

## МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ И КОНТРОЛЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ (обзор)

В. М. РАЗИН, М. Н. СТРОГОНОВ

(Представлена научным семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

### Введение

Одним из способов повышения надежности и эффективности электронного оборудования является применение систем автоматического контроля и поиска неисправности данного оборудования в сочетании с возможностью устранения неисправности.

Сложные системы нельзя контролировать вручную, так как требуется много времени на отыскание неисправности. Автоматизация контроля существенно сокращает затраты времени на проверку и профилактику оборудования, вследствие чего увеличивается полезное время работы системы, кроме того, сокращается штат обслуживающего персонала, снижаются требования к уровню его квалификации. Это все вместе взятое ведет к сокращению эксплуатационных расходов. Какую экономию средств дают системы автоконтроля, видно из следующих примеров, приведенных в [10].

Использование автоматической контрольной системы SCATE при испытании одного радиоэлектронного комплекса сократило время предстартовой проверки ракеты с 12 часов до 5 минут.

Применение системы контроля BOFTE позволило сэкономить 75% общего времени предстартовой проверки ракеты Терьер, а расходы на испытания сократились на 97,5%.

### Общий принцип автоматического контроля сложных систем

В системах автоматического контроля при обнаружении неисправности обычно используется метод контроля прохождения сигнала [1, 2]. На вход проверяемого устройства подаются сигналы, обычно совпадающие с реальными входными сигналами. В контрольных точках производится измерение параметров реакции устройства на входные сигналы. Если информация, снимаемая в контрольных точках, непригодна для непосредственного использования при оценке работы устройства, то она проходит через преобразователь. Обычно информация преобразуется в цифровую форму, так как схемы сравнения и логические схемы, как правило, являются цифровыми.

Далее, преобразованная информация поступает в компаратор, т. е. сравнивающее устройство, где происходит сравнение полученной информации с эталонными значениями измеряемых величин.



Компаратор может вычислять отклонение измеряемой величины от эталонной и выдать величину отклонения или может выдать сигнал с оценкой «годен — не годен».

Сигнал с компаратора подается на устройство индикации и регистрации. Индикаторное устройство фиксирует неисправный узел или субблок. На индикаторном устройстве может предусматриваться также регистрация степени отклонения контролируемой величины от номинального значения. Это дает возможность предсказывать выход того или иного узла из строя.

Временную последовательность испытаний, соответствующую заданной программе, задает программное устройство. Программное устройство посылает команды в сигнал-генераторы, управляет коммутаторами входных и выходных сигналов и обеспечивает сравнение в компараторе ответного сигнала с эталонным.

Если на выходе компаратора появляется сигнал неисправности, то программное устройство останавливает проверку, дает звуковой сигнал неисправности, включает подпрограмму поиска неисправности.

Для контроля сложных устройств программа вводится из внешнего накопителя. В этом случае можно быстро менять программу контроля.

В качестве внешнего накопителя может использоваться наборное поле, перфокарты, перфолента, магнитная лента, магнитные барабаны. В специализированных системах автоконтроля программа проверки постоянная. Этот вид программы используется в том случае, когда отсутствуют логические связи между результатами проверок. Для повышения надежности в САК может предусматриваться возможность самопроверки, которая производится по заданной подпрограмме.

### Методы поиска неисправностей

Известно, что основное время вынужденного простоя оборудования составляет время на отыскание неисправностей. Поэтому для сложных электронных устройств большое значение имеет разработка оптимальной программы поиска неисправностей. Существует несколько критериев оценки, указанных в [2—8], для выбора оптимального маршрута отыскания неисправностей.

Так, Брюле, Джонсон, Клетский, основываясь на теории информации, разработали метод поиска неисправностей, который характеризуется эффективностью проверки  $F_k$ , равному уменьшению неопределенности  $H(P)$  в отношении к стоимости  $C_k$  соответствующего этапа проверки

$$F_k = \frac{H(P)}{C_k} = \frac{-P \log_2 P - (1 - P) \log_2 (1 - P)}{C_k},$$

где  $P$  — априорная вероятность положительного результата проверки.

Последовательно отыскиваются этапы с наибольшими  $F_k$ . При каждой проверке выполняется перерасчет стоимостей оставшихся проверок, учитывая выполненные проверки, и перерасчет положительного результата каждой оставшейся проверки с учетом результата выполненной проверки. Чтобы практически использовать данный метод, необходимо иметь сведения о соответствующих стоимостях и вероятностях.

Накопление этих данных является чрезвычайно трудной задачей особенно относительно стоимости выполнения единичных операций, которые используются для подсчета стоимости проверок.

