

## ОТЗЫВ

научного консультанта К.И.Сыпало на диссертационную работу  
Баженова Сергея Георгиевича на тему «Динамика цифровых  
резервированных асинхронных многотактных систем управления  
магистральных самолетов», представленной к защите на соискание ученой  
степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика,  
баллистика и управление движением летательных аппаратов  
(Авиационная и ракетно-космическая техника)».

С.Г.Баженов окончил Московский физико-технический институт в 1984 г. по специальности «Динамика полета и управление». В течение ряда лет он занимался проблемами динамики полета и управления самолетов, а точнее проблемами построения и динамики цифровых систем управления. Кандидатскую диссертацию защитил в 1992 г. по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов». С начала 1980-х гг. еще будучи студентом, он включился в теоретическое исследование и практическое решение проблем создания цифровых систем управления для отечественных авиалайнеров нового поколения Ту-204 и Ил-96-300. Переход на системы дистанционного управления (СДУ) являлся этапным моментом в развитии систем управления магистральных самолетов, как отечественных, так и зарубежных. Механическое управление сохранялось в самом простейшем виде как аварийное на случай полного отказа дистанционного управления. По этому принципу построена система управления дальних магистральных самолетов, таких как А340, Boeing777, а также отечественного среднемагистрального самолета Ту-204. Применение цифровой техники для систем управления позволило не только добиться беспрецедентного увеличения набора функций, выполняемых системой управления, но и привело к новым вызовам и проблемам, решение которых потребовало больших усилий коллективов КБ – непосредственных разработчиков новых типов самолетов, но и сотрудников научных институтов, задействованных в разработке Ил-96-300 и Ту-204. В процессе создания автоматизированной системы штурвального управления Ту-204 (АСШУ – 204) был создан научно-технический фундамент, который затем успешно применялся при разработке самолетов Ту-334, Сухой Суперджет 100 и МС-21. Именно на самолете Ту-204 впервые были применены интегральные законы управления, которые позволили реализовать такие функции как автобалансировка, обеспечение заданных характеристик управляемости, жесткое ограничение параметров движения, совмещенное управление, которые являются визитной карточкой этого и более современных авиалайнеров.

Следующим этапом явился переход на полное дистанционное управление без механического резерва. Так построены системы управления дальнего магистрального самолета А380 и такой же принцип реализован на отечественных самолетах Сухой Суперджет 100 и МС-21. Это стало

возможным благодаря заметному повышению надежности бортовой вычислительной техники.

В процессе разработки пришлось решать множество задач, как традиционных, связанных с оценкой запасов устойчивости и характеристик управляемости, так и новых обусловленных дискретностью по времени цифровых систем, различием циклограмм работы резервированных каналов, т.е. асинхронностью, использованием различных частот обновления информации, использованием целочисленной арифметики для выполнения расчетов управляющих сигналов, необходимостью выравнивания как непрерывных так и дискретных сигналов, чтобы избежать ложных срабатываний системы контроля и т.д. Эти проблемы и пути их решения нашли отражение в диссертационной работе Баженова С.Г.

Большое внимание в диссертации уделено обеспечению функционирования СДУ как многомашинного комплекса. Для достижения необходимого уровня надежности используется резервирование каналов СДУ. В результате обновления информации в разные моменты времени, использования разных источников информации и т.д. исходная информация в цифровых каналах СДУ слегка отличается. Вследствие использования интегральных звеньев и сложных логических элементов релейно-гистерезисного типа, даже небольшое различие в исходной информации приводит к значительному отличию вычислительных процессов, что недопустимо. В диссертации Баженова С.Г. предложены специальные меры по обеспечению идентичности состояний и вычислительных процессов в разных каналах резервированной СДУ. В свою очередь, применение таких средств синхронизации состояний и выравнивания сигналов приводит к искажению динамических характеристик СДУ. Баженовым С.Г. оценена степень этого искажения и подтверждена приемлемость получившихся в результате динамических характеристик.

Самолет должен обладать отличными динамическими характеристиками, что приводит к высоким требованиям к быстродействию системы дистанционного управления. Это, в свою очередь, требует большой скорости передачи информации по цифровым линиям и высокой частоты обновления информации как цифровых датчиков и информационных систем, так и самих вычислителей СДУ. Частоты обновления информации датчиков, информационных систем и вычислителей СДУ, как правило, разные. 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 приема данных и вычислительного процесса делают систему управления многотактной и значительно усложняют ее анализ. Ряд вопросов анализа динамических характеристик многотактных цифровых систем дистанционного управления также рассмотрен в диссертационной работе Баженова С.Г.

В частности, в процессе своей деятельности, связанной с созданием электродистанционных цифровых систем управления магистральных самолетов Баженовым С.Г. была разработана методика исследования устойчивости и динамики цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления высокоавтоматизированных самолетов. Методика базируется на частотных методах анализа и учитывает основные особенности построения и функционирования сложных цифровых систем управления современных самолетов, такие как резервирование, асинхронность, многотактность, выравнивание информации между каналами, наличие временных запаздываний при передаче информации по цифровым линиям связи, при выполнении операций и вследствие асинхронной работы элементов системы. Также Баженовым С.Г. разработано программное обеспечение для анализа сложных цифровых систем управления самолетов, позволяющее оценивать запасы устойчивости, рассчитывать динамические характеристики с учетом вышеупомянутых особенностей построения и функционирования цифровых систем управления самолетов.

