

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

к.т.н. А.П. Зенин
(представил д.т.н., проф. В.С.Харченко)

Предложена многоярусная адаптивная мажоритарно - резервированная структура для бортовых цифровых систем управления летательного комплекса, которая реализует двухпараметрическую адаптацию. Она позволяет осуществлять текущий контроль технического состояния системы управления (СУ) с целью повышения ее технической готовности и отказоустойчивости.

Введение. В августе 1998 года космический ракетоноситель «Зенит» стартовал с космодрома Байконур, выполняя международные коммерческие заказы по выводу на орбиту иностранных спутников. На 126 сек полета из-за отказа бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) система управления ракеты (СУ) сформировала команду на аварийное прекращение полета (АПП) – на самоликвидацию. Причиной аварии «Зенита» стало случайное совпадение единичных сбоев в двух из трех каналов мажоритарно-резервированной БЦВМ, которое по признаку несравнения информации каналов привело к последовательному штатному отключению сначала одного III канала, а затем – второго канала БЦВМ. Уже по признаку отключения (отказов) двух из трех каналов неадаптивной мажоритарной структуры БЦВМ система управления отработала штатную циклограмму АПП. Кроме выявленного недостатка алгоритма контроля каналов, который квалифицировал одиночные сбои как устойчивые отказы, весомой предпосылкой к аварии при отказе двух из трех каналов явилась невозможность перестройки неадаптивной мажоритарной структуры БЦВМ на один работоспособный канал для продолжения полета. Применение адаптивного мажоритарного органа с блоком контроля и управления перестройкой структуры цифровых систем позволяет избежать подобного недостатка и повысить отказоустойчивость СУ при отказе ее 2-х каналов. Эти устройства могли бы предотвратить потерю дорогостоящей ракеты и гибель ее шести иностранных спутников, которая обошлась Украине в миллионы долларов штрафных санкций. На базе такого адаптивного мажоритарного резервирования была создана БЦВМ для самой мощной стратегической ракеты, которой специалисты из Пентагона дали название «Satan» за ее непревзойден-

ные способности автономного маневрирования и технические показатели [1]. А специалисты из Boeing и NASA за высокую надежность БЦВМ доверили ей управление международной космической станции «Альфа» в качестве центрального бортового компьютера базового модуля «Заря».

Дальнейшими возможностями для повышения надежности автономных цифровых систем управления (ЦС) не только ракетно - космических комплексов (РКК), а также зенитно - ракетных (ЗРК) и авиационных систем управления, обладают **многоярусные** адаптивные мажоритарно-резервированные структуры (МАМРС) с встроенными устройствами контроля и управления их реконфигурацией (УКР). Такие структуры позволяют реализовать различные типы адаптации к отказам.

Цель статьи – разработка на структурной базе МАМРС с двухпараметрической адаптацией алгоритма управления техническим состоянием СУ ЛК по признакам его основных режимов функционирования для повышения технической и оперативной готовности комплекса в наземных режимах и отказоустойчивости ЦС в режиме полета его летательного аппарата.

Устройство МАМРС и правила управления ее реконфигурацией. В многоярусной АМРС адаптивные мажоритарные органы (АМО) размещаются не только на выходе системы, а также на промежуточных участках (ярусах) последовательного резервированного цифрового канала. Благодаря этому МАМРС обладает исключительной устойчивостью к сбоям и отказам за счет их временной и поразрядной селекции на промежуточных участках (ярусах) с помощью мажоритарных органов последовательного резервированного канала ЦС.

