

ЭВОЛЮЦИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ БЦВК И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ РАЗВИТИЯ НА ОДНОКРИСТАЛЬНЫХ МИКРО - ЭВМ

к.т.н. Н.К. Байда, д.т.н. А.И. Кривоносов, к.т.н. И. В Лысенко,
д.т.н. В.С. Харченко, Ю.Б. Юрченко

В статье приводятся результаты исследований структур и вариантов построения отказоустойчивых бортовых цифровых вычислительных комплексов (БЦВК), пути решения проблем, возникающих при разработке отказоустойчивых ЦВК на однокристалльных микро - ЭВМ.

Введение. Современная элементная база позволяет разрабатывать системы управления (СУ) ракетами – носителями (РН) и космическими аппаратами (КА), учитывая рост требований к быстродействию и ограничения по энергопотреблению, массе и габаритам. Однако, одной из основных задач при проектировании СУ и бортового управляющего вычислительного комплекса (БУВК) остаётся обеспечение заданного выходного уровня надёжности.

Цель статьи – эволюционный анализ архитектур, характеристик и методов обеспечения отказоустойчивости БЦВК, созданных на предприятии «ХАРТРОН», а также новых решений, реализованных в последних разработках НПП «Хартрон-АРКОС» на базе однокристалльных микро - ЭВМ.

1. Этапы развития теории мажоритарного резервирования и адаптивных мажоритарных систем. Хорошо известно, что требования к надёжности и безотказности систем критического применения постоянно повышаются. В этих условиях многоярусное мажоритирование является мощным средством повышения отказоустойчивости. Исторически сложилось, что существуют два способа повышения надёжности: 1) повышение безотказности элементной базы; 2) введение избыточности (резервирование). Что касается резервирования, то при реализации устройств, одинаковых с функциональной точки зрения и работающих одновременно, возникает задача идентификации отказавших блоков. Способ решения этой задачи был впервые предложен фон Нейманом в 1956 г. Основная идея состояла в использовании мажоритарного элемента, вырабатывавшего выходной сигнал в соответствии со значением сигнала, снимаемого с выходов резервируемых устройств. Дальнейшее развитие идей фон Неймана в 60-х годах связано с именами таких учёных, как Лоуренс, Пирс, Доманицкий. В частности, Пирс предложил использовать пороговые элементы (рис.1) [1].

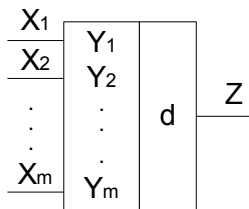


Рис. 1. Пороговый элемент

Функционирование порогового элемента с m входами и одним выходом описывается соотношением

$$z = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^m y_i x_i \geq d; \\ 0, & \text{если } \sum_{i=1}^m y_i x_i < d, \end{cases}$$

где веса входов y_i и порог d описываются конечными вещественными числами.

Мажоритарная логика, лежащая в основе метода мажоритарного резервирования, является частным случаем пороговой логики. В данном случае справедливо соотношение $d=(m+1)/2$, поэтому критерием отказа системы служит отказ более половины устройств. На практике наибольшее распространение получили системы, у которых $m = 3, z = 2$ [2].

Одним из первых опытов использования 3-х входовых мажоритарных элементов имел место в начале шестидесятых годов при реализации ракеты “Сатурн - V”.

Общему мажоритарному резервированию свойственны те же недостатки, что и общему постоянному резервированию. Это предъявляет высокие требования к надёжности мажоритарного элемента. Для устранения этого недостатка применяют резервирование самих мажоритарных элементов, как сетевое мажоритарное резервирование (рис.2). Надёжность систем может быть также повышена применением ярусного мажоритарного резервирования (рис.3).

