

Библиотека

по

А

В

Т

О

М

А

Т

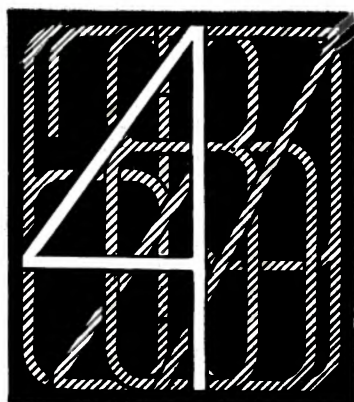
И

К

Е

И.В.Кузьмин, Р.Г.Бурназян,
А.А.Ковергин

АППАРАТНЫЙ КОНТРОЛЬ
ЭЛЕКТРОННЫХ ЦИФРОВЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
МАШИН



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

БИБЛИОТЕКА ПО АВТОМАТИКЕ

Выпуск 518

И. В. Кузьмин, Р. Г. Бурназян, А. А. Ковергин

АППАРАТНЫЙ КОНТРОЛЬ
ЭЛЕКТРОННЫХ
ЦИФРОВЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
МАШИН



«ЭНЕРГИЯ» МОСКВА 1974

6Ф7

К89

УДК 681.32—523.8.004.1

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

И. В. Антик, Г. Т. Артамонов, А. И. Бертинов, М. А. Боярченков, А. А. Воронов, Л. М. Закс, В. С. Малов, В. Э. Низе, Д. А. Поспелов, И. В. Прангишвили, О. В. Слежановский, Ф. Е. Темников, М. Г. Чиликин, А. С. Шаталов.

Кузьмин И. В. и др.

К89 **Аппаратный контроль электронных цифровых вычислительных машин.** М., «Энергия», 1974.

72 с. с ил. (Б-ка по автоматике. Вып. 518).

Перед загл. авт.: И. В. Кузьмин, Р. Г. Бурназян, А. А. Ковергин.

В книге рассматриваются такие виды аппаратного контроля цифровых вычислительных машин, как контроль по модулю, аппаратный контроль с применением дублирования и троирования основного оборудования ЦВМ. Подробно анализируются принципы построения и варианты технической реализации аппаратного контроля с применением дублирования оборудования.

Излагается сравнительная оценка эффекта от введения различных видов аппаратного контроля и контроля методом двойного счета в ЦВМ, предназначенных для решения научно-технических задач, и в управляющих ЦВМ.

Книга представляет интерес для инженеров, имеющих дело с разработкой систем контроля ЦВМ и эксплуатацией различных машин.

К 30502-354
051(01)-74 251-74

6Ф7

© Издательство «Энергия», 1974 г.

**Иван Васильевич Кузьмин
Рафаэль Гургенович Бурназян
Алексей Андреевич Ковергин**

Аппаратный контроль электронных цифровых вычислительных машин

Редактор *В. Н. Заболоцкий*
Редактор издательства *С. А. Лепорская*
Технический редактор *М. П. Осипова*
Корректор *Э. Б. Драновская*

Сдано в набор 24/1 1974 г. Подписано к печати 13/IX 1974 г.
Т-16821 Формат 84×108¹/₃₂ Бумага машиномелозанная
Усл. печ. л. 3,78 Уч.-изд. л. 5,14 Тираж 10 000 экз.
Зак. 637 Цена 27 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114,
Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров
СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время уделяется большое внимание повышению надежности цифровых вычислительных машин.

Надежность работы машины может характеризоваться средним временем между устойчивыми отказами (неисправностями), однако этот критерий является неполным. Наряду с устойчивыми отказами в ЦВМ имеются и самоустраняющиеся отказы (сбои), которые приводят к неправильным результатам вычислений. Кроме этого, немаловажным показателем надежности машины является ее ремонтпригодность, которая определяется сложностью структуры машины, ее конструкцией, системой контроля машины, а также квалификацией обслуживающего персонала, организацией обслуживания и т. п.

Все задачи, решаемые ЦВМ, можно разделить на два основных класса. К первому из них относятся задачи, к срочности правильного решения которых не предъявляются высокие требования. Некоторая задержка в решении таких задач в результате отказа или сбоя машины не приводит к аварийным ситуациям или катастрофическим последствиям. К задачам второго класса относятся задачи, от срочности решения которых зависит исход какого-либо управляемого процесса. ЦВМ, предназначенные для решения задач второго класса, будем называть управляющими (УЦВМ). К надежности таких машин предъявляются жесткие требования.

Проблемы надежности ЦВМ решаются тремя путями:

- 1) повышением надежности деталей и узлов;
- 2) построением надежных систем из ненадежных элементов за счет структурной избыточности (дублирование или утроение элементов или устройств машины, применение учетверенной логики [Л. 21] и т. п.);
- 3) применением контроля ЦВМ, увеличивающим достоверность функционирования машины и ее ремонтпригодность.

Задачами контроля работы ЦВМ являются обнаружение ошибок при решении задач за счет сбоев в работе машины, исправление этих ошибок и указание места отказавшего элемента с целью значительного уменьшения времени восстановления T_v .

Следует отметить, что указание места отказавшего элемента в неремонтируемых ЦВМ может быть целесообразным только для получения статистического материала по надежности устройств или элементов такой ЦВМ. Что касается ремонтируемых ЦВМ, то здесь указание места неисправности позволяет не только уменьшить T_v , но и существенно снизить требования к квалификации обслуживающего персонала.

В настоящее время вопросу разработки различных методов контроля работы ЦВМ уделяется большое внимание. Существующие методы контроля могут быть разделены на программный, аппарат-

ный (схемный) и комбинированный (сочетание программного с аппаратным). Каждый из них имеет свои положительные и отрицательные стороны.

Сравнительная характеристика методов контроля должна учитывать следующие факторы: надежность обнаружения сбоев; возможность исправления ошибок после сбоев без вмешательства оператора; время, затрачиваемое машиной на устранение случайных ошибок; количество дополнительного оборудования; влияние контроля на быстродействие ЦВМ или ее производительность; указание места неисправности с необходимой точностью места сбоя, что необходимо для анализа причин, вызывающих сбой.

Рассмотрим приведенные методы контроля с точки зрения удовлетворения сформулированных требований.

Сравнительная характеристика видов программного контроля. Программный контроль можно разделить на следующие виды: программно-логический, алгоритмический и тестовый.

Наиболее распространенная форма *программно-логического контроля* — это двойной счет со сравнением полученных результатов. В тех случаях, когда имеется возможность найти в программе вычислений какие-либо контрольные соотношения, вместо двойного счета применяют эти соотношения. Например, если вычисляются $\sin x$ и $\cos x$, то для проверки можно использовать контрольное соотношение $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$. К сожалению, не всегда удается найти подобные соотношения, а поэтому двойной счет является основным видом программно-логического контроля.

Программно-логический контроль (двойной счет) позволяет надежно обнаруживать сбой, и для его осуществления не требуется дополнительного оборудования. Однако при этом методе контроля более чем вдвое снижается производительность ЦВМ, не обнаруживаются систематические сбой, нельзя указать место отказа и тем более сбой, требуется дополнительная емкость памяти для программы вычислений.

Алгоритмический контроль заключается в том, что задача, решенная по какому-либо алгоритму, проверяется затем путем решения по сокращенному алгоритму. Например, при вычислении инте-

грала $\int_a^b f(x) dx$ с заданной точностью (шагом интегрирования)

можно в качестве сокращенного алгоритма использовать тот же самый алгоритм, но с большим шагом интегрирования. Очевидно, что при решении задачи по сокращенному алгоритму точность результатов вычислений будет ниже, чем по основному. Однако сравнение результатов при первом и втором счете позволяет оценить правильность решения задачи. При таком методе контроля производительность ЦВМ значительно выше, чем при двойном счете. По существу этот вид контроля является разновидностью программно-логического контроля и обладает теми же недостатками. Кроме того, он находит ограниченное применение, так как не всегда удается найти для основного алгоритма сокращенный, который был бы значительно короче основного.

Тестовый контроль, как правило, применяется для проверки работоспособности ЦВМ при помощи испытательных программ. Следует отметить, что при составлении испытательной программы (теста) надо в совершенстве знать логическую структуру машины и ее

особенности, для того чтобы тест приводил в рабочее состояние все элементы машины в различных сочетаниях режимов их работы, близких к тем, которые могут встретиться при решении всевозможных задач.

Тестовый контроль в отличие от программно-логического проверяет не процесс переработки информации, а пребывание ЦВМ в работоспособном состоянии и служит только для отыскания отказов и их прогнозирования при профилактических мероприятиях. Для отыскания неисправностей при помощи тестов, как правило, затрачивается много времени даже при высокой квалификации обслуживающего персонала, что является существенным недостатком данного метода. Кроме того, тестовый контроль не всегда обнаруживает сбои, так как в момент прохождения теста они могут и не возникнуть, и не всегда обнаруживает систематические сбои; во время проверки тестами ЦВМ не может решать задачи по рабочей программе, что в некоторых машинах совершенно недопустимо.

Несмотря на большое достоинство тестового контроля, которое заключается в отсутствии дополнительного оборудования, данный метод непригоден в тех ЦВМ, которые по условиям работы требуют значительного уменьшения времени восстановления.

В настоящее время широкое применение находят методы аппаратного (схемного) контроля и комбинированный метод, использующий как программный, так и аппаратный контроль.

Сравнительная характеристика методов аппаратного контроля. Аппаратный контроль в отличие от программного может обеспечить указание на наличие сбоя непосредственно в момент его возникновения, а это в свою очередь позволяет автоматизировать процесс исправления ошибок, вызываемых сбоями. Наряду с этим всесторонний аппаратный контроль позволяет свести к минимуму время обнаружения и указания места неисправного элемента ЦВМ.

Разработке методов аппаратного контроля и его внедрению уделяется большое внимание. К сожалению, в литературе эти вопросы освещены пока недостаточно широко. Опубликованный материал по вопросам аппаратного контроля работы ЦВМ позволяет указать на три основных вида такого контроля: 1) аппаратный контроль по модулю; 2) аппаратный контроль в системе из двух однотипных синхронно работающих ЦВМ; 3) аппаратный контроль при троировании оборудования с использованием мажоритарных элементов.

Контроль по модулю основывается на следующих принципах. Из теории чисел известно, что целое положительное число можно представить в виде сравнения:

$$A \equiv r_a \pmod{M}, \quad (1)$$

(читается: A сравнимо с остатком r_a модуля M), которое устанавливает следующее соотношение между числами A , r_a и M :

$$A = Ml + r_a,$$

где A , M , l и r_a — целые числа; A — любое контролируемое n -разрядное число; M — модуль или делитель; l — частное; r_a — остаток от деления числа A на модуль M (контрольный код числа A).

При данном методе контроля каждому контролируемому числу придается еще m дополнительных разрядов, в которые записывается контрольный код, т. е. остаток r_a . Если записать все числа в виде

сравнения (1), то после этого их можно будет складывать, перемножать, а результаты записывать в виде подобных сравнений:

$$\sum_{i=1}^p A_i \equiv \sum_{i=1}^p r_{a_i} \pmod{M}; \quad (2)$$

$$\prod_{i=1}^p A_i \equiv \prod_{i=1}^p r_{a_i} \pmod{M}. \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) означают, что сумма (произведение) чисел сравнима с суммой (произведением) остатков этих чисел по модулю M .

Техническое осуществление контроля по модулю заключается в том, что при помощи специальных схем, которые в технической литературе получили название схем «сверток», образуется остаток r_a . В этих схемах применяется комбинационный способ получения остатка [Л. 22]. К таким схемам предъявляется высокое требование по быстрдействию получения остатка, чтобы не снизить быстрдействие ЦВМ.

В [Л. 19] показано, что эффективность контроля (имеется в виду математическая сторона этого метода и не затрагивается надежность схем, при помощи которых осуществляется этот контроль) повышается с увеличением модуля. Однако с увеличением M непропорционально возрастает количество дополнительного оборудования и значительно усложняются схемы контроля. В табл. 1 приводятся данные, показывающие рост дополнительного оборудования с увеличением модуля M [Л. 2]. Для пояснения таблицы отметим, что при контроле по модулю 3 количество дополнительного оборудования составляет примерно 15% основного оборудования ЦВМ [Л. 22].

Таблица 1

Модуль контрольного устройства	Относительное количество единиц оборудования	Количество контрольных разрядов
3	1	2
5	1,8	3
7	3,5	3
15	13	4

При контроле по модулю сравнительно надежно обнаруживаются сбои, но этот метод имеет ряд существенных недостатков: 1) трудность применения данного метода для контроля узлов машины, в которых нет регистров (центральное устройство управления, местное устройство управления арифметическими и логическими операциями, местное устройство управления ОЗУ и др.); 2) усложнение труда обслуживающего персонала при отыскании неисправности в самой машине и в контрольном оборудовании; 3) требуется весьма значительное увеличение количества единиц контрольного оборудования для организации контроля, позволяющего с большой точностью (до сменного блока) указывать место неисправности [Л. 22].

Аппаратный контроль в системе из двух однотипных ЦВМ. В последние годы появились работы [Л. 2, 25], в которых рассматривается синхронная параллельная работа двух однотипных ЦВМ с целью организации эффективного аппаратного контроля.

В [Л. 2] приводится структурная схема дублированной ЦВМ (ДЦВМ) с применением схем сравнения информации на основных регистрах ЦВМ (регистры АУ, адресный регистр МОЗУ, регистр команд и др.). Высокая эффективность такого контроля по выявлению сбоев объясняется тем, что вероятность одновременного сбоя двух одинаковых элементов обеих машин исчезающе мала.

Недостатком предложенной структурной схемы является незначительная степень локализации места отказа (до устройства ЦВМ или в лучшем случае до крупного узла какого-либо из устройств).

Кроме того, описываемый в [Л. 2] вариант не позволяет осуществлять контроль таких цепей, где нет регистров, состоящих из триггеров, в связи с тем, что применены схемы сравнения, осуществляющие поразрядную операцию несоответствия по уравнению

$$z_k = x_k \bar{y}_k + \bar{x}_k y_k,$$

где x_k , y_k , z_k — соответственно величины на входах и выходе k -й ячейки схемы сравнения.

Более точная локализация места отказа (а при необходимости и места сбоя), например до сменного элемента (ячейки), при помощи устройства контроля в ДЦВМ позволяет решить такую важную задачу, как уменьшение времени восстановления T_v . При этом резко снижаются требования к квалификации обслуживающего персонала и его количеству.

Известно, что одним из методов повышения надежности работы электронных устройств является резервирование аппаратуры. Однако этот метод дает хорошие результаты в том случае, если резервные элементы или все устройство при выходе из строя сразу восстанавливаются [Л. 4]. Но для уменьшения времени восстановления требуется точное указание места неисправности сразу же после ее появления. В этом отношении параллельная работа двух ЦВМ с аппаратным контролем является одним из способов наиболее выгодного использования резервной аппаратуры.

Аппаратный контроль с применением троирования оборудования с элементами «голосования». В троированной ЦВМ наряду с увеличением вероятности безотказной работы увеличивается и достоверность функционирования за счет автоматического устранения последствий случайных сбоев при помощи мажоритарных элементов. Поэтому такой вид резервирования можно считать своеобразным видом контроля, так как при этом решается одна из задач контроля — увеличение достоверности функционирования ЦВМ.

В данной книге предложена методика аппаратного контроля с использованием дублирования оборудования и сделана попытка в основном качественной сравнительной оценки эффективности различных методов контроля.

Глава первая

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ КОНТРОЛЯ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТА ОТ ВВЕДЕНИЯ КОНТРОЛЯ

1. ВЛИЯНИЕ КОНТРОЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ НАДЕЖНОСТИ ЦВМ

Осуществление контроля ЦВМ требует введения дополнительно оборудования или непроизводительных затрат машинного времени. Все виды аппаратного контроля требуют избыточности оборудования, а программные методы контроля — непроизводительных затрат машинного времени. Очевидно, комбинированный контроль предполагает введение обоих видов избыточности. Существующие виды аппаратного контроля можно считать комбинированными, так как они практически требуют использования и программного контроля.

Каждый вид контроля определенным образом влияет на параметры надежности ЦВМ, т. е. на достоверность функционирования, коэффициент готовности и безотказность.

В табл. 2 сведены существующие виды контроля и качественно показано влияние контроля на параметры надежности ЦВМ. В таблице приняты следующие обозначения: K_r — коэффициент готовности; $P_6(\theta)$ — вероятность безотказной работы ЦВМ; $P_d(\theta)$ — достоверность функционирования ЦВМ.

Качественная характеристика существующих видов контроля не позволяет решить вопрос о том, какой вид контроля целесообразно применить в той или иной ЦВМ. Это объясняется тем, что каждая ЦВМ предназначается для решения определенного класса задач. Поэтому выбор необходимого (оптимального) вида контроля существенным образом зависит от назначения ЦВМ. С точки зрения характера решаемых задач все ЦВМ можно разделить на три основных класса: 1) ЦВМ для решения научно-технических задач (будем называть их просто ЦВМ); 2) восстанавливаемые управляющие ЦВМ; 3) невосстанавливаемые управляющие ЦВМ.

При выборе вида контроля необходимо определить некоторые критерии оценки эффекта от введения контроля данного типа ЦВМ и на основе этих критериев выбрать оптимальный. Необходимость такого подхода можно подтвердить хотя бы таким частным примером. Предположим, что существует вид контроля, позволяющий указывать место неисправности с высокой точностью. По-видимому, он даст значительно больший эффект в восстанавливаемых ЦВМ, нежели в невосстанавливаемых, так как в первом случае имеется возможность значительного увеличения коэффициента готовности ЦВМ, а во втором — получения некоторых сведений по неисправностям невосстанавливаемой ЦВМ.

В связи с этим кажется необходимой попытка отыскания основных показателей ЦВМ, по которым можно судить о целесообразности применения того или иного вида контроля.

Таблица 2

Вид контроля	Параметры			Примечание
	улучшаются	остаются без изменений	ухудшаются	
При помощи диагностических тестов Методом двойного счета	K_r $P_{\text{д}}(\theta)$	$P_{\text{д}}(\theta), P_{\text{в}}(\theta)$ $K_r, P_{\text{в}}(\theta)$	—	— Уменьшение производительности более чем в 2 раза Ухудшение K_r объясняется усложнением структуры ЦВМ
Аппаратный контроль по модулю	$P_{\text{д}}(\theta)$	—	$K_r, P_{\text{в}}(\theta)$	—
Аппаратный контроль при использовании дублирования оборудования: а) возможность автономной работы основного и дублирующего оборудования	$P_{\text{д}}(\theta), P_{\text{в}}(\theta), K_r$	—	—	Улучшение K_r объясняется возможностью автоматизации указания места неисправности
б) невозможность автономной работы основного и дублирующего оборудования	$P_{\text{д}}(\theta), K_r$	—	$P_{\text{в}}(\theta)$	—
Аппаратный контроль при проектировании оборудования с использованием мажоритарных элементов	$P_{\text{д}}(\theta), P_{\text{в}}(\theta)$	—	K_r	Ухудшение K_r объясняется усложнением структуры ЦВМ за счет мажоритарных элементов

2. ВЫБОР ВИДА КОНТРОЛЯ ЦВМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Предположим, что разрабатывается какая-то ЦВМ для решения научно-технических задач. На первых этапах разработки основное внимание уделяется логической структуре машины и элементам, из которых она должна состоять; на более поздних встает вопрос о контроле разрабатываемой машины. Для выбора необходимого вида контроля надо знать критерии, которые бы позволили найти оптимальный вид контроля.

Основным показателем таких ЦВМ может служить количество правильно обработанной информации за какой-то промежуток времени (например, месяц). Количество правильно обработанной информации N можно определить из выражения

$$N = N_0(T - T_{\text{пот}}),$$

где N_0 — среднее быстродействие ЦВМ (количество операций в секунду); T — время, в течение которого определяется производительность ЦВМ; $T_{\text{пот}}$ — потери времени в течение периода T .

Потери времени $T_{\text{пот}}$ можно определить из выражения

$$T_{\text{пот}} = T_{\text{в}}(T) + T_{\text{пр}}(T) + T_{\text{сб}}(T), \quad (4)$$

где $T_{\text{в}}(T)$ — потери времени на отыскание и устранение неисправностей в ЦВМ за период T ; $T_{\text{пр}}(T)$ — потери времени на профилактику за период T ; $T_{\text{сб}}(T)$ — потери времени на обнаружение сбоев и устранение их последствий за период T .

Составляющие правой части выражения (4) существенным образом зависят от вида контроля. Так, для обнаружения сбоев при помощи двойного счета затрачивается значительно больше времени, чем при аппаратных методах контроля, т. е.

$$T'_{\text{сб}}(T) \gg T''_{\text{сб}}(T),$$

где $T'_{\text{сб}}(T)$ — потери времени на обнаружение сбоев и устранение их последствий при двойном счете; $T''_{\text{сб}}(T)$ — то же при аппаратном контроле.

Применение аппаратного контроля связано с введением дополнительного оборудования, т. е. с удорожанием ЦВМ. Поэтому при сравнении программных и аппаратных методов контроля необходимо принимать во внимание не количество правильно обработанной информации за период T , а стоимость единицы количества правильно обработанной информации. В качестве единицы количества информации можно принять, например, одну выполненную операцию.

Выражение этой стоимости будет иметь следующий вид:

$$a = \frac{W}{N_0(T - T_{\text{пот}})}, \quad (5)$$

где a — стоимость выполнения одной операции; W — количество затрат на получение правильно обработанной информации за время T .

Нетрудно показать, что значение a в значительной степени зависит от вида контроля. С этой целью рассмотрим более подробно составляющие $T_{\text{пот}}$ в выражении (4) и составляющие W в выражении (5).

Среднее значение потерь времени на устранение неисправностей можно определить из выражения

$$T_v(T) = \frac{T}{T_0} T_v,$$

где T_0 — среднее время между отказами; T_v — среднее время восстановления.

Значения T_0 и T_v существенно зависят от вида контроля.

Некоторые профилактические работы связаны с созданием «тяжелых» режимов устройств ЦВМ, при которых «слабые» элементы ведут себя, как при отказе. Поэтому отыскание этих элементов почти не отличается от поиска неисправностей, которые появляются во время решения задач. В связи с этим потери времени на профилактику $T_{пр}(T)$ существенным образом зависят от вида контроля.

Количество затрат на получение правильно обработанной информации [Л. 16] за время T

$$W = W_1 + W_2,$$

где W_1 — стоимость оборудования ЦВМ; W_2 — затраты на ее эксплуатацию.

Составляющие W_1 и W_2 также зависят от вида контроля.

Таким образом, величину a (5) можно считать основным показателем ЦВМ, по которому следует определять целесообразность применения необходимого вида контроля.

3. ВЫБОР ВИДА КОНТРОЛЯ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ И НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ ЦВМ

Контроль восстанавливаемых УЦВМ. Управляющие ЦВМ находят широкое применение в самых различных областях деятельности человека и служат для управления всевозможными процессами. По своему назначению они значительно отличаются от ЦВМ, предназначенных для решения научно-технических задач.

Каждый управляемый УЦВМ процесс протекает в течение некоторого промежутка времени T_n . При этом можно выделить некоторые особенности управления процессом с точки зрения возможности или невозможности прерывания управления. Управление должно быть непрерывным: 1) в течение времени T_n перерывы в управлении недопустимы; 2) в течение времени T_n допустимы прерывания по причине появления неисправностей в УЦВМ.

Указанные особенности в значительной степени влияют на выбор необходимого вида контроля. Нельзя рассматривать этот выбор для УЦВМ вообще, надо учитывать назначение УЦВМ в смысле отмеченных особенностей управляемого процесса.

Основными показателями УЦВМ, предназначенными для управления ответственными процессами, прерывание которых недопустимо по причине неисправности или случайного сбоя УЦВМ, являются безотказность и достоверность функционирования. Следовательно, основным показателем таких УЦВМ можно считать вероятность правильного управления процессом в течение времени T_n . Считая появление неисправностей и появление случайных сбоев событиями независимыми, что с точки зрения выбора вида контроля допустимо, вероятность правильного управления процессом за период T_n можно найти из выражения

$$P(T_n) = P_6(T_n) P_d(T_n), \quad (6)$$

где $P_b(T_n)$ — вероятность безотказной работы УЦВМ за время T_n ; $P_d(T_n)$ — вероятность бессбойной работы УЦВМ за то же время.

