

УДК 004.942

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.30.3.001](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.001)

## Программный комплекс имитационного моделирования сложноструктурированных реконфигурируемых объектов на основе моделей типовых производственных систем

Д.П. Лащенко, В.Л. Бурковский

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,  
Воронеж, Российская Федерация

**Резюме:** В настоящее время в сфере промышленного производства происходит постепенный переход к новому этапу развития, названному Индустрия 4.0. Основная концепция была впервые представлена на выставке в Ганновере в 2011 году. Основным процессом на промышленном заводе по концепции Индустрии 4.0 – цифровое преобразование физической производственной системы в реконфигурируемую цифровую. Реконфигурируемые технологические системы являются последним достижением в развитии производственной системы. Важнейшими характеристиками реконфигурируемых производственных систем являются высокая адаптивная способность аппаратных и программных компонентов для реакции на постоянно меняющиеся рыночные требования к типу и количеству продуктов. Представленный в данной работе программный комплекс предназначен для имитационного моделирования сложноструктурированных систем. К области применения данного комплекса преимущественно относятся реконфигурируемые производственные системы, обеспечивающие выпуск сложной технической продукции с высокими конструктивными и качественными показателями, включающей в себя широкую номенклатуру компонентов и параметров. В основу программного комплекса положено формализованное описание производственной системы как многоканальной многофазной системы массового обслуживания (СМО). При этом моделирование объектов строится на базе типовых моделей производственных систем обработки и сборки. Программный комплекс разработан на языке объектно-ориентированного программирования JAVA с применением инструментальной среды имитационного моделирования AnyLogic.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, реконфигурируемая производственная система, сложноструктурируемый объект, программный комплекс, оптимизация, система массового обслуживания, AnyLogic, система поддержки принятия решений.

**Для цитирования:** Лащенко Д.П., Бурковский В.Л. Программный комплекс имитационного моделирования сложноструктурированных реконфигурируемых объектов на основе моделей типовых производственных систем. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(3). Доступно по: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/LashchenovBurkovsky\\_3\\_20\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/LashchenovBurkovsky_3_20_1.pdf) DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.001.

## The software package for simulation of complex structured reconfigurable objects based on models of typical manufacturing systems

D.P.Lashchenov, V.L. Burkovsky

FSBE of HE "Voronezh State Technical University", Voronezh, Russian Federation

**Abstract:** Currently, in the field of industrial production, there is a gradual transition to a new stage of development, called Industry 4.0. The basic concept was first presented at the 2011

Hannover exposition. The main process in an industrial plant according to the Industry 4.0 concept is the digital transformation of a physical manufacturing system into a reconfigurable digital one. Reconfigurable manufacturing systems are the latest advancement in production system development. The most important characteristics of reconfigurable manufacturing systems are the high adaptability of hardware and software components to respond to constantly changing market requirements for the type and quantity of products. The software package presented in this paper is intended for simulation of complex-structured systems. The application area of this package mainly includes reconfigurable manufacturing systems that provide the production of complex technical products with high constructive and quality indicators, comprising a wide range of components and parameters. The software package is based on a formalized description of the manufacturing system as a multichannel multiphase queuing system. At the same time, object simulation is based on typical models of working and assembly systems. The software package is developed in the object-oriented programming language JAVA using the AnyLogic simulation environment.

**Keywords:** simulation, reconfigurable manufacturing system, complex structured object, software package, optimization, queuing system, AnyLogic, decision support system.

**For citation:** Lashchenov D.P., Burkovsky V.L. Program package for simulation of complex-structured reconfigurable objects based on models of typical manufacturing systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(3). Available from: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/LashchenovBurkovsky\\_3\\_20\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/LashchenovBurkovsky_3_20_1.pdf) DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.001 (In Russ).

## Введение

В настоящее время практически во всех отраслях промышленности можно выделить следующие основные тенденции развития. Во-первых, происходит активный рост уровня автоматизации и компьютеризации производства, внедрение интегрированных систем управления на всех уровнях, охватывающих все подразделения и службы предприятия, начиная от исполнительных механизмов технологических объектов и заканчивая целым предприятием. Во-вторых, рыночная экономика, широкий спектр быстроменяющихся потребительских запросов и непрекращающийся научно-технический прогресс диктуют необходимость перехода от массового производства стандартизированных товаров узкого номенклатурного ряда к поточному изготовлению широкого спектра персонализированной продукции с высокой вариативностью конструктивных параметров и набором опций, удовлетворяющими индивидуальным запросам заказчиков. И, наконец, крайне важным моментом является внедрение и развитие концепций «бережливого» и «умного» производства, призванных обеспечить высокую степень адаптации производственных систем к изменяющимся внешним условиям за счет перекомпоновки топологии технологических объектов, минимизации всех видов производственных потерь, не создающих ценности для конечного потребителя, интеграции всех участвующих в процессе элементов в единое информационное пространство, управляемое с помощью систем поддержки принятия решений. Особенно актуальными данные задачи становятся в случае рассмотрения реконфигурируемых производственных систем, выпускающих технически сложную многокомпонентную продукцию специального назначения с высокими требованиями к качеству и техническим характеристикам [1].