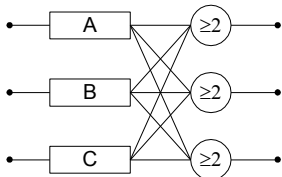


Рис. 2. Сетевое мажоритарное резервирование

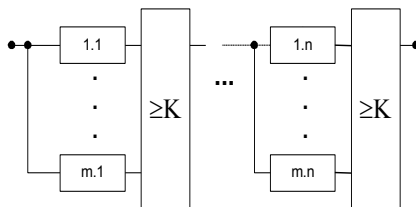


Рис. 3. n – ярусная структура с m входовыми мажоритариями

Очевидным недостатком рассмотренных мажоритарных структур, в частности трёхканальных, является то, что системы с такой организацией теряют работоспособность при отказе двух каналов и наличии одного работоспособного канала. Учесть этот резерв повышения надёжности можно двумя основными способами либо путём организации перехода на работоспособный канал, либо путём приспособления мажоритарного элемента к изменяющимся условиям эксплуатации и состояниям каналов [3]. В последней реализации мажоритарный элемент должен:

- производить мажоритирование до появления отказа второго канала;
- фиксировать факт второго отказа;
- определить работоспособный канал;
- обеспечить перестройку на работоспособный канал.

Анализ мажоритарно резервированных систем с адаптацией позволяет сделать следующие выводы: 1) использование адаптивных восстанавливающих органов позволяет существенно повысить надёжность систем, особенно при невысокой надёжности резервируемых каналов; 2) эффект от применения таких систем значительно зависит от вероятности правильной идентификации работоспособного канала, то есть характеристик средств контроля и диагностирования [4].

2. Эволюция отказоустойчивых БЦВК разработки «ХАРТРОН». Основы мажоритарно резервированных структур легли в основу БЦВК, разрабатываемых в «ХАРТРОН» с 1972г для СУ РКТ. Первый опыт был реализован в БЦВМ 15Л579. В данной БЦВМ аппаратное мажоритирование осуществлялось при выдаче информации по предварительной программно синхронизированной команде. Мажоритирование промежуточной и входной информации осуществлялись программными средствами (рис.4).

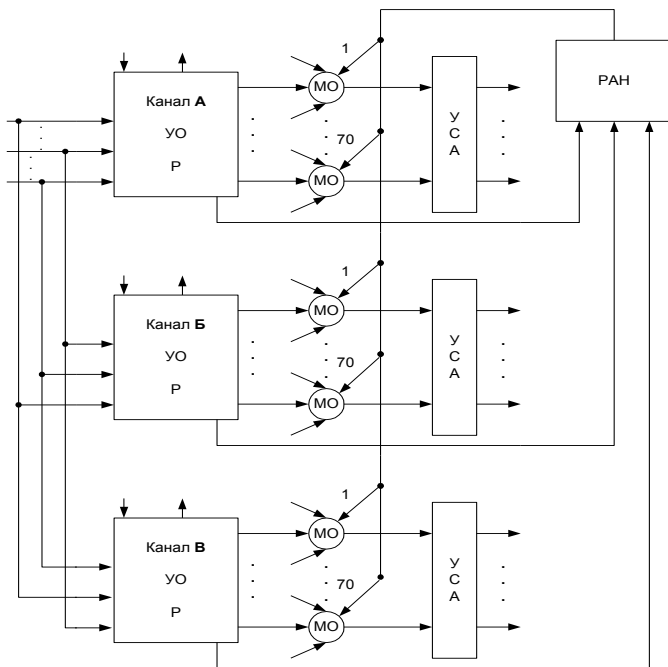


Рис.4. Структура надежности БЦВМ 15Л579

Таким образом, программно - аппаратное резервирование универсально-

го оборудования (УО) каналов, реализованное по схеме «2 из 3» оборудованием мажоритаров (МО), обеспечивало заданный начальный уровень надёжности для аппаратуры управляемой сигналами (УСА). Кроме того, в аппаратуре был заложен релейный анализатор неисправностей (РАН) каналов, который осуществлял перестройку на исправный канал при обнаружении отказа второго канала в БЦВМ. При одном из пусков РН данный механизм сработал успешно, и задача СУ была полностью выполнена. Этим подтвердилась истинность алгоритма обеспечения надёжности 3-3-1 при одноярусном построении БЦВК.

Построение БЦВК с аппаратным многоярусным мажоритированием впервые реализовано в БЦВМ М4 (рис.5), разработанной в 1975г.

