

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.91:658.512-027.43:004.9

**НОВИЧИХИНА**  
**Елена Романовна**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И НАЛАДКИ  
МОДЕЛИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (промышленность)

Минск, 2011

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель	<b>Шардыко Петр Петрович,</b> кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Робототехнические системы» Белорусского национального технического университета
Официальные оппоненты:	<b>Каштальян Иван Алексеевич,</b> доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета; <b>Чумаков Олег Анатольевич,</b> кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Системы управления» Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Оппонирующая организация	Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»

Защита состоится 9 февраля 2012 г. в 15 часов на заседании совета по защите диссертаций К 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202. Тел. ученого секретаря (017) 293-95-64, e-mail: gurski2010@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «\_\_» января 2012 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
кандидат технических наук, доцент

Гурский Н.Н.

© Новичихина Е.Р., 2011  
© БНТУ, 2011

## ВВЕДЕНИЕ

В «Концепции Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь на 2011–2015 годы» (одобрена на заседании Президиума Совета Министров Республики Беларусь от 21 апреля 2010 г., протокол № 11) указано: *«Необходимо повысить уровень научно-технического обоснования проектов вновь создаваемых и модернизируемых производств и технологических процессов, используя компьютерное моделирование»*. Компьютерное моделирование особенно актуально для автоматизированных производственных систем (АПС), таких как автоматические линии, гибкие производственные системы, участки робототехнических комплексов, участки отдельных автоматов и полуавтоматов. Создание АПС является главным направлением повышения производительности и рентабельности современного производства. Основу таких систем чаще всего составляют станки с числовым программным управлением, число которых в Республике Беларусь достигло 12 тысяч и продолжает расти. Необходимость и значимость моделирования АПС обусловлена их сложностью и высокой стоимостью.

Методология системного подхода предполагает всестороннее рассмотрение АПС с использованием нескольких взаимодополняющих моделей (принцип полимодельности). Частные модели (ЧМ), специализируются на отражении определенных аспектов АПС и работают под общим управлением модели-диспетчера, называемой метамоделью (ММ). ЧМ и ММ образуют единый моделирующий комплекс (МК).

Применение МК для АПС сдерживается высокой трудоемкостью их разработки, модификации и наладки. Существующие МК АПС создаются под конкретный класс систем и известный набор технических, управленческих и организационных решений. При появлении новых объектов и решений необходимо создавать МК заново или кардинально переделывать имеющийся, что требует значительных затрат времени (несколько месяцев). Для уже сформированного МК настройка на объект/задачу и наладочный режим работы также достаточно трудоемки (часы), т. к. сопряжены с пользовательским программированием или интерактивным участием человека.

Встает вопрос, с одной стороны, о повышении универсальности МК, чтобы снизить саму потребность в их разработке/модификации, и с другой стороны – о повышении степени автоматизации процесса формирования нового МК, если разработка/модификация все же потребуются. Известные подходы решения этого вопроса снимают проблему лишь частично. Этим обуславливается необходимость продолжения исследований в данном направлении.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Диссертационная работа выполнена в рамках госбюджетных НИР кафедры робототехнических систем БНТУ «Автоматизация производства» (2001–2005 гг., ГБ 01257) и «Разработка программных средств для автоматизации производства» (2006–2010 гг., ГБ 06310). Версия моделирующего комплекса применительно к информационно-вычислительным системам была разработана в рамках НИР «Типовое программное обеспечение и технология функционирования Интернет-узла на основе свободно распространяемых программных продуктов» (2009–2010 гг., № ГР 20091480).

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь, а именно – «методы математического и компьютерного моделирования, компьютерные технологии и интеллектуальные системы поддержки принятия решений» (пункт 5.1 Постановления Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 г. № 585).

### **Цель и задачи исследования**

Цель исследования – снижение трудоемкости процессов формирования и наладки моделирующих комплексов для анализа автоматизированных производственных систем путем универсализации и автоматизации указанных процессов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать концепцию МК АПС, обеспечивающую снижение трудоемкости процессов его формирования и наладки;
- 2) разработать универсальную систему модельного представления АПС, обеспечивающую параметрическую настройку МК на объект без пользовательского программирования;
- 3) разработать универсальную систему данных для автоматического межмодельного обмена в МК, обеспечивающую единообразие интеграции, взаимодействия и взаимного уточнения ЧМ в МК;
- 4) разработать универсальный алгоритм работы ММ и предложить критерий завершения наладочных итераций, обеспечивающие единообразную автоматическую наладку МК вне зависимости от состава ЧМ и разграничения функций между ними;
- 5) реализовать программно МК по предлагаемой концепции.

Объект исследования – АПС обработки деталей в машино- и приборостроении на структурном уровне участков и линий.

Предмет исследования – прогнозирование с помощью компьютерного моделирования показателей функционирования АПС, таких как выработка, производительность, освоенная номенклатура, срок или вероятность выполнения к

сроку планового задания, длительность производственного цикла и доля продуктивной составляющей в нем, коэффициент использования оборудования, заполнение накопителей, загрузка персонала, очереди заказов, операционных и транспортных партий.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Концепция полимодельного итерационного анализа АПС, *отличающаяся* эндогенной идентичностью частных моделей, параллельностью их запуска в итерациях и межмодельной сходимостью результатов, *позволяющая* снизить трудоемкость процессов формирования и наладки моделирующих комплексов за счет унификации и автоматизации указанных процессов.

2. Универсальная система данных для автоматического межмодельного обмена в МК, *отличающаяся* использованием удельных коэффициентов пребывания оборудования и деталей в различных состояниях, *обеспечивающая* единообразие интеграции, взаимодействия и взаимного уточнения ЧМ в МК.

3. Экспериментальное доказательство наличия стационарного режима работы у АПС, *отличающееся* учетом специфических особенностей АПС, выражающихся в отличии процессов от марковских, и охватом всего диапазона встречающихся на практике исходных данных, *позволяющее* использовать межмодельную сходимостью результатов в качестве критерия завершения автоматических наладочных итераций МК.

### **Личный вклад соискателя**

Соискателем лично получены следующие результаты исследований: концепция универсальной программной оболочки МК для анализа АПС; метод параметризации алгоритмов функционирования АПС; универсальная система данных для межмодельного обмена в МК; универсальный алгоритм автоматической наладки МК; экспериментальное подтверждение наличия стационарного режима в АПС; программная реализация концепции в пакете PIMMS; экспресс-метод определения показателей функционирования АПС на основе регрессионных зависимостей.

Д-р техн. наук, профессор Здор Г.Н. обосновал базовый состав ЧМ в МК [2, 4]. Канд. техн. наук, доцент Курч Л.В. принимал участие в планировании имитационных экспериментов и осуществлял промышленное внедрение пакета [3, 5]. Канд. техн. наук, доцент Новичихин Р.В. обосновал выбор методов математического моделирования в МК [1]. Научный руководитель канд. техн. наук, доцент Шардыко П.П. принимал участие в постановке задач исследования и разработал методическое обеспечение для внедрения пакета в учебный процесс [6, 19].

В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками положений, вынесенных на защиту.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях (НТК): республиканская НТК «Инновационная деятельность в системе образования, науки и производства» (Минск, 2002); республиканская НТК студентов и аспирантов «НИРС-2003» (Минск, 2003); республиканская НТК учащихся, студентов и аспирантов, посвященная 85-летию БНТУ (Минск, 2005); республиканская НТК студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (Гомель, 2006, 2007, 2008); международная НТК «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011); международная НТК «Совершенствование систем автоматизации технологических процессов» (Минск, 2010); международная НТК «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (Минск, 2011); международная НТК «Системы автоматизации технологических процессов» (Минск, 2011).

