

*На правах рукописи*

**КРАССИЙ Борис Александрович**

**МЕТОД РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНОГО  
ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации (информатика)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2004

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Мелехин Виктор Федорович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Поляхов Николай Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент Ростов Николай Васильевич

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие “Научно-производственное объединение “Аврора”

Защита состоится “23” декабря 2004 г. в 16 часов  
на заседании диссертационного совета Д 212.229.18  
при Государственном образовательном учреждении высшего  
профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет” по адресу:  
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, дом 21, аудитория 325

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного  
образовательного учреждения высшего профессионального образования  
“Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”

Автореферат разослан “22” ноября 2004 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета \_\_\_\_\_

Шашихин В.Н.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность исследования.** Технический прогресс связан с возрастанием сложности технических систем, увеличением глубины их настройки, уменьшением длительности жизненного цикла (ЖЦ). В технических системах постоянно расширяется применение систем автоматического управления (САУ). К процессу разработки САУ предъявляются требования увеличения гибкости и динамичности, сокращения затрат временных, материальных и интеллектуальных ресурсов. Существенный вклад в повышение эффективности разработки САУ может быть внесен использованием быстро развивающихся средств информационной поддержки этапов ЖЦ систем: систем виртуального динамического моделирования (СВДМ) и систем информационной поддержки ЖЦ изделий (ИПИ/CALS).

Виртуальная модель (ВМ, virtual prototype) – это системное объединение моделей, всесторонне описывающих техническую систему (объект управления, ОУ): ее геометрию, кинематику, динамику, а также аспекты ее изготовления и эксплуатации. Цель создания ВМ – обеспечение комплексного моделирования системы, чем достигается снижение затрат на разработку, изготовление и эксплуатацию системы. В диссертации используются виртуальные динамические модели (ВДМ) с акцентом на динамических свойствах моделируемой системы.

Системы ИПИ и СВДМ обеспечивают взаимодействие ВДМ (ВМ) и процессов, составляющих сущность этапов ЖЦ. Системы ИПИ предназначены для интеграции информационных процессов сопровождения этапов ЖЦ. В свою очередь, СВДМ – это подсистема ИПИ, ориентированная на моделирование процессов на этапе разработки. В частности, важнейшей функцией СВДМ является автоматизация формирования уравнений динамики системы на основе данных о ее структуре и параметрах, содержащихся в ВДМ.

Существенный недостаток современных систем ИПИ/ВДМ – информационный барьер между ВДМ и разработкой САУ.

Актуальность работы определяется потребностью совершенствования существующих методов разработки САУ для повышения эффективности и качества технических систем. При этом перспективно использование компьютерных методов и средств анализа, трансформации, визуализации информации, в их числе систем ИПИ/ВДМ.

Совместное использование ИПИ/ВДМ и разработки САУ вполне закономерно, и в последние годы к нему проявляется устойчивый интерес, в т.ч. со стороны производителей ведущих СВДМ. Тематика диссертации обусловлена потребностью в систематических исследованиях в данной области, которые послужили бы основой

инженерного применения и дальнейшего совместного развития систем ИПИ/ВДМ и практики разработки САУ.

В России концепция виртуального предприятия развивалась Г.Е. Лозино-Лозинским, А.Г. Братухиным, В.И. Дмитривым, С.Г. Арутюновым, В.И. Суровым и другими. Созданы центры исследований по системам ИПИ, в т.ч. при НИЦ АСК (Москва) и ЦНИИ РТК (С.-Петербург). На Западе системы ИПИ/ВДМ развиваются и внедряются в промышленности с 1980-х гг. Крупнейшие разработчики этих систем – Dassault Systèmes (Франция), Mechanical Dynamics (США), LMS (Бельгия).

Тема диссертации согласуется с перечнем критических технологий Российской Федерации: “Информационная интеграция и системная поддержка жизненного цикла продукции (CALS, CAD-, CAM-, CAE-технологии)” и “Компьютерное моделирование”, утвержденным Президентом Российской Федерации 30 марта 2002 г.

**Цели и задачи исследования.** Целью работы является создание метода и технологии разработки САУ на основе ВДМ, позволяющих снизить затраты интеллектуальных, временных и материальных ресурсов на формирование модели динамики ОУ, а также включить этапы разработки САУ в информационную структуру ЖЦ технической системы, тем самым расширив область применимости систем ИПИ/ВДМ на разработку САУ.

Для достижения поставленной цели решаются следующие основные задачи:

1. Исследование возможностей ВДМ и систем ИПИ/ВДМ, как средства компьютерного анализа, трансформации и визуализации информации, для разработки САУ и информационной интеграции этапов разработки САУ в системы ИПИ/ВДМ.

2. Формирование структуры и исследование основных этапов разработки САУ на основе ВДМ.

3. Исследование специфики используемых математических методов идентификации и синтеза САУ и особенностей их совместного применения в контексте создания метода разработки САУ, основанного на ВДМ.

4. Создание технологии разработки САУ, базирующейся на предлагаемом методе, и ее реализация с привлечением современных систем автоматизированного проектирования (САПР) САУ, систем ИПИ/ВДМ и специального математического и программного обеспечения.

5. Оценка области применимости предлагаемых метода и технологии разработки САУ и обеспечение адекватности получаемых результатов.

**Объект исследования:** теория и технология создания САУ с использованием средств компьютерного моделирования, САПР, математических методов обработки информации, идентификации систем и синтеза САУ.

**Методы исследования** включают аппарат системного анализа, математического моделирования, теории динамических систем, теории автоматического управления, теоретической механики, численного анализа, теории идентификации, линейной алгебры, обыкновенных дифференциальных уравнений и теории оптимизации, а также методы компьютерного моделирования и обработки информации.