Второй метод называется методом «средней точки». Сущность его заключается в том, что каждая последующая проверка делается по середине оставшейся части цепи. Этот метод отыскания неисправностей



целесообразно применять к системам, у которых имеются последовательные цепи прохождения сигналов, и, когда вероятности различных неисправностей и время на отыскание этих неисправностей одинаково или неизвестно. Среднее время поиска любой неисправности для конкретной цепи при данном методе одинаково.

Третий метод „время-вероятность“ основан на том, что вычисляются отношения  $\frac{t_i}{P_i}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ),

где  $t_i$  — время поиска неисправности,  
 $P_i$  — вероятность отказа каждого блока.

На основе вычисленных значений  $\frac{t_i}{P_i}$  составляется последовательность возрастающих значений отношения

$$\frac{t_{s_1}}{P_{s_1}} < \frac{t_{s_2}}{P_{s_2}} < \dots < \frac{t_{s_N}}{P_{s_N}}.$$

Поиск отказов идет в такой же последовательности по блокам  $S_1, S_2, \dots, S_N$ .

Достоинство данного метода заключается в том, что при применении автоматического контрольного оборудования с полужестко фиксированной программой поиска, которая после начала ее использования уже не изменяется, возможна сравнительно быстрая и легкая методика программирования, когда имеются данные вероятности отказа и времени поиска. Этот метод считается более эффективным, когда вероятности отказов и время поиска неисправностей различны, и если нет взаимосвязи между отдельными неисправностями.

В случае, если между отдельными частями проверяемой системы имеются взаимосвязи, а затраты времени на поиски и вероятности неисправностей известны и не равны, то оптимальным оказывается так называемый комбинированный метод. В основу его кладется метод «средней точки» с учетом корректив, основанных на учете данных о вероятностях отдельных неисправностей и затратах времени на проверку отдельных блоков системы.

### Автоматический контроль и обнаружение мест неисправностей ЦВМ

Средства контроля ЦВМ подразделяются на средства, входящие в систему обнаружения ошибки, и средства, входящие в систему поиска неисправностей.

Средства, входящие в систему обнаружения ошибки, выдают сигнал ошибки без указания неисправного элемента. Сигнал ошибки включает систему поиска неисправности. Система поиска должна эффективно производить поиск неисправности с указанием сменного блока или модуля. В настоящее время в большинстве ЦВМ поиск неисправности происходит с активным вмешательством оператора, что резко снижает эффективность САК и, кроме того, оператором могут быть допущены ошибки, т. е. снижается точность обнаружения, в особенности при недостаточной квалификации оператора. Необходимо отметить, что не всегда можно произвести разделение устройств на САК и систему поиска неисправностей.

Существует большое количество методов контроля работы ЦВМ и поиска неисправностей. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся, описанные в [9—16].



**1. Метод повторения вычислений.** При применении данного метода делают двойной просчет и сравнивают результаты. При решении больших задач проверяются результаты отдельных частей. Если при сравнении результаты двойного просчета не совпадают, то производится повторное решение. Можно одну и ту же задачу решать на двух машинах с сравнением промежуточных результатов. При несовпадении результатов может предусматриваться двойной просчет. При двухкратном несовпадении результатов может предусматриваться останов с последующим включением системы поиска неисправностей.

Если результаты двух решений совпадают, то осуществляется переход к решению следующей части. Этот метод контроля не эффективен, так как для его осуществления требуется или дорогостоящее оборудование (2 ЦВМ), или двойное полезное машинное время. Но он достаточно надежен, так как достигается избыточность информации за счет повторения вычислений.

**2. Контроль по четности единиц.** В двоичном коде всегда содержится четное или нечетное количество единиц. При четном количестве единиц двоичный код можно обозначить символом «1», а при нечетном — символом «0» или наоборот. Для контроля вычислений эти символы записываются в контрольные разряды.

Покажем на примере, как осуществляется контроль по данному методу:

числа	контрольные разряды
0011	1
0001	0
0100	0

При выполнении арифметических операций нужно учитывать наличие двоичных переносов, иначе контрольная сумма будет неверной. Данный метод контроля обнаруживает единичную ошибку. При появлении большого числа ошибок он совершенно не пригоден.

В [12] указывается на целесообразность применения данного метода контроля для машин последовательного действия. Для машин параллельного действия этот метод требует большого количества дополнительного оборудования и времени на выполнение контроля.

**3. Проверочные коды.** Сущность данного метода состоит в том, что для обнаружения ошибки необходим код, который для перехода от одного числа, изображенного этим кодом, к представлению этим же кодом другого числа требовал бы минимум два изменения в разрядах числа. Широко известен и достаточно описан в литературе код «два из пяти», а также коды, составленные по принципу кратности какому-либо числу, например, код, кратный 3 или 7. Контроль по данному методу позволяет не только обнаруживать ошибки, но и исправлять их. Однако при осуществлении данного метода контроля резко увеличивается разрядность числа, существенно усложняется логика машины и требуется много дополнительного оборудования.

**4. Контроль по модулю.** В основе излагаемого метода лежит идея использования тождества

$$A = a \text{ mod } b.$$

В качестве контрольных символов при данном методе применяются остатки  $a$  от чисел по некоторому фиксированному модулю  $b$ . Выполняя над контрольными символами те же операции, что и над числами, выделяя из результата контрольные символы при определенном модуле и сравнивая эти результаты, можем контролировать ход вычислений.



Данный метод можно использовать для контроля арифметического устройства, но для контроля устройства управления данный метод не приемлем. Кроме того, применение данного метода требует дополнительного оборудования.

**5. Тестовый контроль.** Тестовый контроль является наиболее распространенным методом контроля ЦВМ.

Под тестом будем понимать процесс задания некоторой совокупности входных значений и наблюдения за выходами проверяемой машины.

В зависимости от назначения тесты подразделяются на наладочные, проверочные, диагностические и контрольные тест-задачи.

Наладочные тесты применяются в процессе наладки при установке машины с целью обнаружения грубых ошибок в монтаже и логике машины.

Программой отработанных проверочных тестов завершается наладка машины. В них предусматривается более полный контроль узлов машины с разнообразными режимами работы. Они более полно учитывают логическую схему узлов машины. Контрольные тест-задачи применяются для периодического контроля в процессе основной работы машины.

Тестовый диагностический контроль является профилактическим, т. е. он может производиться в период подготовки к решению задачи. Диагностический тест составляется с учетом частоты отказов каждого типа элементов и ориентировочного времени на их отыскание.

Профилактический контроль заключается в решении задач, ответы которых известны. При этом элементы машины включаются в наиболее трудные режимы работы путем изменения напряжения питания в пределах допустимого. Для каждого устройства вычислительной машины имеется свой проверочный тест. Тесты отдельных устройств сводятся в единый комплексный тест, определяющий последовательность выполнения отдельных тестов и продолжительность их выполнения. Неисправность обнаруживается при работоспособности определенного минимума устройств вычислительной машины. Для точного указания места неисправности при тестовом контроле требуется вмешательство оператора.

В литературе описан ряд методов автоматического программного контроля и отыскания неисправности. Так, например, один из способов автоматического контроля отыскания неисправности заключается в введении в машину диагностической программы. Диагностическая программа задает различные примеры и контролирует правильность их выполнения. Если пример выполняется неверно, то вызывается подпрограмма поиска ошибки. С ее помощью выполняются дополнительные примеры, позволяющие отыскать ошибку. Последовательность проверки идет от более простых узлов к более сложным. Подпрограмма составляется так, что элементы, охваченные при решении одного примера, по возможности исключаются при решении других примеров. Как только с помощью подпрограммы обнаружится неисправный элемент, происходит останов машины, и на индикаторном устройстве указывается перечень элементов, из-за которых могла произойти ошибка. Оператор методом последовательной замены обнаруживает неисправный элемент.

Для проверки ЦВМ может использоваться тестер. В качестве тестера может быть специализированная машина с программным управлением. На основании кодированного описания логической схемы проверяемой машины составляется программа для ВМ. Выполнив данную программу, ВМ дает методику проверки проверяемой ЦВМ. Согласно



выбранной методике, с тестера сигналы поступают на соответствующие входы проверяемой машины. Сигналы с выходов проверяемой машины сравниваются с эталонными. В зависимости от результата сравнения осуществляется условный переход. Другими словами, проверка машины происходит путем введения в нее тестов. Каждый последующий тест выбирается с учетом результата предыдущего теста. При обнаружении ошибки происходит деление крупных групп элементов на более мелкие, в которых может быть неисправность. В конечном итоге при такой методике проверки указывается, какой элемент вышел из строя.

В процессе решения задачи контроль за ходом выполнения программы осуществляется путем печати некоторых промежуточных результатов и участков программы (адресов и команд). Такой метод контроля не дает представления о выполнении программы в целом.

В [16] описывается метод программного контроля за ходом программы. Идея его заключается в том, что блок-схема программы вычерчивается в графической форме по последовательности решения задачи. На каждый блок предусматривается одна индикаторная лампочка. Из общего числа команд, входящих в отдельные блоки программы, выбирается так называемая «характеристическая» команда. Исполнение «характеристических» команд фиксируется устройством индикации. При сбоях в последовательности выполнения программы происходит останов машины. Сигнал «останов» переводит все триггеры, управляющие индикацией, в режим запоминания. В результате горячей остается лампочка, предшествовавшая останову. Таким образом, устанавливается, в каком блоке программы произошел сбой.

Данный метод контроля применен в одноадресной машине PERM параллельного действия. Для реализации данного метода контроля необходимо дополнительное оборудование.