Интеллектуальные системы поддержки принятия решений предназначены для осуществления поиска оптимальных решений многокритериальных задач в сложных системах. Одной из ключевых составляющих таких систем является создание

«цифрового двойника» объекта, то есть его компьютерной модели, позволяющей производить анализ функционирования объекта на основании сбора данных в реальном времени, а также прогнозирование его дальнейшего поведения и поиск оптимального решения задачи управления из множества альтернатив [2].

Поскольку формализованное описание и оптимизация реконфигурируемых производственных систем с помощью традиционных аналитических методов математического программирования и теории расписаний является крайне неэффективным ввиду большого количества информационных потоков, сложной нестационарной структуры, множества сложноформализуемых нелинейных и стохастических функциональных зависимостей между звеньями системы, наиболее целесообразно применять в данном случае дискретные динамические имитационные модели на основе теории массового обслуживания [3]. Подобные модели наилучшим образом воспроизводят логику функционирования технологических объектов и движения материальных потоков, позволяют производить статистический анализ работы системы по результатам многократных виртуальных «прогонов» и найти оптимальное соотношение параметров согласно заданным технико-экономическим критериям.

Однако стоит отметить, что имитационные модели сложноструктурированных объектов обладают значительной вычислительной сложностью с точки зрения необходимых для их реализации машинных ресурсов, что ограничивает возможность эффективного их использования, в том числе в контуре управления сложными производственными системами [4]. Это требует разработки новых подходов к структурной организации имитационных моделей, обеспечивающих значительное сокращение, в условиях их практического использования, временных ресурсов и ресурсов памяти.

В данной работе предлагается программный комплекс имитационного моделирования сложноструктурированных реконфигурируемых объектов на основе моделей типовых производственных систем. В его основу положен модульный принцип структурной организации модели, характеризуемый выделением двух базовых классов моделей обработки и сборки с использованием обобщенных атрибутов, описывающих взаимодействие материальных потоков в рамках производственной системы.

## **Материалы и методы**

### **Структура программного комплекса**

Структура разработанного программного комплекса представлена на Рисунке 1. В основу созданного программного комплекса положено формализованное описание производственной системы как многоканальной многофазной системы массового обслуживания [5]. При этом структура универсальной модели производственной системы создается на базе типовых моделей систем обработки и сборки. Модель реализована в инструментальной среде имитационного моделирования AnyLogic. Все элементы и подсистемы создаваемых моделей являются классами JAVA, что позволяет, используя структуру базовых объектов и принцип наследования, создавать новые объекты со схожей структурой, но своими особенностями.

