

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт компьютерных наук и технологий**

На правах рукописи

Толстолес Алексей Андреевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПРОИЗВОДСТВОМ НА МЕЛКОСЕРИЙНЫХ И ЕДИНИЧНЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УЧАСТКАХ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Направление подготовки 09.06.01 Информатика и вычислительная техника

Код и наименование

Направленность 09.06.01_06 Математическое и программное
обеспечение вычислительных машин,
комплексов и компьютерных сетей

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Толстолес А.А.
Научный руководитель: доцент, к.т.н.,
Дробинцев П.Д.

Санкт Петербург – 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ/на кафедре Института компьютерных наук и технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/зав. кафедрой: *Дробинцев Павел Дмитриевич,
кандидат технических наук,
доцент*

Научный руководитель: *Дробинцев Павел Дмитриевич,
кандидат технических наук,
доцент*

Рецензент: *Голубев Алексей Андреевич,
кандидат технических наук,
ООО «ОРД»,
технический директор*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время направленность на удовлетворение запросов изменяющегося рынка приводит к увеличению доли предприятий мелкосерийного и единичного производства в машиностроении, которая, по оценкам экспертов, уже превышает 65%. По сравнению с массовым производством, выпускающим однородную продукцию в течение длительного времени, такие предприятия, изготавливающие широкую номенклатуру уникальной и эксклюзивной продукции, более приспособлены к условиям колебания спроса. Для них одним из наиболее сложных этапов производственного процесса является технологическая подготовка производства (ТПП). Чтобы соблюсти баланс между затратами на подготовку и, непосредственно, изготовление детали, часто прибегают к сокращению длительности производственного цикла и снижению трудоёмкости выполняемых работ, что негативно сказывается на степени детализации проектируемых технологических процессов, и, следовательно, приводит к снижению качества выполняемых работ.

Для повышения эффективности ТПП применяют средства автоматизации производства на базе информационных технологий. Их зарождение произошло после изобретения программируемого логического контроллера (PLC) во времена начала Третьей промышленной революции (1970-е годы), активная разработка происходит сейчас, на пороге Индустрии 4.0. Важнейшим преимуществом автоматизированной системы ТПП по сравнению с выполнением её вручную является возможность оптимизации технологического маршрута обработки, выбора оборудования и оснастки для обработки конкретной заготовки детали. Для исключения возможного брака от некорректно заданных параметров технологических операций или неправильного их порядка есть необходимость встроить в подобную систему средство проверки маршрута на корректность.

Исходя из вышеописанного, была сформулирована цель диссертационного исследования.

Степень разработанности темы. На сегодняшний день существует множество наработок в области автоматизации производства. В открытый доступ выложены учебные пособия по курсу «Автоматизированные системы технологической подготовки производства» (ТГТУ), для направления подготовки «Автоматизация технологических процессов и производств» (ИТМО), по дисциплине «Интегрированные системы управления» (ПетрГУ), в которых освещаются научно-методические основы современных информационных систем и технологий в области автоматизации и управления. Есть ряд научных публикаций, освещающих результаты разработки отдельных инструментов, повышающих эффективность конкретных производственных участков, например:

- АРМ технолога для швейной промышленности (Бакановская Л.Н., Мокеева Н.С.);
- модуль АСУТПП учёта незавершённого производства на ОАО «Красмаш» (Гуляев А.Ю. и др.);
- система диспетчеризации опытного и мелкосерийного производства радиоэлектронной аппаратуры на ОАО «НПП «Радиосвязь» (Казанцев М.А.).

На отечественном рынке представлены три крупные системы уровня MES (manufacturing execution system, система управления производственными процессами): ФОБОС, YSB.Enterprise.Mes и PolyPlan, а также несколько продуктов из области САПР ТП: ВЕРТИКАЛЬ, СПРУТ-ТП, ADEM. Внедрение MES-систем на имеющееся производство – сложный и дорогостоящий процесс, результатам этого посвящён отдельный класс статей (Полянсков Ю.В. и др. из ЗАО «Авиастар-СП», Харций Д.И. и др. из ОАО «ФосАгро Череповец» и т.п.).