Для аппаратной реализации адаптивной мажоритарной многоярусности предлагается применять специальные схемы АМО, управление которых осуществляют устройства контроля и реконфигурации (УКР) резервированной структуры. Функциональная одноразрядная схема такого АМО, получившего название «управляемого мажоритарного блока транзитного» (УМБТ) [2], изображена на рис.1. Таблица соответствия его сигналов объясняет правило формирования с его помощью пяти конфигураций трехканальной структуры яруса МАМРС - системы, схема которой изображена на рис.2:

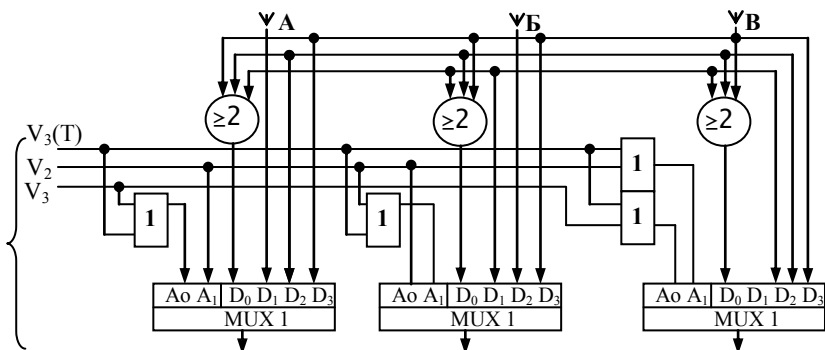
1) мажоритарная конфигурация, обеспечивающая маскирование сбоев и отказов одного канала в ярусах (на рис.2 условно показано, что в этой конфигурации находятся яруса № 2 и № k);

2) одноканальная конфигурация яруса (ОКФ) по каналу А, которая обеспечивает работоспособность яруса при отказе его двух каналов: Б и В;

3) одноканальная ОКФ по каналу Б;

4) одноканальная ОКФ по каналу В, которая условно показана на рис.2 для яруса №3;

5) «транзитная» конфигурация (для яруса №1, рис.2), которая формируется соединением с помощью управляемого коммутатора транзита (УКТ) одноименных каналов соседних ярусов с выключением мажори-



Конфигурация яруса	Управляющие входы УМТ			MUX1	MUX2	MUX3
	V1	V2	V3	A ₀ A ₁ / Вых	A ₀ A ₁ / Вых	A ₀ A ₁ / Вых
мажоритар	0	0	0	00 / М	00 / М	00 / М
однокан. А	1	0	0	10 / А	10 / А	10 / А
однокан. Б	0	1	0	01 / Б	01 / Б	01 / Б
однокан. В	1	1	0	11 / В	11 / В	11 / В
транзит.	0	0	1	10 / А	01 / Б	11 / В

тарных элементов в УМБТ.

Рис. 1. Функциональная одноступенчатая схема УМТ и таблица соответствия сигнала «вход / выход» ярус k

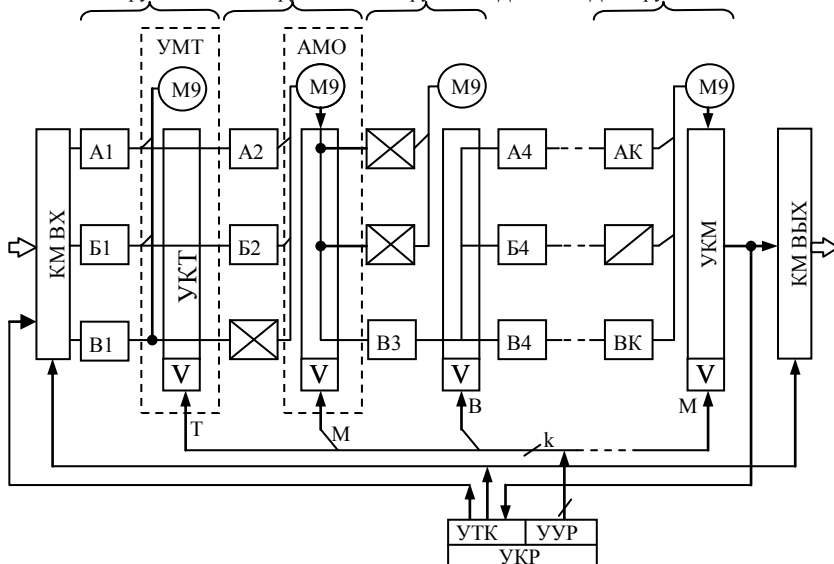


Рис. 2. Структурная схема многоярусной адаптивной МРС с встроенным устройством тестового контроля и управления реконфигурацией

