

УДК 629.7.054(082)

Б. Н. Окоёмов, Н. А. Роднов,
Н. Н. Фащевский

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМАТА СТАБИЛИЗАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Предложен метод идентификации в полете технического состояния агрегатов и систем автомата стабилизации самолета, обеспечивающий требуемый уровень его безотказности при минимальной кратности резервирования.

Эффективная эксплуатация современных и перспективных самолетов может быть обеспечена только при оснащении их автоматом стабилизации (АС), представляющим собой совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих систем датчиков первичной информации (ДПИ), вычислительного устройства (ВУ), исполнительных устройств (ИУ) и систем отображения информации (СОИ). Центральный вопрос в проектировании АС — обеспечение безопасности полета системы “самолет–АС” при отказах систем АС.

При разработке современных агрегатов АС возросла роль микроэлектроники, которая позволяет уменьшить габаритные размеры, массу и энергопотребление, а также повысить безопасность электронных систем. В настоящее время аналоговые и цифровые микроэлектронные компоненты существуют в двух вариантах. Первый предполагает большой выбор однокорпусных микросхем, выполняющих стандартизованные функции такие, как преобразователи различных типов (ЦАП и т.п.), запоминающие устройства (ЗУ), аналоговые компараторы и др. Второй вариант — микросхемы, выполняемая функция которых должна быть установлена пользователем, — это программируемые микроконтроллеры, которые в зависимости от типа и степени интеграции выполняют логические и арифметические функции по отдельности или одновременно. Это позволяет предложить схему построения и алгоритм работы систем встроенного контроля (СВК) АС несколько иные, чем те, которые используется сейчас.

Современные штатные структуры АС для отечественных и зарубежных самолетов различного назначения исходя из критерия допустимой вероятности отказа всего комплекса систем АС в полете, равной $Q_{\text{доп}} \leq (4 \dots 5) \cdot 10^{-8}$, построены с 2-кратным и более резервированием входящих в него систем, а СВК фактически реализована на

базе бортового ВУ. Так, например, самолет ИЛ-96-300 имеет в составе своего АС в качестве ВУ — два вычислителя управления тягой, четыре вычислителя автомата устойчивости и управляемости, три вычислителя системы автоматического управления, а также строенные основные ДПИ. Автомат стабилизации истребителя F-16 (США) имеет счетверенную структуру как цифровых вычислителей, так и ДПИ. В литературе [1] описаны алгоритмы работы и схемы построения СВК АС на базе бортового ВУ АС. При этом отказность r на единицу меньше общего числа идентичных агрегатов n , т.е. $r = n - 1$. В этом случае полный отказ канала АС происходит при одном еще работоспособном агрегате из группы идентичных. Это связано с тем, что коэффициент полноты проверки $K_{\text{пн}}$, характеризующий возможность самопроверки агрегатов, меньше единицы, т.е. $K_{\text{пн}} < 1$.

В статье [2] описаны алгоритмы работы и схемы построения СВК АС на базе цифрового бортового ВУ АС, позволяющие избежать этого недостатка. При быстродействии ВУ АС, существенно (на несколько порядков) превышающем требования динамики системы самолет-АС, создается временная избыточность (резерв), т.е. процессор ВУ простаивает. Эту временную избыточность можно использовать для предсказания — экстраполяции величин выходных сигналов каждого идентичного агрегата АС на один такт вперед работы цифрового бортового ВУ АС. Таким образом, для каждого проверяемого агрегата создается виртуальный дублер в ВУ и, тем самым, проверяется его работоспособность стандартными алгоритмами полностью, т.е. $K_{\text{пн}} \cong 1$. Использование виртуального резерва каждого агрегата АС позволяет построить структуру АС, в которой число возможных отказов будет соответствовать числу агрегатов, т.е. $r = n$. При использовании этого алгоритма особое внимание должно быть уделено бортовому ВУ АС, а именно — контролю его работоспособности, поскольку все функции СВК помимо реализации алгоритма управления и стабилизации выполняет ВУ АС. Этот алгоритм дает возможность понизить кратность резервирования всех агрегатов, входящих в АС, но выдвигает более жесткие требования к ВУ АС по быстродействию, отказобезопасности и объему ЗУ.

