ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСОВ АППАРАТУРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИСПЫТАНИЯМИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ. Часть 4

А.А. ЕГОРОВ (ООО “АВИАТЭКС”),
А.А. КОНСТАНТИНОВ (АО “ОКБ “Аэрокосмические Системы”)

В статье рассматриваются вопросы проектирования автоматизированной системы управления испытательным стендом полунатурного электромеханического моделирования машиностроительных конструкций. Одним из наиболее важных этапов цикла проектирования таких изделий является проведение испытаний на внешнее воздействие. Вибрационное воздействие является одним из наиболее важных внешних факторов, влияющих на работу изделий, поэтому учёт его влияния нельзя недооценить. Вибрации негативно влияют на точность работы измерительной аппаратуры, снижают долговечность конструкции и могут привести к усталостному разрушению изделия. Метод электромеханического моделирования (ЭММ) сегодня является важным средством исследования устойчивости аэроупругих колебаний различных конструкций. В первую очередь, он используется для моделирования силовых воздействий при наземных испытаниях, как воспроизведение аэродинамических силовых воздействий на конструкцию, например, ЛА или его ДПМ.

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

Ключевые слова: *проектирование систем управления, вибрации, полунатурное моделирование, электромеханическое моделирование (ЭММ), динамическая аэроупругость, измерительно-информационный и управляющий комплекс, вибродатчики, контроллеры АРМ, режим реального времени.*

В условиях растущей конкуренции в высокотехнологичных отраслях промышленности, включая энергетическую, задача эффективного проектирования и отработки надежных и экономичных изделий и конструкций становится всё более приоритетной. Объектами энергетического машиностроения являются: машины; установки; двигатели и аппараты по производству, преобразованию и потреблению различных форм энергии, в том числе: паровые и водогрейные котлы и котлы-утилизаторы; парогенераторы; камеры сгорания; ядерные реакторы и энергетические установки; паро- и газотурбинные установки и двигатели; паровые турбины; комбинированные установки; теплообменные аппараты; гидравлические турбины и обратимые гидромашины; энергетические насосы; гидродинамические передачи; гидропневмоагрегаты; гидравлические и пневматические приводы; комбинированные гидропневмосистемы управления энергетическими объектами; средства автоматики энергетических установок и комплексов; двигатели внутреннего сгорания; энергетические установки на основе нетрадиционных и возобновляемых видов энергии; вентиляторы; нагнетатели и компрессоры; исполнительные устройства; системы и устройства управления работой энергетических машин, установок, двигателей, аппаратов и комплексов с различными формами преобразования энергии; вспомогательное оборудование, обеспечивающее функционирование энергетических объектов; технологии и оборудование для энергетического машиностроения.

Одним из наиболее важных этапов цикла проектирования таких изделий является проведение испытаний на внешнее воздействие. Вибрационное воздействие является одним из наиболее важных внешних факторов, вли-

яющих на работу изделий, поэтому учёт его влияния нельзя недооценить. Вибрации негативно влияют на точность работы измерительной аппаратуры, снижают долговечность конструкции и могут привести к усталостному разрушению изделия.

В настоящее время всё большее внимание при проектировании уделяется полунатурному и математическому моделированию, а также численным методам. Однако, несмотря на значительные успехи в моделировании поведения конструкций под действием динамических нагрузок, виброиспытания являются наиболее надежным способом определения вибропрочности и виброустойчивости изделия.

Одной из важнейших задач в машиностроении является исследование колебательных процессов конструкции в условиях внешних воздействий. 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 натурных 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 XX 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 [1].

На сегодняшний день, на основе метода ЭММ разработана методика, позволяющая рассчитать значение воздействующих сил со стороны воздушного потока на конструкцию при наземных испытаниях без использования продувок в АДТ.

Наибольшее распространение этот метод получил при исследованиях и испытаниях конструкций ЛА в условиях аэродинамических воздействий.

Метод ЭММ сегодня является дополнительным средством исследования устойчивости аэроупругих колебаний различных конструкций. В первую очередь, он используется для моделирования силовых воздействий при наземных испытаниях, как воспроизведение аэродинамических силовых воздействий на конструкцию, например, ЛА или его ДПМ. Фактически, помимо аэродинамических сил, теми же средствами могут воспроизводиться и другие, например, силы инерции, демпфирования или гироскопические силы. Потребность в этом может возникнуть, в частности, для компенсации нежелательного влияния силовозбудителей на испытываемую конструкцию. Другой вариант – воспроизведение гироскопического момента и/или сил инерции в таком случае, как потеря лопатки двигателя.