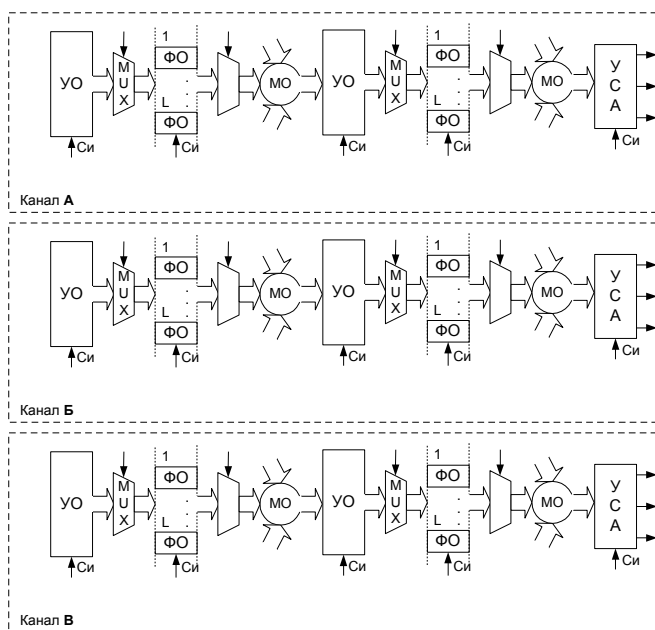


Рис.5. Структура надёжности БЦВМ М4м

Полностью аппаратное обеспечение безотказной работы в БЦВМ М4 произвело революцию в части программ. Во - первых, трехканальный БЦВК с точки зрения программиста стал существовать как одноканальный, во - вторых, уменьшились потери времени на необходимую временную синхронизацию каналов при обращении к аппаратуре ввода - вывода, а в - третьих, программистам больше нет необходимости следить за поканальным состоянием информации и программно мажоритировать промежуточные данные в каналах и обеспечивать межканальный обмен.

В структуре надёжности М4 и М4м вводятся новые понятия с точки зрения анализа надёжности оборудования: УО – универсальное оборудование,

ФО – функциональное оборудование. Многоярусная структура позволяла накапливать отказы по одной неисправности в каждом ярусе и оставаться работоспособной.

Реализация многоярусной структуры потребовала жёсткой синхронизации информации (СИ) по ярусам введённого в М4м (1977г). Помимо этого, было введено построение такта задачи по жёсткому временному интервалу и введён программный тест оборудования по окончании задачи в такте.

Повышение интегральности элементной базы, появление первых БИС и, как следствие, стремление к магистральности в архитектуре ЦВК привело к построению многоярусно мажоритированного БЦВК М6м (1983г) с возможностью адаптации структуры в пределах каждого яруса на один из каналов (ОК) (рис.6). Эта функция выполнялась блоком адаптации структуры ЦВК.

