

На правах рукописи

Романов Александр Евгеньевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ, ПРОГРАММНОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ  
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДСИСТЕМЫ САПР ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ  
ПРИБОРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность: 05.13.12 Системы автоматизации проектирования  
(промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург-2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Сольницев Ремир Иосифович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Рудинский Александр Вадимович

кандидат технических наук Быков Владислав Павлович

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «НИИ Командных приборов»

Защита состоится 7 декабря 2010 г. в 16:30 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.02 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан 2 ноября 2010 г.

Ученый секретарь

совета по защите докторских

и кандидатских диссертаций

Д 212.238.02

Сафьянников Н.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

### Актуальность исследования

Современный уровень развития и постоянно возрастающие требования к приборам систем управления сказываются на трудоемкости испытательных процедур. Несмотря на возможность математического моделирования, испытания приборов систем управления (ПСУ) остаются необходимой проектной процедурой на всех этапах их проектирования, поскольку не всегда возможно обеспечить полную адекватность математической модели ПСУ оригиналу, определить математические модели элементов и процессов.

Существующие на сегодняшний день системы автоматизации процесса испытаний позволяют решать ограниченный круг задач. Например, система LDS Dactron применима только для случая вибрационных испытаний ПСУ. Существенным недостатком существующих систем является статистический анализ испытательных данных как стационарных случайных процессов. Недостаточно оценивать поведение ПСУ при системе действующих сил, моментов и возмущений, пользуясь детерминированными и вероятностными математическими моделями, основанными только на теории стационарных случайных процессов. Отсутствие учета нестационарности случайных процессов может привести к возникновению больших погрешностей измерения и неправильной интерпретации полученных результатов.

В постановку и решение основных задач, связанных с обработкой нестационарных случайных процессов, большой вклад внесли ученые: В.С. Пугачев, Э. И. Цветков, В. В. Ольшевский и другие. Вопросы испытаний аппаратуры подвижных объектов рассматривались в трудах Г. Д. Хаски, Г. А. Корна, Д. С. Пельпора, У. Ригли, У. Холлистера, В. Л. Черникова и других. Существует ряд работ, посвященных разработке систем автоматизации испытаний ПСУ подвижных объектов, в том числе алгоритмам и ме-

тодам формирования возмущающих воздействий, обработки испытательной информации и управления процессом испытаний, проведения испытаний на комплексное воздействие, учитывающих нестационарность протекающих в ПСУ процессов. Постановка и решение перечисленных задач проводились Р. И. Сольницевым и руководимой им группой ученых и инженеров. Продолжение этих работ ориентируется на современные возможности вычислительной техники и повышение точности получаемых результатов испытаний на основе методов и алгоритмов обработки нестационарных случайных процессов, а также учета комплексного воздействия возмущений на объект испытаний.

Из вышеизложенного следует, что создание подсистемы САПР для испытаний ПСУ на основе методов и алгоритмов обработки нестационарных случайных процессов с учетом комплексного воздействия возмущений с помощью современных аппаратно-программных средств представляет значительный практический и теоретический интерес.

### **Цель и задачи исследования**

**Цель работы** – исследование вопросов разработки математического, программного и информационного обеспечения САПР для автоматизации испытаний ПСУ и разработка на базе этого исследования подсистемы САПР для вибрационных и климатических испытаний с возможностью расширения функциональности этой подсистемы для других видов испытаний.

В процессе выполнения работы в соответствии с поставленной целью **необходимо решить следующие научно-технические задачи:**

1. Разработать архитектуру подсистемы САПР для испытаний ПСУ, отвечающей современным требованиям и обладающей возможностями для расширения ее функциональности;
2. Разработать алгоритмы определения класса нестационарных случайных процессов.

3. Разработать программное и информационное обеспечения подсистемы САПР для испытаний ПСУ.
4. Разработать методику автоматизации вибрационных и климатических испытаний ПСУ.