### **Опубликованность результатов диссертации**

По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, в том числе 1 монография и 4 статьи, соответствующие пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общий объем 16 авторских листов), 5 статей в сборниках материалов конференций, 8 тезисов докладов на конференциях, 1 методическое пособие.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных библиографических источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 160 страниц. Она содержит 95 страниц основного текста, 30 рисунков на 16 страницах, 17 таблиц на 11 страницах, 3 приложения на 18 страницах, список использованных библиографических источников из 260 наименований на 20 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы и показана значимость решения проблемы снижения трудоемкости моделирования АПС.

**Первая глава** посвящена анализу состояния вопроса в области полимодельного прогнозирования показателей функционирования АПС и обоснованию задач исследования.

В источниках отмечается, что применение МК диктуется объективной необходимостью, но сдерживается их большой трудоемкостью. Причем проблема проявляется на всех этапах жизненного цикла МК: концептуальное про-

*ектирование; разработка компонентов (ЧМ и ММ); формирование (подбор, интеграция и согласование ЧМ); настройка на объект и задачу; наладка (итерации взаимного уточнения ЧМ); использование (собственно модельное экспериментирование); модифицирование* в процессе эксплуатации.

В качестве основных причин, порождающих проблему трудоемкости МК, исследователи называют следующие: масштабность, сложность, многообразие исполнений и изменчивость объекта; использование программирования и интерактивного участия пользователя. Соответственно путями решения проблемы могут быть *повышение универсальности МК и уровня автоматизации* этапов его жизненного цикла. Универсальность и степень автоматизма являются свойствами в известной степени противоречивыми, и их совмещение представляет собой сложную исследовательскую задачу. Анализ известных МК АПС показал, что эта задача в полной мере не решена.

Способы снижения трудоемкости разработки и эксплуатации программного обеспечения предлагают информационные технологии общего назначения, например, использование инструментальных CASE-средств. Общая теория моделирования систем добавляет свои решения уже применительно к моделирующему программному обеспечению, например, использование принципов Парето, Дейкстра, последовательного и выборочного усложнения, агрегатирования по Бусленко Н.П., типовых математических схем и пр. Предметно-ориентированные на производство языки и системы моделирования, такие, например, как AutoMod, предлагают графическое программирование, встроенные библиотеки готовых элементов, параметрическую настройку и пр. Все перечисленные способы в той или иной мере уже задействованы в известных МК АПС, дают определенный эффект и имеют потенциал на будущее. Однако, они касаются в основном разработки ЧМ, и мало затрагивают взаимодействие моделей. Например, не выявлено решений с универсальной ММ, принято считать, что она должна создаваться под конкретный набор применяющихся ЧМ. Можно предположить, что создание *единой структурно-информационной оболочки МК АПС с единым механизмом функционирования ММ* позволит поднять степень универсальности и автоматизма МК. В такой постановке задача ранее не решалась.

Важным условием обеспечения универсальности МК является *параметризация* исходных данных. Полная параметризация означает, что задание в модели любого из возможных проявлений любого аспекта АПС должно сводиться только к вводу числового значения в предлагаемые поля или к выбору пункта из готовых списков меню. В известных МК эта задача полностью не решена, особенно в части описания алгоритмов функционирования АПС.

Для обеспечения единообразия функционирования ММ вне зависимости от состава ЧМ и разграничения функций между ними необходимо предложить *универсальную систему данных* для межмодельного обмена.

Межмодельный обмен результатами теряет практический смысл, если они статистически не сходятся, т.е. модели должны отражать стационарный (установившийся) режим работы объекта. Условия существования и единственности такого режима строго определены для отдельных разновидностей марковских процессов (эргодические теоремы Фостера, Маркова – Берштейна, Феллера, Мустафы и др.). Однако, процессы АПС в общем случае и в строгом смысле марковскими не являются. В этом случае общего теоретического ответа на вопрос о наличии у АПС свойства эргодичности и финальных вероятностей нет. Необходимо экспериментально проверить *наличие установившегося режима работы* у АПС рассматриваемого вида на моделях с максимально реалистичными условиями.

**Вторая глава** посвящена анализу АПС как объектов моделирования и теоретическому обоснованию решений по обеспечению требуемых свойств МК.

Перечисленные в подразделе «предмет исследования» основные показатели функционирования АПС предопределили состав выходных данных МК. Установлено, что на эти показатели могут влиять более десятка аспектов, около полусотни факторов и более сотни типов количественных и качественных (классификационных) параметров. Эти параметры определили состав исходных данных МК. Показано, что для удовлетворительного охвата основных аспектов и факторов АПС в МК необходимо иметь, по крайней мере, 4 базовые ЧМ с условными названиями, функциями и методами, представленными в таблице 1.

Таблица 1 – Базовый состав частных моделей МК

Модель	Функции	Метод
«Работы / Ресурсы»	Отражение баланса между плановыми работами АПС и имеющимися для их выполнения техническими средствами. Определение загрузки и номинальных простоев оборудования	Метод статистических испытаний (Монте-Карло)
«Потоки»	Отражение транспортных маршрутов и логики функционирования АПС. Определение простоев оборудования и пролеживания деталей, связанных с очередями, неритмичностью и десинхронизацией	Алгоритмическое имитационное моделирование
«Персонал»	Отражение работы обслуживающего персонала. Определение загрузки персонала и связанных с ним простоев оборудования	Теория массового обслуживания
«Состояния»	Отражение логики управления рабочими позициями.	Уравнения



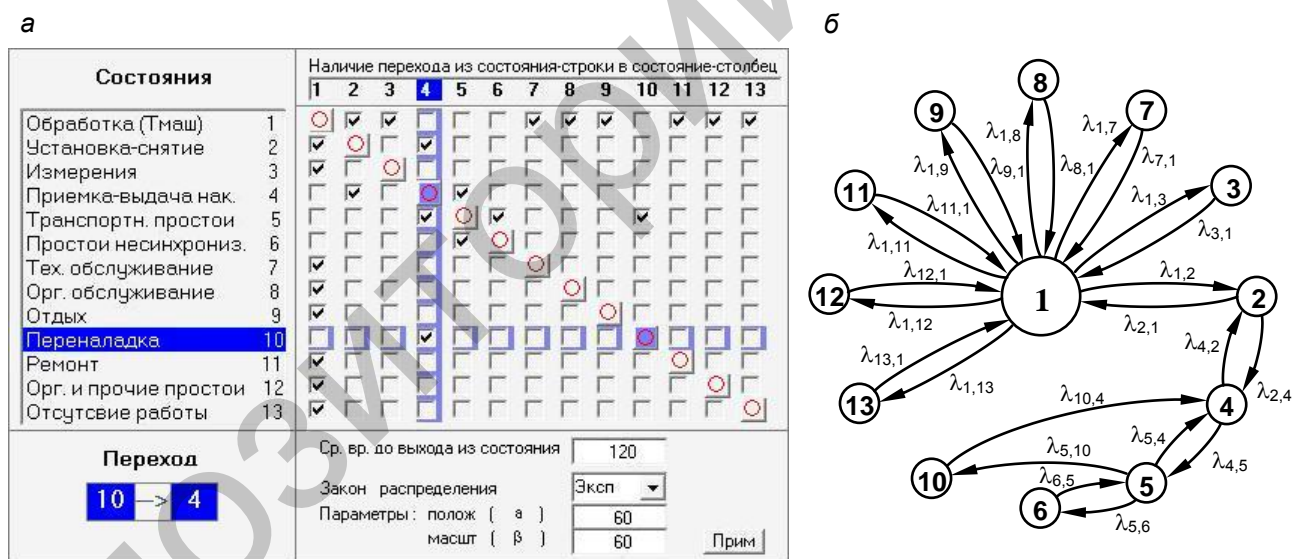
	Определение структуры простоев рабочих позиций с учетом внутренних и внешних воздействий	Колмогорова
--	--	-------------

Репозиторий БНТУ

По унификации модельного представления АПС и параметризации исходных данных в МК приняты следующие решения.