Настоящая работа дополняет вышеупомянутые научные вклады и фокусируется на аспектах, связанных с предварительной проверкой

технологического маршрута обработки заготовки детали на корректность до его исполнения.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационного исследования является разработка метода автоматизированного управления производством на мелкосерийных и единичных технологических участках машиностроения, который позволяет повысить эффективность технологической подготовки производства на основе проектирования рационального маршрута обработки и проверки его на корректность. Для достижения поставленной цели были решены **задачи** исследования:

1. Исследование принципов построения и функций существующих средств автоматизации технологической подготовки производства.
2. Разработка метода проверки на корректность технологического маршрута обработки заготовки детали.
3. Реализация его в алгоритме.
4. Интеграция алгоритма проверки в разрабатываемый прототип программного комплекса, реализующий основные функции АСТПП.
5. Анализ результатов его применения.

Научная новизна

Научная новизна заключается в разработке метода проверки на корректность технологического маршрута обработки заготовки детали.

Теоретическая и практическая значимость

Базируясь на полученных научных результатах, был разработан прототип программного комплекса, позволяющий:

- ввести и сохранить информацию о модульной структуре детали в базе данных;

- спроектировать множество альтернативных технологических маршрутов обработки заготовки детали путём варьирования используемых станков и параметров их настройки;
- выбрать из множества рациональный вариант по критериям времени работы и её стоимости;
- проверить его на корректность;
- построить график его исполнения;
- создать комплект технологической документации.

Разработка велась в ходе работ по проекту «Технологии и инструментарий для надежного управления производственными участками Интернета Вещей» (номер соглашения 14.584.21.0022), проводимого в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».

Апробация работы

Основные результаты научного исследования и разработок обсуждались на конференциях Spring/Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering, SYRCoSE – 2019, Саратов и Cyber-Physical Systems and Control, CPS&C – 2019, Санкт-Петербург.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в восьми научных работах: в трёх статьях в научных журналах, входящих в перечень ВАК и в пяти статьях в научных журналах из перечня Scopus.

Представление научного доклада: основные положения

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод проверки на корректность технологического маршрута обработки заготовки детали.
2. Инструментальное средство, реализующее данный метод.

ПЛАНИРУЕМОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

(по главам)

Во **введении** планируется обосновать актуальность темы исследования, будут поставлены цели и задачи, представлены научная новизна и практическая значимость, определены выносимые на защиту научные положения, описан личный вклад автора, приведён список публикаций автора по теме диссертации.

В **первой главе** я представлю результаты исследования предметной области и обзора существующих решений. Планируется описать этапы жизненного цикла изделия, производимого предприятием, дать определения конструкторской и технологической подготовок производства, привести процедуры последней. Опишу также характерные особенности и проблемы мелкосерийного и единичного производства. Приведу описание видов технологической документации (маршрутной и операционной карт) и особенностей её заполнения. Покажу структуру децентрализованной автоматизированной системы управления производством, дам определения и объясню области применения и функции систем ERP, APS, MES, САПР ТП / АСТПП и АСУ ТП / SCADA. Будут даны определения брака на производстве и описано использование графических статистических методов контроля качества выпускаемой продукции, а также приведены сводки причин появления брака из разных источников. По результатам обзора принято решение о разработке прототипа программного комплекса, сочетающего в себе функции автоматизированной системы технологической подготовки производства с возможностью предварительной проверки технологического маршрута обработки заготовки детали на корректность для уменьшения брака из-за ошибок составления техпроцесса.

Во **второй главе** будут приведены определения и структура отдельных компонентов, использующихся для описания и моделирования деталей и заготовок (конструкторско-технологические элементы, блоки поверхностей, технологические группы, комплексные детали). Объекты данной структуры

являются входными и рабочими данными для разработанного прототипа программного комплекса. Я покажу его высокоуровневую схему, она состоит из следующих частей:

1. Графический интерфейс для ввода данных и проектирования маршрута обработки, имеющий в своём составе:
 - 1) модуль ввода общих данных о детали и задания информации об её внутренней структуре;
 - 2) модуль задания содержания этапов обработки с параметрами, главными из которых являются применимое технологическое оборудование и режущий инструмент;
 - 3) модуль поиска во внешних справочниках и занесения данных о допустимых параметрах режимов резания, они влияют на время работы и её стоимость;
 - 4) модуль определения порядка обработки элементарных поверхностей путём формирования блоков и групп внутри блоков;
 - 5) модуль формирования технологического маршрута обработки заготовки, состоящего из технологических операций по обработке нескольких групп элементарных поверхностей вместе.
2. База данных, в которой хранится вся введённая технологом в процессе работы с графическим интерфейсом информация, а также формулы для последующей оценки времени и стоимости выполнения операций технологического маршрута обработки по отдельности и в сумме.
3. Программа для генерации множества технологических маршрутов обработки заготовки в зависимости от конкретизированных значений их параметров, позволяющая также выбрать рациональный вариант из них по критериям времени или стоимости работы.

