

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРОГРАММ ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ЦВМ

В.Д. Зарубицын
(Калинин)

Необходимость разработки систем диагностических программ (СДП) подтверждается практикой эксплуатации как ламповых, так и полупроводниковых универсальных ЦВМ. На наш взгляд, системы диагностических программ должны в первую очередь улучшить ремонтпригодность машин в тех случаях, когда время поиска неисправностей (T_n) является определяющим в общем времени восстановления (T_v) работоспособности ЦВМ:

$$T_v = T_{обн} + T_n + T_{устр} + T_k,$$

где $T_{обн}$ — время обнаружения факта отказа;

$T_{устр}$ — время замены неисправного съемного блока резервным;

T_k — время послеремонтного контроля.

В связи с этим перечислим ряд практических задач, которые должны решаться СДП, и пути их возможной реализации:

1. Системы диагностических программ должны дополнять системы контрольных программ (СКП). Основные принципы взаимодействия СКП и СДП изложены в [1].

2. СДП должны автоматизировать диагностику неисправностей так называемых немассовых цепей ЦВМ. Под такими цепями будем понимать схемы управления, специфически предназначенные для реализации отдельных операций и их модификаций. Например, схемы местного управления операциями (МУОП), цепи нестандартного обмена между регистрами и т.п. Относительная трудность диагнос-

тики этих схем даже для случаев устойчивых отказов ЦВМ связана с необходимым знанием временных диаграмм применительно к конкретным операндам (кодовым компонентам) тестируемых примеров. Вместе с тем, при отказах в немассовых цепях большинство логических операций и операций управления выполняется верно. Следовательно, неисправная ЦВМ может достаточно эффективно производить поиск собственных неисправностей. Представляется целесообразной дальнейшая разработка метода диагностических таблиц [2,3] в направлении установления взаимоднозначного соответствия "физическая неисправность - код ошибочного результата тестирования операции".

3. СДП должны существенно сократить среднее и максимальное значения T_b путем автоматизации диагностики при перемежающихся отказах. К числу наиболее труднолокализуемых неисправностей такого типа необходимо отнести перемежающиеся отказы в арифметическом устройстве (АУ) и в устройстве управления (УУ), проявляющиеся на многотактных арифметических операциях. Трудность их диагностики обуславливается недостаточностью информации об ошибках и сложностью алгоритмов формирования ошибочных результатов. Ошибки выполнения многотактных арифметических операций, зафиксированные в СКП в условиях "тяжелых" режимов работы схем [1], могут быть достаточно достоверно проанализированы на той же ЦВМ, если диагностическая программа (ДП) будет построена на основе применения простых одноктактных операций.

Диагностические программы для локализации неисправностей немассовых цепей

Предположим, что для некоторой операции ЦВМ определены неисправностей немассовых цепей, которые вызывают ошибочное выполнение этой операции и не влияют на правильность выполнения некоторой группы операций на системе команд ЦВМ. Обозначим эти неисправности через α_i , где i - номер неисправности ($i = 1, 2, \dots, n$). Положим, что значение i однозначно определяет место неисправности в схемах ЦВМ. Далее предположим, что для обеспечения 100%-ой полноты охвата контролем [1] рассматриваемого оборудования подобраны m контрольных примеров. Обозначим эти примеры через β_j , где j - номер примера ($j = 1, 2, \dots, m$). Будем полагать, что каждый β_j -ый пример предназначен для выявления определенного числа неисправностей n_j из общего чис-

да n . Будем обозначать эти неисправности α_{ij} , где i принимает n_j значений из ряда чисел от 1 до n . При отсутствии неисправностей в схемах каждому β_j -ому примеру соответствует некоторый истинный результат, обозначим его через A_{0j} . Наличие в контролируемом оборудовании i -ой неисправности приводит к получению ошибочного результата, обозначим его через A_{ij} . Если для любых неисправностей $i=k$ и $i=l$, $k \neq l$, $1 \leq l \leq n$; $1 \leq k \leq n$ имеет место $A_{ij} \neq A_{kj}$, хотя бы для одного j , то обеспечивается различимость всего первоначально определенного множества n неисправностей.

Таблицы значений A_{ij} будем называть диагностическими таблицами кодов неисправностей. Будем полагать, что таблицы удовлетворяют условию различимости неисправностей. Таблицы обозначим через A_{ij}^0 .

