



Баженов Сергей Георгиевич,
кандидат технических наук, доцент,
– начальник отделения динамики полета
и систем управления Центрального
аэрогидродинамического Института
(ЦАГИ) имени проф. Н.Е. Жуковского,
доцент Московского физико-
технического института

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ
РЕЗЕРВИРОВАННЫХ АСИНХРОННЫХ
МНОГОТАКТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
СОВРЕМЕННЫМИ МАГИСТРАЛЬНЫМИ САМОЛЕТАМИ**

С.Г. Баженов (Московская область, Жуковский)
Тел.: 556-45-06, 8 910-478-41-36, e-mail: sergey.bazhenov@tsagi.ru

Создание гражданской авиационной техники представляет собой сложный процесс, охватывающий множество видов деятельности, включая научный поиск и разработку новых технологий, проектирование, стендовые и летные испытания, производство, сертификацию и сопровождение эксплуатации изделий авиационной техники. Этапным моментом в развитии систем управления магистральных пассажирских самолетов, как отечественных, так и зарубежных, можно считать переход на цифровые системы управления.

Переход на цифровую технику позволил реализовать очень большое количество функций управления. Среди этих функций – обеспечение заданных характеристик управляемости, автобалансировка, ограничение ряда параметров движения (угол атаки, нормальная перегрузка, приборная скорость и число Маха, углы тангажа и крена и др.), а также ряд функций, повышающих комфорт управления (парирование возмущений, вызванных отказами и изменением конфигурации, стабилизация при невмешательстве летчика в управление и др.). Реализовать такие сложные законы управления возможно только с использованием цифровых вычислителей, что порождает множество специфических задач построения цифровых систем, оценки их динамики, реализации эффективной системы контроля и обеспечения синхронной работы многомашинного комплекса.

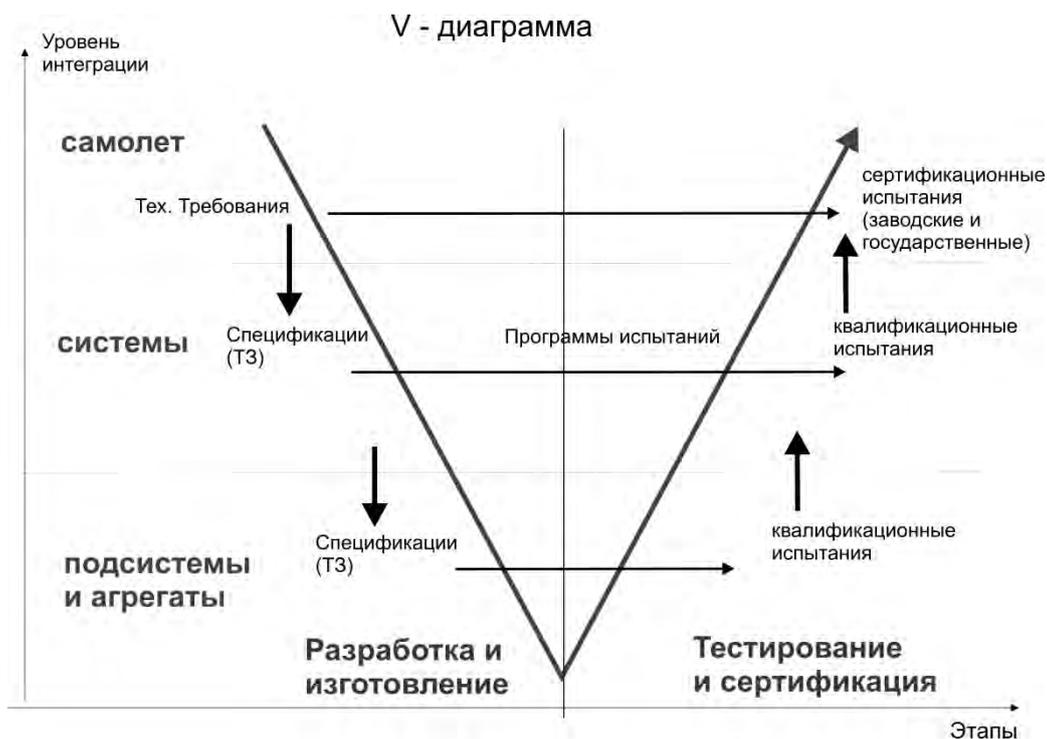


Рис. 1 - “V” – диаграмма разработки, интеграции и испытаний самолета

Одной из главных целей разработки, интеграции и испытаний системы дистанционного управления (СДУ) является демонстрация высокого уровня соответствия ее реализации требованиям технического задания и стандартам, устанавливаемых авиационными властями. Разработка, интеграция и испытания самолета разделена на разные уровни, чтобы реализовать пошаговый подход разделить весь процесс на этапы (см. рис. 1).