**Научная новизна:**

1. Доказана возможность разработки САУ на основе ВДМ при уменьшении трудозатрат за счет исключения явного аналитического, формульного, написания уравнений динамики ОУ или постановки натурального эксперимента.

2. Обосновано расширение функциональных возможностей систем ИПИ/ВДМ на этап разработки САУ, чем достигается более высокий уровень интеграции этого этапа с другими этапами ЖЦ системы.

3. Выявлена специфика, установлены ограничения и определены правила совместного использования методов идентификации моделей ОУ и синтеза САУ при разработке САУ на основе ВДМ.

4. Доказана реализуемость предлагаемого метода для выделенного класса ОУ в виде технологии разработки, использующей аппарат существующих методов параметрической идентификации систем и синтеза САУ, а также современные САПР САУ и системы ИПИ/ВДМ.

**Практическая значимость** диссертационной работы состоит в создании технологии и ее реализации с использованием известных методов идентификации и управления и существующих современных программных пакетов САПР САУ и ИПИ/ВДМ. Повышение эффективности разработки САУ достигается главным образом за счет:

1. Автоматизации рутинного процесса формирования моделей динамики объекта управления на основе ИПИ/ВДМ.

2. Информационной интеграции этапов разработки САУ с другими этапами ЖЦ технической системы, что делает возможным использование содержащейся в ИПИ информации о структуре и параметрах объекта управления при разработке САУ.

3. Многократного использования ВДМ с аккумуляцией информации о предшествующих поколениях системы, специфических для конкретной предметной области алгоритмов и знаний, применения ВДМ не только для разработки САУ, но и для тестирования системы, тренировки операторов, технической поддержки, маркетинга.

4. Целостности представления технической системы посредством ВДМ, представление системы не набором уравнений, а феноменологически.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод разработки САУ на основе ВДМ (его структура и основные этапы), применение которого позволяет повысить эффективность процесса разработки САУ, вписать этапы разработки САУ в информационную структуру ЖЦ системы, распространить область применимости систем ИПИ/ВДМ на разработку САУ.

2. Технология разработки САУ с использованием стандартных математических методов идентификации и управления, реализуемой на базе современных программных пакетов САПР САУ, систем ИПИ/ВДМ и специального математического и программного обеспечения.

**Апробация.** Основные научные и практические результаты работы докладывались и обсуждались на XV научно-технической конференции “Экстремальная робототехника” (6-7 апреля 2004 г., С.-Петербург), XXXII неделе науки СПбГПУ – межвузовской научно-технической конференции (24-29 ноября 2003 г., С.-Петербург), международных конференциях “Modelling and Simulation” (“Моделирование и исследование моделей”; 13-15 мая 2002 г., Марина дель Рей, США и 24-26 февраля 2003 г., Палм Спрингс, США), научно-практической конференции фирмы Delmia (6 ноября 2002 г., Тампере, Финляндия), школе молодых ученых Хельсинкской аспирантуры по вычислительной технике HeCSE (2-3 сентября 2002 г., Нокиа, Финляндия).

Ряд элементов предложенного в диссертации метода разработки САУ был опробован при исследовании системы автоматического подавления остаточных колебаний груза портального крана в рамках совместного научно-технического проекта Хельсинкского технологического университета и фирмы KCI Konecranes Oyj.

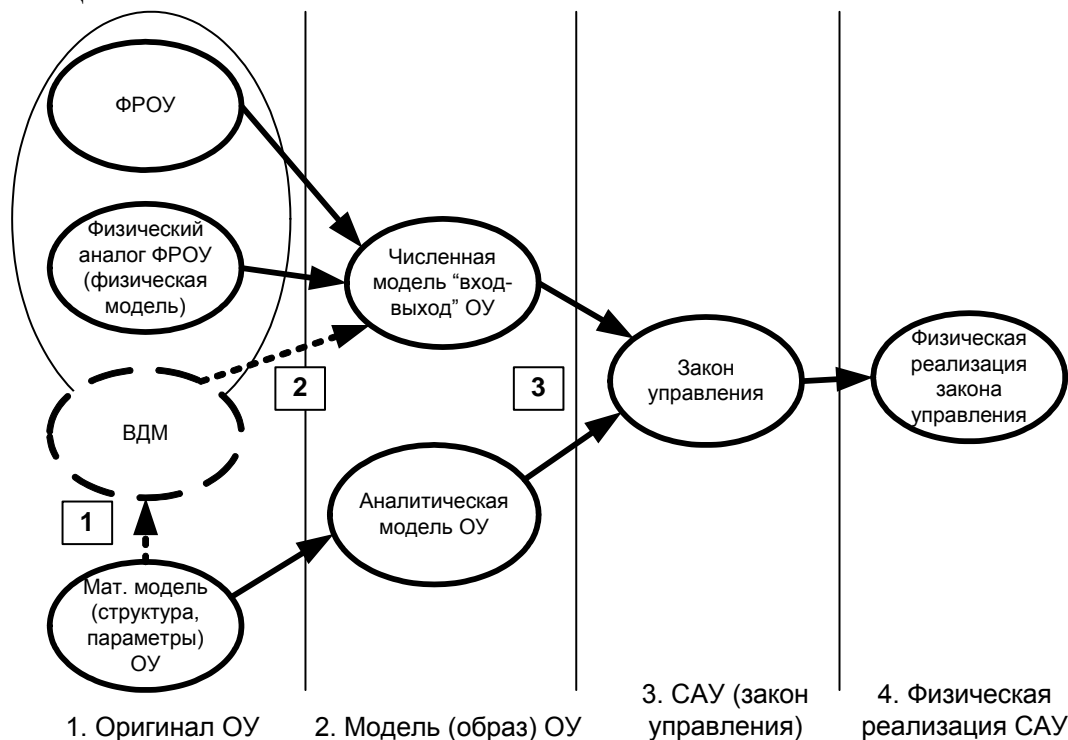
**Реализация.** Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры автоматики и вычислительной техники СПбГПУ в курсах по системам автоматического управления и в Хельсинкском технологическом университете в курсах “Виртуальное моделирование и динамические модели” и “Теория автоматического управления в промышленных приложениях”.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 4 печатных работы.