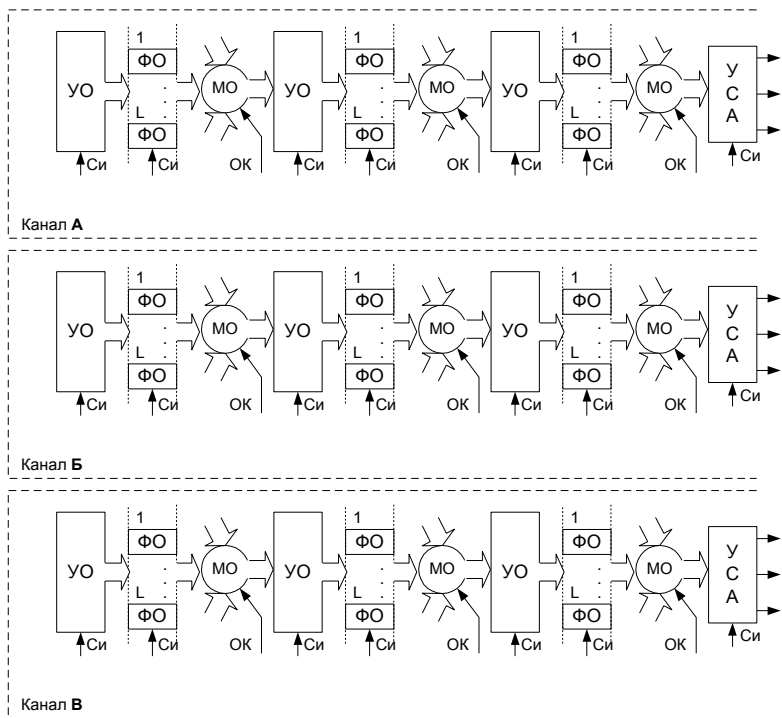


Рис.6. Структура надежности БСVM М6м

Повышение частоты задающего генератора в данном ЦВК повышает вычислительную производительность и приводит к требованию синхронизма информации по каждому ярусу. Нарастивание интегральности БИС привёл к тому, что в БСVM М7 (1990г) ярус оборудования представлялся одним БИС ЧП точки мажоритирования были переведены только на магистрали. Этот факт накладывал повышенные требования к поярусной синхронизации.

Неравнонадёжность ярусов в М6м и М7 учитывалась коррекцией каналов по функциям через специальный механизм синхронизации.

Таким образом, принципы мажоритирования с момента их реализации в 15Л579 получили своё развитие в разработках БЦВК с элементной базой СИС, БИС, СБИС как в аппаратном, так и в программном аспекте. При этом следует отметить, что при возрастании интегральности БИС и производительности БЦВК, требования к синхронизации каналов увеличивались [3].

3. Современные проблемы развития отказоустойчивых БЦВК на базе однокристалльных микро-ЭВМ. Рассмотренные выше БЦВК предназначались для систем управления объектами, которые разработаны 20-30 лет назад. В последнее время Украине представилась возможность реализовать свой научно-производственный потенциал в области РН и систем выведения КА на орбиты с высокой заданной точностью. Данная ситуация требует изготовления не только РН, но и СУ, для этих РН. Изготовление СУ в полном объёме по отработанной документации невозможно. Основная проблема – воспроизведение БЦВК. Именно для данного компонента СУ отсутствует в изготовлении, заложенная в документации, элементная база.

Анализ существующих СУ показал необходимость построения новых БЦВК с сохранением синхронной, аппаратно - мажоритированной, трехканальной структуры. Как показано ранее, такие структуры более стойкие к различным воздействиям. Стремительно выросшая интегральность процессорных элементов сделала невозможным доступ к основным узлам процессорного ядра.

Апробированные пути решения вопроса отказоустойчивости аппаратными средствами при построении систем управления на современной элементной базе наталкиваются на невозможность их непосредственного применения к процессорным элементам нового поколения. Проблема заключается в межканальном асинхронизме работы процессоров. Попытки прямого применения мажоритарных элементов к однокристалльным процессорам заканчивались потерей производительности системы в 10-30 раз по отношению к производительности используемого процессора. Дополнение же БИС процессоров встраиваемыми контроллерами периферийного оборудования и, фактически, превращение БИС в однокристалльные микро ЭВМ, ещё более затрудняют прямое применение отработанных решений по аппаратным средствам обеспечения отказоустойчивости.

Для исследования проблемы построения синхронно-трёхканального мажоритированного ЦВК на базе однокристалльных микро-ЭВМ был предложен метод имитационного моделирования средствами САПР БИС ЧП. Изучение однокристалльных процессорных элементов и построение их имитационных моделей средствами САПР позволили разработать на данной базе модель троированной структуры. Исследование работы полученной модели позволили выявить причины межканальной рассинхронизации процессоров (рис.7).