Эти рассуждения справедливы в том случае, если значение $P(T_n)$ при отсутствии контроля достоверности является недостаточным и необходим контроль для увеличения $P(T_n)$. Если значение $P(T_n)$ является достаточным при отсутствии контроля достоверности, то основным показателем УЦВМ с точки зрения выбора вида контроля необходимо считать коэффициент готовности.

Рассмотрим УЦВМ, которые должны управлять процессом непрерывно в течение времени T_n , но допустимы прерывания в управлении из-за появления неисправностей в УЦВМ. Допустимость прерывания понимается в том смысле, что при появлении неисправности управляемый процесс либо приостанавливается без катастрофических последствий, либо продолжается без управления. Прерывание управления подобными процессами может быть связано с большими экономическими потерями или невыполнением какой-либо поставленной задачи. Поэтому основным показателем таких УЦВМ может быть или вероятность правильного управления процессом $P(T_n)$, или коэффициент готовности. Может произойти и такой случай, когда от УЦВМ потребуются минимальные потери времени в течение какого-то периода T , т. е. оптимальное соотношение между $P(T_n)$ и коэффициентом готовности.

Контроль невосстанавливаемых УЦВМ. Невосстанавливаемые УЦВМ находят широкое применение для управления такими процессами, при которых обслуживание УЦВМ по каким-либо причинам невозможно. Можно считать, что появление неисправности в такой машине приводит к прекращению управления процессом вообще. Вопрос появления случайного сбоя в работе УЦВМ требует специального рассмотрения.

Коэффициент готовности невосстанавливаемых УЦВМ существенного значения не имеет, так как восстановление возможно только перед подготовкой и установкой машины в цепь управления каким-то процессом. Всегда можно определить период подготовки УЦВМ, и за этот период провести на машине необходимые профилактические работы.

Важнейшими показателями надежности невосстанавливаемых УЦВМ являются безотказность и достоверность функционирования. Проблема надежности подобных УЦВМ становится более острой при увеличении времени, в течение которого планируется управление процессом. С увеличением этого времени вероятность появления неисправности или сбоя возрастает.

Известно, что не каждый выявленный сбой приводит к срыву решения задачи управления. Например, сбой в младшем разряде вычислителя окажет какое-то влияние на точность вычислений, но говорить о срыве управления процессом, по-видимому, нельзя. С точки зрения выбора вида контроля можно считать, что любой обнаруженный сбой приводит к срыву управления. Поэтому основным показателем невосстанавливаемых УЦВМ целесообразно считать вероятность правильного управления процессом, которая определяется из выражения (6).

АППАРАТНЫЙ КОНТРОЛЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДУБЛИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

4. АНАЛИЗ СИГНАЛОВ И ЦЕПЕЙ В РАЗЛИЧНЫХ ЦВМ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ СХЕМ КОНТРОЛЯ ДЦВМ

Все ЦВМ в зависимости от вида электрических сигналов, при помощи которых происходит переработка информации, можно разделить на три основных типа: импульсные (динамические), потенциальные и импульсно-потенциальные.

Рассмотрим импульсно-потенциальные ЦВМ. Отвлекаясь от логической структуры ЦВМ и рассматривая только сигналы в ней, можно отметить две характерные особенности: стандартность сигналов ЦВМ и последствие сигналов.

В дальнейшем под ЦВМ будем понимать все ее устройства (УУ, АУ, ОЗУ), кроме внешних электромеханических устройств. Поэтому под устройством контроля ЦВМ будем подразумевать устройство контроля только электронной части ЦВМ.

Под стандартностью сигналов импульсно-потенциальных ЦВМ понимается, что подавляющее большинство импульсных сигналов имеет одни и те же амплитуду и длительность, а потенциальные сигналы имеют одинаковые высокий и низкий уровни напряжения. Эта особенность ЦВМ позволяет свести к минимуму количество видов схем сравнения одноименных контролируемых сигналов $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$.

С целью восстанавливаемости все ЦВМ имеют блочную структуру. В случае выхода из строя какого-либо блока (ячейки) он обычно заменяется новым, а неисправный ремонтируется.

Каждый сменный блок имеет входные и выходные цепи, по которым проходят соответствующие электрические сигналы. Нормальная работа данного блока характеризуется тем, что определенной комбинации сигналов на входе соответствует вполне определенная комбинация сигналов на выходе. Другими словами, определенной комбинации входных сигналов и нормальному состоянию схемы блока y_i будет соответствовать некоторая система выходных булевых функций типа $F(z) = f(x_i, y_i)$. Неисправному состоянию схемы блока y^*_i при той же комбинации входных сигналов x_i будут соответствовать другие выходные функции $F(z) = f(x_i, y^*_i)$.

Обозначим одноименные блоки $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$ соответственно через B_i и B'_i . Очевидно, что при параллельной и синхронной работе $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$ необходимым условием указания места отказа (сбоя) с точностью до двух одноименных блоков является выработка сигнала ошибки при отказе в одном из блоков при помощи схем сравнения ($СхСр$) выходных одноименных сигналов.

Схема, реализующая это условие, приведена на рис. 1.

Учитывая последствие сигналов в ЦВМ, можно утверждать, что сформулированное условие не является достаточным. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Обозначим выходные одноименные контролируемые сигналы блоков B_i и B'_i через J_{in} и J'_{in} . Сигнал J_{in} воздействует на M_{in} других контролируемых сигналов $ЦВМ_1$, а J'_{in} — соответственно на M'_{in} в $ЦВМ_2$.

Очевидно, $M_{in} = M'_{in}$. Количество всех контролируемых сигналов ЦВМ₁ и ЦВМ₂ можно обозначить через A и A' ; при этом $A = A'$. В общем случае $M_{in} = M'_{in} \leq A$.

Нормальная, т. е. безотказная работа обеих ЦВМ характеризуется тем, что все пары одноименных контролируемых сигналов в любой момент времени имеют одинаковое состояние

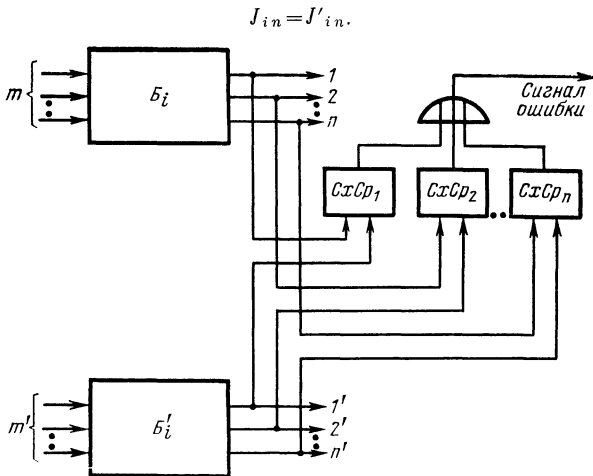


Рис. 1.

Естественно при этом, что число пар одноименных контролируемых сигналов, имеющих одинаковое состояние, совпадает с числом A (или M_{in}), т. е.

$$\left. \begin{aligned} P &= A; \\ Q &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где P — число пар одноименных контролируемых сигналов, имеющих одинаковое состояние в любой момент времени; Q — число пар одноименных контролируемых сигналов, имеющих различные состояния.

По аналогии с (7) $P_{in} = M_{in}$; $Q_{in} = 0$.

В момент отказа (сбоя) при выполнении какой-либо операции в ЦВМ₁ или ЦВМ₂ (в блоке B_i или B'_i)

$$J_{in} \neq J'_{in}.$$

При этом $Q_{in} \neq 0$ определяется из следующего выражения:

$$Q_{in} = M_{in} - P_{in}.$$

Нетрудно видеть, что в этом случае

$$Q_{in} \leq M_{in}. \quad (8)$$

Рассматривая выражение (8), приходим к выводу, что сигнал ошибки будет выделяться не только схемами сравнения блоков B_i и B'_i , но и другими схемами одноименных блоков ЦВМ₁ и ЦВМ₂, на которые воздействуют сигналы с блоков B_i и B'_i . Другими словами,

локализации мест отказа (сбоя) с точностью до двух одноименных блоков не произойдет.

Попытаемся использовать сигнал ошибки, который получается при отказе в блоках B_i и B'_i , для указания места отказа с точностью до двух этих блоков.

Прежде всего отметим, что сигнал ошибки должен выделяться схемой сравнения при любых видах отказов (сбоев).

Все виды отказов (сбоев) могут привести к следующим состояниям сигнала: полное пропадание сигнала (вместо 1 появляется 0); появление ложного сигнала (вместо 0 появляется 1); уход параметра сигнала за пределы нормы (для импульсных и потенциальных сигналов наиболее вероятным изменением является уменьшение амплитуды импульса или перепада напряжений потенциального сигнала).

В связи с этим при отказе в одном из блоков B_i или B'_i возможны три состояния двух одноименных контролируемых сигналов:

$$\left. \begin{array}{l} 1) J_{in} = 0; \quad J'_{in} = 1; \\ 2) J_{in} = 1; \quad J'_{in} = 0; \\ 3) |J_{in} - J'_{in}| \geq \alpha, \end{array} \right\} \quad (9)$$

где α — относительная величина изменения амплитуды напряжения одного из контролируемых сигналов J_{in} или J'_{in} .

Строго говоря, третье состояние в выражениях (9) в общем случае сводится к первому или второму, так как уменьшение значения амплитуды напряжения сигнала ниже допустимого равносильно полному пропаданию сигнала, а превышение допустимого значения амплитуды помехи — появлению ложного сигнала. Далее рассмотрим использование сигнала ошибки в целях локализации места отказа с точностью до двух одноименных блоков B_i и B'_i .

Если сразу после появления сигнала ошибки на выходе схем сравнения блоков B_i и B'_i этот сигнал подать в цепи всех выходных контролируемых сигналов ЦВМ₁ и ЦВМ₂, установить их в состоя-

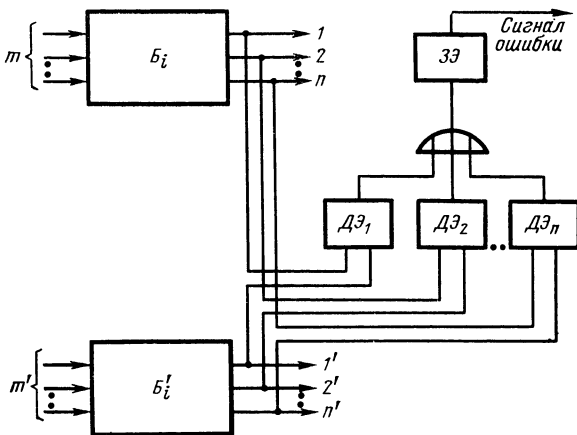


Рис. 2.

ние 0 и запретить изменение всех контролируемых сигналов, то обеспечится условие, которое зафиксировано в выражении (7). Такое состояние выходных контролируемых сигналов в $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$ соответствует остановке обеих машин сразу же после появления отказа в одном из блоков (B_i или B'_i). При этом сигнал ошибки будет зафиксирован только схемами сравнения, которые контролируют выходные сигналы блоков B_i и B'_i . Если схемы сравнения содержат запоминающий элемент сигнала ошибки, то задача указания места отказа (сбоя) с точностью до двух одноименных блоков B_i и B'_i будет решена.

На основании изложенного элементарную схему сравнения можно представить в виде сочетания дифференциального элемента (ДЭ), служащего для выделения сигнала ошибки, и запоминающего элемента (ЗЭ) для запоминания сигнала ошибки.

Под элементарной схемой сравнения понимается такая, которая может служить для контроля двух одноименных блоков B_i и B'_i , имеющих по одному выходному контролируемому сигналу. Когда блоки B_i и B'_i имеют n выходных контролируемых сигналов, то схема сравнения имеет вид, изображенный на рис. 2.

Понятия, изложенные в этом параграфе, будут в дальнейшем уточняться, а также будут рассмотрены различные варианты технической реализации описанной методики аппаратного контроля.

5. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ДЦВМ

Принцип построения устройства контроля ДЦВМ заключается в выделении сигнала ошибки схемой сравнения, контролирующей два одноименных блока, и использовании этого сигнала для установки в одинаковое состояние всех других одноименных выходных сигналов $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$.

В более общем случае этот принцип можно сформулировать так: построение устройства контроля ДЦВМ заключается в том, что сигнал ошибки выделяется только той схемой сравнения, которая контролирует неисправные два блока; исправные блоки при этом имеют одинаковые выходные сигналы, а потому на выходе их схем сравнения сигнал ошибки отсутствует.

Одним из основных элементов устройства контроля является элементарная схема сравнения. Основное назначение $СхСр$ заключается в выделении сигнала ошибки при помощи дифференциального элемента и запоминании сигнала ошибки с целью указания места отказа (сбоя).

Наиболее важными требованиями, предъявляемыми к $СхСр$, являются высокая надежность работы, небольшое количество деталей в схеме и универсальность.

Под универсальностью понимается возможность применения $СхСр$ для сравнения импульсных сигналов любой полярности и потенциальных сигналов.

В качестве дифференциального элемента можно использовать импульсный трансформатор с заземленной средней точкой в первичной обмотке, а запоминающим элементом может служить статический триггер.

Рассмотрим схему сравнения для двух одноименных импульсных сигналов (рис. 3). На рис. 3,а изображено пропадание импульса в момент времени t_1 за счет отказа (сбоя) в блоке B'_i , на рис. 3,б — ложное появление импульса в момент времени t_2 .

Если эти сигналы поданы на входы *I* и *II* импульсного трансформатора (рис. 4), то во вторичной обмотке трансформатора в момент времени t_1 появляется импульс одной полярности (например, положительной), а в момент времени t_2 — другой полярности (отрицательной).

Для запоминания двуполярного сигнала ошибки одним статическим триггером необходимо соединение импульсного трансформатора с триггером по схеме, приведенной на рис. 4. В качестве элемента, выполняющего логическую операцию НЕ (рис. 4), можно использо-

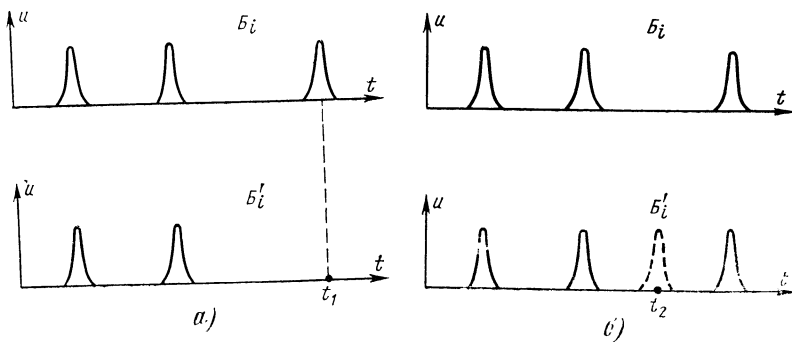


Рис. 3.

вать еще одну вторичную обмотку импульсного трансформатора, включив ее противофазно с первой вторичной обмоткой. Тогда схема сравнения для импульсных сигналов будет иметь вид, изображенный на рис. 5. Если триггер срабатывает только от импульсов положительной полярности, то схема (рис. 5) несколько изменяется (рис. 6).

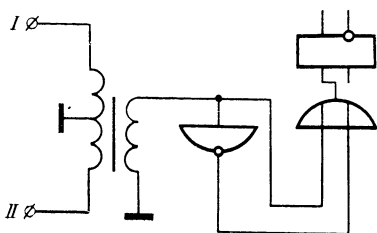


Рис. 4.

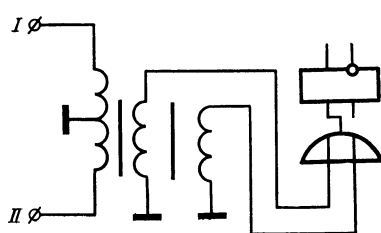


Рис. 5.

При использовании триггера, срабатывающего от отрицательных импульсов, схема сравнения должна быть такой, как на рис. 7.

Схема сравнения (см. рис. 6 или 7) позволяет вырабатывать сигнал ошибки не только при пропадании импульса или появлении ложного импульса в одном из двух одноименных контролируемых импульсных сигналов, но и в случае уменьшения амплитуды импульса одного из контролируемых сигналов ниже допустимого значения.

Это достигается путем подбора соответствующего уровня срабатывания триггера, чтобы выполнялось условие

$$|\Delta V_d| = |V|,$$

где $|\Delta V_d|$ — абсолютное значение максимально допустимого изменения амплитуды напряжения одного из контролируемых импульсных сигналов во вторичной обмотке трансформатора; $|V_d|$ — абсолютное значение уровня срабатывания триггера по напряжению.

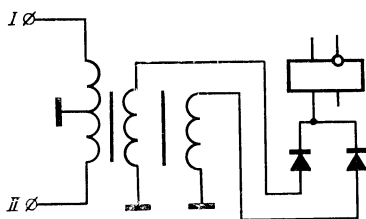


Рис. 6.

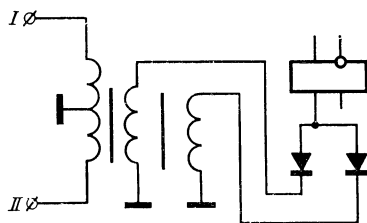


Рис. 7.

При строго синхронной работе $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$ можно сравнивать как установившиеся значения, так и амплитуды перепадов напряжения двух одноименных потенциальных сигналов. Такие сигналы можно контролировать схемой сравнения, аналогичной для импульсных сигналов. Для того чтобы схема сравнения реагировала только на перепады напряжения потенциальных сигналов, необходимы диффе-

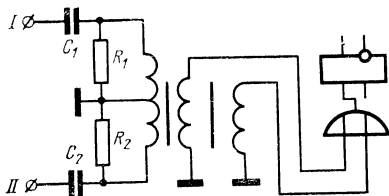


Рис. 8.

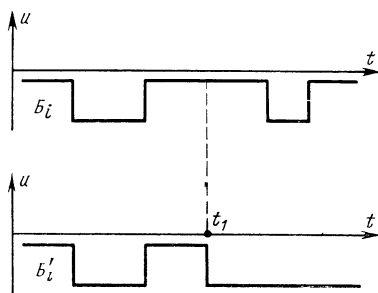


Рис. 9.

ренцирующие RC -цепи (для этой цели можно использовать дифференцирующие свойства трансформатора). В связи с этим $СхСр$ для потенциальных сигналов может быть реализовано так, как показано на рис. 8.

Все рассуждения об этой схеме будут такими же, как и выше, с той лишь разницей, что вместо амплитуды импульса здесь надо иметь в виду амплитуду импульса после дифференцирования перепада напряжения потенциального сигнала. В случае появления лож-

ного перепада напряжения в момент времени t_1 (рис. 9) $CxCr$ (см. рис. 8) вырабатывает сигнал ошибки.

Таким образом, рассмотренные схемы сравнения являются одним из вариантов технической реализации, которая позволяет осуществить необходимое условие указания места отказа с точностью до двух одноименных блоков $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$, т. е. вырабатывать сигнал ошибки при отказе (сбое) в одном из двух одноименных контролируемых сигналов как импульсных, так и потенциальных.

Рассмотрим схему сравнения для блоков B_i и B'_i , имеющих по n выходных контролируемых сигналов. Примем $n=4$, причем будем считать, что среди этих сигналов имеются два импульсных и два потенциальных. Схема сравнения для этих условий иллюстрируется рис. 10.

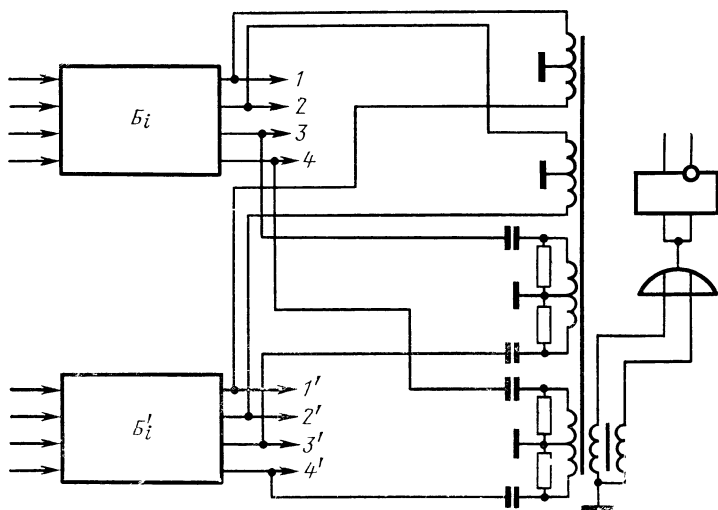


Рис. 10.

Перейдем к рассмотрению вопроса о том, каким образом, используя сигнал ошибки, можно осуществить указание места отказа (сбоя) с точностью до двух одноименных блоков.

Для простоты рассуждений рассмотрим два узла $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$, состоящих из P одноименных блоков (рис. 11). Выходной сигнал с блоков B_i и B'_i поступает на вход всех блоков узла соответственно: B_{i+1} , B_{i+2} , B_{i+3} , B_{i+4} и B'_{i+1} , B'_{i+2} , B'_{i+3} , B'_{i+4} . В принципе устройство контроля для всех блоков $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$ будет аналогично устройству, изображенному на рис. 11. Выходы схем сравнения каждого блока объединяются в общую цепь сигнала ошибки, который затем поступает в цепи выходных контролируемых сигналов $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$.

Предположим, что в блоке B_i или B'_i произошел отказ (сбой). На основании изложенного $CxCr$ вырабатывает сигнал ошибки, который поступает через схему ИЛИ в общую цепь сигнала ошибки, а затем в цепи всех контролируемых сигналов $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$. В ре-

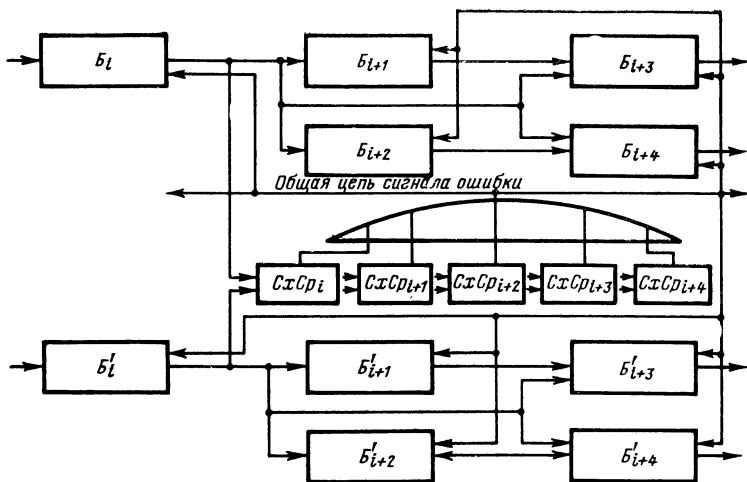


Рис. 11.

зультате возникает запрет выдачи контролируемых сигналов. При этом $СхСр_{i+1}$, $СхСр_{i+2}$, $СхСр_{i+3}$, $СхСр_{i+4}$ не будут вырабатывать сигнал ошибки, так как контролируемые ими одноименные сигналы будут находиться в одинаковом (нулевом) состоянии. Фактически произойдут остановка обеих ЦВМ и фиксация и индикация сигнала ошибки только в $СхСр_i$.

Остается рассмотреть, как происходит запрет выдачи выходных контролируемых сигналов. Одним из вариантов схемы запрета может служить схема совпадения И (рис. 12).

При технической реализации рассмотренного вида аппаратного контроля необходимо, чтобы соблюдались соотношения

$$\left. \begin{aligned} \tau_{э.с} &< \tau_{i+1}; \\ \tau_{э.с} &< \tau_{i+2}; \\ \dots &\dots \\ \tau_{э.с} &< \tau_{i+k}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $\tau_{э.с}$ — время прохождения сигнала ошибки при отказе (сбое) в сигнале J_{in} (или J'_{in}) блоков B_i и B'_i до выходов других блоков, на которые воздействует сигнал J_{in} (J'_{in}); τ_{i+k} — интервал времени между поступлением сигнала J_{in} (J'_{in}) и выдачей выходного сигнала в блоках, на которые воздействует сигнал J_{in} (J'_{in}).

Необходимо учитывать это условие при разбиении ЦВМ на блоки. В тех блоках, где это условие не будет выполняться, необходимо ввести некоторую задержку сигнала J_{in} (J'_{in}).