4. Компонент для проверки выбранного маршрута обработки на корректность, состоящий из:

- 1) модуля для задания условий правильности в определённой разработанной нотации;
- 2) генератора представления маршрута в виде кода, синтаксически удовлетворяющего стандарту языка C++ 11, в котором правила принимают вид конструкций `__CPROVER_assert(<условие>, "<описание_условия>")`.

Представление используется в качестве входных данных для средства проверки ограниченных моделей CBMC.

5. Программа построения производственного графика маршрута обработки с операциями, распределёнными по станкам.

6. Программа, отвечающая за составление операционной карты – части документации технологического процесса, автоматически создаваемой на основе установленной формы.

В третьей главе планируется привести пример использования разработанного прототипа программного комплекса. Будут даны снимки экранов пользовательского интерфейса для ввода данных и проектирования маршрута обработки, схемы таблиц и отношений между ними в базе данных СУБД PostgreSQL. Будут также приведены формулы для расчёта машинного времени обработки и стоимости для конкретных методов обработки в формате JSON с комментариями. В дополнение, я дам описание принципа работы библиотеки Expr4j для подстановки значений в формулы и приведу запрос на языке SQL для получения высчитанных результатов из базы данных для конкретного метода.

Четвёртую главу планируется посвятить созданию и проверке технологических маршрутов обработки. Будет описан принцип работы генератора множества маршрутов, форматы его входных и выходных данных и суть выбора рационального варианта. Также будут приведены примеры производственных графиков, построенных по результатам его работы. Проверку выбранного маршрута обработки на корректность я планирую осветить на примере изготовления детали «Толкатель» (*). Приведу структуру, нотацию и содержание заданных условий на очередность следования методов обработки друг за другом, применимые типы станков и режущего инструмента для методов обработки. Дам вид кода на C++, сгенерированного по входным данным маршрута и условиям, и описание средства проверки ограниченных моделей (Bounded Model Checker) CBMC. Приведу результаты проверок верной версии маршрута и версий со специально внесёнными ошибками. В дополнение, будет описано создание маршрутной карты в формате XLS на основе набора шаблонов с использованием библиотеки Apache POI, служащей для создания интерфейсов для работы с различными форматами файлов на основе стандартов Office Open XML (OOXML) и формата Microsoft OLE 2 Compound Document (OLE2). В **заключении** будут приведены выводы по всей работе.

(*) Опишу подробнее содержание этого раздела. Технологический маршрут, подлежащий проверке, имеет вид последовательности обработки технологических элементов (ТЭ) детали, информация о которых была занесена в базу данных через пользовательский интерфейс. Перед внесением использовался следующий формат записи параметров технологического элемента:

$TЭ(N_{тэ}; ЭО; h; Ra; ФМС; МО; (ТО_1, \dots, ТО_n; РИ_1, \dots, РИ_n)_{1..n})$, где:

- $N_{тэ}$ – номер технологического элемента,
- $ЭО$ – этап обработки, которому принадлежит технологический элемент,
- h – величина припуска,

- Ra – шероховатость технологического элемента,
- ФМС – физико-механические свойства,
- МО – название метода обработки технологического элемента,
- ТО – технологическое оборудование,
- РИ – режущий инструмент, применяемый для обработки технологического элемента.

Для обработки используются четыре типа станков (ТО в скобках):

- Тун – универсальные токарные станки,
- Тчпу – токарные станки с числовым программным управлением,
- ТФчпу – токарно-фрезерные станки с числовым программным управлением,
- КШ – круглошлифовальные станки.

Для демонстрации будем рассматривать выдержку из маршрута, в которую входят методы обработки каждого типа:

- 1) ТЭ((1Н-1)₂); 1; 1.16, 2; 6.3; -; черновое точение; (Тун; 2112-0013 Т15К6 ГОСТ 18880-73), (Тчпу, ТФчпу; PCLNR 2020K 12HP, CNMG120408-PM 4225), (Тчпу, ТФчпу; PCLNR 2020K 12HP, CNMG120408-WM 4215), (Тчпу, ТФчпу; PCLNR 2020K 12HP, CNMG120408-PM 1525);
- 2) ТЭ((2Н/1-4)₁); 4; 5, 0.1; 0.8; -; предварительное шлифование; (КШ; Круг 125x20x20 25А 16 СТ1));
- 3) ТЭ((2В/1-1)₁); 1; 1.33, 1.5; 6.3; -; сверление; (Тун; 2301-3597-А1 ГОСТ 10903-77), (Тчпу, ТФчпу; 860.1-1400-042А1-ММ));
- 4) ТЭ((4В/1-2)₁); 2; 3.75; 6.3; -; нарезание резьбы метчиком; (Тун; 2621-1223 ГОСТ 3266-81), (Тчпу, ТФчпу; Т200- ХМ100DA-М8 С110; Т200-ХМ100DA-М8 С145; Т200- ХМ100DA-М8 С150)).