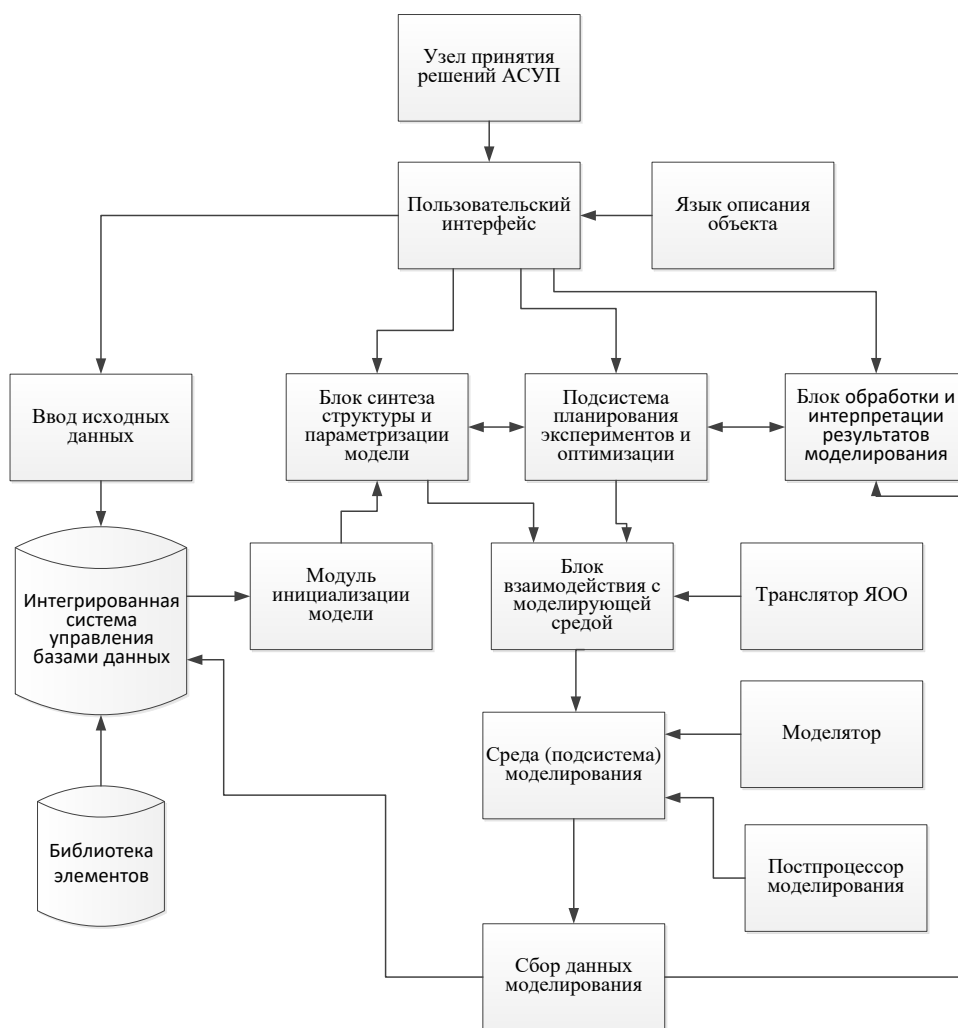


Рисунок 1 – Структура программного комплекса имитационного моделирования  
 Picture 1 – The structure of the software package for simulation

*Узел принятия решений АСУП* является центральным диспетчерским пунктом производственной системы, осуществляющим контроль и управление технологическими процессами с использованием системы поддержки принятия решений на основе программного комплекса.

*Пользовательский интерфейс* является графической оболочкой программного комплекса, посредством которой осуществляется взаимодействия оператора с программными модулями системы.

*Язык описания объекта* или язык моделирования является наглядной для пользователя интерпретацией моделируемого объекта в виде графических отображений различных блоков, элементов, функций, естественным образом отражающих структуру и особенности функционирования реального объекта.

*Блок синтеза структуры и параметризации* выполняет роль «конструктора» модели производственной системы, формирует ее общую иерархическую структуру, а также ее параметры или переменные состояния.

*Модуль ввода* исходных данных позволяет пользователи задать условия функционирования системы через набор исходных данных.

*Интегрированная система управления базами данных (СУБД)* отвечает за хранение библиотек моделей компонентов графических представлений, а также составленных пользователем моделей. Базы разделяются на справочные и рабочие.

СУБД обеспечивает поиск и подключение моделей компонентов, запрашиваемых пользователем через графический интерфейс; обновление, замену и удаление моделей; расширение библиотек за счет ввода новых моделей.

*Модуль инициализации* на основе данных СУБД задает все начальные условия запуска модели, формируя тем самым детализацию всех ее параметров.

С помощью *подсистемы планирования экспериментов и оптимизации* оператор создает алгоритм и методику проведения имитационных прогонов модели, исходя из поставленных задач управления и анализа. При этом это может быть как простая симуляция с заданным количеством итераций при статических значениях параметров, так и сложные эксперименты (оптимизация, варьирование параметров, сравнение прогонов, Монте-Карло, анализ чувствительности, калибровка и т.д.).

*Блок взаимодействия с моделирующей средой* осуществляет настройку параметров запуска имитационного эксперимента, начальное и конечное время моделирования, скорость моделирования, максимальное количество итераций, управление ходом моделирования, переключение между элементами графического отображения хода процесса и результатов моделирования.

*Транслятор языка описания объекта (ЯОО)* преобразует исходное описание проекта в формат, пригодный для моделирования. В случае, если язык описания объекта графический, транслятор с этого языка является частью графического интерфейса.

*Среда моделирования* является динамическим ядром программного комплекса, в котором осуществляются все машинные вычисления в ходе выполнения имитационного моделирования, и включает в себя модельатор и постпроцессор моделирования.

*Модельатор* – специальная управляющая программа моделирования, выполняющая операции численного интегрирования («Simulation»). На модельатор возлагаются следующие функции:

- установка начальных условий и значений сигналов на входах моделируемой схемы;
- управление модельным временем по принципу Dt или Dz, а при моделировании гибридных схем использование одновременно обоих принципов;
- интерфейс с пользователем по ходу модельного эксперимента, а также выдача запросов и диагностических сообщений.

Для вывода, наблюдения и обработки результатов моделирования используется программа, называемая *постпроцессором моделирования*.

*Модуль сбора данных моделирования* выполняет запись результатов функционирования имитационной модели (количество готовых изделий, среднее время изготовления одного изделия, загрузки рабочих ресурсов и т.п.) в базу данных результатов экспериментов. Степень детальности сохраняемой информации определяется задачами обработки результатов вычислительных экспериментов, решаемых в блоке обработки результатов.

*Блок обработки и интерпретации результатов моделирования* производит вычисление необходимых для решения задачи характеристик функционирования производственной системы и предоставляет их пользователю в наглядной форме через графический интерфейс [6].

Исходными данными для моделирования в данном программном комплексе являются: виды и количество производственных ресурсов, обеспечивающих выполнение технологических операций (участки, цеха, рабочие, роботы, станки, конвейеры и т.д.); маршрутные карты изготовления деталей, узлов, изделий с перечнем операций, необходимых ресурсов и трудоемкостью выполнения; порядок и интенсивность

поступления на склад комплектующих, материалов и заготовок; суточный график работы подразделений; объемы межоперационных накопителей; масштаб и интервал времени моделирования. На основании исходных данных создается структура модели, ее элементы и классы, задаются связи между элементами, графическое представление модели, пользовательский интерфейс, блоки вывода результатов моделирования и сбора статистики [7].