Управление реконфигурацией по ярусам осуществляется устройствами контроля и реконфигураций (УКР), которое условно показано на рис.2 и состоит из устройства тестового контроля (УТК) для тестирования на работоспособность конфигураций ярусов и устройства управления реконфигурацией (УУР) для их переключения по определенному алгоритму. Разработана функциональная схема такого УКР для многоярусной адаптивной мажоритарно - резервированной структуры [3]. Количество УМБТ для многоярусной структуры и, следовательно, количество ее мажоритарных ярусов (**к**) определяется с помощью «методики оптимальной декомпозиции» [4].

С помощью УМБТ многоярусная адаптивная мажоритарно - резервированная структура реализует процесс автоматического восстановления работоспособности ЦС при отказах двух каналов в мажоритарных ярусах путем перестройки таких ярусов в одноканальную конфигурацию по исправному каналу (ОКФ). При этом УУР устройства контроля МАМРС может реализовывать два типа алгоритма поиска ОКФ, отличающихся временем проведения и глубиной контроля. «Алгоритм полного перебора» выявляет не только отказы двух каналов, но и все одноканальные отказы, замаскированные мажоритарными органами ярусов, путем тестовой проверки всех возможных одноканальных конфигураций всех ярусов. «Алгоритм ускоренного поиска» определяет только ярусы с отказами двух каналов для их перестройки в ОКФ, уменьшая время восстановления за счет сокращения проверок числа одноканальных конфигураций [1, 3].

Процесс функционирования МАМРС - системы можно условно разделить на 3 режима с точки зрения правил управления ее структурой:

1) режим «поддержания безотказности», в котором осуществляется длительное рабочее функционирование системы; при этом ярусы МАМРС находятся в мажоритарных конфигурациях, маскируя свои и одноканальные отказы;

2) режим контроля текущего технического состояния (ТТС) цифровых систем управления, для выполнения которого допускается кратковременное прерывание рабочего функционирования ЦС для реализации «Алгоритма полного перебора»;

3) режим восстановления работоспособности, который выполняется в условиях ограничений на время прерывания (что характерно для режима полета летательного аппарата) и реализуется с помощью «Алгоритма ускоренного поиска» работоспособной конфигурации.

Алгоритм управления техническим состоянием СУ ЛК. Такие возможности управления МАМРС - структурой позволяют реализовать для СУ ЛК процессы (алгоритмы) управления их техническим состоянием в зависимости от особенностей и показателя надежности основных режимов

работы РКК, ЗРК или авиационного комплекса. Системы управления этих комплексов имеют не только общие конструкционные черты. Процессы функционирования их СУ, с точки зрения применения летательных аппаратов (ЛА), можно объединить в 4 основных режимах работы:

1) режим поддержания постоянной готовности (режим «дежурства»), который характеризуется длительностью ненагруженного функционирования и возможностью понижения готовности для проведения диагностирования, технического обслуживания и ремонта;

2) режим технического обслуживания и ремонтно - восстановительных работ (РТО), который требует понижения готовности комплекса для проведения ремонтных работ по устранению неисправностей – замены неисправных модулей аппаратуры СУ;

3) режим (а точнее подрежим для первого) проведения автоматизированных проверок СУ, который требует кратковременного прерывания рабочего режима функционирования и минимального понижения готовности;

4) режим основной работы – применения летательного аппарата комплекса, который характеризуется ограничением на время восстановления работоспособности (на время прерывания основного функционирования) СУ при отказах, что характерно для бортовой аппаратуры во время полета ЛА.