Пусть в системе испытательных программ имеется определенное число диагностических программ (ДП), предназначенных для локализации неисправностей немассовых цепей с помощью диагностических таблиц. По сигналу СКП о факте присутствия устойчивого отказа в цепях некоторой операции вводится соответствующая ДП с задачей локализации неисправности до съемного блока.

Возможный вариант блок-схемы ДП приведен на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема ДП.

ДП осуществляет:

- Тестирование β_j -го контрольного примера с образованием кода результата A_{ij} (бл. 1). Код A_{ij} определяется операндами и текущей неисправностью α_i , реально присутствующей в схемах ($i=1, 2, \dots, N$, где N - число всех возможных неисправностей в схемах операции).

- Сравнение $A_{1,j}$ с табличным кодом $A_{1,j}^0$ (бл. 2). В случае сравнения этих кодов печатается координата блока, соответствующая коду $A_{1,j}^0$ (бл. 3).

- Проверка, показывающая, все ли предусмотренные в ДП m контрольных примеров выполнены (бл.4.5).

Как видно из рассмотренных выше алгоритма работы ДП и принципов ее построения, основой ДП являются диагностические таблицы. Очевидно, что их формирование практически невозможно без использования ЦВМ. В связи с этим возникает задача о разработке методов построения моделирующих программ (МП). На наш взгляд, целесообразно возложить на моделирующую программу следующие функции:

1. Моделирование схем ЦВМ, реализующих операции, и моделирование множества неисправностей α_i из n рассматриваемых. Целью моделирования является программное описание функции

$$A_{1,j}^0 = F(\alpha_i, \beta_j),$$

которая соответствует истинному результату $A_{0,j}$ схемного тестирования β_j -го примера при отсутствии неисправностей в схемах ЦВМ и ошибочному результату $A_{1,j}$ под воздействием α_i -ой неисправности из рассматриваемого числа неисправностей n . При моделировании целесообразно использовать две степени подобия описания реальной схеме. Схемы, возможные неисправности которых включены в множество α_i , моделируются на уровне описания логических функций блоков с учетом их взаимосвязанности в моделируемой схеме. Примеры моделирования блоков ЦВМ приведены в [2]. Схемы, обеспечивающие выполнение операции, неисправности которых не будут диагностироваться на разрабатываемой ДП, моделируются со значительно меньшей степенью подобия. Пример такого комбинированного моделирования схем ЦВМ М-20 приведен в [4].

2. МП должна выполнять анализ сформированных таблиц на обеспечение различимости моделируемых неисправностей.

При этом разработчик таблиц должен решить следующие задачи:

1. Определить множество α_i ($i = 1, 2, \dots, n$) неисправностей, которые целесообразно диагностировать в разрабатываемой ДП. Основная часть этой работы должна быть выполнена перед разработкой МП на основе анализа схем ЦВМ. Представляется достаточным для нужд практики включать в множество α_i лишь наиболее характерные неисправности, приводящие к нарушению выходных

функций блоков без оказания реакций на блоки предыдущего каскада.

2. Разработать МП.

3. С помощью МП сформировать и оптимизировать таблицы для всего множества определенных ранее неисправностей.

Возможный вариант блок-схемы МП приведен на рис. 2. Поясним назначение отдельных блоков МП на примере описания последовательности действий при разработке таблиц. Последовательность такова:

а) Задаются исходные операнды β_1 . Для исходных операнд МП производит моделирование всего множества рассматриваемых неисправностей $\{\alpha_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) с формированием таблицы $\{A_{i,1}^0\}$ (блоки I-5). Далее МП производит анализ $\{A_{i,1}^0\}$ на их различимость с формированием трех таблиц (блоки 6-II МП). В таблицу I сводятся те элементы $\{A_{i,1}^0\}$, которые удовлетворяют условию различимости. В таблицу II попадают те элементы $\{A_{i,1}^0\}$ — те, которые отличны от истинного (при отсутствии неисправностей) значения $A_{0,1}^0$, но среди которых есть равные при различных номерах неисправностей, то есть когда $A_{0,1,1}^0 \neq A_{0,1}^0$, но при $i \neq k$ ($i, k = 1, 2, \dots, n$) $A_{i,1}^0 = A_{k,1}^0$. В таблицу III попадают, в отличие от таблиц I и II, элементы множества $\{\alpha_i\}$, при моделировании которых результат выполнения модели над операндами β_1 не отличается от правильного $A_{0,1}^0$. Далее производится печать таблиц (блок I2).