В результате значительных усилий многих специалистов в настоящее время созданы системы управления самолетов, которые характеризуются следующими основными чертами (см. рис. 2):

- архитектурное построение системы управления предполагает использование цифровых управляющих вычислителей с применением разнородного резервирования, цифровых информационных систем параметров движения, боковых ручек или миништурвалов в качестве рычагов управления, цифровых линий связи и электрогидравлических приводов (см. рис. 3);
- алгоритмическое обеспечение систем управления предполагает реализацию большого объема функций СДУ для обеспечения устойчивости и управляемости, предупреждения и ограничения важнейших параметров движения, повышения комфорта управления;
- самолет должен обладать отличными динамическими характеристиками, что приводит к жестким требованиям к максимальному допустимому запаздыванию в трактах управления. Это требует большой скорости передачи информации по цифровым линиям и высокой частоты обновления информации;



Рис. 2. Основные особенности современных цифровых систем управления самолетов

- в СДУ (см. рис. 3) задействовано большое количество цифровых устройств, работа которых не синхронизирована, т.е. система является асинхронной. Это приводит к дополнительным запаздываниям в трактах управления и к «разбеганию» резервированных каналов, особенно, в случае интегральных систем. Для обеспечения согласованной работы многомашинного комплекса требуются специальные средства, которые оказывают влияние на динамические характеристики системы. Расчет таких систем вызывает дополнительные сложности и требует разработки специальных методов анализа.
- частоты обновления информации датчиков, информационных систем и вычислителей СДУ, как правило, разные (см. рис. 3). С другой стороны, высокая сложность алгоритмов управления, разная значимость функций СДУ с точки зрения влияния на динамику системы «самолет – СДУ» позволяют распределить выполнение различных функций по разным шагам обновления СДУ. Последовательность выполняемых операций определяется диспетчером функций. Эти особенности архитектурного построения, а также организации вычислительного процесса делают систему управления многотактной и сильно усложняют ее анализ.

Структурное построение системы управления должно отражать требования по обеспечению надёжности функций различного уровня важности. Современная СДУ строится по иерархическому принципу и имеет трехуровневую структуру – основной, резервный и аварийный контур (см. рис. 4).

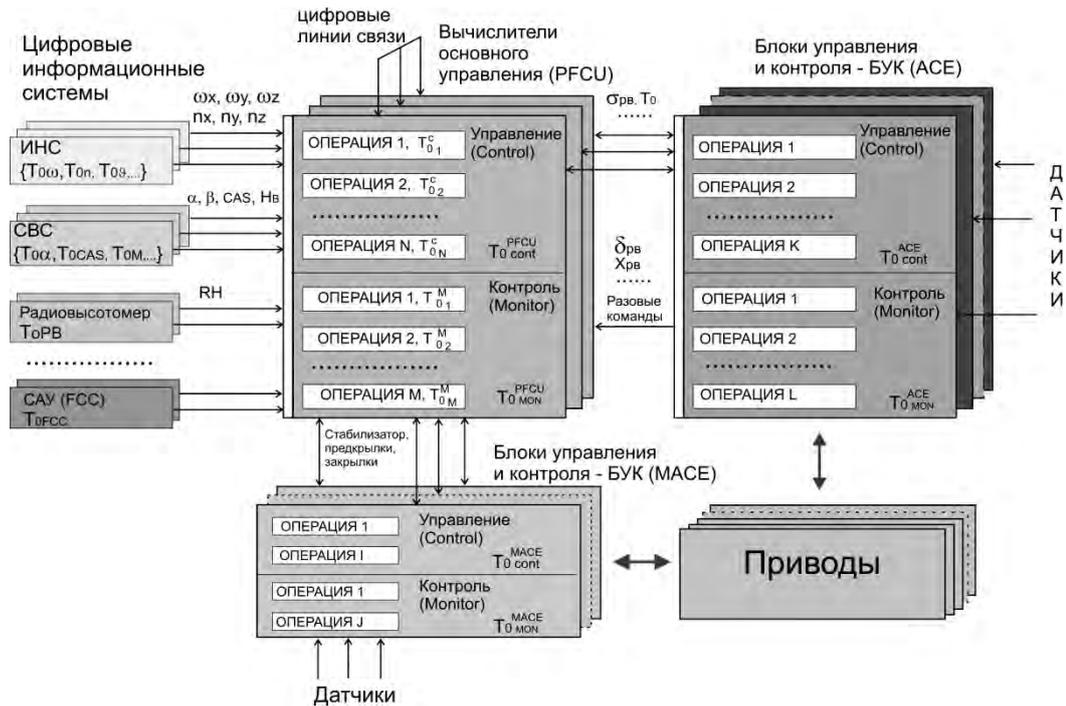


Рис. 3. Общая архитектура цифровой части системы управления

Основной цифровой дистанционный контур СДУ совместно с сопрягаемым оборудованием должен обеспечивать весь спектр функций управления (функции пилотирования с обеспечением заданных характеристик устойчивости и управляемости, функции предупреждения и ограничения, комфортные функции).