Рассмотрим вопросы проектировани автоматизированных систем управления испытательными стендами полунатурного электромеханического моделирования машиностроительных конструкций.

Исходными данными для решения задач, основанных на методе ЭММ, в случае исследований и испытаний конструкций ЛА в условиях аэродинамических воздействий являются плотность набегающего потока, скоростной напор, число Маха и число Струхаля [2, 3].

Системный анализ показал, что 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 [4].

Таким образом, появилась возможность создания нового типа измерительно-информационных и управляющих комплексов (ИИУК), в 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 на натурную конструкцию ЛА.

Целью данной статьи является исследование и разработка для имитатора аэродинамических воздействий ИАВ специализированного быстродействующего информационно-измерительного и управляющего комплекса (ИИУК), для полунатурного моделирования аэродинамических воздействий, во время проведения наземных испытаний ЛА с использованием метода электромеханического моделирования.

Исходя из поставленной цели, в процессе проектирования решаются следующие научно-технические задачи:

1. Исследование и разработка архитектуры ИИУК для ИАВ.
2. Исследование особенностей использования ПЛИС для оптимизации схем устройств управления ИИУК.
3. Реализация ПО для многоканальных ИИУК, работающих в режиме жесткого реального времени на основе анализа математического аппарата ИАВ.
4. Исследование и оценка цифровой реализации алгоритмов ИИУК на базе ПЛИС, на основе анализа аэродинамических уравнений в интегральном виде и формирование набора типовых операций для разрабатываемого алгоритма, реализуемого на ПЛИС.
5. Экспериментальная оценка характеристик реализованных аппаратной и программной частей ИИУК по разработанной методике.

Для решения поставленных задач используются методы цифровой обработки сигналов в режиме реального времени, в том числе метод перехода из аналоговой формы описания математического аппарата в цифровую, современные информационные технологии, ориентированные на параллельные вычисления.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Предложена современная архитектура ИИУК для разработки ИАВ с учетом сформулированных технических требований к быстродействию и точности, на базе технологий цифровой обработки сигналов в режиме реального времени с применением методов, построенных на применении параллельной архитектуры вычислений.
2. Проведено преобразование аэродинамических соотношений ИАВ из аналоговой формы в цифровую, с описанием в числах с фиксированной запятой, для реализации на ПЛИС.
3. Представлена методика разработки программного обеспечения ИИУК, реализуемого на структуре “АЦП-ПЛИС-ЦАП”, для оптимизации затрачиваемых ресурсов и времени исполнения кода.
4. Разработано ПО, реализующее решение аэродинамических уравнений метода ЭММ с учетом предложенной методики реализации программного обеспечения.
5. Разработан ИИУК с характеристиками, соответствующими современным техническим требованиям по быстродействию, многоканальности и параллельному исполнению кода, реализуемого в архитектуре “АЦП-ПЛИС-ЦАП”.

Значение результатов этой работы для практического применения заключается в том, что модернизированная архитектура ИИУК и методика позволяют разрабатывать различные измерительно-управляющие комплексы для решения задач динамической аэроупругости, с высоким требованием к быстродействию, точности и многоканальности. Представленная методика реализации ПО для ПЛИС позволяет эффективным образом реализовать алгоритм, с учетом задействованных ресурсов ПЛИС и быстродействия.

Этот метод занимает промежуточное положение между полностью экспериментальными и полностью аналитическими методами. Фактически испытывается упругая конструкция – натурный ЛА или его ДПМ. В то же время аэродинамические силы являются искусственными и должны вычисляться для всех “полетных” условий, возбуждающие силы должны распределяться между возбудителями и воспроизводиться специальным электронным блоком. В качестве последнего многие годы использовалась аналоговая вычислительная техника. Установка для испыта-

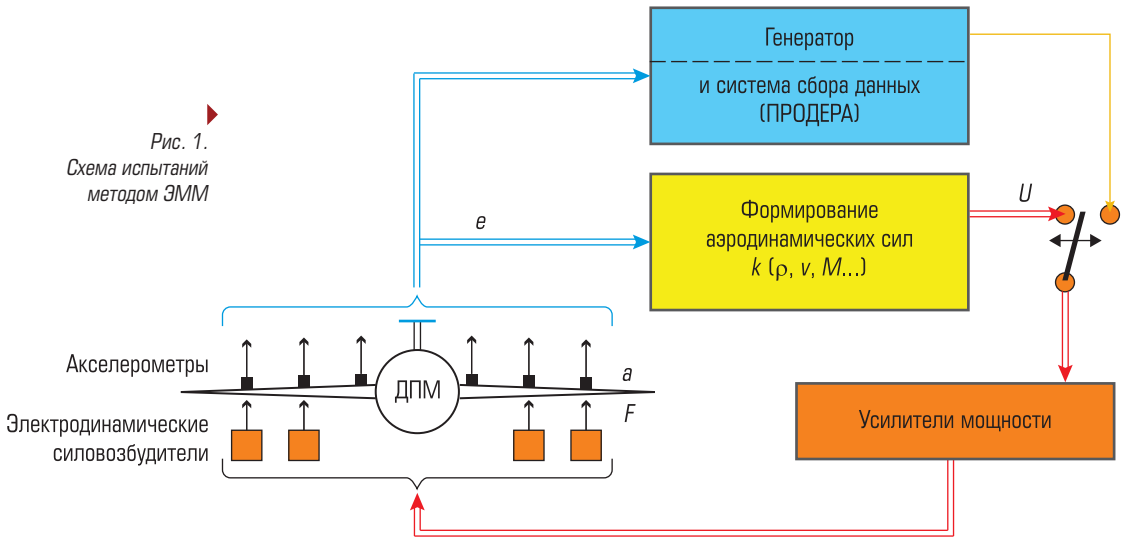

Рис. 1. Схема испытаний методом ЭММ

ний и основная часть оборудования являются таким же, как в стандартных наземных резонансных испытаниях.

Преимущество такого подхода очевидно – испытывается конструкция (и система управления) со всеми присущими ей особенностями, включая нелинейности, и не требуется разрабатывать математическую модель ЛА, которая неизбежно содержит определенные упрощения. Главный недостаток также очевиден – искусственные аэродинамические нагрузки не могут быть более точными, чем применяемые аэродинамические теории, как и в расчете. Количество силовозбудителей также всегда ограничено. Блок-схема такого эксперимента выглядит, как и для типовых испытаний с многоточечным возбуждением, однако здесь вместо генератора сигналов используются и преобразуются сигналы датчиков. Схема эксперимента с ЭММ (рис. 1) выглядит также, как для типовых резонансных испытаний с многоточечным возбуждением, однако в данном случае для возбуждения колебаний конструкции используются сигналы датчиков, преобразованные вычислительным блоком.

На рис. 1 приведены следующие обозначения: a – ускорения точек конструкции, F – усилия электродинамических силовозбудителей, e – электрические сигналы датчиков ускорения, U – электрический сигнал на выходе из имитатора аэродинамических воздействий.

ИАВ обеспечивает непрерывное формирование из комбинации входных сигналов акселерометров ряда выходных напряжений, пропорциональных сосредоточенным аэродинамическим силам на несущую поверхность летательного аппарата (ЛА), к которым сводятся воздействия со стороны потока воздуха. В таком случае преобразование сигналов реализуется в соответствии с аэродинамической теорией, определяющей зависимость каждой силы от мгновенных величин виброскорости и виброперемещения отдельных точек ЛА [5].

Реализация законов управления осуществляетя изменением коэффициентов преобразования в соответствии с заданным режимом управления величинами общих (основных) относительных коэффициентов: скорости набегающего потока v; плотности ρ; числа Струхаля Sh и числа Маха M, либо их комбинации.

Типовые режимы управления могут быть следующими:

1. Изменение одного из коэффициентов при постоянных остальных.
2. Парное – одновременное изменение двух коэффициентов при постоянных остальных.
3. Одновременное изменение трех или четырех коэффициентов.

Все соотношения между коэффициентами при их изменении выбираются и задаются по результатам предварительных расчетов.

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

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

где M, H и G – матрицы инерции, демпфирования и жесткости соответственно, t – текущий

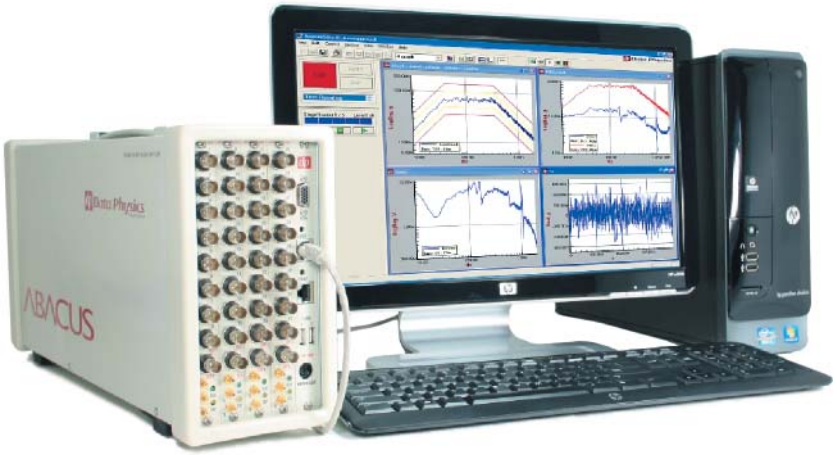

Рис. 2. Внешний вид системы ABACUS

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 [3, 6]:

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

где f – вектор сил возбуждения.