**Структура и объем работы.** Диссертация включает в себя 4 главы, введение, заключение, список литературы и 2 приложения. Общий объем – 207 страниц, основное содержание – 177 страниц. Работа содержит 24 рисунка и 4 таблицы. В списке литературы 141 источник, из них 52 отечественных, 89 иностранных.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Глава 1** “Анализ существующих методов и инструментария разработки САУ”. Итеративный процесс разработки САУ представим в виде графа, вершины которого размещены на 4-х уровнях (рис. 1): оригинал ОУ, модель (образ) ОУ, САУ (закон управления), физическая реализация САУ.



*Рис. 1. Структура процесса разработки САУ*

Под оригиналом ОУ, относительно его модели, понимается некоторый гомеоморфный образ реального ОУ, содержащий только существенные для разработки САУ информационные, в т.ч. динамические, свойства ОУ. Среди методов установления отношения (изоморфизма) между оригиналом и моделью ОУ отметим натурный эксперимент и физическое моделирование, приводящие, как правило, к численной модели “вход-выход”, а также аналитическое моделирование, соответствующее формульному представлению модели ОУ. В основе разработки САУ лежит модель ОУ. Поэтому по методу установления отношений “оригинал – модель” будем классифицировать и методы разработки САУ.

В настоящее время хорошо разработаны абстрагированные от предметной области ОУ математические методы анализа и синтеза САУ, а физическая реализация САУ существенно облегчена наличием высокоразвитых программных и аппаратных средств. Однако получение модели ОУ сопряжено с фундаментальными трудностями, поскольку эта фаза сильно связана с предметной областью ОУ и наименее поддается

формализации по сравнению с другими фазами процесса разработки. С одной стороны, аналитическое моделирование требует высокой квалификации инженера, знания и навыков математического выражения физических процессов функционирования ОУ. С другой стороны, “физические” методы моделирования подразумевают наличие экспериментальных данных, получение которых в достаточном объеме для всех требуемых динамических режимов ОУ может быть затруднительно в связи с отсутствием ФРОУ или его физической модели-аналога, а также в силу экономических, экологических и других причин.

Общими критериями оценки и направлениями повышения эффективности процессов, составляющих ЖЦ технической системы, являются автоматизация рутинной работы, рационализация путем удаления непроизводительных операций, информационная интеграция и облегчение протекания потоков информации (М. Mäntylä и Н. Andersin, 1998). В настоящей работе эти критерии и рекомендации распространены и на процесс разработки САУ.

Если разработка САУ, основанная на “физических” методах моделирования, в основном зависит от возможности постановки качественного эксперимента, то метод разработки САУ, базирующийся на аналитическом моделировании, поддается интенсификации путем применения средств вычислительной техники и САПР, что сегодня в основном сводится к упрощению формирования уравнений динамики и облегчению манипуляции с полученными уравнениями. Здесь можно отметить пакеты символьных вычислений, язык MODELICA, бонд графы. При этом разработка САУ рассматривается обособленно от других этапов ЖЦ системы, что приводит к низкому уровню информационной интеграции в пределах ЖЦ. Возникает дублирование информации, встречаются препятствия потоки информации между различными этапами ЖЦ, затрудняется использование информации об ОУ, содержащейся в ИПИ системах.

Автором показано, что эти недостатки могут быть уменьшены при применении систем ИПИ/ВДМ в разработке САУ. Это открывает перспективы усовершенствования процесса разработки САУ по всем трем указанным выше направлениям. Помимо автоматизации формирования уравнений динамики ОУ в СВДМ, появляется возможность использования общей ВМ, составляющей основу ИПИ, для связи информационных потоков между различными этапами ЖЦ технической системы, включая и этапы создания САУ. Тем самым практика разработки САУ обогащается за счет привлечения потенциала систем ИПИ/ВДМ, которые, в свою очередь, расширяют область своих применений. В работе отмечено, что создание метода разработки САУ, основанного на ВДМ, во многом эквивалентно построению технической



реализации интерфейса между ВДМ и существующими формальными методами синтеза САУ.

В главе 2 “Метод разработки САУ на основе ВДМ” подробно изложены теоретико-методологические основы предлагаемого метода разработки САУ. Главная идея (рис. 1, пунктир) состоит в замене ФРОУ его ВДМ (1), имитационном моделировании (“прогоне”) ВДМ в СВДМ с получением численной модели ОУ “вход-выход” (2), и последующем синтезе закона управления на базе полученной модели ОУ (3). Описываемый метод представлен в виде процедуры на рис. 2.