Известно, что точение, сверление и нарезание резьбы метчиком могут выполняться на Тун либо на Тчпу и ТФчпу в качестве альтернативы, предварительное шлифование выполняется только на КШ.

Известны также режущие инструменты, которыми можно выполнять каждый из методов обработки (РИ в скобках), например, для черного точения годятся только:

- Резец подрезной 2112-0013 T15K6 ГОСТ 18880-73;
- Резец PCLNR 2020K 12HP; Пластина CNMG120408-PM 4225;
- Резец PCLNR 2020K 12HP; Пластина CNMG120408-WM 4215;
- Резец PCLNR 2020K 12HP; Пластина CNMG120408-PM 1525.

Станок и режущий инструмент к нему используются попарно.

Проверять на корректность будем очерёдность следования методов обработки друг за другом, выбранный тип станка и режущий инструмент для метода обработки.

Данные о маршруте, сохранённые в базу, имеют следующую структуру:

```
<название_метода_обработки><уникальный_номер>( <тип_параметра_1>
<название_параметра_1> <значение_параметра_1>, ..., <тип_параметра_N>
<название_параметра_N> <значение_параметра_N>),
```

и соответственно, выдержка из маршрута, описанная выше, принимает вид:

- 1) Черновое точение1(varchar(50) machine “Тун”, varchar(50) tool “2112-0013 T15K6 ГОСТ 18880-73”);
- 2) Предварительное шлифование5(varchar(50) machine “КШ”, varchar(50) tool “Круг 125x20x20 25А 16 СТ1”);
- 3) Сверление6(varchar(50) machine “Тун”, varchar(50) tool “2301-3597-А1 ГОСТ 10903-77”);
- 4) Нарезание резьбы метчиком26(varchar(50) machine “Тун”, tool “2621-1223 ГОСТ 3266-81”).

Поскольку изначально названия методов обработки не являются уникальными, к ним добавляются уникальные номера по их занесению в базу данных (метод + 1 = метод1). Varchar(50) – это строковый тип данных в языке SQL. Значения параметров пишутся в кавычках “”.

Условия для проверки множества маршрутов обработки имеют следующую структуру:

```
<уникальный_порядковый_номер>|<название_метода_обработки><уникальн  
ый_номер>|(<название_параметра_1> <значение_1>, ..., <значение_N>| ...  
|<название_параметра_N> <значение_1>, ..., <значение_N>)| ...
```

...

```
<название_общего_параметра_1> <значение_1>, ..., <значение_N>| ... |  
<название_общего_параметра_N> <значение_1>, ..., <значение_N>
```

Вертикальная черта | здесь выступает в качестве разделителя. Проверка порядка следования методов осуществляется через сравнение <уникального_порядкового_номера> условия и <уникального_номера> метода. Если они не совпадают, порядок нарушен. Условия разделены на два блока с помощью ***: в первом блоке они относятся к отдельным методам (в строке задаются условия на параметры конкретного), во втором находятся общие условия на сквозные параметры для всех методов, в которых они встречаются. В скобках указываются параметры, значения которых могут быть заданы только вместе друг с другом (но в любом сочетании), например, станки определённого типа используются только с определённым инструментом. При задании значений параметра метода и в первом, и во втором блоках, условия первого считаются более приоритетными.

Условия:

```
1|Черновое точение1|(machine “Тун” tool “2112-0013 T15K6 ГОСТ 18880-  
73”)|(machine “Тчпу” tool “PCLNR 2020K 12HP”)|(machine “ТФчпу” tool  
“CNMG120408-PM 4225”, “CNMG120408-WM 4215”, “CNMG120408-PM  
1525”)
```

```
5|Предварительное шлифование5|(machine “КШ” tool “Круг 125x20x20 25А  
16 СТ1”)
```

6|Сверление6|(machine “Тун” tool “2301-3597-А1 ГОСТ 10903-77”)|(machine “Тчпу” tool “860.1-1400-042А1-ММ”)|(machine “ТФчпу” tool “860.1-1400-042А1-ММ”)

26|Нарезание резьбы метчиком26|(machine “Тун” tool “2621-1223 ГОСТ 3266-81”)|(machine “Тчпу” tool “Т200- ХМ100DA-М8 С110”)|(machine “Тчпу” tool “Т200- ХМ100DA-М8 С145”)|(machine “Тчпу” tool “Т200- ХМ100DA-М8 С150”)|(machine “ТФчпу” tool “Т200- ХМ100DA-М8 С110”)|(machine “ТФчпу” tool “Т200- ХМ100DA-М8 С145”)|(machine “ТФчпу” tool “Т200- ХМ100DA-М8 С150”)

machine “Тун”, “Тчпу”, “ТФчпу”, “КШ”

По данным и условиям на них генерируется код на С++ (Main01.cpp):

```
void turning1(char* machine, char* tool);
void grinding5(char* machine, char* tool);
void drilling6(char* machine, char* tool);
void tapping26(char* machine, char* tool);

int orderNum = 1;
char* checkVar = "checking machine and tool";

int main() {
    turning1("Тун", "2112-0013 Т15К6 ГОСТ 18880-73");
    grinding5("КШ", "Круг 125x20x20 25А 16 СТ1");
    drilling6("Тун", "2301-3597-А1 ГОСТ 10903-77");
    tapping26("Тун", "2621-1223 ГОСТ 3266-81");

    return 0;
}

void turning1(char* machine, char* tool) {
    __CPROVER_assert(orderNum == 1, "turning1 must be 1 operation");
    __CPROVER_assert((machine == "Тун" && tool == "2112-0013 Т15К6 ГОСТ 18880-73") ||
        (machine == "Тчпу" && tool == "PCLNR 2020K 12HP") ||
        (machine == "ТФчпу" && tool == "CNMG120408-PM 4225") ||
        (machine == "ТФчпу" && tool == "CNMG120408-WM 4215") ||
        (machine == "ТФчпу" && tool == "CNMG120408-PM 1525"),
        checkVar);

    orderNum = 5;
}

void grinding5(char* machine, char* tool) {
    __CPROVER_assert(orderNum == 5, "grinding5 must be 5 operation");
    __CPROVER_assert((machine == "КШ" && tool == "Круг 125x20x20 25А 16 СТ1"),
        checkVar);
}
```

```

    orderNum = 6;
}

void drilling6(char* machine, char* tool) {
    __CPROVER_assert(orderNum == 6, "drilling6 must be 6 operation");
    __CPROVER_assert((machine == "Тун" && tool == "2301-3597-A1 ГОСТ 10903-77") ||
        (machine == "Тчпу" && tool == "860.1-1400-042A1-MM") ||
        (machine == "ТФчпу" && tool == "860.1-1400-042A1-MM"),
        checkVar);

    orderNum = 26;
}

void tapping26(char* machine, char* tool) {
    __CPROVER_assert(orderNum == 26, "tapping26 must be 26 operation");
    __CPROVER_assert((machine == "Тун" && tool == "2621-1223 ГОСТ 3266-81") ||
        (machine == "Тчпу" && tool == "T200- XM100DA-M8 C110") ||
        (machine == "Тчпу" && tool == "T200- XM100DA-M8 C145") ||
        (machine == "Тчпу" && tool == "T200- XM100DA-M8 C150") ||
        (machine == "ТФчпу" && tool == "T200- XM100DA-M8 C145") ||
        (machine == "ТФчпу" && tool == "T200- XM100DA-M8 C150"),
        checkVar);

    orderNum++; }

```

В коде данной работы основная конструкция для проверки имеет вид `__CPROVER_assert(<условие>, "<описание_условия>")`, порядок выполнения проверяется значением переменной `orderNum`. Тип данных `varchar(50)` изменился на `char*` из-за необходимости использовать базовые типы языка C++.

Результаты проверки:

```

C:\cbmc-5-10-win>cbmc.exe Main01.cpp
CBMC version 5.10 (cbmc-5.10) 32-bit i386 windows
Parsing Main01.cpp
Main01.cpp
Converting
Type-checking Main01
Generating GOTO Program
Adding CPROVER library (i386)
Removal of function pointers and virtual functions
Generic Property Instrumentation
Running with 8 object bits, 24 offset bits (default)
Starting Bounded Model Checking
size of program expression: 77 steps
simple slicing removed 8 assignments
Generated 8 VCC(s), 4 remaining after simplification
Passing problem to propositional reduction
converting SSA
Running propositional reduction
Post-processing
Solving with MinisAT 2.2.1 with simplifier
8 variables, 0 clauses
SAT checker inconsistent: instance is UNSATISFIABLE
Runtime decision procedure: 0.0119979s

** Results:
[turning1.assertion.1] turning1 must be 1 operation: SUCCESS
[turning1.assertion.2] checking machine and tool: SUCCESS
[grinding5.assertion.1] grinding5 must be 5 operation: SUCCESS
[grinding5.assertion.2] checking machine and tool: SUCCESS
[drilling6.assertion.1] drilling6 must be 6 operation: SUCCESS
[drilling6.assertion.2] checking machine and tool: SUCCESS
[tapping26.assertion.1] tapping26 must be 26 operation: SUCCESS
[tapping26.assertion.2] checking machine and tool: SUCCESS

** 0 of 8 failed (1 iteration)
VERIFICATION SUCCESSFUL

C:\cbmc-5-10-win>

```

Ошибок в очередности и значениях параметров методов обработки не найдено.

Теперь рассмотрим ситуацию введения технологом неправильных данных при тех же условиях.

Корректный вариант	Некорректный вариант
Данные: Предварительное шлифование5(varchar(50) machine “КШ”, ...)	Данные: Предварительное шлифование5(varchar(50) machine “Тун”, ...)
Данные: Сверление6(...)	Данные: Сверление8(...)
Код: <pre>grinding5("КШ", "Круг 125x20x20 25A 16 CT1"); ... void grinding5(char* machine, char* tool) { ... orderNum = 6; } ... drilling6(...);</pre>	Код: <pre>grinding5("Тун", "Круг 125x20x20 25A 16 CT1"); ... void grinding5(char* machine, char* tool) { ... orderNum = 8; } ... drilling8(...);</pre>

Для метода обработки “предварительное шлифование” некорректно указан универсальный токарный станок “Тун” вместо круглошлифовального “КШ”, а для метода обработки “сверление” нарушена очередность.

Результаты проверки:

```
** Results:
[turning1.assertion.1] turning1 must be 1 operation: SUCCESS
[turning1.assertion.2] checking machine and tool: SUCCESS
[grinding5.assertion.1] grinding5 must be 5 operation: SUCCESS
[grinding5.assertion.2] checking machine and tool: FAILURE
[drilling8.assertion.1] drilling6 must be 6 operation: FAILURE
[drilling8.assertion.2] checking machine and tool: SUCCESS
[tapping26.assertion.1] tapping26 must be 26 operation: SUCCESS
[tapping26.assertion.2] checking machine and tool: SUCCESS

** 2 of 8 failed (2 iterations)
VERIFICATION FAILED

C:\cbmc-5-10-win>_
```

Были закономерно найдены две внесённые ошибки.

Для отладки на конкретном производственном участке разумно будет ввести дополнительные ограничения на типы доступных станков и

инструментария. Например, нам могут быть недоступны токарно-фрезерные станки с числовым программным управлением (ТФчпу), следовательно, вся информация о них убирается из условий. В дополнение к этому, невозможно осуществить сверление сверлом “860.1-1400-042А1-ММ”. Условия приобретают следующий новый вид:

```
1|Черновое точение1|(machine “Тун” tool “2112-0013 Т15К6 ГОСТ 18880-73”)|(machine “Тчпу” tool “PCLNR 2020К 12НР”)
```

```
5|Предварительное шлифование5|(machine “КШ” tool “Круг 125x20x20 25А 16 СТ1”)
```

```
6|Сверление6|(machine “Тун” tool “2301-3597-А1 ГОСТ 10903-77”)
```

```
26|Нарезание резьбы метчиком26|(machine “Тун” tool “2621-1223 ГОСТ 3266-81”)|(machine “Тчпу” tool “Т200- ХМ100ДА-М8 С110”)|(machine “Тчпу” tool “Т200- ХМ100ДА-М8 С145”)|(machine “Тчпу” tool “Т200- ХМ100ДА-М8 С150”)
```

```
***
```

```
machine “Тун” “Тчпу” “КШ”
```

