

УДК 629.053

КОМПЛЕКСНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ САМОЛЕТОВ. СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

С.Г. Баженов

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского (ФАУ «ЦАГИ»)
Россия, 140180, Московская область, Жуковский, ул. Жуковского 1
E-mail: sergey.bazhenov@tsagi.ru

Ю.И. Диденко

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского (ФАУ «ЦАГИ»)
Россия, 140180, Московская область, Жуковский, ул. Жуковского 1
E-mail: yuriy.didenko@tsagi.ru

Р.И. Терехов

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского (ФАУ «ЦАГИ»)
Россия, 140180, Московская область, Жуковский, ул. Жуковского 1
E-mail: roman.terekhov@tsagi.ru

Ю.Ф. Шелюхин

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского (ФАУ «ЦАГИ»)
Россия, 140180, Московская область, Жуковский, ул. Жуковского 1
E-mail: yury.shelukhin@gmail.com

Ключевые слова: самолет, цифровая система дистанционного управления, комплексная система управления, управляемость, интегральный закон управления, ограничители параметров движения, нечеткая логика, конечные автоматы, многомерное управление.

Аннотация: Выполнен обзор архитектурных построения, функционального наполнения и алгоритмического обеспечения современных пассажирских самолетов, оборудованных цифровыми комплексными системами управления (КСУ). КСУ имеет иерархическое архитектурное построение, включающее основной, резервный и аварийный контуры с развитой системой реконфигурации управления при отказах, цифровые вычислители имеют разнородное резервирование аппаратуры и программного обеспечения. Интегральные законы управления обеспечивают заданные характеристики управляемости, ограничение параметров движения, автобалансировку, повышение комфортности управления. В качестве перспективных направлений совершенствования КСУ представляется дальнейшая интеграция штурвального и автоматического управления, реализация совмещенного управления как продолжения действий летчика, интеллектуализация управления и человеко-машинного интерфейса, реализация многомерного управления для обеспечения оптимальной конфигурации рулей при инвариантности законов управления.

1. Введение

Все современные магистральные самолеты, начиная с А-320, Ту-204 и Ил-96-300, оборудованы цифровыми системами дистанционного управления (ЦСДУ) [1-5]. На ранних этапах внедрения ЦСДУ на самолетах оставалась механическая аварийная

система, обеспечивающая минимальный уровень управляемости. Массовая эксплуатация цифровых СДУ самолетов показала их высокую надежность, что сделало возможным переход на чисто дистанционные цифровые системы без механического аварийного контура.

В отечественной практике первым самолетом с цифровой СДУ без механического резерва стал региональный SSJ-100, начавший летные испытания в 2008 году. Эту линию продолжает пассажирский самолет MC-21, проходящий летные испытания.

За время с начала внедрения ЦСДУ на самолетах гражданской авиации ее структура и функциональная нагрузка постоянно совершенствовались. Параллельно шла работа по формированию нормативных документов, регулирующих создание ЦСДУ [6-11].

2. Законы управления ЦСДУ

Особое место в создании ЦСДУ занимает концептуальное построение штурвального управления. Если раньше широко использовался принцип пропорционального управления «рычаг-аэродинамический орган», то в настоящее время реализуется пропорциональность «рычаг-параметр движения самолета».

В продольном канале выдерживается пропорциональность «рычаг-нормальная перегрузка», а на больших углах атаки (БУА) «рычаг-угол атаки». Такой подход реализован на семействе самолетов Airbus, начиная с А-320, Ту-204, Ту-334, SSJ-100 и MC-21. На самолетах Boeing 777/787 реализуется пропорциональность «отклонение штурвальной колонки – взвешенная сумма нормальной перегрузки и угловой скорости тангажа» (т.н. «С» - критерий).

В поперечном канале управления наиболее часто реализуется пропорциональность «рычаг-угловая скорость крена», которая выдерживается на малых углах крена при $|\gamma| \leq 35^\circ - 45^\circ$, а при $|\gamma| \geq 45^\circ$ реализуется пропорциональность «рычаг-угол крена».

В путевом канале управления на современных самолетах часто реализуется пропорциональность «педаль-угол скольжения», а в поперечном канале – «отклонение педалей-угловая скорость крена».