При построении различных схем резервированного АС — многократном структурном резервировании отдельных агрегатов АС, резервировании измерительных базисов ДПИ, использовании методов прогноза выходных сигналов агрегатов АС — системы контроля работоспособности реализуются на базе бортового ВУ АС. В схеме построения АС ВУ, по сути, является наиболее нагруженным с функциональной точки зрения агрегатом. Помимо выполнения основной задачи — реализации алгоритмов управления — бортовое ВУ АС задействовано

при любой, ныне существующей системе контроля работоспособности отдельных агрегатов АС. Потеря работоспособности самого ВУ в полете приводит к полному отказу всего АС и может привести к потере возможности даже ручного пилотирования. Контроль работоспособности самого ВУ при современных схемах построения АС проводится в нем же самом. Все это приводит к существенному повышению кратности резервирования ВУ АС, но, тем не менее, не снимает функцию СВК для всего АС и для самого ВУ.

Снять эту функцию с ВУ возможно, создав автономные виртуальные резервные устройства не на базе бортового ВУ АС, а используя возможности современной микроэлектроники. Для этого необходимо распределить функцию контроля работоспособности агрегатов, входящих в состав АС, по небольшим микроэлектронным устройствам, скомпонованным вместе с основным агрегатом АС (АгАС). Структура отдельного агрегата, входящего в состав АС, дополненная микроэлектронным устройством контроля представлена на рис. 1.

Тактовая частота современной цифровой микроэлектроники может достигать 10^9 Гц. Таким образом, виртуальный агрегат может быть создан из наборов современных микросхем (рис. 2). Входным сигналом для него является оцифрованный текущий выходной сигнал АгАС, а выходным — экстраполированный выходной сигнал АгАС. Выборка осуществляется под управлением тактирующих сигналов (TTL1, TTL2, TTL3, TTL4), которые вырабатывает тактовый генератор, штатно устанавливаемый в цифровые схемы. Тактирующие сигналы — это импульсы прямоугольной формы одинакового уровня, следующие через равные промежутки времени — периоды следования, не превыша-

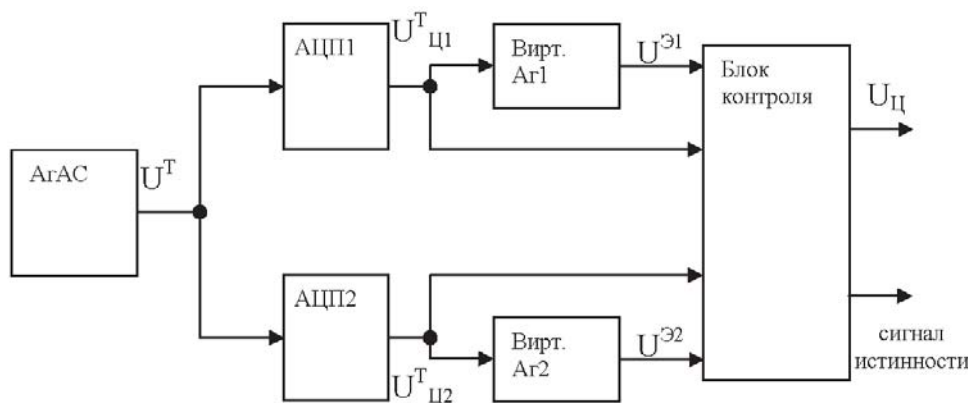


Рис. 1. Функциональная схема модернизированного агрегата:

АгАС — агрегат, входящий в состав АС; Вирт.Аг — виртуальный агрегат; U^T — текущий выходной сигнал АгАС; $U^T_{ц}$ — оцифрованный текущий выходной сигнал АгАС; $U^Э$ — экстраполированный выходной сигнал АгАС; $U_{ц}$ — проверенный оцифрованный текущий выходной сигнал АгАС