Следовательно, предлагаемый вариант устройства контроля в системе из двух однотипных синхронно работающих ЦВМ позволяет найти место отказа себя с точностью до двух одноименных блоков ЦВМ₁ и ЦВМ₂.

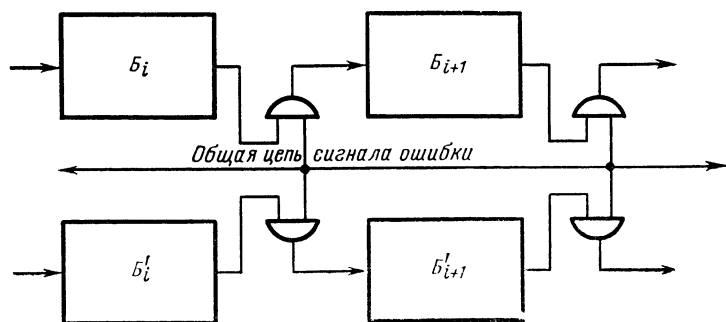


Рис. 12.

С целью компактности связей при осуществлении аппаратного контроля желательно конструктивное совмещение $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$. Поэтому каждые два одноименных блока B_i и B'_i в конструктивном отношении могут представлять собой один сборный сменный узел вместе с его схемой сравнения.

Независимость работы $ЦВМ_1$, $ЦВМ_2$ и устройства контроля обеспечивается при наличии автономных источников питания для $ЦВМ_1$, $ЦВМ_2$ и устройства контроля.

6. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ДЦВМ С АППАРАТНЫМ КОНТРОЛЕМ

Как отмечалось ранее, в системе из двух ЦВМ (в дальнейшем будем ее называть ДЦВМ) с аппаратным контролем должны надежно обнаруживаться случайные сбои и устраняться их последствия путем повторения операции, при которой произошел сбой, а также указываться место отказа (сбоя) с точностью до двух одноименных блоков ДЦВМ.

Рассмотрим структурную схему ДЦВМ с аппаратным контролем (рис. 13). Она содержит $ЦВМ_1$, $ЦВМ_2$, устройство контроля, синхронизирующее устройство, элементы начального и повторного пуска и счетчик сбоев.

Синхронизирующее устройство представляет собой задающий генератор, определяющий рабочую частоту обеих машин. Оно обеспечивает одновременное (синхронное) появление одноименных контролируемых сигналов $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$.

Элемент начального пуска служит для пуска обеих машин с пульта управления по цепи 7, а затем по цепям 6 и 6'. После правильного выполнения операции обеими ЦВМ приходит сигнал ответа о выполнении операции по цепям 5 и 5' для запуска на выполнение следующей операции по цепям 6 и 6'.

Элемент повторного пуска предназначен для пуска $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$ на повторение неправильно выполненной операции, при осуществлении которой произошел сбой. На элемент повторного пуска поступает сигнал ошибки из общей цепи 1 устройства контроля. При появлении сигнала ошибки элемент повторного пуска осуществляет пуск обеих ЦВМ по цепи 2.

Счетчик сбоев обеспечивает выдачу сигнала запрещения повторного пуска по цепи 3 на элемент начального пуска, когда число повторений неправильно выполненных операций достигает определенного значения. Число повторений может быть установлено на пульте оператором.

По цепям 4 и 4' в момент пуска обеих машин на выполнение операции происходит установка в исходное состояние устройства контроля, которое соответствует отсутствию сигнала ошибки в цепи 1.

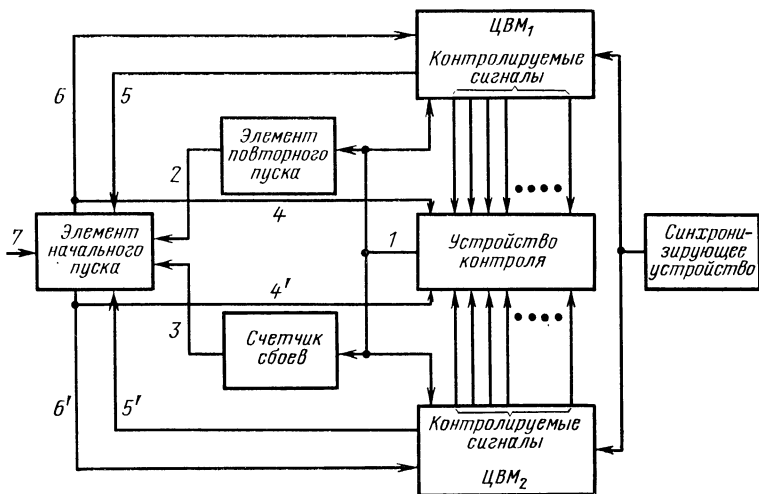


Рис. 13.

Из общей цепи 1 сигнал ошибки поступает в цепи всех контролируемых сигналов ЦВМ₁ и ЦВМ₂ с целью локализации места неисправности (сбоя) так, как было показано на рис. 12.

Рассмотрим работу ДЦВМ от момента пуска на решение какой-либо задачи, в процессе которого могут возникнуть сбой и отказы.

При одновременном пуске по цепи 7, а затем по цепям 6 и 6' обеих машин на выполнение первой операции происходит установка в исходное состояние всех триггеров схем сравнения устройства контроля по цепи 4 (или 4') и начинается выполнение этой операции. Номер первой команды хранится на счетчиках команд ЦВМ₁ и ЦВМ₂. Если при выполнении этой команды сбоя не было, то в конце операции в счетчиках команд обеих машин добавляется 1 и сигнал ответа о выполнении операции поступает по цепям 5 и 5' для пуска обеих ЦВМ на выполнение следующей операции по цепям 6 и 6' и т. д.

Предположим, что при выполнении команды с номером k произошел сбой в одном из блоков ЦВМ₁ или ЦВМ₂. Выделенный устройством контроля сигнал ошибки из цепи 1 поступит в цепи всех выходных контролируемых сигналов обеих машин и приведет их в нулевое состояние.

Сигнал ошибки из цепи l поступит на элемент повторного пуска, который осуществит пуск обеих ЦВМ по цепям b и b' на выполнение операции k , во время которой произошел сбой. При пуске устройство контроля по цепи 4 (или $4'$) будет установлено в исходное состояние и начнется повторное выполнение операции k . Если при повторном выполнении этой операции сбой не будет, то в конце операции в счетчики команд добавится по 1 и произойдет пуск обеих ЦВМ ответным сигналом по цепям 5 и $5'$, а затем по цепям b и b' на выполнение операции $k+1$ и т. д. Таким образом, будут устраняться последствия сбоев, возникающих при решении задачи.

Представим себе, что во время операции l произошел отказ в одном из блоков $ЦВМ_1$ или $ЦВМ_2$, например в B_i (или B'_i). Исходя из вышеизложенного, повторение выполнения операции будет продолжаться до тех пор, пока в счетчике сбоев число повторений не станет равным тому, которое было установлено оператором перед пуском ДЦВМ на решение данной задачи. При равенстве числа повторений на счетчике числу, установленному оператором, со счетчика по цепи 3 поступит сигнал запрета на последующий повторный пуск. Пуска по цепи b и b' не произойдет, т. е. в устройстве контроля сохранится сигнал ошибки, выделенный схемой сравнения блоков B_i и B'_i .

После замены или ремонта одного из этих блоков ДЦВМ может быть пущена на продолжение решения задачи.

Приведем некоторые уточнения к рассмотренной структурной схеме ДЦВМ. Прежде всего о счетчике команд одной и второй ЦВМ. Если произошел сбой в одном из счетчиков команд, то этот сбой будет неустранимым, так как $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$ будут повторять после сбоя разные команды, что приведет к остановке обеих ЦВМ, как при отказе. После остановки ДЦВМ сигнал ошибки будет зафиксирован как схемой сравнения счетчиков команд, так и другими схемами сравнения, что является отличительным признаком отказа (сбоя) в одном из счетчиков команд по отношению к отказам во всех других блоках ЦВМ. В связи с этим схема сравнения для счетчиков команд должна устанавливаться в исходное состояние только при начальном пуске обеих ЦВМ на решение задачи, т. е. при пуске с пульта оператора.

К числу неустранимых сбоев в одноадресных и двухадресных ЦВМ относятся и такие, которые происходят и обнаруживаются непосредственно при записи результата операции в ОЗУ. В трехадресной ЦВМ этот сбой является устранимым в тех случаях, когда третий адрес не совпадает с первым или вторым, так как исходные данные выполняемой операции хранятся по первому и второму адресам, а результат записывается по третьему адресу.

В этом отношении при создании ДЦВМ с аппаратным контролем необходимо отдать предпочтение трехадресным ЦВМ.

Отметим еще одну особенность, связанную с выполнением команды перехода (условного или безусловного). Известно, что при таких командах счетчик команд переводится в нулевое состояние и на нем устанавливается новая команда, т. е. команда перехода.

Для того чтобы избежать неустранимого сбоя, который может произойти во время команды условного перехода в одной из ЦВМ, необходимо иметь дополнительный регистр в обеих ЦВМ. На дополнительном регистре должна храниться команда перехода. При возникновении сбоя во время выполнения команды перехода с дополни-

тельного регистра команд в счетчики команд должна быть вызвана команда перехода и повторена.

В заключение отметим, что весьма подробно вопрос о исправлении ошибок за счет сбоев с использованием для этой цели сигнала ошибки устройства аппаратного контроля рассмотрен в [Л. 17]. Поэтому в дальнейшем основное внимание будет уделено только разработке устройства аппаратного контроля в системе из двух однотипных ЦВМ и вопросам, связанным с надежностью и эффективностью использования ЦВМ при различных видах аппаратного контроля.

7. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К УСТРОЙСТВУ АППАРАТНОГО КОНТРОЛЯ ДЦВМ

При технической реализации устройства контроля ДЦВМ необходимо предусмотреть ряд принципиальных вопросов и особенностей, от решения которых будет зависеть, например, такое свойство ДЦВМ, как ее быстродействие. Поэтому одним из важнейших требований, предъявляемых к устройству контроля, заключается в том, чтобы оно не снижало быстродействия ДЦВМ по сравнению с быстродействием ЦВМ, входящих в систему. Кроме того, немаловажно и такое требование, как обеспечение возможности автономной работы каждой из ЦВМ, входящих в ДЦВМ. Выполнение этого требования позволит продолжать решение задачи при отказе в одной из ЦВМ на исправной ЦВМ. Практически может возникнуть необходимость, когда $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$ должны решать различные задачи, а устройство контроля будет включаться только для быстрого отыскания неисправности, если она возникает в одной из двух ЦВМ, а также при прогнозировании отказов в ДЦВМ. В этом случае мы будем иметь не просто дублированную ЦВМ, а гибкую систему из двух однотипных машин.

Наряду с указанными требованиями к устройству контроля безусловно предъявляются и общие требования по надежности его работы, минимальному количеству оборудования и т. п. Ниже будут рассматриваться некоторые варианты технической реализации устройства контроля.

Специфическими требованиями к устройству контроля являются: 1) выделение сигнала ошибки при отказе (сбое); 2) запоминание сигнала ошибки той схемой сравнения, которая обнаружила отказ (сбой), т. е. локализация места отказа (сбоя); 3) выдача сигнала ошибки в цепи управления, обеспечивающие исправление ошибок за счет сбоев путем повторения неправильно выполненной операции, а также остановку ДЦВМ при отказе в одной из ЦВМ.

Логическая структура устройства контроля ДЦВМ будет в основном определяться принципом локализации места отказа (сбоя). Будем считать, что выделение сигнала ошибки и его запоминание осуществляются при помощи схемы сравнения (см. рис. 10).

8. ВАРИАНТЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ДЦВМ

Рассмотренный способ локализации отказа (сбоя) (см. рис. 11 и 12) принципиально возможен, но имеет существенные недостатки. Один из них заключается в том, что триггер схемы сравнения дол-

жен обладать большой нагрузочной способностью, чтобы управлять схемами И, которые установлены в цепях всех контролируемых сигналов $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$. Однако этот недостаток можно устранить, подав сигнал ошибки из общей цепи на мощный формирующий элемент, который бы обеспечил управление всеми схемами И в цепях контролируемых выходных сигналов обеих ЦВМ (рис. 14). Главным недостатком является то, что данный способ локализации требует выполнения условия (10), которое не всегда может быть обеспечено. Предположим, что ДЦВМ состоит из двух одностипных ЦВМ, вы-

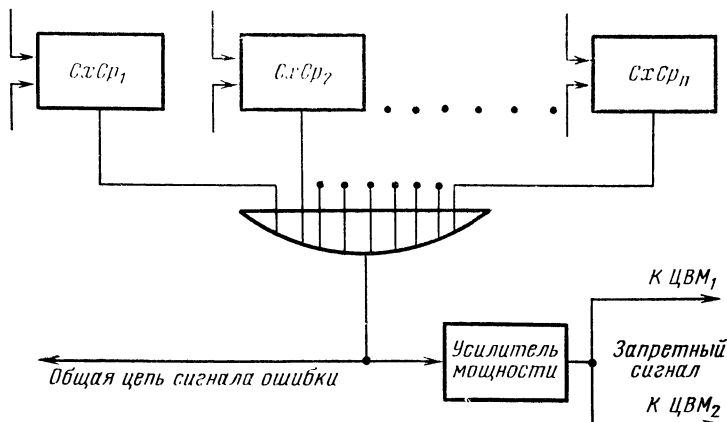


Рис. 14

полненных из элементов ЦВМ «Минск-22». Время срабатывания триггера данной системы элементов составляет примерно 1 мксек. Задержка на каскад значительно меньше времени срабатывания триггера. Например, для усилителя импульсов задержка выходного импульса τ_3 относительно входного, поступающего на диодно-трансформаторный клапан, составляет примерно 0,05 мксек. При этом длительность входного и выходного импульсов $\tau_{\text{н}} \approx 1$ мксек. Поэтому возможны случаи, когда сигнал ошибки и выходной контролируемый сигнал будут поступать на схему И почти одновременно (рис. 15).

На рис. 15 u_1 — выходной контролируемый сигнал, u_2 — сигнал ошибки с триггера схемы сравнения (сигнал запрета), а u_3 — напряжение на выходе схемы И, осуществляющей выделение отрицательных сигналов. Из рассмотрения рис. 15 следует, что полного запрещения выдачи выходного контролируемого сигнала за счет подачи сигнала на схему И не происходит. Напряжение u_3 представляет собой напряжение помехи с амплитудой, примерно равной $0,5U_m$. Аналогичное явление будет происходить и при запрете импульсных сигналов. Неполное запрещение выходных контролируемых сигналов может привести к срабатыванию триггеров других схем сравнения, где по существу отказа или сбоя не было. В связи с этим точной локализации отказа (сбоя) не произойдет.

Вполне понятно, что искусственная задержка выходных контролируемых сигналов, обеспечивающая локализацию отказа, весьма

нежелательна, так как это приведет к значительному снижению быстродействия ДЦВМ по сравнению с быстродействием входящих в нее ЦВМ без аппаратного контроля. Можно избежать потери в быстродействии путем введения уровня ограничения, превышающего амплитуду рассмотренного вида помех. Однако и это мероприятие

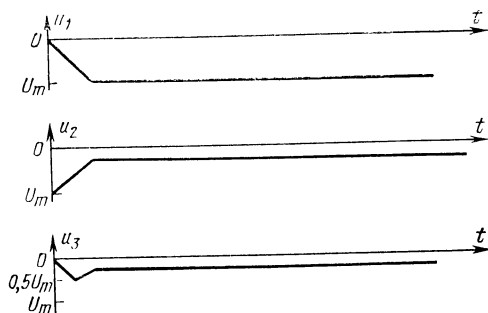


Рис. 15.

нежелательно в связи с тем, что область устойчивости работы устройства контроля ДЦВМ снизится, т. е. произойдет уменьшение надежности работы ДЦВМ в целом.

Рассмотрим еще один вариант устройства контроля, использующего сигнал ошибки с целью локализации отказа (сбоя).

Структурная схема такого устройства контроля представлена на рис. 16. Схема отличается от рассмотренной выше (см. рис. 14) тем, что сигнал ошибки из общей цепи поступает на формирователь,

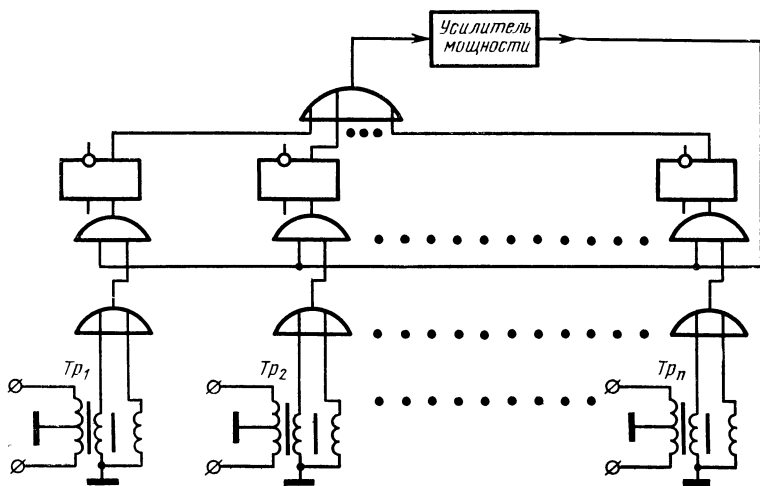


Рис. 16.

с которого сигнал запрета поступает на схемы И всех схем сравнения устройства контроля. Такой вариант устройства контроля имеет некоторое преимущество перед рассмотренным, так как не требуются схемы совпадения для выходных контролируемых сигналов.

Следует отметить, что уровень помех при запрете импульсных сигналов будет выше, чем при запрете потенциальных сигналов. Это

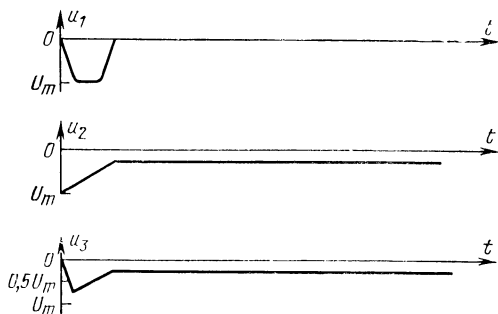


Рис. 17.

объясняется большой крутизной фронта импульсных сигналов. В системе элементов ЦВМ «Минск-22» длительность импульсных сигналов составляет 1 мксек, т. е. примерно равна времени срабатывания триггера. Поэтому с учетом плоской вершины импульса амплитуда помехи на выходе схемы И будет больше, чем $0,5U_m$ (рис. 17).

Исходя из рассмотренного, можно сделать вывод, что осуществление локализации отказа (сбоя) при помощи сигнала ошибки хотя и возможно, но в этом случае могут быть недопустимы потери в быстродействии ДЦВМ.

Произведем оценку потерь в быстродействии ДЦВМ при использовании рассмотренных вариантов локализации отказа на примере ЦВМ «Минск-22». Предположим, что каждый контролируемый блок содержит три последовательных каскада, которые имеют время задержки такое же, как рассмотренный выше импульсный усилитель. Тогда время задержки блока будет равно

$$\tau_{з.б} \approx 3\tau_з = 3 \cdot 0,05 = 0,15 \text{ мксек.}$$

Можно показать, что данный вариант контроля можно реализовать при условии введения искусственной задержки выходных сигналов в блоке на время, равное $\tau = \tau_и/2 = 0,5 \text{ мксек.}$ При этом амплитуда помех на выходе схем И при запрещении импульсных сигналов будет меньше, чем $0,5U_m$ (рис. 18). Отсюда потери в быстродействии ДЦВМ по сравнению с отдельной ЦВМ без контроля при условии, что все блоки имеют одинаковую задержку

$$k_n = \frac{\tau_{з.б} + \tau_{з.и}}{\tau_{з.б}},$$

где k_n — коэффициент, показывающий, во сколько раз уменьшится быстродействие ДЦВМ при введении искусственной задержки выходных сигналов блоков на время $\tau_{з.и}$.

В данном примере

$$k_n = \frac{0,15 + 0,5}{0,15} \approx 4.$$

Этот ориентировочный расчет показывает, что потери в быстродействии могут быть значительными. С точки зрения экономичности эти варианты устройства контроля также невыгодны, так как требуют большого количества элементов задержки.

В связи с рассмотренным возникает задача осуществления локализации места отказа без применения сигнала ошибки. При таком

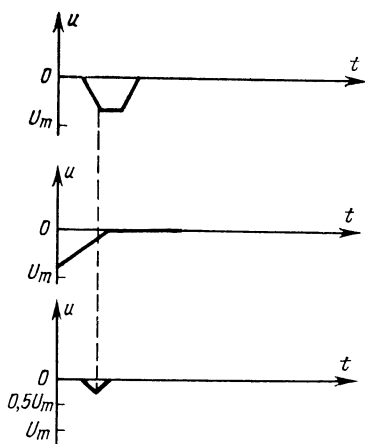


Рис. 18.

варианте контроля сигнал ошибки должен использоваться для целей исправления информации за счет сбоев и остановки ДЦВМ при отказе. Обеспечение локализации требует выполнения условия (7). При этом не обязательно все выходные сигналы $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$ устанавливать в нулевое состояние. Важно, чтобы при отказе (сбое) в B_i или B'_i все последующие блоки, на которые воздействуют сигналы B_i и B'_i , имели попарно одинаковые одноименные выходные сигналы.

Предположим, что с B_i и B'_i выходные сигналы поступают на последующие блоки так, как показано на рис 19. Очевидно, что при отказе в B_i или B'_i схема сравнения $СхСр$ выработает сигнал ошибки.

Предположим, что с B_i и B'_i выходные сигналы поступают на последующие блоки так, как показано на рис 19. Очевидно, что при отказе в B_i или B'_i схема сравнения $СхСр$ выработает сигнал ошибки. Несмотря на отсутствие отказа в блоках B_{i+1} , B_{i+2} и B'_{i+1} , B'_{i+2} , схемы сравнения, контролирующие выходные сигналы этих блоков, могут выработать сигнал ошибки, потому что выходные сигналы данных блоков за счет неодинаковых сигналов на их входах будут разными. Чтобы локализовать отказ в B_i или B'_i , можно применить схему, изображенную на рис. 20. В данной схеме одноименные выходные сигналы поступают на последующие блоки через схему совпадения. Такое соединение блоков позволяет локализовать отказ (сбой) в B_i или B'_i . Действительно, если в одном из блоков (B_i , B'_i) за счет отказа (сбоя) пропал, например, сигнал I (или I'), то схема сравнения этих блоков выделит и запомнит сигнал ошибки. Схема сравнения, контролирующая последующие блоки, останется в исходном состоянии, которое соответствует отсутствию сигнала ошибки, так как выходные одноименные сигналы этих блоков одинаковы в связи с тем, что одноименные входные сигналы этих блоков после схемы И оказываются также одинаковыми. Если все блоки $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$ будут соединены, как на рис. 20, то локализация места отказа с точностью до двух одноименных блоков будет обеспечена.

Такой вариант устройства контроля не удовлетворяет сформулированному требованию автономности $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$. Очевидно, при

таким соединении блоков нельзя использовать каждую ЦВМ в отдельности.

При отсутствии схем сравнения такой вид дублирования обеспечивает автоматическое устранение сбоев, которые приводят к появлению ложных сигналов в ЦВМ₁ или ЦВМ₂ (имеются в виду неодновременные сбои). Если же выходные сигналы блоков подавать на схемы ИЛИ, то будут устраняться сбои, приводящие к пропада-

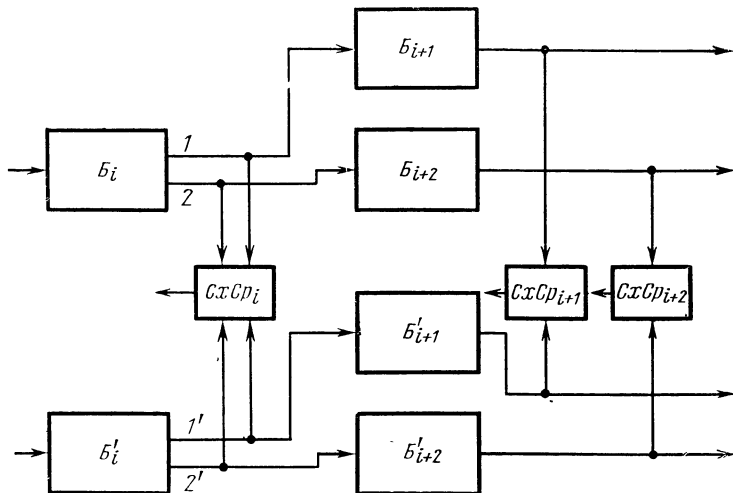


Рис. 19.

