Информационные процессы, Том 4, № 2, 2004, стр. 170–174.

Диагностика коммутационных систем

В.А.Гармаш

Институт проблем передачи информации, Российская Академия наук, Москва, Россия
Поступила в редколлегию 12.05.2004

Аннотация—Рассматриваются вопросы диагностики коммутационных систем, в которых возможны отказы коммутационных элементов. Алгоритм основан на покрытии коммутационной схемы минимальной системой точных разрезов и элементарных цепей. По значениям прохождения или непрохождения сигналов через соответствующие разрезы и цепи определяется наличие неисправных коммутационных элементов. Применение алгоритма иллюстрируется диагностикой коммутатора и трехкаскадной схемы коммутации.

1. ВВЕДЕНИЕ

Коммутационная система представляет собой определенным образом обьединение коммутационных элементов (КЭ), позволяющих при соответствующем значении их набора в замкнутом и разомкнутом состояниях обеспечивать соединение множества входов с выбранным заранее множеством выходов. Как и во всякой структурно-сложной системе, КЭ подвержены отказам, что уменьшает надежность работы всей коммутационной системы. Здесь рассматриваются “классические” виды отказов КЭ: 1.при команде на размыкание КЭ остается в замкнутом состоянии и 2. при команде на замыкание КЭ не срабатывает.

Задача повышения надежности работы коммутационной системы состоит, в частности, в диагностике всей системы с целью определения отказавших КЭ, а в случае обнаружения таковых, их локализацию. Вопросы диагностики коммутационных систем рассматривались ранее применительно к конкретным структурам или специальным их применениям. Обеспечение надежной работы систем коммутации неразрывно связано с организацией и проведением ее технической диагностики. Различные аспекты определения неисправностей рассмотрены в [1] при решении задачи диагностики многокаскадных коммутационных систем, построенных на основе двоичных коммутаторов. По выходным значениям системы и при заданном наборе множества входных данных выносилось заключение о работоспособности всей системы. В [2] описана диагностика СБИС структуры, при этом существенным является особеннсость структуры схемы и учет возможных отказов (обрывы, короткие замыкания и др.). В статье [3] описан метод диагностики многошинной системы коммутации, по-существу, являющейся двухкаскадной схемой с последовательным соединением двух одинаковых коммутаторов. Здесь рассматривается общая задача диагностики коммутационных систем.

2. АЛГОРИТМ ДИАГНОСТИКИ СИСТЕМ КОММУТАЦИИ

Рассматриваемая задача диагностики коммутационных систем состоит в разработке такого алгоритма диагностирования, который установил бы в системе отсутствие неисправных КЭ, а если таковые имеются, то локализовал бы их. Предполагается, что обнаруживаемые по ходу диагностирования неисправные КЭ могут после их локализации заменяться на исправные, а новые неисправные КЭ за время диагностирования не появляются. Требуемый алгоритм должен обладать высокой надежностью, т.е. вероятность того, что он поставит неверный диагноз, не определив имеющиеся неисправные КЭ в коммутационной схеме, очень мала. С другой стороны, количество выполняемых элементарных проверок должно быть минимально. Под элементарной проверкой понимается прохождение (или непрохождение) сигнала между двумя полюсами (входами и выходами) исследуемой коммутационной схемы.

Рассматриваемый алгоритм основан на следующих предположениях.

1.Пусть каждая цепь, соединяющая полюса a и b, содержит хотя бы один КЭ из некоторого множества R. Такое множество является разрезом между a и b или, короче, разрезом. Пусть всем КЭ разреза дана команда на размыкание, а всем остальным КЭ схемы – на замыкание. Если после этого сигнал из a в b проходит, то хотя бы один КЭ из R не выполнил команду на размыкание. Отсутсвие прохождения сигнала из a в b может быть как следствием размыкания некоторых КЭ из R, так и следствием невыполнения команды на замыкание некоторых КЭ, не принадлежащих R. Для получения вероятностной оценки того, что все КЭ из R выполнили команду на размыкание, надо потребовать, чтобы каждый КЭ из R принадлежал хотя бы одной цепи, соединяющей a с b и содержащий только один КЭ из этого разреза. Такой разрез называется точным. Если же известно, что каждый КЭ $u \subseteq R' \subseteq R$ входит в состав хотя бы одной цепи, соединяющей a с b, все КЭ которой, кроме КЭ u, достоверно выполнили команду на замыкание, то непрохождение сигнала из a в b достоверно означает, что все КЭ $u \subseteq R'$ выполнили команду на размыкание.

2. Пусть L – некоторая цепь, соединяющая полюса a и b и проходящая через каждый полюс коммутационной схемы не более одного раза. Такая цепь называется элементарной. Пусть всем КЭ цепи L дана команда на замыкание, а всем остальным КЭ – на размыкание. Если после этого сигнал из a в b не проходит, то хотя бы один КЭ цепи L не сработал на замыкание. В общем случае прохождение сигнала из a в b позволяет делать только вероятностные оценки того, что все КЭ цепи L выполнили команду на замыкание (при этом учитывается, что L не образует циклов). Не исключено, что некоторые КЭ цепи L не сработали на замыкание, но одновременно не выполнили команду на размыкание некоторые КЭ, не принадлежащие цепи L. В результате сигнал из a в b прошел по обходному пути. Если же достоверно известно, что все КЭ, не принадлежащие цепи L, работают на размыкание, то прохождение сигнала из a в b достоверно означает, что все КЭ цепи L работают на замыкание.