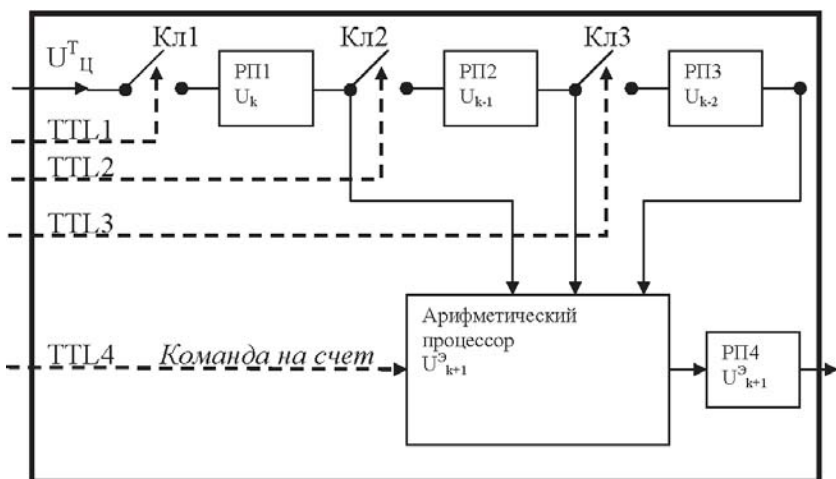


Рис. 2. Функциональная схема виртуального агрегата:

РП1, РП2, РП3, РП4 – регистры памяти; Кл1, Кл2, Кл3 – электронные ключи; TTL1, TTL2, TTL3, TTL4 – тактирующие сигналы

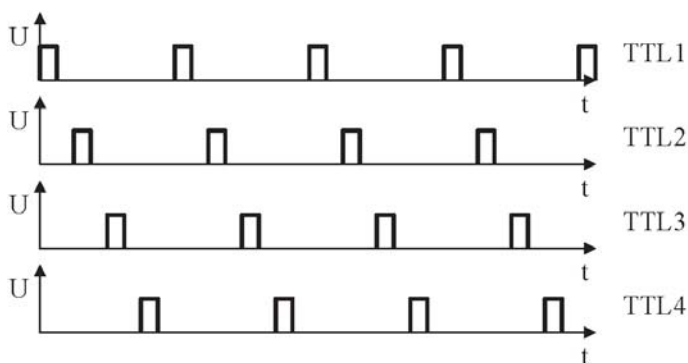


Рис. 3. Временная диаграмма тактирующих сигналов

ющие временной резерв, но сдвинутые относительно друг друга во времени (рис. 3).

Рабочий цикл начинается с последовательного приема схемой тактирующих сигналов TTL1, TTL2, TTL3, которые управляют ключами Кл3, Кл2, Кл1. В результате этого по очереди в запоминающие устройства – регистры памяти РП3, РП2, РП1 – заносятся текущие (для моментов времени t_{k-2} , t_{k-1} , t_k) значения выходного сигнала с контролируемого агрегата: U_{k-2} , U_{k-1} , U_k . Далее тактирующий сигнал TTL4 выдает команду “Старт” счета в “Арифметическом процессоре” экстраполированного значения $U^э_{k+1}$ выходного сигнала контролируемого агрегата для момента времени t_{k+1} , которое заносится в регистр памяти РП4 для считывания и хранится до следующего акта счета. Далее схема работает по новому циклу.