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

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

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:

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

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

Данный метод оказался эффективным в ряде задач динамической аэроупругости, в том числе в случае, когда адекватная математическая модель конструкции (линейная или нелинейная, с САУ и без нее) отсутствует, неполна или ненадежна, и при условии, когда обычный эксперимент опасен или очень дорог. В настоящее время метод ЭММ наиболее доступен для относительно сложных динамических задач, требующих моделирования в наземных условиях, в том числе и в модальных испытаниях [7, 8].

Для исследования динамических процессов при решении задач динамической аэроупругости, к системам измерения и управления предъявляются серьезные требования по числу измерительных и управляющих каналов, а также быстродействию и точности.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ИНФОРМАЦИОННЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИНАМИЧЕСКОЙ АЭРОУПРУГОСТИ

Для решения задач проведения модальных испытаний с многоточечным возбуждением, компанией Data Physics предлагается система ABACUS и построенная на нем система SignalStar Matrix.

ABACUS (рис. 2) представляет собой расширяемую высокопроизводительную систему, выполненную в виде шасси со вставленными модулями, предназначенную для анализа сигналов. Расширение системы происходит установкой дополнительных шасси, связывающихся между собой посредством кабеля Ethernet.

Каждый модуль системы ABACUS имеет встроенный DSP-процессор, а каждый канал имеет собственный АЦП (рис. 3).

В таблице 1 приведены основные технические характеристики системы ABACUS.

Система SignalStar Matrix представляет собой связку систем ABACUS, работающих вместе по сети Ethernet (рис. 4). Таким образом, можно расширить у готовой системы число каналов измерения (до 1024) и управления (до 16).

Программное обеспечение, поставляемое с SignalStar Matrix позволяет осуществлять анализ сигналов и управление вибростендами, однако, нет решений ИИУК для ИАВ в составе ЭММ ЛА [9].

Испытания в области динамической аэроупругости активно проводит ЦАГИ. Так, в качестве стендового оборудования используется управляющий и измерительно-вычислительный комплекс частотных испытаний (УИВК/ЧИ) конструкций ЛА. Совместно со средствами возбуждения колебаний конструкций (вибровозбудителями с усилителями мощности) и средствами измерения колебаний конструкций (например, пьезоэлектрическими акселерометрами с усилителями заряда) интегрируются в систему для наземных динамических (частотных) испытаний конструкции (СДИ).

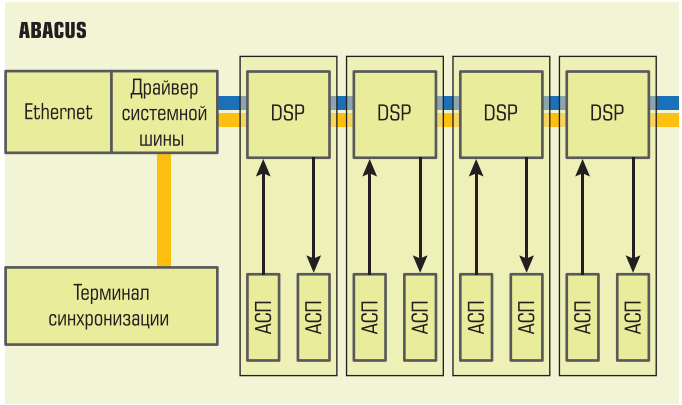

Рис. 3. Архитектура системы ABACUS

Таблица 1. Технические характеристики ABACUS

Число аналоговых измерительных каналов	от 4 до 32
Разрядность АЦП	24 бит
Тип АЦП	Дельта-сигма
Диапазон измерения	1/2/5/10В
Частота дискретизации	1...107.42 kSps (214.82 опционально)
Число аналоговых каналов управления	от 2 до 8
Разрядность ЦАП	24 бит
Диапазон изменения выходного сигнала	0.1/0.2/0.5/1/2/3/10В