Сгенерированный код изменится сообразно новым условиям:

```
void turning1(char* machine, char* tool);
void grinding5(char* machine, char* tool);
void drilling6(char* machine, char* tool);
void tapping26(char* machine, char* tool);

int orderNum = 1;
char* checkVar = "checking machine and tool";

int main() {
    <...>
    return 0;
}

void turning1(char* machine, char* tool) {
    __CPROVER_assert(orderNum == 1, "turning1 must be 1 operation");
    __CPROVER_assert((machine == "Тун" && tool == "2112-0013 Т15К6 ГОСТ 18880-73") ||
                    (machine == "Тчпу" && tool == "PCLNR 2020К 12НР"),
                    checkVar);
    orderNum = 5;
}

void grinding5(char* machine, char* tool) {
    __CPROVER_assert(orderNum == 5, "grinding5 must be 5 operation");
```

```

    __CPROVER_assert((machine == "КШ" && tool == "Круг 125x20x20 25А 16 СТ1"),
                    checkVar);
    orderNum = 6;
}

void drilling6(char* machine, char* tool) {
    __CPROVER_assert(orderNum == 6, "drilling6 must be 6 operation");
    __CPROVER_assert((machine == "Тун" && tool == "2301-3597-А1 ГОСТ 10903-77"),
                    checkVar);
    orderNum = 26;
}

void tapping26(char* machine, char* tool) {
    __CPROVER_assert(orderNum == 26, "tapping26 must be 26 operation");
    __CPROVER_assert((machine == "Тун" && tool == "2621-1223 ГОСТ 3266-81") ||
                    (machine == "Тчпу" && tool == "Т200- ХМ100DA-М8 С110") ||
                    (machine == "Тчпу" && tool == "Т200- ХМ100DA-М8 С145") ||
                    (machine == "Тчпу" && tool == "Т200- ХМ100DA-М8 С150"),
                    checkVar);
    orderNum++;
}

```

Если мы всё же попытаемся использовать ТФчпу (например, для нарезания резьбы метчиком) или указанное сверло во входных данных, то получим отрицательный результат проверки (см. ниже).

Входные данные:

Черновое точение1(varchar(50) machine “Тун”, varchar(50) tool “2112-0013 Т15К6 ГОСТ 18880-73”)

Предварительное шлифование5(varchar(50) machine “КШ”, varchar(50) tool “Круг 125x20x20 25А 16 СТ1”)

Сверление6(varchar(50) machine “Тун”, varchar(50) tool “860.1-1400-042А1-ММ”)

Нарезание резьбы метчиком26(varchar(50) machine “ТФчпу”, tool “Т200-ХМ100DA-М8 С150”)

Часть кода, использующая входные данные:

```

int main() {
    turning1("Тун", "2112-0013 Т15К6 ГОСТ 18880-73");
    grinding5("КШ", "Круг 125x20x20 25А 16 СТ1");
    drilling6("Тун", "860.1-1400-042А1-ММ ");
    tapping26("ТФчпу", " Т200- ХМ100DA-М8 С150");

    return 0;
}

```

Результат:

```

** Results:
[turning1.assertion.1] turning1 must be 1 operation: SUCCESS
[turning1.assertion.2] checking machine and tool: SUCCESS
[grinding5.assertion.1] grinding5 must be 5 operation: SUCCESS
[grinding5.assertion.2] checking machine and tool: SUCCESS
[drilling6.assertion.1] drilling6 must be 6 operation: SUCCESS
[drilling6.assertion.2] checking machine and tool: FAILURE
[tapping26.assertion.1] tapping26 must be 26 operation: SUCCESS
[tapping26.assertion.2] checking machine and tool: FAILURE

** 2 of 8 failed (2 iterations)
VERIFICATION FAILED

```

Объекты, (предмет) и методы исследования

Объектом исследования является система автоматизации технологической подготовки производства на мелкосерийном или единичном участке машиностроения.

Предметом исследования являются генерация множества технологических маршрутов обработки заготовок деталей, выбор рационального маршрута, проверка его на корректность, создание комплекта сопутствующей технологической документации.

Методология и методы исследования. Исследование задействует теорию сетецентрического управления производственным участком, теорию построения систем массового обслуживания для программы выбора рационального маршрута обработки, а также методы генерации кода и верификации для его проверки. Предметная область входных данных базируется на научных основах теории машиностроения, в частности, на сочетании модульного и группового подходов проектирования технологических процессов. Для создания прототипа программного комплекса использовались методы программной инженерии.