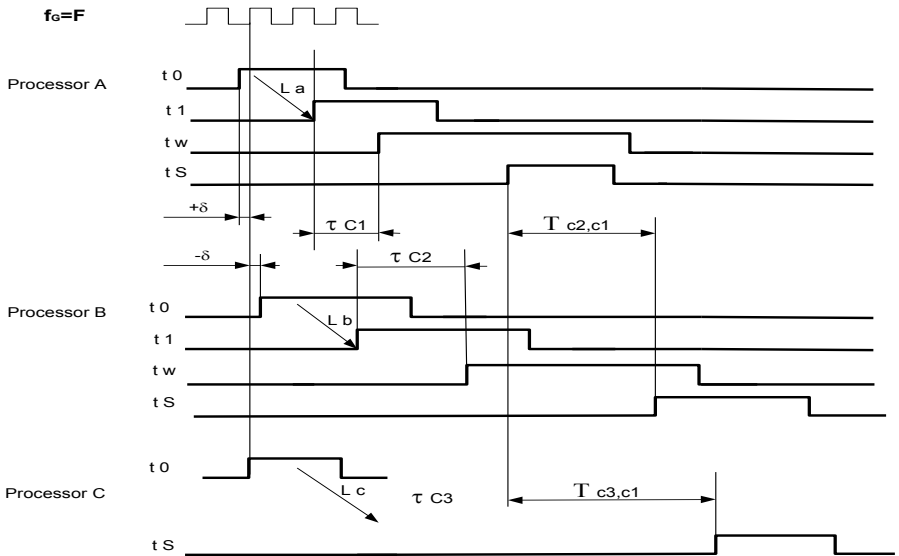
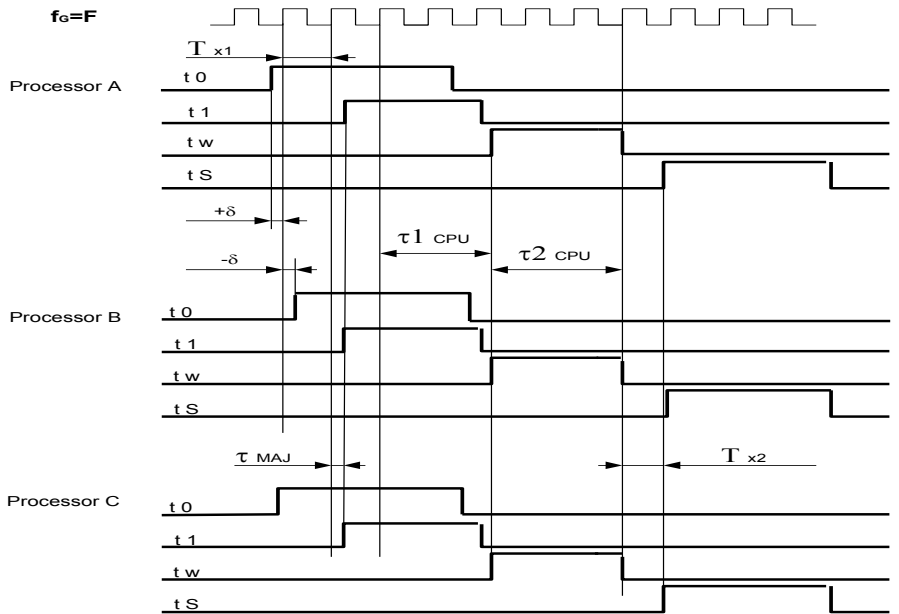


Рис.7. Диаграмма рассинхронизации асинхронных каналов ЦВК



t_0 – время подачи воздействия; t_1 – время захвата воздействия
 t_S – время выдачи результата; t_w – время входа в программу обработчика

Рис.8. Диаграмма синхронной работы каналов ЦВК

Намеченные пути решения задачи синхронизации дали положительный результат. Изучение описания процессорных элементов и исследование времён реакции на реальных образцах позволило уточнить разработанные ранее модели (рис.8). На основании результатов имитационного моделирования в 1995г. реализован проект синхронизированного мажоритарно резервированного трёхканального ЦВК на базе процессора INTEL 80c186XL [5]. Полное соответствие работы реальной аппаратуры имитационным описаниям модели подтвердила работа ЦВК под управлением MS DOS версий 3.30 и 6.22.

