

Г.С. Жетесова, Н.А. Савельева\*, Т.Ю. Никонова,  
В.В. Юрченко, А.А. Берг

Карагандинский технический университет им. А. Сагиновой,  
Караганда, Казахстан  
E-mail: \* n.a.savelyeva@gmail.com

---

## Разработка программного модуля для технологической подготовки производства единичных и мелкосерийных машиностроительных предприятий

---

**Аннотация.** В данной статье авторами представлен новый подход к оптимизации работы с помощью уменьшения трудозатрат на проектирование технологического процесса производства и полностью автоматическое составление сопутствующей документации в условиях единичного и мелкосерийного производства. Одним из вариантов решения построения эффективного мелкосерийного и единичного производства заключается в использовании автоматизации на разных уровнях производства, что соответствует парадигме Индустрии 4.0. Проблемным местом в организации мелкосерийного производства является время технологической подготовки производства и составление соответствующей документации. В ходе научной работы были реализованы алгоритмы формализации технологического маршрута производства, разработаны средства автоматической генерации технологического процесса производства, в том числе расчет диапазона значений стоимости и времени работы для отдельных методов обработки и целых технологических маршрутов и составление операционных карт для производства.

**Ключевые слова:** автоматизация производственных процессов, индустрия 4.0., формализация технологических процессов, технологическая подготовка производства.

DOI: [doi.org/10.32523/2616-7263-2023-144-3-122-133](https://doi.org/10.32523/2616-7263-2023-144-3-122-133)

---

### 1. Введение

Четвертая индустриальная революция, более известная как «Индустрия 4.0», получила свое название в 2011 году в рамках государственной стратегии развития экономики Германии путем создания автоматизированных, цифровых производств. Термин «Индустрия 4.0» подразумевает, что руководители предприятия не просто переосмысливают принцип конвейерной сборки, но и активно создают сеть машин, способных не только производить товары, но автономно изменять шаблоны производства в соответствии с новыми требованиями, не нанося вред эффективности [1].

1. Залогом успешной цифровизации Казахстана являются цифровые технологии в машиностроении – одном из наиболее сложных диверсифицированных сегментов промышленности. Трансформация деятельности машиностроительных предприятий обуславливает концепцию их цифровизации, заключающуюся в рациональном сочетании лучшего отечественного и зарубежного опыта функционирования предприятий и проектных организаций машиностроительного профиля. Цифровые технологии являются неотъемлемым элементом деятельности промышленных предприятий Казахстана, сохранения их интеллектуальной собственности. Посредством интегрирования

производственных процессов, оперирования большими данными и мониторинга всех производственных цепочек в регламенте онлайн можно повысить производительность в 2–5 раз, снизить операционные издержки в среднем на 20%. Достижению высоких результатов во многом способствуют прогресс информационных и производственных технологий, «Интернета вещей» и аналитики данных, освоение систем, базирующихся на искусственном интеллекте [2].

В рамках развития данных направлений толчок к развитию и внедрению получили промышленный интернет вещей (IIoT) и сети с сетевым управлением (СЦУ). Принцип работы подобных технологий заключается в следующем: с установленного оборудования (датчиков, исполнительных механизмов, человеко-машинных интерфейсов) осуществляется сбор информации, которая впоследствии позволяет компании приобрести актуальные и точные данные о состоянии предприятия. Полученная информация распространяется во все отделы, что помогает синхронизировать взаимодействие между сотрудниками. Собранные данные могут быть использованы для минимизации простоев, затрат, избыточного износа оборудования и инструмента [3].

Проблемным местом в работе мелкосерийного производства является время технологической подготовки производства и составление соответствующей документации.

В данной статье представлен подход к оптимизации работы с помощью уменьшения трудозатрат на проектирование технологического процесса производства и полностью автоматическое составление сопутствующей документации.

В ходе работы были реализованы алгоритмы формализации технологического маршрута производства, разработаны средства автоматической генерации технологического процесса производства, в том числе расчет диапазона значений стоимости и времени работы для отдельных методов обработки и целых технологических маршрутов и составление операционных карт для производства.

Принцип работы технологии заключается в следующем: с установленного оборудования (датчиков, исполнительных механизмов, человеко-машинных интерфейсов) осуществляется сбор информации, которая впоследствии позволяет компании приобрести актуальные и точные данные о состоянии предприятия. Полученная информация распространяется во все отделы, что помогает синхронизировать взаимодействие между сотрудниками. Собранные данные могут быть использованы для минимизации простоев, затрат, избыточного износа оборудования и инструмента [4].

