

УДК 629.179.13

Л.Л. ЯЦКО¹, Р.А. ТРОФИМЕНКО¹, А.О. АНТОНОВ²

¹ *ОАО «НТК «Электронприлад», Киев, Украина*

² *Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев, Украина*

ОБЩАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА И ОЦЕНОЧНЫЙ РАСЧЕТ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНОЙ САУ БУК-3000

Рассмотрена общая функциональная схема перспективной САУ БУК-3000, входные и выходные каскады которой построены по схеме однократного резервирования, а микроконтроллерная схема центрального вычислителя – по схеме двойного резервирования. Многократный перекрестный обмен информацией, для выявления неявных отказов и повышения функциональной надежности. Выполнен оценочный расчет и сравнительная характеристика безотказности работы представленной схемы и одноканальной системы, построенных на однотипных элементах.

Ключевые слова: функциональная схема, функциональная надежность, система автоматического управления, вероятность безотказной работы, микроконтроллерная система, встроенный контроль, идентификация отказа, резервный канал управления, FADEC, мажоритарная логика, САУ, устройство управления, отказ, контролепригодность, обмен информацией, модуль.

Введение

Разработка новых перспективных систем управления (САУ) авиационными двигателями осуществляется в соответствии с требованиями, предъявляемыми к двигателю в целом и к САУ, а также с учетом существующего уровня развития элементной базы. От правильности обоснования и выбора элементов САУ будут зависеть не только характеристики двигателя, но и технико-экономические показатели летательного аппарата. Поэтому при разработке новых систем управления необходимо учитывать потенциальное будущее моральное старение элементов совместно с перспективой длительного жизненного цикла авиационного двигателя.

Современный уровень развития миниатюризации и интеграции элементной базы позволяет обеспечить новый, более высокий уровень расчетной безотказности систем управления и контроля. Благодаря появлению микросхем, содержащих сверхмощный процессор, память, программы и данные, коммуникационные интерфейсы, АЦП, ЦАП и др., изменилась схемотехника устройств САУ. Фактически устройство центрального вычислителя для систем типа FADEC состоит из 2-3 СБИС и некоторого количества режимно-задающих и согласующих пассивных элементов (резисторы, конденсаторы и т.д.). Это позволило повысить надежность САУ, но на сегодняшний день можно констатировать, что пути повышения надежности системы за счет применения все более и более интегрированных элементов практически исчерпаны [1].

Формулирование проблемы. Наиболее эффективным направлением повышения функциональной надежности САУ сейчас является совершенствование структурных решений и функциональных схем построения систем управления и контроля. Развитие многоканальных резервированных систем до недавнего времени было ограничено информационными каналами обмена между параллельно работающими системами. Если в качестве внутрисистемной магистрали и обмена использовалась параллельная шина, она требовала прокладки большого количества проводников в поддоне, развязывающих мультиплексоров и демультимплексоров, применение двухпортовых ОЗУ, сложной развязки внутренней и внешней шин обмена, синхронизации работы взаимодействующих устройств. Все перечисленное ограничивало аппаратное построение многоканальных систем и практически сводило к нулю суммарный эффект повышения надежности от функциональной и аппаратной избыточности системы.

Если в качестве внутрисистемной магистрали применялись последовательные каналы обмена, то при внешней простоте построения они не обладали требуемыми характеристиками по скорости обмена, надежности доставки информации, контролепригодности и т.д. Современные вычислительные системы имеют колоссальную вычислительную производительность и аппаратную оснащенность, которые в совокупности позволяют пойти по пути усложнения системного программного обеспечения (ПО) для повышения контролепригодности и повышения общей функциональной надежности, без

ущерба для качества реализации алгоритмов управления и контроля двигателя.

Широко известны алгоритмы мажоритарной логики "2 из 3" [1], и в настоящий момент они достаточно широко распространены при построении высоконадежных систем, в которых основными выходными командами являются сигналы вида 1/0. Такие системы являются очень надежными.