Запуск модели может быть осуществлен как в режиме реального времени, так и виртуального с заданной скоростью. По результатам запуска формируется отчет, содержащий сведения о количестве изготовленных изделий, количестве утеранных заявок на обслуживание и забракованных деталей, коэффициентах загрузки производственных ресурсов, статистики заполнения межоперационных накопителей, времени, затрачиваемого на изготовление каждого изделия.

Также в программном комплексе реализован инструмент для поиска оптимальной, с точки зрения экономических критериев, конфигурации производственной системы – оптимизационный эксперимент. В рамках этого эксперимента осуществляется ввод варьируемых параметров, диапазон их варьирования, задается целевая функция, отражающая критерий оптимизации, имеющиеся требования и ограничения для оценки допустимости полученных результатов, количество производимых итераций, начальное и конечное время моделирования. В ходе оптимизационного эксперимента осуществляются многократные «прогоны» модели с различными комбинациями параметров, производится оценка полученных результатов согласно заданной целевой функции, требованиям и ограничениям, и производится выбор оптимального набора параметров

### **Пользовательский интерфейс программного комплекса**

Рассмотрим основные элементы пользовательского интерфейса программного комплекса, необходимые для разработки модели реконфигурируемой производственной системы и анализа результатов моделирования.

В основу разработанного программного комплекса имитационного моделирования реконфигурируемых производственных систем положен модульный принцип построения. Производственная система компонуется из отдельных типовых производственных модулей двух базовых классов: обработки и сборки.

В меню инициализации модели, представленном на Рисунке 2, задается общая иерархия производственной системы, количество и типы производственных модулей обработки и сборки. Также здесь конфигурируются основные параметры запуска модели: режим времени, начальная и конечная точки запуска модели. При нажатии кнопки «Запуск модели» происходит запуск симуляционного эксперимента с заданными параметрами. Для каждого типа модуля формируется структурная схема и задается набор параметров. Переключение между отдельными подразделами меню осуществляется с помощью нажатия соответствующих кнопок.

На Рисунке 3 показано меню конфигурации типового производственного модуля, в котором формируется объем производственных мощностей по типам рабочих ресурсов, входящих в состав модуля, перед началом очередного имитационного эксперимента.

**Панели инструментов** обеспечивают быстрый доступ к большинству функций, автоматически подстраиваются под текущий режим, а также могут быть адаптированы пользователем.

**Панель Проекты** представляет собой дерево элементов модели.

Универсальная имитационная модель сложноструктурированных  
 реконфигурируемых производственных систем