Схема алгоритма управления техническим состоянием ЦС летательного комплекса по признакам режимов его функционирования изображена на рис.3. Содержание операторов «Алгоритма управления» состоит в следующем. Система управления имеет МАМРС – структуру, которая характеризуется (оператор 1 схемы алгоритма) оптимальным по безотказности числом k ярусов, определенным для заданного времени восстановления числом k_B и соответственным количеством УМБТ k_T ($k_T = k - k_B$), а также определенным в УУР «Алгоритмом ускоренного поиска»: $S_{МАМРС}(k, k_B, A^II)$. Значение k_B определяется зависимостью времени восстановления (T_B) от времени выполнения тест-команды (T_T) и количества ее повторов по числу возможных конфигураций 4^{k_B} :

$$T_B = T_T 4^{k_B}. \quad (1)$$

В зависимости от управляющего сигнала СУ (оператором 2) выбирает режим работы:

- «дежурства» - для поддержания постоянной (технической) готовности;
- «пуск-полет ЛА» – основной режим применения комплекса.

В процессе «дежурства» (оператор 3) реализуется рабочий режим поддержания технической готовности, который характеризуется нахождением АМО ярусов МАМРС в мажоритарной конфигурации. За счет многоярусного мажоритирования сбоев и одноканальных отказов обеспечивается выполнение условия технической готовности

$$P_{МАМРС}(k, t) > P_{ТРЕБ}(t). \quad (2)$$

Контроль работоспособности СУ выполняется в рабочем такте БЦВМ с помощью тест - программы УТК (по схеме алгоритма - «тест -