*Вход* процедуры – исходные данные об ОУ: техническая документация, чертежи, спецификации. При наличии возможно использование содержащихся в ИПИ моделей ОУ, экспертных знаний, результатов анализа предыдущих поколений САУ. Объем информации о структуре и параметрах ОУ на требуемом уровне системной сложности в целом должен быть таким же, какой необходим для составления традиционными методами формульного описания динамики ОУ, связанной с контуром управления. Также должна быть сформулирована задача управления в виде функциональных и нефункциональных требований к САУ. *Выход* процедуры – закон управления, удовлетворяющий заданным техническим требованиям. Метод включает в себя *три основных этапа*:

*Этап 1.* На основе исходных данных производится построение ВДМ ОУ в СВДМ. Выбор СВДМ определяется классом доминирующих физических явлений, наиболее существенных для описания динамики ОУ, масштабом моделируемых явлений и системным уровнем их сложности (по Л. фон Берталанфи). Если явления, оказывающие влияние на динамику, не поддерживаются СВДМ, то их требуется описать аналитически. Построение ВДМ зависит от класса определяющих динамику ОУ физических явлений и типа соответствующей СВДМ, однако в любом случае нужно задать структуру и параметры ОУ.

Так, для механических систем построение ВДМ состоит из моделирования геометрии ОУ (по чертежам), в т.ч. с использованием готовых моделей из системы ИПИ, кинематики (на базе кинематического графа), задания динамических параметров (массы, трения и т.д.). Затем СВДМ автоматически составляет уравнения динамики ОУ. Для механических систем для этого используется формализм уравнений динамики Лагранжа. Все последующие этапы предлагаемого метода инвариантны по отношению к предметной области ОУ.

Далее необходим анализ ВДМ на предмет ее соответствия всей имеющейся дополнительной информации, в зависимости от ее наличия: существующих моделей, ФРОУ, предыдущих поколений ОУ, экспертных знаний, известных аналитических соотношений.

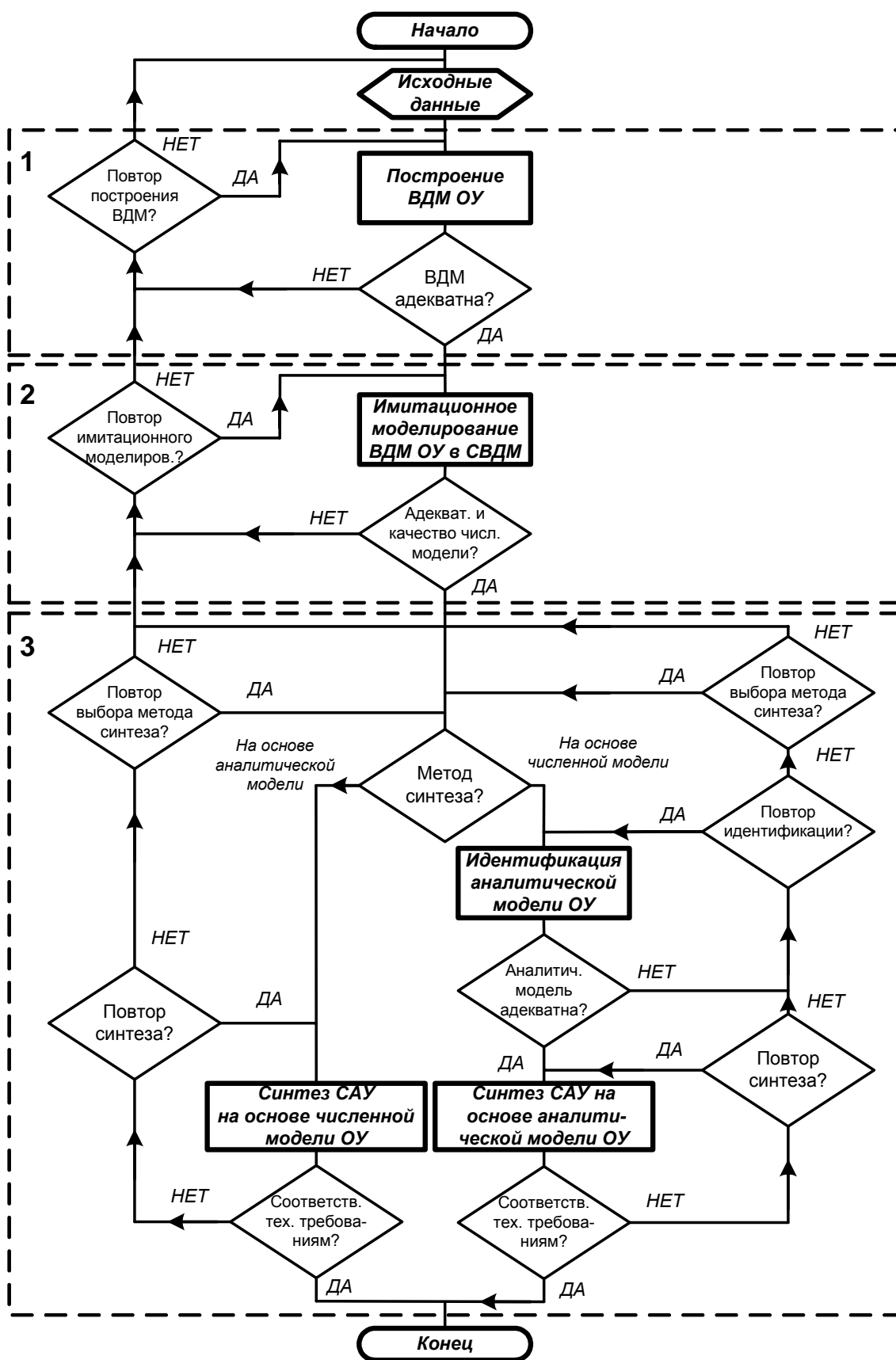


Рис. 2. Этапы разработки САУ на основе ВДМ

*Этап 2.* Уравнения динамики в СВДМ формируются обычно в неявном виде, они недоступны пользователю СВДМ и непосредственно использовать эти уравнения для синтеза САУ затруднительно. Одно из решений – имитационное моделирование (“прогон”) ВДМ в требуемых режимах с целью получения численной модели “вход-выход” ОУ.