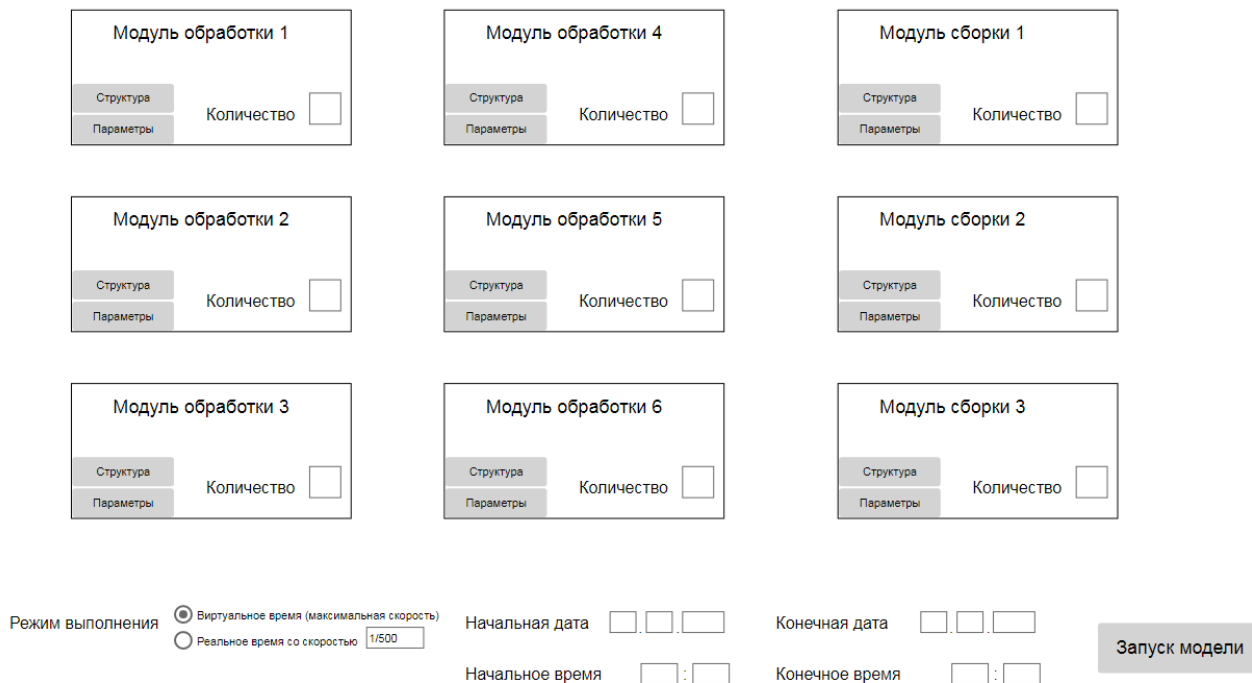


Рисунок 2 – Меню инициализации модели  
 Picture 2 – Model initialization menu

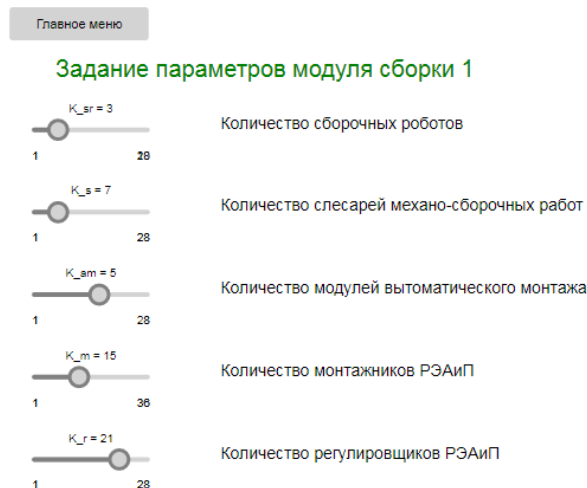


Рисунок 3 – Меню задания параметров производственного модуля  
 Picture 3 – Menu for setting parameters of the production module

**Панель Палитры** состоит из нескольких вкладок (палитр), каждая из которых содержит элементы, относящиеся к определенной задаче:

- основная содержит основные элементы, с помощью которых можно задать динамику модели, ее структуру и данные;
- диаграмма состояний содержит блоки диаграмм, позволяющих графически задавать поведение объекта;
- диаграмма действий содержит блоки структурированных блок-схем, позволяющих задавать алгоритмы визуально;
- статистика содержит элементы, используемые для сбора, анализа и отображения результатов моделирования;
- презентация содержит элементы для рисования презентаций: примитивные фигуры, а также элементы управления, для придания презентации интерактивности;
- внешние данные содержит инструменты для работы с базами данных и текстовыми файлами;
- картинки содержит набор графических изображений наиболее часто моделируемых объектов (человек, погрузчик, склад, станок, рабочий центр, завод и т. д.).

**Панель Ошибки** позволяет отобразить ошибку и локализовать ее.

В **окне свойств** редактора программного комплекса для каждого выделенного элемента модели указываются его свойства (параметры). При выделении какого-либо элемента в любом из окон редактора (в окне структуры, окне поведения, окне анимации или в окне классов) справа появляется окно свойств, показывающее параметры именно этого выделенного элемента. Каждый класс может иметь произвольное количество параметров различных типов (int, real, Boolean и др.). Каждый экземпляр класса может иметь собственные значения параметров, которые могут быть изменены динамически в процессе выполнения модели.

В **Окне графического редактора** активного объекта для модели строится двухмерное или трехмерное анимационное представление, которое помогает понять, что происходит с моделью с течением времени. Именно в этом окне визуально представляется имитация поведения моделируемой системы. Элементы анимационной картинки имеют свои параметры, которые могут быть связаны с переменными и параметрами модели. Изменение переменных модели во времени ведет к изменению графического образа, что позволяет пользователю наглядно представить динамику моделируемой системы с помощью динамически меняющейся графики.

Для построения имитационной модели производственной системы на основе аппарата теории массового обслуживания в программном комплексе используется библиотека моделирования процессов. В основе дискретно-событийной модели лежит диаграмма процесса – последовательность соединенных между собой объектов, задающих последовательность операций, которые будут производиться над проходящими по диаграмме процесса заявками, для создания которой необходимо добавить объекты из библиотеки моделирования процессов, соединить их порты и задать свойства блоков в соответствии с требованиями модели [8].

При исполнении модели запустится компилятор, который построит исполняемый код модели в языке JAVA, оттранслирует его и затем запустит модель на исполнение. При этом откроется окно презентации.

## Результаты

В качестве результатов проверки работоспособности программного комплекса рассмотрим практическую реализацию имитационной модели на примере модели



автоматизированного цеха металлообработки (Рисунок 4). Структура цеха включает в себя автоматизированную транспортно-складскую систему (АТСС), состоящую из склада поступающих заготовок, межоперационных буферов и конвейера; производственные участки, сгруппированные по типам технологических операций: фрезерная, токарная, сверлильная, шлифовальная и т.д.; роботы-упаковщики, выполняющие упаковку деталей в межоперационную тару [9]. Согласно исходным данным и технологическим маршрутам, цех осуществляет изготовление деталей трех видов. Соответственно, структура модели включает в себя 3 модуля обработки, каждый из которых содержит источник поступающих заготовок *zag*; склады заготовок *st\_zag*; блоки упаковки/распаковки межоперационных партий заготовок *batch/unbatch*; конвейеры *conveyor*; элементы обслуживания: фрезерная *frez*, токарная *tokar*; шлифовальная *shlif*; сверлильная *sverl*; потоки обработанных (готовых) деталей *det* и потоки необработанных (потерянных) вследствие переполнения накопителей заготовок *p\_st\_zag*, *p\_frez*, *p\_tokar*, *p\_shlif*, *p\_sverl*.