Но не были решены проблемы резервирования формирователей выходных аналоговых сигналов. Возможно ли сформировать алгоритм мажоритарной логики для аналогового выходного сигнала? Какая бы ни была сложная цепочка формирования решения, она должна иметь выход на чувствительный элемент исполнительного механизма, т.е. на физическом выходе, все равно будет находиться нерезервированная выходная цепочка. Однако возможно за счет большого количества перекрестных обменов информацией и взаимного контроля свести риск принятия решения до минимума, а выходной каскад охватить 100% обратной связью для надежного контроля его работоспособности.

В данной работе рассматривается возможность построения полноценной трехканальной системы для перспективной САУ БУК-3000 и выполняется оценочный расчет надежности такой системы.

1. Общая функциональная схема перспективной САУ - БУК-3000

В блоке БУК-20-38 - САУ ГТД ТВД-20 самолета АН-38 была реализована мажоритарная логика "2 из 3" для дискретных выходных команд [3]. Система проявила себя очень хорошо во время опытной эксплуатации самолета, однако формирование выходного аналогового сигнала на электромагнитный клапан ограничения расхода топлива, формировался с устройства, которое было условно обозначено как "Основной канал управления", т.е. по одноканальной схеме.

Для перспективной САУ БУК-3000 в настоящий момент прорабатывается вариант построения полноценной 3-х канальной системы, с двухуровневым перекрестным информационным обменом, который минимизирует вероятность ошибки при подготовке исходных данных и вычислении величины потребного расхода топлива, выдачи команды управления на формирователь выходного сигнала и надежно выявляет отказавшее устройство внутри системы. Особенностью функциональной схемы системы является двухуровневый информационный обмен. На рис. 1 приведена общая структура процессов передачи информации, контроля и вычисления перспективной системы БУК-3000.

Устройства сбора и обработки информации (УСО-3000) выполняют сбор и начальную обработку первичной информации от датчиков. Так как боль-

шинство датчиков – двухканальные, то система сбора имеет независимые каналы, реализуя значительное количество контрольных алгоритмов, в частности: – контроль целостности линии связи на КЗ/Обрыв, по возможности, разделяя эти состояния; – самоконтроль исправности внутренних преобразователей и нормализаторов входных сигналов - встроенная система контроля; – контроль исправности датчика, по анализу динамических и статических характеристик измеренного сигнала, таких как попадание результатов в заданный диапазон, контроль скорости изменения сигнала датчика и т.д.; – фильтрацию результатов измерений от сбойных значений (математическая обработка результатов); – коррекцию результатов измерения по градуировочным таблицам или с учетом внешних воздействующих факторов (температура, давление и т.д.) – при необходимости.

Устройства центральных вычислителей (УЦВ-3000) осуществляют сбор аналоговой информации от разных источников, осуществляя перекрестный контроль полученных данных по величине предельного рассогласования. Для каждого аналогового сигнала будет выбран свой критерий выбора результирующего значения для использования в вычислительных алгоритмах. Это может быть выбор среднего значения, "всегда работаем по большему или меньшему", привязка результата (при общих нормальных характеристиках) к какому-то одному каналу. Это требует индивидуального анализа характеристик каждого сигнала. При одинаковых критериях выбора микроконтроллеры независимых каналов выберут одинаковые, или близкие по значениям (при наличии некоторой асинхронности в канале информационного обмена). На данном этапе осуществится контроль работоспособности системы сбора и устройство сбора, данные которого будут отличаться от принятой нормы, будет удалено из системы, т.е. его информация будет игнорироваться центральными вычислителями.

Центральные вычислители осуществляют расчет потребного расхода топлива (или положения ВНА, или КПВ и т.д.) и формируют величину необходимого корректирующего воздействия.