Баженовым С.Г. проведен анализ влияния выравнивания информации на динамические характеристики цифровой резервированной системы управления. Показано, что доминирующим влиянием выравнивания является:

- появление дополнительного запаздывания;
- изменение коэффициента при интеграле;
- изменение постоянной времени фильтра;
- изменение структуры динамических звеньев.

Баженов С.Г. разработал подход к анализу устойчивости резервированных цифровых асинхронных систем управления на основе методов теории многосвязных систем. Показано, что передаточная функция, определяющая устойчивость замкнутой системы является нелинейной функцией коэффициентов усиления. Установлено, что частотная характеристика линейной части передаточной функции, определяющей устойчивость замкнутой системы, и частотная характеристика разомкнутой системы совпадают. Предложен метод структурной декомпозиции многосвязных систем для анализа многоконтурных систем управления самолета в боковом канале.

Баженовым С.Г. предложен подход к тестированию цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления с помощью программно-аналитических моделей систем дистанционного управления самолетов. Дискретная модель учитывает цифровую реализацию системы дистанционного управления (дискретность, асинхронность и многотактность информационно-вычислительной части, запаздывания при обработке информации и передаче ее по цифровым линиям связи). С помощью этой модели проводится расчет эталонных частотных характеристик, необходимых для частотного анализа реальной системы управления на этапе квалификационных испытаний.

Баженовым С.Г. проведен синтез алгоритмов выравнивания интегралов для системы управления современного самолета транспортной категории и

выбор их параметров. Оценено влияние выравнивания на динамику системы и на рассогласование между сигналами разных каналов. На основе теории конечных автоматов синтезированы алгоритмы синхронизации логических элементов разных каналов системы управления и проведен анализ эффективности работы данных алгоритмов при различных сценариях.

Баженовым С.Г. разработана методика предварительного выбора порогов срабатывания алгоритмов контроля сигналов СДУ современного магистрального самолета. Методика базируется на требованиях к вероятности ложного срабатывания системы контроля и данных стендовых и летных испытаний системы управления.

Баженовым С.Г. проведено исследование особенностей устойчивости и динамических характеристик магистральных высокоавтоматизированных самолетов с цифровой резервированной асинхронной многотактной СДУ с законами управления, реализующими современный набор функций системы управления. Определены максимальные допустимые временные запаздывания в сигналах, используемых при расчете управляющих сигналов СДУ современных магистральных самолетов. Показано, что важную роль для выбора допустимого запаздывания сигналов играет возможность построения эффективной системы контроля.

Разработанные Баженовым С.Г. методы использовались при оценке особенностей динамики и формировании рекомендаций для построения цифровых систем управления самолетов Ту-204, Ту-334, Сухой Суперджет 100, МС-21.

Баженов С.Г. занимается преподавательской деятельностью на кафедре механики полета МФТИ, где он читает общефакультетский курс лекций «Динамика полета». Под его руководством ряд студентов МФТИ и МАИ успешно защитили дипломные работы.

Дальнейшее развитие направления исследований, которым посвящена диссертационная работа Баженова С.Г. представляется весьма актуальной и перспективной вследствие дальнейшего наращивания функций цифровых СДУ, их внедрением на летательные аппараты перспективных компоновок, использованием элементов искусственного интеллекта для управления и мониторинга работы системы.

Результаты, полученные Баженовым С.Г. в ходе выполнения диссертационной работы с достаточной полнотой описаны представлены в монографии, в 20 публикациях в рецензируемых журналах и сборниках научных трудов, а также в сборниках тезисов конференций. Из них 12 статей в журналах из перечня ВАК РФ. Общий объем публикаций Баженова С.Г. составляет 66 работ, включая три монографии. Полученные результаты обсуждались на 2-х международных и ряде всероссийских и отраслевых конференций. Полученные результаты используются в учебном процессе в МФТИ, где Баженовым С.Г. подготовлен и в течение 12 лет читается курс лекций по динамике полета и системам управления для студентов кафедры физики полета факультета аэромеханики и летательной техники (ФАЛТ).

В целом диссертационная работа представляет собой теоретическое обоснование и решение актуальной комплексной научно-технической проблемы динамического проектирования цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов, вносящее ценный вклад в развитие теории сложных интегрированных цифровых систем управления самолетов, выполненное на высоком научном уровне, содержащее новые теоретические и практические результаты и полностью соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов».

Считаю, что автор работы – Сергей Георгиевич Баженов продемонстрировал способность самостоятельно ставить и решать комплексные научно-технические проблемы, и заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов (Авиационная и ракетно-космическая техника)».

Научный консультант  
доктор технических наук,  
профессор РАН, доцент  
член-корреспондент РАН

К.И. Сыпало

Подпись К.И. Сыпало удостоверяю



А.С. Никифоров

Начальник отдела кадров  
ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е.Жуковского»