Построенная на уточнённой модели синхронная структура ЦВК обладает следующими преимуществами:

- работа может происходить на максимальной рабочей частоте процессоров;
- процессорные элементы работают синхронно на каждом цикле шины;
- есть возможность поставить элементы аппаратурного мажоритирования в любом доступном месте проекта ЦВК;
- временные потери на синхронизацию при внешних запросах на программные переходы лежат в пределах цикла шины процессора;
- временные потери по сигналам готовности аппаратуры ввода-вывода не превышают длительности такта частоты процессора;
- межканальная рассинхронизация по внешним сигналам процессоров не превышает максимального времени срабатывания логических элементов;
- процессорные элементы в полученной трёхканальной синхронной структуре работают аналогично одноканальной, как по программному обеспечению, так и по производительности.

Применение моделей работы процессорного ядра при построении синхронно - троированной мажоритированной структуры на базе микроконтроллеров, позволило разработать ЦВК специализированного назначения на базе микроконтроллера 80386EX.

В данной разработке подтвердились, отмечаемые в моделях, проблемы синхронизации встроенного в микроконтроллер, не доступного внешними аппаратными средствами, периферийного оборудования. Проблема синхронизации здесь может быть решена программными средствами, в частности средствами BIOS, опираясь на реализованные аппаратные возможности мажоритарной структуры ЦВК. Ожидаемые временные потери при программно-аппаратном мажоритировании будут минимальны.

Результаты исследований внедрены в НИП «Хартрон-АРКОС» при разработке систем управления на базе отказоустойчивых БЦВК специального применения. Последняя из разработок «Хартрон-АРКОС», одноплатный компьютер МБ386м, обладает такими характеристиками:

центральный процессор	- на базе контроллера 80386EX;
ёмкость ОЗУ / ЕEPROM	- 1 / 1 Мбайт;
быстродействие в MIPS	- 6,0 млн. коротких операций в секунду;
- по смеси Шаттл	- 1,336 млн операций в секунду;

обеспечение надёжности	- синхронно - троированная структура с мажоритированием на уровне магистралей и выводов БИС процессорного элемента;
связь с аппаратурой ввода-вывода	- синхронно-троированная, мажоритированная шина ISA; дублированный асинхронный канал по стандарту EIA RS485 (полудуплексе).

Выводы. 1. В процессе эволюции отказоустойчивые БЦВК прошли ряд этапов от аппаратуры ЦВМ на реле, дискретных транзисторах и т.п., до высокоинтегрированных БИС микро-ЭВМ.

2. Основной метод обеспечения надёжности, который применялся на всех БЦВК разработки «ХАРТРОН» – это мажоритарное резервирование, эволюция которого шла от неадаптивных одноярусных схем к многоярусным со схемно - программным анализом отказов и адаптацией мажоритаров на работоспособный канал в каждом из ярусов.

3. При использовании каналов ЦВК на основе микро-ЭВМ применение мажоритарно адаптивных методов обеспечения надёжности предъявляет жёсткие требования к межканальному синхронизму.

4. Решение проблемы синхронизации каналов в ЦВК на базе однокристалльных микро-ЭВМ позволяет применить апробированные аппаратные методы для обеспечения требуемого показателя надёжности без потери производительности относительно применённого процессорного элемента .

5. Построение синхронных, аппаратно - мажоритированных БЦВК с требуемым показателем надёжности на базе однокристалльных микроконтроллеров и микро-ЭВМ возможно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пирс У. Построение надёжных вычислительных машин. – М.: Мир, 1968. – 284 с.
2. Половко А.М. Основы теории надёжности. – М.: Наука, 1964. – 446 с.
3. Кривонос А.И. Методические вопросы проектирования и эксплуатации СЦВМ. – Харьков : НПО «Электроприбор», 1990. – 123 с.
4. Харченко В.С. Структурная организация отказоустойчивых и живучих систем летательных комплексов. – Харьков, 1992. – 112 с.
5. Кривонос А.И., Кулаков А.А., Байда Н.К. и др. Структурно - алгоритмическая организация и модели надёжности мажоритарно - резервированных систем // Космічна наука і технологія. – 1995. – Том 1, №1. – С. 74 - 79.

Поступила в редколлегию 5.07.2001