В соответствии с п.1 и п.2 для построения алгоритма диагностирования надо иметь системы Γ и Λ точных разрезов и элементарных цепей, образующих покрытие коммутационной системы, т.е. обладающее тем свойством, что каждый КЭ коммутационной системы принадлежит хотя бы одному разрезу из Γ и хотя бы одной цепи из Λ. При этом, чтобы удовлетворялось требование минимальности алгоритма, системы Γ и Λ должны быть минимальными. Это означает, что никакая система с меньшим числом точных разрезов, чем Γ и соответственно с меньшим числом элементарных цепей, чем Λ, не образуют покрытия коммутационной схемы.

3. ДИАГНОСТИКА КОММУТАТОРА

Рассматривается коммутатор с разделенными входами и выходами. Структура коммутатора описывается двудольным графом. Пусть G – двудольный граф, долями которого являются множества $J = 1, 2, \dots, N$ -множество входов и $\Omega = 1, 2, \dots, M$ -множество выходов, причем, $M \geq N$.

Минимальная система точных разрезов строится следующим образом. Разобьем множество всех КЭ коммутатора на два подмножества R_1 и R_2. К подмножеству R_1 относятся все КЭ, расположенные между входами с номерами $1, 2, \dots, N/2$ и выходами с номерами $1, 2, \dots, M/2$ и между входами с номерами $N/2+1, N/2+2, \dots, N$ и выходами с номерами $M/2+1, M/2+2, \dots, M$. К подмножеству R_2 - все остальные КЭ коммутатора. Каждое из подмножеств R_1 и R_2 являются точными разрезами между входами с номерами 1 и N, а их совокупность образует покрытие коммутатора.

Минимальное покрытие элементарными цепями. Рассмотрим полный двудольный граф G, у которого α_i – произвольный вход, а β_j – произвольный выход.

Введем множество X_{NM} перестановок

$$A = \begin{pmatrix} \beta_1 \; \beta_2 \; \dots \; \beta_N \; \beta_{N+1} \; \dots \; \beta_M \\ \alpha_1 \; \alpha_2 \; \dots \; \alpha_N \; \alpha_{N+1} \; \dots \; \alpha_M \end{pmatrix} \tag{1}$$

где

$$\beta_i = 1, 2, \dots, M, \quad \beta_i \neq \beta_j$$

$$\alpha_i = 1, 2, \dots, N \quad \text{при} \quad i \leq N$$

$$\alpha_i = 0 \quad \text{при} \quad i > N, \alpha_i \neq \alpha_j$$

В графе G каждой перестановке A можно сопоставить элементарную цепь $L = \beta_1\alpha_1\beta_2\alpha_2 \dots \beta_N\alpha_N\beta_{N+1}$ длины $2N$ с концами в выходах $\beta_1\beta_{N+1}$. Определим на множестве $X_{NM}, M \geq N$ операцию сдвига влево. Перестановка A' получена из перестановки A (1) сдвигом на k влево, если

$$A' = \begin{pmatrix} \beta_{1+k} \; \beta_{2+k} \; \dots \; \beta_{N+k} \; \dots \; \beta_{M+k} \\ \alpha_1 \quad \alpha_2 \; \dots \; \alpha_N \; \dots \; \alpha_M \end{pmatrix} \tag{2}$$

где

$$i + k = \begin{cases} i + k & \text{при } i + k \leq M \\ i + k - M & \text{при } i + k > M \end{cases}$$

Пусть дана перестановка

$$A' = \begin{pmatrix} 1 \; 2 \dots N \; N+1 \dots M \\ 1 \; 2 \dots N \quad 0 \quad \dots \; 0 \end{pmatrix}$$

причем

$$r = M/2$$

Обозначим через $X(A_i)$ семейство перестановок $A_i, i = 1, 2, \dots, r$, полученных из перестановки (2) сдвигом на $2(i-1)$ влево.

Семейство элементарных цепей, соответствующих в графе G перестановкам $X(A_i)$ обозначим через $\Lambda = L_1, L_2, \dots, L_r$. Полученное семейство элементарных цепей Λ образует его минимальное покрытие.