### **Основные методы исследования**

Для решения поставленных задач в диссертационной работе используются методы теории вероятностей и математической статистики, положения теории баз данных, теории построения САПР и теории вибрационных и климатических испытаний приборов.

### **Достоверность научных результатов**

Подтверждается корректностью использования математического аппарата, а также инженерной практикой решения испытательных задач.

### **Новые научные результаты**

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Разработана архитектура подсистемы САПР для испытаний ПСУ, отличающаяся от известных высокой гибкостью и адаптивностью к новым задачам испытаний, возможностями организации удаленного сбора испытательной информации в базу данных и средствами коллективной работы пользователей.
2. Разработаны алгоритмы определения класса нестационарных случайных процессов на основе метода “матрицы решений” и эвристико-аналитического метода принятия решений.
3. Разработано программное и информационное обеспечения подсистемы САПР для испытаний ПСУ, отличающиеся от известных наличием встроенных средств для удаленного сбора испытательной информации в базу данных и организации коллективной работы пользователей.

4. Предложена методика автоматизации вибрационных и климатических испытаний, базирующаяся на использовании разработанной подсистемы САПР для испытаний ПСУ.

#### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Архитектура подсистемы САПР для испытаний ПСУ.
2. Алгоритмы оценки возмущающих воздействий и результатов испытаний как нестационарных случайных процессов.
3. Программное и информационное обеспечение подсистемы САПР для испытаний ПСУ.
4. Методика автоматизации испытаний на базе применения разработанной подсистемы САПР для испытаний ПСУ.

#### **Практическая ценность**

Значение результатов диссертационной работы для практического применения заключается в следующем:

1. Разработанная архитектура подсистемы САПР для испытаний ПСУ поддерживает ее развитие, позволяет минимизировать и стандартизировать взаимодействие между отдельными частями подсистемы, адаптивна к новым задачам и не требует внесения существенных изменений в случае расширения функциональности.
2. Применение реализованной подсистемы САПР для испытаний ПСУ позволяет организовать сбор информации с нескольких испытательных стендов в базу данных результатов испытаний и предоставляет средства дистанционного взаимодействия пользователей.
3. Разработанная библиотека алгоритмов обработки результатов испытаний, программное и информационное обеспечение подсистемы САПР для испытаний ПСУ допускает их использование в составе других САПР.

## **Практическая реализация и внедрение результатов работы**

Программное обеспечение разработанной подсистемы САПР для испытаний ПСУ выполнено в среде разработки NI LabVIEW с помощью языков программирования G и C\C++. Информационное обеспечение разработанной подсистемы выполнено в СУБД SQLite. Практическим результатом работы является подсистема САПР TestCAD, обеспечивающая автоматизацию вибрационных и климатических испытаний ПСУ.

## **Результаты диссертационной работы использовались:**

В НИР по договору с ЗАО “НПЦ Аквамарин” на тему: “Испытания прибора на механические и климатические возмущения” (шифр САПР-72 тем. плана СПбГЭТУ 2008 г.).

В госбюджетной НИР на тему “Теоретические основы и методы проектирования аппаратно-программных комплексов испытаний технических объектов” по программе фундаментальных научных исследований ОНИТ РАН “Фундаментальные проблемы разработки новых структурных решений и элементной базы в телекоммуникационных системах”.

Основные результаты работы используются при подготовке инженеров по специальностям 230104 “Системы автоматизации проектирования” и магистров по направлению “Информатика и вычислительная техника” (специализация 230100.68-16 “Информационное и программное обеспечение САПР”). Применение разработанной системы в учебном процессе обеспечивает поддержку дисциплин “Теория принятия решений” и “Компьютерная графика САПР”.

Результаты диссертационной работы используются в учебной практике Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” им. В. И. Ульянова (Ленина) на кафедре “Системы автоматизированного проектирования” для подготовки магистров и бакалавров по направлению “Информатика и вычислительная техника”.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на XIV международной конференции “Современное образование: содержание, технологии, качество” (Санкт-Петербург, 2008), на профессорско-преподавательских конференциях СПбГЭТУ “ЛЭТИ” 2009-2010 гг.