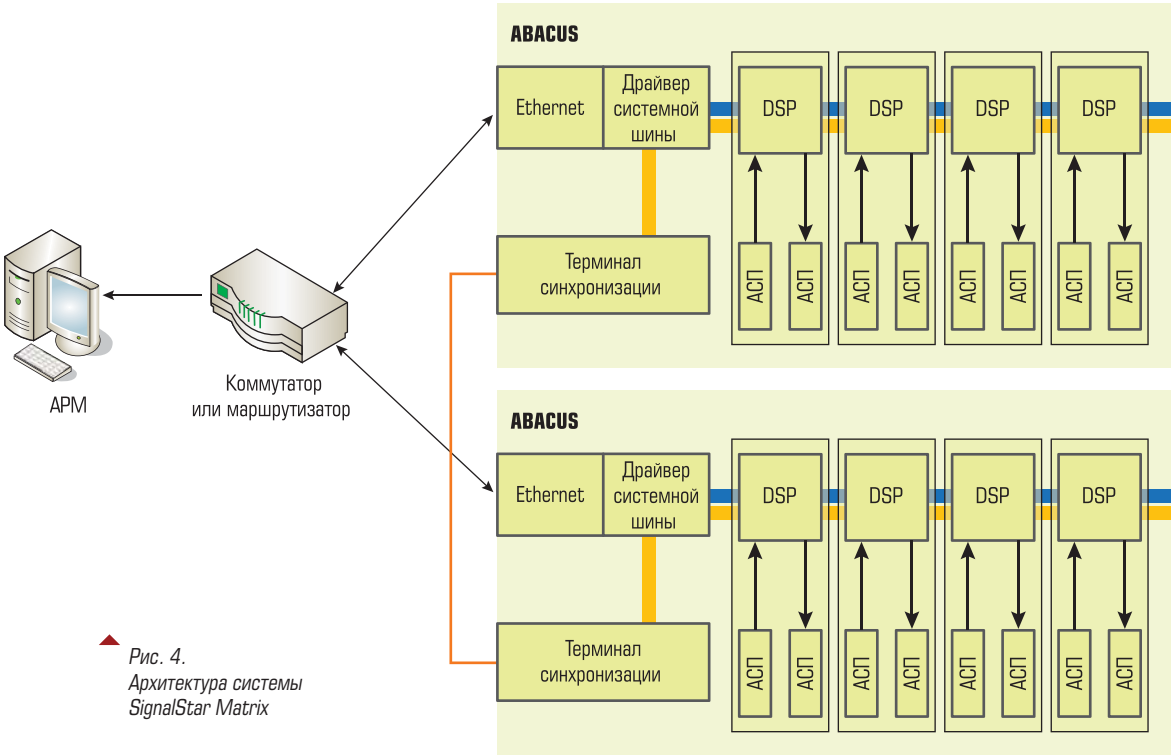

Рис. 4. Архитектура системы SignalStar Matrix

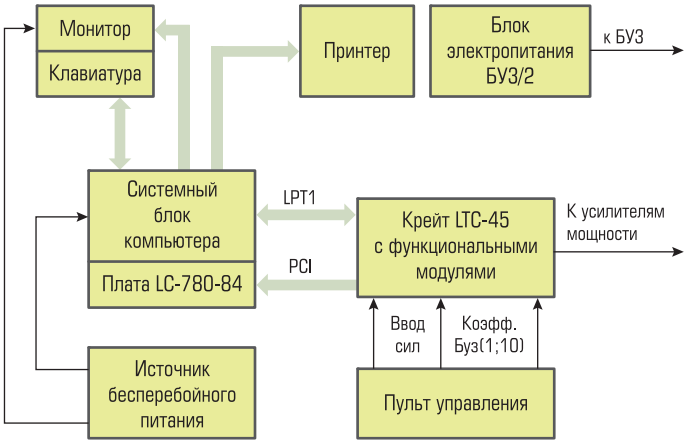

Рис. 5. Структурная блок-схема УИВК/ЧИ

С помощью системы СДИ определяются характеристики собственных колебаний конструкций летательных аппаратов (собственные частоты, формы колебаний, коэффициенты демпфирования и обобщенные массы).

УИВК/ЧИ в этих системах выполняет следующие функции:

- Обеспечивает генерирование и управление амплитудой и фазой тестовых гармонических сигналов, которые поступают на входы соответствующих усилителей мощности, управляя параметрами прикладываемых к конструкции сил.
- Обеспечивает сбор и обработку сигналов с вибропреобразователей (например, с усилителей заряда в случае использования пьезоэлектрических акселерометров).
- На этапе проведения частотных испытаний комплекс обеспечивает визуализацию временных сигналов с датчиков вибраций и фазовых соотношений между приложенными силами и откликами конструкции (например, по фигурам Лиссажу), рассчитывает различные критерии выделения собственного тона, регистрирует временные процессы, амплитудно-фазовые частотные характеристики и формы колебаний конструкции.
- На этапе постобработки выполняет модальный анализ зарегистрированных данных с целью определения искомых характеристик собственных колебаний, оценивает достоверность полученных результатов и представляет результаты в графическом и табличном видах.