При $M = N$ каждой перестановке (1) можно сопоставить в графе G элементарную цепь $L = \beta_1\alpha_1\beta_2\alpha_2 \dots \beta_N\alpha_N$ длины $2N - 1$ с концами в выходе β_1 и входе α_N. Определим на перестановке (1) операцию вращения на k влево. Пусть

$$B_0 = \begin{pmatrix} 1 \; 2 \dots N \\ 1 \; 2 \dots N \end{pmatrix}$$

Обозначим через $X(B_i), r = N/2 + 1$ семейство перестановок, определяющих условиями: 1. если $1 \leq i < r$, то перестановка B_i получается из B_0 сдвигом на $2(i+1)$ влево и поворотом на $N/2 + i - 1$ влево, 2. если $i = r$, то

$$B_r = \begin{pmatrix} N \; N-1 \dots 1 \\ 1 \quad 2 \quad \dots N \end{pmatrix}$$

Семейство элементарных цепей, соответствующих в графе G перестановкам семейства $X(B_i)$ обозначим $\Lambda = \{L_1, L_2, \dots, L_r\}$. В этом случае, как и в случае $M > N$, полученное семейство элементарных цепей образует минимальное покрытие.

Алгоритм диагностирования

Алгоритм диагностирования состоит из последовательности выполнения некоторых шагов - замыкания КЭ, принадлежащих одному из множеств и размыкания оставшихся КЭ другого множества. При этом выполняется элементарная операция – прохождение или непрохождение сигнала между выбранными полюсами. В зависимости от результата элмементарной проверки осуществляется переход к следующей элементарной операции или производится локализация неисправного КЭ. Затем производится переход к анализу КЭ с использованием системы Γ точных разрезов. После этого осуществляется переход к анализу КЭ, принадлежащих множеству Λ элементарных цепей с замыканием одного множества КЭ и размыкания соответствующего множества других КЭ.

По поводу локализации неисправных КЭ следует заметить следующее.Так как разрезы R_1 и R_2 состоят из двух полных двудольных графов, то локализацию оставшихся КЭ следует вести дихитомией. При этом каждый двудольный граф, входящий в разрез, следует диагностировать по тому же принципу, что и коммутатор в целом. Число элементарных проверок (без локализации неисправных КЭ) равно M/2+2.

Однако, как отмечалось ранее, алгоритм может не обнаружить имеющуюся в коммутаторе неисправность. Для этого необходимо оценить вероятность того, что алгоритм не обнаружил в коммутаторе неисправный КЭ. В каждом из полных двудольных графов, из которых состоят разрезы R_1 и R_2 любые два полюса можно соединить не менее, чем N/2 цепями, не имеющих общих полюсов. Поэтому, если в каждом из них число КЭ, отказавших на замыкание, меньше N/2 и в коммутаторе имеется хотя бы один КЭ, отказавший на размыкание, то алгоритм достоверно обнаружит это. Вероятность того, что в графе не менее N/2 КЭ, отказавших на размыкание, меньше $1/8mN^2$, где m – математическое ожидание числа КЭ, отказавших на размыкание (замыкание) и имеет порядок не более 1. Поэтому вероятность необнаружения отказа на размыкание имеет оценку $p < 4m/2^{N/2}N/2!$. Ошибка на замыкание возможна тогда, когда после диагностирования на размыкание в коммутаторе остался КЭ, не сработавший на размыкание. Поэтому вероятность p неправильного диагноза на замыкание имеет такую же оценку.

4. ДИАГНОСТИКА КОММУТАЦИОННОЙ СХЕМЫ

Использование изложенных ранее предложений, положенных в основу диагностики коммутатора, легко могут быть применимы для обнаружения неисправностей в многокаскадных коммутационных схемах. Рассмотрим в качестве примера трехкаскадную схему разовой коммутации $\nu(n, r, n)$, с числом входов и выходов $N = nr$, в которой каждый коммутатор первого (входного) каскада и каждый коммутатор третьего (выходного) каскада, число которых равно r, имеют размеры nxn, а n коммутаторов среднего каскада имеют размеры rxr. Обозначим через P_i и Q_i, $i = 1, 2, \dots, r$ коммутаторы первого и третьего каскадов, а через T_j, $j = 1, 2, \dots, n$ - коммутаторы среднего каскада.

Минимальная система точных разрезов, покрывающая схему $\nu(n, r, n,)$. Система состоит из четырех точных разрезов. Обозначим через $P_{i1}(Q_{i1})$ множество КЭ коммутатора $P_i(Q_j)$, которые соединяют в нем входы с номерами $1.2, \dots, n/2$ с выходами с номерами $1, 2, \dots, n/2$, а также входы с номерами $n/2 + 1, n/2 + 2, \dots, n$ с выходами $n/2 + 1, n/2 + 2, \dots, n$. Множество остальных КЭ коммутатора $P_i(Q_i)$ обозначим через $P_{i2}(Q_{i2})$.

Аналогично строятся множества КЭ коммутаторов среднего каскада T_j, $j = 1, 2, \dots, r$. Обозначим через T_{j1} множество КЭ коммутатора T_j, соединяющего входы с номерами $1, 2, \dots, r/2$ с выходами $1, 2, \dots, r/2$, а также входы с номерами $r/2 + 1, r/2 + 2, \dots, r$ и выходы с номерами $r/2 + 1, r/2 + 2, \dots, r$. Множество остальных КЭ коммутатора T_j обозначим через T_{j2}. Замкнем все КