталей машин. Оценивается текущий уровень развития САПР ТП, а также ставятся задачи и направления дальнейших разработок в области автоматизации технологического проектирования.

Ключевые слова: цифровой двойник, технологическое проектирование, маршрутное проектирование, размерный анализ.

Yu. L. Tchigirinsky, A. L. Plotnikov, I. V. Firsov, A. A. Zhdanov

**ABOUT THE NECESSITY TO CREATE DIGITAL TWINS OF TECHNOLOGICAL
PROCESSES FOR MECHANICAL PROCESSING OF MACHINE PARTS**

Volgograd State Technical University

The paper addresses the issue related to the development of digital twins of technological processes for machining machine parts. The current level of development of CAD TP is assessed, and tasks and directions for further developments in the field of automation of process design are set.

Keywords: digital twin, process design, route design, dimensional analysis.

В настоящее время в условиях цифровизации и автоматизации, в рамках концепции «Индустрии 4.0» традиционное представление технологического процесса в виде комплекта технологических документов, как правило, в бумажном виде, представляется устаревающим. До сих пор не

создана полноценная система автоматизированного проектирования технологических процессов, которая бы позволяла не просто сделать более удобным и быстрым процедуру формирования технологической документации, сопровождающей процессы технологической подготовки

и собственно производства, но действительно осуществлять автоматизированное проектирование, когда технологу останется только проверить и согласиться с одним из предложенных САПР ТП вариантом технологии, внося минимальные правки. Пока же процесс технологического проектирования осуществляется в основном в голове инженера-технолога, который руководствуется знаниями, опытом, справочными данными и математическими расчетами.

Существование цифрового двойника изделия должно быть неразрывно связано с понятием цифрового двойника технологического процесса его изготовления. То есть, цифровой двойник технологического процесса не просто должен быть одним из пунктов сопроводительной документации (пусть и в цифровом виде) к цифровому двойнику изделия, но самостоятельной цифровой единицей, цифровой моделью. Технологический процесс, особенно достаточно сложных деталей, в течение своего жизненного цикла подвергается многократным переработкам, правкам. Результатом этих правок является изменение характеристик качества изделия, оптимизация затрат или производительности его изготовления и т. д. Существует определенная обратная связь в результате изменения технологии. Поэтому одним из свойств цифрового двойника технологического процесса должна стать так называемая «система контроля версий». В программировании давно существует такое понятие, существуют

специальные сервисы, например, «github», которые позволяют отслеживать изменения программного кода, хранить все его версии, при необходимости осуществлять откат на предыдущую стабильную версию. При привязке к цифровому двойнику технологического процесса двойников конкретных изделий (которые хранят результаты контроля размеров изделия и другую информацию), что делается без существенных затрат, формируется достаточно широкое поле для статистической обработки (в том числе для обучения систем технологического искусственного интеллекта [1]) в разрезе «как те или иные изменения повлияли на производственный процесс и на качество изделий». Такие «версии» впоследствии могут быть учтены как некоторые новые паттерны для обучения интеллектуальной САПР ТП. В отсутствие цифровизации этот процесс осуществляется достаточно сложно и трудоемко. Как правило, этот процесс сопряжен либо с анализом большого количества бумажной документации (протоколов измерений, техпроцессов, правок, результатов испытаний и т. д.), либо вообще с необходимостью проведения сплошного контроля и наработки массива данных на рабочем месте. Наличие цифрового двойника технологического процесса с системой контроля версий и привязкой к метрикам каждого конкретного изделия (партии) может позволить осуществлять анализ вносимых изменений практически в режиме реального времени (рис. 1).