Реализация соответствия между отклонениями рычагов управления и параметрами движения успешно обеспечивается интегральными законами управления, которые в настоящее время нашли самое широкое распространение. Эти законы позволяют:

- обеспечить автоматическую балансировку по всем каналам управления. Особую ценность эта функция приобретает для продольного канала, в котором происходит существенное изменение балансировки по режимам полета, весу, конфигурации и т.д.;
- обеспечить заданные статические характеристики управляемости, например, $X_e^{n_y}$, $X_y^{\omega_x}$, X_n^β . При этом эти характеристики можно легко менять по режимам полета, высоте H , скорости V_{np} , числу M полета, конфигурации самолета и т.д.;
- реализовать ограничение параметров движения (угол атаки, нормальная перегрузка, угол крена, угол скольжения и т.д.) заданными предельными значениями.

Реализация функций ограничения предельных параметров движения существенно повышает безопасность полета. Особо следует отметить функцию ограничения угла атаки и минимальной скорости полета, которая реализуется через управление рулем высоты и тягой двигателя и позволила предотвратить явление сваливания.

Для обеспечения высокой комфортности пилотирования в современных ЦСДУ широко используются функции парирования возмущений, а именно:

- моментов тангажа, крена и рыскания при отказе двигателя. Особое значение эта функция приобретает на режиме взлета, который характеризуется максимальным значением тяги, а, следовательно, и возмущающих моментов. Если на первом отечественном самолете Ту-204 ограничивались только парированием момента рыскания через отклонение руля направления, то на последующих самолетах компенсируются моменты тангажа и крена;
- возмущающих моментов по тангажу при выпуске и уборке механизации крыла, выпуске и уборке интерцепторов, изменении тяги силовой установки.

Также повышение комфортности управления достигается освобождением экипажа от рутинных функций балансировки самолета на установившихся режимах полета за счет подключения режимов стабилизации угла тангажа в продольном канале и угла крена в поперечном канале управления. Эти функции активируются при отсутствии управляющих действий летчика.

3. Архитектура и особенности функционирования ЦСДУ

Ключевыми факторами при выборе архитектуры ЦСДУ являются требования обеспечения высокой надежности, отказобезопасности и отличных динамических характеристик. В настоящее время ЦСДУ строится по иерархическому принципу и имеет три уровня – основной, резервный и аварийный контуры.

Основной цифровой дистанционный контур СДУ совместно с сопрягаемым оборудованием должен обеспечивать весь спектр функций управления, ограничения предельных параметров движения, парирования возмущений и повышения комфортности управления.

Резервный электродистанционный контур должен обеспечивать ограниченный спектр функций управления, достаточный для безопасного завершения полета.

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

Важным этапом при разработке сложных цифровых систем управления является анализ функциональных отказов, которые определяют ее архитектуру, резервирование и систему контроля. Для обеспечения надежности системы необходимо применение вычислителей, построенных по схеме «пары» или «триады» с разнородным резервированием аппаратной и программной частей каналов. Также требуется два типа блоков управления и контроля приводов для обеспечения надежности резервного управления и предотвращения отказа типа «общая точка» из-за ошибок в ПМО.

При разработке ЦСДУ возникает ряд проблем, не свойственных аналоговым дистанционным системам, не говоря уже о механических. Формирование требований к характеристикам ЦСДУ, оценка влияния цифровой реализации СДУ и ее резервирования на динамические характеристики самолета требуют разработки новых методов исследования и моделирования сложных цифровых систем управления.

Необходимо учитывать многоканальность, асинхронность выполнения операций между каналами резервированной ЦСДУ и внутри каждого канала, многотактность, выравнивание информации между каналами для обеспечения идентичности процессов в различных каналах ЦСДУ.

В настоящее время цифровые системы управления самолетов характеризуются следующими основными чертами:

- системы управления строятся на базе цифровых вычислителей с применением разнородного резервирования, цифровых линий связи и информационных систем;
- в ЦСДУ реализуется широкий набор функций для обеспечения заданных характеристик устойчивости и управляемости, комфорта управления, ограничения

параметров движения, для реализации которых используются алгоритмы управления с настройками по параметрам полета, нелинейными и логическими элементами;

- самолет должен обладать отличными динамическими характеристиками, что приводит к жестким требованиям к динамике трактов управления, включая быстроедействие, запаздывания и др.;
- в системе управления используется много цифровых устройств, работа которых не синхронизирована, т.е. система является асинхронной. Это приводит к дополнительным запаздываниям в трактах управления и к рассогласованию каналов. Согласование работы каналов требует специальных мер, которые влияют на динамику системы;
- частоты обновления информации датчиков, информационных систем и вычислителей ЦСДУ отличаются друг от друга. Разная значимость функций ЦСДУ позволяет разнести выполнение различных функций по разным тактам ЦСДУ. Эти особенности делают систему управления многотактной и усложняют ее анализ;
- жесткие требования к надежности и отказобезопасности в сочетании с высокой сложностью системы управления требуют разработки эффективной системы контроля. Выбор ее параметров определяется характеристиками сигналов и требованиями к вероятности несрабатывания и ложного срабатывания.