### **Публикации**

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 8 статьях и докладах, из них по теме диссертации 5, среди которых 1 публикация в ведущем рецензируемом издании, рекомендованном в действующем перечне ВАК. Доклад доложен и получил одобрение на 1 международной научно-практической конференции указанной в конце автореферата.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами и заключения. Она изложена на 122 страницах машинописного текста, включает 45 рисунков, 8 таблиц, 1 приложение и содержит список литературы из 78 наименований, среди которых 73 отечественных и 5 иностранных авторов.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, приводятся основные научные и практические результаты. Кратко описано содержание глав диссертации.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена аналитическому обзору существующих средств автоматизации испытаний ПСУ. Показано, что на сегодняшний день не существует инструментов, позволяющих обрабатывать результаты испытаний как нестационарные случайные процессы, осуществлять сбор испытательных данных с нескольких динамических моделирующих стендов в единую базу данных, организовать дистанционную работу коллективов испытателей. На основе проведенного анализа и



потребностей промышленных предприятий к системам испытаний ПСУ сформулированы требования к разрабатываемой подсистеме:

1. Подсистема САПР должна позволять удаленный сбор информации с различных испытательных стендов в базу данных, а также предоставлять возможности и средства для дистанционного взаимодействия инженеров-испытателей;
2. Подсистема САПР должна интегрироваться с другими САПР различных производителей;
3. Подсистема должна предоставлять программные средства для формирования возмущающих воздействий на объект испытаний;
4. Подсистема должна обрабатывать результаты испытаний и позволять получать статистические характеристики процессов, протекающих в объекте испытаний с учетом их нестационарности;
5. Подсистема должна позволять организовать удаленный мониторинг и управление процессом испытаний с учетом безопасности данных и жестким разграничением доступа к информации;
6. Подсистема должна быть простой в изучении и предоставлять диалоговые средства с возможностями адаптации к уровню квалификации пользователя.

**Во второй главе** рассматривается математическое обеспечение разрабатываемой подсистемы САПР для испытаний ПСУ. В главе рассмотрены принципы построения подсистемы САПР, а также особенности испытаний ПСУ на комплексное воздействие.

В главе представлена общая структура подсистемы САПР, выполненная в виде трехуровневой иерархической схемы.

Рассмотрены алгоритмы формирования возмущающих воздействий, обработки результатов, управления процессом испытаний.

Предложен алгоритм определения класса нестационарных случайных процессов аддитивно-мультипликативной модели на основе метода

“матрицы решений” для случаев гауссовского (рисунок 1) и негауссовско-го (рисунок 2) распределений.

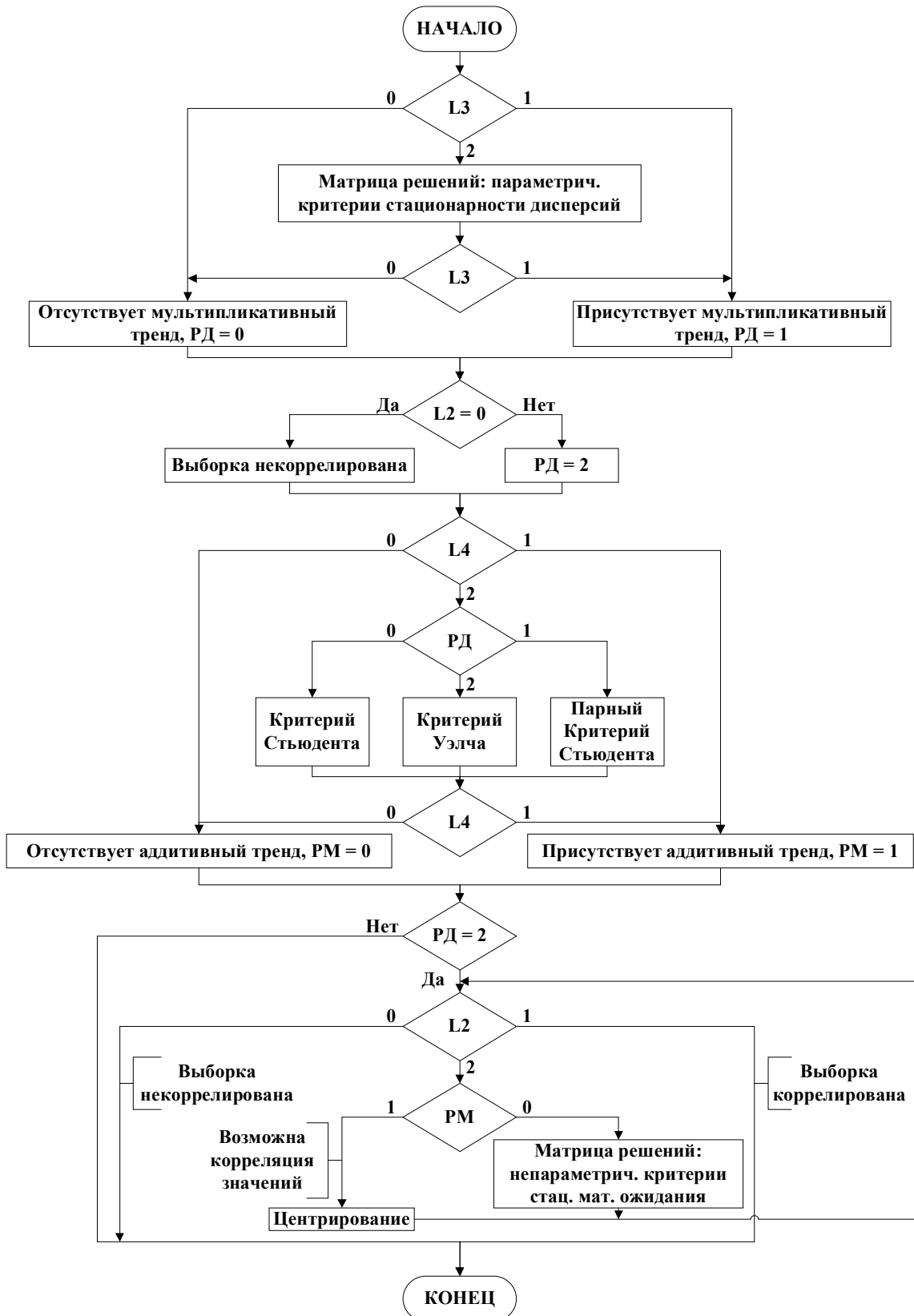


Рисунок 1. Алгоритм определения класса нестационарных случайных процессов для случая гауссовского распределения