Жизненный цикл изделия, производимого предприятием, делится на несколько этапов. Начинается всё со стадии НИР, в ходе которой проводятся работы поискового, теоретического и экспериментального характера, выполняемые с целью определения возможности создания новой продукции в определенные сроки. На стадии ОКР, одобренные в процессе НИР идеи, воплощаются в конструкторской и технологической документации на опытный образец, параллельно с этим производится конструкторская (КПП), технологическая (ТПП) и организационная подготовка производства и отработка конструкторских и технологических решений в опытно-экземплярном КПП – это совокупность процессов и работ, направленных на освоение новой конструкторской документации для серийного производства новой или усовершенствование старой продукции [5]. Данный процесс происходит в соответствии с Единой системой конструкторской документации (ЕСКД), в которой определены основные стадии КПП.

Характерной особенностью мелкосерийного или единичного производства является обширная номенклатура производимого продукта. Данный факт влечет за собой ряд проблем, которые усложняют автоматизацию. Ввиду наличия большого разнообразия продукции, порядка и способов обработки участки производства строятся по технологическому принципу, в каждом из них находится оборудование одной группы. Во время производства детали проходят через различные маршруты по участкам обработки, что означает отсутствие устойчивого технологического процесса и требует дополнительного планирования маршрута производства, контроля качества обработки и контроля

продвижения детали по операциям. Поскольку в единичном производстве производимые заказы могут отличаться, то разработка детального ТПП занимает длительное количество времени или вообще не производится. Как правило, устанавливаются межцеховые технологические маршруты с указанием групп необходимого оборудования. Данный подход организации процесса затрудняет нахождение рационального построения логистики на предприятии. Использование универсального оборудования и инструмента, которое может требовать больше времени для перехода на новый ТП и подразумевает наличие высококвалифицированного персонала.

Специфика единичного и мелкосерийного производства приводит к нерациональному использованию материалов и инструмента. Изготовление специальной оснастки для уменьшения припусков на механическую обработку экономически невыгодно, поэтому на обработку заготовки приходят со значительными припусками, что приводит к увеличению количества отходов производства и снижению коэффициента использования материалов. Из-за сложности планирования производства и отсутствия объективной статистики за предыдущие периоды возникают проблемы материально-технического снабжения. Широкая номенклатура изготавливаемой продукции делает процесс планирования снабжения предприятия очень сложным, из-за чего на предприятии накапливаются большие запасы материала и инструмента, что замораживает оборотные средства.

ТПП - длительный и сложный процесс, подразумевающий унификацию изготовления изделий, и данный подход эффективен для серийного производства, в котором на подготовку тратится значительное количество времени. Для единичного или мелкосерийного производства такой подход не эффективен, так как существенно задерживает выпуск продукции [6].

Таким образом, целью данной работы является разработка возможности снижения затрат путем снижения времени на ТПП единичных и мелкосерийных производств. Однако нужно учесть, что попытки уменьшить время на выполнение заказа за счет уменьшения качества и детализации ТПП могут привести к увеличению времени производства, так как все неточности в описании технологических маршрутов придется решать на месте, а значит могут возникнуть проблемы с логистикой, своевременным снабжением цехов расходным материалом и инструментом и т.д. Ситуацию осложняет то, что при попытке составления прогноза на следующие периоды и резервировании различных ресурсов также не обеспечит должный результат.

## 2. Методы исследования

Автоматизация проектирования осуществляется в системах типа САПР (система автоматизированного проектирования). С помощью современных распределенных систем вычисления, телекоммуникационных технологий, облачных средств вычисления и хранения данных САПР позволят обеспечить эффективное взаимодействие с внешними программно-аппаратными комплексами автоматизации производства [7].

Для решения проблемы взаимодействия компонентов самого САПР, таких, как САЕ, САД и САМ, были разработаны системы управления проектными данными под названием PDM (Product Data Management). Системы PDM либо входят в поставку вместе с САПР, либо существуют самостоятельно и могут работать с различными САПР. Разработка технологического процесса всегда заканчивается составлением и оформлением ряда документов.

Документация различается по составу и форме в зависимости от ТП (единичный, типовой или групповой), типа производства, степени компьютеризации, задействования ручного труда и автоматизации предприятия. Каждый из выше указанных видов технологических по-своему влияет на степень детализации информации и предусматривает различное изложение содержания операции и комплектность документов.

В ходе анализа существующих систем автоматизации производства, относящихся к различным классам и работающих на разных уровнях, была поставлена задача создания системы, которая совмещала бы функциональность систем типа MES (контроль производства, отслеживание графиков, планирование и оптимизация) и систем подготовки производства (техпроцессы, подготовка оборудования, разработка ТМ, подготовка документации).

Для решения поставленной задачи предлагается применение трехуровневого участка с сетцентрическим управлением. Первый уровень управления подразумевает управление технологическими макрооперациями (МО) станков и роботов и осуществляется сбор данных от объектов сети. Данные характеризуют состояние объекта, что позволит элементам второго уровня контролировать условия выполнения каждой МО. Каждая такая операция запускает автоматическое выполнение конкретной последовательности более мелких технологических операций, управляемых встроенным контроллером любого объекта сети.