Эти особенности функционального наполнения современных систем управления и соответствующего алгоритмического обеспечения приводят к необходимости использования новых подходов к разработке и сертификации высокоавтоматизированных систем управления самолетов.

Также существует большое количество проблем, которые необходимо учитывать при синтезе структуры и алгоритмов ЦСДУ. В их числе:

- обеспечение устойчивости замкнутой системы «самолет – ЦСДУ» с учетом тонов аэроупругих колебаний конструкции;
- минимизация нагрузок на конструкцию и темпа расходования ресурса;
- оптимизация энергетической системы самолета (мощность гидросистем, скорости отклонения приводов и усилия на них, и др.);
- обеспечение отказобезопасности системы (снижение функциональной опасности отказов, эффективность обнаружения, локализации и изоляции отказов, реконфигурация алгоритмов ЦСДУ).

Эти задачи, зачастую носят противоречивый характер (например, снижение ветровых нагрузок – уменьшение скорости отклонения приводов), что требует разработки нового подхода к синтезу алгоритмов ЦСДУ.

4. Интеллектуализация систем управления

Можно отметить следующие направления, которые вызывают наибольший интерес:

- применение нечеткой логики (Fuzzy Logic) позволяет реализовать подход к эффективному построению многорежимного управления самолетом с переходом от одного закона управления к другому. Примером применения нечеткой логики является плавное переключение законов управления с ограничения перегрузки на ограничение угла атаки [1];
- расширенное совмещенное управление как продолжение действий пилота. При отсутствии командных сигналов от летчика ЦСДУ инициирует автоматические режимы. Если ранее включалась стабилизация углового положения самолета, то при

расширенном совмещенном управлении могут быть реализованы различные режимы автопилота и автомата тяги в зависимости от режима и условий полета. Логика выбора решаемых задач управления может быть эффективно реализована с помощью конечных автоматов [3];

- применение конечных автоматов является эффективным подходом к построению ЦСДУ с высоким уровнем логической сложности, а также для системы контроля и синхронизации состояний каналов резервированной ЦСДУ [1]. Законы управления современных ЦСДУ характеризуются высокой логической сложностью, их построение включает большое количество логических элементов. ЦСДУ является резервированной, т.е. содержит несколько каналов, выходные сигналы которых контролируются с целью обнаружения отказов и реконфигурации. Состояния различных каналов должны быть идентичными, в противном случае произойдет каскадное отключение каналов управления. Для этого все логические элементы должны быть синхронизованы, что может быть эффективно реализовано с помощью конечных автоматов.
- новые принципы контроля, селекции сигналов и синтеза алгоритмов с использованием распределенных датчиков и органов управления. При этом появляется широкий спектр возможностей по решению задач повышения аэродинамического качества самолета, снижения нагрузок на конструкцию, снижения шарнирных моментов органов управления, снижения требований к динамическим и энергетическим характеристикам приводов, управления обтеканием.

Список литературы

1. Алешин Б.С., Баженов С.Г., Диденко Ю.И., Шелюхин Ю.Ф. Системы дистанционного управления магистральных самолетов. М.: Наука, 2013. 292 с.
2. Алешин Б.С., Суханов В.Л. Самолет в перспективной системе аэронавигации // Труды ЦАГИ. 2011. Вып. 2699. С. 7-9.
3. Алешин Б.С., Шелюхин Ю.Ф. Повышение безопасности полета средствами автоматизации управления // Труды ЦАГИ. 2011. Вып. 2699. С. 10-18.
4. Moir I., Seabridge A. Civil avionics systems. AIAA Education series, 2003.
5. Moir I., Seabridge A. Aircraft systems: mechanical, electrical and avionics subsystems integration. Third edition. AIAA Education series, 2008.
6. Certification Consideration for Highly Integrated or Complex Aircraft Systems. SAE ARP4754, 1996.
7. Руководство по процессам сертификации высокоинтегрированных сложных бортовых систем воздушных судов гражданской авиации – P4754. Межгосударственный Авиационный комитет, 2007.
8. Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment. SAE ARP4761, 1996.
9. Руководство № 4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования самолетов гражданской авиации. Межгосударственный Авиационный комитет, 2007.
10. RTCA DO-178B. Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification. RTCA, 1992.
11. RTCA DO-254. Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware, 2000.