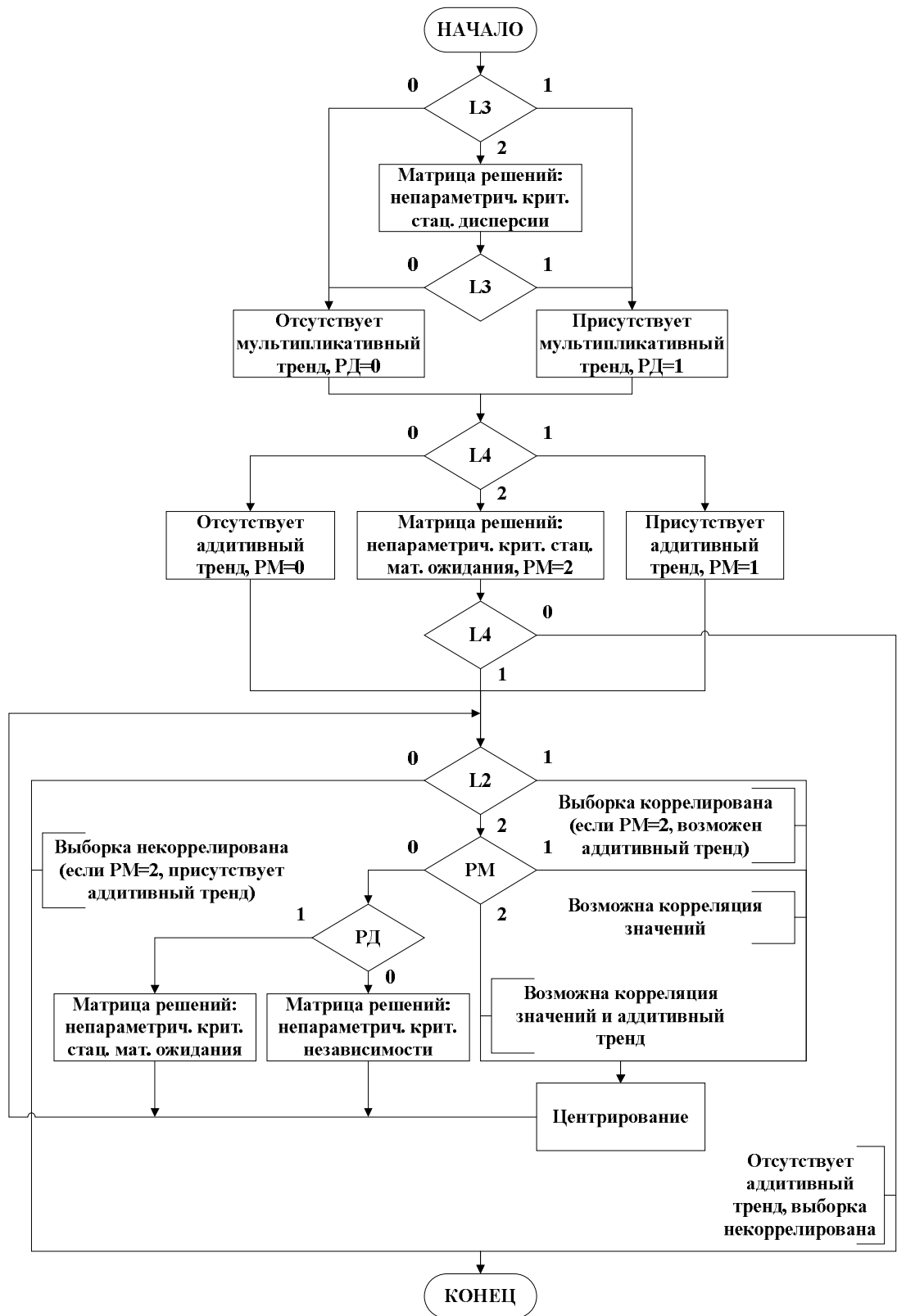


Рисунок 2. Алгоритм определения класса нестационарных случайных процессов для случая негауссовского распределения

Алгоритм использует вектор априорной информации, который задается пользователем на основе знаний о физической природе объекта испытаний, либо на основе других предпосылок

$$V_{\alpha} = L_1, L_2, L_3, L_4$$

где  $L_1$  - плотность распределения,  $L_2$  - корреляция значений,  $L_3$  - информация о присутствии мультипликативного тренда,  $L_4$  - информация о присутствии аддитивного тренда. Результатом работы алгоритма является определение неизвестных значений вектора  $V_{\alpha}$ .

Алгоритм определения класса нестационарных случайных процессов, предназначенного для статистического анализа полученных результатов квалифицированными инженерами-испытателями, основан на эвристико-аналитическом методе принятия решений. Алгоритм использует помимо вектора априорной информации  $V_{\alpha}$  численные оценки отдельных выборочных реализаций  $U_i$  случайного процесса, которые назначаются пользователем. Выбор критерия проверки статистических гипотез осуществляется на основе оценок фактического уровня ошибок первого и второго рода, анализ которых выполняется методом машинного моделирования. Результатом работы алгоритма является определение неизвестных значений вектора  $V_{\alpha}$ .