После завершения расчета, они повторно обмениваются информацией и сравнивают результаты расчета между собой. По формализованному алгоритму выбирается оптимальное значение корректирующего воздействия, которое передается дальше на устройство управления насосом-дозатором.

Устройство управления насосом-дозатором – это сложное комплексное микроконтроллерное устройство, которое формирует силовой аналоговый сигнал на исполнительный механизм. На это устройство заведены датчики положения исполнительных механизмов (ИМ) со схемами контроля целостности линии и алгоритмами контроля исправности датчика.

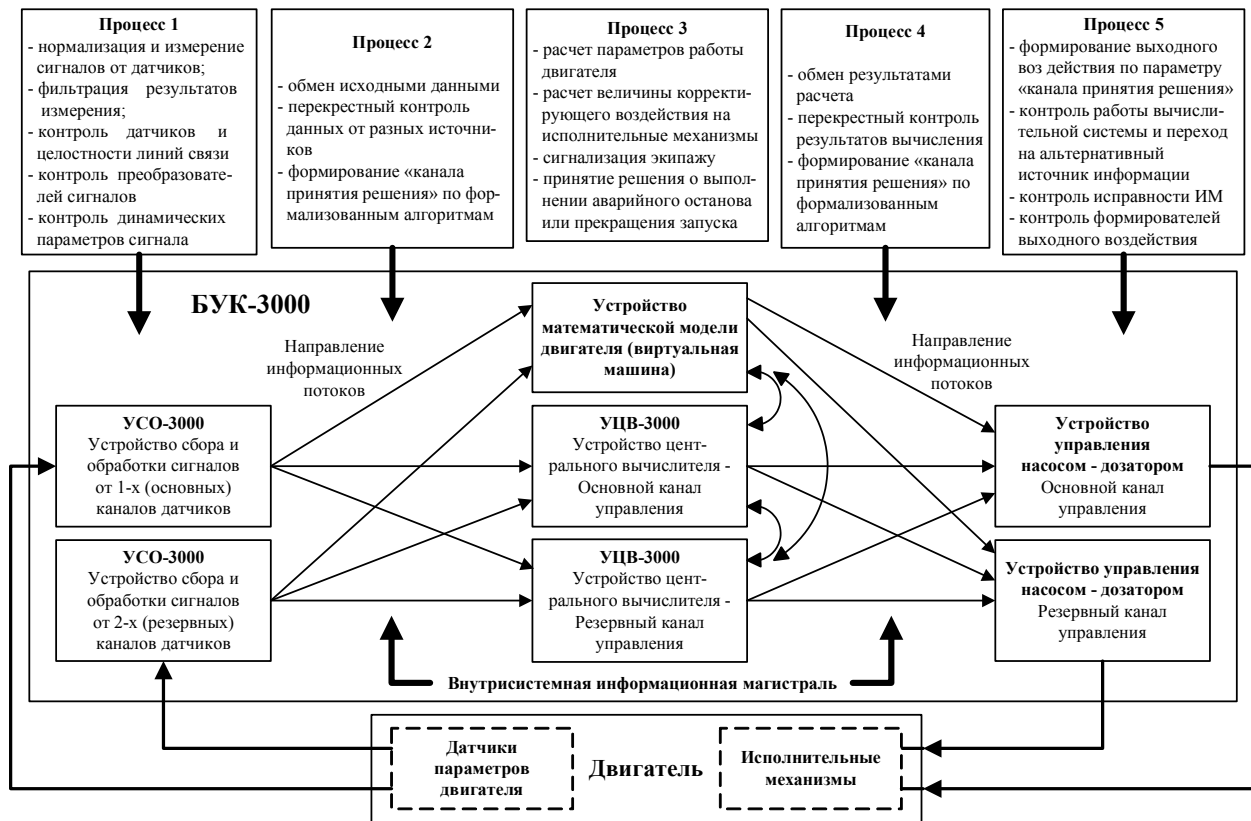


Рис.1. Общая функциональная схема перспективной САУ - БУК-3000

Устройство контролирует величину выдаваемого сигнала, скорость перемещения исполнительного механизма, при необходимости оно формирует несколько последовательных высокочастотных сигналов корректировки положения ИМ для оптимального позиционирования на величину заданного расхода. При этом в программных алгоритмах могут учитываться индивидуальные характеристики ИМ, такие как величина трения, величина тока страгивания (трение покоя), динамические и статические характеристики. Особенностью системы является двойной перекрестный обмен информацией – первый процесс обеспечивает выполнение расчетных алгоритмов по одинаковым исходным данным и выявление отказов в системе сбора и обработки первичной информации. Второй перекрестный обмен результатами вычислений обеспечивает выявление отказов уже в системе центрального вычислителя. Таким образом, гарантируется высокая вероятность выполнения функции – вычисление потребного расхода топлива и формирование выходного управляющего сигнала.

2. Оценочный сравнительный расчет функциональной надежности

Для анализа возможности повышения функциональной надежности САУ был проведен оценоч-

ный расчет надежности представленной функциональной схемы. Естественно, сложно ожидать совпадения реального и рассчитанного поведения системы. Расчет надежности микроконтроллерных устройств, состоящий в определении числовых показателей надежности $P(t)$ и T_{cp} по известным интенсивностям отказов комплектующих элементов не проводился, но оценочная вероятность безотказной работы принималась равной 0,9, что является сильно заниженной величиной, по сравнению с расчетной. Вероятность безотказной работы системы обычно вычисляется с использованием выражений [4]:

$$P_c(t) = \exp\left(-\int_0^t \Lambda(t) dt\right), \quad \Lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t), \quad (1)$$

где $\lambda_i(t)$ – интенсивность отказов i -го модуля, n – число модулей системы.

Модули одного иерархического уровня имеют приблизительно равную надежность. Тогда для системы из K групп модулей одного уровня можно записать приведенные выше зависимости:

$$P_c(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^K n_i \int_0^t \lambda_i(t) dt\right), \quad \Lambda(t) = \sum_{i=1}^K n_i \lambda_i(t), \quad (2)$$

где n_i – число модулей i -го уровня иерархии.

Средняя наработка на отказ системы в общем случае определяется по вероятности безотказной работы в соответствии с выражением:

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt. \quad (3)$$

Установка и включение параллельно нескольких таких же систем, т.е. общее резервирование, приводит к увеличению результирующей вероятности безотказной работы резервированной системы $P(t)$:

$$P(t) = 1 - [1 - P_c(t)]^{m+1}, \quad (4)$$

где m – число резервных систем, включенных параллельно основной.

В представленной функциональной схеме используется однократное резервирование устройств системы сбора первичной информации, двукратное резервирование устройств центральных вычислителей и однократное резервирование устройств управления насосом-дозатором, поэтому (4) запишем в виде:

$$P_{\text{РЕЗ. СИСТЕМЫ}}(t) = [1 - (1 - P_{\text{УСО-3000}}(t))^2] \cdot [1 - (1 - P_{\text{УЦВ-3000}}(t))^3] \cdot [1 - (1 - P_{\text{УУ-ИД}}(t))^2]. \quad (5)$$

Если предположить, что микроконтроллерные устройства системы имеют примерно одинаковую вероятность безотказной работы, и принять ее, как было указано выше, равной 0,9, то вероятность безотказной работы одноканальной системы из трех последовательно соединенных модулей будет равна 0,729. Оценочная вероятность безотказной работы резервированной системы, представленной на рис. 1, будет составлять 0,9791, что более чем в 1,34 раза выше, чем у одноканального исполнения системы.