**6. Аппаратно-логический контроль.** В [12] следующим образом излагается сущность аппаратно-логического контроля: «...все контролируемое оборудование разбивается на определенные группы; для каждой группы оборудования разрабатывается своя методика проверки и своя схема контроля, которые увязываются в дальнейшем с работой общего устройства контроля».

Можно разработать такие схемы контроля, которые бы указывали на степень ухудшения параметров сигнала, и заранее предсказывать выход из строя элемента машины. В [12, 13] даны схемы для контроля приемо-передающих регистров, счетчиков, сумматоров, выборки команд и др.

Но все эти схемы требуют или большого количества дополнительного оборудования, или неэффективны при появлении большого количества ошибок, или с недостаточной точностью указывают, какой элемент вышел из строя.

Почти во всех, выпускаемых в настоящее время в СССР ЦВМ, не предусматривается схемный контроль. Поэтому при организации схемного контроля создаются трудности подключения дополнительного оборудования ЦВМ.

Вероятно, целесообразнее применять встроенные модули для контроля какого-либо параметра сигнала, например, амплитуды. Модули должны содержать минимальное количество радиодеталей, чтобы их можно было вмонтировать в основной модуль ЦВМ. Этот метод контроля может быть эффективным при применении его совместно с тестовым контролем. Однако в этом направлении сделано еще очень мало. Анализ имеющихся в опубликованной литературе материалов показывает, что вопросу автоматизации контроля неисправностей электронных



ЦВМ уделяется еще недостаточно внимания. Отсутствуют теоретические разработки по этому важному вопросу, не осуществляется систематическое накопление и анализ данных по эксплуатации ЭВМ, в новых разработках ЦВМ по-прежнему не предусматриваются встроенные системы автоконтроля и т. д.

С другой стороны, скорость действия ЦВМ быстро растет при все возрастающей сложности структуры самих машин и экономические потери, связанные с поиском и устранением неисправностей, становятся все более значительными. Использование ЦВМ в системах автоматического регулирования и управления производственными процессами выдвигает еще более жесткие условия в отношении обеспечения высокой надежности и эффективности, ремонтпригодности цифровых вычислительных устройств.

Имеющиеся отдельные работы по рассматриваемой проблеме свидетельствуют о том, что эти разработки находятся еще в начальной стадии. Необходимо существенно усилить работу в этом направлении и уже в разрабатываемых конструкциях машины предусматривать соответствующие методы схемного и тестового автоконтроля для обеспечения минимума затрат времени на отыскание и устранение неисправностей в процессе эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. G. V. Novotny. Автоматические устройства контроля современных сложных систем. Электроника, 35, № 28, 14—23, 1962.
2. Сборник статей «Автоматическая проверка оборудования самолетов и ракет». Изд. иностранной литературы, М., 1962.
3. Брюле, Джонсон, Клетский. Отыскание неисправностей в технических устройствах. Зарубежная радиоэлектроника, № 7, 1961.
4. Оптимальный метод отыскания неисправностей. Зарубежная радиоэлектроника, № 3, 18—23, 1959.
5. Е. Дж. Клетский. Применение теории информации к отысканию неисправностей в технических устройствах. Зарубежная радиоэлектроника, № 9, 124—137, 1961.
6. Винтер. Оптимальные способы отыскания неисправностей. Зарубежная радиоэлектроника, № 1, 118—126, 1962.
7. Фирстман, Гласс. Оптимальные маршруты поиска при автоматическом отыскании неисправностей. Зарубежная радиоэлектроника, № 6, 115—124, 1963.
8. И. М. Синдеев. К вопросу о синтезе логических схем для поиска неисправностей и контроля состояния сложных систем. Техническая кибернетика. Изд. АН СССР, № 2, 1963.
9. В. В. Питерсон. О контроле сумматора. Кибернетический сб., № 4. Изд. иностранной литературы, М., 1962.
10. Системы автоматического контроля и отыскания неисправностей в радиоэлектронном оборудовании (обзор). Зарубежная радиоэлектроника, № 5, 108—122, 1961.
11. Ф. И. Белов, Ф. С. Соловейчик. Вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры. М.—Л., 1961.
12. Сб. статей «Вычислительная техника», вып. 4, М., 1962.
13. Э. И. Клямко. Схемный и тестовый контроль автоматических цифровых вычислительных машин. М., 1963.
14. S. Seshu, D. N. Freeman. Диагностика асинхронных последовательных переключательных систем. Экспресс-информация, вычислительная техника, № 8, 1963.
15. Nonken Howard R. Missile computer has «self-checking» capability. «Electron. Inds.», 20, № 7, 100—102, 1961.
16. Tsui Frank F. A flexible and inexpensive method of monitoring program execution in a digital computer. «IRE Trans. Electronic comput», 10, № 2, 253—259, 1961.