Для описания номенклатуры деталей, технологических процессов и поступления заказов предусмотрено 3 способа: полное детерминированное задание (массовое и крупносерийное производство); групповое детерминированное задание с усреднением или случайностью внутри групп (серийное производство); целиком вероятностное задание (мелкосерийное и единичное производство).

Для описания алгоритмов функционирования рабочих позиций (РП) используется неявное задание графа их состояний (пример на рисунке 1, б), который формируется в модели автоматически после отметки возможных переходов (рисунок 1, а) и задания средних (номинальных) времен  $t_{cp(i,j)}$  их периодичности. При этом используется универсальный список из 13 возможных состояний. Условия выбора альтернативных действий в РП (переходов на графе с известными интенсивностями  $\lambda_{i,j} = 1 / t_{cp(i,j)}$ ) описываются вероятностью возможных исходов применения этих условий.



а – задание матрицы смежности состояний; б – автоматически сформированный граф состояний

Рисунок 1 – Параметризация алгоритмов функционирования рабочих позиций

Для описания структуры АПС используется функциональный признак. Предмет труда (детали), орудия труда (оборудование) и персонал рассматриваются с точки зрения 4 базовых функций: преобразование, приемка-выдача, передача и хранение.

Для описания особенностей планирования и диспетчирования используются унифицированные списки приоритетных правил для обслуживания заявок следующих типов: заказы, операционные партии (запуски), транспортные пар-

тии, детали-операции, группы однотипных РП, отдельные РП. Предусмотрены также унифицированные списки условий перехода на параллельное, перекрывающееся и дублирующее обслуживание.

В качестве универсальной системы показателей АПС для межмодельного обмена данными предлагается использовать *удельные коэффициенты* пребывания основного технологического оборудования (ОТО)  $C_i$  и деталей  $D_j$  в возможных состояниях:

$$C_i = T_i / T_{\text{маш}}, (C_i \geq 0, \Sigma C_i > 1, C_1 = C_{\text{маш}} = 1), \quad (1)$$

$$D_j = T_{\text{д}j} / T_{\text{маш.д}}, (D_j \geq 0, \Sigma D_j > 1, D_1 = D_{\text{маш}} = 1), \quad (2)$$

где  $T_i$  – суммарное время нахождения ОТО в  $i$ -м состоянии за рассматриваемый период  $T$ ;  $T_{\text{маш}}$  – суммарное время нахождения ОТО в состоянии машинной обработки (работа по управляющей программе) за  $T$ ;  $T_{\text{д}j}$  – суммарное время нахождения детали в  $j$ -м состоянии за период ее производственного цикла  $T_{\text{ц}}$ ;  $T_{\text{маш.д}}$  – суммарное время нахождения детали в состоянии машинной обработки за  $T_{\text{ц}}$ .

Система удельных коэффициентов отвечает требованиям информативности (чувствительна ко всем факторам и определяет все показатели функционирования АПС), согласованности, единого формата данных, сопоставимости и автономности. Последнее означает, что в отличие от традиционных для технологии машиностроения и организации производства *долевых коэффициентов* ( $K_i = T_i / T, \Sigma K_i = 1$ ), таких как коэффициенты использования и простоев ОТО, изменение значения любого из удельных коэффициентов какой-либо моделью не влечет изменение значений остальных коэффициентов, которые были определены другими моделями. Для определения универсального состава состояний ОТО за базу взяты стандартная структура нормы времени на операцию и общепринятые компоненты расширенного объемного временного баланса ОТО. Всего достаточно регистрировать 13 состояний (список на рисунке 1, а).

Значения долевых коэффициентов  $C_i$  в базовых ЧМ из таблицы 1 определяются статистически за исключением ЧМ «Состояния», в которой коэффициенты пересчитываются по найденным значениям вероятности пребывания РП в каждом из состояний  $P_i$ . Значения  $P_i$ , в свою очередь, вычисляются из предположения, что потоки событий в АПС простейшие (пуассоновские). В этом случае можно воспользоваться уравнениями Колмогорова для марковских случайных потоков с дискретными состояниями и непрерывным временем.

Будем иметь систему из 13 однотипных уравнений баланса (по числу состояний на графе рисунка 1, б) и нормировочного уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} dP_1 / dt = \sum_{r=1}^R \lambda_{r,1} P_r - \sum_{s=1}^S \lambda_{1,s} P_1, \\ \dots \\ dP_i / dt = \sum_{j=1}^J \lambda_{j,i} P_j - \sum_{l=1}^L \lambda_{i,l} P_i, \\ \dots \\ dP_{13} / dt = \sum_{w=1}^W \lambda_{w,13} P_w - \sum_{v=1}^V \lambda_{13,v} P_{13}, \\ \sum_{i=1}^{13} P_i = 1, \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $i$  – номер рассматриваемого состояния;  $J, j$  – количество и номер состояний, предшествующих  $i$ -му;  $L, l$  – количество и номер состояний, следующих за  $i$ -м;  $P_i, P_j$  – вероятности пребывания объекта в  $i$ -м и  $j$ -м состояниях;  $\lambda_{j,i}, \lambda_{i,l}$  – интенсивности переходов из  $j$ -го состояния в  $i$ -е и из  $i$ -го состояния в  $l$ -е ( $\text{мин}^{-1}$ );  $R, r$  и  $S, s$  – аналогичны  $J, j$  и  $L, l$  при  $i = 1$ ;  $W, w$  и  $V, v$  – аналогичны  $J, j$  и  $L, l$  при  $i = 13$ . Для стационарного режима работы АПС  $dP_i / dt = 0$ , уравнения из дифференциальных превращаются в алгебраические, и полученная система уравнений решается аналитически, в нашем МК – методом LU-разложения. Если потоки не являются простейшими, то в МК предусмотрена имитация на графе с программной генерацией заданных законов распределения для каждого перехода.

**Третья глава** посвящена разработке и программной реализации концепции универсального и малотрудоемкого МК.

Суть предлагаемой концепции заключается в следующих положениях (рисунок 2).

1. Полиmodelьность – анализ АПС должен вестись несколькими относительно простыми ЧМ  $M_1, \dots, M_k, \dots, M_N$ , специализированными по функциям (аспектам, факторам), но универсальными по отношению к объектам.

2. Итерационность – новому использованию МК должен предшествовать итерационный наладочный режим его работы под управлением метамоделли, в процессе которого происходит взаимное дополнение и уточнение ЧМ.

3. Эндогенная идентичность – все ЧМ должны содержать одинаковое ядро эндогенных переменных (выходных переменных  $Y$  и переменных состояния  $C$ ), достаточных для определения всех главных показателей функционирования АПС и используемых для межмодельного обмена данными.

4. Параллельность обмена – в каждой итерации запуск всех ЧМ должен осуществляться параллельно и независимо, только после чего между ними про-

изводится одновременный обмен полученными результатами – факторными поправками  $\Delta_{i,k}$  к переменным состояния  $C_i$ .