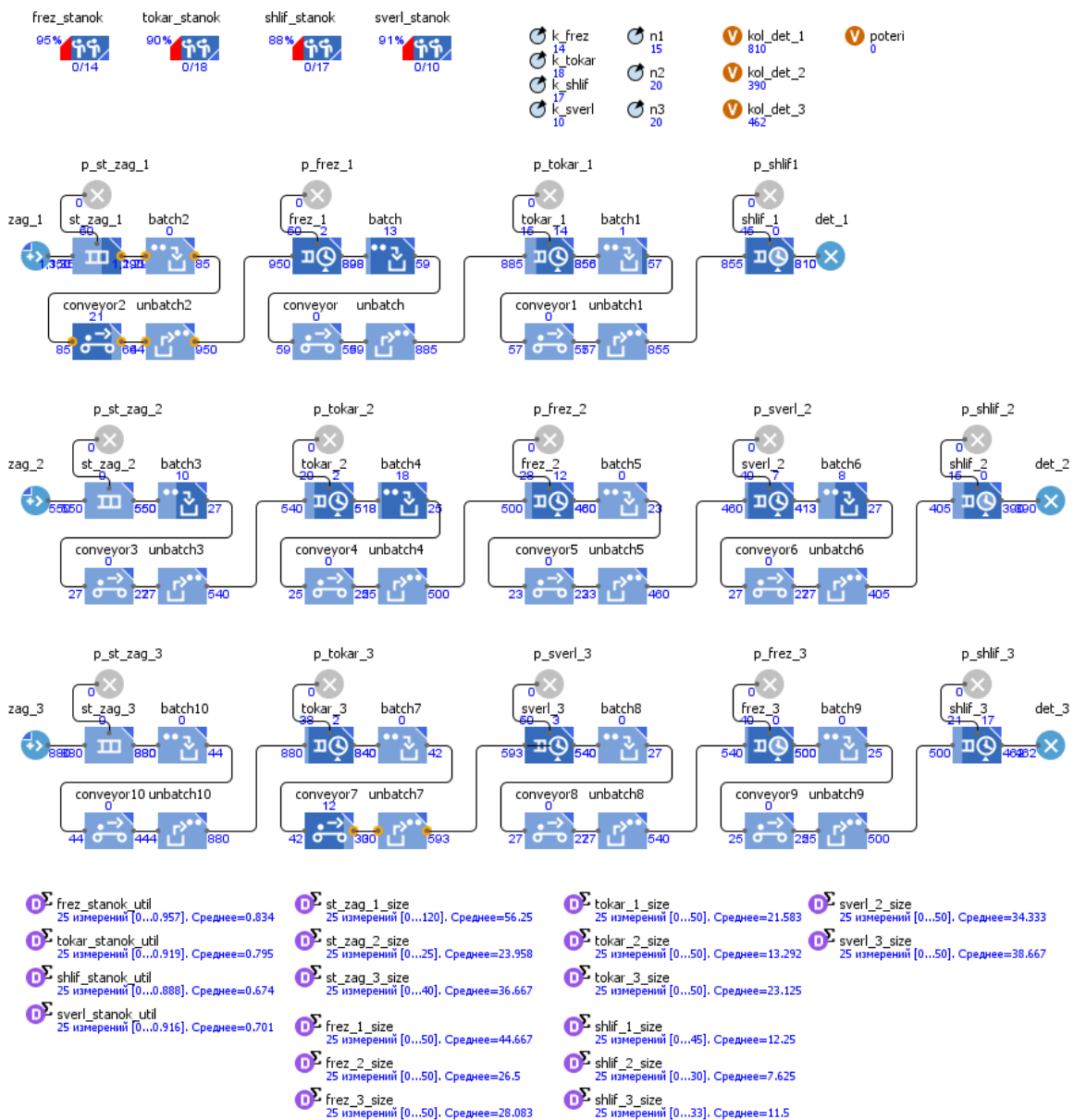


Рисунок 4 – Имитационная модель гибкого автоматизированного цеха  
 Picture 4 – Simulation model of a flexible automated workshop

Состав технологического оборудования задается с помощью блоков типа «Resource Pool»: *frez\_stanok* – фрезерные станки, *tokar\_stanok* – токарные станки, *shlif\_stanok* – шлифовальные станки, *sverl\_stanok* – сверлильные станки. Количество станков в каждой группе определяется параметрами *k\_frez*, *k\_tokar*, *k\_shlif*, *k\_sverl*. Время выполнения операции обработки задается в параметрах каждого блока согласно заданной трудоемкости. Количество деталей в межоперационной таре для каждого из трех видов деталей задается параметрами *n1*, *n2*, *n3*. Количество готовых деталей каждого типа записывается в переменные *kol\_det*. Суммарное количество потерянных в системе заявок за время запуска модели записывается в переменную *poteri*.