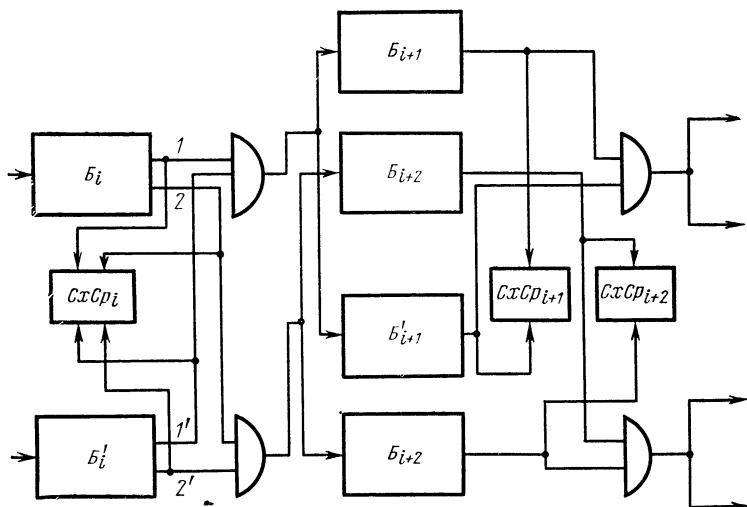


Рис. 20.

нию сигналов в одной из ЦВМ. Применение схем сравнения позволяет устранять последствия сбоев любого вида путем повторения операции, при которой произошел сбой, а также обнаруживать и указывать место отказа. Недостатком описанного устройства является то, что сбои и отказы в схемах И не могут быть обнаружены при таком виде аппаратного контроля.

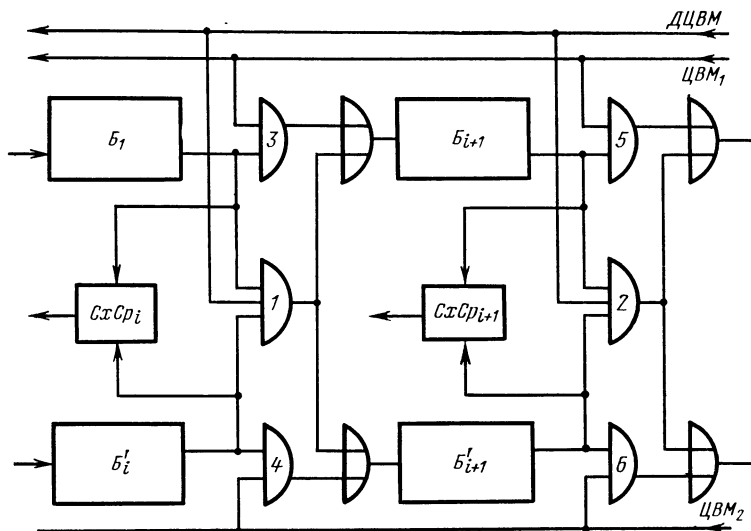


Рис. 21.

Одним из важнейших положительных качеств этого варианта устройства контроля является снижение требований к точности синхронизации ЦВМ, входящих в систему. Подробно этот вопрос будет рассмотрен ниже.

Для обеспечения автономности работы ЦВМ₁ и ЦВМ₂ можно применить подачу выходных контролируемых сигналов на последующие блоки так, как показано на рис. 21. Если подать разрешающий сигнал на схемы 1 и 2, а на схемы 3–6—запрещающий сигнал, то будет обеспечена совместная работа ЦВМ₁ и ЦВМ₂. При подаче разрешающего сигнала на схемы 3–6 и запрещающего на схемы 1 и 2 возможна автономная работа обеих ЦВМ.

Прежде чем детально анализировать указанные выше варианты устройства контроля ДЦВМ, рассмотрим вопросы, связанные с синхронной работой ЦВМ₁ и ЦВМ₂.

9. ВОПРОСЫ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ДЦВМ

Рассмотренный принцип построения устройства контроля ДЦВМ требует синхронной работы обеих ЦВМ. При синхронизации ЦВМ₁ и ЦВМ₂ от общего задающего генератора, импульсы которого посту-

пают на программные датчики обеих ЦВМ, необходима определенная симметрия ЦВМ₁ и ЦВМ₂. Общая симметрия ЦВМ предполагает следующие виды ее: симметрию монтажных схем блоков, из которых состоит ЦВМ; симметрию параметров пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, импульсных трансформаторов, диодов и т. п.); симметрию параметров активных элементов (различного рода транзисторов) и симметрию напряжений источников питания.

Эти виды симметрии должны обеспечить одновременное появление одноименных импульсов контролируемых импульсных сигналов и перепадов напряжений потенциальных сигналов. Требование симметрии по существу означает обеспечение стабильности основных параметров импульсно-потенциальных логических элементов: длительности импульса, его амплитуды, задержки на каскад, длительности фронта и спада потенциальных сигналов. Повышение стабильности указанных параметров приводит к повышению быстродействия ЦВМ и надежности ее работы [Л. 14].

Из рассмотрения предлагаемых схем сравнения следует, что основное влияние на работу устройства контроля ДЦВМ будут оказывать нестабильность задержки сигналов и длительности импульсов, фронтов и спадов потенциальных сигналов. Что касается амплитуды сигналов, то при подборе определенного уровня срабатывания триггера схемы сравнения сигнал ошибки будет появляться только в случае уменьшения амплитуды одного из двух одноименных сигналов до величины ниже допустимой, а также при пропадании одного из них или ложном срабатывании за счет помехи.

Нестабильность длительности импульсов, фронтов и спадов потенциальных сигналов. В импульсно-потенциальных ЦВМ импульсные сигналы вырабатываются формирователями. Длительность выходных импульсов этих формирователей зависит от длительности входного импульса (импульса запуска), амплитуды входного импульса, нагрузки на формирователь, напряжения источников питания, параметров активных и пассивных элементов.

В системе импульсно-потенциальных логических элементов «Магний» [Л. 13] длительность выходных импульсов формирователей практически не зависит от длительности и амплитуды запускающего импульса при

$$\begin{aligned} \tau_{н.вх} &\geq \tau_{н.вх0}; \\ U_{вх} &\geq U_{вх0}. \end{aligned}$$

где $\tau_{н.вх0}$ — минимальная длительность входного импульса, необходимая для надежного срабатывания формирователя; $U_{вх0}$ — минимальная амплитуда входного импульса, необходимая для надежного срабатывания формирователя.

На рис. 22 изображены зависимости $\tau_{н.вых} = f(\tau_{н.вх})$ и $\tau_{н.вых} = f(U_{вх})$, полученные в результате эксперимента [Л. 13]. Из рисунка видно, что $\tau_{н.вх0} = 0,15$ мксек; $U_{вх0} = 2,2$ в. В [Л. 14] рассмотрена схема формирователя, которая обеспечивает стабильную длительность выходного импульса при изменении нагрузки в 6 раз. Учитывая незначительный разброс параметров нагрузки формирователей ЦВМ₁ и ЦВМ₂ (в пределах $\pm 10\%$), можно считать, что этот дестабилизирующий фактор не окажет никакого влияния на осуществление синхронной работы обеих ЦВМ.

Граничные испытания различных формирователей [Л. 13] показали, что при одновременном изменении рабочей частоты от 2 мГц до 500 кГц, температуры окружающей среды от -10 до $+50$ °С, на-

пряжений источников питания на $\pm 10\%$ в наихудшем сочетании, параметров входных сигналов в широких пределах и специальном подборе радиокомпонентов и полупроводниковых приборов, имеющих параметры с крайними разбросами, длительность выходного импульса изменялась на $\pm 50\%$ номинального. Вполне понятно, что ЦВМ₁ и ЦВМ₂ будут находиться примерно в одинаковых условиях, а поэтому можно сделать общий вывод о практически одинаковой длительности двух одноименных контролируемых импульсов. Подобные эксперименты были проведены и с различными потенциальными элементами и показали аналогичные результаты.

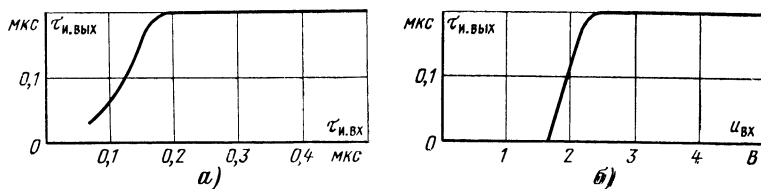


Рис. 22.

Нестабильность задержки выходных сигналов. Известно, что собственная задержка выходных сигналов относительно входных определяется задержками входного и выходного сигналов, а также задержкой при срабатывании транзисторов. Практически задержка на каскад значительно меньше длительности импульса или фронта потенциального сигнала. Как указывалось выше, для системы элементов ЦВМ «Минск-22» задержка на один формирователь составляет 0,05 мксек при длительности выходного импульса $\tau_{и.вых} = 1$ мксек. В системе элементов «Магний» задержка на один формирователь составляет примерно 0,05 мксек. При этом задержка за счет входных цепей формирователя (собираательные схемы, схемы совпадения) равна примерно 0,02 мксек, задержка дрейфового транзистора 0,001 мксек и выходная задержка 0,02 мксек, т. е. общая задержка определяется в основном задержками на входе и выходе и зависит от параметров пассивных элементов (сопротивления, емкости, индуктивности) и паразитных емкостей деталей и монтажа. Нестабильность задержки определяется разбросом их параметров. В связи с этим некоторые каскады будут иметь задержку

$$\tau'_a = \tau_{a0} + \Delta\tau,$$

где τ_{a0} — задержка, соответствующая номинальным значениям параметров элементов схемы; $\Delta\tau$ — абсолютное значение изменения задержки за счет разброса параметров элементов схемы.

Некоторая часть каскадов будет иметь задержку $\tau''_a = \tau_{a0} - \Delta\tau$.

Очевидно, будут и такие каскады, у которых задержка будет близка к номинальной или равна ей, т. е. $\tau''_a = \tau_{a0}$.

Если при изготовлении логических элементов не происходит специального подбора радиокомпонентов по их параметрам, то при последовательном соединении каскадов можно ожидать, что общая нестабильность задержки n последовательно соединенных каскадов будет определяться соотношением $\Delta\tau_{a,n} < n\Delta\tau$.

Другими словами, даже при значительном числе последовательно включенных каскадов общая нестабильность задержки может ока-

заться сравнимой с нестабильностью задержки одного каскада. Это очевидный факт, не требующий особого доказательства.

Наиболее опасна нестабильность задержки, вызываемая нестабильностью напряжений источников питания. Известно, что с изменением напряжения источников питания будет меняться уровень срабатывания активных элементов (транзисторов). В этом случае будет происходить накопление нестабильности последовательного соединения каскадов с увеличением их числа, так как изменение задержки у всех каскадов будет иметь один и тот же знак. При увеличении напряжений источников питания чувствительность к запуску формирователей и потенциальных элементов (триггеров и др.) будет увеличиваться, т. е. уровень срабатывания будет уменьшаться. В связи с тем, что фронт запускающих импульсов не является идеальным, а имеет определенную длительность, уменьшение уровня срабатывания приведет к уменьшению задержки выходного сигнала данным каскадом, и наоборот. Так, при длительности фронта запускающего импульса 0,06 мксек [Л. 13] изменение уровня срабатывания на 10% приведет к изменению задержки формирователя (триггера) примерно на 0,006 мксек.

Предположим, что при переработке информации сигнал проходит последовательно n каскадов как в ЦВМ₁, так и в ЦВМ₂. Причем синхронизация от общего синхронизирующего устройства осуществляется в первых одноименных каскадах. Тогда изменение напряжений источников питания в одной из ЦВМ приведет к изменению задержки n каскадов на величину $\Delta\tau_n = n\Delta\tau'_3$, где $\Delta\tau'_3$ — изменение задержки каскада с активным элементом при изменении напряжения источника питания.

Очевидно, на выходе n -го каскада контролируемые импульсы ЦВМ₁ и ЦВМ₂ будут смещены во времени на величину $\Delta\tau_n$. Несмотря на нормальное состояние обоих сигналов, схема сравнения, контролирующая их, может выработать ложный сигнал ошибки.

Оценим допустимое значение числа n для системы элементов, рассмотренной в [Л. 15]. В этой системе элементов запуск триггера возможен при длительности запускающего импульса $\tau_{н.вх} = 0,1$ мксек. Следовательно, триггер схемы сравнения не будет вырабатывать ложного сигнала ошибки при $\Delta\tau_n < 0,1$ мксек. Возьмем допустимое смещение двух одноименных импульсов $\Delta\tau_n = 0,06$ мксек. Тогда допустимое число последовательно соединенных каскадов с активными элементами

$$n \approx \frac{\Delta\tau_n}{\Delta\tau'_3} = \frac{0,06}{0,006} = 10.$$

Этот пример приведен с целью показать, что синхронизацию обеих ЦВМ от общего синхронизирующего устройства необходимо производить с учетом изменения задержки при изменениях напряжений источников питания.

Требования к синхронизации обеих ЦВМ могут быть существенно снижены, если ЦВМ₁ и ЦВМ₂ будут иметь общие источники питания, так как изменение напряжений источников питания будет приводить к одинаковым по знаку (и примерно по значению) нестабильностям задержек одноименных выходных сигналов. Однако применение общих источников питания противоречит требованию обеспечения независимости работы ЦВМ₁ и ЦВМ₂.

На основании изложенного можно сделать вывод, что предлагаемая методика аппаратного контроля в системе из двух однотипных синхронно работающих ЦВМ не вызывает сомнений в ее технической реализации.

10. ПРИМЕР ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ДЦВМ

Рассмотрение вариантов построения устройства контроля, которое обеспечивает устранение последствий случайных сбоев и локализацию места отказа (сбоя), а также незначительно снижает быстродействие ДЦВМ и позволяет осуществить автономную работу ЦВМ₁ и ЦВМ₂, дает основание отдать предпочтение варианту включения выходных контролируемых сигналов блоков согласно рис. 21. Такая схема включения позволяет осуществление работы ЦВМ₁ и ЦВМ₂ в следующих режимах:

1) автономная работа ЦВМ₁ и ЦВМ₂ при одновременном решении на них двух неодинаковых задач; 2) совместная синхронная работа с целью обнаружения сбоев и устранения их последствий и обнаружения отказов без локализации места отказа (сбоя); 3) совместная синхронная работа с обнаружением сбоев (отказов) и локализацией отказов (сбоев).

При автономной работе обеих ЦВМ устройство контроля отключается путем разрыва общей цепи сигнала ошибки, по которой этот сигнал поступает на элемент повторного пуска. В случае необходимости можно отключить источник питания от устройства контроля.

Режимы совместной синхронной работы существенно отличаются, и каждый из них имеет свои положительные стороны и недостатки.

Первый режим осуществляется при подаче разрешающего сигнала на схемы 3—6 и т. д. во всех блоках ЦВМ₁ и ЦВМ₂ (см. рис. 21) и запрещающего сигнала на схемы 1, 2 и др. Этот режим работы ДЦВМ характеризуется повышенной надежностью обнаружения сбоев (отказов) устройством контроля. Действительно, если произошел отказ в $CxCr_i$, а после этого появился сбой в блоке B_i или B'_i , то этот сбой будет обнаружен $CxCr_{i+1}$. Происходит подстраховка предыдущих схем сравнения последующими. Достоверность функционирования ДЦВМ при таком режиме контроля будет определяться в основном надежностью схем сравнения, контролирующей информацию на выходе ЦВМ₁ и ЦВМ₂. Характерная особенность данного режима заключается в том, что при появлении отказа в ЦВМ₁ или ЦВМ₂ происходит останова ДЦВМ без указания места отказа. Чтобы локализовать место отказа, надо перейти на другой режим, т. е. поменять знаки указанных разрешающих и запрещающих сигналов схемы переключения на противоположные. При втором режиме работы сигнал ошибки будет выделен только той схемой сравнения, которая контролирует неисправную пару блоков (имеется в виду, что в этой паре блоков неисправен один из них). Очевидно, этот режим работы характеризуется отсутствием подстраховки предыдущих схем сравнения последующими, а поэтому обладает меньшей надежностью обнаружения сбоев по сравнению с первым режимом совместной синхронной работы. В связи с этим можно считать первый режим основным, а второй — вспомогательным, который надо применять для быстрой локализации отказов. Кроме того, второй ре-

жим целесообразно использовать тогда, когда требуется локализовать места случайных сбоев с целью получения статистического материала для анализа причин возникновения сбоев.

Рассмотрим вопрос переключения выходных контролируемых сигналов блоков при использовании в $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$ какого-либо импульсно-потенциального логического комплекса элементов (например, описанного в [Л. 15]). В указанный комплекс логических элементов входят пять типов импульсных ячеек, которые предназначены для выполнения логических функций И, ИЛИ, усиления и формирования импульсных сигналов. Отличаются они количеством диодно-

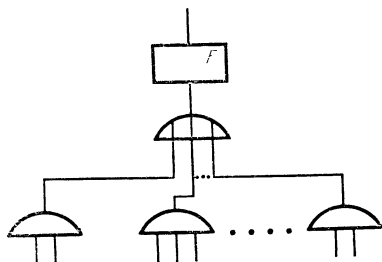


Рис. 23.

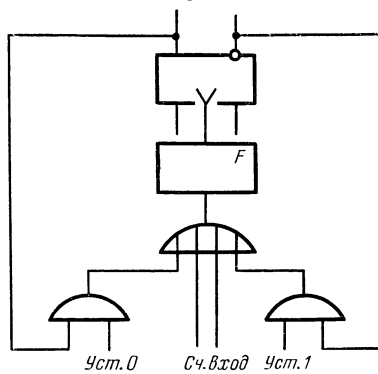


Рис. 24.

резисторных клапанов на входе и мощностью выходного импульсного сигнала формирователя. Функциональная схема этих ячеек имеет примерно один и тот же вид (рис. 23). Схемы совпадения (Сп) и собирательные схемы (Сб) включают в себя резисторы и полупроводниковые диоды.

К ячейкам потенциального типа данного комплекса относятся статический триггер Тг (рис. 24), инвертор И и ячейка Д, предназначенная для осуществления логической операции И верхних уровней потенциальных сигналов с инвертированием. Таким образом, выходные одноименные контролируемые сигналы $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$, состоящие из рассмотренных элементов, будут являться или импульсными от формирователей, или потенциальными от триггеров или инверторов.

Импульсные сигналы с формирователей поступают либо на импульсно-потенциальные клапаны (входы формирователей) либо на входы триггеров. Выходы триггеров подаются на импульсно-потенциальные клапаны, на входы инверторов и ячеек Д. Выходы ячеек И и Д поступают на входы ячеек И, Д и импульсно-потенциальные клапаны.

Подключение выходных импульсных и потенциальных сигнала-

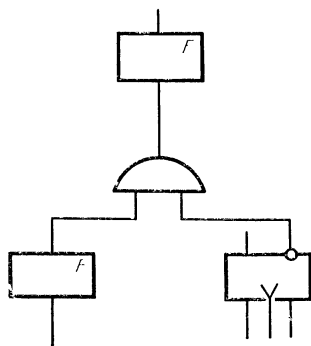


Рис. 25.

лов к импульсно-потенциальному клапану в обычной ЦВМ без аппаратного контроля происходит так, как показано на рис. 25. Для осуществления переключения этих сигналов при синхронной совместной работе ЦВМ₁ и ЦВМ₂ необходимо применить схему, изображенную

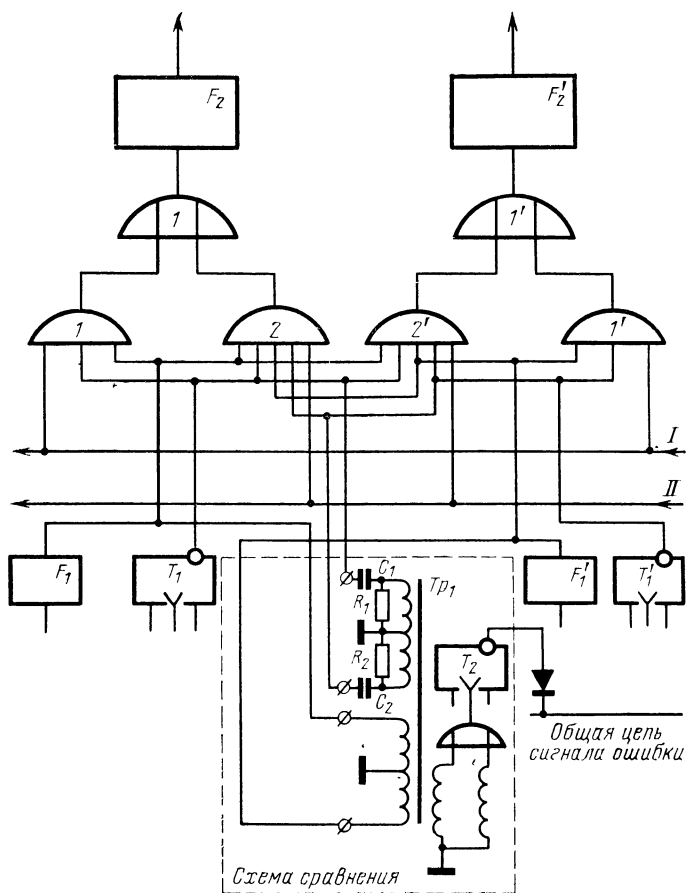


Рис. 26.

на рис. 26. Если на Сп1 и Сп1' подать разрешающий потенциальный сигнал с общей шины I, а на Сп2 и Сп2' запрещающий сигнал с шины II, то будет осуществлен режим синхронной работы первого рода. Режим второго рода обеспечивается при изменении значений потен-

циальных сигналов на шинах I и II на противоположные. При помощи трансформатора Tp_1 и триггера T_2 осуществляется контроль выходных сигналов T_1, T'_1 и F_1, F'_1 .

Из рассмотрения схемы (рис. 26) следует, что потерь в быстродействии при синхронной работе обеих ЦВМ не происходит, так как сигналы проходят через такие же цепи, как в обычной ЦВМ без контроля.

Аналогичным образом происходит переключение импульсных сигналов, поступающих на входы триггера.

Переключение потенциальных сигналов, поступающих на входы инверторов, осуществляется по схеме рис. 27, из которой видно, что

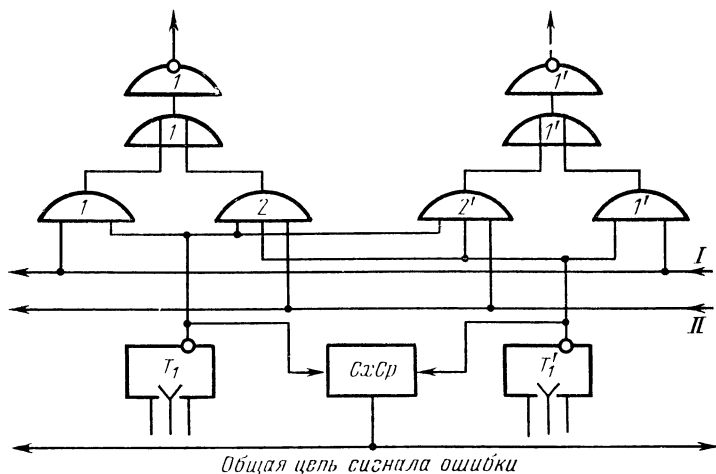


Рис. 27.

это переключение связано с некоторыми потерями в быстродействии ДЦВМ за счет схем совпадения и собирательных схем (Сп1, Сб1 или Сп2, Сб2), так как в обычной ЦВМ без контроля потенциальные сигналы на инверторы подаются непосредственно или через собирательные схемы. Если в обычной ЦВМ потенциальные сигналы на инвертор подаются через собирательные схемы, то потери в быстродействии при синхронной работе будут связаны только с задержкой схемы совпадения Сп.

Рассмотрение схем переключения выходных импульсных и потенциальных сигналов позволяет сделать вывод о том, что быстродействие ДЦВМ с аппаратным контролем при синхронной работе практически не будет отличаться от быстродействия ЦВМ, входящих в систему.