Второй уровень, или уровень управления и контроля технологическими процессами, описанными в виде последовательностей МО. Данный уровень обеспечивает управление спланированными последовательностями МО, выполняемых станками, роботами и автоматизированным складом. Кроме того, он транслирует на третий уровень информацию о состоянии сетевых объектов и их окружении.

Третий уровень – уровень многокритериальной иерархической оптимизации и планирования производственных процессов. На этом уровне осуществляется анализ данных, на основе которых осуществляется динамическое планирование работы цеха. При планировании работы происходит оптимизация выполнения МО объектами производственной сети, которая учитывает возможности параллельного выполнения МО, их синхронизацию, области допустимых значений параметров состояний, условия надежного выполнения плана и т.п. Так как для каждого режима работы каждого объекта существуют конкретные критерии успешности, многокритериальной иерархической оптимизации и планирования производственных процессов. На этом уровне осуществляется анализ данных, на основе которых осуществляется динамическое планирование работы цеха. При планировании работы происходит оптимизация выполнения МО объектами производственной сети, которая учитывает возможности параллельного выполнения МО, их синхронизацию, области допустимых значений параметров состояний, условия надежного выполнения плана и т.п., так как для каждого режима работы каждого объекта существуют конкретные критерии успешности.

В рамках выполнения проекта разработан специальный модуль, который по своей функциональности сопоставим с системами типа CAPP и возможностью полной автоматической генерации документации под ТМ. Чтобы программный продукт был максимально гибким, умел в короткие временные промежутки адаптироваться к новым требованиям, нужно произвести тщательное планирование архитектуры на разных уровнях детализации.

В технической литературе, например, С. Маркконелл – Совершенный код [8], выделяется несколько уровней детализации. Разделение на уровни детализации необходимо для разделения модулей и компонентов системы, а также демонстрации высокоуровневой архитектуры, то есть обеспечение постепенного погружения в детали реализации (рисунок 1).

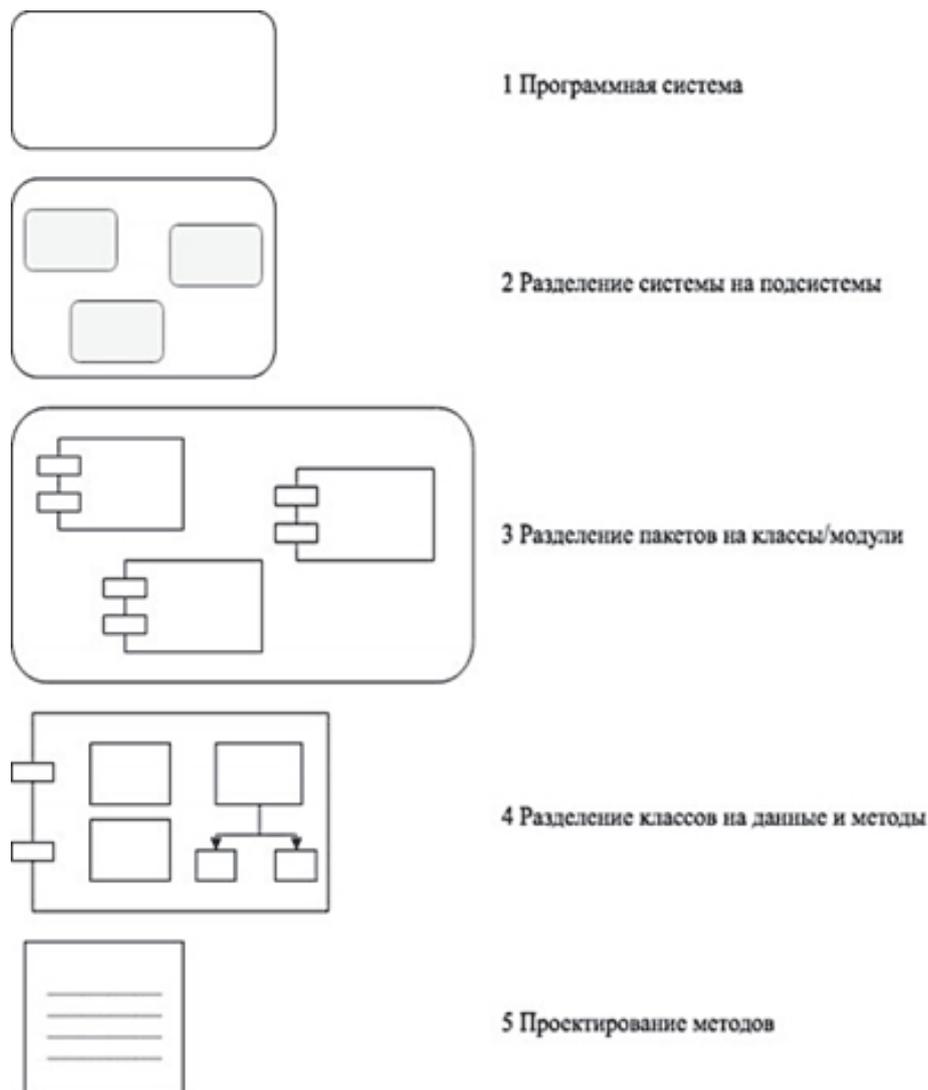


Рисунок 1. Классификация уровней детализации

Общую структуру подсистем модулей можно представить в виде схемы взаимозависимых модулей (рисунок 2):

– Модуль инициализации и формализации данных. На уровне инициализации происходит разработка графической модели в системах проектирования CAD, после чего данные с чертежа технологом в программу и сохраняются в базу данных.

– Модуль группировки данных. За счет структуры базы данных, которая отражает весь цикл производства, происходит группировка и разбиение данных.

– Модуль верификации. Верификация вариантов ТМ в условиях изменений логистического и ресурсного обеспечения. Генерация корректного множества трассы в MSC формате.

– Модуль конкретизации оценок характеристик ТМ. На данном этапе происходит конкретизация ТМ в диапазоне допустимых значений. Оценка вариации времени и стоимости реализации технологического маршрута и одного метода обработки. Выбор субоптимального варианта и ТМ, удовлетворяющего критериям.

– Модуль модулирования ТП. Инициализация состояния ресурсов цеха для модели ТП и распределения их для выполнения нескольких ТМ. Цифровое моделирование ТП, оценка стоимости и времени выполнения заказов, оценка простоя оборудования.

Выбор субоптимального варианта ТП, если происходит расхождение с иерархией критериев, происходит повторное моделирование с изменением приоритетов у ТМ. На заключительном этапе модуль генерирует план-график работ цеха на данный ТП.

– Модуль генерации ТП и технологической документации. На данном этапе производится извлечение ТМ из производственной базы данных и на их основе производит генерацию технологической документации.

– Модуль генерации программ ЧПУ станков. Генерация программ для станков в g – кодах.

– Модуль мониторинга состояния ТП. Мониторинг состояния ТП посредством опроса цеховых датчиков и автоматических устройств для регистрации персонала.

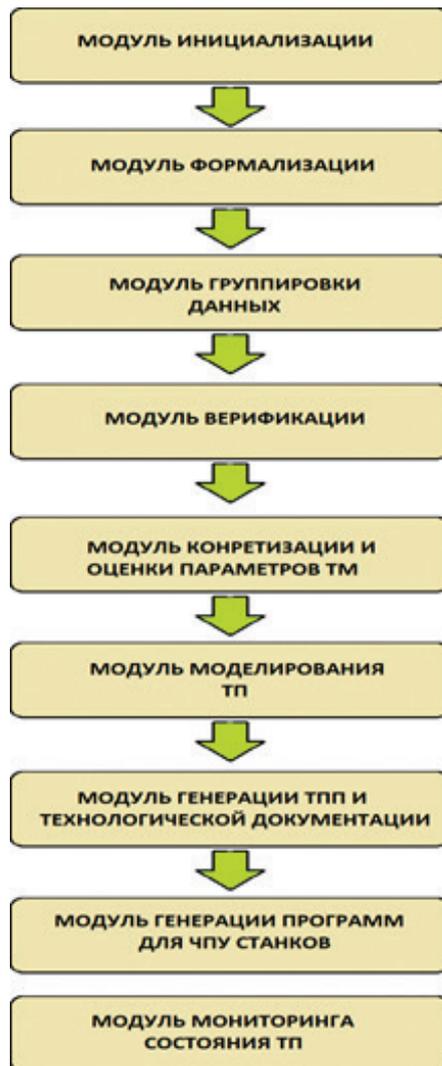


Рисунок 2. Схема модулей

В ходе автоматизации ТПП происходит обработка большого объёма данных. Эффективность процесса проектирования во многом зависит от правильности подхода представления и хранения информации.

При создании программного продукта одной из наиболее важных и первостепенных задач является выбор средств реализации: выбор языков программирования, фреймворков, библиотек и другого инструментария. Выбор языка программирования напрямую влияет на дальнейшую разработку и архитектуру проекта. И предпочтение в выборе языка

программирования будет отдано тому языку, который поддерживается в операционных системах Windows и Linux, которые наиболее часто встречаются на предприятиях. Таким образом, выбор пал на язык программирования Java. Данный язык позволяет писать платформонезависимые приложения и развертывать приложения без дополнительных сложностей. Кроме того, язык активно развивается, компания Oracle постоянно добавляет новые возможности, оптимизирует работу JVM.

Одной из важных функций систем типа САРР является возможность рассчитывать время на операцию. Для реализации такой функции авторами статьи предлагается решение нескольких проблемных вопросов:

1. В каком виде хранить формулы расчета, чтобы пользователь мог быстро добавлять формулы и значения к ним без изменения кода программы?

2. Как производить расчет значений, подставляя значения в формулы?

Для решения первого вопроса предлагается использование файлов JSON (JavaScript Object Notation) – формат обмена данными, который удобен для восприятия и написания как человеком, так и машиной и имеет поддержку во многих языках программирования. JSON основан на структурах данных и может представлять из себя коллекцию пар ключ/значение, которые имеют различную реализацию в разных языках программирования (объект, структура, словарь, хэш и т.д.) или упорядоченный список, который может быть представлен массивом, списком, вектором и т.д. (рисунок 3).

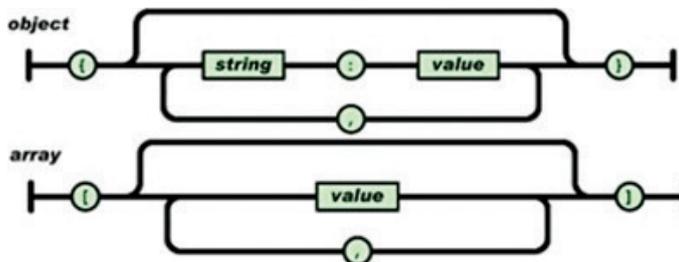


Рисунок 3. Схема устройства JSON

Таким образом, мы получаем два вида JSON: файл с формулами (рисунок 4) и файлы со значениями для них, их хранение происходит в БД, причем файл с формулами присутствует в одном экземпляре и доступен для любого проекта.

```
{
  "formulas": [
    {
      "TurningBP":
      {
        "i": "h / t",
        "n": "(1000 * v) / (pi * d)",
        "l_de": "(Dmax - Dmin) / 2",
        "L_2": "l_de + l_1 + l_2",
        "L_1": "l_de + l_1 + l_2",
        "T_2": "L_2 / (n * s) * i_2",
        "T_1": "L_1 / (n * s) * i_1",
        "T_m": "T_1 + T_2",
        "T_method": "T_m + (20 * T_m / 100)",
        "Cost_work_on_machine": "T_method * W_h",
        "Cost_method": "Cost_work_on_machine + Cost_Ri"
      }
    }
  ],
}
```

Рисунок 4. Файл JSON с формулами

Файлы со значениями имеют привязку к ТМ или отдельному методу обработки, входящего в него. Таким образом, при получении данных из БД они имеют строгую структуру, и мы имеем возможность совершать расчёт характеристик как для отдельных методов обработки, так и для всего ТМ.

Для решения второго вопроса, подстановки значений в формулы, была выбрана библиотека Exp4j - библиотека, реализующая изобретенный Эдсгером Дейкстрой так называемый «Алгоритм сортировочной станции» (Shunting-yard algorithm). Алгоритм использует свойство, по которому в обратной польской записи меняется только порядок и место операции в выражении, и пересортировываются операции в порядке выполнения действий (рисунок 5) [9]:

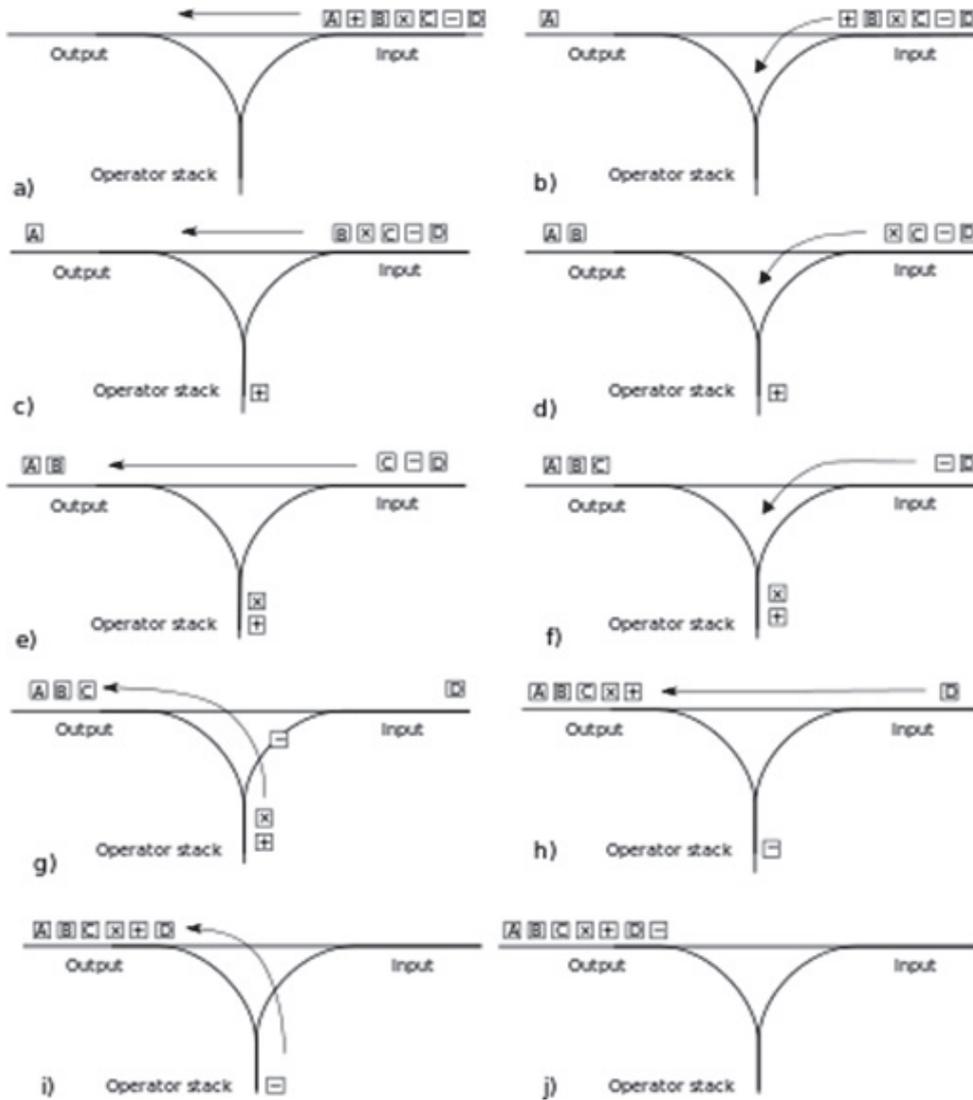


Рисунок 5. Схема алгоритма

Алгоритм рассматривает элементы выражения по очереди, слева направо.

Операнды идут прямо в выходную очередь.

Если элемент – оператор, то:

1. Если стек не пуст, и его верхний элемент – более приоритетный оператор, то он прикладывается из стека в выходную очередь, оператор из выражения идет в очередь. Открывающая скобка идет в стек.

2. Если элемент – закрывающая скобка, то:
  - пока на вершине стека не покажется открывающая скобка, переключать операторы из стека в выходную очередь;
  - удалить открывающую скобку из стека.
3. Если в выражении закончились элементы, переключать операторы из стека в выходную очередь, пока стек не опустеет.

В качестве инструментов реализации было принято решение использовать открытую библиотеку Apache POI, главной задачей которой является создание интерфейсов для работы с различными форматами файлов на основе стандартов Office Open XML (OOXML) и формата Microsoft OLE 2 Compound Document (OLE2) [10].

Чтобы сделать код генерации универсальным для любого вида документации, был создан набор шаблонов карт, заполненных специально введенным набором обозначений. Символы % (процент), # (решетка) и ^ (циркумфлекс). Процент отвечает за обозначение одиночной ячейки для внесения информации, решетка обозначает диапазон ячеек, используется как для определения логической части документа, в которую будет вноситься информация, циркумфлекс отвечает за обозначения столбца, который будет использоваться. Слова между специальными символами указывают программе, какую по смыслу информацию будет содержать поле.

### 3. Выводы

В статье рассмотрена проблема технологической подготовки мелкосерийного или технологического производства, для которой характерны такие проблемы, как дисбаланс трудоемкости подготовки производства и реализации экспериментального продукта.

Система модулей, разработанная в процессе работы, совмещает в себе функции систем подготовки производства (техпроцессы, подготовка оборудования, разработка маршрутов, подготовка операционных карт) и MES (контроль производства, отслеживания графиков, планирования и оптимизация).

Она не является прямым конкурентом крупных узконаправленных продуктов, которые имеют значительную стоимость и в большинстве случаев не доступны для малого и среднего бизнеса, данный проект предлагает частное решение ряда машиностроительных задач при малой трудоемкости использования.

В ходе разработки модуля генерации ТП и сопутствующей документации были решены все поставленные задачи. Данный блок значительно сократит время и трудоёмкость работы технолога на предприятии, что позволит увеличить доход и пропускную способность предприятия.

В результате этапа работы разработан программный модуль, который позволяет:

1. Производить автоматическую разработку технологических процессов мелкосерийного и единичного производств.
2. Создавать документации в виде маршрутной и операционной карты с точным описанием всех переходов, вспомогательного и измерительно оборудования.
3. Возможность вручную редактировать созданные документы.
4. Расчет стоимости и времени обработки как для одного ТМ, так и для конкретных методов обработки. Данные характеристики позволяют на следующих этапах работы системы произвести оптимизацию производственных процессов.