Подача электропитания на борту современных летательных аппаратов к потребителям осуществляется по двум резервирующим друг

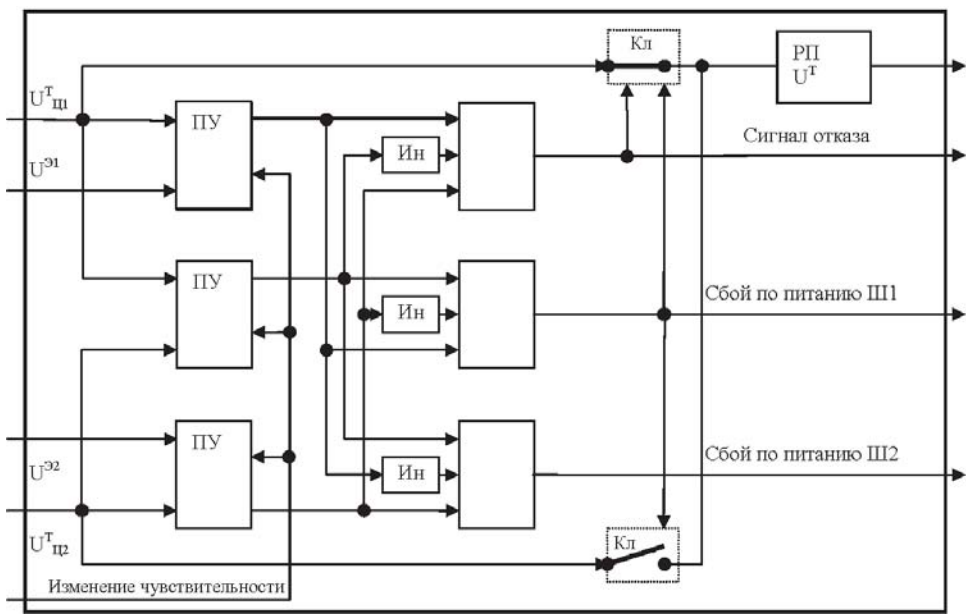


Рис. 4. Блок контроля:

ПУ — пороговое устройство; Ин — инвертирующее устройство; & — логическая схема И, РП — регистр памяти

друга шинам (Ш1 и Ш2), поэтому каждое реальное устройство целесообразно резервировать двумя виртуальными агрегатами, подключенными к отдельным шинам электропитания. Также целесообразно параллельно дважды оцифровывать сигнал U^T . В итоге, в каждый момент времени существуют один реальный выходной сигнал, дважды оцифрованный ($U^T_{Ц1}$ и $U^T_{Ц2}$), а также два предсказанных сигнала $U^Э_{Ц1}$ и $U^Э_{Ц2}$, сравнивая которые в блоке контроля (рис. 4), можно однозначно определить момент отказа реального агрегата, а также моменты “пропадания” электропитания.

Выход из строя последовательно одного за другим виртуальных агрегатов — событие маловероятное. Схемные решения устройств сравнения и контроля достаточно отработаны и могут быть перенесены на элементную базу микроэлектроники с учетом того, что только один сигнал является реальным и выходным может быть только он, либо никакой.

При сравнении четырех сигналов между собой возможна установка шести пороговых устройств (ПУ), сравнивающих попарно значения:

$$\begin{aligned} \text{ПУ1} & - [U^T_{Ц1} \text{ и } U^Э_{Ц1}], \text{ ПУ2} - [U^T_{Ц1} \text{ и } U^Э_{Ц2}], \text{ ПУ3} - [U^T_{Ц1} \text{ и } U^T_{Ц2}], \\ \text{ПУ4} & - [U^Э_{Ц1} \text{ и } U^Э_{Ц2}], \text{ ПУ5} - [U^Э_{Ц1} \text{ и } U^T_{Ц2}], \text{ ПУ6} - [U^Э_{Ц2} \text{ и } U^T_{Ц2}]. \end{aligned}$$

Результат работы ПУ — “0”, если значения сигналов равны (с точностью до допустимой ошибки), и “1”, если их значения различаются.

Предположительно возможны следующие варианты событий.