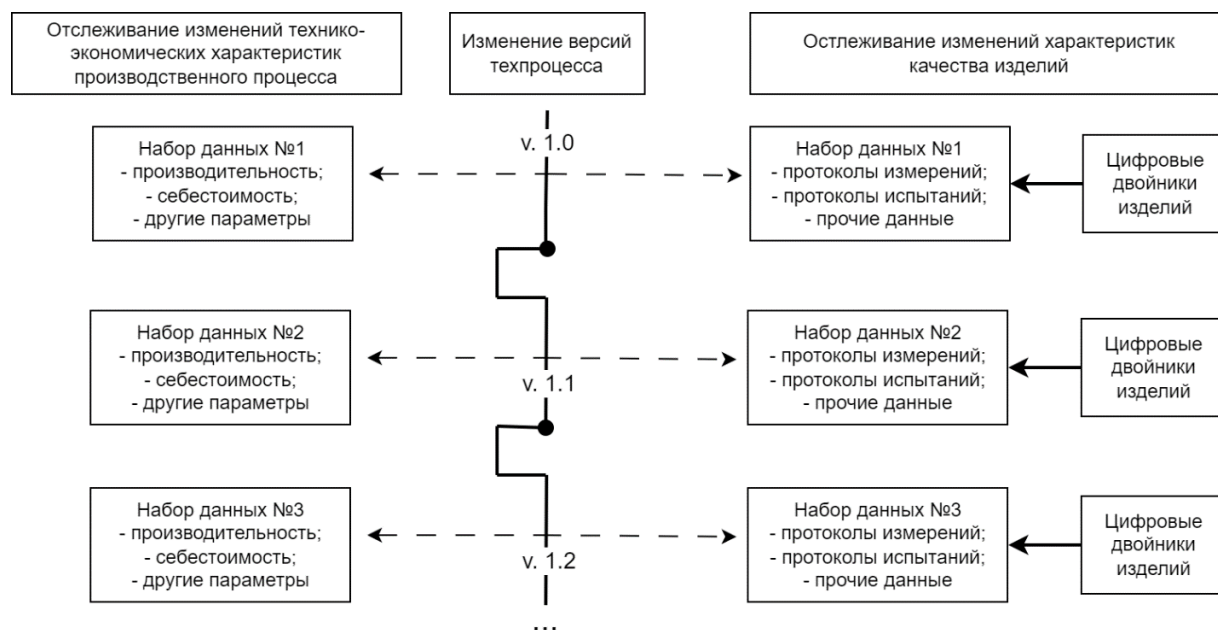


Рис. 1. Контроль версий технологического процесса и отслеживание изменений характеристик изделия и производственного процесса в целом

Создание цифрового двойника технологического процесса невозможно без наличия соответствующего программно-информационного обеспечения, интегрированного в PDM-систему предприятия. Современные САПР ТП представляют собой лишь помощников по заполнению технологических документов, практически не представляя возможностей собственно проектирования [1].

В работе [2] предложена концепция программного продукта, представляющего комплексное решение по технологическому проектированию. Самой большой трудностью разработки является отсутствие формализованного решения задачи маршрутного и операционного проектирования. То есть, непонятно, как научить компьютер самостоятельно строить маршрут обработки, особенно с учетом выбора технологических баз для совершенно разных деталей различных типоразмеров. Стоит отметить, что частично решение задачи автоматизации маршрутного проектирования рассмотрено в работах [3–5]. Речь идет об автоматизации поиска оптимального маршрута обработки конкретных поверхностей.

Для формализации процесса маршрутного проектирования, по-видимому, необходимо решить следующие основные задачи:

1. Формализация процесса поиска оптимального маршрута обработки отдельных поверхностей детали.
2. Формализация процесса выбора заготовки и ее параметров (формы, размеров, размерной точности, качества и др. параметров).
3. Формализация процесса построения маршрута обработки всей детали с выбором технологических баз, оборудования, режущего инструмента и т. п.
4. Формализация процедуры проверочного расчета технологических размерных цепей методами размерного анализа и корректировки маршрута обработки, интегрированная в общий единый алгоритм, в общую САПР.
5. Формализация процесса подготовки комплекта технологической документации на основе работы автоматизированного модуля маршрутного проектирования.

Эти задачи взаимосвязаны и последовательны. Укрупненный алгоритм работы полноценного модуля САПР «Построение оптимального маршрута обработки» представлен на рис. 2. Алгоритм не предусматривает автоматизированного поиска решения в случае, когда выдержать все требования при любых вариантах маршрута, которые система может сгенерировать, невозможно. Эти случаи отрабатываются отдельно, уже в ручном режиме, совместно с конструкторами, спроектировавшими эту деталь, заказчиками, руководством. Здесь же речь идет о случае, когда задача, все-таки, имеет решение, и получить хотя бы один маршрут, для которого будут выполняться требования по точности, качеству и т. д., возможно.

Задача выбора последовательности обработки конкретной поверхности детали на текущий момент представляется в целом формализованной. Трудности формализации заключались в том, чтобы алгоритмизовать процедуру выбора методов обработки с учетом требований по точности, качеству и т. д.