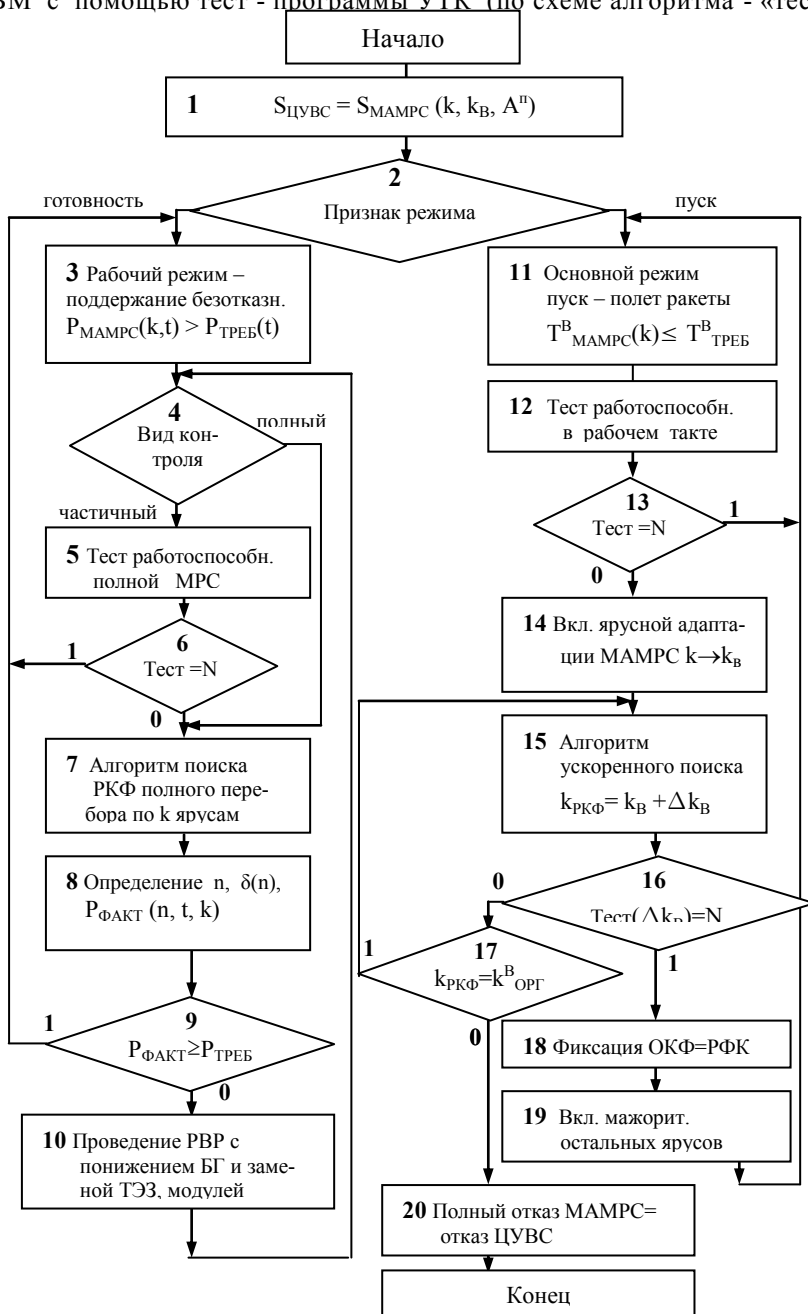


Рис.3. Схема алгоритма управления техническим состоянием ЦС ЛА (работоспособности») без прерывания функционирования СУ - оператор 5. Так, например, организован рабочий контроль БЦВМ стратегической ракеты [1], которая была успешно и дешево конверсирована в космический носитель «Дніпро». Его два успешных пуска из шахтных пусковых установок Байконура показали отличные характеристики БЦВМ и ракетносителя по выводу на орбиту спутников различного назначения. В условиях отлаженного производства этих ракет, а также готовых 200 ракет на складах ракета «Дніпро» могла быстро и значительно расширить сферу влияния Украины на международном рынке космических запусков, если бы не ликвидация в 1998 году 190 этих ракет под контролем американцев для «безъядерного статуса» Украины.

Однако, тест работоспособности оператора 5 алгоритма не выявляет замаскированные мажоритарными отказами одного канала в ярусах, накопление которых в процессе длительного дежурства снижает показатель безотказности (2) системы. Поэтому с некоторой периодичностью, в зависимости от обстановки дежурства, иницируется программа полного контроля в виде «Алгоритма полного перебора» всех одноканальных конфигураций всех k ярусов (оператор 7). Этот алгоритм проверки принудительно включается в случае получения УТК ненормы теста работоспособности ($N = 0$ оператора 6). В результате проверки всех одноканальных конфигураций всех k ярусов определяется количество n «фактических» отказов МАМРС (оператор 8). На основании этого значения n вычисляется вероятностный критерий «относительных потерь безотказности» $\delta(n)$ по формуле (оператор 8):

$$\delta(n) = 1 - \frac{\prod_{i=1}^{k_0} P_n^i(n, t)}{\prod_{i=1}^k P^i(t)}, \quad (3)$$

где k_0 - число ярусов с отказами ($n \geq k_0, k \geq k_0$); $P_n^i(n, t)$ - вероятность безотказной работы (ВБР) яруса с учетом неисправностей из числа n ; $P^i(t)$ - ВБР i -го исправного адреса.

Таким образом, оператор 7 реализует полный контроль системы путем полного перебора всех ее конфигураций по ярусам. По результатам такого диагностирования оператор 8 запоминает количество n отказавших каналов и номера их ярусов, производит расчет значения «потерь безотказности» $\delta(n)$ по формуле (3), на основании которого определяется «фактическое» (или «текущее») значение показателя $P_{\text{факт}}(n, k, t)$ безотказности системы

$$P_{\text{факт}}(n, k, t) = P_{\text{МАМРС}}(k, t) \cdot \delta(n). \quad (4)$$

Решение на продолжение дежурного функционирования с допустимым уровнем «потерь» или на начало ремонтно-восстановительных работ принимается оператором 9 на основании условия требуемой надежности (2). В случае его невыполнения организуется второй режим работы СУ и комплекса – техническое обслуживание и ремонт путем замены модулей (блоков) аппаратуры с ярусами, в которых обнаружены отказы 2-х каналов, а при наличии временных и стоимостных возможностей – замена элементов аппаратуры с отказами одного канала ярусов. При этом номера (адреса) всех ярусов с отказами определены «Алгоритмом полного перебора», в процессе которого 3-4 раза тестируется каждый ярус МАМРС, а его адрес запоминается в специальном регистре УУР.