5. Межмодельная сходимость – признаком завершения процесса взаимоуточнения ЧМ и условием окончания итераций по наладке МК должны считаться стабилизация и совпадение с заданной точностью  $\varepsilon$  одноименных показателей функционирования АПС на выходе всех ЧМ  $|Y_{q,1} - Y_{q,k}| \leq \varepsilon$ , где  $q$  – № показателя.

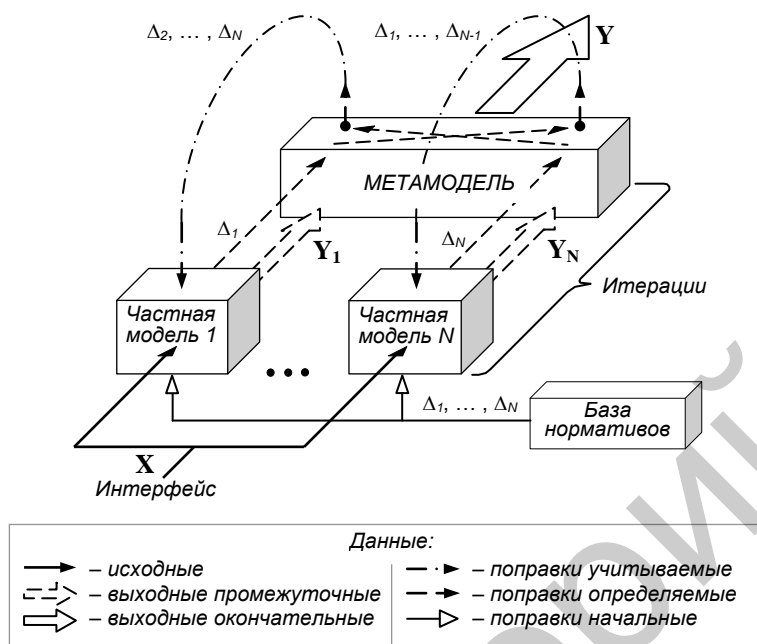


Рисунок 2 – Схема модельного анализа АПС по предлагаемой концепции

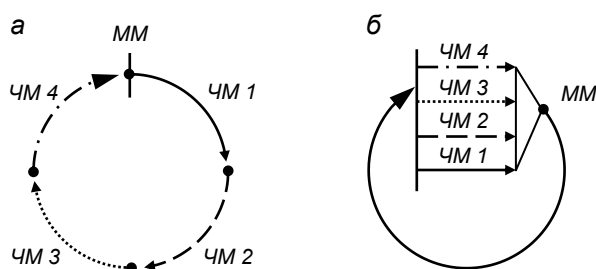
непосредственным, когда  $q$ -й показатель прямо совпадает с выходной переменной  $Y_q$ , или опосредованным, когда показателю соответствует одна или несколько переменных состояния, связывающих показатель и исходные данные очевидной формульной зависимостью  $Y_q = f(\mathbf{X}, \mathbf{C})$ . Если снабдить все ЧМ полным набором таких показателеобразующих переменных, то каждая из ЧМ превращается из части в самостоятельный экземпляр общей модели АПС. Она будет учитывать все значимые факторы, правда, с неравномерной детализацией, и способна даже в одиночку выдать все показатели функционирования АПС. Показатели  $Y_{q,k}$ , выдаваемые разными ЧМ, дублируются, но разнятся до тех пор, пока итерационное взаимное уточнение ЧМ не завершится. В качестве переменных состояния используются удельные коэффициенты  $C_i$ . Для случая, когда поправки  $\Delta_{i,k}$  к одному коэффициенту  $C_i$  выдают одновременно несколько ЧМ, предусмотрена система их приоритетов.

Положение *параллельности обмена* информацией в МК выступает альтернативой традиционному последовательному способу, который предусматривает

Первые два положения не новы и являются обязательными условиями системного подхода. Новизна заключается в сути и сочетании трех последних положений, которые являются связными и для получения эффекта эмерджентности должны применяться совместно.

Положение *эндогенной идентичности* исходит из того, что все выделенные показатели функционирования АПС  $Y$  однозначно отражаются в модели ограниченным набором зависимых переменных. Отражение может быть

одностороннюю передачу результатов после срабатывания очередной ЧМ (рисунок 3, а). При предлагаемой параллельной схеме (рисунок 3, б) ЧМ не приступают к обмену информацией, пока не сработают все.



а – последовательная; б - параллельная

Рисунок 3 – Схемы запусков ЧМ и обмена информацией внутри итерации

ности запусков ЧМ и неодинаковым уровнем вложения поправок.

Положение межмодельной сходимости результатов исходит из предположения о наличии у АПС стационарного режима работы. В ходе имитационного эксперимента было получено подтверждение этого предположения для реалистичных условий АПС (групповые заявки, зависимость событий, отличие потоков от пуассоновских и пр.), для всех сочетаний факторов, во всем диапазоне встречающихся на практике исходных данных.

Для единообразия и однозначности оценки сходимости результатов МК желательно рассматривать только один показатель АПС. Для этого он должен быть чувствительным ко всем исходным данным, определять все остальные по-

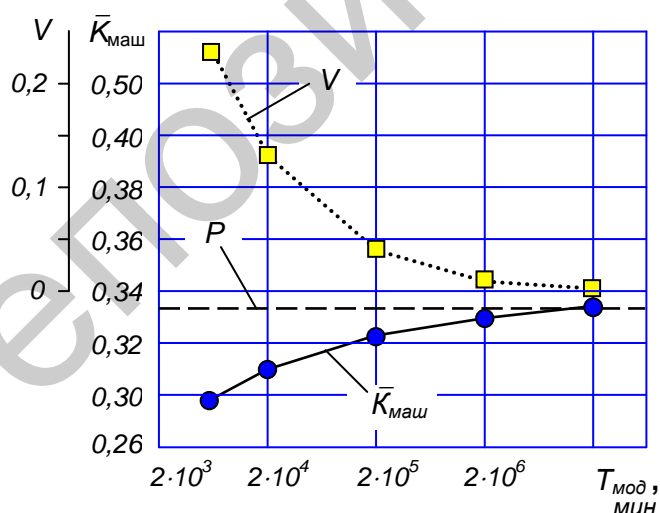


Рисунок 4 – Зависимость среднего значения и коэффициента вариации случайной величины  $\bar{K}_{\text{маш}}$  от времени моделирования

Таким образом, связи по принципу «один с одним» или «один со многими», заменяются связями «все со всеми». В этом случае не требуется индивидуальная пригонка смежных ЧМ, а работа ММ сводится к одной простой и неизменной схеме. Параллельность также устраняет неоднозначность толкования причин изменения результатов, вызванную их зависимостью от последователь-

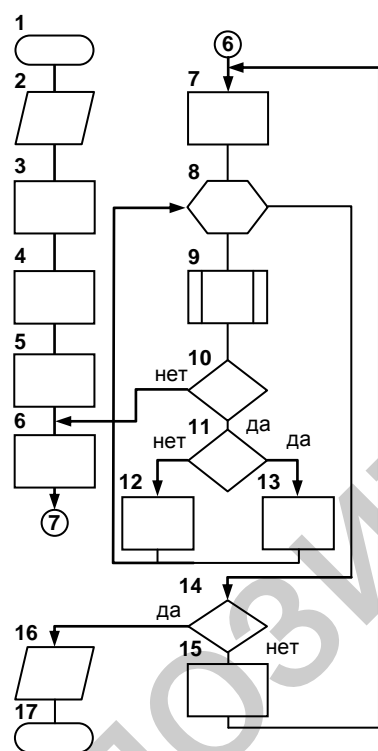
казатели, обеспечивать сопоставимость для различных АПС. Показано, что из традиционных показателей этим требованиям отвечает только один – долевой коэффициент использования ОТО по машинному времени обработки:  $K_{\text{маш}} = T_{\text{маш}} / T = [0; 1]$ . Установлено, что сходимость, достигнутая по  $K_{\text{маш}}$  (пример типичной картины – на рисунке 4), означает сходимость и по другим показателям АПС с не меньшей относительной точностью  $(\Delta_{Y_q}/Y_q) \leq (\Delta_{K_{\text{маш}}}/K_{\text{маш}})$ .