Для определения средней наработки на отказ резервированной системы запишем выражение (5) с учетом экспоненциального закона распределения:

$$P_{\text{РЕЗ. СИСТЕМЫ}}(t) = [1 - (1 - \exp(-\lambda_i t))^2] \cdot [1 - (1 - \exp(-\lambda_i t))^3] \cdot [1 - (1 - \exp(-\lambda_i t))^2].$$

После несложных математических преобразований полученное выражение подставим в (3) и после интегрирования получим $0,776/\lambda_i$. Для нерезервированной системы $T_{\text{ср}} = 0,333/\lambda_i$, таким образом, средняя наработка на отказ при принятом методе резервирования увеличилась в 2,33 раза по сравнению с исходной.

3. Надежность и ресурс современных микроконтроллеров с хранением кодов программ во внутренней FLASH-памяти

Кроме анализа надежности функциональных схем, нами был проведен анализ надежности собственно микроконтроллеров типа MCS-51 (Atmel), ARM (Atmel), ST10 (STMicro). В результате поиска и анализа полученных от служб тех.поддержки материалов и результатов ресурсных испытаний микроконтроллеров фирм Atmel и STMicro установлено очень серьезное отношение указанных фирм к вопросам надежности.

Типовыми тестами, которым подвергаются все, без исключения серии микросхем, являются:

- тест на длительную наработку (при +125°C);
- тест на длительную наработку (при 125°C для изделий в пластиковых корпусах);
- сохраняемость данных во внутренней FLASH-памяти при высоких температурах (при +150°C для пластиковых корпусов);
- воздействие высокого давления и температуры;
- тест на воздействие относительной влажности (85% при +131°C);
- расширенные температурные циклы (не менее 1000 циклов от -65°C до +150°C) и т.д.

Тестированию подвергаются партии микросхем, с размером выборки от 50–100 образцов, до 1000 образцов. Суммарная наработка испытуемых партий составляет от $1 \cdot 10^6$ до $12 \cdot 10^6$ приборо-часов.

Условия испытаний – значительно более жесткие по внешним воздействующим факторам (несмотря на индустриальное назначение (диапазон от -40°C .. +125°C), ВСЕ микросхемы в пластиковых корпусах подвергались длительному (миллионы часов) воздействию температур -60°C +150°C, или их комбинаций, а также значительно более длительные по времени воздействия.

Несмотря на то, что пресс-релизы фирмы AT-MEL об устаревших микросхемах MCS-51 появились в 2006 году, последние отчеты о ресурсных испытаниях датируются 2007 – 2008 годами, что говорит о непрекращающихся испытаниях микросхем на ресурс, в течении всего времени серийного производства. Можно предположить, что испытания были прекращены и оформлены отчеты, после принятия решения о прекращении массового серийного производства указанных микросхем.

При экстраполяции полученных результатов испытаний на надежность, с учетом гораздо более мягких условий климатических воздействий, которым подвергаются наши блоки, по экспоненциальному закону, то можно сделать выводы:

- величина назначенного ресурса 30лет, с учетом воздействия типовых величин внешних факторов (ЕНЛГС, АП-25 и т.д.), принятых для изделий БРЭО, не превышает допустимые сроки эксплуатации микроконтроллеров, установленные их производители-лями (Atmel, STMicro) в части сохраняемости кодов программ и данных во внутренней FLASH-памяти и назначенным ресурсам для микроконтроллеров;

- для обеспечения сохранения назначенного ресурса критически важным параметром является количество перепрограммирований микроконтроллеров в процессе настройки изделия.

Исходя из анализа добротности предоставлен-

ных материалов, можно сделать вывод о стратегически правильном выборе разработчиков в части выбора производителей встраиваемых микроконтроллеров (ATMEL, STMicro) а также типов применяемых микроконтроллеров (MCS-51: AT89S8252, MCS-16: ST10F168, ST10F269, ARM).

Характеристики указанных микросхем, в совокупности со схемотехническими решениями, позволяющими выявлять отказы различных микроконтроллеров и структурных единиц системы, и по возможности парировать их (методами реконфигурации структуры инф. потоков или выдачей команд на аварийный останов) позволяют применять их при разработке систем управления с полной ответственностью - FADEC.