1. Отказов нет — АгАС, АЦП1 и АЦП2 работоспособны; результаты работы всех ПУ — “0”; в итоге на выход подается $U_{Ц1}^T$.
2. Отказ АгАС — $U_{Ц1}^T$ и $U_{Ц2}^T$ ложные; результаты работы ПУ1, ПУ2, ПУ5, ПУ6 — “1”, а ПУ3, ПУ4 — “0”; в итоге на выход подается $U_{Ц1}^T$, сохраненный с предыдущего такта в РП.
3. Отказ АЦП1 или сбой по ШПП1 — $U_{Ц1}^T$ и $U_{Ц1}^Э$ ложные; результаты работы ПУ1, ПУ2, ПУ3, ПУ4, ПУ5 — “1”, а ПУ6 — “0”; в итоге на выход подается $U_{Ц2}^T$.
4. Отказ АЦП2 или сбой по ШПП2 — $U_{Ц2}^T$ и $U_{Ц2}^Э$ ложные; результаты работы ПУ2, ПУ3, ПУ4, ПУ5, ПУ6 — “1”, а ПУ1 — “0”; в итоге на выход подается $U_{Ц1}^T$.

Из анализа представленных вариантов событий следует, что результаты работы ПУ2, ПУ5 не несут смысловой нагрузки и работают как большинство ПУ. В то же время ПУ3, ПУ4 срабатывают одновременно, но для сравнения текущих сигналов, без снижения достоверности результата, достаточно проанализировать итоги работы ПУ1, ПУ3, ПУ6.

Структура микроэлектронного устройства, выполняющего функции аналого-цифрового преобразования и контроля работоспособности, будет выглядеть, как показано на рис. 5. Все функции устройства могут быть реализованы на двух микроконтроллерах (МК) типа ATmega 64 или аналогичных.

В предлагаемой опытной реализации микроэлектронного устройства сигнал АгАС поступает на усилители-формирователи DA-1, DA-2, реализующие функцию фильтра низкой частоты и усиления, и

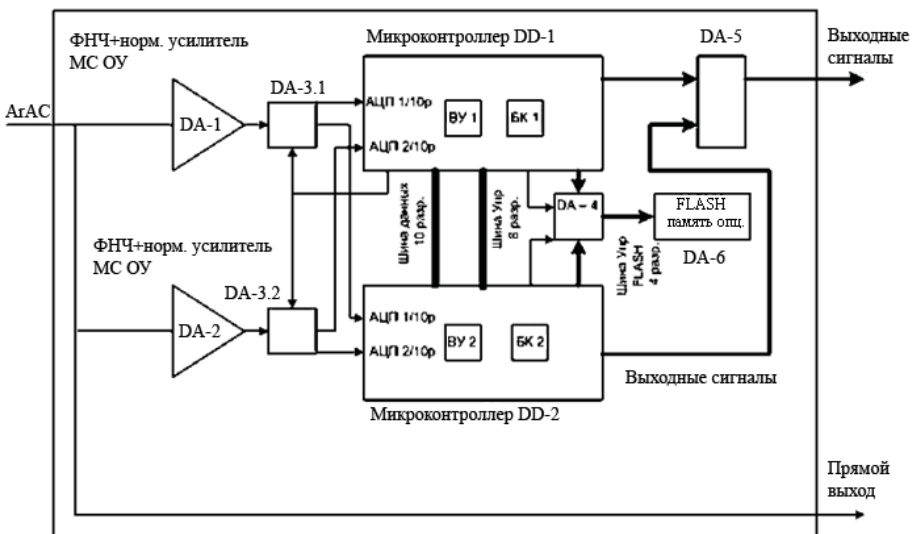


Рис. 5. Структура микроэлектронного устройства

с них — на встроенные десятиразрядные АЦП DA-3.1, DA-3.2. Функции виртуального устройства и блока контроля реализованы дважды на DD-1, DD-2. С целью выявить сбои в работе схемы реализуется функция сравнения параметров в узле DA-4. Статистические данные о сбоях в реальном времени собираются в флеш-памяти. Окончательный контроль работоспособности и дополнительные технологические сигналы формируются в DA-5.