Глава третья

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ РАБОТЫ ЦВМ

11. О ХАРАКТЕРЕ СБОЕВ В ЦВМ

Выше отмечалось, что одним из критериев надежности ЦВМ является вероятность достоверного решения задачи за определенный промежуток времени

$$P_d(\theta) = e^{-\mu\theta},$$

где μ — интенсивность сбоев в ЦВМ.

Выявление сбоев и устранение их последствий являются одной из главных задач методов контроля работы ЦВМ. Каждый вид контроля характеризуется эффективностью, под которой понимается вероятность обнаружения сбоев в работе машины.

Сбои возникают в результате внешних и внутренних воздействий, оказывающих влияние на параметры отдельных элементов и устройств ЦВМ. К первым можно отнести всевозможные электромагнитные излучения, которые могут вызвать появление напряжения помех в цепях ЦВМ, колебание напряжения источников питания, температуры, влажности и пр., ко вторым — старение элементов, кратковременное ухудшение электрических контактов, появление помех за счет внутренних шумов электрических цепей и др.

Как внутренние, так и внешние факторы приводят к тому, что некоторые параметры выходят за пределы нормы в течение какого-то промежутка времени $\tau_{сб}$, а затем их значения восстанавливаются (рис. 28).

В течение времени $\tau_{сб}$ ЦВМ функционирует неправильно и находится фактически в состоянии отказа, что приводит к ошибкам при решении задачи.

Все сбои в ЦВМ подразделяются на случайные и систематические. Не претендуя на полноту определения, можно сказать, что случайные сбои — это такие, которые не зависят от характера перерабатываемой информации и определяются только случайным воздействием внешних и внутренних причин. Систематические сбои определяются характером перерабатываемой информации, т. е. такие сбои повторяются всякий раз, когда происходит повторение решения какой-либо задачи. При этом результаты вычислений остаются одинаковыми, но неверными. Приведем один из примеров появления си-

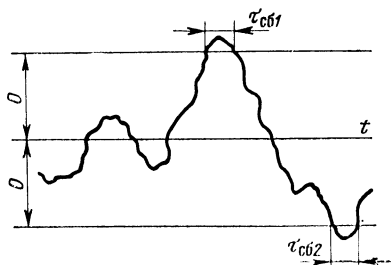


Рис. 28.

стематического сбоя при чтении информации из МОЗУ. Если коэффициент усиления усилителя чтения одного из разрядов будет иметь немного завышенное значение, то возможны случаи, когда в этом разряде при чтении какого-либо числа за счет помех будет систематически появляться вместо 0 ложная 1. При чтении других чисел и команд этой ошибки может и не быть даже при многократном чте-

нии. Большинство систематических сбоев прогнозируется при профилактических мероприятиях путем создания утяжеленных режимов работы ЦВМ, при которых ослабленные элементы ведут себя, как отказавшие.

Резкой границы между систематическими и случайными сбоями провести нельзя. Покажем на одном частном примере, как кратковременный отказ в течение времени $\tau_{сб}$ может привести к случайной или систематической ошибке. Известно, что при двойном счете практически всегда обнаруживаются случайные и не обнаруживаются систематические сбои.

Если выполняется соотношение

$$\tau_{сб} \leq \frac{T_{п}}{2}, \quad (11)$$

где $T_{п}$ — время, необходимое для реализации одного какого-либо цикла двойного счета, то данный сбой будет являться случайным и может быть обнаружен при двойном счете.

В случае, когда $\tau_{сб} \geq T_{п}$, сбой можно считать систематическим с точки зрения контроля методом двойного счета.

В связи с этим, говоря о кратковременном отказе машины, который вызывается внешним воздействием (помехи, флуктуация напряжений питания и т. д.) или изменением внутреннего состояния ЦВМ (выход за пределы нормы какого-либо из ее многочисленных параметров), необходимо считать отказ кратковременным только тогда, когда $\tau_{сб}$ имеет значение, соответствующее выражению (11).

С точки зрения аппаратного контроля принципиальной разницы между случайным сбоем и систематическим не существует в связи с тем, что сбой обнаруживается сразу же, как только он возник.

Попутно отметим одно из важнейших свойств аппаратного контроля в ДЦВМ, позволяющего определить место случайного сбоя с точностью до сменного блока (элемента). При таком методе контроля значительно упрощается анализ причин, вызывающих случайные сбои, так как до некоторой степени снимается неопределенность в отношении мест возникновения сбоев. В настоящее время в литературе по контролю работы ЦВМ, когда речь идет о случайных сбоях, под случайностью понимается случайность во времени появления этих сбоев. Что касается пространственной картины, т. е. мест случайных сбоев, то об этом, как правило, не говорят. И это естественно, потому что вопрос указания места сбоя является очень сложным даже с точки зрения аппаратного контроля, а попытка определять место случайного сбоя программным методом, по нашему мнению, кажется вообще бессмысленной.

Вполне допустимо предположить, что случайные сбои, являясь случайными во времени их появления, вовсе не являются случайными в местах их возникновения. А это очень важно. Предположим, в машине имеется несколько элементов, параметры которых находятся на границе области устойчивости работы того узла, куда входят эти элементы. Некоторые возмущающие факторы, характер которых является случайным во времени, воздействуя на указанные элементы, вызывают сбой в их работе. При таком предположении получается так, что вполне определенные элементы машины в процессе работы могут давать ошибки, создавая картину случайного характера сбоев.

Основное отличие случайных сбоев от систематических, а также от отказов заключается в том, что они не поддаются прогнозиро-

ванию. Изучению характера случайных сбоев уделяется большое внимание. На основе статистического материала по сбоям в ЦВМ можно определить распределение во времени случайных сбоев и некоторые средние значения, такие, как интенсивность сбоев μ и среднее время между сбоями $T_{сб}$, связанные зависимостью $T_{сб} = 1/\mu$.

Получение данных о длительности каждого сбоя как аналитическим, так и опытным путем весьма затруднительно, и это связано в значительной степени с тем, что неизвестно где, в каком месте ЦВМ произошел сбой и какова конкретная причина, вызвавшая его. Поэтому еще раз отметим важность аппаратного контроля в ДЦВМ, который позволяет обеспечить указание места сбоя с необходимой точностью, а следовательно, позволяет упростить анализ причин, вызывающих случайные сбои.

В современных ЦВМ среднее время бесбойной работы значительно меньше среднего времени безотказной работы. Например, согласно техническим условиям на ЦВМ БЭСМ-4 среднее время безотказной работы T_0 составляет 50 ч, а среднее время бесбойной работы $T_{сб}$ только 10 ч, т. е.

$$\frac{T_0}{T_{сб}} = \frac{\mu}{\lambda} = 5, \quad (12)$$

где λ — интенсивность отказов в ЦВМ.

В [Л. 6] отмечается, что величина этого отношения составляет примерно 10.

При оценке эффективности того или иного вида контроля требуется определенный подход. Когда применяется программно-логический контроль, заключающийся в двойном счете, необходимо учитывать длительность сбоя $\tau_{сб}$. Для аппаратного контроля длительность сбоя существенного значения не имеет. Поэтому трудно сравнивать количественно эффективность контроля при двойном счете с эффективностью аппаратных методов контроля.

12. ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНТРОЛЯ ПРИ ДВОЙНОМ СЧЕТЕ

Под эффективностью контроля при двойном счете понимается вероятность обнаружения сбоев в работе ЦВМ.

Прежде чем говорить об эффективности контроля при двойном счете, рассмотрим сбои с точки зрения их длительности. Все сбои, которые приводят к ошибкам в работе ЦВМ, можно разделить на следующие (по времени их существования, т. е. по длительности):

$$\tau_{сб} \leq t_{оп}; \quad (13)$$

$$t_{оп} < \tau_{сб} \leq \frac{T_{ц}}{2}; \quad (14)$$

$$\tau_{сб} \geq T_{ц}, \quad (15)$$

где $t_{оп}$ — время выполнения одной операции; $\tau_{сб}$ — длительность сбоя; $T_{ц}$ — время реализации цикла двойного счета.

Очевидно, сбои, длительность которых определяется выражением (15), не могут быть обнаружены при двойном счете и воспринимаются машиной как систематические. Сбои, определяемые выражениями (13) и (14), будут обнаружены и в данном примере их можно рассматривать как случайные.

С точки зрения максимальной производительности ЦВМ при двойном счете шаг вычислений t ($t=T_{ц}/2$) имеет некоторое оптимальное значение $t_{опт}$.

При условии

$$t > t_{опт}$$

увеличивается вероятность сбоя за время цикла двойного счета, а потому получаются значительными потери времени на исправление ошибок за счет сбоев путем третьего счета.

Если $t < t_{опт}$, то производительность ЦВМ уменьшается за счет увеличения количества обращений к внешней памяти (магнитному барабану или магнитной ленте), которые необходимы после окончания каждого шага вычислений [Л. 24].

Количественная оценка эффективности контроля при двойном счете весьма затруднительна в связи с тем, что характер случайных сбоев и причины их возникновения недостаточно изучены. Можно было бы найти соотношение, которое бы учло наиболее вероятные случаи, приводящие к сбоям, но все эти выкладки не будут иметь практического значения, так как в исходной формуле все или большинство величин окажутся неизвестными [Л. 22].

Существенным недостатком такого контроля является то, что при двойном счете не обнаруживаются систематические сбои. Вероятностью появления такого рода сбоев пренебречь нельзя, а поэтому двойной счет неполностью гарантирует достоверное решение задачи.

Из рассуждений, которые сводились к тому, что при длительности сбоя $\tau_{сб} \geq T_{ц}$ данный сбой не обнаруживается двойным счетом и воспринимается как систематический, можно сделать следующий вывод. При увеличении быстродействия ЦВМ эффективность контроля двойным счетом должна уменьшаться. Действительно, с увеличением быстродействия в общем случае уменьшается время реализации цикла двойного счета $T_{ц}$, а потому увеличивается вероятность превышения длительностью сбоя $\tau_{сб}$ длительность цикла $T_{ц}$.

13. ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ АППАРАТНОГО КОНТРОЛЯ

Как отмечалось ранее, аппаратный контроль в различных ЦВМ применяется с целью обнаружения случайных сбоев и устранения появившихся при этом ошибок. С точки зрения аппаратного контроля нет существенной разницы между случайным сбоем (кратковременным отказом в течение времени $\tau_{сб}$) и устойчивым отказом (неисправностью), а также систематическим (режимным) сбоем, который занимает промежуточное положение между случайным сбоем и устойчивым отказом. Разница между этими видами отказов ЦВМ заключается только в способе исправления ошибок, вызванных ими. Если исправление ошибок за счет случайных сбоев можно автоматизировать, то этого не удается осуществить так просто при возникновении неисправности или систематического сбоя, когда требуется восстановление (ремонт) отказавшего элемента или его регулировка. В одном случае приходится иметь дело с исправлением информации, в другом — с ремонтом или регулировкой, которые затрагивают вопрос автоматического ремонта (замены) аппаратуры.

В связи с этим под эффективностью аппаратного контроля надо понимать вероятность обнаружения случайных сбоев, считая при этом неисправность частным случаем сбоя.

Эффективность аппаратного контроля в общем случае зависит от двух факторов: эффективности метода, на котором базируется данный вид контроля, и схемного решения, реализующего данный вид контроля.

Следовательно, чем эффективнее метод и чем надежнее схемы контроля, тем эффективнее аппаратный контроль. Исходя из этого, оценку какого-либо метода аппаратного контроля необходимо производить следующим образом. Вначале рассчитать эффективность самого метода при допущении, что схемы контроля работают безотказно и бесспорно, а затем надежность схем контроля (с учетом отказов и сбоев) и, наконец, эффективность контроля.

Расчет эффективности метода не представляет больших трудностей. Определение безотказности и бесспорности работы схем контроля является более сложной задачей в связи с тем, что в проектируемых схемах контроля трудно предсказать характер сбоев, которые могут быть в этих схемах. Поэтому в литературе, как правило, когда речь идет об эффективности аппаратного контроля, имеется в виду эффективность метода контроля. Другими словами, все расчеты и анализ относятся к самому методу. Что касается надежности схем контроля и общей количественной оценки контроля в целом, то можно сказать, что их почти нет.

Переработка информации в ЦВМ осуществляется при помощи передачи и обработки кодов чисел и слов по определенному алгоритму (программе вычислений). Появление сбоев приводит к тому, что в коде может возникнуть одиночная или групповая ошибка (двукратная, трехкратная и т. д.).

Такие ошибки могут возникнуть при передаче кодов из одного устройства ЦВМ в другое, при хранении кодов в запоминающем устройстве и при переработке кодов, например, в арифметической части ЦВМ. Отметим, что все дальнейшие рассуждения будут относиться к ЦВМ параллельного действия. В таких машинах при передаче кодов и некоторых поразрядных логических операциях можно считать, что все разряды кода независимы друг от друга, так как каждый из них имеет свой канал передачи и хранения. При выполнении арифметических операций с кодами (сложение, вычитание, умножение, деление и ряд других вспомогательных операций) нельзя считать разряды кода независимыми, так как они связаны цепями переноса и сдвигов. Однако в [Л. 23] показывается, что ошибка может считаться одиночной и в том случае, если она возникла в одном разряде, а за счет цепей переноса исказила еще ряд других разрядов кода. С учетом этих допущений в литературе по аппаратному контролю производится оценка эффективности метода контроля.

Здесь мы сделаем попытку количественного сравнения эффективности различных методов аппаратного контроля.

Считая ошибки в каждом разряде кода независимыми, можно определить вероятность появления ошибки i -й кратности при известной вероятности искажения одного разряда двоичного кода. В этом случае ошибки в каждом из разрядов подчиняются биномиальному распределению вероятностей.

Вероятность появления однократной ошибки в n -разрядном двоичном коде может быть определена из выражения

$$P_1 = nq(1-q)^{n-1}, \quad (16)$$

где q — вероятность появления ошибки в отдельном разряде в течение одной операции,

Вероятность появления двукратной ошибки

$$P_2 = \frac{n(n-1)}{2} q^2 (1-q)^{n-2}. \quad (17)$$

Вероятность появления ошибок i -й кратности

$$P_i = C_n^i q^i (1-q)^{n-i}. \quad (18)$$

Из выражений (16), (17) и (18) следует, что значение вероятности появления ошибки i -й кратности может быть определено в том случае, когда известно значение вероятности появления ошибки в отдельном разряде за время одной операции. Оценка значения этой вероятности аналитическим путем связана с трудностями, которые связаны с анализом причин, вызывающих сбои. Получение статистического материала о сбоях каждого разряда требует точного указания места сбоя, что также является проблемным вопросом.

Известно, что получение статистического материала по сбоям ЦВМ в целом (имеется в виду совокупность таких устройств, как АУ, УУ, МОЗУ) не представляет особой сложности. Попытаемся использовать статистический материал по сбоям всей ЦВМ для оценки вероятности появления ошибки i -й кратности P_i .

В передаче и хранении каждого разряда двоичного кода участвует какое-то количество оборудования, которое может давать сбой и отказы. Обозначим интенсивность сбоев этого количества оборудования через μ_p . Очевидно, общая интенсивность сбоев оборудования всех n разрядов

$$\mu_o = n\mu_p.$$

Есть основание утверждать, что поток сбоев, так же как и поток отказов, является простейшим. Подтверждением этого может служить эксперимент, который был проведен на трех специализированных полупроводниковых ЦВМ [Л. 27].

В [Л. 5, 18] показано, что при небольших значениях вероятности появления каждого исхода ($q \leq 0,1$) можно вместо биномиального распределения использовать распределение Пуассона

$$P_i(t) = \frac{(\mu_o t)^i}{i!} e^{-\mu_o t}, \quad (19)$$

где $P_i(t)$ — вероятность появления i сбоев в коде за промежуток времени t .

Величина q в выражении (18) практически является малой (намного меньше 0,1 [Л. 22]), поэтому выражение (19) с большим приближением может быть использовано вместо (18). Если вместо времени t подставить длительность одной операции $t_{оп}$, то получим:

$$P_i = \frac{n\mu_p t_{оп}^i}{i!} e^{-n\mu_p t_{оп}}. \quad (20)$$

Вероятность однократной ошибки, вычисленная по формуле (20),

$$P_1 = n\mu_p t_{оп} e^{-n\mu_p t_{оп}}. \quad (21)$$

Преобразуем выражение (21) таким образом, чтобы показать его соответствие с (16).

Вероятность бессбойной работы одного какого-либо разряда в течение $t_{\text{оп}}$

$$p = e^{-\mu_p t_{\text{оп}}} = 1 - q. \quad (22)$$

Тогда, очевидно, вероятность сбоя

$$q = 1 - e^{-\mu_p t_{\text{оп}}}. \quad (23)$$

Учитывая малую величину $\mu_p t_{\text{оп}}$, после разложения в ряд правой части выражения (23) получаем:

$$q \approx \mu_p t_{\text{оп}}. \quad (24)$$

Если в выражение (21) подставить (22) и (24), то получим:

$$P_i = nq(1-q)^n. \quad (25)$$

Нетрудно видеть, что выражения (25) и (16) дают близкие по своему значению вероятности появления однократной ошибки в n -разрядном коде. Аналогично будет и для вероятностей появления ошибок других кратностей. Таким образом, для практических целей выражения (18) и (20) можно считать эквивалентными.

Вычисление вероятности появления ошибки i -й кратности по формуле (20) требует знания среднего значения интенсивности сбоев $\mu_0 = n\mu_p$, т. е. интенсивности сбоев оборудования всего регистра кода и цепей, связанных с ним. Практически получение такого статистического материала вызовет гораздо меньше затруднений, чем при анализе каждого разряда регистра двоичного кода. Иными словами, формула (20) более практична, чем формула (18).

Отметим, что с увеличением кратности ошибки вероятность ее появления уменьшается. Можно показать, что вероятность появления ошибки с кратностью $i=4$ (четырёхкратная) пренебрежимо мала. Поэтому при рассмотрении эффективности метода контроля ограничиваются значениями $i=1, 2, 3$.

Для оценки эффективности метода аппаратного контроля необходимо знать вероятность обнаружения (пропуска) ошибок различной кратности при данном методе контроля. Понятно, что ошибка будет пропущена в том случае, если она возникла, а применяемый метод контроля не может ее обнаружить. В связи с этим общая вероятность пропуска ошибки

$$P_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n P_i P_{\text{м.пр } i},$$

где P_i — вероятность появления ошибки i -й кратности; $P_{\text{м.пр } i}$ — вероятность пропуска ошибки i -й кратности при данном методе аппаратного контроля.

Аппаратный контроль по модулю. В настоящее время имеется достаточно работ [Л. 12, 22 и др.] по вероятности обнаружения ошибок различной кратности при контроле по модулю. Например, в [Л. 12] дается вывод формул вероятности обнаружения ошибок контролем по модулю $M=2^m-1$ при выявлении ошибок различной кратности ($i=2, 3, 4, 5, 6$). Результаты вычислений по этим формулам приведены в табл. 3.

Таблица 3

M	m	P_i				
		$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$
3	2	0,5	0,75	0,626	0,687	0,656
7	3	0,834	0,861	0,855	0,858	0,857
15	4	0,874	0,952	0,924	0,937	0,932
31	5	0,924	0,970	0,961	0,968	0,965
68	6	0,916	0,978	0,974	0,982	0,981
127	7	0,927	0,985	0,981	0,988	0,990
233	8	0,938	0,987	0,986	0,992	0,993
511	9	0,944	0,990	0,988	0,994	0,995
1 023	10	0,950	0,992	0,991	0,996	0,997

Одиночная ошибка при контроле по модулю обнаруживается с вероятностью $P=1$. В [Л. 12] показано, что вероятность обнаружения ошибок i -й кратности при контроле по модулю мало зависит от числа разрядов контролируемого двоичного числа при $n \geq 12$.

Из табл. 3 следует, что с увеличением модуля увеличивается эффективность контроля. Однако при этом количество дополнительного оборудования возрастает непропорционально росту эффективности контроля. Например, при контроле по модулю 3 дополнительное оборудование составляет примерно 15%, при модуле 7 — 50%, а при модуле 15—200% основного, при $M > 15$ эффективность контроля увеличивается незначительно. При приближении i к n , когда число разрядов n достаточно велико, вероятность пропуска ошибок будет мало отличаться от величины $P_{\text{м.пр}n} = 1/M$.

Вероятность обнаружения ошибок при контроле по модулю дополняет до единицы вероятность пропуска ошибок $P_{\text{м}n} = 1 - P_{\text{м.пр}i}$.

Для количественной оценки эффективности метода контроля по модулю рассмотрим двукратную и трехкратную ошибки, так как вероятность их появления существенна, а вероятность обнаружения самая низкая по сравнению со всеми другими ошибками, кратность которых больше трех.

Вероятность появления двукратной ошибки

$$P_2 = \frac{n^2 \mu_p^2 t_{\text{оп}}^2}{2} e^{-n \mu_p t_{\text{оп}}}.$$

Вероятность появления трехкратной ошибки

$$P_3 = \frac{n^3 \mu_p^3 t_{\text{оп}}^3}{6} e^{-n \mu_p t_{\text{оп}}}.$$

Вероятность пропуска двукратных и трехкратных ошибок при контроле по модулю 15

$$P_{\text{пр}} = 0,126 \frac{n^2 \mu_p^2 t_{\text{оп}}^2}{2} + 0,048 \frac{n^3 \mu_p^3 t_{\text{оп}}^3}{6},$$

или

$$[P_{\text{пр}} = 0,063 n^2 \mu_p^2 t_{\text{оп}}^2 (1 + 0,095 n \mu_p t_{\text{оп}})]. \quad (26)$$

Вероятность пропуска двукратных и трехкратных ошибок при контроле по модулю 7

$$P_{\text{пр}} = 0,083n^2\mu_p^2 t_{\text{оп}}^2 (1 + 0,281n\mu_p t_{\text{оп}}). \quad (27)$$

по модулю 3

$$P_{\text{пр}} = 0,25n^2\mu_p^2 t_{\text{оп}}^2 (1 + 0,166n\mu_p t_{\text{оп}}). \quad (28)$$

В формулах (26), (27) и (28) неизвестной является величина μ_p . Ориентировочную оценку значения μ_p можно произвести следующим образом. Зная интенсивность сбоев μ для всей ЦВМ (АУ, УУ, МОЗУ) и определив, какую часть всего оборудования ЦВМ составляет оборудование, относящееся к одному разряду, т. е. $\xi = Q_p/Q_o$, где Q_p , Q_o — количества единиц оборудования одного разряда и всей ЦВМ, найдем:

$$\mu_p \approx \xi\mu.$$

При этом имеется в виду, что интенсивность сбоев всей ЦВМ определена из статистических данных.

Так, если интенсивность сбоев ЦВМ $\mu = 0,1$ 1/ч, а $\xi = 0,001$, то $\mu_p \approx 10^{-4}$ 1/ч.

Аппаратный контроль в ДЦВМ. Рассмотрим эффективность аппаратного контроля в системе из двух однотипных синхронно работающих ЦВМ и сравним ее с эффективностью контроля по модулю.

При таком виде контроля происходит сравнение одноименных разрядов регистров обеих ЦВМ при помощи схем сравнения для каждой пары разрядов, в том числе и знаков чисел.

Однократная ошибка в этом случае может быть пропущена только тогда, когда она одновременно возникла в двух одноименных разрядах двоичного числа в течение времени сравнения $t_{\text{ср}}$ кодов при помощи устройства контроля.

Вероятность появления ошибки в данном разряде ЦВМ₁ за время $t_{\text{ср}}$

$$P'_1 = n\mu_p t_{\text{ср}} e^{-n\mu_p t_{\text{ср}}} \frac{1}{n}. \quad (29)$$

Вероятность появления ошибки в этом же разряде ЦВМ₂ будет такой же, т. е. $P'_1 = P''_1$.