б) Если на β_1 операндах отсутствуют таблицы II и III, это означает, что различимость обеспечена для всего рассматриваемого перечня неисправностей. Таблицы включаются в ДП, в которой в этом случае будет тестироваться единственный пример с операндами β_1 .

в) Если кроме таблицы I формируются таблицы II или III, то разработчиком задаются новые операнды β_2 . Производится моделирование $A_{i,2}^0$ и вывод таблиц. Затем производится моделирование $A_{i,3}^0$ для третьего примера и так далее до обеспечения по возможности полной различимости и охвата контролем всех n рассматриваемых неисправностей.

Отметим, что при построении ДП на основе применения таблиц вида $A_{i,j}^0$ необходимо учитывать возможную многозначность результата тестирования, которая может возникнуть в ряде случаев из-за неустойчивости схем под воздействием устойчивой неисправности. Причины неустойчивости схем и возможные практические пути устранения многозначности следующие:

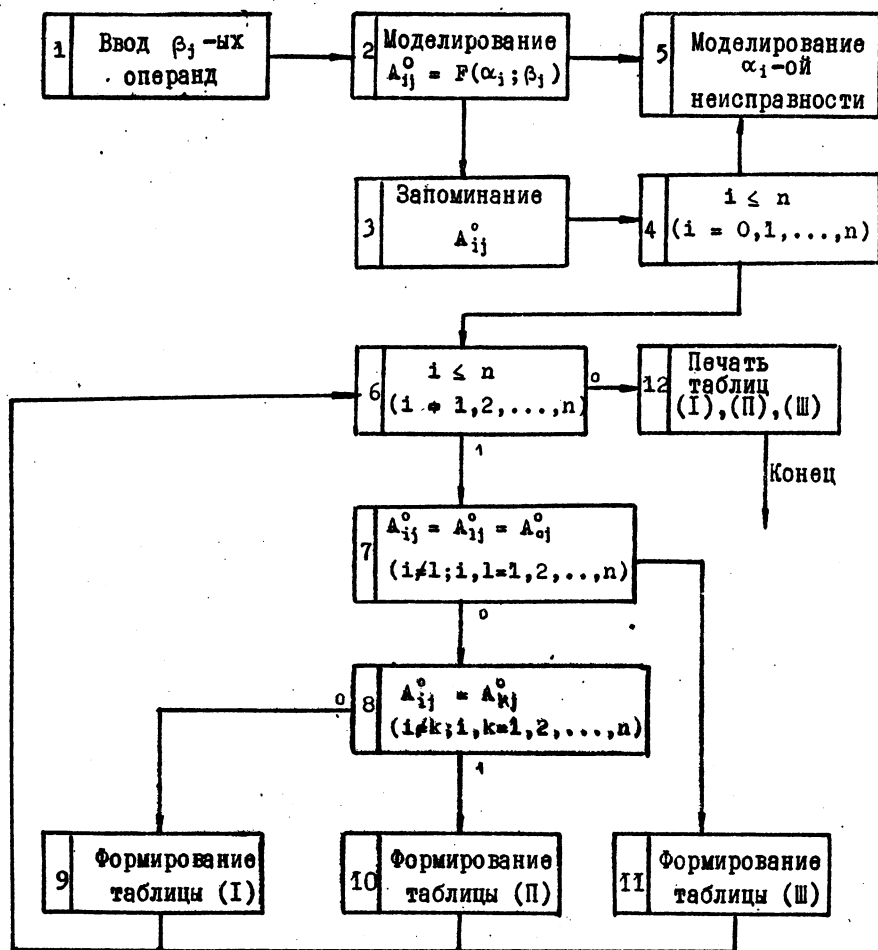


Рис. 2. Блок-схема МП.

1. Некоторые исправные блоки могут стать неустойчивыми во взаимодействии с неисправным блоком. Такие блоки должны быть выявлены в МП (по условию возникновения "запрещенных" комбинаций сигналов), и для неисправных блоков необходимо моделировать коды ошибок для режимов граничных испытаний. Естественно, что при получении многозначности диагноза в ДП, машина должна быть переведена в режим граничных испытаний.