Требуется, чтобы входной сигнал, подаваемый на вход ВДМ, так возбуждал ОУ, чтобы получаемая численная модель “вход-выход” обладала репрезентативностью, содержала достаточно богатую информацию о рабочих режимах ОУ, обеспечивала подобие динамики ВДМ ОУ и численной модели. С использованием ВДМ можно поставить более обширные эксперименты по имитационному моделированию ОУ и получить больший объем численных данных, чем в натурном эксперименте. Однако эти численные данные не будут содержать в себе информацию о тех особенностях ОУ, которые не были приняты во внимание при построении ВДМ. В этом состоит одно из ограничений предлагаемого метода разработки.

*Этап 3.* Синтез закона управления осуществляется в САПР САУ известными методами одной из двух групп: на базе предварительно идентифицированной аналитической модели или на основе численной модели “вход-выход”.

Автором показано, что выбор математических методов синтеза САУ на данном этапе определяется тем, что для синтеза применяется численная модель “вход-выход” ОУ, сгенерированная в СВДМ, а разрабатываемая САУ будет функционировать в реальных условиях. Оценка области неопределенности на основе численной модели ОУ, полученной моделированием ВДМ, гораздо беднее и менее надежна, чем при натурном эксперименте с ФРОУ. Это нужно учитывать при использовании методов робастного управления, опирающихся на априорное знание области неопределенности ОУ.

*Анализ метода.* Принципиальное отличие предлагаемого метода от традиционных состоит в организации процесса разработки САУ. Метод разработки на основе ВДМ занимает промежуточное положение между методами, основанными на аналитическом или физическом моделировании и натурном эксперименте (рис. 1). Отправные позиции и исходные данные, требующиеся для построения ВДМ и формирования аналитической модели, в целом идентичны. Но если аналитическое моделирование может быть трудоемко, то построение ВДМ – это формальная процедура задания структуры и параметров ОУ в СВДМ, напоминающую сборку по чертежам. Далее СВДМ позволяет автоматически сформировать уравнения динамики. В основе ВДМ в неявной форме лежит формульное описание динамики и, следовательно, ВДМ по содержанию обладает свойствами аналитической модели,

однако по форме ВДМ – физическая модель, т.к. при экспериментах с ВДМ в СВДМ это формульное описание динамики инкапсулировано в ВДМ и явно не фигурирует, скрыто от инженера. ВДМ выступает как альтернативная форма представления ОУ наряду с математической и физической моделями ОУ и ФРОУ.

Кроме этого используется информационный потенциал ВДМ. Хотя для разработки САУ, как правило, пользуются только моделью динамики, комплексный и целостный подход к моделированию системы посредством ВДМ повышает качество разработки. При этом на разработку САУ распространяются известные достоинства ВДМ, заключающиеся в более полном моделировании всех связанных с системой аспектов, что делает возможным снизить риск внесения изменений в проект системы на поздних стадиях ее разработки или подготовки производства, сократить продолжительность разработки и затраты на оборудование.

Построение ВДМ – самый трудоемкий этап предлагаемого метода. По данным А. Wenderoth (2002), для некоторых статических ВМ он занимает в 4 раза больше времени, чем последующая работа с ВМ. В нашем случае ситуация усугубляется необходимостью учета динамики в ВДМ и затратами на ее верификацию. Поэтому имеет смысл построенную ВДМ использовать многократно, постепенно дополняя и уточняя ее как в пределах текущего поколения создаваемой системы, так и при разработке ее последующих поколений, аккумулируя в ВДМ опыт разработки, специфические алгоритмы и знания. Рациональнее всего строить ВДМ уже при разработке ОУ, высвобождая ресурсы инженера-разработчика САУ, и использовать ВДМ вплоть до пост-анализа САУ, моделирования системы в целом, построения тренажеров.

ВДМ предоставляет возможность информационной интеграции этапа разработки САУ с другими этапами ЖЦ системы в рамках ИПИ: на протяжении ЖЦ системы используется единая ВМ, способствующая лучшей взаимосвязи всех его участников. Координация работы и возможность оценки влияния модификаций на различные этапы ЖЦ и на всю систему в целом важны для современной промышленности, когда за те или иные этапы ЖЦ отвечают разные отделы или предприятия.

СВДМ менее универсальны для моделирования систем с различной природой физических явлений, чем язык MODELICA и бонд графы в сочетании с пакетами символьных вычислений. Однако информационный потенциал ВДМ и возможности интеграции ЖЦ дают предлагаемому методу разработки неоспоримые преимущества.

С точки зрения разработчика САУ описываемый в диссертации метод обладает принципиальной новизной: ОУ представляется как виртуальная “физическая” модель с акцентом на феноменологическое

описание, что способствует естественному восприятию инженером ОУ как целостного явления, а не как набора уравнений. Применение предлагаемого метода разработки требует от инженера, кроме традиционных знаний теории автоматического управления и САПР САУ, владения системами ИПИ/ВДМ, что окупается повышением эффективности разработки САУ.

*Наибольший эффект* от применения метода разработки на основе ВДМ достигается, главным образом, когда:

- Возможно многократное использование ВДМ на всех этапах ЖЦ и эволюционное развитие ВДМ от поколения к поколению, или если необходима перенастройка САУ, связанная со специализацией ОУ “под заказ”. Это снижает относительные затраты на создание ВДМ.
- Аналитическая модель динамики ОУ отсутствует, ее получение трудоемко, а натурные эксперименты невозможны.
- Аналитическая модель имеется, но нуждается в относительно независимой проверке, т.е. имеет место совместное применение ВДМ с традиционными методами моделирования, например, с целью контроля ошибок, допускаемых при “ручном” выводе аналитической модели.