Резервный дистанционный контур (цифровой, аналоговый или аналого-цифровой) должен обеспечивать ограниченный спектр функций управления, достаточный для безопасного завершения полета.

Аварийный контур (если он необходим по условиям надёжности) должен обеспечивать минимальный уровень управляемости в случае отказа основного и резервного контуров.

В процессе создания систем управления самолетов наибольший интерес вызывает синтез алгоритмов системы управления, обеспечивающих требуемые характеристики устойчивости и управляемости. Для формирования алгоритмов управления необходимо провести большой объем исследований, в числе которых:

- оценка запасов устойчивости и характеристик управляемости;
- определение требований к трактам управления (допустимые временные запаздывания, нелинейности,...);
- определение требований к исполнительным элементам (постоянные времени, зоны нечувствительности, частотные характеристики при малых входных сигналах);
- математическое и стендовое моделирование.

Все эти оценки весьма существенно зависят от законов управления и их реализации. Как правило, алгоритмы управления синтезируются и обрабатываются в аналоговой форме. Однако для реализации в цифровой системе управления эти законы нужно перевести в дискретную форму.

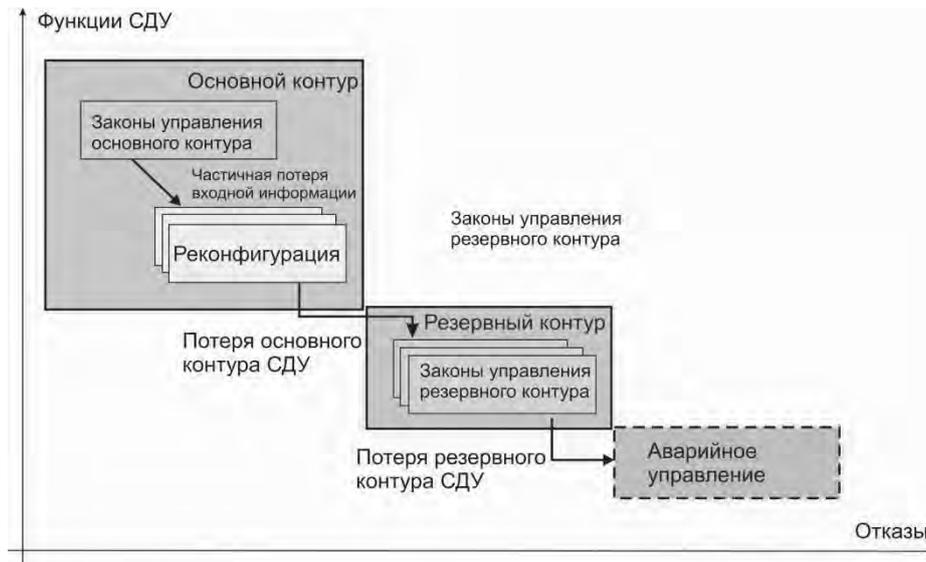


Рис. 4. Иерархическое построение системы управления самолета

Процедура перевода законов управления в дискретную форму включает следующие этапы:

1. Разработка законов управления в непрерывной форме в виде модели среды программирования Simulink;
2. Дискретизация законов управления;
3. Разработка аппаратного и программного обеспечения;
4. Тестирование элементов СДУ;
5. Интеграция, верификация и валидация СДУ. Тестирование всей СДУ.

При рассмотрении цифровых резервированных систем управления возникает ряд сложностей, нехарактерных для непрерывных систем. Так, для непрерывных систем резервирование не вносит изменений в динамику системы, т. е. многоканальная система формирует такие же управляющие сигналы, что и одноканальная. Для цифровых систем это не так в силу асинхронности каналов, поэтому, в общем случае, резервирование цифровых систем необходимо учитывать. Также, необходимо учитывать резервирование по причине широкого использования процедур выравнивания входной информации и синхронизации вычислительных процессов, протекающих в разных вычислителях.

Для расчета динамических характеристик и запасов устойчивости замкнутой системы можно воспользоваться как аналитическими методами, так и получить их напрямую - с помощью численного моделирования, что связано с большими затратами вычислительных ресурсов. Наиболее перспективным представляется путь определения характеристик аналитическим путем, а затем выборочные результаты подтверждаются путем прямого численного интегрирования. Для получения аналитических результатов необходимо создать модель самолета, учитывающую особенности цифровой реализации СДУ (см. рис. 5-6).

Для этого было использовано разработанное программное обеспечение, предназначенное для анализа динамики самолетов с цифровыми системами управления (система "DASIS" - Digital Asynchronous Systems Investigation Software), разработанное в отделении систем управления и динамики полета ЦАГИ. Система разработана в среде MatLab. Целью системы DASIS является исследование современных цифровых систем управления в частотной области.

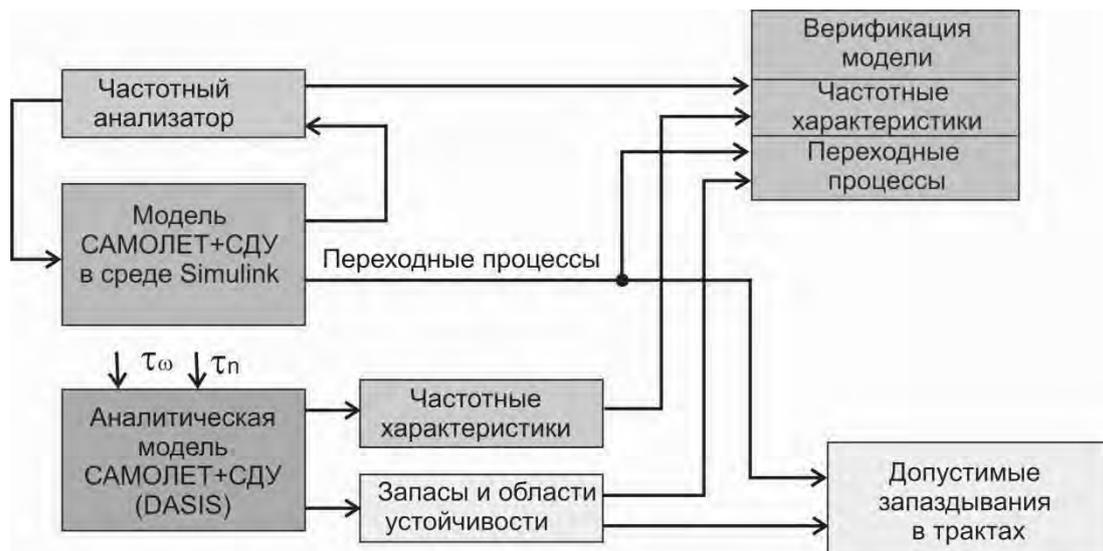


Рис. 5. Создание аналитической модели в аналоговом виде, ее верификация и определение максимальных допустимых запаздываний в трактах управления

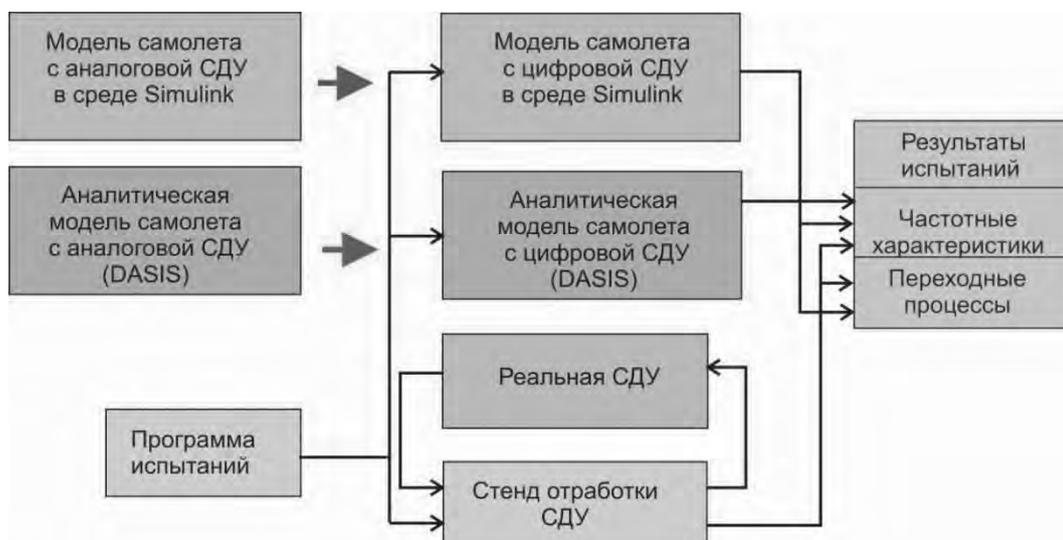


Рис. 6. Создание аналитической модели в цифровом виде, ее верификация и использование для тестирования реальной СДУ

Программа позволяет учитывать такие особенности построения и функционирования систем управления как:

- резервирование;
- асинхронную работу цифровых управляющих компьютеров;
- многотактность, т.е. использование различных частот обновления информации и выполнения операций;
- реализацию произвольной циклограммы работы вычислителей;
- использование межканальных линий связи для передачи информации для ее последующего контроля и выравнивания.