Стоит отметить, что справочные данные по достижимым показателям качества и точности существенно разнятся, а отдельные показатели, влияющие на эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин (микротвердость, глубина наклепа и т.д.), вообще могут отсутствовать в справочной литературе.

Статистически достоверные данные о границах технологических допусков, характерных для конкретного производства, представляются в виде вероятностных таблиц точности, фактически – матриц смежности ориентированных графов [5], – формирования комплекса эксплуатационных свойств каждой из поверхностей изделия.

Маршрут обработки формируется с помощью обычной задачи поиска оптимальных – критерий оптимизации определяется технологом, – путей в ориентированном графе (рис. 3). Один из возможных вариантов программной реализации данной методики представлен [4] программным модулем «Route of Process» (рис. 4).

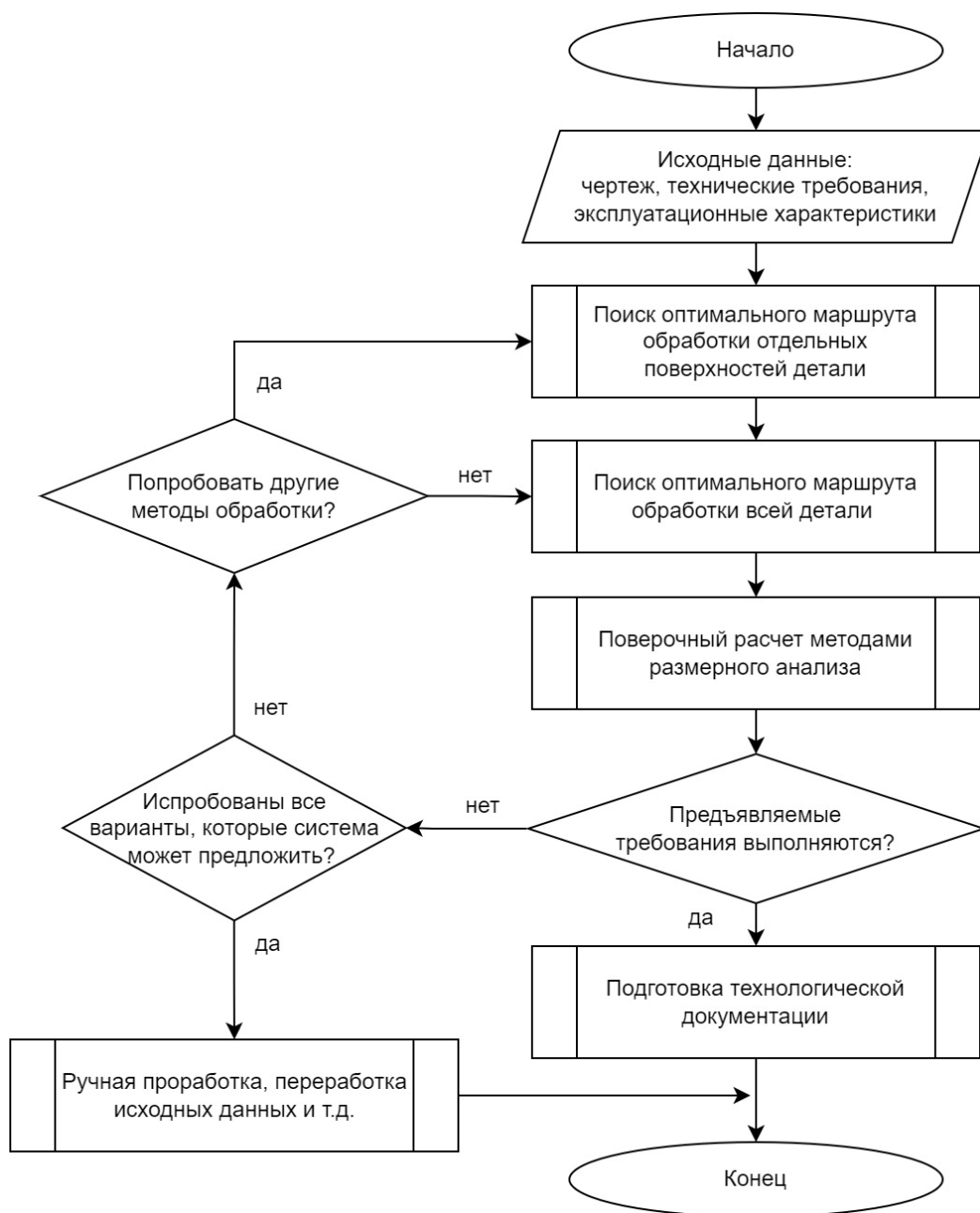


Рис. 2. Укрупненный алгоритм модуля маршрутного проектирования

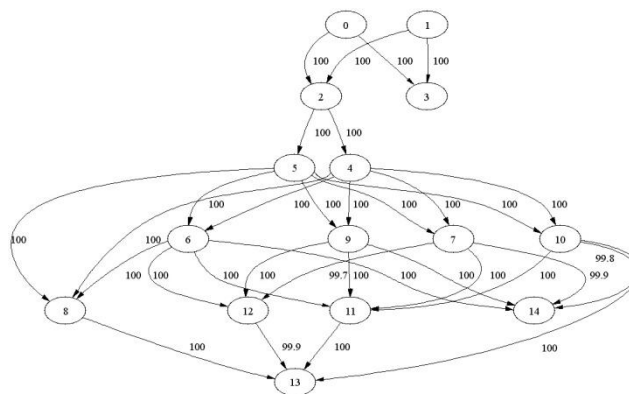


Рис. 3. Граф методов обработки

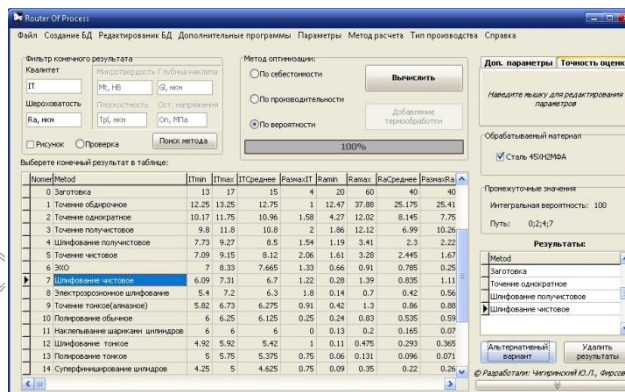


Рис. 4. Экран модуля «Route of Process»

Сложно решаемым остается вопрос выбора баз в автоматическом режиме. На сегодняшний момент в САПР ТП отсутствует даже связь маршрута, технологической размерной цепи с какой-либо электронной моделью. Требуется введение понятия «электронной цифровой модели техпроцесса» или «цифрового двойника техпроцесса» и реализация ее на программном уровне. В данной модели техпроцесс может быть представлен в виде совокупности графов. Такой подход позволит не только осуществлять автоматизацию заполнения технологической документации, но и