Глобальная *область применимости* метода определяется выполнимостью 3-х групп требований:

1. Возможность построения ВДМ ОУ в СВДМ в зависимости от наличия необходимых данных о структуре и параметрах ОУ и СВДМ, соответствующей классу лежащих в основе ОУ физических явлений.
2. Возможность получения в результате “прогона” ВДМ численной модели необходимого качества в смысле ее репрезентативности и пригодности для последующей идентификации и синтеза САУ.
3. Наличие математических методов, пригодных для синтеза САУ на основе полученной численной модели “вход-выход”.

*Адекватность получаемых результатов* – САУ, ее практическая работоспособность, поставлена в зависимость от адекватности ВДМ, адекватности и качества численной модели “вход-выход”, робастности синтезированной САУ и оценивается на каждом из 3-х этапов (рис. 2). В общем случае, невозможно оценить адекватность результатов не выйдя за рамки системы “модель ОУ – САУ”, т.е. адекватность результатов должна проверяться моделированием САУ в СВДМ, а также, как и в случае использования любых других методов разработки САУ, макетированием, полунатурными и натурными испытаниями.

**Глава 3** “Технология разработки САУ и ее реализация”. В диссертации рассматривается класс ОУ со следующими признаками. Это ОУ с известной структурой и параметрами, функциональный оператор которых выражается в классе обыкновенных дифференциальных или разностных уравнений. Включаются ОУ с линеаризуемыми

нелинейностями и нестационарными системами с медленно меняющимися параметрами. Технология разработки применима для устойчивых ОУ и тех неустойчивых, которые могут быть стабилизированы каким-либо методом без привлечения аналитической модели ОУ или фазовые траектории которых за период моделирования не покидают окрестности рабочего режима, где требуется адекватность численной модели объекту. Выбор класса ОУ продиктован наличием соответствующих ему и хорошо разработанных формальных методов идентификации и управления.

Основой технологии является получение численной модели “вход-выход” ОУ путем “прогона” ВДМ в СВДМ в окрестности требуемых рабочих режимов. ВДМ, как правило, нелинейна, а получаемая численная модель по сути является линейным приближением ВДМ в рассматриваемом рабочем режиме. Поэтому для полученной аналитической модели можно привлечь или методы идентификации линейных моделей с последующим синтезом САУ, или для синтеза напрямую использовать численную модель ОУ. Для всестороннего тестирования синтезированной САУ рационально использовать нелинейную ВДМ.

Автором выявлена специфика применения известных методов идентификации и синтеза САУ в контексте разработки САУ на основе ВДМ. В этой связи проводится анализ 2-х групп методов.

Первая группа требует предварительной идентификации аналитической модели динамики ОУ на основе численной модели “вход-выход”. Для описанного выше класса ОУ существуют конструктивные критерии и пути обеспечения качества численной модели “вход-выход” ОУ, где под качеством мы понимаем не только адекватность объекту, но и пригодность модели для последующей идентификации аналитической модели или непосредственного синтеза САУ. В работе рассматриваются 3 фактора, в совокупности определяющие качество численной модели: порядок постоянства возбуждения, число отсчетов и спектральные характеристики входного сигнала. Кроме того, для обеспечения надежности результатов идентификации предлагается проверка результатов при замыкании контура управления.

Среди методов идентификации для многомерных ОУ наиболее удобен метод подпространств (subspace identification), использующий стандартную форму пространства состояний в сочетании с методами оценки порядка идентифицируемой модели: сингулярным анализом и критериями AIC (H. Akaike) и MDL (J. Rissanen).

Показано, что наиболее узким местом предлагаемой технологии является недостаточная развитость методов синтеза многомерных САУ, гарантирующих ее робастность в условиях неполноты информации об области неопределенности ОУ. Следовательно, особое значение имеет

всестороннее тестирование синтезированной САУ в различных режимах и с различными параметрами с целью оценки робастности результатов.

Вторая группа методов синтеза САУ опирается непосредственно на численную модель “вход-выход” ОУ. К ней в равной степени относятся сформулированные выше выводы относительно специфики идентификации и синтеза САУ. Проанализированы 2 метода: линейно-квадратичный гауссиан, основанный на численной модели ОУ “вход-выход” (data-based LQG) и поэтапное адаптивное управление (итеративные методы идентификации и управления). Выполненные исследования показывают, что в рамках технологии разработки для этих методов можно рекомендовать выполнение первого шага в процессе настройки параметров САУ и ее тестирование на основе ВДМ, т.е. без привлечения ФРОУ или аналитической модели ОУ.

Предлагаемая технология реализуется на базе существующих пакетов СВДМ и САПР САУ. Наиболее распространены СВДМ IGRIP/ENVISION семейств D5 и V5 (после дооснащения последней модулем динамики), LMS/VirtualLab, ADAMS. В работе сформулированы основные требования к функциональным возможностям СВДМ. Кроме автоматизации формирования уравнений динамики и трехмерной визуализации, необходимы (для механических систем) модули решения прямой и обратной задач кинематики, набор методов численного интегрирования с контролем невязок, обусловленности. Также должен обеспечиваться доступ к величинам, описывающим состояние системы.

Математические методы идентификации и управления наиболее полно реализованы в САПР MATLAB/SIMULINK. Среди других пакетов, используемых как САПР САУ, выделим Scilab и MATRIXx.