При получении сигнала на пуск летательного аппарата СУ комплекса организует основной режим, который характеризуется максимальной интенсивностью автономного функционирования, ограничением на время восстановления ($T_{\text{ТРЕБ}}^B$) работоспособности системы

$$T_{\text{МАМРС}}^B(k) \leq T_{\text{ТРЕБ}}^B, \quad (5)$$

и максимальным использованием на ее обеспечение всех ресурсов мажоритарного резервирования в условиях относительно непродолжительного и, часто, одноразового применения ЛА (ракеты).

В рабочем такте функционирования (аналогично оператору 5) проводится «тест-работоспособности» МАМРС – структуры (оператор 12). При обнаружении ненормы теста ($N=0$: оператор 13) «включается» ярусная адаптация МАМРС путем переключения УМБТ в состояние «транзит» В результате этого количество ярусов МАМРС уменьшается с k до значения k_B , которое удовлетворяет ограничению на время (1). На множество k_B реализуется «Алгоритм ускоренного поиска» (оператор 15), в ходе которого выполняется постепенное обратное переключение части УМБТ из состояния «транзит» в состояния «мажоритар» или одноканальные конфигурации по определенному «Алгоритмом» числу Δk_B : $k_{\text{РКФ}} = k_B + \Delta k_B$. При обнаружении работоспособной одноканальной ОКФ отказавшего яруса она фиксируется, а остальные ярусы переключаются вновь в мажоритарную конфигурацию для продолжения основного режима системы (оператора 16 → 18 → 19 → 11).

Дополнительным контролем выполнения ограничения на время восстановления служит условие (оператор 17) достижения числа « $k_{\text{РКФ}}$ » тестируемых конфигураций своего предельного значения $k_{\text{орп}}^B$, определяемым значением $T_{\text{ТРЕБ}}^B$ из (1). Полный отказ системы классифицируется оператором 20 по признакам:

- нарушения условия управляемости ЛА по времени восстановления

работоспособности, в течение которого не будет обнаружена работоспособная ОКФ при достижении числе «размажоритированных» ярусов значения $k_{огр}^B$ (оператор 17);

- отказа последнего третьего канала в ярусе, который находился в одноканальной конфигурации в результате предыдущих восстановлений.

Заключение. Предложенная для системы управления летательного комплекса МАМРС – структура позволяет:

1) для поддержания работоспособности в условиях жестких ограничений на время восстановления реализовать адаптацию по двум параметрам:

- по пороговой функции адаптивных МО ярусов, осуществляя с их помощью перестройку на один исправный канал для повышения отказоустойчивости при отказе двух каналов;

- по числу ярусов в многоярусной структуре для выполнения требований по ограничению времени восстановления;

2) контролировать текущее значение показателей безотказности в ходе длительного функционирования комплекса с целью повышения безотказности и готовности за счет уменьшения ее потерь на плановые периодические РТО. Такие свойства МАМРС позволяют адаптировать процессы поддержания безотказности к условиям функционирования СУ летательных комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков Е.Б., Филимонов А.А., Кобяков В.А. Межконтинентальные баллистические ракеты СССР (РФ) и США / Под ред. Е.Б. Волкова – М.: МО РФ, 1996. – 376 с.

2. Харченко В.С., Зенин А.П., Склад В.В. Методы многопараметрической адаптации бортовых управляющих и вычислительных систем с разделным мажоритарным резервированием // *Космічна наука і технологія*. – 1999. – Том 5, № 5/6. – С. 81 - 92.

3. Зенин А.П., Харченко В.С. и др. Адаптивная мажоритарно-резервированная система с контролем и управляемой реконфигурацией. Заявка №93005327 от 30.06.93. НПО «Хартрон». Принята на правовую охрану патента Украины.

4. Харченко В.С., Зенин А.П. и др. Структурная организация отказоустойчивых и живучих систем летательных комплексов: Учебное пособие. – Харьков: МО Украины, 1992. – 232 с.

Поступила в редколлегию 1.03.2001