Получена эмпирическая зависимость периода вхождения АПС в установившийся режим работы для общего случая:

$$T_{уст} = [(Q - 269 \ln \varepsilon_K) (1 - S) t_{маш} C_{пр} \rho^{-1} + 0,2] \cdot 10^4 \text{ (мин)}, \quad (4)$$

где  $Q = [1; 2000]$  шт. – средний размер партии запуска;  $t_{маш} = [0,2; 125]$  мин – среднее машинное время операции;  $S = [0; 1]$  – коэффициент детерминированности случайных величин  $Q$  и  $t_{маш}$ ;  $C_{пр} = [0,2; 20]$  – коэффициент номинальных простоев ОТО;  $\rho = [0,05; 1]$  – планируемый коэффициент загрузки ОТО;  $\varepsilon_K = (M_K - \bar{K}_{маш}) = [5 \cdot 10^{-5}; 5 \cdot 10^{-2}]$  – заданное значение допустимой ошибки оценки математического ожидания  $M_K$  величины  $K_{маш}$  с вероятностью 0,95.

Алгоритм автоматической наладки МК представлен на рисунке 5.



- 1 – начало
- 2 – ввод исходных данных  $X$ , задание значений для критериев стабилизации  $\varepsilon_1$  и совпадения  $\varepsilon_2$  результатов по  $K_{маш}$
- 3 – присвоение начальных значений для переменных состояния  $C$ :  $C_1 = 1$ ;  $C_{13} = 1 - \rho$ ;  $C_i = [C_i]$  для  $i = 2, \dots, 12$ , где  $[C_i]$  – нормативы
- 4 – расчет и присвоение начального (номинального) значения  $K_{маш}$ :  $K_{маш} = \rho / (1 + C_{пр})$ ;  $K_{k,0} = K_{маш}$ , где  $k = 1, \dots, 10$  – № ЧМ
- 5 – расчет  $T_{уст}$  по формуле (4), назначение времени моделирования  $T_{мод} = T_{уст}$
- 6 – сброс счетчика итераций  $n = 0$ , коррекция  $T_{мод} = a T_{мод}$ , где  $a$  – коэффициент запаса
- 7 – приращение счетчика  $n = n + 1$ , ввод значений  $C_i$  всем ЧМ
- 8 – перебор ( $k = 1, \dots, 10$ ) всех ЧМ, включая «пустые»
- 9 – запуск  $k$ -ой ЧМ
- 10 – проверка критерия  $|K_{k,n} - K_{k,n-1}| \leq \varepsilon_1$  стабилизации результатов
- 11 – проверка критерия  $|K_{1,n} - K_{k,n}| \leq \varepsilon_2$  совпадения результатов
- 12, 13 – присвоение значения индикатору сходимости  $I_k = \text{False}$  или  $I_k = \text{True}$  соответственно
- 14 – проверка: « $I_k = \text{True}$  для всех  $k$ ?»
- 15 – коррекция  $C_i = C_i + \Delta_{i,k,n}$  если по данному  $i$ -му состоянию  $k$ -я ЧМ приоритетна, где  $\Delta$  – поправка
- 16 – вывод результатов  $Y_{(n)}$  для  $T_{уст}$  и фиксация значений  $C_{(n)}$  для работы отлаженного МК в режиме моделирования
- 17 – конец

Рисунок 5 – Укрупненная схема алгоритма ММ в режиме наладки МК

Предлагаемая концепция программно реализована в виде пакета PIMMS, структурная схема которого приведена на рисунке 6.

Пакет в базовой комплектации содержит 4 ЧМ (см. таблицу 1) и резерв еще на 6 ЧМ. Последние разрабатываются вне комплекса с использованием единого программного шаблона, обеспечивающего соблюдение соглашений об универсальном составе и едином формате данных  $X, Y, Y_{и}, C$ , где  $Y_{и}$  – результаты, идентифицированные по отдельным элементам и потокам в АПС.

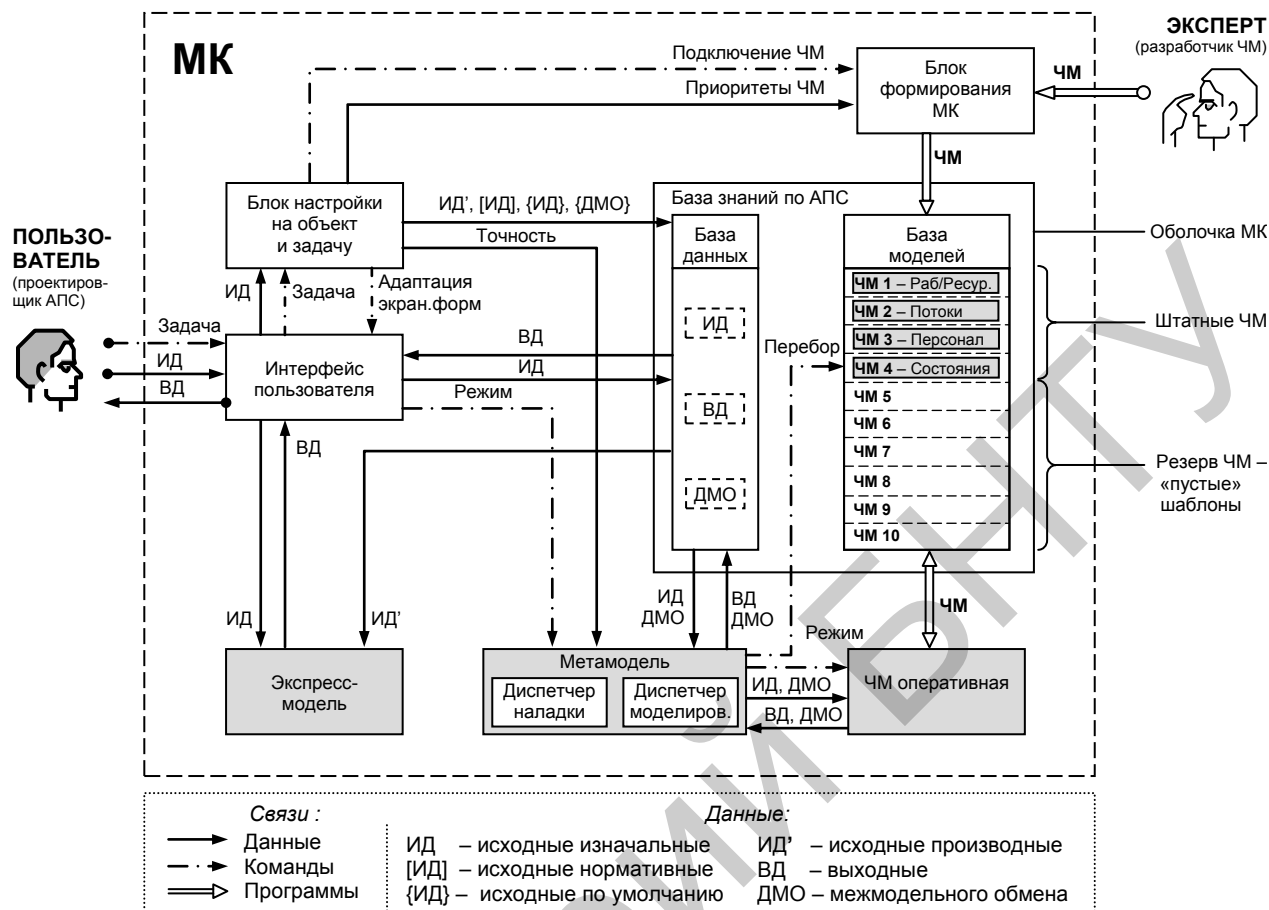


Рисунок 6 – Структурная схема разработанного МК «PIMMS»

«Пустые» шаблоны для резервных ЧМ уже заложены в оболочку МК и формально (безрезультатно) участвуют в его работе. Добавление в МК любой новой ЧМ сводится только к записи ее программного модуля поверх модуля очередного «пустого» шаблона под тем же именем (mdl5, mdl6 и т. д.). При этом конфигурация МК и алгоритм ММ остаются неизменными, а специальное согласование вновь вводимой ЧМ не требуется.