Теоретические основы, заложенные в программное обеспечение основываются на методах частотного анализа. Система позволяет:

- анализировать традиционные аналоговые и сложные цифровые системы в частотной области;
- преобразовывать цифровую резервированную асинхронную многотактную

- систему в синхронную одноканальную;
- вычислять все необходимые передаточные функции и частотные характеристики замкнутой и разомкнутой систем как в аналоговом, так и в цифровом виде;
- определять запасы устойчивости и области устойчивости;
- анализировать спектры сигналов.

Для подтверждения правильности результатов, полученных с помощью этой программы, были проведены расчеты частотных характеристик аналитической модели системы управления самолета и частотных характеристик на основе полной модели самолета с цифровой системой управления, созданной в среде Simulink с помощью частотного анализатора.

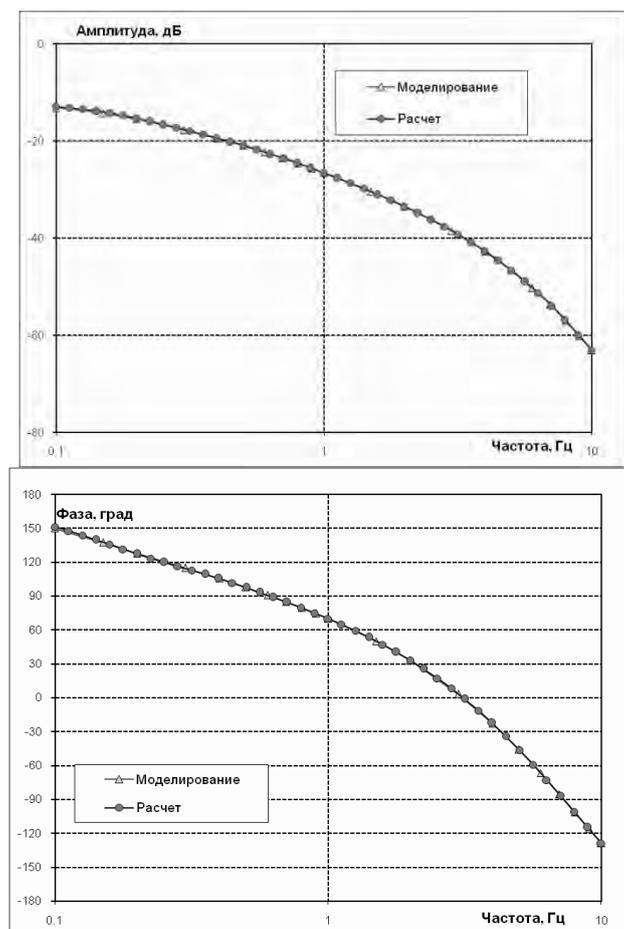
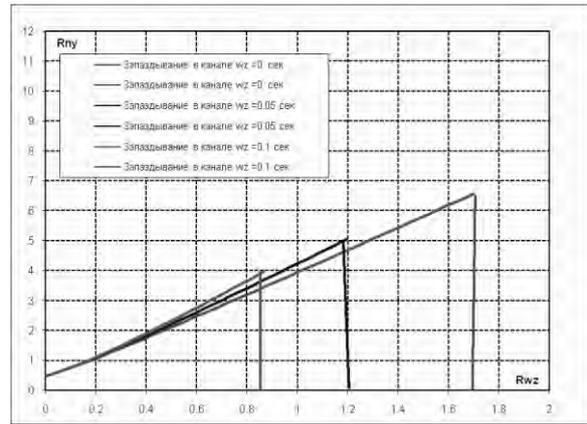
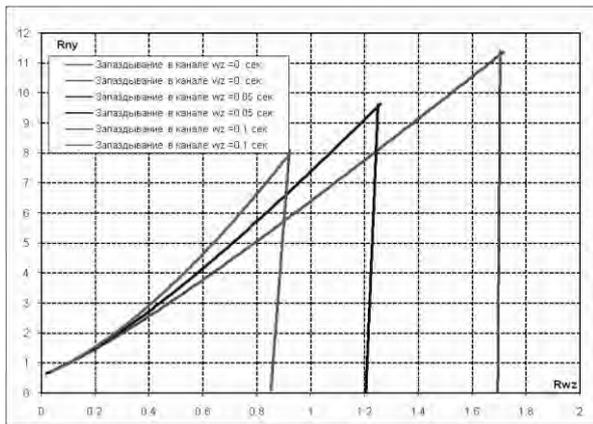


Рис. 7 - Верификация расчетной модели. Частотная характеристика разомкнутой системы. Размыкание по элеронам. Контур руля направления замкнут. Режим $M_{MO}-V_{MO}$

Сравнение этих частотных характеристик приведено на рисунке 7. Видно, что совпадение аналитических частотных характеристик аналоговой модели СДУ и характеристик, полученных с помощью стандартного частотного анализатора, очень хорошее, что говорит о корректности аналитической модели СДУ.