Структурная блок-схема УИВК/ЧИ представлена на рис. 5. УИВК/ЧИ состоит из крейта LTC-45 с функциональными модулями, пульта управления, системного блока компьютера, монитора с клавиатурой, принтера, источника бесперебойного питания и блока электропитания блоков усилителя заряда (БУЗов).

При этом крейт, системный блок компьютера, блок электропитания и источник бесперебойного питания установлены в приборной стойке.

В состав базового комплекта УИВК/ЧИ (рис. 6) входит: крейт (блок) LTC-45 в составе следующих функциональных модулей (ЗАО “Л-Кард”): крейт-контроллер LC-014, коммутатор-усилитель LC-101 (16 шт.), АЦП/ЦАП LC-301, цифровой ввод/вывод LC-403 U, ЦАП LC-302, блок управления LC-Y, блок электропитания LTC-PW; системный блок промышленного компьютера с платой 32-х канального АЦП и 2-х канального ЦАП LC-780-84 (ЗАО “Л-Кард), установленной на шине PCI, пульт ручного управления, монитор, принтер, источник бесперебойного питания.

С помощью программируемых ЦАП формируются 2 выходных аналоговых нормированных сигнала. Один из них имеет форму синуса (sin), а другой – косинуса (cos).

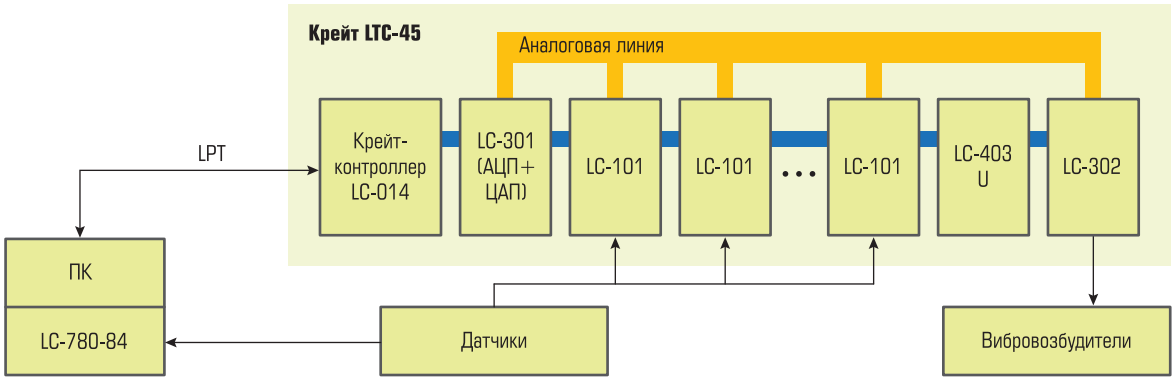

Рис. 6. Архитектура УИВК/ЧИ

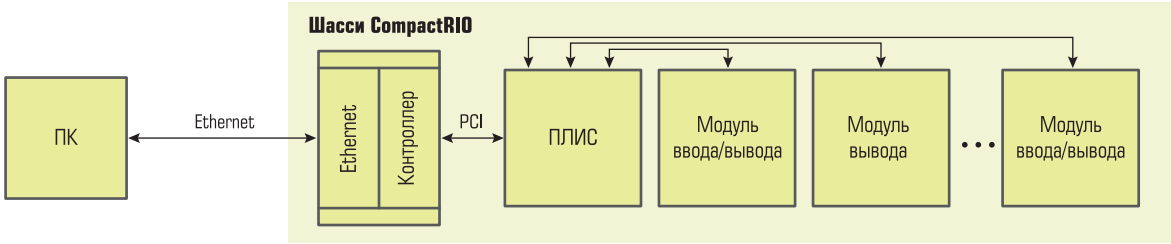

Рис. 7. Архитектура ИИУК лаборатории ЭММ МАИ

Выходные сигналы с ЦАП поступают на вход модуля управления (МУ), где суммируются. Фаза выходного сигнала МУ зависит от соотношения амплитуд сигналов sin и cos. Необходимое соотношение амплитуд задается с помощью модуля цифрового управления. Нормированный сигнал заданной фазы поступает на вход потенциометра ввода амплитуды сил – ПВС, а с выхода его подвижной "средней" точки сигнал поступает на вход модуля установки сил по каналам. Сигнал с выхода последнего подается на входы усилителей мощности, обеспечивающих питание вибровозбудителей.