Вероятность одновременного появления ошибки в двух одноименных разрядах обеих ЦВМ

$$P_{\text{пр}1} = P'_1 P''_1 = [P'_1]^2. \quad (30)$$

Очевидно, величина $P_{\text{пр}1}$ в формуле (30) представляет собой вероятность пропуска однократной ошибки при аппаратном контроле в системе из двух ЦВМ. Подставив формулу (29) в (30), получим:

$$P_{\text{пр}1} = \mu_p^2 t_{\text{ср}}^2 e^{-2n\mu_p t_{\text{ср}}}. \quad (31)$$

Вероятность появления ошибки в двух определенных разрядах ЦВМ₁

$$P'_2 = \frac{n^2\mu_p^2 t_{\text{ср}}^2}{2} e^{-2n\mu_p t_{\text{ср}}} \frac{1}{n^2}. \quad (32)$$

По аналогии с предыдущим определим вероятность пропуска двукратной ошибки при аппаратном контроле в ДЦВМ:

$$P_{\text{пр}2} = \frac{\mu_p^4 t_{\text{ср}}^4}{(1 \cdot 2)^2} e^{-2n\mu_p t_{\text{ср}}} \quad (33)$$

Вероятность пропуска трехкратной ошибки

$$P_{\text{пр}3} = \frac{\mu_p^6 t_{\text{ср}}^6}{(1 \cdot 2 \cdot 3)^2} e^{-2n\mu_p t_{\text{ср}}} \quad (34)$$

Анализируя выражения (31), (33) и (34), можно сделать вывод, что вероятность пропуска ошибки i -й кратности при аппаратном контроле в ДЦВМ

$$P_{\text{пр}i} = \frac{\mu_p^{2i} t_{\text{ср}}^{2i}}{(i!)^2} e^{-2n\mu_p t_{\text{ср}}}$$

Принимая во внимание только ошибки с кратностью $i=1, 2, 3$, найдем общую вероятность пропуска этих ошибок при контроле в ДЦВМ:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пр}1} + P_{\text{пр}2} + P_{\text{пр}3} \quad (35)$$

Подставив в (35) значения (31), (33) и (34), получим:

$$P_{\text{пр}} = \mu_p^2 t_{\text{ср}}^2 e^{-2n\mu_p t_{\text{ср}}} \left(1 + \frac{\mu_p^2 t_{\text{ср}}^2}{4} + \frac{\mu_p^4 t_{\text{ср}}^4}{36} \right) \quad (36)$$

Рассматривая выражения (26), (27) и (28) и выражение (36), можно сделать вывод, что эти зависимости позволяют количественно сравнить эффективности контроля по некоторому модулю и в системе из двух однотипных ЦВМ.

Можно показать, что в выражении (36) значение

$$e^{-2n\mu_p t_{\text{ср}}} \approx 1.$$

Действительно, если принять $n=40$; $\mu_p=10^{-3}$ 1/ч, $t_{\text{ср}}=1$ мксек, то получим:

$$2n\mu_p t_{\text{ср}} \approx 4 \cdot 10^{-11}. \quad (37)$$

По этим же соображениям

$$1 + \frac{\mu_p^2 t_{\text{ср}}^2}{4} + \frac{\mu_p^4 t_{\text{ср}}^4}{36} \approx 1. \quad (38)$$

С учетом выражений (37) и (38) вероятность пропуска ошибок в выражении (36)

$$P_{\text{пр}} \approx \mu_p^2 t_{\text{ср}}^2 \quad (39)$$

После аналогичных преобразований выражений (26), (27) и (28) получим вероятности пропуска ошибок при контроле соответственно по модулям 15, 7 и 3:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{пр}M=15} &\approx 0,063n^2\mu_p^2 t_{\text{оп}}^2; \\ P_{\text{пр}M=7} &\approx 0,083n^2\mu_p^2 t_{\text{оп}}^2; \\ P_{\text{пр}M=3} &\approx 0,25n^2\mu_p^2 t_{\text{оп}}^2. \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Анализируя выражения (39) и (40), можно прийти к выводу, что вероятность пропуска ошибок в n -разрядном регистре при контроле по модулю в основном определяется вероятностью пропуска двукратной ошибки, а при контроле в системе из двух ЦВМ — вероятностью пропуска однократной ошибки, которая происходит в течение времени t_{cp} одновременно в двух одноименных разрядах регистров $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$.

Отметим, что выражение (39) определяет вероятность пропуска однократной ошибки только для одной пары одноименных разрядов n -разрядных регистров $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$. Для всех пар разрядов n -разрядных регистров вероятность пропуска однократных ошибок

$$P_{npn} = nP_{np} (1 - P_{np})^{n-1} = n\mu_p^2 t_{cp}^2 (1 - \mu_p^2 t_{cp}^2) = n\mu_p^2 t_{cp}^2.$$

На числовых примерах можно убедиться в том, что вероятность пропуска ошибок в n -разрядном регистре и при контроле по модулю, и в системе из двух ЦВМ весьма мала. Зададимся реальными значениями n , μ_p , $t_{оп}$ для современных полупроводниковых ЦВМ: $n=40$; $\mu_p=0,001$ 1/ч; $t_{оп}=10 \cdot 10^{-6}$ сек. При этих значениях вероятность пропуска ошибки при контроле по модулю 3

$$P_{npM=3} \approx 0,25 \cdot 40^2 \left(\frac{0,001}{3600} \right)^2 (10 \cdot 10^{-6})^2 \approx 3 \cdot 10^{-21}.$$

Определим вероятность пропуска ошибки $P_{npM=3}(\theta)$ в течение времени θ . Пусть за это время ЦВМ делает N операций. Считая появление сбоев в каждой операции независимыми событиями, на основании биномиального распределения получим:

$$P_{npM=3}(\theta) = NP_{npM=3} (1 - P_{npM=3})^{N-1} \approx NP_{npM=3}. \quad (41)$$

Значение N можно представить таким образом:

$$N = N_0 \theta, \quad (42)$$

где N_0 — быстродействие ЦВМ, определяемое количеством операций в секунду.

Тогда выражение (41) с учетом (42) будет иметь вид:

$$P_{npM=3}(\theta) \approx N_0 \theta P_{npM=3}.$$

Если задаться $P_{npM=3}(\theta) = 0,01$, что соответствует вероятности безошибочной работы n -разрядного регистра $P_6(\theta) = 0,99$, и принять $N_0 = 10^6$ оп/с, то время безошибочной работы (гарантийное время)

$$\theta \approx \frac{0,01}{10^6 \cdot 3 \cdot 10^{-21}} \approx 3,3 \cdot 10^{12} \text{ с} \approx 10^9 \text{ ч.}$$

Этот пример позволяет сделать вывод, что эффективность контроля по модулю при обнаружении сбоев в регистрах ЦВМ весьма высока. Объясняется это тем, что однократные ошибки выявляются с вероятностью, равной 1, а вероятность появления двукратных ошибок весьма мала.

Характерной особенностью контроля по модулю является то, что контролируются только регистры ЦВМ. Но в реальных ЦВМ, кроме

регистров, имеется большое количество узлов, в которых нет регистров. Другими словами, при контроле по модулю многие элементы ЦВМ не могут быть охвачены аппаратным контролем. Для контроля этих цепей по существу требуются другие методы аппаратного контроля (например, дублирование, троирование). Если проанализировать структуру современных ЦВМ, то можно прийти к выводу, что основная часть оборудования таких устройств, как ОЗУ и УУ, не может быть охвачена контролем по модулю. Таким образом, при организации даже сквозного контроля по модулю, когда контролируется каждый регистр ЦВМ, остается значительная часть оборудования ЦВМ, не охваченная аппаратным контролем. Сбои в этой части оборудования безусловно не обнаруживаются и приводят к уменьшению достоверности функционирования ЦВМ.

В связи с этим определим коэффициент ϵ , который можно выразить так:

$$\epsilon = \frac{Q'}{Q_0},$$

где Q_0 — общее количество оборудования ЦВМ; Q' — оборудование ЦВМ, не охваченное контролем по модулю.

Коэффициент ϵ можно с некоторым приближением выразить через интенсивность сбоев:

$$\epsilon \approx \frac{\mu'}{\mu}, \quad (43)$$

где μ' — интенсивность сбоев оборудования, не охваченного контролем по модулю; μ — интенсивность сбоев всей ЦВМ.

Для уменьшения величины ϵ необходимо применять другие методы схемного контроля тех узлов ЦВМ, которые не могут быть охвачены контролем по модулю. Это приведет к увеличению достоверности функционирования ЦВМ.

Покажем, что эффективность контроля по модулю в основном будет определяться величиной ϵ .

Ранее отмечалось, что вероятность бессбойной (безошибочной) работы ЦВМ без контроля определяется выражением

$$P_d(\theta) = e^{-\mu\theta}.$$

Очевидно, вероятность безошибочной работы ЦВМ с аппаратным контролем по модулю $P_{д.к}\theta$ с учетом выражения (43) будет иметь вид

$$P_{д.к}(\theta) = e^{-\mu'\theta} \approx e^{-\epsilon\mu\theta}. \quad (44)$$

Значение $P_{д.к}(\theta)$, вычисленное по формуле (44), является максимально возможным, так как здесь не учитывается небольшая вероятность пропуска ошибки (сбоя) в оборудовании ЦВМ, которое контролируется по модулю.

Если задаться, как и в предыдущем числовом примере, $P_{д.к}(\theta) = 0,99$ и принять $\epsilon = 0,1$, а $\mu = 0,1$ 1/ч (для БЭСМ-4), то получим:

$$P_{д.к}(\theta) = e^{-0,1 \cdot 0,1\theta} = 0,99,$$

откуда гарантийное время $\theta \approx 1$ ч (при $\epsilon = 0,01$ и $\theta \approx 10$ ч).

Рассмотренные числовые примеры показывают, что достоверность функционирования ЦВМ с аппаратным контролем по модулю существенно зависит от величины ϵ в выражении (44).

Кроме того, эти примеры позволяют сделать вывод о том, что наиболее целесообразная величина модуля не должна превышать 3, так как увеличение модуля приводит к значительному увеличению контрольного оборудования при незначительном увеличении эффективности контроля.

Произведем оценку эффективности контроля в системе из двух ЦВМ. Предположим, что каждая из этих ЦВМ состоит из определенного количества сменных блоков и выходные сигналы этих блоков контролируются схемами сравнения. Для простоты рассуждений будем считать, что все сменные блоки имеют примерно одинаковое количество оборудования и одинаковую интенсивность сбоев $\mu_i = \mu_6$, причем

$$\sum_{i=1}^f \mu_i = \mu = f\mu_6, \quad (45)$$

где f — количество сменных блоков в одной из ЦВМ.

На основании изложенного вероятность одновременного появления сбоев в течение времени t_{cp} в каких-либо двух одноименных блоках

$$P_i \approx \mu_i^2 t_{cp}^2 = \mu_6^2 t_{cp}^2. \quad (46)$$

Вероятность одновременного сбоя хотя бы в одной из пар одноименных блоков ЦВМ₁ и ЦВМ₂ с учетом независимости появления сбоев в каждом из блоков ЦВМ

$$P_f = fP_i (1 - P_i)^{f-1} \approx fP_i = f\mu_6^2 t_{cp}^2. \quad (47)$$

Значение P_f , определяемое выражением (47), можно принять за вероятность пропуска сбоя в ДЦВМ с аппаратным контролем. Поэтому достоверность функционирования (вероятность безошибочной работы системы из двух ЦВМ)

$$P_d = 1 - P_f.$$

Пример. Предположим, что $f = 1\,000$; $\mu = 0,1$ 1/ч; $t_{cp} = 10^{-6}$ с. Тогда с учетом выражения (45) получим

$$P_f \approx 1\,000 \left(\frac{0,1}{1\,000 \cdot 3\,600} \right)^2 (10^{-6})^2 \approx 10^{-24}.$$

Следовательно, достоверность функционирования ДЦВМ практически можно считать равной 1, т. е.

$$P_d = 1 - P_f \approx 1 - 10^{-24} \approx 1.$$

Все эти рассуждения относятся только к возможностям методов контроля без учета надежности работы схем контроля.

Аппаратный контроль в системе из трех ЦВМ (ТЦВМ). Рассмотрим эффективность метода контроля в системе из трех однотипных синхронно работающих ЦВМ с применением схем «голосования» по большинству, т. е. «два из трех», и сравним ее с эффективностью контроля в системе из двух однотипных ЦВМ.

В качестве органов голосования в системе из трех ЦВМ могут быть использованы переключатели, работающие по мажоритарному принципу, которые выдают выходной сигнал при наличии хотя бы двух сигналов на входе [Л. 7].

Переключатель, работающий по указанному принципу, может быть собран из обычных логических элементов И, ИЛИ (рис. 29).

Предположим, что на переключатель (на рисунке обведен пунктиром), осуществляющий голосование, поступают одновременно три импульса длительностью $\tau_{\text{и}}$ или три перепада напряжения потенциальных сигналов с трех одноименных разрядов ЦВМ.

Ошибка при таком методе контроля за счет случайного сбоя может быть пропущена в том случае, когда сбой в течение времени $\tau_{\text{и}}$ произойдет в каких-либо двух из трех одноименных разрядов или во всех трех разрядах одновременно, т. е. вероятность пропуска однократной ошибки

$$P_{\text{пр1}} = P'_1 P''_1 + P'_1 P'''_1 + P''_1 P'''_1 + P'_1 P''_1 P'''_1, \quad (48)$$

где

$$P'_1 = P''_1 = P'''_1. \quad (49)$$

Величина P'_1 определяется по формуле (29). Тогда с учетом (49) выражение (48) примет следующий вид:

$$P_{\text{пр1}} \approx 3[P'_1]^2.$$

Вероятность пропуска двукратной ошибки $P_{\text{пр2}} \approx 3[P'_2]^2$. Значение P'_2 можно найти по формуле (32).

Нетрудно видеть, что вероятность пропуска случайных сбоев в системе из трех ЦВМ будет сравнима с вероятностью пропуска при контроле в системе из двух ЦВМ при условии, что

$$t_{\text{ср}} = \tau_{\text{и}}$$

или

$$t_{\text{ср}} = \tau_{\text{ф}},$$

где $\tau_{\text{ф}}$ — длительность фронта (спада) перепада напряжения потенциальных сигналов ЦВМ; $\tau_{\text{и}}$ — длительность импульсного сигнала.

Некоторые особенности методов аппаратного контроля. Если рассматривать все виды аппаратного контроля с точки зрения появления отказов и систематических сбоев в ЦВМ и последствий этих отказов и сбоев на общую надежность и производительность ЦВМ или систем из ЦВМ, то можно отметить ряд особенностей различных видов аппаратного контроля.

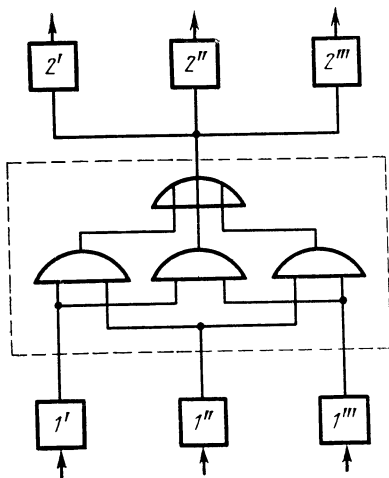


Рис. 29.

Будем считать, что оборудование контроля и переключатели, осуществляющие голосование, абсолютно надежны, т. е. будем рассматривать только возможности именно методов контроля.

В случае возникновения отказа при решении задачи в ЦВМ с аппаратным контролем по модулю машина останавливается после выполнения той операции, во время которой произошел отказ. Решение задачи может быть продолжено только после восстановления ЦВМ. В связи с тем, что степень локализации отказа при таком контроле низка, время восстановления таких ЦВМ может быть значительным из-за усложнения схем по сравнению с обычными ЦВМ без аппаратного контроля.

Кроме того, время восстановления для ЦВМ с контролем по модулю в значительной степени зависит от квалификации обслуживающего персонала и потому носит резко выраженный характер случайности, т. е. может колебаться в больших пределах (от нескольких минут до нескольких часов). При возникновении в таких ЦВМ систематического (режимного) сбоя, так же как и при отказе, происходит остановка машины. Отыскание места режимного сбоя осложняется тем, что при прохождении тестов такой сбой может себя не проявить; поэтому отыскание его должно производиться при решении той части задачи, в которой проявляется режимный сбой. В лучшем случае указанная часть задачи может состоять из одной какой-либо операции.

Для организации такого вида контроля, обеспечивающего высокую степень локализации отказа аппаратным способом, требуется чрезмерное увеличение контрольного оборудования, что может в значительной степени снизить надежность работы ЦВМ [Л. 22]. Кроме того, при данном методе контроля затрудняется организация контроля тех цепей, где нет регистров.

Аппаратный контроль в системе из двух однотипных ЦВМ позволяет указывать место отказа (сбоя) с точностью до двух одноименных сменных блоков и значительно снижает требование к квалификации обслуживающего персонала. В связи с этим при таком виде контроля время восстановления намного меньше, чем при контроле по модулю, и имеет величину, близкую к определенному постоянному значению, т. е. $T_{\text{в}} \approx \text{const}$.

Такой вид контроля позволяет при отказе в одной из ЦВМ продолжать решение задачи на исправной ЦВМ, которая определяется при помощи проверочного теста, хранящегося в памяти каждой ЦВМ.

При аппаратном контроле в системе из трех однотипных ЦВМ при отказе в одной из машин решение задачи может быть продолжено без остановки, но достоверность функционирования будет еще ниже, чем у одной ЦВМ без аппаратного контроля, так как вероятность появления случайного сбоя у двух ЦВМ будет больше, чем у одной. Здесь имеется в виду, что троирование осуществлено на уровне всей ЦВМ.

С точки зрения устранения последствий систематических (режимных) сбоев система из трех ЦВМ имеет неоспоримое преимущество, так как после режимного сбоя в одной из ЦВМ результат за счет голосования не исказится и система продолжит решение задачи без остановки.

Существенным недостатком аппаратного контроля в системе из трех ЦВМ является то, что при помощи схем голосования не имеется возможности указать точное место отказа (сбоя).

В качестве вывода к данному параграфу отметим, что принятые в ней допущения, а именно, что потоки сбоев и отказов являются простейшими и независимыми, и разряды в коде также независимы, не позволяют утверждать о точности выведенных формул, характеризующих эффективность рассмотренных видов аппаратного контроля. Учитывая, что допущения имели место при рассмотрении каждого из этих видов контроля, можно утверждать возможность количественного сравнения эффективности рассмотренных видов аппаратного контроля.

Приведенные примеры в этой главе позволяют сделать вывод о том, что эффективность методов аппаратного контроля в ДЦВМ и троированной ЦВМ весьма высока. Эффективность аппаратного контроля по модулю существенно зависит от той части количества оборудования, которая не может быть охвачена контролем по модулю; поэтому она непременно должна контролироваться другими методами. Но, как известно, эффективность того или другого вида аппаратного контроля определяется не только эффективностью метода, но и надежностью контрольного оборудования. Поэтому в следующей главе оценим эффективность рассмотренных видов аппаратного контроля с учетом надежности схем контроля.

14. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ

Аппаратный контроль по модулю. Случайные сбои (отказы) в устройстве аппаратного контроля по модулю будут выявляться с той же вероятностью, что и в основном оборудовании [Л. 22]. Слабым звеном устройства аппаратного контроля по модулю, в котором не обнаруживаются сбои и отказы, является схема сравнения остатков от деления чисел с их контрольными кодами. Отказ в схеме сравнения, в результате которого на ее выходе устанавливается напряжение, соответствующее отсутствию сигнала ошибки, приведет к нечувствительности устройства контроля к отказам и сбоям как в основном оборудовании ЦВМ, так и в оборудовании устройства контроля. Поэтому достоверность функционирования ЦВМ с аппаратным контролем по модулю будет определяться выражением (44), надежностью схемы сравнения остатков от деления чисел на модуль с их контрольными кодами и надежностью схем контроля тех узлов ЦВМ, которые не поддаются контролю по модулю.

Аппаратный контроль в ДЦВМ. В § 13 была произведена оценка эффективности контроля в системе из двух однотипных ЦВМ (ДЦВМ) с применением схем сравнения, рассмотренных в гл. 3, при условии, что эти схемы сравнения не имеют ни отказов, ни сбоев в работе, т. е. являются абсолютно надежными. Вполне очевидно, что реальные схемы сравнения не безотказны и могут давать сбои в работе.

Ранее отмечалось, что с целью обеспечения независимости работы ЦВМ₁ и ЦВМ₂, входящих в ДЦВМ, необходимы отдельные источники питания для ЦВМ₁ и ЦВМ₂. Необходимо отметить, что независимость работы системы контроля от ЦВМ₁ и ЦВМ₂ требует отдельных источников питания и для схем контроля. При соблюдении этих условий можно считать, что существует независимость в работе ЦВМ₁, ЦВМ₂ и схем контроля.

После этих замечаний рассмотрим возможные случаи неправильной работы схем сравнения и их влияние на эффективность контро-

ля. Неправильная работа схемы сравнения может быть вызвана отказом или сбоем в данной схеме. Естественно, отказ или сбой может привести к появлению сигнала ошибки, когда этого сигнала не должно быть, или, наоборот, — к пропаданию сигнала ошибки. Будем считать, что наличие сигнала ошибки соответствует 1, а отсутствие — 0.

Если в результате сбоя в схеме сравнения появился ложный сигнал ошибки (1 вместо 0), то схема контроля воспримет его как сбой в работе ЦВМ и этот ложный сигнал ошибки заставит повторно выполнять операцию, при выполнении которой произошел сбой в схеме сравнения, хотя сама операция выполнялась обеими ЦВМ правильно. Другими словами, в этом случае произойдет устранение ошибки в работе схемы сравнения путем повторения выполнения операции, во время которой произошел сбой в данной схеме сравнения. Следовательно, такой вид сбоя в любой из схем сравнения не представляет никакой опасности, так как его последствия устраняются самой системой контроля.

Второй случай (появление 0 вместо 1) соответствует одновременному сбою как в самой схеме сравнения, так и в одном из выходных одноименных сигналов, контролируемых данной схемой сравнения. Вероятность появления такого события примерно совпадает с вероятностью появления одновременного сбоя, определяемой выражением (46), и является исчезающе малой величиной.

Рассмотрение этих случаев позволяет сделать вывод, что система аппаратного контроля в ДЦВМ является надежным средством обнаружения и исправления ошибок в результате случайных сбоев как в работе ЦВМ, так и в самой схеме контроля.

В связи с этим можно считать, что эффективность аппаратного контроля в системе из двух однотипных ЦВМ по выявлению случайных сбоев с учетом этих сбоев в устройстве контроля будет совпадать с эффективностью самого метода, рассмотренного в § 13.

Рассмотрим влияние отказов в элементарных схемах сравнения на эффективность контроля в системе из двух однотипных ЦВМ. Отказ может привести к тому, что на выходе схем сравнения устанавливается 0 или 1 независимо от того, поступают на нее сигналы для сравнения или нет.

Предположим, что в результате отказа на выходе схемы сравнения постоянно существует сигнал ошибки. Очевидно, что после определенного числа повторений одной и той же операции ДЦВМ остановится и произойдет указание места отказа с точностью до двух сменных одноименных блоков B_i , B'_i и их схемы сравнения. В качестве одноименных блоков можно рассматривать и два одноименных разряда регистров $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$. Такой вид отказа обнаруживается так же, как и отказ в одном из блоков (разрядов) $ЦВМ_1$ или $ЦВМ_2$. Поэтому такие отказы в схемах сравнения не могут влиять на достоверность решения задачи, так как указывается место их возникновения, и они обнаруживаются системой контроля.

Большую опасность представляет отказ в схеме сравнения, когда на выходе ее устанавливается 0 независимо от поступления на нее контролируемых сигналов. В этом случае схема сравнения будет нечувствительна ни к сбоям, ни к отказам в одноименных сигналах, которые она должна контролировать. Отказ такого вида требует детального рассмотрения.

Прежде чем приступить к освещению этого вопроса, сделаем некоторые предварительные пояснения. Характерной особенностью

ЦВМ как преобразователя информации является сложность логических связей между элементами, из которых состоит ЦВМ. Исходя из этого, выходные контролируемые сигналы блоков B_i можно разделить на два вида.

К первому относятся сигналы, которые оказывают влияние на внутреннее состояние других блоков, т. е. эти сигналы обладают логическим последствием. Следует отметить, что такие сигналы являются наиболее характерными для любой ЦВМ.

Ко второму относятся сигналы, которые не участвуют в логике работы машины. Примером сигналов такого вида могут служить электрические сигналы, при помощи которых выводятся результаты вычислений на электромеханическую печать, магнитную ленту и другие выходные регистрирующие устройства. К таким сигналам можно отнести уровни напряжений триггеров выходного регистра, с которого осуществляется запись чисел в ОЗУ или выдача их на выходные регистрирующие устройства.