а) Запозывание $\tau_{ny} = 0.0$ сек.

б) $\tau_{ny} = 0.2$ сек.

Рис. 8 - Области устойчивости. Статический запас устойчивости $m_z^{Cy} = -0.15$.
Режим $V_{MO} - M_{MO}$

Данный подход используется и при расчетах областей устойчивости. На рис. 8 приведены области устойчивости замкнутой системы «самолет – СДУ» в координатах коэффициентов усиления по нормальной перегрузке и угловой скорости тангажа при различных запаздываниях в этих трактах. Запозывание в тракте угловой скорости тангажа $\tau = 0.1$ сек. является недопустимым, поскольку приводит к потере устойчивости (см. рис. 8). Весьма интересен вопрос о форме областей устойчивости. На всех рисунках видно пересечение низкочастотной и высокочастотной границ устойчивости, а точке пересечения соответствует две частоты потери устойчивости. Результаты численного моделирования движения самолета с СДУ с коэффициентами усиления, соответствующими угловой точке пересечения свидетельствуют о наличии незатухающих колебаний с примерно постоянным уровнем колебаний, в которых наблюдаются две гармоника (см. рис. 9).

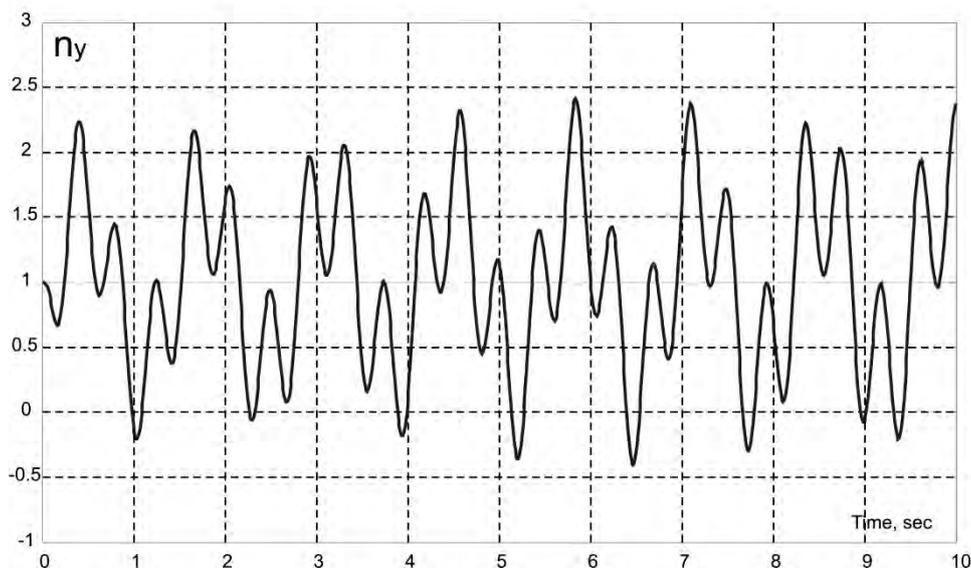


Рис. 9 - Бигармонический характер потери устойчивости, соответствующий угловой точке области устойчивости