Методы и алгоритмы управления решают задачи:

- корректировки испытательного воздействия;
- взаимодействия отдельных испытательных станций с сервером испытаний;
- защиты публикуемых в сети данных от несанкционированного доступа.

Рассмотрены критерии проверки статистических гипотез, включенные в библиотеку алгоритмов с открытым программным интерфейсом, что обеспечивает их адаптацию к новым задачам.

**Третья глава** посвящена вопросам реализации программного обеспечения подсистемы САПР для испытаний ПСУ. На основе анализа технических характеристик сделан выбор аппаратных и программных средств для реализации подсистемы. Предложена архитектура подсистемы САПР для испытаний ПСУ (рисунок 3).

Управляющие вызовы представлены на рисунке линиями с черными стрелками. Управляющая программа должна быть реализована в виде исполняемого модуля и библиотеки алгоритмов, рассмотренной в главе 2. Информационные потоки представлены линиями с белыми стрелками.

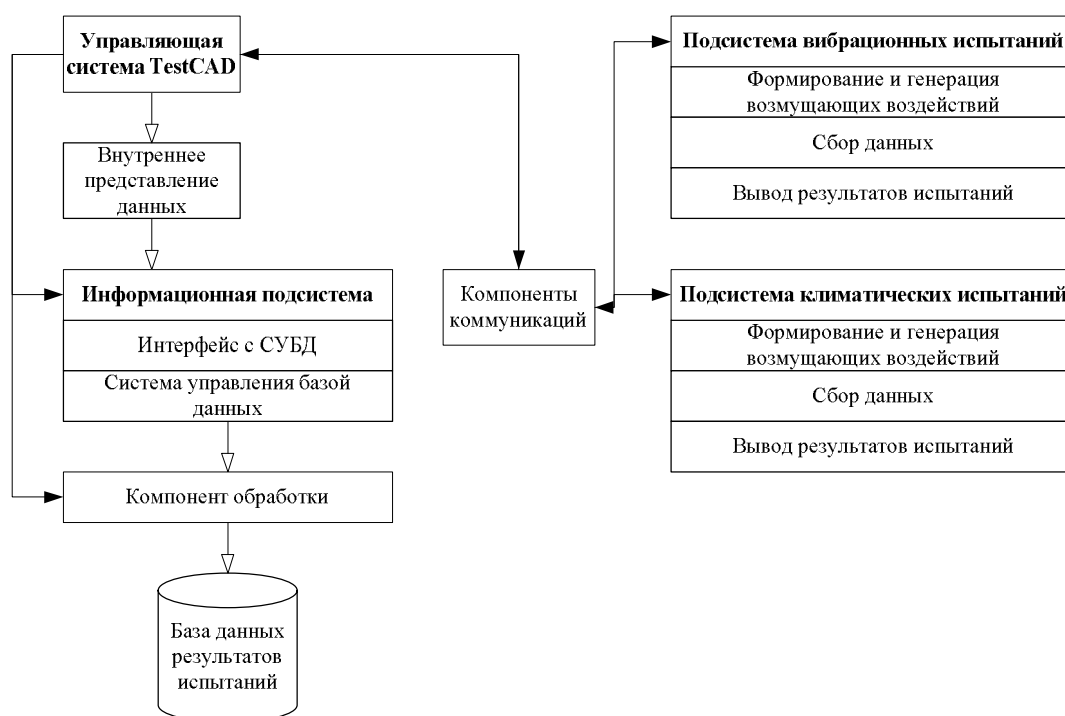


Рисунок 3. Архитектура подсистемы САПР для проведения испытаний ПСУ

Управляющая подсистема через компоненты коммуникаций задействует подсистемы вибрационных и климатических испытаний, в задачу которых входит генерация возмущающих воздействий на испытательный стенд, сбор испытательных данных и вывод результатов. Кроме того, в задачу управляющей подсистемы входит управление информационным обеспечением подсистемы, вызов компонента обработки и документирования и запись результатов испытаний в базу данных.