подсказывать технологу оптимальные маршруты, а также проверять их методами размерного анализа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чигиринский, Ю. Л. Технологические аспекты подготовки цифрового машиностроительного производства / Ю. Л. Чигиринский, А. Р. Ингеманссон // Научные технологии в машиностроении. – 2023. – № 9 (147). – С. 39–48. – DOI : 10.30987/2223-4608-2023-39-48
2. Tchigirinsky, Ju. L., Zhdanov, A. A. and Arzhanov, R. I. The Concept of a Software Module for Automating the Route Design of Mechanical Processing Machine Parts for Use as Part of a Machine-Building CAD System // Advances in Automation V : Proc. of the Int. Russian Automation Conference (RusAutoCon2023) (Sochi, Russia, September 10-16, 2023) / eds.: A. A. Radionov, V. R. Gasiyarov ; Moscow Polytechnic University. – Cham (Switzerland) : Springer Nature Switzerland AG, 2024. – P. 205-213. – DOI : https://doi.org/10.1007/978-3-031-51127-1_20.
3. Фирсов, И. В. Обеспечение точности и качества плоских поверхностей при многопереходной механической обработке сложнотеленой стали // Дисс. к. т. н. / ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». Волгоград, 2019.
4. Свид. о регистрации программы для ЭВМ № 2013614279 от 26.04.2013 г., РФ Проектирование маршрута обработки наружных цилиндрических поверхностей / Ю. Л. Чигиринский, И. В. Фирсов; ВолгГТУ. – 2013.
5. Tchigirinsky, Ju. L., Chigirinskaya, N. V. and Firsov, I. V. Structural optimization of technological route using simulation modeling // Proceedings of 2015 Int. Conf. on Mech. Eng., Automation and Control Systems (MEACS) (Tomsk, Russia, 1-4 12.2015) / Tomsk Polytechnic University. – P. 1–4. – DOI : 10.1109/MEACS.2015.7414925.