Развиваемая вибровозбудителем сила пропорциональна току, протекающему через его подвижную катушку, который, в свою очередь, пропорционален сигналу управления усилителя мощности. Модуль установки амплитудных значений сил по каналам формирует сигналы управления на 8 усилителей мощности путем распараллеливания входного сигнала.

Сигналы с блоков усилителей заряда поступают на входы коммутатора. Одновременно на входы коммутаторов могут подключаться до 256-ти вибропреобразователей.

Регистрация сигналов от вибропреобразователей осуществляется по цепи: "коммутатор – модуль АЦП1 – порт LPT – память контроллера". При этом с выхода коммутатора сигналы с вибропреобразователей последовательными группами по 32 параллельных канала без промежуточной фильтрации поступают на вход многоканального АЦП1, который преобразует аналоговые сигналы в цифровые коды и загружает их в память компьютера.

Базовый комплект УИВК/ЧИ имеет следующие основные технические характеристики [10]:

Число каналов управления возбуждением колебаний 8;
Число каналов сбора данных
(параллельными группами по 32) 256;
Форма сигнала управления ..... гармоническая;
Диапазон частот сигналов управления
и сбора, Гц 0,1-1000;
Максимальные амплитуды
сигналов управления и сбора, В 5;
Приведенная погрешность задания сигнала
по амплитуде, % 0,5;
Относительная погрешность задания
сигнала по частоте 0,001;
Приведенная погрешность выделения
синфазных и квадратурных составляющих входных
сигналов,% 2;
Масса, кг ..... 45.

Кроме приведенных систем, в рамках программы развития Национального Исследовательского Университета (НИУ), создан стенд лаборатории ЭММ на каф. № 602 (рис. 7) [11].

В состав данного стенда входят:

- Средства возбуждения колебаний (8 вибровозбудителей электродинамического типа в комплекте с усилителями мощности фирмы TMS, США).
- Средства измерения колебаний – акселерометры (24 шт.) и импендансные головки (8 шт.) фирмы PCB Piezoelectronics.
- Управляющий программно-аппаратный комплекс в составе персонального компьютера, измерительно-управляющей системы реального времени CompactRIO (National Instruments, США) и стандартного программного обеспечения National Instruments.

Для управления испытаниями, реализующими режимы гармонического возбуждения испытываемой конструкции в заданном диапазоне частот, измерение и обработку сигналов датчиков, вычисление в реальном времени аэродинамических воздействий разработано программное обеспечение для системы CompactRIO.

Это позволило проводить комплексные экспериментальные исследования аэроупругой устойчивости беспилотных ЛА, включая:

- проведение резонансных испытаний (определение частотных характеристик) упругой конструкции ЛА;
- исследования флаттера ЛА;

- определение характеристик системы “руль-привод” (амплитудных и частотных характеристик, запасов устойчивости, динамической жесткости);
- определение частотных характеристик системы “упругий ЛА-САУ”;
- расчетно-экспериментальное определение запасов устойчивости контура “упругий ЛА-САУ”;
- исследование характера возможных автоколебаний (частоты, предельные циклы, уровень вибрационных перегрузок).

В ОАО ГосМКБ “Вымпел” был установлен специализированный измерительный комплекс НВ-16 (измерительная станция Н-2000), представляющий собой основанный на ПК крейт (процессор Pentium III от 1000 МГц, ОЗУ 256 Мб) с возможностью установки до 16-ти специализированных модулей.

Основные параметры управляющей части:

- число каналов возбуждения – до 8-ми, измерения – 16-32;
- частота дискретизации цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) 40 кГц (каждого канала), номинальная разрядность – 16 бит;
- диапазон частот возбуждения 2...500 Гц, при дискретности задания частоты 0,0001 Гц и стабильности 0,01 %;
- амплитуда сигналов возбуждения 0...10 В при дискретности задания 1 мВ с погрешностью программных генераторов гармонических сигналов, управляющих модулями с ЦАП. Фазовые сдвиги выходных сигналов генераторов могут составлять 0, π а также $\pm\pi/2$ относительно выбранного канала (или произвольное значение). Уровень этих сигналов устанавливается индивидуально для каждого канала по заданному амплитудному значению силы возбуждения, а также возможно одновременное изменение уровня всех каналов (“общего уровня”);
- усилители мощности – генераторы тока, преобразующие выходные напряжения ЦАП в пропорциональный им ток силовозбудителей, не зависящий от колебаний точек возбуждения и от изменения величины полного сопротивления нагрузки;
- электродинамические силовозбудители, у которых сила, приложенная к подвижной системе, пропорциональна току и не зависит от частоты и колебаний точки возбуждения в пределах рабочего перемещения. При использовании силовозбудителей с электромагнитом, как источником магнитного поля, используются соответствующие блоки подмагничивания. Для возбуждения колебаний используются отечественные (АВДИ) или импортные (Prodera) силовозбудители, при этом разной мощности: для корпуса – на 200, 500 и 1000 Н, для органов управления – на 50 и 200 Н.
- амплитуды 0,1 %;
- диапазон частот измеряемых сигналов определяется частотой аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и величиной приемлемой погрешности измерения. Частота дискретизации АЦП 20 кГц (каждого канала), номинальная разрядность АЦП – 16 бит.