### Подтверждения

The article was executed within the framework of implementation of IRN grant AP14972804 «Development of software for technological preparation of production on the basis of the formalized design methodology» (Head N.A. Savelyeva).

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант No AP14972804).

## Список литературы

1. Шваб К. Четвертая промышленная революция. – М.: Эскмо. – 2017. – 208 с.
2. Аубакирова Г.М., Исатаева Ф.М., Куатова А.С. Цифровизация промышленных предприятий Казахстана: потенциальные возможности и перспективы // Вопросы инновационной экономики. – 2020. – Том 10. – № 4. – С. 2251-2268. – doi: 10.18334/vines.10.4.111211.
3. Drobintsev P.D., Kotlyarova L.P., Voinov N.V., Tolstoles A.A., Maslakov A.P., Khrustaleva I.N. Automating preparation of small-scale production for reliable net-centric IoT workshop // 6th International Conference Actual Problems of System and Software Engineering 2019. – 2019. – Т. 2514. – С. 75-85.
4. Lyubomudrov S.A., Khrustaleva I.N., Tolstoles A.A., Maslakov A.P. Improving the efficiency of technological preparation of single and small batch production based on simulation modeling // Journal of Mining institute. – 2019. Т. 260, №6. С 669-677. DOI:10.31897.
5. Элизарова О. И. Организация производства и менеджмент. – М.: МГУП. – 2010. – 265 с.
6. Khrustaleva I.N., Lyubomudrov S.A., Chernykh L.G., Stepanov S.N., Larionova T.A. Automating production engineering for custom and small-batch production on the basis of simulation modeling // Journal of Physics: Conference Series: International conference on innovations, physical studies and digitalization in mining engineering 2020. – 2020. – Т. 1753 (2021), №1, doi: 10.1088/1742-6596/1753/1/012047.
7. Баранова И. В., Зайцев А. В. Реинжиниринг как инструмент модернизационной стратегии предприятия // Вопросы инновационной экономики. – 2016. Т. 6. № 3. – С. 219–238. DOI: 10.18334/vines.6.3.36967.
8. . McConnel S. Code complete. Second edition. Издательство «Microsoft Press». – 2004 г. – 857 с.
9. Документация к exp4j. [Электронный ресурс] URL: <https://www.objecthunter.net/exp4j/> (дата обращения: 10.03.2023).
10. Гаврилов Д.А. Управление производством на базе стандарта MRP II. – СПб.: Питер. – 2005. – 416 с.

## Бірыңғай және шағын машина жасау кәсіпорындарының өндірісін технологиялық дайындаудың бағдарламалық модулін әзірлеу

**Г.С. Жетесова, Н.А. Савельева, Т.Ю. Никонова, В.В. Юрченко, А.А. Берг**

*Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан*

**Аңдатпа.** Бұл мақалада авторлар өндірістің технологиялық процесін жобалауға кететін еңбек шығындарын азайту және бір және шағын сериялы өндіріс жағдайында ілесіп құжаттаманы толығымен автоматты түрде құрастыру арқылы жұмысты оңтайландырудың жаңа тәсілін ұсынды. Тиімді шағын және бір өндірісті құруды шешудің бір нұсқасы-4.0 индустриясының парадигмасына сәйкес келетін өндірістің әртүрлі деңгейлерінде автоматтандыруды қолдану. Шағын сериялы өндірісті ұйымдастырудағы проблемалық орын өндірісті технологиялық дайындау уақыты және тиісті құжаттаманы жасау болып табылады. Ғылыми жұмыс барысында өндірістің технологиялық бағытын рәсімдеу алгоритмдері іске асырылды, өндірістің технологиялық процесін автоматты түрде генерациялау құралдары әзірленді, оның ішінде жекелеген өңдеу әдістері мен тұтас технологиялық маршруттар үшін жұмыс құны мен уақыты мәндерінің диапазонын есептеу және өндіріс үшін операциялық карталарды жасау.

**Түйін сөздер:** өндірістік процестерді автоматтандыру, индустрия 4.0, технологиялық процестерді рәсімдеу, өндірісті технологиялық дайындау.

## Development of a software module for technological preparation of production of single and small-scale machine-building enterprises

G. Zhetessova, N. Savelyeva, T. Nikonova, V. Yurchenko, A. Berg

*Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan*

**Abstract.** In this article, the authors present a new approach to optimizing work by reducing labor costs for the design of the technological process of production and fully automatic compilation of related documentation in the conditions of single-piece and small-scale production. One solution to building efficient small-batch and single-piece production is to use automation at different levels of production, which is in line with Industry 4.0 paradigm. A problematic place in the organization of small-scale production is the time of technological preparation of production and the preparation of relevant documentation. In the course of scientific work, algorithms for formalizing the technological route of production were implemented, tools were developed for automatically generating the technological process of production, including the calculation of the range of values of cost and operating time for individual processing methods and entire technological routes and the compilation of operational maps for production.

**Keywords:** automation of production processes, industry 4.0., formalization of technological processes, technological preparation of production.

### References

1. Shvab K. Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya [The fourth industrial revolution] (Eskmo, M, 2017, 208 p) [in Russian].
2. Aubakirova G.M., Isataeva F.M., Kuvatova A.S. Cifrovizaciya promyshlennyh predpriyatij Kazakhstana: potencialnye vozmozhnosti i perspektivy [Digitalization of industrial enterprises in Kazakhstan: potential opportunities and prospects], Voprosy innovacionnoj ehkonomiki [Issues of innovative economics], Moscow, 2020. 10(4), P2251-2268. DOI: 10.18334/vinec.10.4.111211.
3. Drobintsev P.D., Kotlyarova L.P., Voinov N.V., Tolstoles A.A., Maslakov A.P., Khrustaleva I.N. Automating preparation of small-scale production for reliable net-centric IoT workshop // 6th International Conference Actual Problems of System and Software Engineering 2019. – 2019. – T. 2514. – C. 75-85.
4. Lyubomudrov S.A., Khrustaleva I.N., Tolstoles A.A., Maslakov A.P. Improving the efficiency of technological preparation of single and small batch production based on simulation modeling // Journal of Mining institute. – 2019. T. 260, №6. C 669-677. DOI:10.31897.
5. Elizarova O. I. Organizatsiya proizvodstva i menedzhment [Organization of production and management] (MGUP, M, 2010, 265 p) [in Russian].
6. Khrustaleva I.N., Lyubomudrov S.A., Chernykh L.G., Stepanov S.N., Larionova T.A. Automating production engineering for custom and small-batch production on the basis of simulation modeling // Journal of Physics: Conference Series: International conference on innovations, physical studies and digitalization in mining engineering 2020. – 2020. – T. 1753 (2021), №1, DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012047.
7. Baranova I. V., Zaytsev A. V. Reinzhiniring kak instrument modernizatsionnoy strategii predpriyatiya [Reengineering as a tool for the modernization strategy of an enterprise], Voprosy innovatsionnoy ekonomiki [Issues of innovative economics], Moscow, 2016. 6(3), P. 219–238. DOI: 10.18334/vinec.6.3.36967.
8. McConnell S. Code complete. Second edition (Microsoft Press, 2004, 857 p).
9. Documentation exp4j. [Electronic resource]. Available at: <https://www.objecthunter.net/exp4j> (Accessed: 10.03.2023).
10. Gavrilov D.A. Upravleniye proizvodstvom na baze standart MRP II [Production management based on the MRP II standard] (Piter., SPb, 2005, 416 p) [in Russian].

### Сведения об авторах:

**Г.С. Жетесова** – д.т.н., профессор, Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан.

**Н.А. Савельева** – постдокторант, преподаватель, Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан.

**Т.Ю. Никонова** – к.т.н., доцент, Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан.

**В.В. Юрченко** – PhD, заведующий кафедрой, Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан.

**А.А. Берг** – докторант, Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан.

**Г.С. Жетесова** – т.ғ.д., профессор, Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Н. Назарбаев даң., 56, Қарағанды, Қазақстан.

**Н.А. Савельева** – постдокторант, оқытушы, Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Н. Назарбаев даң., 56, Қарағанды, Қазақстан.

**Т.Ю. Никонова** – т.ғ.к., доцент, Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Н. Назарбаев даң., 56, Қарағанды, Қазақстан.

**В.В. Юрченко** – PhD, кафедра меңгерушісі, Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Н. Назарбаев даң., 56, Қарағанды, Қазақстан.

**А.А. Берг** – докторант, Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Н. Назарбаев даң., 56, Қарағанды, Қазақстан.

**G. Zhetessova** – Doctor of Technical Sciences, Professor, A. Saginov Karaganda Technical University, 56 N. Nazarbayev Ave., Karaganda, Kazakhstan.

**N. Savelyeva** – postdoc, A. Saginov Karaganda Technical University, 56 N. Nazarbayev Ave., Karaganda, Kazakhstan.

**T. Nikonova** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, A. Saginov Karaganda Technical University, 56 N. Nazarbayev Ave., Karaganda, Kazakhstan.

**V. Yurchenko** – PhD, Head of Department, A. Saginov Karaganda Technical University, 56 N. Nazarbayev Ave., Karaganda, Kazakhstan.

**A. Berg** – PhD student, A. Saginov Karaganda Technical University, 56 N. Nazarbayev Ave., Karaganda, Kazakhstan.