Заключение

Создание аппаратуры без излишних запасов прочности – важная и сложная задача, поскольку конструктор не всегда имеет четкие количественные параметры внешних воздействий, отсутствуют или

имеются неточные математические модели, позволяющие весьма ориентировочно произвести указанную оценку. Это приводит к внесению в конструкцию завышенных запасов прочности и устойчивости, так называемых коэффициентов незнания, уточнение которых – условие успешного обеспечения заданной надежности при минимальной себестоимости.

Литература

1. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры / Под ред. В.А. Шахнова. – М.: МГТУ им. Баумана, 2002. – 528 с.
2. Woodward Governor Company, firms presentation material, "2 out of 3 voting fault tolerance process" and "Triple module fault tolerance", 2008.
3. Отладка и испытания систем управления и контроля авиационных двигателей / С.В. Епифанов, С.Н. Суховий, В.П. Дробинов, Л.Л. Яцко, Е.В. Павлюк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 23.
4. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко. – М.: Наука, 1964. – 448 с.

Поступила в редакцию 01.04.2009

Рецензент: д-р техн.наук, проф., зав.кафедрой Н.И. Бурау, НТУУ "Киевский политехнический институт", Киев.

ЗАГАЛЬНА ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА І ОЦІННИЙ РОЗРАХУНОК ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ НАДІЙНОСТІ ПЕРСПЕКТИВНОЇ САК БУК-3000

Л.Л. Яцко, Р.А. Трофіменко, А.О. Антонов

Розглянута загальна функціональна схема перспективної САУ БУК-3000, вхідні і вихідні каскади якої побудовані по схемі одноразового резервування, а мікроконтролерна схема центрального обчислювача - по схемі подвійного резервування. Багатократний перехресний обмін інформацією, для виявлення неявних відмов і підвищення функціональної надійності. Виконаний оцінний розрахунок і порівняльна характеристика безвідмовності роботи представленої схеми і одноканальної системи, побудованих на однотипних елементах.

Ключові слова: функціональна схема, функціональна надійність, система автоматичного керування, вірогідність безвідмовної роботи, мікроконтролерна система, вбудований контроль, ідентифікація відмови, резервний канал управління, FADEC, мажоритарна логіка, САК, пристрій управління, відмова, контролепригодність, обмін інформацією, модуль.

GENERAL FUNCTIONAL DIAGRAM AND EVALUATION CALCULATION TO FUNCTIONAL RELIABILITY OF PERSPECTIVE ACS БУК-3000

L.L. Iatsko, R.A. Trofimenko, A.O. Antonov

The general functional diagram of perspective ACS is considered БУК-3000, the cascades of entrances and outputs of which are built on the chart of the single reserving, and microcontrollers chart of main device - on the chart of the double reserving. It is use frequent cross exchange by information, for the exposure of non-obvious refusals and increase of functional reliability. An evaluation calculation and comparative description of faultlessness of work of the presented chart is executed the one - channel system, built on of the same types elements.

Key words: functional diagram, functional reliability, automatic control system, probability of faultless work, microcontrollers system, built-in control, authentication of refusal, reserve channel of management, FADEC, majority logic, SAU, control unit, refusal, possibility for control, exchange by information, module.

Яцко Ласло Ласлович – канд.техн.наук, ведучий конструктор, начальник бригади перспективних разработок ОАО "НТК "Електронприлад", Киев, Украина, e-mail: iatsko@i.ua.

Трофименко Руслан Анатольевич – ведучий конструктор, ОАО "НТК "Електронприлад", Киев, Украина, e-mail: tr@mail.ru.

Антонов Алексей Олегович – студент 5 курса кафедри "Прибори и системы ориентации и навигации" Приборостроительного факультета, НТУУ "Киевский политехнический институт", Киев, Украина.