Предложенная архитектура позволяет минимизировать и стандартизировать взаимодействие между отдельными частями подсистемы, адаптивна к новым задачам и не требует внесения существенных изменений в случае расширения функциональности.

В главе рассмотрены реализации компонентов генерации испытательных воздействий, коммуникаций, обработки и документирования результатов испытаний.

Разработанный компонент генерации испытательных воздействий обладает следующими возможностями:

- возможность единовременной генерации и сбора аналоговых сигналов в реальном масштабе времени;
- возможность задания в качестве выходного сигнала генератора типовых форм: синусоиды, прямоугольных импульсов, треугольных импульсов, “пилообразного” сигнала и гауссова шума;
- возможность задания частоты и амплитуды выходного сигнала при помощи интуитивно понятного пользовательского интерфейса;
- возможность наблюдения входного и выходного сигналов в графической форме в реальном масштабе времени;
- возможность ограничения уровней сигналов путем задания через интерфейс пользователя пороговых значений;
- возможность записи сигналов в базу данных;
- возможность фильтрации входного сигнала с заданием полосы пропускания фильтра и выводом отфильтрованного сигнала через пользовательский интерфейс.

Компоненты коммуникаций подсистемы САПР для испытаний ПСУ обеспечивают возможность организации удаленного мониторинга и управления процессом испытаний на разных предприятиях и на различных динамических моделирующих стендах (ДМС).

Удаленное соединение осуществляется с использованием сети Интернет. Пользователю сервера испытаний доступны возможности разгра-

ничения доступа к публикуемым в сети виртуальным приборам и назначения элементов управления и индикации, которые будут доступны для удаленных испытательных станций. Сервером регистрируются данные о подключениях, сетевом трафике и статусе соединений, ведется протокол событий, фиксируется, кто из клиентов и когда пытался получить доступ к данным.

Компонент обработки результатов испытаний включает в себя программную реализацию методов и алгоритмов математического обеспечения подсистемы, предложенные во второй главе. В реферируемой главе рассмотрена библиотека параметрических и непараметрических критериев проверки статистических гипотез.

**Четвертая глава** посвящена вопросам реализации информационного обеспечения подсистемы САПР для испытаний ПСУ. Информационное обеспечение представлено базой данных результатов испытаний. Поскольку большинство существующих на сегодняшний день систем управления базами данных (СУБД) предоставляют все необходимые функции для решения любых задач и нет необходимости в создании специализированной СУБД, для реализации базы данных результатов испытаний сделан выбор в пользу СУБД SQLite.

Логическая структура базы данных организована по схеме «звезда», поскольку результат испытаний можно представить как выборочную реализацию случайного процесса с описательной справочной информацией.

Предложенная структура базы данных результатов испытаний обеспечивает надежность и высокую скорость выборки данных. Поддерживается добавление новой информации об испытаниях различных ПСУ, выполненных на различных предприятиях и ДМС по различным испытательным программам. Добавление новых данных не требует изменения компонента обработки управляющей подсистемы TestCAD.

Рассмотрены необходимые меры по обеспечению безопасности базы данных от основных типов угроз.

Интерфейс базы данных с компонентами обработки и документирования управляющей подсистемы выполнен с учетом компонентной модели последней. Каждая процедура работы с базой данных выделена в отдельную подсистему и реализована в виде отдельного компонента. Логика вызова соответствующих процедур принадлежит управляющей программе TestCAD.

Из соображений переносимости библиотека, адаптирующая возможности целевой СУБД для управляющей программы выполнена на языке C/C++, диалоговые средства взаимодействия инженера-испытателя с базой данных в среде LabVIEW. Набор диалоговых форм инвариантен к хранящейся в базе данных информации. Инженер-испытатель абстрагирован от деталей реализации базы данных и специальных команд целевой СУБД и взаимодействует с ней через графический интерфейс и SQL-запросы.