Применение шаблонов развивает концепцию агрегативных систем по Бусленко Н.П. Отличие заключается в том, что в PIMMS все модели МК, включая ММ, представляются одинаковыми агрегатами, с одним набором входных/выходных контактов и с фиксированным смыслом сигнала (данных) для каждого. Кроме того, схема сопряжения (матрица смежности) контактов для любых реализаций системы также остается неизменной (рисунок 7).

**Четвертая глава** посвящена практическому использованию и внедрению результатов исследования.

Показано, что для оценки показателей функционирования АПС с приемлемой для практических приложений точностью достаточно иметь среднее значение и параметры закона распределения всего одной величины –  $K_{\text{маш}}$ .



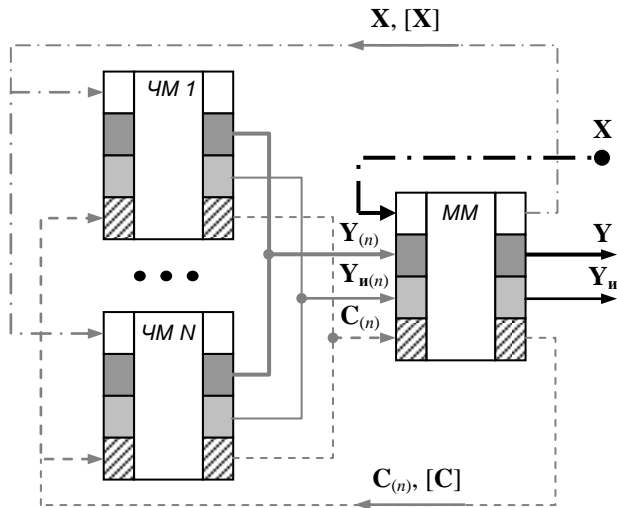


Рисунок 7 – Агрегатированная структура МК

Остальные показатели могут быть определены уже после модельного эксперимента прямым счетом по предлагаемым в работе формулам.

В результате модельного эксперимента были получены следующие регрессионные зависимости для среднего значения, коэффициентов вариации, асимметрии и эксцесса величины  $K_{\text{маш}}$ :

$$K_{\text{маш}} = \rho(1 - 0,077k_T) / (1 + C_{\text{пр}}), \quad (5)$$

$$V = (0,3898 + 0,0014Q - 0,7535\rho - 0,4277S - 5,904 \cdot 10^{-7}Q^2 + 0,4449\rho^2 + 0,198S^2 + 1,2609 \cdot 10^{-11}Q^3) k_T k_t k_{\text{пр}}, \quad (6)$$

$$A = 1,095 + 0,001982Q - 1,885\rho + 1,201S - 8,059 \cdot 10^{-7}Q^2 + 0,3537\rho^3 - 2,921S^2, \quad (7)$$

$$E = 4,016 - 7,867\rho - 6,882S + 3,46\rho^2 + 11,1S^2, \quad (8)$$

где  $k_T = (T' / T)^{1/2}$  – коэффициент приведения к анализируемому периоду  $T$ ;  $C_{\text{пр}}$  – коэффициент номинальных простоев ОТО;  $S$  – коэффициент детерминированности случайных величин  $Q$  и  $t_{\text{маш}}$ ;  $k_t = (t_{\text{маш}} / t'_{\text{маш}})^{1/3}$  – коэффициент приведения по трудоемкости;  $k_{\text{пр}} = (C_{\text{пр}} / C'_{\text{пр}})^{1/3}$  – коэффициент приведения по номинальным простоям;  $T' = 2 \cdot 10^4$  мин (1 месяц работы в 2 смены),  $t'_{\text{маш}} = 1$  мин и  $C'_{\text{пр}} = 1$  – соответственно значения величин  $T$ ,  $t_{\text{маш}}$  и  $C_{\text{пр}}$  для условий, которые приняты в качестве «нормальных».

Зависимости (5)–(8) справедливы для  $T \geq 4,8 \cdot 10^2$  мин, а по остальным исходным данным диапазоны те же, что и для формулы (4). Адекватность проверялась по критерию Фишера и по коэффициенту детерминации  $[R^2] \geq 0,75$ . Ошибка аппроксимации регрессии по среднему значению  $K_{\text{маш}}$  составляет 0,02 с доверительной вероятностью 0,95. Общая ошибка с учетом погрешности экспериментальных откликов составляет 0,035.

На основе зависимостей (5)–(8) и аналитических формул, вытекающих из определений, разработан экспресс-метод расчета выработки, производительности и средней длительности производственного цикла выполнения заказа АПС без непосредственного применения МК.

Для проверки достижения цели и решения поставленных задач исследования были проведены сравнительные испытания на универсальность и трудоем-

кость разработанного МК PIMMS и аналогов. За оценку универсальности принималась доля полигона из 82 АПС, охватываемая штатными средствами МК без перепрограммирования. У PIMMS эта доля составила 87 % против 66 % у ближайшего аналога. За оценку трудоемкости принималось среднее время пользователя, затраченное на моделирование 5 АПС механообработки – типичных представителей каждого типа производства (единичного, мелко-, средне- и крупносерийного, массового). У PIMMS это время сокращалось в 1,4–3 раза по сравнению с ближайшими аналогами.

Практическая значимость результатов исследования подтверждается эффективностью их внедрения. Так, использование разработанного пакета PIMMS для обоснования проекта модернизации автоматизированного участка на производстве ЗАО «БелТАТ-М» дало годовой экономический эффект 12,3 млн руб. (в ценах 2007 г.) за счет повышения коэффициента загрузки оборудования на 4,3 % и его производительности на 19,2 %. Результаты внедрены также на РУП «Минский тракторный завод» (годовой экономический эффект 3,4 млн руб. в ценах 2006 г.), в представительстве компании «Sandvik Coromant AB» (Швеция) в РБ, в учебном процессе кафедры робототехнических систем БНТУ.

**В приложениях** приведены классификационные схемы объекта для унификации его модельного представления, экранные формы разработанного МК PIMMS, а также документы, подтверждающие применение результатов диссертационной работы.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Разработана концепция полимодельного итерационного анализа АПС, отличающаяся эндогенной идентичностью частных моделей, параллельностью их запуска в итерациях и использованием межмодельной сходимости результатов в качестве критерия завершения итераций. Концепция позволяет снизить трудоемкость формирования и наладки МК за счет универсальности и автоматизации [1, 4, 7, 12, 18].