Отказы в схемах сравнения, которые контролируют одноименные сигналы первого вида, менее опасны, чем отказы в схемах сравнения, предназначенные для контроля одноименных сигналов второго вида, т. е. выходных сигналов. Поясним это на примере. Пусть отказ произошел в схеме сравнения, контролирующей два одноименных сигнала первого вида. Предположим, что через некоторое время после этого отказа в одном из этих контролируемых сигналов произошел сбой. Очевидно, данная схема сравнения не будет реагировать на этот сбой, так как в результате отказа на ее выходе установился 0. Сбой в одном из контролируемых сигналов вызовет несоответствие за счет последствия некоторого количества пар других одноименных контролируемых сигналов, что воспримется схемами сравнения этих сигналов как ошибка, которая будет устранена путем повторения операции.

В этом случае происходит подстраховка предыдущих схем сравнения последующими. При контроле выходных сигналов такой подстраховки не существует. Поэтому в дальнейшем мы будем анализировать влияние отказов в схемах сравнения, которые контролируют разряды выходных регистров $ЦВМ_1$ и $ЦВМ_2$.

Из всех этих рассуждений следует, что эффективность контроля в системе из двух ЦВМ в основном будет определяться безотказностью схем сравнения.

Обозначим вероятность появления отказа за время t в элементарной схеме сравнения через q_{cx} , а вероятность появления случайного сбоя или отказа в одном разряде выходного регистра—через q_p .

Вероятность появления отказа в схеме сравнения может быть определена через вероятность ее безотказной работы:

$$q_{cx} = 1 - P_{cx}(t);$$

здесь $P_{cx}(t)$ — вероятность безотказной работы элементарной схемы сравнения:

$$P_{cx}(t) = e^{-\lambda_{cx}t},$$

где λ_{cx} — параметр потока отказов (интенсивность отказов) схемы сравнения.

Вероятность безотказной и бессбойной работы одного из разрядов выходного регистра равна

$$p_p(t) = e^{-\lambda_p t} e^{-\mu_p t},$$

где λ_p — интенсивность отказов одного разряда выходного регистра.

Следовательно, вероятность появления отказа или сбоя в одном из разрядов выходного регистра будет иметь вид:

$$q_p = 1 - e^{-(\lambda_p + \mu_p) t}.$$

Вероятность отказа хотя бы одной схемы сравнения из n

$$Q_{cx1} = nq_{cx}(1 - q_{cx})^{n-1}.$$

Вероятность отказа i схем сравнения

$$Q_{cx i} = C_n^i q_{cx}^i (1 - q_{cx})^{n-i}.$$

Вероятность появления отказа или сбоя хотя бы в одном разряде n -разрядного регистра ЦВМ₁ (или ЦВМ₂)

$$Q_{p1} = nq_p(1 - q_p)^{n-1}.$$

Вероятность появления отказа или сбоя в i разрядах

$$Q_{p i} = C_n^i q_p^i (1 - q_p)^{n-i}.$$

Вероятность появления отказа или сбоя в одном определенном разряде одной из ЦВМ

$$Q'_{p1} = Q_{p1} \frac{1}{n} = q_p (1 - q_p)^{n-1}.$$

Вероятность отказа схемы сравнения, контролирующей два определенных одноименных разряда из числа n пар одноименных разрядов

$$Q'_{cx1} = Q_{cx1} \frac{1}{n} = q_{cx} (1 - q_{cx})^{n-1}.$$

Ошибка будет пропущена только в том случае, если в течение времени t произошел отказ в схеме сравнения, в результате на выходе ее установился 0 и в течение этого же времени произошел отказ или сбой в одном из одноименных разрядов, которые контролируются данной схемой сравнения. Вероятность такого события

$$Q_1 = Q'_{cx1} Q'_{p1},$$

где Q_1 — вероятность пропуска ошибки при отказе одной схемы сравнения.

Вероятность пропуска ошибки с учетом всех n схем сравнения выходных сигналов

$$Q_{np}(\theta) = nQ_1[1 - Q_1]^{n-1}, \quad (50)$$

где

$$Q_1 = 0,5q_{cx}(1 - 0,5q_{cx})^{n-1}q_p(1 - q_p)^{n-1}. \quad (51)$$

Коэффициент 0,5 в выражении (51) взят в связи с тем, что вероятность появления отказа в элементарной схеме сравнения, когда на ее выходе устанавливается 0, можно считать равной вероятности отказа, приводящего к установлению на выходе 1. Выше отмечалось, что вероятность обнаружения отказов в схемах сравнения, когда на их выходе устанавливается 1, равна единице.

Вероятность обнаружения ошибок за счет отказов и сбоев в ЦВМ₁ и ЦВМ₂ с учетом отказов в схеме контроля, т. е. достоверность функционирования ДЦВМ,

$$P_d(\theta) = 1 - Q_{np}(\theta).$$

В выражении (50)

$$[1 - Q_1]^{n-1} < 1,$$

поэтому

$$Q_{np}(\theta) < nQ_1.$$

Учитывая, что в выражении (51)

$$(1 - 0,5q_{cx})^{n-1} < 1;$$

$$(1 - q_p)^{n-1} < 1,$$

получим:

$$Q_{np}(\theta) < 0,5nq_{cx}q_p = 0,5n [1 - e^{-\lambda_{cx}\theta}] [1 - e^{-(\lambda_p + \mu_p)\theta}]. \quad (52)$$

Коэффициент 2 в показателе степени числа e (52) взят с учетом вероятности появления отказа или сбоя в обоих одноименных разрядах, контролируемых схемой сравнения.

Если принять $\lambda_{cx} \approx \lambda_p$ (при условии, что разряд регистра содержит такой же триггер, как и схема сравнения), а на основании (12) $\mu_p \approx 5\lambda_p \approx 5\lambda_{cx}$ получим:

$$Q_{np}(\theta) \approx 0,5n (1 - e^{-\lambda_{cx}\theta}) (1 - e^{-6\lambda_{cx}\theta}).$$

Определим интенсивность отказов λ_{cx} элементарной схемы сравнения. В табл. 4 приведен состав деталей для схемы сравнения при использовании триггера [Л. 4, 10].

Таблица 4

Название элемента	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-3}$, 1/ч	Количество деталей
Импульсный трансформатор	0,00015	1
Полупроводниковые триоды	0,0005	2
Конденсаторы керамические	0,001	5
Полупроводниковые диоды	0,0003	4
Резисторы	0,00002	9

С учетом этих данных $\lambda_{cx} \approx 0,005 \cdot 10^{-3}$ 1/ч. Поэтому достоверность функционирования ДЦВМ

$$P_d(\theta) \approx 1 - 05, n (1 - e^{-0,005 \cdot 10^{-3}\theta}) (1 - e^{-0,06 \cdot 10^{-3}\theta}). \quad (53)$$

В табл. 5 приведены значения $P_d(\theta)$, рассчитанные по формуле (53) при $n=40$ и различных θ .

Рассмотренный пример позволяет сделать вывод о том, что эффективность аппаратного контроля в системе из двух однотипных ЦВМ с учетом надежности схем сравнения является весьма высокой. Чтобы понять, насколько эффективен этот метод контроля, приведем такой пример. Интенсивность сбоев для ЦВМ БЭСМ-4 без контроля $\mu=0,1$ 1/ч. Достоверность функционирования этой ЦВМ

$$P_d(\theta) = e^{-0,1\theta}. \quad (54)$$

Из выражения (54) следует, что вероятность безошибочного решения $P_d(\theta) = 0,9$; гарантийное время решения $\theta = 1$ ч.

В гл. 2 рассматривались три возможных режима работы ДЦВМ при условии логической структуры устройства контроля, поясняемой на рис. 21. Эти режимы таковы:

1) автономная работа ЦВМ₁ и ЦВМ₂; при этом режиме ЦВМ₁ и ЦВМ₂ работают независимо друг от друга и каждая из них может решать свою задачу;

Таблица 5

$t, \text{ч}$	$P_d(\theta)$
70	0,99997
700	0,997
3 570	0,925

2) синхронная работа ЦВМ₁ и ЦВМ₂, когда они решают одну задачу и происходит сравнение результатов их вычислений на выходных регистрах;

3) совместная синхронная работа ЦВМ₁ и ЦВМ₂ со сравнением результатов вычислений и локализацией отказов (сбоев).

При втором режиме работы достоверность функционирования определяется в основном надежностью схем сравнения, контролируемых одноименные выходные сигналы ЦВМ₁ и ЦВМ₂. В этом режиме применение схем сравнения других (не выходных) одноименных сигналов ЦВМ₁ и ЦВМ₂ позволяет подстраховывать схемы сравнения выходных одноименных сигналов. При этом режиме вопрос о разбиении ЦВМ₁ и ЦВМ₂ на контролируемые блоки не является главным.

Третий режим работы ДЦВМ, при котором осуществляется локализация отказов (сбоев), требует разбиения ЦВМ₁ и ЦВМ₂ на контролируемые сменные блоки. При разбиении на блоки должны учитываться два основных момента: надежность локализации отказов (сбоев) и количество оборудования аппаратного контроля ДЦВМ.

Рассмотрим, каким образом влияет на надежность локализации отказов (сбоев) разбиение на контролируемые сменные блоки ЦВМ₁ и ЦВМ₂. Как было показано, отказ (сбой) не может быть обнаружен (локализован) в случае, если произошел отказ в схеме сравнения, контролирующей два одноименных блока ЦВМ₁ и ЦВМ₂, и в одном из этих блоков. Вероятность такого события

$$Q(\theta) = 0,5 Q_{cx}(\theta) Q_b(\theta), \quad (55)$$

где $Q_{cx}(\theta)$ — вероятность выхода из строя схемы сравнения, контролирующей два одноименных блока ЦВМ₁ и ЦВМ₂; $Q_b(\theta)$ — вероятность появления отказа (сбоя) в одном из одноименных контролируемых блоков данной схемой сравнения.

Выражение (55) можно представить в следующем виде:

$$Q(\theta) = 0,5 [1 - e^{-\lambda_{cx}\theta}] [1 - e^{-2\lambda_b\theta}], \quad (56)$$

где λ_b — интенсивность отказов одного из одноименных блоков, контролируемых данной схемой сравнения.

Если предположить, что все контролируемые блоки ЦВМ₁ и ЦВМ₂ имеют одинаковое количество оборудования, то получим:

$$\lambda_0 = \frac{\lambda}{n}, \quad (57)$$

где n — количество контролируемых блоков в ЦВМ₁ (ЦВМ₂); λ — интенсивность отказов ЦВМ₁ (ЦВМ₂).

С учетом формулы (57) выражение (56) будет иметь вид:

$$Q(\theta) \approx 0,5 [1 - e^{-\lambda_{\text{сх}}\theta}] \left[1 - e^{-2 \frac{\lambda}{n} \theta} \right].$$

Можно показать, что вероятность того, что не будет выявлен (локализован) хотя бы один из n блоков,

$$Q_n(\theta) \approx 0,5n [1 - e^{-\lambda_{\text{сх}}\theta}] \left[1 - e^{-2 \frac{\lambda}{n} \theta} \right]. \quad (58)$$

При разложении в ряд двучленов в квадратных скобках выражения (58) получим:

$$Q_n(\theta) \approx 0,5n\lambda_{\text{сх}}\theta \cdot 2 \frac{\lambda}{n} \theta = \lambda_{\text{сх}}\lambda\theta^2. \quad (59)$$

Из формулы (59) следует, что надежность обнаружения (локализации) отказов (сбоев) не зависит от вариантов разбиения ЦВМ₁ и ЦВМ₂ на контролируемые блоки, а зависит только от интенсивности отказов ЦВМ₁ и ЦВМ₂.

Можно определить время θ , в течение которого может проработать устройство аппаратного контроля ДЦВМ с заданной надежностью локализации отказов (сбоев), т. е.

$$\theta = \sqrt{\frac{Q_n(\theta)}{\lambda_{\text{сх}}\lambda}}.$$

Выражение (59) справедливо при значении $Q_n(\theta) \leq 0,1$, так как разложение в ряд двучленов в квадратных скобках формулы (58) осуществлялось с учетом данного условия.

Определим надежность локализации отказов (сбоев) устройством аппаратного контроля в ДЦВМ на базе БЭСМ-4 с учетом надежности рассмотренной схемы сравнения при $Q_n(\theta) = 0,1$, т. е. при $P_n(\theta) = 0,9$:

$$\theta = \sqrt{\frac{0,1}{0,005 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02}} = 1000 \text{ ч.}$$

Этот пример свидетельствует о том, что надежность локализации отказов (сбоев) устройством аппаратного контроля в ДЦВМ весьма высока.

Рассмотрим, каким образом надо производить разбиение ЦВМ на контролируемые блоки с точки зрения выбора оптимального количества оборудования устройства контроля и оборудования запасных блоков ЦВМ, необходимых для замены отказавших.

Вполне понятно, что с укрупнением сменных блоков уменьшается количество оборудования устройства контроля. Однако при этом возможность унификации блоков уменьшается, что связано с увеличением количества оборудования запасных блоков. Очевидно, с уменьшением блоков количество оборудования устройства контроля возрастает, а количество оборудования запасных блоков уменьшается за счет увеличения возможности унификации. Из этих рассуждений следует, что для разрабатываемых ДЦВМ, когда требуется локализация отказов (сбоев) с точностью до сменного блока, разбиение надо производить таким образом, чтобы суммарное количество оборудования устройства контроля и запасных блоков было минимальным.

В ДЦВМ, создаваемых на базе существующих ЦВМ, по-видимому, наиболее целесообразным будет разбиение на группы ячеек, каждая из которых будет контролироваться одной схемой сравнения. При этом количество ячеек в группе будет определяться требованием уменьшения времени восстановления, квалификацией обслуживающего персонала и затратами на создание устройства контроля. Другими словами, при создании ДЦВМ на базе существующих ЦВМ разбиение надо производить, исходя из наибольшего экономического эффекта.

Аппаратный контроль в ТЦВМ. Рассмотрим эффективность контроля в системе из трех однотипных синхронно работающих ЦВМ с применением переключателей, работающих по мажоритарному принципу, т. е. осуществляющих голосование по принципу два из трех. Если считать переключатели абсолютно надежными, то вероятность исправления ошибок за счет случайных сбоев при таком виде контроля будет, как и в ДЦВМ, ничтожно мало отличаться от 1. Вполне понятно, что достоверность функционирования при таком виде аппаратного контроля будет зависеть только от безотказности мажоритарных элементов, так как при отказе в одном из них, когда на выходе переключателя установится 0 или 1, происходит отказ в работе системы.

Для системы из трех ЦВМ, когда органы голосования установлены только на выходных регистрах этих ЦВМ, т. е. на каждые три одноименных разряда приходится один переключатель, работающий по мажоритарному принципу, вероятность отказа одного из n таких переключателей за время θ равна

$$Q(\theta) = nq(1-q)^{n-1},$$

где q — вероятность отказа одного переключателя в течение времени θ .

Поэтому достоверность функционирования системы из трех ЦВМ будет определяться в основном следующим выражением:

$$P_d(\theta) = 1 - nq(1-q)^{n-1}.$$

Значение вероятности, вычисленной по формуле (56), будет иметь примерно такой же порядок, как и для системы из двух ЦВМ.

Из рассмотренного в этой главе можно сделать два основных вывода:

1. Эффективность аппаратного контроля в ДЦВМ и ТЦВМ определяется практически только надежностью схем контроля выходных сигналов ЦВМ (в троированной ЦВМ под схемами контроля подразумеваются мажоритарные элементы).

2. Эффективность аппаратного контроля по модулю также зависит от надежности контрольного оборудования и величины ε , определяемой формулой (43).

Глава четвертая

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА УВЕЛИЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЦВМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ КОНТРОЛЯ

15. ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ОТ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ КОНТРОЛЯ ЦВМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

В гл. 1 показано, что основным показателем таких ЦВМ является стоимость единицы количества информации, определяемой из выражения (5). При проектировании конкретной ЦВМ можно определить ее стоимость с учетом того или иного вида контроля и оценить стоимость эксплуатации при различных видах контроля.

Чтобы произвести оценку различных видов контроля, не имея конкретных данных по стоимости ЦВМ и затрат на ее эксплуатацию, примем следующее допущение. Будем считать, что стоимость ЦВМ и затраты на ее эксплуатацию прямо пропорциональны количеству оборудования ЦВМ, т. е. $A_c = kC$, где C — количество оборудования ЦВМ; k — коэффициент пропорциональности.

Обозначим количество оборудования ЦВМ с программно-логическим контролем через C_0 , а с аппаратным контролем — через $C = C_0 + C_k$, где C_k — количество оборудования устройства аппаратного контроля (дополнительное оборудование).

Обычно устройство контроля состоит из таких же элементов, как и основное оборудование ЦВМ. В связи с этим погрешность принятого допущения заключается в основном в том, что не учитываются квалификация обслуживающего персонала и его количество при различных видах контроля данной ЦВМ.

Учитывая указанные замечания, выражение (5) можно представить в следующем виде:

$$a \approx \frac{kC}{N_0 (T - T_{\text{пот}})}.$$

Для сравнительной оценки различных видов контроля введем понятие условной стоимости обработанной информации a'

$$a' = \frac{a}{kC_0}.$$

Очевидно, что

$$a' = \frac{1 + \beta}{N_0 (T - T_{\text{пот}})}, \quad (60)$$

где значение β определяется из выражения

$$\beta = \frac{C_k}{C_0}. \quad (61)$$

На основании изложенного можно считать, что оптимальным видом контроля данной конкретной ЦВМ будет такой, который обеспечит наименьшее значение условной стоимости обработанной информации a' .

ЦВМ с контролем методом двойного счета. Из [Л. 24] известно, что время решения какой-либо задачи методом двойного счета зависит от длины шага вычислений и частоты случайных сбоев в ЦВМ:

$$T_2 = T_1 \left[\frac{2}{1 - p(t)} - \frac{\omega}{t} \right], \quad (62)$$

где T_2 — математическое ожидание времени, затраченного на решение задачи двойным счетом; T_1 — время решения задачи при однократном счете, учитывающее только быстроедействие ЦВМ; t — время, затрачиваемое на один шаг вычислений; $p(t)$ — вероятность появления сбоя за время t ; ω — время, затрачиваемое на передачу результатов на магнитный барабан или магнитную ленту после каждого участка вычислений.

Зная интенсивность сбоев ЦВМ, выражение (62) можно записать в следующем виде:

$$T_2 = T_1 \left[2e^{\mu t} + \frac{\omega}{t} \right] = kT_1. \quad (63)$$

Реальные значения k в выражении (63), как следует из [Л. 24, 27], могут значительно превышать величину $k=2$, если не учитывать оптимальное соотношение между ω , t и μ в выражении (63). В [Л. 24, 27] приводятся примеры подбора оптимального значения k , которые позволяют считать $k_{\min}=2,2$.

На основании изложенного полезное время $T_{\text{пол1}}$, характеризующее условную стоимость обработанной информации ЦВМ с контролем путем двойного счета, определится из выражения

$$T_{\text{пол1}} \approx \frac{T - T_{\text{в1}}(T) - T_{\text{пр1}}(T)}{2,2},$$

где $T_{\text{в1}}(T)$ и $T_{\text{пр1}}(T)$ — потери времени на восстановление и профилактику за период T .

Поэтому для такой ЦВМ значение

$$a'_{1} = \frac{2,2(1 + \beta_1)}{N_o [T - T_{\text{в1}}(T) - T_{\text{пр1}}(T)]}, \quad (64)$$

где $\beta_1=0$, так как при контроле методом двойного счета в выражении (61) $\beta=0$.

ЦВМ с аппаратным контролем по модулю 3. При аппаратном контроле по модулю потери времени

$$T_{\text{пот2}}(T) = T_{\text{в2}}(T) + T_{\text{пр2}}(T) + T_{\text{с62}}(T),$$

где $T_{\text{в2}}(T)$, $T_{\text{пр2}}(T)$ и $T_{\text{с62}}(T)$ — потери времени при контроле по модулю соответственно на восстановление, профилактику и обнаружение сбоев и устранение их последствий.

Оборудование устройства контроля без учета схем узлов ЦВМ при контроле по модулю 3 составляет примерно 20% основного оборудования ЦВМ [Л. 22].

Как отмечалось выше, для увеличения эффективности контроля по модулю необходимо применять схемы устройства управления ЦВМ и других ее узлов и устройств, которые не могут быть охвачены контролем по модулю. Определение этого количества оборудования является вопросом больше практическим, чем теоретическим. Однако предположение о том, что оборудование контроля будет меньше, чем основное оборудование ЦВМ, можно считать вполне допустимым.

В связи с этим значение β в выражении (60) для аппаратного контроля по модулю $0,2 < \beta_2 < 1$, где β_2 — отношение оборудования аппаратного контроля по модулю к основному оборудованию ЦВМ, поэтому выражение (60) для аппаратного контроля по модулю будет иметь вид

$$a'_{2} = \frac{1 + \beta_2}{N_0 [T - T_{в2}(T) - T_{нр2}(T) - T_{с62}(T)]}.$$

Аппаратный контроль в ДЦВМ. После аналогичных рассуждений, которые относились к аппаратному контролю по модулю, выражение (60) для аппаратного контроля в ДЦВМ можно представить в следующем виде:

$$a'_{3} = \frac{1 + \beta_3}{N_0 [T - T_{в3}(T) - T_{нр3}(T) - T_{с63}(T)]}. \quad (65)$$

Очевидно, в этом выражении $\beta_3 > 1$. Значение β_3 учитывает оборудование второй ЦВМ и оборудование устройства контроля ДЦВМ. Для более точного определения β_3 необходимо знать, каким образом произведено разбиение ЦВМ, входящих в ДЦВМ, на контролируемые блоки. Возможны различные варианты разбиения. С точки зрения уменьшения времени восстановления и профилактики, при которой отыскиваются слабые элементы при утяжеленных режимах работы, необходимо ЦВМ разбивать на сменные блоки таким образом, чтобы каждые два одноименных блока ЦВМ₁ и ЦВМ₂ контролировались своей схемой сравнения. В этом случае, как показано в § 8, можно указать место неисправности с точностью до двух одноименных сменных блоков ЦВМ₁ и ЦВМ₂.

В гл. 2 рассматривалась схема сравнения, позволяющая контролировать два одноименных блока ЦВМ₁ и ЦВМ₂, каждый из которых имеет n выходов. При этом число n может быть практически любым. Рассмотренная схема сравнения включает импульсный трансформатор на n входов и триггер, который служит для запоминания сигнала ошибки.

Если предположить, что сменный блок ЦВМ₁ (ЦВМ₂) по количеству оборудования равен четырем триггерам, что примерно соответствует разбиению на блоки современных ЦВМ второго поколения, то оборудование контроля ДЦВМ составит 25—30% оборудования ЦВМ₁ (ЦВМ₂).

Таким образом, ориентировочно можно считать, что $\beta_3 \approx 1,25$.

Аппаратный контроль в троированной ЦВМ. Выражение (60) для данного вида контроля будет иметь вид

$$a'_{4} = \frac{1 + \beta_4}{N_0 [T - T_{в4}(T) - T_{нр4}(T) - T_{с64}(T)]}. \quad (66)$$

При этом $\beta_4 > 2$. Значение β_4 учитывает оборудование двух ЦВМ и мажоритарных элементов. Следует отметить, что в троиро-

ванной ЦВМ за счет голосования происходит автоматическое устранение последствий сбоев, поэтому

$$T_{сб4}(T) = 0. \quad (67)$$

Выражение (67) справедливо в том случае, если после появления отказа в одной из ЦВМ эта ЦВМ восстанавливается.

Определение потерь времени на восстановление, профилактику, обнаружение и устранение последствий сбоев для проектируемых ЦВМ с различными видами контроля является сложной задачей. Получение средних потерь времени требует необходимого количества статистического материала и его обработки. Не зная потерь времени при различных видах контроля, невозможно определить значение a' в выражении (60) для этих видов контроля. Определение значения β для различных видов контроля существенных затруднений не представит.

В идеальном случае сравнение эффекта от введения того или другого вида контроля можно было бы произвести практически, спроектировав на базе какого-либо типа ЦВМ вычислительные машины с различными видами контроля. В этом случае можно было бы на основе статистического материала определить времена потерь при различных видах контроля и какой из видов контроля является оптимальным для ЦВМ, предназначенных для решения научно-технических задач.

В литературе нет данных по эксплуатации ЦВМ с аппаратным контролем по модулю. В связи с этим не представляется возможным хотя бы качественно определить, какой из рассмотренных видов контроля является оптимальным.