Система измерения включает в себя:

- датчики – используются преимущественно пъезоакселерометры и пъезодатчики силы (или комбинированные – импедансные головки). Перспективным является использование “интеллектуальных” датчиков (TEDS, с встроенным микрочипом);
- согласующую аппаратуру – “предусилители”, а также средства фильтрации;
- программные модули: синхронного детектирования (вычисляющий в реальном времени значения амплитуд синфазного и квадратурного компонентов измеряемого сигнала для каждого канала), вычисления действующих значений, БПФ и другие.

Напряжения предусилителей поступают на входы модулей АЦП. Использование модулей с автономными АЦП в каждом канале принципиально исключает сдвиги по времени отдельных входных напряжений [12].

Список литературы

1. *Карклэ П.Г., Смыслов В.И.* Электромеханическое моделирование в задачах аэроупругости //Полет. 2008, №10, с. 25-31.
2. *Карклэ П.Г., Малютин В.А., Мамедов О.С.* и др. О современных методиках наземных испытаний самолетов в аэроупругости // Труды Центрального Аэрогидродинамического института им. проф. Н.Е. Жуковского. – Вып. 2708 – М.: ЦАГИ. 2012, 35 с.
3. *Карклэ П.Г., Пронин М.А., Смыслов В.И.* Стенд для исследований флаттера упругой демонстрационной модели при воспроизведении аэродинамических сил // Труды Центрального Аэрогидродинамического института им. проф. Н.Е. Жуковского. – Вып. 2706 – М.: ЦАГИ. 2012, с. 1-12.
4. *Смыслов В.И.* К истории модальных испытаний ЛА в ЦАГИ // Труды Центрального Аэрогидродинамического института

им. проф. Н.Е. Жуковского. – Вып. 2738 – М.: ЦАГИ. 2013, с. 245-255.

5. *Константинов А.А.* Диссертация на ученую степень к.т.н. “Исследование и разработка измерительно-информационного и управляющего комплекса для полунатурного моделирования полета летательного аппарата”. 2014. *https://www.dissercat.com/content/issledovanie-i-razrabotka-izmeritelno-informatsionnogo-i-upravlyayushchego-kompleksa-dlya-po*
6. *Карклэ П.Г., Смыслов В.И.* Электромеханическое моделирование в задачах аэроупругости // Полет. 2008, № 10, с. 25-31.
7. *Смыслов В.И.* Четырехканальное оборудование для наземных резонансных испытаний // Авиационная промышленность. 1968, № 4, с. 94-97.
8. *Смыслов В.И., Васильев К.И., Язвин В.М.* Оборудование для многоточечного возбуждения колебаний при динамических испытаниях // Приборы и системы управления. 1976, № 10.
9. *Сайт* компании Data Physics. [электронный ресурс] // URL: *www.dataphysics.com*
10. *Белоусов Л.С., Логунов Б.А., Рослов Ю.А.* Управляющий и измерительно-вычислительный комплекс для частотных испытаний конструкций // Труды Центрального Аэрогидродинамического института им. проф. Н.Е. Жуковского. - Вып. 2738 – М.: ЦАГИ. 2013, с. 317-325.
11. *Стенд* электромеханического моделирования аэродинамических сил для исследования аэроупругого поведения ЛА [электронный ресурс] // URL: *http://www.mai.ru/science/equipment/index.php?SECTION_ID=1290&ф*
12. *Быков А.В., Парафесь С.Г., Смыслов В.И.* Программно-аппаратный комплекс для проведения расчетно-экспериментальных исследований аэроупругой устойчивости летательных аппаратов // Вестник МАИ. 2009, т. 16, № 5, стр. 56-63.

Продолжение следует.

***Егоров Александр Александрович** – канд. техн. наук, профессор АВН РФ, генеральный директор ООО “АВИАТЭКС”,*
***Константинов Александр Андреевич** – канд. техн. наук, инженер, АО “ОКБ “Аэрокосмические Системы”.*