**Глава 4** “Пример использования технологии разработки САУ на основе ВДМ”. В качестве иллюстрации применения описываемой технологии разработки САУ и доказательства ее инженерной применимости рассматривается создание системы точного позиционирования груза порталного крана (ПК). Основное внимание уделяется не синтезу нового закона управления, а *совместному* применению *известных* методов идентификации и управления. Выбор примера объясняется тем, что ПК – это “классический” ОУ и по вопросу моделирования и синтеза САУ ПК имеется обширная литература.

Используемая в диссертации рабочая модель ПК (структура и параметры по Y. Sakawa, Y. Shindo, 1982), соответствует реально существующему ПК и представляет собой электромеханическую систему с 3-мя механическими степенями подвижности (выходами): линейные перемещение вагонетки и подъем/спуск груза и угловое отклонение от вертикали троса, удерживающего груз (рис. 3а). Имеется 2 входа – моменты двигателей привода перемещения вагонетки и подъема груза.

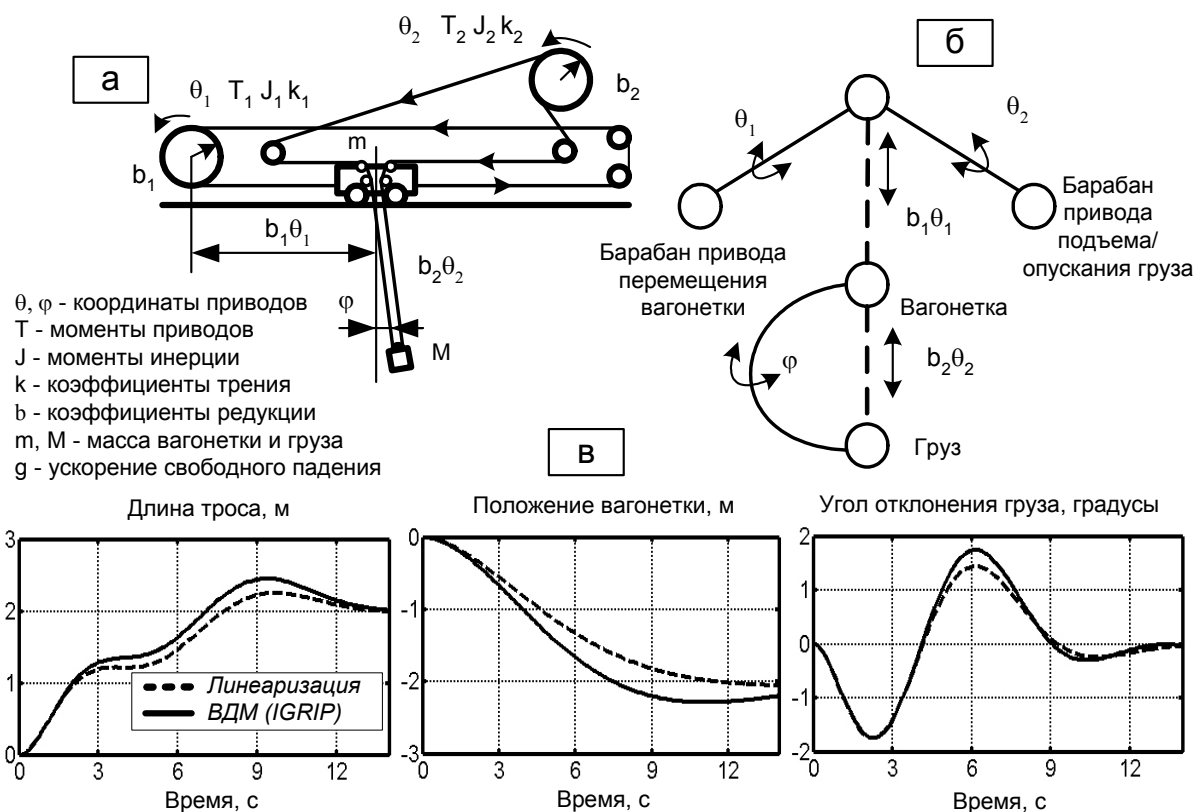


Рис. 3. а) рабочая модель ПК; б) кинематический граф ПК; в) ПК с управлением: перемещение вагонетки на 2м и подъем груза на 2м

Задача управления грузом ПК состоит в перемещении груза при ограничениях по скорости перемещения вагонетки и вертикального перемещения груза, а также по величине управляющих моментов, с минимизацией колебаний груза по пути следования и вблизи конечной точки. Цель – уменьшение длительности рабочего цикла, снижение вибрации всей конструкции, повышение безопасности работ.

Сложность управления ПК определяется следующими факторами: 1) ПК слабо демпфирован; 2) место приложения управления по отношению к грузу расположено очень “невыгодно”; 3) ПК – нелинейная система с меняющимися параметрами как в пределах рабочего цикла (длина троса), так и от цикла к циклу (различная масса грузов, перемещение с грузом и без).