Произведем сравнение условной стоимости правильно обработанной информации при контроле методом двойного счета, при аппаратном контроле в ДЦВМ и троированной ЦВМ для конкретной ЦВМ, например БЭСМ-4.

ЦВМ БЭСМ-4 с контролем методом двойного счета. Будем считать работу ЦВМ круглосуточной. Потери времени на восстановление в течение одного месяца можно определить по формуле

$$T_{в1}(T) \approx \frac{T}{T_0} T_{в1},$$

где T_0 , $T_{в1}$ — среднее время между отказами и среднее время восстановления.

Учитывая, что для ЦВМ БЭСМ-4 $T_0 = 50$ ч, а $T_{в1} \approx 0,5$ ч, получим:

$$T_{в1}(T) = \frac{24 \cdot 30}{50} \cdot 0,5 \approx 7 \text{ ч.}$$

На ежедневную профилактику ЦВМ БЭСМ-4 отводится примерно 2 ч, а на недельную — 10 ч. Поэтому потери времени на профилактику

$$T_{пр1}(T) = 30 \cdot 2 + 10 \cdot 4 = 100 \text{ ч.}$$

Следовательно, условная стоимость обработанной информации ЦВМ БЭСМ-4 с контролем методом двойного счета на основании формулы (64)

$$a'_{1} \approx \frac{2,2}{N_0(720 - 7 - 100)} \approx \frac{1}{278N_0}.$$

Система из двух ЦВМ БЭСМ-4 с аппаратным контролем. Для ЦВМ с аппаратным контролем время на устранение последствий сбоев будет ничтожно малым по сравнению с потерями времени на восстановление и профилактику. Это объясняется возможностью повторения операции, при выполнении которой произошел сбой.

Время восстановления ДЦВМ сводится ко времени, необходимому для замены отказавшегося блока. Известно, что время замены составляет примерно 10% среднего значения времени, затраченного на одно восстановление. Поэтому $T_{вз} \approx 0,1T_{в1}$ (где $T_{в1}$ и $T_{вз}$ — соответственно средние времени восстановления обычной ЦВМ с тестовым контролем и ДЦВМ).

Количество отказов в ДЦВМ в 2 раза больше, чем в обычной ЦВМ, поэтому потери времени на восстановление ДЦВМ с аппаратным контролем $T_{вз}(T) \approx 0,1T_{в1}(T)2 \approx 1,5$ ч.

Можно ожидать, что потери времени на прогнозирование отказов в ДЦВМ будут на порядок меньше, чем в обычной ЦВМ, что объясняется высокой степенью локализации отказов. В обычной ЦВМ с тестовым контролем значительная часть времени профилактики отводится для проверки работоспособности ЦВМ. В ДЦВМ такой проверке должно подвергаться устройство аппаратного контроля. Учитывая несложность структуры устройства контроля, можно считать, что затраты времени на его проверку будут незначительными. Что касается проверки работоспособности ДЦВМ, то в ней нет необходимости, если проверено устройство контроля. В связи с этим можно считать ориентировочное значение потерь времени на профилактику ДЦВМ $T_{прз}(T) \approx 0,1T_{пр1}(T) = 10$ ч.

Значит, условная стоимость правильно обработанной информации в ДЦВМ БЭСМ-4 с аппаратным контролем на основании выражения (65)

$$a'_3 \approx \frac{1 + 1,2}{N_0(720 - 1,5 - 10)} \approx \frac{1}{322N_0}.$$

Система из трех ЦВМ БЭСМ-4. Количество отказов в такой ЦВМ будет примерно в 3 раза больше, чем в обычной ЦВМ. Можно считать, что в троированной ЦВМ среднее время восстановления $T_{в4}$ будет сравнимо со временем восстановления $T_{в1}$, т. е. $T_{в4} \approx T_{в1}$. Поэтому потери времени на восстановление $T_{в4}(T) \approx 3T_{в1}(T) = 3 \cdot 7 = 21$ ч.

Время на прогнозирование отказов и профилактику в троированной ЦВМ БЭСМ-4 $T_{пр4}(T) \approx 3T_{пр1}(T) = 3 \cdot 100 = 300$ ч, так как локализации отказов органами голосования не происходит.

Условная стоимость обработанной информации такой ЦВМ на основании выражения (66)

$$a'_4 \approx \frac{1 + 2}{N_0(720 - 21 - 300)} \approx \frac{1}{134N_0}.$$

Числовые примеры показывают, что из трех видов контроля ЦВМ, предназначенных для решения научно-технических задач (двойной счет, аппаратный контроль в ДЦВМ и троированной ЦВМ), оптимальным является аппаратный контроль в ДЦВМ, так как он обеспечивает минимальную условную стоимость правильно обработанной информации. Кроме того, аппаратный контроль в ДЦВМ позволяет значительно снижать требования к квалификации обслуживающего персонала. На основании произведенной каче-

ственной оценки можно сделать вывод о том, что наиболее целесообразным видом контроля ЦВМ, предназначенных для решения научно-технических задач, является аппаратный контроль в ДЦВМ или по модулю.

16. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ УЦВМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ КОНТРОЛЯ

В гл. 1 отмечалось многообразие управляемых процессов и характера управления ими. Это затрудняет проведение количественной оценки увеличения надежности УЦВМ при различных видах контроля. Длительность решения задачи при управлении различными процессами является величиной переменной, изменяющейся от самой малой (минуты) до самой большой (дни, недели, месяцы и более).

Учитывая сказанное, попытаемся произвести хотя бы качественную сравнительную оценку надежности УЦВМ при различных видах контроля. Прежде всего отметим трудность сравнения контроля методом двойного счета с аппаратными видами контроля. Это объясняется тем, что решение задачи при управлении процессом существенным образом будет зависеть от разбиения задачи на участки при двойном счете. При аппаратном контроле предполагается однократный счет, если при этом обеспечивается заданная достоверность функционирования УЦВМ.

В связи с этим произведем сравнение надежности УЦВМ с применением рассмотренных видов аппаратного контроля с надежностью обычной ЦВМ с тестовым контролем, в которой применяется однократный счет.

Отметим, что при аппаратных видах контроля потери времени на устранение последствий случайных сбоев можно свести ко времени, которое будет равно длительности выполнения одной или нескольких операций. Такая возможность показана в гл. 2 для ДЦВМ с аппаратным контролем. Надо полагать, что эта возможность существует и для аппаратного контроля по модулю [Л. 17]. В трюированной ЦВМ с применением мажоритарных элементов это время равно 0.

Чтобы сравнить надежность УЦВМ при различных видах аппаратного контроля с надежностью обычной ЦВМ без контроля достоверности предположим, что каждая из этих ЦВМ решает одну и ту же задачу при управлении каким-то одним управляемым процессом. В этом случае можно считать, что характер информационных процессов во всех УЦВМ будет один и тот же.

Будем считать, что появление отказа в УЦВМ или устройстве контроля, а также появление невыявленного случайного сбоя приводят к срыву решения задачи при управлении процессом. Такое предположение справедливо в тех случаях, когда нет возможности внесения корректировки при управлении процессом после появления невыявленного случайного сбоя. Другими словами, произведем качественную сравнимую оценку надежности УЦВМ при различных видах аппаратного контроля, исходя только из теории надежности, т. е. считая, что вероятность правильного решения задачи за время управления θ

$$P_o(\theta) = P_b(\theta)P_d(\theta),$$

где $P_6(\theta)$ — вероятность безотказной работы УЦВМ с учетом безотказности устройства контроля; $P_d(\theta)$ — достоверность функционирования УЦВМ.

При однократном счете в обычной ЦВМ без контроля достоверности

$$P_o(\theta) = e^{-\lambda\theta} e^{-\mu\theta} = e^{-\lambda\left(1 + \frac{\mu}{\lambda}\right)\theta}. \quad (68)$$

Для УЦВМ с аппаратным контролем по модулю

$$P_o(\theta) = e^{-\lambda\left(1 + \frac{\lambda_k}{\lambda} + \varepsilon \frac{\mu}{\lambda}\right)\theta}. \quad (69)$$

Для ДЦВМ с аппаратным контролем

$$P_o(\theta) = e^{-\lambda\left(2 + \frac{\lambda_k}{\lambda}\right)\theta}. \quad (70)$$

Рассмотрим надежность троированной ЦВМ. Предположим, что троирование произведено на уровне всей ЦВМ и элементы голосования установлены только после выходных регистров, с которых выдаются результаты решения задачи.

Легко показать, что при таком виде контроля вероятность правильного решения задачи тройной ЦВМ будет определяться в основном ее безотказностью. Очевидно, при отказе в одной из трех ЦВМ система останется работоспособной но при этом достоверность функционирования резко упадет, так как сбой в одной из двух работающих ЦВМ при отсутствии голосования приведет к ошибочному результату.

В связи с этим для тройной ЦВМ надо рассматривать два промежутка времени: θ_1 и θ_2 , в течение которых вероятность правильного решения будет различна. В промежутке времени θ_1 , который соответствует отсутствию отказов в ЦВМ, когда ошибки за счет сбоев автоматически исправляются элементами голосования, вероятность правильного решения задачи

$$P_o(\theta_1) = P_6(\theta_1) P_d(\theta_1),$$

причем $P_d(\theta_1) = 1$. Поэтому

$$P_o(\theta_1) \approx e^{-3\lambda\theta_1}. \quad (71)$$

После появления отказа в одной из ЦВМ вероятность правильного решения

$$P_o(\theta_2) = P_6(\theta_2) P_d(\theta_2).$$

В этом случае

$$P_6(\theta_2) = 1 - (1 - e^{-\lambda\theta_2})^2,$$

а достоверность функционирования

$$P_d(\theta_2) = e^{-2\mu\theta_2}.$$

Легко показать, что в этом случае

$$P_o(\theta_2) \approx e^{-2\mu\theta_2}, \quad (72)$$

так как при $\theta_2 > 0$ $P_6(\theta_2) \gg P_d(\theta_2)$.

Исходя из этого, можно приближенно считать, что гарантийное время решения задачи при заданной вероятности

$$\theta \approx \theta_1 + \theta_2. \quad (73)$$

На основании выражения (68)

$$P_o(\theta) = e^{-(\lambda+\mu)\theta}. \quad (74)$$

В связи с тем, что для ЦВМ задаются большими значениями $P_o(\theta)$, равными 0,9; 0,99 и т. д., можно показать справедливость следующего приближенного равенства:

$$1 - P_o(\theta) = Q_o(\theta) \approx (\lambda + \mu)\theta. \quad (75)$$

Выражение (75) получается после разложения в ряд правой части уравнения (74).

Из формулы (75) определим время θ при заданных значениях $P_o(\theta)$ или $Q_o(\theta)$:

$$\theta \approx \frac{Q_o(\theta)}{\lambda + \mu}.$$

Аналогично для аппаратного контроля по модулю из выражения (69) следует:

$$\theta_M \approx \frac{Q_o(\theta)}{\lambda + \gamma\lambda + \epsilon\mu}, \quad (76)$$

где $\gamma = \lambda_k/\lambda$; λ_k — интенсивность отказов устройства контроля.

Для ДЦВМ с аппаратным контролем из выражения (70) получим:

$$\theta_D \approx \frac{Q_o(\theta)}{2\lambda + \gamma\lambda}. \quad (77)$$

Троированная ЦВМ при условии троирования на уровне всей ЦВМ на основании выражений (71), (72) и (73) может обеспечить

$$\theta_T \approx Q_o(\theta) \left[\frac{1}{3\lambda} + \frac{1}{2\mu} \right]. \quad (78)$$

На основании выражений (76)—(78) можно определить выигрыш в надежности УЦВМ при различных видах аппаратного контроля по сравнению с обычной УЦВМ без контроля достоверности.

Выигрыш в надежности при аппаратном контроле по модулю 3

$$\psi_{M=3} = \frac{\theta_M}{\theta} = \frac{1 + \frac{\mu}{\lambda}}{1 + \epsilon \frac{\mu}{\lambda} + \gamma}. \quad (79)$$

При аппаратном контроле в ДЦВМ выигрыш в надежности

$$\psi_D = \frac{\theta_D}{\theta} = \frac{1 + \frac{\mu}{\lambda}}{2 + \gamma}. \quad (80)$$

Выигрыш в надежности в троированной ЦВМ при троировании на уровне всей ЦВМ

$$\psi_T = \frac{\theta_T}{\theta} = \frac{5 + 2 \frac{\mu}{\lambda} + 3 \frac{\lambda}{\mu}}{6}. \quad (81)$$

Покажем на числовых примерах, какой выигрыш в надежности может быть при $\mu/\lambda=5$ при различных видах аппаратного контроля.

Если при контроле по модулю все оборудование охвачено аппаратным контролем, то $\varepsilon=0$; при этом $\gamma>0,2$. Примем $\gamma=0,3$; тогда получим:

$$\psi_{M=3} = \frac{1 + 5}{1 + 0,3} \approx 4,6.$$

При $\gamma=0,5$ $\psi_{M=3}=4$.

Если в ДЦВМ контролировать только выходные сигналы ЦВМ₁ и ЦВМ₂, т. е. не задаваться целью локализации отказов, а только достоверностью функционирования ДЦВМ, то при этом значении γ будет малым.

Тогда в выражении (80) им можно пренебречь. Поэтому выигрыш в надежности такой ДЦВМ из выражения (80)

$$\psi_D \approx \frac{1 + 5}{2} = 3.$$

Выигрыш в надежности троированной ЦВМ на основании выражения (81)

$$\psi_T = \frac{5 + 2 \cdot 5 + 3 \frac{1}{5}}{6} = 2,6.$$

Следует отметить, что при аппаратном контроле по модулю при отсутствии аппаратного контроля узлов, которые принципиально не могут быть охвачены контролем по модулю, значительно снижается выигрыш в надежности. Например, при $\varepsilon=0,2$ и реальном значении $\gamma=0,2$ из выражения (79) следует, что $\psi_{M=3} \approx 2,7$.

Рассмотренные числовые примеры позволяют сделать качественный вывод о том, что выигрыш в надежности невосстанавливаемых УЦВМ при контроле по модулю, при аппаратном контроле в ДЦВМ и троированной ЦВМ, когда троирование произведено на уровне ЦВМ, примерно одинаков. Учитывая, что этот выигрыш в надежности при контроле по модулю получается при меньшем количестве оборудования, чем при аппаратном контроле в ДЦВМ и троированной ЦВМ, надо отдать предпочтение аппаратному контролю по модулю для невосстанавливаемых УЦВМ.

Известно, что для большего выигрыша в надежности невосстанавливаемых УЦВМ применяют оптимальное троирование на уровне узлов ЦВМ, которое позволяет получить выигрыш в надежности $\psi_T \approx 20$.

17. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ДУБЛИРОВАННЫХ УЦВМ С ВОССТАНОВЛЕНИЕМ РЕЗЕРВА

Существенный выигрыш в надежности можно получить в дублированной УЦВМ, работающей в режиме с восстановлением резерва. Этот режим заключается в том, что обе ЦВМ, входящие в ДЦВМ, работают синхронно, решая одну и ту же задачу. Устройство контроля следит за их работой так, как показано было в гл. 2 при рассмотрении структурной схемы ДЦВМ. В случае появления отказа в одной из ЦВМ решение задачи продолжается на исправной ЦВМ, а неисправная восстанавливается. После восстановления ЦВМ, в которой был отказ, продолжается решение задачи обеими ЦВМ одновременно.

Вероятность правильного решения задачи при таком режиме [Л. 9] определяется формулой

$$P(Q) = \frac{A+B}{2A} e^{-0,5(B-A)\theta} - \frac{B-A}{2A} e^{-0,5(A+B)\theta}, \quad (82)$$

где $A = \sqrt{\lambda^2 + 6\lambda\mu_b + \mu_b^2}$; $B = 3\lambda + \mu_b$; $\mu_b = 1/T_b$; T_b — среднее время восстановления одной из ЦВМ, входящих в ДЦВМ.

Зададимся реальным значением $\lambda = 0,02$ 1/ч и $T_b = 0,5$ ч. Такое время восстановления характерно для ЦВМ БЭСМ-4, в которой неисправности отыскиваются при помощи тестов. Рассмотрим также вариант ДЦВМ с аппаратным контролем, позволяющим локализовать отказ с точностью до двух одноименных сменных блоков ЦВМ₁ и ЦВМ₂. При таком контроле, как показано выше, можно уменьшить время восстановления примерно в 10 раз, т. е. при этом $T_b \approx 0,05$ ч.

Приняв $P(\theta) = 0,9$, из выражения (82) найдем, что при $T_b = 0,5$ ч $\theta \approx 250$ ч, при $T_b = 0,1$ ч $\theta \approx 1250$ ч, а при $T_b = 0,05$ ч $\theta \approx 2500$ ч.

Из этих примеров следует, что надежность ДЦВМ, работающей в режиме с восстановлением резерва, в значительной степени зависит от времени восстановления. Поэтому ДЦВМ с аппаратным контролем, позволяющим локализовать отказы с точностью до сменного блока ЦВМ и тем самым на порядок уменьшить время восстановления, является наиболее целесообразной для применения в таком режиме работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными задачами контроля ЦВМ являются обнаружение сбоев и устранение их последствий и указание места неисправности с заданной точностью.

Необходимо отметить, что от вида контроля существенно зависят численность обслуживающего персонала и требования к его квалификации. Снижение требований к квалификации обслуживающего персонала и уменьшение его количества возможны при автоматизации указания места неисправности. В связи с этим автоматический поиск неисправностей в ЦВМ является одной из важнейших проблем в области вычислительной техники.

Сравнительная оценка методов контроля, рассмотренных в этой книге, позволяет отдать предпочтение аппаратному контролю с использованием дублирования оборудования. Такой вид контроля позволяет решить следующие задачи: 1) автоматизировать указание места неисправности с точностью до сменного дублированного блока; 2) надежно обнаруживать сбои и устранять их последствия, а также указывать места сбоев с точностью до сменного дублированного блока; 3) обеспечить совместную синхронную работу ЦВМ₁ и ЦВМ₂ с целью выявления сбоев и неисправностей и указания мест их возникновения; 4) обеспечить автономную работу каждой из двух ЦВМ.

В качестве недостатка аппаратного контроля с использованием дублирования оборудования, описанного в гл. 2, можно считать трудность его осуществления в электромеханических устройствах, что объясняется сложностью синхронизации работы двух таких устройств.

Этот вопрос требует специального исследования и выходит за рамки данной книги. При решении этой проблемы и вопроса обмена информацией между ЦВМ₁ и ЦВМ₂ данный вид аппаратного контроля позволит в значительной степени повысить надежность дублированной ЦВМ за счет применения так называемого режима работы с восстановлением резерва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаджанов З. Г., Валадян Л. Д. Оперативный контроль и методы повышения надежности устройства микропрограммного управления. — «Вопросы радиоэлектроники», 1966, серия VII, вып. 7.
2. Контроль работы электронных вычислительных машин. — «Труды ВЦ АН СССР», М., 1965.
3. Бурназян Р. Г., Ковергин А. А. Устройство для указания неисправностей в дублированных дискретных автоматах. Авт. свид. № 283688. — «Бюллетень изобретений», 1970, № 13.
4. Вайрадян А. С. Надежность электронных вычислительных машин. М., Изд. МИФИ, 1966.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1969.
6. Веригин В. Н. Основные характеристики аппаратного контроля с обнаружением ошибок применительно к ЦВМ. М., ИТМ и ВГ АН СССР, 1966.
7. Веригин В. Н. Раздельное резервирование как метод повышения надежности ЦВМ. М., ИТМ и ВГ АН СССР, 1967.
8. Волков А. Ф., Ведешников В. А., Зенкин В. Д. Автоматический поиск неисправностей в ЦВМ. М., «Советское радио», 1968.
9. Гаркави А. Л., Гоголевский В. Б. О надежности резервированных устройств. — «Известия АН СССР. Энергетика и автоматика», 1962, № 6.
10. Герасимов С. М., Мигулин И. Н., Яковлев В. Н. Расчет полупроводниковых усилителей и генераторов. Киев, Гостехиздат, 1961.
11. Голубев-Новожилов Ю. С. Многомашинные комплексы вычислительных средств. М., «Советское радио», 1967.

12. **Зайко Ю. Г.** Эффективность контроля по модулю. — «Вопросы радиоэлектроники», 1965, серия VII, вып. 1.
13. **Анализ** формирования импульсных сигналов в комплексе логических элементов «Магний». — «Вопросы радиоэлектроники», 1966, серия VII, вып. 7. Авт.: В. В. Карапетян, С. Е. Казарян, Л. А. Григорян и др.
14. **Карапетян В. В.** Стабилизация параметров сигналов логических элементов при изменении нагрузки. — «Вопросы радиоэлектроники», 1966, серия VII, вып. 7.
15. **Карапетян В. В. и др.** Унифицированный импульсно-потенциальный комплекс логических элементов «Магний» — «Вопросы радиоэлектроники», 1966, серия VII, вып. 7. Авт.: В. В. Карапетян, С. Е. Казарян, Л. А. Григорян и др.
16. **Касаткин А. С., Кузьмин И. В.** Оценка эффективности автоматизированных систем контроля, М., «Энергия», 1967.
17. **Клямко Э. И.** Схемный и тестовый контроль автоматических цифровых вычислительных машин. М., «Советское радио», 1963.
18. **Кузнецов В. А.** Основные вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры. М., «Энергия», 1965.
19. **Мнацакян Б. С.** Автоматический контроль ЭВМ параллельного действия. — «Вопросы радиоэлектроники», 1962, серия VII, вып. 2.
20. **Мямлин А. Н.** Универсальная электронная вычислительная машина с контролем и совмещением операций. — «Вопросы вычислительной математики и вычислительной техники». М., Машгиз, 1963.
21. **Методы** введения избыточности для вычислительных систем. Пер. с англ. под ред. В. С. Пугачева. М., «Советское радио», 1966.
22. **Путинцев Н. Д.** Аппаратный контроль управляющих цифровых вычислительных машин. М., «Советское радио», 1966.
23. **Сидоров С. М.** Методы контроля электронных цифровых машин. М., «Советское радио», 1966.
24. **Собельман В. И.** О зависимости времени счета от длины шага и частоты случайных сбоев. — «Вычислительная математика и математическая физика», № 1, 1961.
25. **Торгов Ю. И.** Некоторые вопросы повышения эффективности вычислительных машин. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Москва, 1963.
26. **Ушакова Г. Н.** Аппаратный контроль и надежность специализированных ЭВМ. М., «Советское радио», 1969.
27. **Щербаков О. В.** Об оценке случайных сбоев в цифровых вычислительных машинах. — «Известия АН СССР. Техническая кибернетика», 1964, № 3.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава первая	
Область применения различных видов контроля и критерии оценки эффекта от введения контроля	
1. Влияние контроля на параметры надежности ЦВМ	8
2. Выбор вида контроля ЦВМ, предназначенных для решения научно-технических задач	10
3. Выбор вида контроля восстанавливаемых и невозстанавливаемых управляющих ЦВМ	11
Глава вторая	
Аппаратный контроль с применением дублирования оборудования	
4. Анализ сигналов и цепей в различных ЦВМ с точки зрения схем контроля ДЦВМ	13
5. Принцип построения устройства контроля ДЦВМ	16
6. Структурная схема ДЦВМ с аппаратным контролем	21
7. Требования, предъявляемые к устройству аппаратного контроля ДЦВМ	24
8. Варианты технической реализации устройства контроля ДЦВМ	24
9. Вопросы помехоустойчивости устройства контроля ДЦВМ	30
10. Пример технической реализации устройства контроля ДЦВМ	34
Глава третья	
Оценка эффективности различных методов контроля работы ЦВМ	
11. О характере сбоев в ЦВМ	38
12. Эффективность контроля при двойном счете	40
13. Эффективность методов аппаратного контроля	41
14. Оценка эффективности контроля с учетом надежности устройства контроля	53
Глава четвертая	
Сравнительная оценка увеличения надежности ЦВМ при различных видах контроля	
15. Оценка эффекта от применения различных видов контроля ЦВМ, предназначенных для решения научно-технических задач	61
16. Оценка надежности работы восстанавливаемых УЦВМ при различных видах контроля	66
17. Оценка надежности работы дублированных УЦВМ с восстановлением резерва	70
Заключение	70
Список литературы	71

Цена 27 коп.