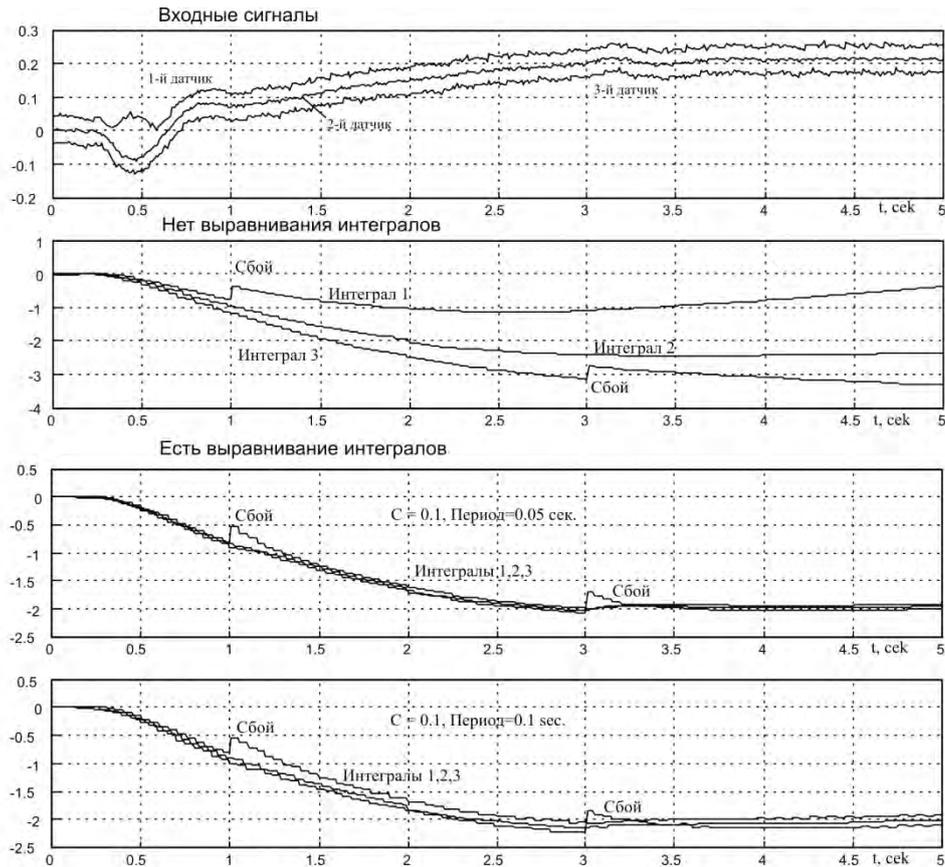


Рис. 10 - Расхождение интегралов при наличии постоянных смещений и случайных составляющих во входном сигнале и при наличии сбоев интегралов

Как уже отмечалось выше, расчет динамических характеристик резервированных асинхронных многотактных цифровых систем с выравниванием информации между каналами является весьма сложной задачей, а результаты, зачастую, являются неожиданными. Для цифровых асинхронных систем управления весьма актуальна проблема т. н. «разбегания» интегралов разных каналов (см. рис. 10), вследствие асинхронности, наличия постоянных смещений и случайных составляющих в сигналах датчиков разных каналов и сбоев интегралов, т. е. изменений их значений вследствие возмущений разной природы.

Для обеспечения идентичности исходных данных и вычислительных процессов в разных каналах между ними предусмотрены обмен информацией и выравнивание сигналов. В общем виде выходной сигнал процедуры выравнивания в каждом компьютере есть сумма «собственного» сигнала с весом $1 - c$ и «чужого» сигнала, полученного от соседнего вычислителя, с весом c . Процедура выравнивания интегралов описывается уравнениями:

$$u_1(nT_0) = (1 - c) \cdot [u_1(nT_0 - T_0) + T_0 \cdot X(nT_0 - T_0)] + cu_2(nT_0 - T_0 + \tau - n_2T_0),$$

$$u_2(nT_0 + \tau) = (1 - c) \cdot [u_2(nT_0 + \tau - T_0) + T_0 \cdot X(nT_0 + \tau - T_0)] + cu_1(nT_0 - n_1T_0).$$

Преобразуя систему в операторную форму, можно получить упрощенное выражение для эквивалентной передаточной функции системы:

$$W \cong \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{c \cdot (n_1 + n_2 + 1)}{2 \cdot (1 - c)}}$$

т. е. выравнивание приводит к изменению коэффициента при интеграле, независимо от периода обновления информации (см. рис. 11).