Таким образом, предлагаемая схема построения распределенной СВК технического состояния приборов и агрегатов, входящих в АС, позволяет довести коэффициент полноты проверки отдельных агрегатов АС практически до $K_{\text{шт}} = 1$ и снизить число резервных агрегатов. При этом вычислительные мощности центрального ВУ АС освобождаются для выполнения задач формирования и стабилизации траектории полета самолета и одновременно снижается кратность его резервирования. В то же время дополнительная массогабаритная нагрузка и дополнительное энергопотребление, при применении распределенного контроля технического состояния агрегатов, входящих в АС, от дополнительных электронных компонентов составит доли процента от соответствующих характеристик отдельного агрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О к о е м о в Б. Н. Принципы проектирования гироскопических систем по критерию надежности. – М: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1985.
2. О к о е м о в Б. Н., П е т р о в В. М., Ф а щ е в с к и й Н. Н. Принцип построения двухотказного пилотажно-навигационного комплекса для самолета общего назначения // Вестник МГТУ им.Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. – 1999. – № 1.

Статья поступила в редакцию 13.04.2007

Окоемов Барит Николаевич родился в 1932 г., окончил в 1956 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Академик Академии навигации и управления движением РФ. Автор свыше 150 научных работ в области приборов точной электромеханики и систем ориентации, стабилизации и навигации.

B.N. Okoyomov (b. 1932) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1956. D. Sc. (Eng.), professor of “Instruments and Systems of Orientation, Stabilization and Navigation” department of the Bauman Moscow State Technical University, academician of the Russian Academy for Navigation and Motion Control. Author of more than 150 publications in the field of instruments of precise electromechanics and systems of orientation, stabilization and navigation.

Николай Алексеевич Роднов родился в 1966 г. окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1989 г. и Российскую академию госслужбы при президенте РФ в 1996 г. Руководитель информационно-аналитического центра МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 14 научных работ в области экспертных оценок и управления системами.

N.A. Rodnov (b. 1966) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1989 and Russian Academy of Government Service at RF President in 1996. Chief of Information and Analytical Center of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 14 publications in the field of expert estimation and management of systems.

Николай Николаевич Фащевский родился в 1965 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1993 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации” МГТУ им. Н.Э. Баумана, действительный член Академии навигации и управления движением РФ. Автор 10 научных работ в области приборов точной электромеханики и систем ориентации, стабилизации и навигации.

N.N. Fashchevskiy (b. 1965) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1993. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Instruments and Systems of Orientation, Stabilization and Navigation” department of the Bauman Moscow State Technical University, academician of the Russian Academy for Navigation and Motion Control. Author of 10 publications in the field of instruments of precise electromechanics and systems of orientation, stabilization and navigation.

**В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
в 2007 г. вышла в свет книга**

Недашковский В.М. Хартов В.Я.

Микроконтроллеры AVR. Практикум для начинающих. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 240 с.

Практикум содержит материалы для изучения микроконтроллеров AVR с архитектурой RISC. Рассмотрены необходимые инструментальные средства — интегрированный пакет для разработки и отладки программ AVR Studio 4, стартовый набор разработчика STK500. Предложен комплект программ для изучения функциональных возможностей микроконтроллеров (27 учебных проектов). Тематика охватывает практически все аспекты архитектуры микроконтроллеров: работу портов, таймеров, арифметическую обработку данных, организацию ввода/вывода по параллельным и последовательным (UART, SPI и I2C) каналам связи, устройств обработки аналоговых сигналов, системы прерывания. Базовые программы могут быть использованы в качестве основы для обучения и самостоятельного программирования на языке Ассемблер AVR в курсовом и дипломном проектировании.

Материалы книги автор использует в учебном процессе в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов высших и средних специальных учебных заведений, обучающихся по направлению “Информатика и вычислительная техника”.

По вопросам приобретения обращаться по тел. 263-60-45;

e-mail: press@bmstu.ru