



*На правах рукописи*

**Константинов Александр Андреевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНО-  
ИНФОРМАЦИОННОГО И УПРАВЛЯЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ  
ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЕТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО  
АППАРАТА**

Специальность 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы  
(авиационная, ракетно-космическая техника и кораблестроение)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2014 г.

Работа выполнена на кафедре «Приборы и измерительно-вычислительные комплексы» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

**Научный руководитель:** **Егоров Александр Александрович**,  
кандидат технических наук, профессор  
Академии Военных Наук Российской  
Федерации;

**Официальные оппоненты:** **Смыслов Всеволод Игоревич**,  
доктор технических наук, главный научный  
сотрудник Центрального аэрогидродинами-  
ческого института имени профессора Н.Е.  
Жуковского;

**Неретин Евгений Сергеевич**,  
кандидат технических наук, начальник сектора  
верификации СУОСО ООО «ОАК – Центр  
Комплексования»

**Ведущая организация:** ОАО «Государственное машиностроительное  
конструкторское бюро «Вымпел» им. И.И.  
Торопова»

Защита состоится 29 декабря 2014 г. в 10ч. 00мин. на заседании  
диссертационного совета Д 212.125.11 Московского авиационного института по  
адресу: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться с библиотеке Московского авиационного  
института по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4,  
Ученый совет МАИ

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Отзывы просим отправлять в 2-х экземплярах, заверенных печатью, по адресу:  
125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук

  
\_\_\_\_\_ Горбачев Ю.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одной из важнейших задач в авиа и ракетостроении является исследование колебательных процессов конструкции летательного аппарата (ЛА) в полете. Для того, чтобы получить соответствующие результаты, проводятся наземные эксперименты с применением аэродинамических труб (АДТ). Такие исследования достаточно дороги, а технические средства для совершения таких измерений достаточно сложны. Аэродинамические трубы, в которых производится продувка динамически подобных моделей (ДПМ) и некоторых натуральных элементов конструкций имеют внушительные размеры, обычно несопоставимые с размерами продуваемой модели. Кроме того АДТ, в силу своих размеров и масс, очень инерционны, что не позволяет моментально остановить компрессорное колесо, а вместе с ним и воздушный поток, в случае возникновения аварийной ситуации, которая может привести к разрушению конструкции исследуемого объекта и повреждению элементов конструкции АДТ.

В первой половине 20 века был предложен метод электромеханического моделирования (ЭММ), суть которого сводилась к возбуждению колебаний точек исследуемого объекта, при помощи электро-механических силовозбудителей с определенной частотой и амплитудой, основной целью которого было, нахождение критических параметров колебаний, при которых возникало разрушение испытуемого образца, без проведения экспериментов над ним в АДТ.

На сегодняшний день, на основе метода ЭММ разработана методика, позволяющая рассчитать значение воздействующих сил со стороны воздушного потока на ЛА, во время его движения при наземных испытаниях без использования АДТ. Исходными данными для решения задач, основанных на данной методике являются плотность набегающего потока, скоростной напор, число Маха и число Струхала.

В стендовых условиях обеспечивается значительное расширение режимов потока для модели, рассчитанной на испытания лишь для определенной аэродинамической трубы. Поскольку на стенде значения параметров виртуального воздушного потока и их сочетаний принципиально не ограничены, на одной модели

возможны исследования любых режимов потока, включая недостижимые в АДТ. Средства ЭММ обеспечивают также воспроизведение других силовых воздействий, включая нелинейные характеристики конструкции. Электронное ограничение амплитуды колебаний предотвращает повреждение модели при вхождении в резонанс или малых величинах демпфирования.

Таким образом появилась возможность создания нового типа измерительно-информационных и управляющих комплексов (ИИУК), с помощью которых можно создавать колебания точек исследуемого объекта по рассчитанным характеристикам колебаний, в зависимости от вышеуказанных параметров.

Предыдущее поколение ИИУК для решения задач динамической аэроупругости было реализовано посредством больших вычислительных аналоговых машин. Постоянное развитие аэродинамических теорий, совместно с развитием техники, порождают все новые и новые требования к ИИУК, соблюдение которых необходимо для более качественного уточнения разрабатываемых моделей.

Исходя из выше сказанного, является актуальной задача исследования и разработки ИИУК, представляющего собой имитатор аэродинамических воздействий (ИАВ) на натурную конструкцию ЛА.

**Объектом исследований** является аппаратно-программный комплекс (АПК) для ИАВ имитирующий воздействия аэродинамических сил на ЛА при проведении наземных стендовых испытаний.