2. Предложены метод унифицированного представления АПС в моделях, включающий декомпозицию на основе базовых функций, и метод параметризации алгоритмов функционирования АПС, отличающийся представлением логических условий вероятностным описанием исходов их выполнения. Методы обеспечивают единообразную настройку МК на объект без пользовательского программирования [1, 6, 7, 12, 13]. Сокращение времени настройки для тестовых примеров составило в среднем 1,5 часа [10].

3. Разработана универсальная система данных для автоматического межмодельного обмена в МК на основе компонентов объемного временного балан-

са оборудования и деталей, отличающаяся представлением компонентов удельными коэффициентами пребывания ОТО и деталей в различных состояниях. Система обеспечивает единообразие интеграции, взаимодействия и взаимного уточнения ЧМ в МК за счет единого формата и автономности данных [1, 6, 8, 12].

4. Экспериментально доказано наличие стационарного режима работы АПС во всем диапазоне встречающихся на практике исходных данных. Этот факт позволяет использовать межмодельную сходимость результатов в качестве критерия завершения автоматических наладочных итераций МК [2, 3, 9].

5. Разработан универсальный алгоритм работы ММ, отличающийся тем, что реализует оригинальные положения предлагаемой концепции. Алгоритм обеспечивает единообразную автоматическую наладку МК вне зависимости от состава ЧМ и разграничения функций между ними [1, 19].

6. Разработан МК в виде программного пакета PIMMS, отличающийся тем, что реализует оригинальные положения предлагаемой концепции в сочетании с агрегативным представлением моделей [1, 14, 19]. Применение PIMMS позволяет повысить по сравнению с ближайшими аналогами долю охвата АПС штатными средствами МК без перепрограммирования с 66 % до 87 % и снизить трудоемкость формирования, настройки и наладки МК до 3 раз [10]. С использованием МК PIMMS получены регрессионные зависимости, на базе которых разработан экспресс-метод расчета выработки, производительности и средней длительности производственного цикла выполнения заказа АПС без непосредственного применения МК. Метод отличается от известных более полным учетом факторов и возможностью получения вероятностных интервальных оценок [2, 5, 16]. Метод позволяет оперативно получить результаты с приемлемой для практики точностью 3,5 % [5, 18].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты исследования целесообразно использовать для обоснования проектных вариантов вновь создаваемых и модернизируемых АПС обработки деталей в машино- и приборостроении. Эффективность практического использования результатов исследования подтверждается актами их внедрения на ЗАО «БелТАТ-М», на РУП «Минский тракторный завод», в представительстве компании «Sandvik Coromant AB» (Швеция) в Республике Беларусь. Общий годовой экономический эффект от внедрения составил 15,7 млн руб. (в ценах 2007 г.).

Разработанный пакет PIMMS может использоваться также для исследовательских и учебных целей. Эффективность такого использования подтверждается актом внедрения пакета в учебный процесс на кафедре робототехнических систем БНТУ и включением пакета в образовательный стандарт нового поколения ОСРБ 1-530106-2007 специальности «Промышленные роботы и робототехнические комплексы».

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Монография

1. Новичихин, Р.В. Моделирование производственных систем обработки деталей в машино- и приборостроении : монография / Р.В. Новичихин, Е.Р. Новичихина. – Минск : БНТУ, 2010. – 309 с.

### Статьи в научных журналах

2. Здор, Г.Н. Повышение адекватности марковских моделей механообрабатывающих участков и линий в условиях неустановившегося режима их работы / Г.Н. Здор, Е.Р. Новичихина // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 4. – С. 49–57.

3. Курч, Л.В. Аналитическо-имитационная модель производственных систем механообработки для оценки эффективности инструментального обеспечения / Л.В. Курч, Е.Р. Новичихина // Вестник ПГУ. Сер. С. Фундаментальные науки (математика и информатика, физика и химия, механика). – 2010. – № 9. – С. 44–49.

4. Здор, Г.Н. Полимодельный анализ производственных систем механообработки / Г.Н. Здор, Е.Р. Новичихина // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2011. – № 1. – С. 51–57.

5. Новичихина, Е.Р. Универсальная регрессионная модель производственных систем механообработки / Е.Р. Новичихина, Л.В. Курч // Вестник БНТУ. – 2011. – № 2. – С. 28–32.

### Статьи в сборниках материалов конференций

6. Новичихина, Е.Р. Программный комплекс для моделирования производственных систем / Е.Р. Новичихина, П.П. Шардыко // Материалы науч. конф. учащихся, студентов и аспирантов, посвященной 85-летию БНТУ, Минск, 15–17 ноября 2005 г. / БНТУ. – Минск, 2005. – С. 17–21.

7. Новичихина, Е.Р. Концепция многомодельного параллельно-итерационного анализа производственных систем / Е.Р. Новичихина // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2005 г. : в 2 ч. / БНТУ ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2006. – Ч. 1. – С. 243–245.

8. Новичихина, Е.Р. Систематизация показателей функционирования производственных систем для их комплексного анализа различными методами моделирования / Е.Р. Новичихина // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2006 г. : в 2 ч. / БНТУ ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2006. – Ч. 1. – С. 107–109.

9. Новичихина, Е.Р. Условия сходимости результатов у альтернативных методов моделирования производственных систем / Е.Р. Новичихина // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 5-й Междунар. науч.-техн.

конф., Минск, 2007 г. : в 2 ч. / БНТУ ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2007. – Ч. 1. – С. 129–131.

10. Новичихина, Е.Р. Эффективность использования моделирующего комплекса PIMMS для автоматизированных производственных систем / Е.Р. Новичихина, Л.В. Курч // Автоматизация технологических процессов: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 15-16 марта 2011 г., МинскЭкспо) / редкол.: Г.Н. Здор [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2011. – С. 113–114.

#### **Тезисы докладов на конференциях**

11. Новичихина, Е.Р. Интеллектуальная система моделирования производственных систем / Е.Р. Новичихина // НИРС-2003 : тезисы докладов 8-й Республиканской науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Минск, 9–10 декабря 2003 г. : в 7 ч. / БНТУ ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2003. – Ч. 7. – С. 11–12.

12. Новичихина, Е.Р. Комплексное моделирование производственных систем / Е.Р. Новичихина // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы 9-й Республиканской науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 13–15 марта 2006 г. / ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: Д.Г. Лин [и др.]. – Гомель, 2006. – С. 66–67.

13. Новичихина, Е.Р. Валидация модели производственных систем, построенной по методу динамики средних / Е.Р. Новичихина // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы 10-й Республиканской науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 12–14 марта 2007 г. / ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: Д.Г. Лин [и др.]. – Гомель, 2007. – С. 40–41.

14. Новичихина, Е.Р. Универсальная модель поступления и выполнения заказов механообрабатывающего цеха / Е.Р. Новичихина // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы 11-й Республиканской науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 17–19 марта 2008 г. : в 2 ч. / ГГУ им. Ф.Скорины ; редкол.: О.М. Демиденко [и др.]. – Гомель, 2008. – Ч. 1. – С. 33–34.

15. Новичихина, Е.Р. Использование пакета моделирования PIMMS для обоснования проекта модернизации цеха / Е.Р. Новичихина // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 7-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2009 г.: в 3 ч. / БНТУ; редкол.: Б.М.Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2009. – Ч.1. – С. 92.

16. Новичихина, Е.Р. Анализ дисперсии результатов различных методов имитационного моделирования производственных систем / Е.Р. Новичихина // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2010 г. : в 4 ч. / БНТУ ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2010. – Ч. 1. – С. 161.

17. Новичихина, Е.Р. Сравнительный анализ методов моделирования автоматизированных производственных систем / Е.Р. Новичихина // Совершенствование систем автоматизации технологических процессов : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24-25 мая 2010 г. / БНТУ ; редкол.: Г.Н. Здор [и др.]. – Минск, 2010. – С. 59.