Для анализа функционирования модели задействованы блоки статистики, определяющие основные характеристики производственной системы: загруженность технологического оборудования *frez\_stanok\_util*, *tokar\_stanok\_util*, *shlif\_stanok\_util*, *sverl\_stanok\_util*; количество заявок в накопителях *st\_zag\_size*, *frez\_size*, *tokar\_size*, *shlif\_size*, *sverl\_size*.

Согласно исходным данным модели интенсивность поступления заготовок 1-го типа составляет 50 шт./ч, 2-го типа – 25 шт./ч, 3-го типа – 40 шт./ч. Емкости складов поступающих заготовок составляют: *st\_zag\_1* – 300 шт., *st\_zag\_2* – 200 шт., *st\_zag\_3* – 300 шт.; емкости межоперационных буферов – 50 шт. Режим работы цеха – круглосуточный, без перерывов и выходных. В рамках решаемой задачи для анализа и оптимизации модели выбрано время симуляции – 24 ч.

Для решения задачи по нахождению оптимального соотношения параметров производственной системы организован эксперимент «Оптимизация». В качестве целевой функции определено общее количество обрабатывающих станков, которое необходимо минимизировать:

$$k\_frez + k\_tokar + k\_shlif + k\_sverl \rightarrow \min \quad (1)$$

В качестве варьируемых параметров принимается количество станков каждой группы *k\_frez*, *k\_tokar*, *k\_shlif*, *k\_sverl* в диапазоне от 5 до 20 с шагом варьирования 1; количество деталей в межоперационных партиях *n1*, *n2*, *n3* в диапазоне от 5 до 25 с шагом 5.

В качестве требований заданы следующие условия: план по изготовлению деталей каждого вида  $kol\_det\_1 \geq 800$ ,  $kol\_det\_2 \geq 300$ ,  $kol\_det\_3 \geq 500$ ; отсутствие потерянных заготовок: *poteri* = 0.

В ходе оптимизационного эксперимента было выполнено 500 итераций, оптимальные значения параметров получены на 327-й итерации и составляют:

$$k\_frez = 14, k\_tokar = 18, k\_shlif = 17, k\_sverl = 10, n1 = 15, n2 = 20, n3 = 20.$$

Запуск модели с найденными значениями параметров подтвердил рациональность проведенной оптимизации: заданный план по изготовлению деталей выполняется, заполнение накопителей и складов не превышает их емкости, при этом статистика по загрузке обрабатывающих центров каждой группы (в среднем коэффициент использования равен 0,7-0,8) свидетельствует о достаточной эффективности их использования.

### Обсуждение

Таким образом, в рассмотренном примере с использованием программного комплекса имитационного моделирования решена задача выбора оптимального соотношения количества обрабатывающих центров для каждой группы, объема межоперационных партий для каждого вида заготовок, обеспечивающего выполнение заданного на расчетный период плана по изготовлению деталей при минимизации общего количества

единиц задействованного технологического оборудования и отсутствия потерянных заготовок по причине переполнения накопителей.

Аналогичным образом, в представленном программном комплексе на основе типовых программных модулей могут быть построены модели производственных систем сборки или комплексные модели взаимодействия материальных потоков нескольких подсистем обработки и сборки различных по масштабу и структуре. В зависимости от задач исследования могут быть сформированы различные алгоритмы проведения экспериментов и оптимизации, включая варьирование параметров, сравнение прогонов, метод Монте-Карло, анализ чувствительности, калибровка и т.д. [10].

Предложенный модульный принцип структурной организации моделей значительно упрощает процесс проектирования новых моделей и анализа их функционирования, а также сокращает необходимое количество машинных ресурсов для реализации вычислений в ходе имитационных «прогонов».

### Заключение

По причине того, что современные производственные системы являются сложноструктурированными объектами и практически не поддаются математическому описанию с помощью аналитических методов ввиду чрезвычайной сложности циркулирующих случайных процессов и величин, целесообразным является применение здесь аппарата имитационного моделирования. Специфика реконфигурируемых производственных систем в условиях выпуска, прежде всего, заказной наукоемкой продукции, безальтернативно требует использования дискретных имитационных моделей. Разработанный программный комплекс имитационного моделирования сложноструктурированных реконфигурируемых объектов на основе моделей типовых производственных систем может быть интегрирован в интеллектуальную систему поддержки решений промышленных предприятий. При этом результаты, полученные в ходе многократных «прогонов» имитационной модели используются для корректировки вариантов структурно-параметрической конфигурации производственных объектов и пополнения базы знаний технологических маршрутов изготовления. Тем самым замыкается петля обратной связи и информационной поддержки всех уровней решений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мизюн В.А. *Интеллектуальное управление производственными системами и процессами: принципы организации и инструменты*. Тольятти: СНЦ РАН. 2012.
2. Koren Y., Heisel U., Jovane F., Moriwaki T., Pritchow G., Van Brussel H., Ulsoy A.G. Reconfigurable manufacturing systems. *CIRP Annals*. 1999;48(2):527-540.
3. Valentin Edwin C., Verbraeck Alexander. Domain specific model constructs in commercial simulation environments. *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*. 2007. WSC 2007, Washington, DC, USA, December 9-12. 2007:785-795. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/221529357\\_Domain\\_specific\\_model\\_constructs\\_in\\_commercial\\_simulation\\_environments](https://www.researchgate.net/publication/221529357_Domain_specific_model_constructs_in_commercial_simulation_environments)
4. Abrishambaf R., Hashemipour M., Bal M. Structural Modeling of Industrial Wireless Sensor and Actuator Networks for Reconfigurable Mechatronic Systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;64(5):793–811.
5. Куприяшкин А.Г. Основы моделирования систем. Норильск: НИИ. 2015.
6. Константайн Л. Разработка программного обеспечения. СПб.: Питер. 2004.