2. Неисправные блоки могут влиять на процесс установки схем в исходное состояние и код A_{1j} может зависеть от операндов примера предыдущего тестирования, т.е. от β_{j-1} . Многозначность в этом случае практически устраняется при 2-х кратном тестировании примера в ДП перед сравнением кода A_{1j} с A_{1j}^0 . Алгоритм 2-х кратного цикла работы модели ($A_{1j}^0 = F(\alpha_1, \beta_j)$) должен быть предусмотрен и в МП.

Приведем некоторые практические результаты разработки ДП "умножение" для ЦВМ М-20. В ДП обеспечено различение порядка 260 физических неисправностей в цепях операции "умножение" при тестировании в ней пяти примеров. ДП печатает непосредственно координату неисправного блока. Время, потребное для диагноза при условии нахождения ДП в оперативной памяти (время полной работы ДП), составляет доли секунды. Диагностические таблицы A_{1j}^0 сформированы с использованием МП, разработанной в системе команд М-20. Моделирование и вывод таблиц для фиксированного значения j требует около 6 минут машинного времени.

Диагностическая программа для анализа ошибок выполнения сложных многотактных операций

В большинстве случаев прогнозируемые неисправности АУ ЦВМ проявляются в виде перемежающихся отказов на сложных многотактных операциях типа "деление", "умножение" и т.д. При этом отказы на других операциях, как правило, еще не наблюдаются. В основе этого явления лежат следующие причины:

1. При выполнении многотактных операций элементы схем АУ работают в областях, близких к предельным по запасу рабочих характеристик.

2. В процессе выполнения многотактных операций существенно изменяется частотный режим работы активных элементов схем, что создает условия для возникновения критических ситуаций в цепях питания ЦВМ.

Алгоритмы выполнения сложных многотактных операций состоят из определенных последовательностей машинных микроопераций типа: прием кодов на регистры, сдвиги и сложения на регистрах, анализ состояний определенных регистров в текущем такте для выработки управляющих сигналов в последующем такте и т.п. В силу взаимосвязанности и взаимообусловленности микроопераций в общем алгоритме сложной операции ошибочное выполнение хотя бы одной микрооперации на одном из тактов, как правило, нарушает исходный алгоритм операции. Поэтому диагностический анализ конечного ошибочного результата практически не удается осуществить. Вместе с тем практика показывает, что задача обслуживающего персонала значительно упрощается в процессе поиска неисправного блока, если предварительно определена хотя бы цепь ошибочно выполненной микрооперации.

В связи со сказанным представляется целесообразным автоматизировать диагностический анализ ошибочных результатов с локализацией неисправностей хотя бы до нескольких съемных блоков. Эту задачу могут выполнить ДП, построенные на основе моделирования алгоритмов сложных операций простыми одноктактными операциями. Достоверность работы ДП обуславливается тем, что для рассматриваемых случаев отказов (в режиме провоцирования прогнозируемых неисправностей) дефектные элементы схем, как правило, обладают еще достаточным запасом рабочих характеристик для правильного выполнения простых операций. Степень подобия описаний схемам операций можно ограничить подобием конечных результатов при подобии алгоритмов выполнения операций и микроопераций.

Для ЦВМ М-20 разработана ДП, которая предназначается для диагностического анализа ошибочных результатов, зафиксированных в СКП на операциях "умножение", "деление", "извлечение корня". При этом область возможных неисправностей ограничивается рассмотрением тех из них, которые приводят к ошибкам в одной микрооперации на одном из тактов работы данной микрооперации. Целесообразность разработки такой ДП обуславливается тем фактом, что в ряде случаев СКП индицирует систематические ошибки на одном или нескольких тестируемых примерах, когда данные ошибки возникают только в режиме прохождения системы контрольных программ, и когда не удастся спровоцировать их возникновение при тестировании отдельных примеров.