**Предметом исследования** является программное и аппаратное обеспечение информационно-измерительного и управляющего комплекса (ИИУК) для имитатора аэродинамических воздействий (ИАВ), позволяющие моделировать полетные условия ЛА при полунатурных стендовых испытаниях конструкций ЛА.

**Целью диссертационной работы** является исследование и разработка для ИАВ специализированного быстродействующего ИИУК, его методических, аппаратных и программных средств, обеспечивающего полунатурное моделирование аэродинамических воздействий во время проведения наземных испытаний конструкций ЛА с использованием метода электромеханического моделирования.

На защиту выносятся следующие **основные научные положения**:

1. Анализ и разработка архитектуры специализированного быстродействующего трехуровневого ИИУК, построенного на базе открытых международных модульных структур, с использованием операционных систем жесткого реального времени и структур «АЦП-ПЛИС-ЦАП» для ИАВ.
2. Алгоритм преобразования аэродинамических уравнений ИАВ из аналоговой формы в цифровую форму, с описанием в числах с фиксированной запятой (заданной разрядности), с выбором типовых арифметических операций для эффективной по времени реализации на ПЛИС.
3. Математическая модель для оптимизации ресурсов ПЛИС, связывающая скорость выполнения программного кода, количество ресурсов, требуемых для его реализации и точности вычислений (целочисленный формат 8-64 разряда и числа с фиксированной запятой).
4. Методика проектирования программного обеспечения специализированного ИИУК, с использованием структур «АЦП-ПЛИС-ЦАП», обеспечивающая возможность управления выбором затрачиваемых ресурсов (емкость ПЛИС), времени исполнения кода ПЛИС (быстродействие) и точности вычислений (разрядность данных).
5. Алгоритм применения разработанной методики с целью обеспечения эффективности выбора технических параметров АПК на базе ПЛИС для реализации перспективных многоканальных измерительно-управляющих систем нового поколения.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработана архитектура специализированного быстродействующего трехуровневого ИИУК, построенного на базе открытых международных модульных структурах РХІ, с использованием операционных систем жесткого реального времени и структур «АЦП-ПЛИС-ЦАП» для ИАВ. Разработанная архитектура обеспечивает выполнение сформулированных технических требований к

быстродействию и точности, построена на базе технологий цифровой обработки сигналов в режиме реального времени с применением методов реализации параллельного выполнения алгоритмов сбора данных с датчиков (акселерометров), обработки и выдачи управляющих воздействий (по каналам).

2. Разработан алгоритм преобразования аэродинамических уравнений ИАВ из аналоговой формы в цифровую форму, с описанием в числах с фиксированной запятой (заданной разрядности), с выбором типовых арифметических операций для эффективной по времени реализации на ПЛИС.

3. Разработана математическая модель для оптимизации ресурсов ПЛИС, связывающая скорость выполнения программного кода, количество ресурсов, требуемых для его реализации и точности вычислений (целочисленный формат 8-64 разряда и числа с фиксированной запятой). Модель построена для типовых арифметических операций и позволяет при заданных скорости выполнения программного кода и точности вычислений определить необходимые ресурсы ПЛИС.

4. Разработана методика проектирования программного обеспечения специализированного ИИУК, с использованием структур «АЦП-ПЛИС-ЦАП», обеспечивающая возможность управления выбором затрачиваемых ресурсов (емкость ПЛИС), времени исполнения кода ПЛИС (быстродействие) и точности вычислений (разрядность данных).

5. Разработан алгоритм применения созданной методики с целью обеспечения эффективности выбора технических параметров АПК на базе ПЛИС для реализации перспективных многоканальных измерительно-управляющих систем нового поколения.

**Практическая значимость диссертационной работы** заключается:

- Разработан опытный образец специализированного ИИУК на базе созданной методики проектирования математического аппарата на ПЛИС, который экспериментально подтвердил заданные технические характеристики, соответствующие современным требованиям по быстродействию, многоканальности измерений (сигналы от датчиков-

акселерометров) и управления (сигналы управления на силовозбудители) - физические имитаторы аэродинамических воздействий) для ИАВ;

- Разработан лабораторный стенд ИАВ, в состав которого входит ИИУК, реализующий метод полунатурного моделирования (имитации) аэродинамических воздействий.

**Достоверность** разработанных архитектуры специализированного ИИУК, математических моделей и разработанных методик подтверждена согласованностью результатов математического моделирования и экспериментальных исследований специализированного ИИУК в составе лабораторного образца ИАВ.

**Личный вклад автора** состоит в разработке и реализации архитектуры специализированного ИИУК и лабораторного образца ИАВ, в переводе аэродинамических уравнений в цифровое представление и оценка погрешностей преобразования, разработке цифрового представления аэродинамических уравнений в числах с фиксированной запятой, для реализации на ПЛИС, разработке методики создания ПО на ПЛИС, учитывающей требования по занимаемым ресурсам ПЛИС и быстродействию для специализированного ИИУК, формировании списка типовых математических операций для аэродинамических уравнений в формате чисел с фиксированной запятой, построение карт распределения ресурсов для типовых операций и приведение их к полиномиальному описанию.

**Апробация работы и публикации.** Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 2 научных трудах, из них по теме диссертации 2, среди которых 2 публикация в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК. Основные результаты работы были доложены на ежегодной Международной конференции «Aerospace Testing & Industrial Control» (г.Москва 2014г.) и на IX-ой Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» (г.Москва 2012г.)

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами и заключениями. Она изложена на 143 страницах машинописного текста, включает 51 рисунок, 24 таблицы и содержит список литературы из 68 наименований, среди которых 50 отечественных и 18 иностранных авторов.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определяются цели и задачи исследования, а также объект и предмет исследования. Формулируются основные положения, выносимые на защиту, проводятся основные научные и практические результаты, обосновывается их новизна. Приводится содержание и краткое описание глав диссертации.

**В первой главе** диссертационной работы рассматривается метод электромеханического моделирования (ЭММ), который лежит в основе имитатора аэродинамических воздействий. Метод ЭММ используется для моделирования силовых воздействий при наземных испытаниях, как воспроизведение аэродинамических силовых воздействий на ЛА или его динамическую подобную модель (ДПМ). Идея метода состоит в воспроизведении аэродинамических сил на механическую конструкцию в стендовых условиях, без реального воздушного потока. Для этого необходимо, в частности, заменить распределенные аэродинамические силы, действующие на упругую конструкцию при ее колебаниях в потоке, искусственными (эквивалентными) сосредоточенными силами с помощью электродинамических силовозбудителей.

Многие расчетные схемы приводят к линейной системе дифференциальных уравнений, описывающих малые колебания упругой конструкции в потоке:

$$M \ddot{y}(t) + H \dot{y}(t) + G y(t) = f^A(t), \quad (1)$$

где  $M, H$  и  $G$  - матрицы инерции, демпфирования и жесткости соответственно,  $t$  - текущий момент времени,  $y$  - мгновенное значение вектора перемещений точек

измерения конструкции;  $f^A$  - мгновенное значение вектора сосредоточенных аэродинамических сил, который может быть вычислен на основе любой аэродинамической теории и процедуры преобразования распределенных сил в ряд энергетически эквивалентных сосредоточенных сил. При вывешивании механической конструкции на стенде, значения вектора сосредоточенных аэродинамических сил становятся тождественно равными значениям вектора сил возбуждения:

$$f(t) = f^A(t), \quad (2)$$

где  $f$  - вектор сил возбуждения.

При использовании датчиков ускорения, дифференциальное уравнение (1) приводится к интегральной форме (1.3):

$$Ma(t) + \frac{H}{T} \int a(t)dt + \frac{G}{T^2} \iint a(t)dt^2 = f(t), \quad (3)$$

где  $a$  - мгновенное значение ускорения точек конструкции.

Вибродатчики, установленные на конструкции, преобразуют ускорения соответствующих точек в электрические сигналы  $e$ . Эти сигналы преобразуются вычислительным устройством в выходные напряжения  $u$ . После усиления мощности эти напряжения  $u$  преобразуются в силы  $f$  электродинамическими силовозбудителями. Соответствующие преобразования описываются уравнениями:

$$e = Ra ; u = Ke ; f = Qu, \quad (4)$$

где  $R$  и  $Q$  - диагональные матрицы калибровочных коэффициентов датчиков и силовозбудителей соответственно;  $K$  - матрица аэродинамических преобразований.

Как показал анализ аппаратно-программных комплексов, существующие решения не удовлетворяют современным техническим требованиям для решений задач динамической аэроупругости. Сформулирована следующая постановка задачи, для разработки ИИУК для ИАВ:

1. Сформулировать требования к современным информационно-измерительным и управляющим комплексам (таким как ИАВ) с повышенным требованием по быстродействию, многоканальности и точности.
2. Разработать архитектуру ИИУК для решения задач динамической аэроупругости;
3. Провести преобразование аэродинамических уравнений из аналоговой формы к дискретной;
4. Разработать методику реализации математического аппарата на ПЛИС для многоканальных систем измерения и управления с жестким требованием по точности и быстродействию;
5. Разработать алгоритм ПО, реализующий математический аппарат, на основе представленной методики;
6. Разработать ИАВ в составе ЭММ для решения задач динамической аэроупругости;
7. Оценить характеристики ИАВ на соответствие сформулированным требованиям.

**Во второй главе** Сформулированы требования к ИАВ и описан процесс выбора архитектуры построения ИАВ. Приводится схема взаимодействия ИИУК с исследуемым объектом. На основании анализа требований к ИИУК и схемы взаимодействия происходит функциональное разделение ИИУК на автономное рабочее место (АРМ) и автономный блок (АБ), описывается структура сети для ИИУК, строится структурная схема АБ ИИУК, оценивается и выбирается архитектура расширительных модулей для ИИУК и проводится выбор вычислителя для расширительный модуль.

Взаимодействие ИИУК с пользователем происходит посредством человеко-машинного интерфейса, работающего под управлением операционной системы графическим интерфейсом. Для организации графического пользовательского интерфейса обычно используются вычислительные системы на базе персональных компьютеров (ПК) с операционной системой (ОС) Windows,

Linux, MacOS. Все вышеперечисленные операционные системы, с организацией графического интерфейса, не являются ОС реального времени. Время выполнения кода в таких ОС зависит от многих факторов, которые могут приводить к непредсказуемым задержкам. К таким факторам относятся:

1. Параллельная работа сервисных программ, таких как экранная заставка, антивирусные программы и т.д.;
2. Обслуживание ОС прерываний от периферийных устройств, таких как USB порт, клавиатура, мышь и т.д.

Для того, чтобы максимально точно определить характеристики исследуемого объекта и упростить процедуру математического анализа, необходимо обеспечить синхронность поступающей информации в систему. Кроме того, необходимо обеспечить безопасную и синхронную работу в режиме реального времени контура управления. Поэтому, для исследования динамических процессов ключевую роль играют системы синхронного измерения и управления, осуществляющие одновременный опрос измерительных и выдачи сигналов для управляющих каналов, с минимальным расхождением по времени. Величина предельного расхождения опроса измерительных и управляющих каналов задается для каждой системы, стенда и решаемой задачи индивидуально. Кроме задач измерения и управления, необходимо, в режиме реального времени производить различного рода вычисления, что накладывает серьезные ограничения и высокие требования к быстродействию системы измерения и управления. За детерминированность вычислительного и измерительного процесса, отвечают операционные системы реального времени (ОСРВ).

В качестве основного требования к ОСРВ выдвигается требование обеспечения предсказуемости или детерминированности поведения системы в наихудших внешних условиях, что резко отличается от требований к производительности и быстродействию универсальных ОС.

Принято различать системы мягкого (soft) и жесткого (hard) реального времени. В системах жесткого реального времени неспособность обеспечить реакцию на какие-либо события в заданное время ведет к отказам и невозможности

выполнения поставленной задачи. Системами мягкого реального времени называются системы, не попадающие под определение "жесткие", т.к. в литературе четкого определения для них пока нет. Системы мягкого реального времени могут не успевать решать задачу, но это не приводит к отказу системы в целом. В системах реального времени необходимо введение некоторого директивного срока, до истечения которого задача должна обязательно (для систем мягкого реального времени – желательно) выполняться. Этот директивный срок используется планировщиком задач как для назначения приоритета задачи при ее запуске, так и при выборе задачи на выполнение.

Чтобы обеспечить многопользовательский режим для доступа и управления кАБ ИИУК строится структура сети. Происходит оценка и выбор структуры сети ИИУК для ИАВ.

Показано, что для расширяемых многоканальных систем с межканальной и межмодульной синхронизацией необходимо использовать системные шины РХІ и РХІExpress.

В качестве устройств ввода информации с датчиков, служат АЦП. Данные, получаемые с АЦП поступают в вычислитель, где происходит расчет значений силовых воздействий, и выдача управляющего воздействия. Управляющее воздействие выводится из системы посредством ЦАП, и затем, в аналоговой форме поступает на усилители силовозбудителей.

Для обеспечения работы данного контура необходимо выбрать схему передачи данных от АЦП к ЦАП.

Раздельное исполнение измерительного модуля, модуля управления и вычислителя.

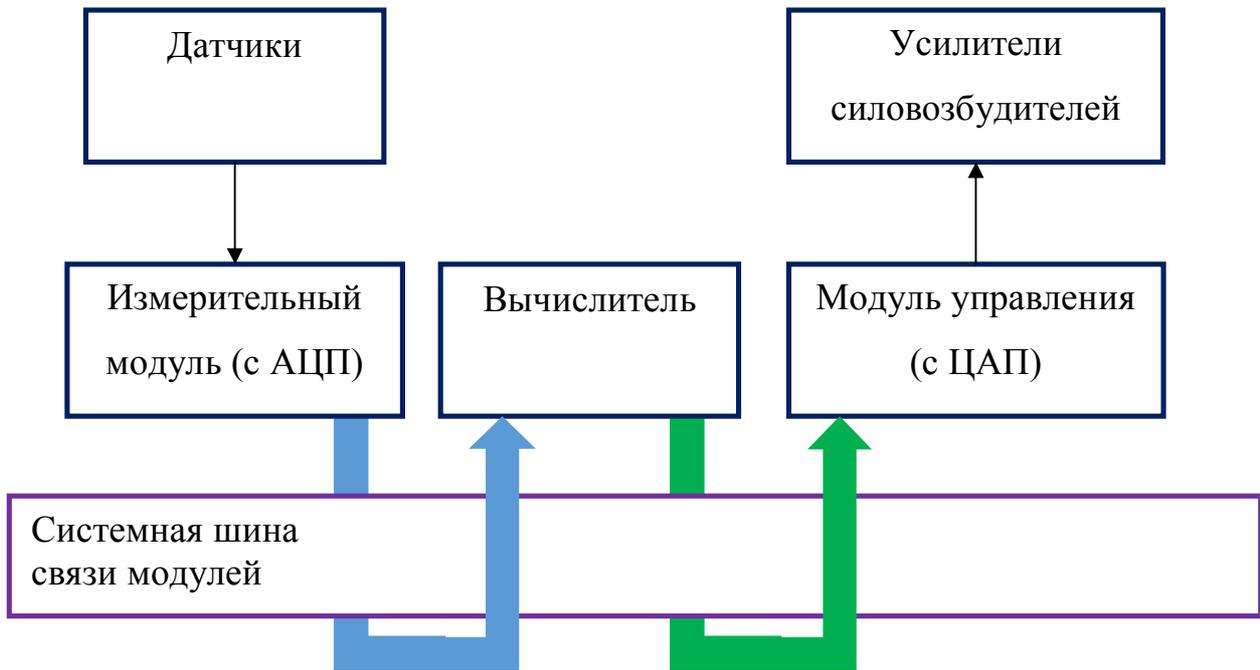


Рис.1. Архитектура с раздельным исполнением измерительной, вычислительной и управляющей частей.

Суммарная скорость получения информации на выходе ЦАП вычисляется по следующим формулам:

1. Для одноканальных АЦП и ЦАП:

$$t_{\Sigma} = (t_{ADC} + t_{sys}) * n + t_{pr}(m, n) + (t_{sys} + t_{DAC}) * m \quad (5)$$

2. Для многоканальных АЦП и ЦАП:

$$t_{\Sigma} = t_{ADC} + t_{sys} * (n + m) + t_{pr}(m, n) + t_{DAC} \quad (6)$$

где  $t_{\Sigma}$  - задержка выходного сигнала с момента поступления данных с датчиков;  $t_{ADC}$  - время преобразования аналогового сигнала в код;  $t_{sys}$  - время, необходимое для передачи данных по системной шине;  $t_{pr}(m, n)$  - время расчета значения силового воздействия (зависит от алгоритма и архитектуры вычислителя);  $t_{DAC}$  - время преобразования цифрового кода в аналоговый сигнал для усилителей силовозбудителей;  $n$  - число измерительных каналов;  $m$  - число каналов управления. При увеличении количества модулей, и соответственно измерительных

и управляющих модулей, задержка выдачи управляющего воздействия увеличивается.

Аналогичная ситуация, при нахождении АЦП и ЦАП в рамках одного модуля, а расположение вычислителя, на другом модуле.

Архитектура сквозного потока данных «АЦП-Вычислитель-ЦАП»

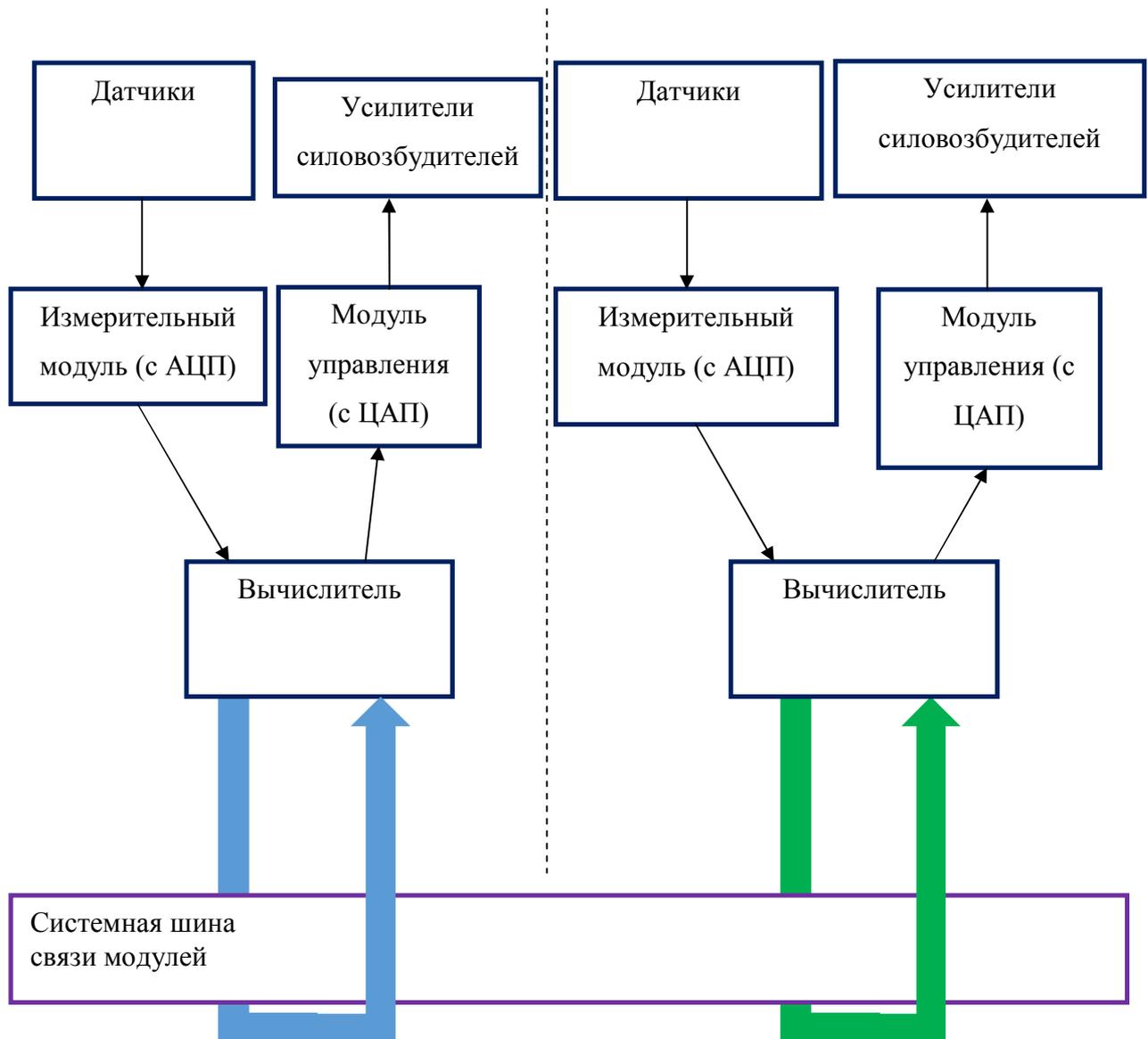


Рис.2. Архитектура с единым исполнением измерительной, вычислительной и управляющей частей.

Суммарная скорость получения информации на выходе ЦАП вычисляется по следующей формуле:

1. Для одноканальных АЦП и ЦАП:

$$t_{\Sigma} = t_{ADC} * n + t_{pr}(m, n) + t_{DAC} * m \quad (7)$$

2. Для многоканальных АЦП и ЦАП:

$$t_{\Sigma} = t_{ADC} + t_{pr}(m, n) + t_{DAC} \quad (8)$$

При увеличении количества однотипных модулей задержка, при расчете не изменяется, а при увеличении измерительных или управляющих каналов каждого модуля, изменяется.

С учетом предъявляемых требований к стендовым системам, наиболее целесообразно, в качестве вычислителя использовать архитектуры, обеспечивающие параллельность исполнения операций. Наиболее эффективными, при решении задач построения быстродействующих измерительно-управляющих систем, является архитектуры ПЛИС, в силу аппаратной реализации алгоритма, и обеспечивающей естественный параллелизм исполнения кода.

**В третьей главе** Представлен процесс преобразования аэродинамических уравнений из аналоговой формы к дискретной. Описываются последовательность действий разработанной методики для реализации ПО на ПЛИС:

- 1) Разбивка формул на отдельные типовые математические операции;
- 2) Разделение параметров на быстро и медленно меняющиеся;
- 3) Перенос расчета медленно меняющихся параметров на хост;
- 4) Приведение формул к целочисленной форме или в формате с фиксированной запятой, с заменой операции деления бинарным сдвигом или обратным умножением;
- 5) Предварительный выбор способа реализации каждой математической операции на ПЛИС;
- 6) Программное распараллеливание независимых операций (данное положение важно для синхронного исполнения параллельных веток);
- 7) Замена элементов лицевой панели константами на блок-диаграмме (если константа не представляет собой меняющийся параметр);

- 8) Свертка связанных констант и медленно меняющихся параметров в одно значение;
- 9) Выбор типа данных для каждой операции;
- 10) Предварительная разработка программы ПЛИС;
- 11) Отладка программы в режиме моделирования;
- 12) Предварительный расчет скорости работы алгоритма;
- 13) Предварительная оценка аппаратной емкости алгоритма;
- 14) Компиляция программы ПЛИС и запуск на целевом устройстве;
- 15) Проверка программы ПЛИС на соответствие требованиям;
- 16) При необходимости и возможности – корректировка программы ПЛИС
  - a. Увеличение производительности программы – замена отдельных участков кода на более быстрые;
  - b. Корректировка по емкости участка кода – замена отдельных участков кода на менее ресурсоемкие.

Для преобразованных аэродинамических уравнений формируется список типовых математических операций и строятся карты распределения ресурсов и проводится полиномиальное описание распределения ресурсов, для выбора наилучшего варианта реализации типовой математической операции.

Учитывая, что данные в цифровую систему поступают через АЦП, а выводятся из ЦАП, необходимо предусмотреть соответствующие операции масштабирования.

Численное представление сигнала при прохождении через АЦП:

$$e_i^*(t_c) = \left[ \frac{2^{N_{ADCi}} \cdot U_i(t_c)}{A_i} \right], \quad (9)$$

где  $e_i^*$  - численное представление исходного сигнала датчика после оцифровки в текущий момент времени,  $A_i$  - размах диапазона измерения,  $U_i(t_c)$  - текущее значение измеренного сигнала,  $N_{ADCi}$  - разрядность канала АЦП, квадратные скобки – округление до ближайшего целого.

Численное значение ускорения в точке:

$$a_i^*(t_c) = \left[ \frac{f(e_i^*(t_c) - e_i^{*0}) + f^*(e_i^*(t_{c-1}) - e_i^{*0})}{2} \right], \quad (10)$$

где  $a_i^*$  - численное значение ускорения в точке,  $e_i^{*0}$  - цифровое значение уставки (смещение нуля),  $f$  - функция фильтрации, квадратные скобки – округление до ближайшего целого.

Численное значение скорости в точке:

$$v_i^*(t_c) = \left[ \frac{f(\dot{s}_i^*(t_c))}{\Delta t} \right], \quad (11)$$

где  $v_i^*$  - цифровое значение скорости в точке,  $\dot{s}_i^*(t_c)$  - промежуточная сумма, пропорциональная ускорению точек конструкции в текущий момент времени.

$$\dot{s}_i^*(t_c) = \dot{s}_i^*(t_{c-1}) + a_i^*(t_c) \quad (12)$$

Численное значение перемещения в точке:

$$y_i^*(t_c) = \left[ \frac{f(s_i^*(t_c))}{\Delta t} \right], \quad (13)$$

где  $y_i^*$  - цифровое значение перемещения в точке,  $s_i^*(t_c)$  - промежуточная сумма, пропорциональная скорости точек конструкции в текущий момент времени.

$$s_i^*(t_c) = s_i^*(t_{c-1}) + f(\dot{s}_i^*(t_{c-1})) + \frac{a_i^*(t_c)}{2}, \quad (14)$$

Численное значение выходного сигнала ЦАП:

$$u_i^*(t_c) = \left[ \sum_j^n g_{ij} y_j^*(t_c) + \sum_j^n h_{ij} v_j^*(t_c) + \sum_j^n m_{ij} a_j^*(t_c) \right] \quad (15)$$

Восстановленное значение выходного сигнала ЦАП для силового воздействия:

$$R_i(t_c) = u_i^*(t_c) \cdot Q_i, \quad (16)$$

где  $R_i$  - восстановленное значение сигнала ЦАП,  $Q_i$  - масштабный коэффициент ЦАП.

$$Q_i = \frac{B_i}{2^{N_{DAC_i}}}, \quad (17)$$

где  $B_i$  - размах выходного диапазона изменения сигнала ЦАП,  $N_{DAC_i}$  - число разрядов ЦАП.

Применение методики при разработке ИИУК позволило увеличить быстродействие измерительно-вычислительного и управляющего контура ПО ПЛИС с 36,9кГц до 157,5 кГц, что соответствует увеличению в 4,2 раза.

Использование ресурсов ПЛИС:

1. Slices: уменьшилось на 4,9% (с 15120 до 14376);
2. Registers: уменьшилось на 5,6% (с 48236 до 45531);
3. LUTs: уменьшилось на 7,3% (с 44713 до 41435);
4. DSP: увеличилось на 14,5% (с 48 до 55);
5. RAM: увеличилось с 0 до 17 ячеек

**Четвертая глава** посвящена практической реализации ИИУК для ИАВ в составе ЭММ, выполняющему решение аэродинамических уравнений, с учетом предлагаемой методики реализации алгоритма с учетом технических требований к ИИУК. Проведена оценка полученного решения на соответствие требованиям к ИИУК по быстродействию и точности.

Программа расчета выходных сигналов проводит преобразования по формуле:

$$u_i = [(\sum_j^8 b_{ij}^* y_j^* + \sum_j^8 d_{ij}^* \dot{y}_j^* + c_i^* \ddot{y}_i^*): \quad (18)$$

где:

$u_i^*$  – сигналы для силовозбудителей;

$b_{ij}^*$  – коэффициенты преобразования перемещений элементов конструкции в сигналы силовозбудителя;

$d_{ij}^*$  – коэффициенты преобразования скоростей элементов конструкции в сигналы силовозбудителя;

$c_i^*$  – коэффициенты преобразования ускорений элементов конструкции в сигналы силовозбудителя;

$y_i^*$  – перемещения элементов конструкции;

$\dot{y}_i^*$  – скорости элементов конструкции;

$\ddot{y}_i^*$  – ускорения элементов конструкции;

Квадратные скобки – округление до целых.

Все переменные реализованы в виде 16 разрядных регистров. Результатом умножений является 32 разрядная величина, с погрешностью вычислений  $2^{-16}$ , далее суммируются полученные 32-х разрядные значения. Общая погрешность вычислений будет  $17 \cdot 2^{-16}$  или менее чем  $2^{-11}$ . В результате отбрасывания 16-ти младших разрядов результата суммирования, накопленная погрешность вычисления не попадает в итоговый результат и не вносит дополнительной вычислительной ошибки в амплитуду выходных сигналов.

### Заключение:

На основании проведенных исследований получены следующие научные результаты:

1. Проведен анализ и разработана архитектура специализированного быстродействующего трехуровневого ИИУК, построенного на базе открытых международных модульных структурах РХІ, с использованием операционных систем жесткого реального времени и структур «АЦП-ПЛИС-ЦАП» для ИАВ, обеспечивающая реализацию параллельного выполнения алгоритмов сбора данных с датчиков (акселерометров), обработки и выдачи управляющих воздействий (по каналам).
2. Разработан алгоритм преобразования аэродинамических уравнений ИАВ из аналоговой формы в цифровую форму, с описанием в числах с фиксированной запятой (заданной разрядности), с выбором типовых арифметических операций для эффективной по времени реализации на ПЛИС.

3. Разработана математическая модель для оптимизации ресурсов ПЛИС, позволяющая связать скорость выполнения программного кода, количество ресурсов ПЛИС, требуемых для его реализации и точности вычислений (целочисленный формат 8-64 разряда и числа с фиксированной запятой). Математическая модель построена для выбранных типовых арифметических операций и позволяет при заданных скорости выполнения программного кода и точности вычислений определить необходимые ресурсы ПЛИС.
4. Разработана методика проектирования ПО специализированного ИИУК, с использованием структур «АЦП-ПЛИС-ЦАП», обеспечивающая возможность управления выбором затрачиваемых ресурсов (емкость ПЛИС), времени исполнения кода ПЛИС (быстродействие) и точности вычислений (разрядность данных).
5. Разработано и протестировано в составе ИАВ программное обеспечения верхнего и нижнего уровня специализированного ИИУК на основе разработанной методики для решения задач динамической аэроупругости.
6. Разработан алгоритм применения созданной методики с целью обеспечения эффективности выбора технических параметров АПК на базе ПЛИС для реализации перспективных многоканальных измерительно-управляющих систем нового поколения.
7. Разработан лабораторный образец специализированного ИИУК на базе технологий LabView, который позволил экспериментально подтвердить заданные технические характеристики, соответствующие современным требованиям по быстродействию, многоканальности измерений (сигналы от датчиков-акселерометров) и управления (сигналы управления на силовозбудители - физические имитаторы аэродинамических воздействий) для ИАВ.
8. Разработан и реализован лабораторный стенд полунатурного моделирования (имитации) аэродинамических воздействий, реализующий метод электромеханического моделирования в составе: усилители

мощности, силовозбудители, датчики-акселерометры, установленные на модель крыла и специализированный ИИУК. Проведена экспериментальная оценка характеристик разработанного ИИУК в составе ИАВ с моделью конструкции ЛА.

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

### **В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК:**

1. Егоров А.А., Константинов А.А., Бодунков Н.Е. Разработка алгоритмов и программного обеспечения специализированного блока формирования аэродинамических воздействий для электромеханического моделирования в задачах аэроупругости. // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. 2014. №2, с.33-38.

2. Константинов А.А. Методика реализации уравнений имитатора аэродинамических воздействий на программируемой логической интегральной схеме [электронный ресурс]. // Труды МАИ. 2014. №77. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php>