

На правах рукописи

АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ
ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ ВЕРТОЛЕТНЫХ
РЕДУКТОРОВ**

Специальность 05.11.16 – информационно-измерительные и управляющие системы (машиностроение)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2002

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Шкодырев В.П.

Официальные оппоненты: доктор технических наук Яковлев Н.И.

кандидат технических наук, доцент Брусаков И.Ю.

Ведущая организация: ОАО СПб «Красный октябрь»

Защита состоится 26 декабря 2002 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета Д 212.229.10 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 9 корпус, ауд. 535.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГПУ.

Автореферат разослан 25 ноября 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Г.Ф. Малыхина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное состояние промышленного производства вертолетных редукторов (ВР) в России определяется несколькими факторами. 1) Большой объем и стабильный спрос обусловлены острой необходимостью применения вертолетов, а также обслуживанием и ремонтом имеющегося огромного парка вертолетов. 2) Основное внимание уделяется не столько разработке сверхсовременных изделий, сколько повышению качества и модернизации серийно выпускаемой продукции. 3) Для повышения конкурентоспособности продукции (особенно на зарубежном рынке) требуется сертификация производства по международным стандартам.

Поскольку качество изготовления ВР во многом определяет летные характеристики и надежность всего вертолета в целом, необходимо осуществлять комплексное тестирование ВР на всех возможных режимах последующей эксплуатации. Такая проверка производится на специализированных испытательных стендах (ИСВР), полностью имитирующих работу ВР на вертолете в реальных условиях эксплуатации и выполняющих измерения основных параметров.

При больших объемах тестируемой продукции повышение производительности труда может быть достигнуто за счет применения автоматизации. Автоматизация ИСВР также позволяет повысить точность и достоверность результатов испытаний, исключить неадекватные действия и ошибки оператора, упростить обучение персонала.

В настоящее время в России (и только несколькими годами ранее – за рубежом) начался процесс оснащения ИСВР автоматизированными информационно-измерительными системами (ИИС). Кроме основных измерительных задач на эти системы возлагаются функции автоматического управления работой стенда. В настоящее время методы проектирования ИИС ИСВР в целом слабо формализованы, отсутствуют единые методики разработки отдельных частей системы. Все это приводит к существенным

затратам времени на проектирование и наладку ИИС каждого стенда, снижению надежности и точности измерений. В диссертации основное внимание уделяется всестороннему исследованию процесса проектирования ИИС типовых ИСВР и научному обоснованию предлагаемых прикладных методик.

Цель работы. Разработка унифицированного процесса проектирования (УПП) ИИС ИСВР, включающего в себя математический аппарат и критерии для оценки качества созданных на основе УПП моделей системы, а также методики практического воплощения моделей.

Задачи исследований. В соответствии с поставленной целью были решены следующие задачи диссертационного исследования.

1. Исследование имеющихся ИИС ИСВР и возможных методов построения современных ИИС для ИСВР.
2. Выявление особенностей аппаратуры и программного обеспечения (ПО) проектируемых стендов с измерительной точки зрения.
3. Критический обзор методов объектно-ориентированного (ОО) анализа (ООА) и проектирования (ООП), а также имеющихся ОО сред разработки применительно к ИИС ИСВР.
4. Расширение объектных нотаций для ИИС.
5. Разработка методов представления моделей ИИС ИСВР.
6. Разработка унифицированного процесса проектирования (УПП) ИИС ИСВР.
7. Построение формального математического описания макромоделей ИИС ИСВР.
8. Нахождение формальных критериев качества макромоделей ИИС ИСВР
9. Исследование метрологических характеристик измерительных каналов ИИС ИСВР, выявление основных источников погрешности, разработка универсальных протоколов поверки (калибровки) измерительных каналов автоматизированных ИИС.
10. Разработка методик построения графического интерфейса оператора испытательных стендов.

11. Разработка структуры хранения результатов испытаний и метрологической аттестации ИИС ИСВР в реляционной СУБД.

Методы исследования. Решение задач диссертационного исследования проводилось с применением теории построения ИИС, математического моделирования, математической логики, теории множеств, теории матричного исчисления, теории ООА и ООП, теории погрешностей, теории автоматического управления, теории баз данных. Разработка ПО и исследование предлагаемых алгоритмов выполнялось с использованием пакетов LabVIEW, LabVIEW Real Time, LabWindows/CVI, Visual C++, Mathcad.

Научная новизна работы.

1. Предложен унифицированный процесс проектирования (УПП) ИИС ИСВР.
2. Разработаны и исследованы методики представления моделей УПП.
3. Создано формальное математическое описание моделей ПО ИИС ИСВР, предлагаются формальные критерии и полный функционал качества для их оценки.
4. Расширены объектные нотации применительно к ИИС ИСВР.

Практическая ценность работы.

1. Предложена блочно-модульная унифицированная архитектура построения аппаратной части ИИС типовых ИСВР, основанная на применении концепции виртуальных приборов National Instruments.
2. На основе предложенной архитектуры и других диссертационных положений разработаны и внедрены ИИС двух ИСВР.
3. Разработаны структура, методы хранения и формирования универсальных протоколов поверки (калибровки) измерительных каналов автоматизированных ИИС ИСВР.
4. Изложенные и научно обоснованные методики конкретной реализации пользовательского интерфейса, способов записи протоколов испытаний, структур баз данных, дистанционного эксперимента и удаленной отладки ПО ИИС ИСВР отражают современные тенденции программирования данных систем. На основе этих методик возможно создание (по

испытанным шаблонам) новых систем, отличающихся эргономичностью, высокой надежностью, быстродействием и сравнительно невысокой стоимостью.

5. Предложенные программные алгоритмы частотной коррекции датчиков крутящего момента позволяют в несколько раз повысить точность измерения в широком диапазоне изменения частоты вращения вала.
6. Предложенная модификация программного алгоритма расчета сдвига фаз низкочастотных (5...50 Гц) существенно зашумленных синусоидальных сигналов тормозных генераторов позволяет получать устойчивые результаты измерения в темпе испытания ВР.

Реализация и внедрение результатов. Две разработанные ИИС ИСВР и программный комплекс метрологической аттестации средств измерения единичного изготовления крутящего момента силы и расхода жидкости прошли производственные испытания и внедрены на предприятии СПб ОАО «Красный октябрь». Отдельные положения диссертации использовались при разработке автоматического образцового средства для поверки датчиков давления на Балаковской АЭС. Было получено четыре акта о внедрении.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены на международных конференциях по мягким вычислениям и измерениям SCM'2000, SCM'2001 и SCM'2002 (Санкт-Петербург), на международной конференции «Датчики и системы 2002» (Санкт-Петербург), на зарубежной международной научно-технической конференции National Instruments NI WEEK'2000 (Остин, США). Представленная на конференцию NI WEEK'2000 работа была удостоена второго места в конкурсе наиболее значимых докладов в категории аэрокосмических приложений.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано семь печатных работ общим объемом более трех печатных листов.

Структура и объем работы. Текст диссертации состоит из введения, шести глав, заключения, изложенных на 239 машинописных страницах, в том числе

содержит 79 рисунков и 30 таблиц; а также содержит список литературы из 92 наименований и одно приложение.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Блочно-модульная унифицированная архитектура аппаратной части ИИС типовых ИСВР.
2. Унифицированный процесс проектирования ИИС ИСВР.
3. Формальные модели аппаратуры и ПО ИИС ИСВР.
4. Формальные критерии и полный функционал качества ПО ИИС ИСВР.
5. Сравнительный анализ нотаций моделей ПО ИИС ИСВР.
6. Исследование метрологических характеристик ИИС ИСВР и унифицированный протокол метрологической аттестации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертационного исследования, выбрана цель и определены задачи работы, сформулированы основные выносимые на защиту положения.

В первой главе рассматриваются задачи тестирования вертолетных редукторов (ВР), проведено исследование объекта испытания – ВР, выявлены классы основных измеряемых параметров. Выполняется анализ используемых в настоящее время ИСВР. Найден общий состав технологического оборудования, установлены классы технологических параметров, подлежащих контролю. Определены главные требования, предъявляемые к ИИС ИСВР.

В задачи информационно-измерительной и управляющей системы стенда входят: измерение параметров (редуктора, его дополнительных агрегатов, технологических агрегатов стенда), ведение протоколов измеряемых параметров на различных режимах работы редуктора (в текстовой и графической формах), управление дополнительными агрегатами редуктора, управление технологическими агрегатами стенда (вывод редуктора на режим, поддержание работоспособности масло- и гидросистемы).

Имеющиеся информационно-измерительные системы испытательных стендов имеют низкую точность, малое быстродействие, во многих случаях принципиально не способны выполнять требования действующих методик испытаний, сильно зависят от человеческого фактора и не обеспечивают достоверности результатов измерений, сложны в эксплуатации, не обеспечивают самодиагностики. В типичной системе около 60 разнородных аналоговых измерительных каналов, около 70 дискретных сигналов состояния, несколько управляющих аналоговых каналов и около 50 дискретных управляющих команд.

По результатам исследования данной главы к разрабатываемым информационно-измерительным системам испытательных стендов вертолетных редукторов предъявляются следующие требования:

- высокая надежность аппаратуры и программного обеспечения, исключение сбоев в процессе испытания, влекущих за собой повторение испытания;
- быстрота замены вышедшего из строя оборудования;
- ранняя диагностика и автоматическое предотвращение аварийных ситуаций, приводящих к порче дорогостоящих агрегатов стенда, контроль действий оператора в нештатных ситуациях;
- необходимая точность и достоверность результатов измерения;
- наличие развитых функций автоматического управления, упрощающих работу оператора и снижающих влияние человеческого фактора;
- гибкое сочетание разнородных каналов в целостной системе;
- возможность компоновки системы, содержащей несколько сотен аналоговых, дискретных сигналов и команд;
- двойная гальваническая развязка каналов (от стенда и между собой);
- строгое соблюдение требований методик испытания;
- высокое качество проектирования ИИС с целью сокращения времени на наладку и времени проверки системы на работающем стенде;

- гибкость архитектуры ИИС, позволяющая с минимальными переделками использовать имеющиеся наработки для схожих стендов испытания ВР;
- необходимость автоматизации измерений и ведения протоколов испытаний;
- развитая структура хранения протоколов испытаний в базе данных.

Во второй главе предложено и обосновано использование блочно-модульной архитектуры (на основе концепции виртуальных приборов National Instruments) для построения аппаратной части ИИС ИСВР. Приведены ценовые характеристики применяемого оборудования и его возможности для построения ИИС ИСВР. Приводятся разработанные нами конфигурации (и исследуются характеристики) измерительного оборудования (производства National Instruments, США) для ИИС ИСВР. Предложена унифицированная архитектура аппаратной части ИИС типовых ИСВР (см. рис. 1).

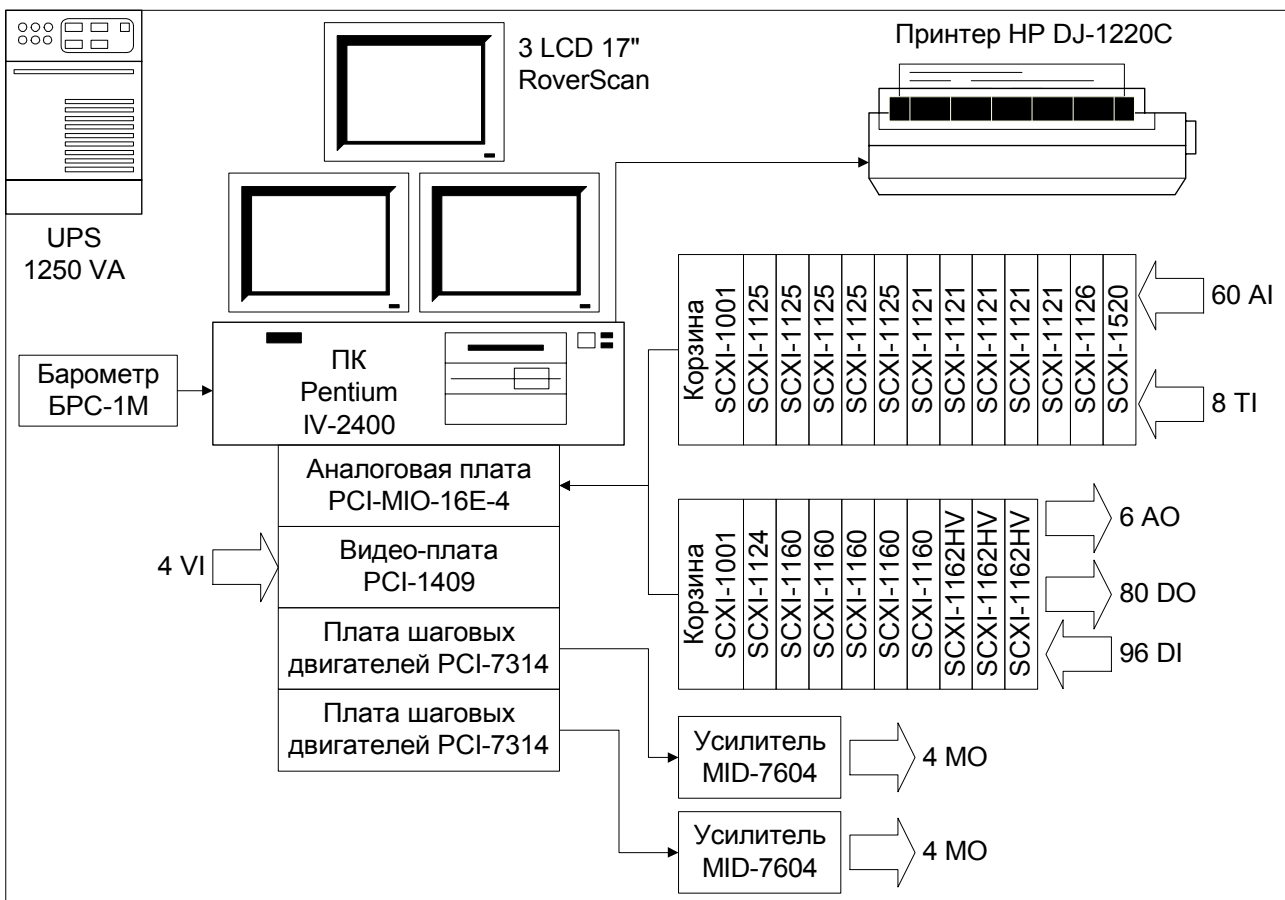


Рис.1. Структурная схема оборудования ИИС типового ИСВР

Основные измерительные (AI – аналоговые, TI – частотные, DI – дискретные) и управляющие (AO – аналоговые, DO – дискретные) сигналы подключаются к мультиплексирующей системе SCXI, что существенно повышает модульность архитектуры. К видео-плате подключается до четырех видеокамер (VI), визуальный контроль за состоянием стенда производится с помощью одного из трех мониторов. На остальные два монитора выводится информация о процессе испытания и измеряемых параметрах. Управление приводами двигателей и гидротормозов осуществляется с помощью шаговых двигателей (MO). Ориентировочная стоимость оборудования данной (рассматривается пример наиболее сложного стенда) ИИС ИСВР около \$ 65000, что составляет менее 7% от общей стоимости стенда.

В третьей главе выявлены сложности проектирования программного обеспечения ИИС ИСВР и проведен критический обзор методов проектирования (структурное, потоковое, объектно-ориентированное) программного обеспечения ИИС, а также имеющихся сред разработки, которые могут быть использованы при создании ИИС ИСВР. Показаны потенциальные возможности и удобство применения сред графического объектно-ориентированного программирования (LabVIEW GOOP, ObjectVIEW) для создания ПО испытательных стендов. Найдены необходимые для проектирования ПО ИИС ИСВР объектные нотации (UML, UML RT, LePUS) и приведен их сравнительный анализ. Изложено краткое описание новейшей (и пока недостаточно исследованной) нотации LePUS.

При создании макромоделей ИСВР встают задачи исследования различных методов представления систем, анализа применимости этих методов к ИИС и возможности с их помощью формально представить макромоделей ИСВР. Для выбора необходимого для представления моделей ИИС ИСВР математического аппарата мы воспользовались теорией объектно-ориентированного анализа и проектирования. Из имеющихся объектных нотаций были выбраны: UML (физическое представление, динамика работы программы, структура базы данных), UML RT (структура многопоточного управления) и LePUS (основная

структура программы). Выбор производился по критериям полноты и согласованности, однозначности и формальности, абстрактности, выразительности, масштабируемости, наглядности и компактности.

В диссертации проводится исследование широко распространенной нотации UML и указывается на ее непригодность для формального описания каркаса ПО ИИС ИСВР. Эта нотация успешно применяется только при разработке конкретных программ, но из-за отсутствия строгого математического описания, двусмысленности и некомпактности плохо подходит для описания общей структуры ПО ИИС ИСВР. Основные разрабатываемые в диссертации модели записываются с помощью нотации LePUS, которая на данный момент еще мало изучена, но (по результатам нашего исследования) восполняет недостатки UML.

В четвертой главе разрабатываются формальные методы проектирования аппаратной и (преимущественно) программной части ИИС ИСВР. Проведено расширение объектных нотаций для ИИС. Исследованы возможности нотации LePUS для формального описания программного обеспечения сложных измерительных систем. Предложен и детально проработан УПП ИИС ИСВР. Представлено формальное математическое описание макромодели (и составляющих ее 11 моделей) ИИС ИСВР. Найдены формальные критерии качества макромодели ИИС ИСВР.

УПП содержит теоретическую, практическую и организационные составляющие. В УПП ИИС ИСВР включены следующие модели:

- модель предметной области (Ψ^{AREA}) – формализует контекст системы;
- модель развертывания компьютерного комплекса ИСВР (Ψ^{PC}_{DEPL});
- модель развертывания аппаратных средств ИСВР (Ψ^{TB}_{DEPL});
- модель архитектуры ПО ИИС ИСВР ($\Psi_{LePUS} = \{\Psi^{KERNL}_L, \Psi^{MTH}_L, \Psi_L^{DB}, \Psi^{INTERACT}_{LJ}\}$) – основана на модели каркаса ПО ИИС ИСВР;
- многопоточная модель ($\Psi^{MTH}_{UML_RT}$) – формализует механизмы параллелизма и синхронизации в ПО ИИС ИСВР;

- модель для представления алгоритмов управления ИСВР ($\Psi^{ALG}_{FUN}, \Psi^{SFW}_{SM}$);
- модель хранения данных (Ψ^{DB}_{OBJ}) – описывает структуру базы данных и ее отображение на ПО ИИС ИСВР;
- модель метрологической аттестации (Ψ^{MT}) – формализует способы метрологической проверки и приемки системы.
- модель реализации (Ψ^{RZ}) – описывает части, из которых собирается физическая система.

Зададим общий вид макромоделей ИИС ИСВР (1):

$$\Psi^{ИИС_ИСВР} = \{ \Psi^{AREA}, \Psi_{UML}, \Psi^{MTH}_{UML_RT}, \Psi_{LePUS}, \Psi^{MT}, \Psi^{RZ} \} \quad (1)$$

Где Ψ^{AREA} – модель предметной области, Ψ_{UML} – часть макромоделей ИИС ИСВР в нотации UML; $\Psi^{MTH}_{UML_RT}$ – диаграмма взаимодействия для представления многопоточной модели ПО ИИС ИСВР в нотации UML RT; Ψ_{LePUS} – представление архитектурного основания ПО ИИС ИСВР в нотации LePUS; Ψ^{MT} – модель метрологической аттестации; Ψ^{RZ} – модель реализации.

Часть макромоделей ИИС ИСВР, созданную в нотации UML, можно представить в следующем виде (2):

$$\Psi_{UML} = \{ \Psi^{DB}_{OBJ}, \Psi^{HDW}_{DEPL}, \Psi^{ALG}_{FUN}, \Psi^{SFW}_{SM} \} \quad (2)$$

Где Ψ^{DB}_{OBJ} – модель таблиц базы данных для хранения измерительной информации; $\Psi^{HDW}_{DEPL} = \{ \Psi^{PC}_{DEPL}, \Psi^{TB}_{DEPL} \}$ – модель физической конфигурации системы, состоящая из двух подмоделей: Ψ^{PC}_{DEPL} – модель развертывания компьютерного комплекса ИСВР, Ψ^{TB}_{DEPL} – модель развертывания аппаратных средств ИСВР; Ψ^{ALG}_{FUN} – модель представления алгоритмов управления на UML-диаграмме деятельности; Ψ^{SFW}_{SM} – модель состояний ПО ИИС ИСВР.

Достоинства (выразительность и строгий математический формализм) нотации LePUS дают возможность представления с ее помощью архитектурного основания ПО ИИС ИСВР. Представим минимально необходимый набор подмоделей LePUS-модели (3):

$$\Psi_{LePUS} = \{ \psi^{KERNL}_L, \psi^{MTH}_L, \psi_L^{DB}, \psi^{INTERACT}_L \} \quad (3)$$

Где: ψ^{KERNL}_L – подмодель ПО ИИС ИСВР самого высокого уровня абстракции; ψ^{MTH}_L – подмодель, представляющая разбиение каркаса на активные объекты; ψ_L^{DB} – подмодель отображения базы данных на каркас; $\psi^{INTERACT}_L$ – подмодель интерактивного взаимодействия с оператором.

В диссертации приводится разработка всех выше перечисленных моделей ИИС ИСВР. Для представления аппаратной части диаграмма развертывания нотации UML расширяется стереотипными измерительными узлами. Диаграмма деятельности нотации UML (представление алгоритмов управления стендом и взаимодействие потоков программы) расширяется введением временных ограничений «в течение», «до», «после», сокращенной записью выражений переходов и значками портов. В нотацию UML RT (многопоточная структура программы) мы вносим стереотипные узлы-капсулы для представления объектов LabVIEW GOOP, а также формальную декларацию отображаемых на диаграмме объектов.

Основная часть абстрактных моделей каркаса ИИС ИСВР была разработана нами с помощью нотации LePUS. Мы расширили LePUS, добавив семь новых семантических связей и отношений, а также модифицировали ее формальное описание, сократив объем математической спецификации типовых программ в 3...5 раз. Исследование данной малоизвестной нотации показало, что она позволяет строго математически записывать статическую структуру сколь угодно сложной объектно-ориентированной программы. На рис. 2 показана одна из разработанных (на основе расширенной нами нотации LePUS) моделей – ядро программного обеспечения. Текстовая часть описания (представляет собой строгое математическое описание структуры программы в виде формул математической логики) ядра в нотации LePUS приведена в спецификации 1.

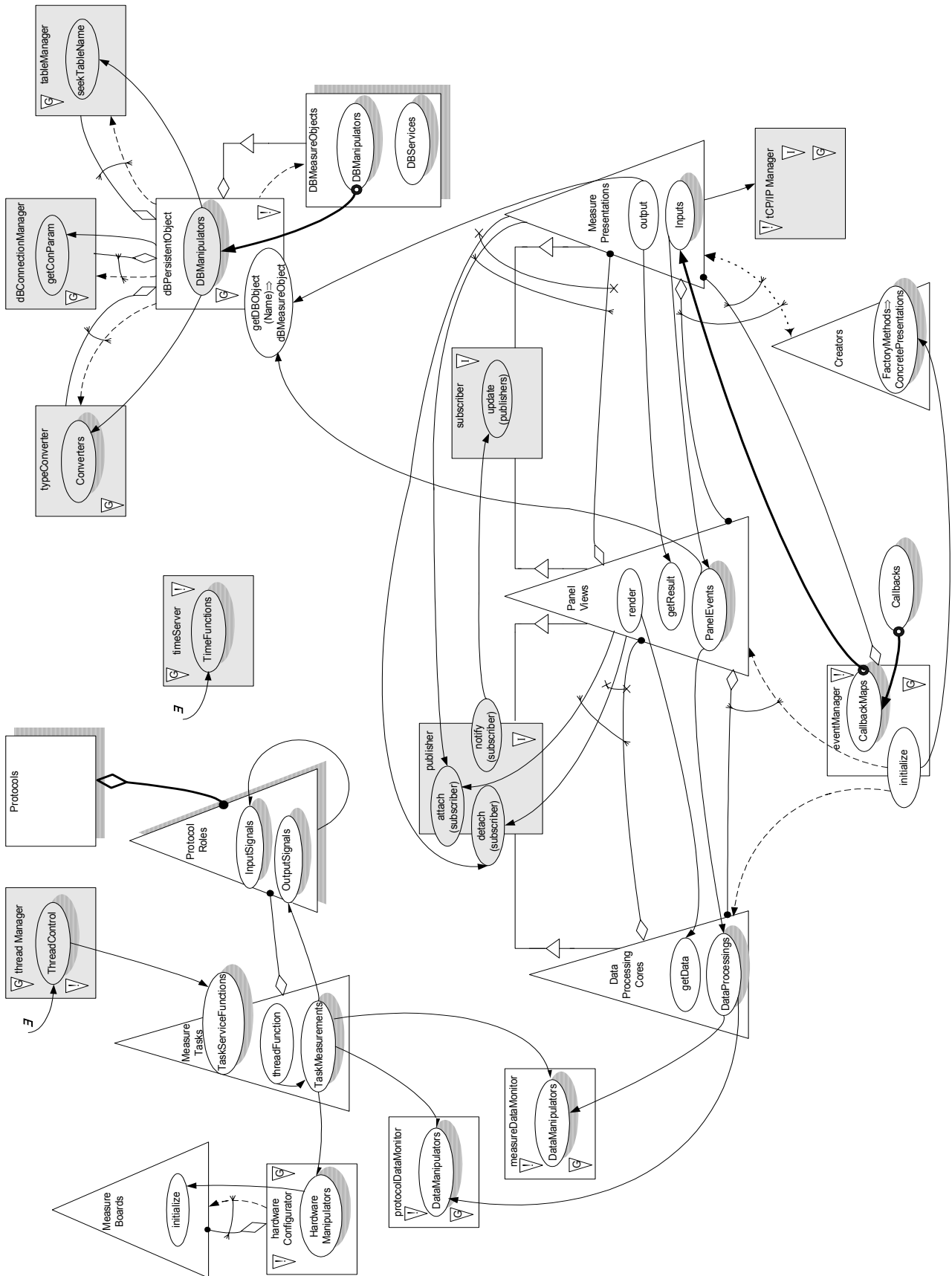


Рис. 2. Расширенная LePUS-диаграмма ядра каркаса ПО ИИС ИСВР

Спецификация 1. Ядро каркаса ПО ИИС ИСВР:

<i>hardwareConfigurator, threadManager, protocolDataMonitor,</i> <i>measureDataMonitor, timeServer, publisher, sSubscriber, eventManager,</i> <i>tCP/IPManager, typeConverter, dBConnectionManager, tableManager,</i> <i>dBPersistentObject</i>	$\in \mathbf{C}$
<i>Protocols, MeasureDataObjects</i>	$\in \mathbf{P(C)}$
<i>MeasurePresentations, MeasureBoard, MeasureTasks, PanelViews,</i> <i>DataProcessingCores, Creators</i>	$\in \mathbf{H}$
<i>ProtocolRoles</i>	$\in \mathbf{P(H)}$
<i>initialize</i> \otimes <i>eventManager, notify, attach, detach, update, getConParam,</i> <i>seekTableName, getDBObject</i>	$\in \mathbf{S}$
<i>initialize</i> \otimes <i>MeasureBoard, HardwareManipulators, DataManipulators</i> \otimes <i>protocolDataMonitor, DataManipulators</i> \otimes <i>measuredataMonitor,</i> <i>threadFunction, ThreadControl, TimeFunctions, render, getResult,</i> <i>getData, output, Callbacks, CallbackMaps, DBManipulators</i> \otimes <i>dBpersistentObject, Converters, execute</i>	$\in \mathbf{P(S)}$
<i>TaskServiceFunctions, TaskMeasurements, DataProcessings,</i> <i>PanelEvents, Inputs, DBManipulators</i> \otimes <i>DBMeasureObjects,</i> <i>FactoryMethods, DBServices</i>	$\in \mathbf{P^2(S)}$
<i>Inputsignals, OutputSignals</i>	$\in \mathbf{P^3(S)}$

Creation \rightarrow (*hardwareConfigurator, MeasureBoards*)

ClassAssign(*hardwareConfigurator, MeasureBoards*)

ReferenceToMany \leftrightarrow (*hardwareConfigurator, MeasureBoards*)

Invocation \rightarrow (*HardwareManipulators*^T \otimes *hardwareConfigurator, Initialize*^K \otimes
MeasureBoards)

ReferenceToMany \leftrightarrow (*Protocols, ProtocolRoles*)

ReferenceToMany \rightarrow (*MeasureTasks, ProtocolRoles*)

AsyncForwarding \rightarrow (*OutputSignals*^T \otimes *ProtocolRoles, InputSignals*^T \otimes
ProtocolRoles)

AsyncInvocation \rightarrow (*TaskMeasurements*^T \otimes *MeasureTasks,*
HardwareManipulators^T \otimes *hardwareConfigurator*)

AsyncInvocation \rightarrow (*TaskMeasurements*^T \otimes *MeasureTasks, (DataManipulators*^T \otimes
protocolDataMonitor) \cup (*DataManipulators*^T \otimes
measureDataMonitor))

Invocation \rightarrow (*TaskMeasurements*^T \otimes *MeasureTasks, OutputSignals*^T \otimes
ProtocolRoles)

Invocation \rightarrow ($\text{threadFunction}^K \otimes \text{MeasureTasks}, \text{TaskMeasurments}^T \otimes \text{MeasureTasks}$)
Creation \rightarrow ($\text{initialize}^K \otimes \text{eventManager}, \text{DataProcessingCores} \cup \text{PanelViews}$)
Assign($\text{initialize}^K \otimes \text{EventManager}, \text{PanelViews}, \text{DataProcessingCores}$)
ReferenceToMany \leftrightarrow ($\text{PanelViews}, \text{DataProcessingCores}$)
Invocation \rightarrow ($\text{initialize}^K \otimes \text{eventManager}, \text{FactoryMethods}^T \otimes \text{Creators}$)
Production \rightarrow ($\text{FactoryMethods}^T \otimes \text{Creators}, \text{MeasurePresentations}$)
ReturnType \leftrightarrow ($\text{FactoryMethods}^T \otimes \text{Creators}, \text{MeasurePresentations}$)
Commute $\text{Return_Type, Creation}$ ($\text{factoryMethod}, \text{MeasurePresentations}$)
Assign($\text{FactoryMethods}^T \otimes \text{Creators}, \text{EventManager}, \text{MeasurePresentations}$)
ReferenceToMany \rightarrow ($\text{EventManager}, \text{MeasurePresentations}$)
Assign($\text{FactoryMethods}^T \otimes \text{Creators}, \text{MeasurePresentations}, \text{PanelViews}$)
ReferenceToMany \rightarrow ($\text{MeasurePresentations}, \text{PanelViews}$)
Inheritance($\text{DataProcessingCores} \cup \text{PanelViews}, \text{publisher}$)
Inheritance($\text{PanelViews} \cup \text{MeasurePresentations}, \text{subscriber}$)
Assign($\text{attach}^K \otimes \text{publisher}, \text{DataProcessingCores}, \text{PanelViews}$)
CancelAssign($\text{detach}^K \otimes \text{publisher}, \text{DataProcessingCores}, \text{PanelViews}$)
Assign($\text{attach}^K \otimes \text{publisher}, \text{PanelViews}, \text{MeasurePresentations}$)
CancelAssign($\text{detach}^K \otimes \text{publisher}, \text{PanelViews}, \text{MeasurePresentations}$)
ReferenceToMany \rightarrow ($\text{DataProcesingCores}, \text{PanelViews}$)
ReferenceToMany \rightarrow ($\text{PanelViews}, \text{MeasurePresentations}$)
Invocation \rightarrow ($\text{PanelViews} \cup \text{MeasurePresentations}, (\text{attach}^K \vee \text{detach}^K) \otimes \text{publisher}$)
FirstArgument \rightarrow ($(\text{attach}^K \vee \text{detach}^K) \otimes \text{publisher}, \text{subscriber}$)
FirstArgument \rightarrow ($\text{notify}^K \otimes \text{publisher}, \text{subscriber}$)
Forwarding \leftrightarrow ($\text{Callbacks}^T \otimes \emptyset, \text{CallbackMaps}^T \otimes \text{eventManager}$)
Forwarding \leftrightarrow ($\text{CallbackMaps}^T \otimes \text{eventManager}, \text{Inputs}^T \otimes \text{MeasurePresentations}$)
Invocation \rightarrow ($\text{Inputs}^T \otimes \text{MeasurePresentations}, \text{PanelEvents}^T \otimes \text{PanelViews}$)
Invocation \rightarrow ($\text{PanelEvents}^T \otimes \text{PanelViews}, \text{DataProcessings}^T \otimes \text{DataProcessingCores}$)
Invocation \rightarrow ($\text{notify}^K \otimes \text{publisher}, \text{update}^K \otimes \text{subscriber}$)
FirstArgument \rightarrow ($\text{update}^K \otimes \text{subscriber}, \text{publisher}$)
Invocation \rightarrow ($\text{render}^K \otimes \text{PanelViews}, \text{getData}^K \otimes \text{DataProcessingCores}$)
Invocation \rightarrow ($\text{output}^K \otimes \text{MeasurePresentations}, \text{getResult}^K \otimes \text{PanelViews}$)
Invocation \rightarrow ($\text{MeasurePresentations}, \text{tCP/IPmanager}$)
Invocation \rightarrow ($\text{Output}^K \otimes \text{MeasurePresentations}, \text{getDBObject}^K \otimes \text{dBPersistentObject}$)
Assign($\text{getDBObject}^K \otimes \text{dBPersistentObject}, \text{MeasurePresentations}, \text{DBMeasureObjects}$)
ReferenceToSingle \rightarrow ($\text{MeasurePresentations}, \text{DBMeasureObjects}$)
Invocation \rightarrow ($\text{MeasurePresentations}, \text{DBServices}^T \otimes \text{DBMeasureObjects}$)
Invocation \rightarrow ($\text{PanelEvents} \otimes \text{PanelViews}, \text{getDBObject}^K \otimes \text{dBPersistentObject}$)

Assign($getDBObject^K \otimes dBPersistentObject, PanelViews, DBMeasureObjects$)
ReferenceToSingle \rightarrow ($PanelViews, DBMeasureObjects$)
Invocation \rightarrow ($PanelEvents \otimes PanelViews, DBServices^T \otimes DBMeasureObjects$)
Invocation \rightarrow ($DataProcessings^T \otimes DataProcessingCores, DataManipulators^T \otimes$
 $measureDataMonitor$)
Invocation \rightarrow ($DataProcessings^T \otimes DataProcessingCores, DataManipulators^T \otimes$
 $protocolDataMonitor$)
ReferenceInheritance($DBMeasureObjects, dBPersistentObject$)
ReferenceToMany \leftrightarrow ($dBPersistentObject, DBMeasureObjects$)
Creation \rightarrow ($dBPersistentObject, typeConverter \vee dBConnectionManager \vee$
 $tableManager$)
ClassAssign($dBPersistentObject, typeConverter \vee dBConnectionManager \vee$
 $tableManager$)
ReferenceToSingle \leftrightarrow ($dBPersistentObject, typeConverter \vee dBConnectionManager$
 $\vee tableManager$)
Invocation \rightarrow ($dBPersistentObject, GetConParam^K \otimes dBConnectionManager$)
Invocation \rightarrow ($DBManipulators^T \otimes dBPersistentObject, (Converters^T \otimes$
 $typeConverter) \cup SeekTableName^K \otimes tableManager$)
Forwarding \leftrightarrow ($DBManipulators^T \otimes DBMeasureObjects, DBManipulators^T \otimes$
 $dBPersistentObject$)
SameSignature($DBManipulators^T \otimes DBMeasureObjects, DBManipulators^T \otimes$
 $dBPersistentObjects$)
FirstArgument \rightarrow ($getDBObject^K \otimes dBPersistentObject, Name$)
ReturnType \rightarrow ($getDBObject^K \otimes dBPersistentObject, DBMeasureObject$)
Invocation \rightarrow ($DBServices, DBManipulators \otimes DBMeasureObjects$)
AnyInvocation \rightarrow ($ThreadControl^T \otimes threadManager$)
Invocation \rightarrow ($ThreadControl^T \otimes threadManager, TaskServiceFunctions^T \otimes$
 $MeasureTasks$)
AnyInvocation \rightarrow ($TimeFunctions^T \otimes timeServer$)

В диссертации предлагаются формальные критерии и объединяющий их функционал для оценки качества проектируемых моделей ПО ИИС ИСВР. Нами вводятся коэффициенты повторного использования, качества абстракций, интеграции, влияния компонентов, автогенерации и наглядности.

В пятой главе приведены разрабатываемые ИИС конкретных ИСВР. Разработаны методики построения унифицированного графического интерфейса оператора испытательных стендов. Разработаны методики

надежного накопления результатов испытаний в реальном времени без потерь в случае выключения/зависания компьютера. Построена и представлена структура хранения результатов испытаний, а также служебной программной информации в базах данных. Разработаны принципы удаленной отладки ИИС ИСВР на основе имитационного моделирования по локальной сети. Предлагается использование дистанционного эксперимента для обучения операторов работе с ПО ИИС ИСВР.

В шестой главе исследуются вопросы метрологической аттестации ИИС ИСВР. Исследованы метрологические характеристики и особенности современных методов поверки измерительных каналов (ИК) ИИС ИСВР. По результатам исследований приводятся таблица 1 и формула (4).

Таблица 1. Трудоемкость поверки типичных ИИС ИСВР

Тип канала	$C_{t_prepare}$, ч	C_{t_work} , ч	$C_{t_res_calc}$, ч	K_{again}	C_t , ч
Частота вращения	0,5	2	0,25	1,2	3,3
Крутящий момент	3	5	0,4	1,8	15,12
Температура (ТСП)	0,5	2	0,3	1,1	3,08
Температура (термопары)	0,6	3,5	0,3	1,3	5,72
Давление	0,7	3,5	0,3	1,2	4,56
Мощность загрузки	0,6	3,5	0,3	1,3	5,72
Объемный расход	0,5	2	0,3	1,3	3,64
Напряжение (DC)	0,5	2	0,25	1,1	3,025
Напряжение (RMS)	0,6	3,5	0,3	1,2	5,28

$$C_t = (C_{t_prepare} + C_{t_work} + C_{t_res_calc}) \cdot K_{again} \quad (4)$$

где $C_{t_prepare}$ – время, требуемое на подготовку стенда к калибровке ИК; C_{t_work} – время получения измерительных отсчетов; $C_{t_res_calc}$ – время подготовки и исследования протокола поверки; K_{again} – показывает общее количество градуировок, требуемое для достижения положительного результата. Для типовых ИИС ИСВР с числом аналоговых каналов 50-100 общее время поверки составляет 1...2 месяца при работе в одну смену. Это время в несколько раз больше, чем при поверке аналогичных неавтоматизированных систем, так как

было установлено, что при ручной поверке поверители произвольно сокращали число циклов и искажали измерительные отсчеты. Наши системы исключают такую возможность, что резко повышает достоверность и точность измерений. Для снижения времени поверки в диссертации дается рекомендация по разработке автоматических образцовых средств, подключаемых к ИИС ИСВР. Одна из таких систем (для поверки датчиков давления) была нами разработана с применением диссертационных положений.

Для широко используемых в ИИС ИСВР индукционных датчиков крутящего момента была установлена и исследована ярко выраженная дополнительная погрешность, вызванная изменением частоты вращения вала (см. рис. 3).

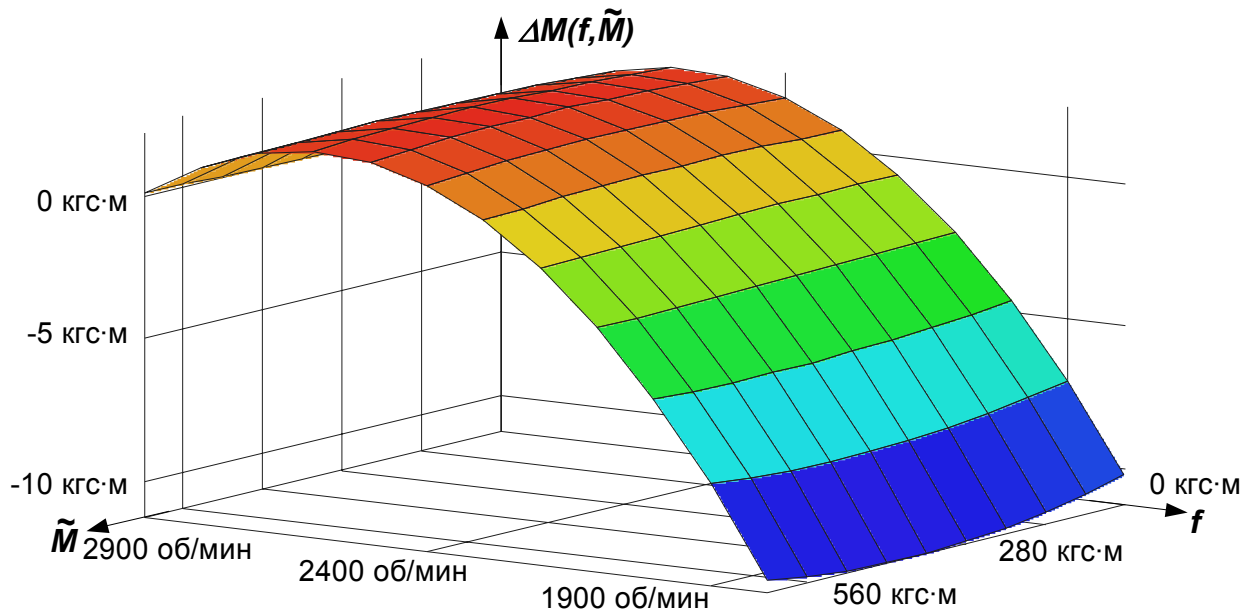


Рис. 3. Частотная зависимость датчика крутящего момента

Были исследованы программные методы коррекции этой погрешности: линейная интерполяция и полиномиальная регрессия. Использование второго метода (5) позволило снизить частотную погрешность с 10 кгс·м до 0,72 кгс·м.

$$\Delta M(f, \tilde{M}) = -135,9 + 0,1 \cdot f - 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot f^2 - 0,1 \cdot \tilde{M} + 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot \tilde{M}^2 + 6,8 \cdot 10^{-5} \cdot f \cdot \tilde{M} - 6,8 \cdot 10^{-5} \cdot f \cdot \tilde{M} - 1,3 \cdot 10^{-8} \cdot f^2 \cdot \tilde{M} - 9,9 \cdot 10^{-8} \cdot f \cdot \tilde{M}^2 \quad (5)$$

Для повышения точности и стабильности измерений были исследованы и доработаны программные алгоритмы расчета сдвига фаз сильно зашумленных низкочастотных (5...50 Гц) синусоидальных сигналов тормозных генераторов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В диссертации сформулирована и решена научно-практическая задача проектирования и разработки как аппаратного, так и программного обеспечения ИИС ИСВР.
2. Применение концепции виртуальных приборов National Instruments позволяет быстро создавать надежные и высокоточные ИИС конкретных ИСВР на основе унифицированной блочно-модульной архитектуры.
3. Для современных ИИС кроме качества используемых датчиков особое значение начинает играть ПО. Для промышленных задач разработано множество высококачественной аппаратуры, однако, качество ПО существенно отстает по многим показателям. Основная проблема заключается в отсутствии стандартизованных, научно и практически обоснованных методик проектирования ПО.
4. В диссертации предлагается и детально разрабатывается унифицированный процесс проектирования ИИС ИСВР, включающий в себя методики проектирования и формального описания аппаратного и программного обеспечения ИИС ИСВР. Для целостного формального описания разрабатываемых ИИС ИСВР было проведено расширение объектных нотаций UML (наглядное представление аппаратной части ИИС, формальное представление алгоритмов управления), UML RT (наглядное описание объектов GOOP и формальная спецификация для представления многопоточкового взаимодействия) и LePUS (7 новых семантических связей и отношений, модифицирован синтаксис для сокращения формальной спецификации в 3...5 раз).
5. Построенная обобщенная макро модель ИИС ИСВР состоит из 11 подмоделей: предметной области, физического представления ИСВР, физического представления ИИС ИСВР, ядра программного каркаса, многопоточкового управления измерениями (статика), взаимодействия потоков (динамика), алгоритмов управления, машины состояния, структуры

базы данных (статика), взаимодействия с базой данных (динамика), интерактивного взаимодействия с оператором. Она наглядно отражает сущность испытательных стендов, набор измеряемых параметров и сигналов управления, структуру и динамику работы ПО.

6. Разработанный и исследованный программный каркас ИИС ИСВР позволяет на нескольких диаграммах отразить и строго математически записать функционирование сложного программного комплекса.
7. Введенные критерии и функционал качества дают объективную информацию о качестве разрабатываемых моделей и каркасов.
8. На основе удачного применения нотации LePUS для моделирования ПО ИИС ИСВР можно сделать вывод о применимости этой новейшей (и еще слабо распространенной и изученной) нотации для строго математической записи статической структуры сложного объектно-ориентированного ПО.
9. Изложенные и научно обоснованные методики конкретной реализации пользовательского интерфейса, способов записи протоколов испытаний, структур баз данных, дистанционного эксперимента и удаленной отладки ПО ИИС ИСВР отражают современные тенденции программирования данных систем. На основе этих методик возможно создание (по испытанным шаблонам) новых систем, отличающихся эргономичностью, высокой надежностью, быстродействием и приемлемой стоимостью.
10. Детальное исследование метрологических характеристик типовых ИИС ИСВР выявляет основные сложности проектирования и программирования таких систем, указывает возможные пути повышения точности и динамических характеристик измерений, а также снижения времени на проведение поверки измерительных каналов.
11. Предложенные программные алгоритмы частотной коррекции датчиков крутящего момента позволяют существенно повысить точность измерения в широком диапазоне частоты вращения вала. С их помощью значительно подавляется выявленная нами погрешность широко используемых в ИИС ИСВР датчиков.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Андреев С.В., Шкодырев В.П. Интеллектуальный WEB-сервер управления дистанционным экспериментом // Сборник докладов международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM'2000, Санкт-Петербург, том 1, стр. 274-277, 2000 г.
2. Andreev S.V. Helicopter Gear Drive Computer Based Test Bench // National Instruments NI WEEK'2000 Proceedings, Austin, USA, 2000. <http://www.ni.com/pdf/csma/us/andreev.pdf> . – 3 pages.
3. Андреев С.В., Шкодырев В.П. Архитектура абстрактных объектно-ориентированных моделей промышленных измерительных систем // Сборник докладов международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM'2001, Санкт-Петербург, том 2, стр. 53-57, 2001 г.
4. Андреев С.В. Разработка формальных методов проектирования программного обеспечения, управляющего испытательными стендами. Электронный журнал «Исследовано в России», 71, стр. 781-797, 2002 г. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/071.pdf>
5. Андреев С.В., Шкодырев В.П. Расширение нотации LePUS для проектирования программного обеспечения испытательных стендов // Сборник докладов международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM'2002, Санкт-Петербург, том 2, стр. 236-239, 2002 г.
6. Андреев С.В., Шкодырев В.П. Применение объектно-ориентированных принципов для моделирования измерительных программных систем, управляющих промышленными испытательными стендами // Сборник докладов международной конференции Датчики и Системы 2002, Санкт-Петербург, том III, стр. 125-129, 2002 г.
7. Андреев С.В. Разработка методик представления моделей информационно-измерительных систем испытательных стендов с помощью нотации UML. Электронный журнал «Исследовано в России», 122, стр. 1348-1359, 2002 г. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/122.pdf>