Блок-схема ДП приведена на рис. 3. Поясним введенные на блок-схеме обозначения. Множество микроопераций, анализиру-

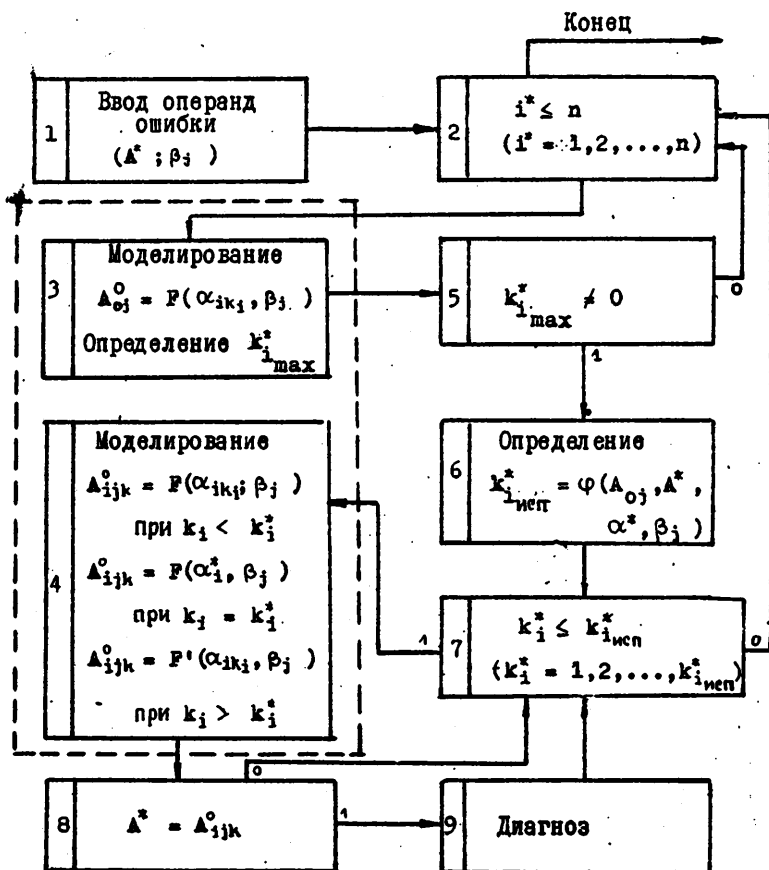


Рис. 3. Блок-схема ДП.

емых на ошибочность выполнения, обозначим через $\{\alpha_{ik_1}\}$, где i - условный номер микрооперации ($i = 1, 2, \dots, n$), k_1 - номер такта работы i -ой микрооперации ($k_1 = 1, 2, \dots, m_1$). Ошибочно выполняемую микрооперацию обозначим через α^* и будем иметь в виду, что ей соответствует определенный номер микрооперации i^* и номер такта возникновения ошибки k_1^* . Ошибочный результат, зафиксированный в СКП, совместно с операндами примера будем называть операндами ошибки. Обозначим ошибочный результат через A^* , операнды примера - через β_j . Моделируемый конечный результат операции будем представлять как некоторую функцию рассматриваемого множества микроопераций и операнд примера и обозначать через

$A_{ijk}^0 = F(\alpha_{ik_1}, \beta_j)$, если в микрооперациях нет ошибки, и через

$A_{ijk}^0 = F(\alpha^*, \beta_j)$, если i^* -ая микрооперация выполнена с ошибкой на k_1^* -ом такте.

ДП осуществляет:

- Ввод операнд ошибки β_j и настройку программы на моделирование алгоритма операции, на которой возникла ошибка (бл. 1).

- Организацию цикла проб на ошибочность выполнения всего предусмотренного переноса ($i^* = 1, 2, \dots, n$) микроопераций (бл. 2).

- Определение (подсчет) числа рабочих тактов с участием анализируемой i^* -ой микрооперации (бл. 3). Максимальный номер такта обозначим через $k_{i^*}^{\max}$. Данная характеристика определяется в процессе моделирования кода A_{0j}^0 ($A_{0j}^0 = F(\alpha_{ik_1}, \beta_j)$).

- Анализ наличия в алгоритме выполнения β_j -го примера анализируемой i^* -ой микрооперации (бл. 5). Если таковой нет, то осуществляется проба на ошибочность выполнения $(i+1)^*$ микрооперации (бл. 5, 2).

- Определение разумного объема испытаний в процессе проб (бл. 6). Данный блок ДП на основе анализа кодов A^* и A_{0j}^0 , а также с учетом алгоритма выполнения β_j -го примера определяет предельный номер рабочего такта, на котором ошибочное выполнение i^* -ой микрооперации еще может привести к ошибке, аналогичной той, что зафиксирована в СКП. Обозначим предельный номер такта через $k_{i^*}^{\text{исп}}$. Очевидно, что он представляет некоторую функцию от A_{0j}^0 ; A^* ; α^* ; β_j . Обозначим ее через Φ .