18. Новичихина, Е.Р. Программный комплекс для моделирования механообработывающих участков и линий / Е.Р. Новичихина // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 12-13 апреля 2011 г., МинскЭкспо) ; редкол.: К.В. Шелег [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2011. – С. 129–131.

#### **Методическое пособие**

19. Новичихина, Е.Р. Моделирование производственных систем в среде PIMMS : методическое пособие / Е.Р. Новичихина, П.П. Шардыко. – Минск : БНТУ, 2008. – 24 с.

## РЭЗІЮМЭ

Навічыхіна Алена Раманаўна

Аўтаматызацыя фарміравання і наладкі мадэліруючых комплексаў  
для аўтаматызаваных вытворчых сістэм апрацоўкі дэталей

**Ключавыя словы:** аўтаматызаваныя вытворчыя сістэмы, камп'ютарнае прагназіраванне паказчыкаў вытворчых сістэм, мадэліруючы комплекс, алгарытм метамадэлі, мадэльны эксперымент, аўтаматызацыя мадэліравання.

**Мэта працы** – зніжэнне працаёмкасці працэсаў фарміравання і наладкі мадэліруючых комплексаў для аўтаматызаваных вытворчых сістэм шляхам універсалаізацыі і аўтаматызацыі пазначаных працэсаў.

**Метады даследавання:** сістэмны аналіз і даследаванне аперацый; аналітычнае мадэліраванне **маркаўскіх** працэсаў; **дыскрэтна-падзейнае** імітацыйнае мадэліраванне; статыстычнае мадэліраванне метадамі Монтэ-Карла і рэгрэсійнага аналізу; метады тэхналогіі машынабудаўніцтва і арганізацыі вытворчасці (тэорыя прадукцыйнасці і надзейнасці, тэхнічнае нармаванне, аб'ёмны часовы баланс).

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Распрацавана канцэпцыя ўніверсальнага і малапрацаёмкага шматмадэльнага комплексу для прагназавання паказальнікаў функцыяніравання аўтаматызаваных вытворчых сістэм. Навізна канцэпцыі заключаецца ў сутнасці і спалучэнні наступных прапанаваных прынцыпаў: эндагенная ідэнтычнасць мадэлей, паралельнасць запускаў мадэлей усярэдзіне ітэрацыі, узаемнае ўдакладненне мадэлей шляхам абмену ўдзельнымі пераменнымі стану, адсочванне міжмадэльнай збежнасці аднайменных вынікаў. Рэалізацыя канцэпцыі дазваляе здзяйсняць фарміраванне і наладку комплексу аўтаматычна без карыстальніцкага праграмавання і экспертнага ўдзелу. У працы прапанаваны: метады уніфікаванага прадстаўлення аўтаматызаваных вытворчых сістэм у мадэлях; універсальная сістэма дадзеных для аўтаматычнага міжмадэльнага абмену; універсальны алгарытм працы мадэліруючага комплексу; экспрэс-метады вызначэння паказальнікаў аб'екта на аснове рэгрэсійных залежнасцей.

**Ступень выкарыстання.** Вынікі даследавання рэалізаваны ў выглядзе праграмачнага пакету PIMMS. Пакет выкарыстоўваецца для абгрунтавання праектных і арганізацыйна-кіраўніцкіх рашэнняў на прадпрыемствах і ў арганізацыях рэспублікі, а таксама для даследчыцкіх і навучальных мэтаў.

**Галіна выкарыстання:** апрацоўчая вытворчасць у машынабудаўніцтве і прыборабудаванні; навучальны працэс.

## РЕЗЮМЕ

Новичихина Елена Романовна

Автоматизация формирования и наладки моделирующих комплексов для автоматизированных производственных систем обработки деталей

**Ключевые слова:** автоматизированные производственные системы, компьютерное прогнозирование показателей производственных систем, моделирующий комплекс, алгоритм метамоделей, модельный эксперимент, автоматизация моделирования.

**Цель работы** – снижение трудоемкости процессов формирования и наладки моделирующих комплексов для автоматизированных производственных систем путем универсализации и автоматизации указанных процессов.

**Методы исследования:** системный анализ и исследование операций; аналитическое моделирование марковских процессов; дискретно-событийное имитационное моделирование; статистическое моделирование методами Монте-Карло и регрессионного анализа; методы технологии машиностроения и организации производства (теория производительности и надежности, техническое нормирование, объемный временной баланс).

**Полученные результаты и их новизна.** Разработана концепция универсального и малотрудоемкого многомодельного комплекса для прогнозирования показателей функционирования автоматизированных производственных систем. Новизна концепции заключается в сути и сочетании следующих предложенных принципов: эндогенная идентичность моделей, параллельность запусков моделей внутри итерации, взаимное уточнение моделей путем обмена удельными переменными состояниями, отслеживание межмодельной сходимости одноименных результатов. Реализация концепции позволяет осуществлять формирование и наладку комплекса автоматически без пользовательского программирования и экспертного участия. В работе предложены: метод унифицированного представления автоматизированных производственных систем в моделях; универсальная система данных для автоматического межмодельного обмена; универсальный алгоритм работы моделирующего комплекса; экспресс-метод определения показателей объекта на основе регрессионных зависимостей.

**Степень использования.** Результаты исследования реализованы в виде программного пакета PIMMS. Пакет используется для обоснования проектных и организационно-управленческих решений на предприятиях и в организациях республики, а также для исследовательских и учебных целей.

**Область применения:** обрабатывающее производство в машиностроении и приборостроении; учебный процесс.



## SUMMARY

Novichikhina Elena Romanovna

Automation of formation and tuning of the modeling complexes for systems of automated manufacturing for processing of details

**Keywords.** Automated manufacturing systems, computer forecasting of key performance indicators, modelling system, metamodel algorithm, model experiment, automation of function modeling.

**Purpose.** To reduce labor intensity of the initial formulation and tuning of the modeling systems for automated manufacturing by means of universalization and automation of the processes.

**Methods.** Systems analysis and operations research; analytic modeling of Markov processes; discrete event simulation, statistical modeling using Monte Carlo simulation and regression analysis; methods of the theory mechanical engineering and organization of production process (the theory of performance and reliability, technical regulation, common the temporary balance).

**Results and novelty.** We propose a concept of the universal and easy to develop multi-model complex forecasting of key performance indicators of automated manufacturing. The novelty of the concept is in the following principles: the endogenous identity of the models, parallelization of the models running within the iteration, the reciprocal refinement of the models by means of exchange of the specific variables of the state, tracking of the intermodal convergence of the homonymous results. Our realization of these principles allows to automate the initial formulation and tuning of the modeling system without manual intervention and participation of the expert. In this work we have developed: an approach for unified representation of automated manufacturing systems in models, an universal protocol for parallel data exchange between submodels, an universal algorithm for the modeling system, a method for estimating key performance indicators which uses regression.

**Degree of use.** Results of the study are implemented as a software package PIMMS. The package is used to substantiate the design, organizational and administrative decisions on the enterprises and organizations of the republic, as well as for research and educational purposes.

**Application area.** Manufacturing, particularly in the area of mechanical engineering and instrumentation technology, the training process.

Научное издание

НОВИЧИХИНА Елена Романовна

АВТОМАТИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И НАЛАДКИ  
МОДЕЛИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (промышленность)

---

Подписано в печать 23.12.2011.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,34. Уч.-изд. л. 1,04. Тираж 60. Заказ 1375.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65, 220013, Минск.