Результаты и их обсуждение

По результатам исследований группой разработчиков, в которую входил автор, были получены:

патент на изобретение №2702387 от 08.10.2019 «Способ автоматизированной технологической подготовки операционных карт мелкосерийного машиностроительного производства»;

свидетельства на две программы для ЭВМ:

- 1) №2020610865 от 21.01.20 «Автоматизированное рабочее место технолога мелкосерийного машиностроительного производства» (по заявке №2019667144 от 23.12.2019);
- 2) №2020610484 от 15.01.20 «Программа расчета оптимальной стратегии производства для одного или нескольких производственных параметров» (по заявке №2019667134 от 23.12.2019).

Результаты оценки технико-экономической эффективности внедрения

Внедрение разработанного прототипа было осуществлено на производственном участке ООО «Айрон» (г. Санкт-Петербург) в рамках технологического процесса производства детали «Толкатель». По оценкам представителей ООО «Айрон», благодаря использованию разработанных средств, в среднем (при апробации 7 различных технологических маршрутов обработки на трёх вариантах режущего инструмента), срок изготовления партии детали сократился на 5.8%, величина переменных затрат сократилась на 5.2%. Кроме того, на 10% сократилась погрешность обработки за счёт оптимального выбора режущего инструмента. Таким образом, можно утверждать, что результаты внедрения продемонстрировали:

- повышение эффективности производственного процесса за счет контроля и своевременной коррекции производственного графика и устранения «узких мест» на основе анализа различных технологических маршрутов обработки;
- сокращение производственных затрат за счёт выбора рациональных технологических маршрутов обработки и применяемых средств технологического оснащения на основе моделирования различных производственных сценариев;
- сокращение сроков проектирования технологических процессов и оформления комплектов технологической документации.

Заключение

В диссертационной работе рассмотрена проблема повышения эффективности технологической подготовки производства мелкосерийного и единичного производства. Предложенное решение проблемы основывается на дополнении основных функций автоматизированной системы технологической подготовки производства (ввод и сохранение данных, проектирование маршрутов обработки, выбор рационального маршрута по заданным критериям, постройка производственного расписания, формирование комплекта производственной документации) имплементацией алгоритма проверки технологического маршрута обработки заготовки детали на корректность. Разработанный прототип был успешно апробирован, показал положительные результаты на небольшом количестве изготовленных деталей. Поставленные задачи исследования для достижения его цели были решены в полном объёме.

В дальнейшем можно измерить эффективность устранения производственного брака от применения прототипа на большем периоде времени.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

DIGITAL MODELLING OF PRODUCTION ENGINEERING FOR METALWORKING MACHINE SHOPS / Котляров В.П., Толстолес А.А., Маслаков А.П. // Труды Института системного программирования РАН. 2019. Т. 31. № 3. С. 85-98.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НА СУДОРЕМОНТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ / Хрусталёва И.Н., Любомудров С.А., Ларионова Т.А., Толстолес А.А. // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 3. С. 86-96.

Повышение эффективности технологической подготовки единичного и мелкосерийного производства на основе имитационного моделирования (Improving the efficiency of technological preparation of single and small batch production based on simulation modeling) / Любомудров С.А., Хрусталёва И.Н., Толстолес А.А., Маслаков А.П. // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 669-677. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.669

Публикации в других изданиях

Automating preparation of small-scale production for reliable net-centric IoT workshop / Дробинцев П.Д., Котлярова Л.П., Воинов Н.В., Толстолес А.А., Маслаков А.П., Хрусталёва И.Н. // CEUR Workshop Proceedings (Vol. 2514, pp. 75–85). CEUR-WS.

Automation of technological preparation of single and small-scale production using simulation modeling / Хрусталёва И.Н., Любомудров С.А., Толстолес А.А. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 378). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/378/1/012060>

Implementation of reliable net-centric management of IoT industrial workshop for small-scale production / Чернооруцкий И.Г., Котляров В.П., Шьямасундар Р., Воинов Н.В., Толстолес А.А. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 497). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/497/1/012040>

Structural modelling and automation of technological processes within net-centric industrial workshop based on network methods of planning / Котляров В.П., Чернооруцкий И.Г., Дробинцев П.Д., Воинов Н.В., Толстолес А.А. // Lecture

Notes in Electrical Engineering (Vol. 484, pp. 475–488). Springer Verlag.
https://doi.org/10.1007/978-981-13-2375-1_60

Net-centric internet of things for industrial machinery workshop / Дробинцев П.Д., Черноруцкий И.Г., Котляров В.П., Котлярова Л.П., Толстолес А.А., Хрусталёва И.Н. // CEUR Workshop Proceedings (Vol. 2281, pp. 112–122). CEUR-WS.

Аспирант _____ Толстолес А.А.

(подпись)