**Пятая глава** содержит описание применения разработанной подсистемы САПР для испытаний ПСУ, методики и средства обработки результатов испытаний для случаев вибрационных и климатических испытаний.

Разработанная подсистема TestCAD для испытаний ПСУ:

- позволяет назначать соответствующие программе испытаний параметры: фильтрации, амплитуды, частоты и формы испытательного воздействия для случая вибрационных испытаний; минимальной и максимальной температурных границ, время пребывания на каждой температуре для случая климатических испытаний;
- обеспечивает автоматическое отключение ДМС в случае превышения предельных значений, устанавливаемых пользователем;
- предоставляет инженеру-испытателю возможность дистанционного управления процессом испытаний, выбора метода обработки результатов;
- решает задачи удаленного сбора и сохранения результатов испытаний в базе данных;



- выводит результаты обработки испытательных данных, а также входные и выходные сигналы ДМС на экраны виртуальных осциллографов и графиков;
- функционирует под управлением операционных систем линейки Windows и Unix, исходный код модулей и компонентов подсистемы кроссплатформенный.

Таким образом, подсистема TestCAD является инструментом для автоматизации вибрационных и климатических испытаний, может быть использована для проведения научно-исследовательских работ, выполнения лабораторных работ, а также при курсовом и дипломном проектировании.

**В заключении** сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

#### **Основные результаты работы**

1. Разработана архитектура подсистемы САПР для испытаний ПСУ, отличающаяся от известных высокой гибкостью и адаптивностью к новым задачам испытаний, возможностями организации удаленного сбора испытательной информации в базу данных и средствами коллективной работы пользователей.
2. Разработаны алгоритмы определения класса нестационарных случайных процессов на основе метода “матрицы решений” и эвристико-аналитического метода принятия решений.
3. Разработано программное и информационное обеспечения подсистемы САПР для испытаний ПСУ, отличающиеся от известных наличием встроенных средств для удаленного сбора испытательной информации в базу данных и организации коллективной работы пользователей.
4. Предложена методика автоматизации вибрационных и климатических испытаний, базирующаяся на использовании разработанной подсистемы САПР для испытаний ПСУ.
5. На основании полученных в работе результатов разработана и внедрена в промышленность и учебную практику подсистема САПР для испытаний ПСУ TestCAD.

### **Список опубликованных работ по теме диссертации**

*Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:*

#### ***Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:***

1. Романов, А.Е. Вопросы алгоритмизации процесса испытаний [Текст] / А.Е. Романов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2010. - № 7. - С. 52-55.

#### ***Другие статьи и материалы конференций***

2. Романов, А.Е. Подсистема САПР испытаний на основе динамического моделирующего комплекса и аппаратно-программного обеспечения National Instruments [Текст] / Р.И. Сольницев, А.Е. Романов // Известия Санкт-Петербургского электротехнического университета. – 2009. - № 10. – С. 35-38.

3. Романов, А.Е. Подсистема САПР испытаний приборов [Текст] / Р.И. Сольницев, Г.Д. Дмитриевич, А.Е. Романов // Материалы XIV межд. науч.-практ. конференции «Современное образование: содержание, технологии, качество». – СПб., 2008.

4. Романов, А.Е. Разработка цифровой системы измерений и управления испытательным оборудованием при проведении механических и климатических испытаний [Текст]. – САПР-72: Отчет о НИР (промежут.точ.) / Санкт-Петербургский электротех. ун-т (СПбГЭТУ); Рук. Сольницев Р.И. - № 6814. – СПб, 2008. – 59 с.

5. Романов, А.Е. Теоретические основы и методы проектирования аппаратно-программных комплексов испытаний технических объектов [Текст]. - Отчет о НИР по программе фундаментальных научных исследований ОНИТ РАН «Фундаментальные проблемы разработки новых структурных решений и элементной базы в телекоммуникационных системах» / Санкт-Петербургский электротех. ун-т (СПбГЭТУ); Рук. Сольницев Р.И. – СПб, 2010. – 19 с.