7. Борщев, А.В. Как строить красивые и полезные модели сложных систем. *Материалы конференции «Имитационное Моделирование. Теория и Практика» (ИММОД- 2013)*. 2013;1: 21-34. Доступно по: <https://www.anylogic.ru/resources/articles/kak-stroit-prostye-krasivye-i-poleznye-modeli-slozhnykh-sistem>.
8. AnyLogic. Руководство пользователя. Доступно по: <http://www.xjtek.com/products/anylogic5/usersmanual.pdf>.
9. Хаймович И.Н., Фролов М.А., Куралесова Н.О. Совершенствование технологического процесса многономенклатурного производства на основе имитационного моделирования гибких производственных линий в цехе. *Вестник ВУУТ*. 2016;2(3):208-213.
10. Лашченков Д.П., Бурковский В.Л. Имитационное моделирование гибкой производственной системы на базе автоматизированного сборочно-монтажного цеха. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019;15(3):51-56.

## REFERENCES

1. Mizyun V.A. *Intellectual'noe upravlenie proizvodstvennymi sistemami i protsessami: printsipy organizatsii i instrumenty*. Tol'yatti: SNTs RAN. 2012.
2. Koren Y., Heisel U., Jovane F., Moriwaki T., Pritchow G., Van Brussel H., Ulsoy A.G. Reconfigurable manufacturing systems. *CIRP Annals*. 1999;48(2):527-540.
3. Valentin Edwin C., Verbraeck Alexander. Domain specific model constructs in commercial simulation environments. *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*. 2007. WSC 2007, Washington, DC, USA, December 9-12. 2007:785-795. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/221529357\\_Domain\\_specific\\_model\\_constructs\\_in\\_commercial\\_simulation\\_environments](https://www.researchgate.net/publication/221529357_Domain_specific_model_constructs_in_commercial_simulation_environments)
4. Abrishambaf R., Hashemipour M., Bal M. Structural Modeling of Industrial Wireless Sensor and Actuator Networks for Reconfigurable Mechatronic Systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;64(5):793–811.
5. Kupriyashkin A.G. *Osnovy modelirovaniya sistem*. Noril'sk: NII. 2015.
6. Constantine L. *Software for use*. SPb.: Piter. 2004.
7. Borshchev, A.V. Как строит' красивые i poleznye modeli slozhnykh sistem. *Materialy konferentsii «Imitatsionnoe Modelirovanie. Teoriya i Praktika» (IMMOD- 2013)*. 2013;1:S. 21-34. Available at: <https://www.anylogic.ru/resources/articles/kak-stroit-prostye-krasivye-i-poleznye-modeli-slozhnykh-sistem>.
8. AnyLogic Rukovodstvo pol'zovatelya. Available at: <http://www.xjtek.com/products/anylogic5/usersmanual.pdf>.
9. Khaymovich I.N., Frolov M.A., Kuralesova N.O. Improving process of multiproduct producrion based simulation of flexible manufacturing line in the workshop. *Vestnik VUIT*. 2016;2(3):208-213
10. Lashchenov D.P., Burkovsky V.L. Simulation of a flexible manufacturing system based on the automated assembly shop. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019;15(3):51-56.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Лашченков Дмитрий Павлович**, аспирант кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах ФГБОУ ВО Воронежского государственного технического университета, Воронеж, Российская Федерация  
*e-mail: [nord\\_vrn@mail.ru](mailto:nord_vrn@mail.ru)*

**Dmitrii P. Lashchenov**, P. G. of The Department of electric drive, automation and control in technical systems of FSBE of HE Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

**Бурковский Виктор Леонидович**, д.т.н., профессор кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах ФГБОУ ВО Воронежского государственного технического университета, Воронеж, Российская Федерация  
*e-mail: [bvl@vorstu.ru](mailto:bvl@vorstu.ru)*  
ORCID: [0000-0001-7957-9681](https://orcid.org/0000-0001-7957-9681)

**Viktor L. Burkovsky**, Doctor of Technical Sciences, Professor of The Department of electric drive, automation and control in technical systems of FSBE of HE Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.