- Цикл проб на ошибочность выполнения i^* -ой микрооперации на одном из рабочих тактов ($k_i^* = 1, 2, \dots, k_{i, \text{исп}}^*$). При этом операция моделируется по следующим алгоритмам:

$$A_{i,j,k}^0 = F(\alpha_{i,k_i}, \beta_j) \quad \text{при} \quad k_i < k_i^*,$$

$$A_{i,j,k}^0 = F(\alpha^*, \beta_j) \quad \text{при} \quad k_i = k_i^*,$$

$$A_{i,j,k}^0 = F'(\alpha_{i,k_i}, \beta_j) \quad \text{при} \quad k_i > k_i^*.$$

Через (F') обозначена некоторая новая функция, которая может отличаться от исходной (F) под воздействием введенной ошибки. Моделируемый конечный результат сравнивается с результатом ошибки. В случае сравнения ДП выдает на печать диагностическое заключение в виде условно закодированной информации. Например: "ошибка в выработке сигнала +ч2 в МУОП умножения на третьем такте работы МУОП" или "ошибка в выдаче переноса пятым разрядом СМЧ на первом такте". Указанный выше цикл проб осуществляют блоки 7,4,8,9 МП.

Объем ДП - около 800 ячеек МОЗУ. ДП реализована на основе использования простых операций. Потребное время для диагноза зависит от операнд ошибки и колеблется в пределах от десятых долей минуты до нескольких минут. В ряде случаев с помощью данной ДП в течение нескольких минут были локализованы неисправности, диагностика которых при использовании одной лишь СКП занимает часы. Однако в общем случае эффективность ДП ограничивается возможностью получения многозначного диагноза.

Суть вопроса о многозначности диагноза и возможных путях улучшения характеристик ДП состоит в следующем:

1. Неисправности массовых цепей диагностируются, как правило, многозначно. Под массовыми цепями будем понимать стандартные для всех разрядов цепи сумматора, регистров и т.п.

2. Многозначность диагноза обуславливается тем, что в многотактном цикле можно получить аналогичные ошибочные результаты под воздействием различных ошибок на различных тактах.

3. Одним из возможных путей устранения многозначности диагноза является метод введения в ДП дополнительной информации об ошибках. В частности, для М-20 разработан режим фиксирования К-го промежуточного состояния сумматора числа на регистре результатов. Режим обеспечивает программное задание номера такта, программный съем дополнительной информации и запись её в МОЗУ после записи конечного ошибочного результата. Режим зна-

чительно улучшает характеристики ДП, но вместе с тем в силу наличия единственной ячейки памяти (регистра результатов) накладывает дополнительные ограничения на область рассматриваемых неисправностей и усложняет взаимодействие СКП и ДП. На наш взгляд, целесообразно исследовать в дальнейшем возможность использования МОЗУ для фиксирования дополнительной информации. Наряду с улучшением характеристик ДП в этом случае можно значительно расширить область применимости ДП.

4. Второй путь устранения многозначности диагноза в ДП связан с возможностью оптимизации операнд примеров, тестируемых в СКП. Предпосылкой этому является то, что для теста "Умножения" (система "КТ-3" для ЦВМ М-20) разработаны операнды, при тестировании которых осуществляется проверка отдельных разрядов массовых цепей со значительно большей режимной глубиной контроля, чем других разрядов. При этом наиболее вероятные для данных операнд ошибки локализуются ДП однозначно.

В ы в о д ы

1. Система диагностических программ, включающая в себя ДП для диагностики неисправностей на отдельных операциях, может существенно улучшить ремонтпригодность ЦВМ.

2. В качестве аппарата разработки ДП целесообразно использовать метод моделирования операций ЦВМ.

Л и т е р а т у р а

1. Г.А. Миронов. Испытательные программы для контроля электронных цифровых машин. Наука, М, 1964.
2. Диагностика неисправностей вычислительных машин. Сборник статей. М., "Наука", 1965.
3. В.В. Ваксов, К.С. Колобовников. К вопросу о построении диагностических тестов. "Вопросы радиоэлектроники", серия XII, выпуск 29, 1965.
4. Б.Д. Зарубицын. Метод построения диагностических программ для локализации неисправностей немассовых цепей ЭЦВМ М-20. "Вопросы технической эксплуатации вычислительных машин", выпуск I, вычислительный центр АН СССР, М, 1967.