На основе уравнений Лагранжа 2-го рода в работе получена аналитическая модель динамики (см. обозначения на рис. 3а):

$$\begin{cases} (J_1 + (M + m)b_1^2)\ddot{\theta}_1 + Mb_1b_2(\ddot{\theta}_2 \sin \varphi + \dot{\theta}_2\dot{\varphi} \cos \varphi + 2\dot{\theta}_2\dot{\varphi} \cos \varphi - \theta_2\dot{\varphi}^2 \sin \varphi) + k_1\dot{\theta}_1 = T_1, \\ Mb_1b_2\dot{\theta}_1 \sin \varphi + (J_2 + Mb_2^2)\ddot{\theta}_2 - Mb_2^2\theta_2\dot{\varphi}^2 - Mgb_2 \cos \varphi + k_2\dot{\theta}_2 = T_2, \\ Mb_1b_2\theta_2\ddot{\theta}_1 \cos \varphi + Mb_2^2\theta_2^2\ddot{\varphi} + 2Mb_2^2\theta_2\dot{\theta}_2\dot{\varphi} + Mgb_2\theta_2 \sin \varphi + k_3\dot{\varphi} = 0. \end{cases}$$

Трудоемкость вывода этих уравнений значительна, особенно при увеличении степени детализации рабочей модели ПК (учет трения, тормозов, оттяжек, неидеализированных характеристик двигателей,



подвеса в виде двойного маятника). Идентификация модели на этапе проектирования ПК невозможна по причине отсутствия ФРОУ.

Автором решена проблема разработки САУ с привлечением ВДМ без явного вывода аналитических уравнений и натурального эксперимента.

*Этап 1.* В СВДМ IGRIP построена ВДМ ПК, соответствующая рабочей модели: задана геометрия системы, кинематика ПК на основе кинематического графа (рис. 3б) и динамические параметры. СВДМ автоматически формирует уравнения динамики ПК (в неявном виде). Результаты моделирования ВДМ ПК в СВДМ обнаруживают полное совпадение с результатами моделирования аналитической модели ПК.

В работе показана возможность использования линеаризованной модели ПК для решения сформулированной выше задачи управления. Для больших отклонений переменных состояния ПК обосновано использование метода коммутации САУ (gain scheduling).

*Этап 2.* Путем “прогона” в ВДМ получена численная модель “вход-выход” ПК в одном из типовых режимов точного позиционирования груза. В качестве входных сигналов (см. гл. 3) использованы несимметричные меандры максимально возможной амплитуды.

*Этап 3.* На основе модели “вход-выход” методом подпространств (функция *n4sid*, MATLAB/Identification) идентифицирована линейная МИМО модель в пространстве состояний 6-го порядка с 2-мя входами и 3-мя выходами. Порядок оценен методом сингулярного анализа (в *n4sid*). Адекватность линеаризованной модели доказана сравнением с ВДМ.

Применяя полученную линеаризованную модель, произведен синтез САУ: вычислены параметры линейной стационарной обратной связи по состоянию, минимизирующей заданный линейно-квадратичный функционал (функция *dlqr*, MATLAB/Control). Тестирование САУ выполнено как в MATLAB на линеаризованной модели, так и в СВДМ на нелинейной ВДМ ПК.

Управление ПК при точном позиционировании в заданном типовом рабочем режиме существенно (почти в 3 раза) сокращает длительность переходного процесса в сравнении с разомкнутой системой (рис. 3в).

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. Предложен метод разработки САУ на основе ВДМ, не требующий явного аналитического, формульного, написания уравнений динамики ОУ или постановки натурального эксперимента и отличающийся высоким уровнем информационной интеграции этапа разработки САУ с другими этапами ЖЦ технической системы.

2. Установлены ограничения и определены правила совместного применения математических методов идентификации моделей ОУ и синтеза САУ на основе ВДМ.

3. На базе предлагаемого метода, создана технология разработки САУ, реализуемая с привлечением аппарата параметрической идентификации систем и методов синтеза САУ и с использованием современных САПР САУ, систем ИПИ/ВДМ и специального математического и программного обеспечения. Приведено доказательство применимости технологии разработки САУ для ОУ с известной структурой и параметрами, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями, линейных или с линеаризуемыми нелинейностями, стационарных или с медленно меняющимися параметрами, устойчивых или стабилизируемых методами, не требующими знания аналитической модели ОУ.

4. Проанализированы и обоснованы подходы к оценке и обеспечению адекватности результатов, получаемых с помощью предложенных в работе метода и технологии разработки САУ.

5. Показана инженерная применимость предложенной технологии на примере разработки САУ точного позиционирования ПК.

Полученные в диссертационной работе результаты способствуют развитию функциональных возможностей систем ИПИ/ВДМ и расширяют область их использования.

Метод и технологию разработки САУ на основе ВДМ можно рекомендовать для внедрения как производителям систем ИПИ/ВДМ, так и разработчикам САУ. Кроме того, результаты работы могут быть полезны для обучения современным методам и средствам автоматизированного проектирования САУ и технологиям ИПИ(CALS)/ВДМ.

### ***СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ***

1. Бабко Л.В., Крассий Б.А., Туоминен Ю.О. Автоматизация разработки систем автоматического управления с использованием виртуального динамического моделирования // Материалы XV научно-технической конференции “Экстремальная робототехника”, 6-7 апреля 2004 г., С.-Петербург. – СПб.: ЦНИИ РТК, 2004. – с. 342-347

2. Крассий Б.А., Бабко Л.В. Использование систем виртуального моделирования в процессе разработки САУ // XXXII неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научно-технической конференции: ч.5, 24-29 ноября 2003 г., С.-Петербург. – СПб.: СПбГПУ, 2004. – с. 53-54

3. Krassi, B.A., Tuominen, J.O., Virtual prototyping for integration of the control system design chain // Proc. IASTED Internat. Conf. “Modelling and Simulation”, Palm Springs, USA, February 24-26, 2003, pp. 99-105

4. Krassi, B.A., Tuominen, J.O., Virtual prototyping for automated generation of mathematical models // Proc. IASTED Internat. Conf. “Modelling and Simulation”, Marina del Rey, USA, May 13-15, 2002, pp. 287-291