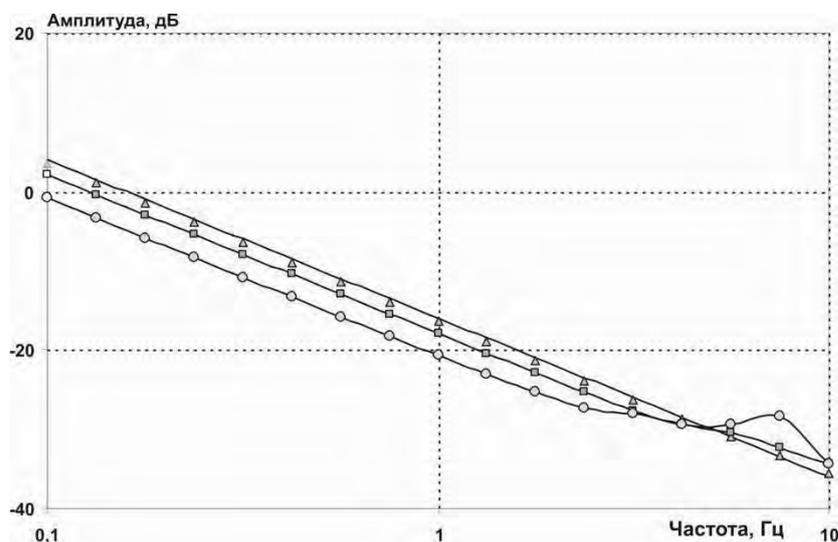


Рис. 11 - Частотные характеристики двухканальной системы с интегралами при наличии и отсутствии выравнивания интегралов:
 — нет выравнивания; Δ - $c = 0,1, n = 0$; \square - $c = 0,5, n = 0$; \circ - $c = 0,5, n = 1$

Данные необходимо учитывать при расчете эталонных частотных характеристик сложных цифровых систем, которые затем используются при экспериментальной отработке СДУ. На рис. 12 приведены экспериментальные и теоретические частотные характеристики реальной трехканальной цифровой асинхронной системы управления. Видно, что различие между характеристиками достаточно мало, что говорит о корректной реализации законов управления.

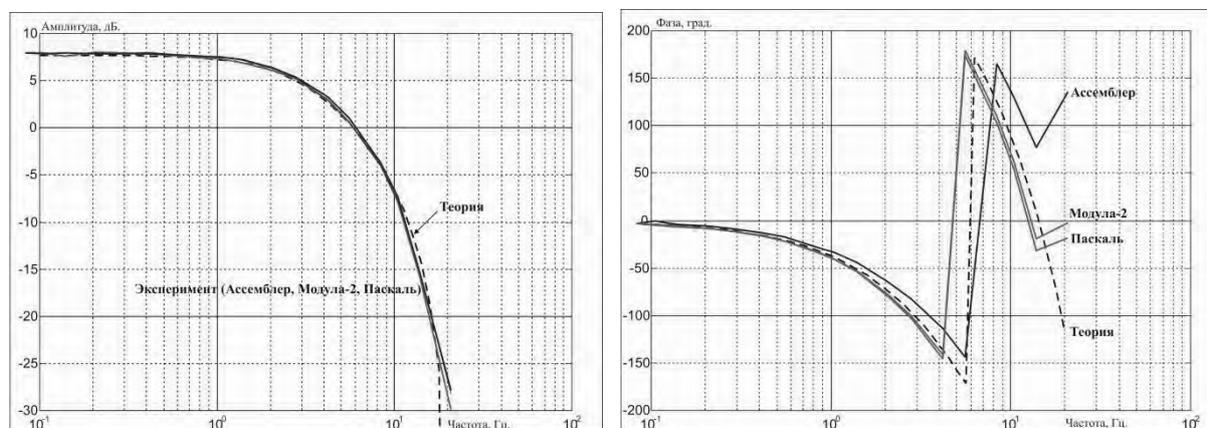


Рис. 12 - Теоретические и экспериментальные частотные характеристики трехканальной цифровой системы управления.

Выводы

Разработан подход к анализу, моделированию и тестированию цифровых, резервированных, асинхронных, многотактных цифровых систем управления высокоавтоматизированных самолетов. Подход основан на использовании аналитических моделей систем управления самолетов и моделей в среде MatLab/Simulink. Дискретные аналитические модели учитывают цифровую реализацию системы управления (дискретность, асинхронность и многотактность информационно-вычислительной части, запаздывания при обработке информации и передаче ее по цифровым линиям связи). Верификация аналитической модели производится с помощью полной модели в среде Matlab/Simulink. С помощью этих моделей проводится расчет областей устойчивости, оценка допустимых запаздываний в основных трактах управления, расчет эталонных частотных характеристик, необходимых для частотного анализа реальной системы управления на этапе квалификационных испытаний.

Литература

1. Алешин Б.С., Баженов С.Г., Диденко Ю.И., Шелюхин Ю.Ф. Системы дистанционного управления магистральных самолетов. М.: Издательство «Наука», 2013.
2. Баженов С.Г., Шелюхин Ю.Ф. Анализ изменения динамических свойств самолета при согласовании информации между резервированными каналами цифровой системы управления. Ученые Записки ЦАГИ, 2013. Т. XLIV, № 1, стр. 94-106.
3. Баженов С.Г. Некоторые особенности динамики многотактной цифровой системы управления, Ученые Записки ЦАГИ, 2010. Т. XLI, № 5, с. 56-65.
4. Баженов С.Г. К расчету устойчивости самолета в боковом канале с цифровой многотактной системой управления, Ученые Записки ЦАГИ, 2011. Т. XLII, № 2 с. 80-89.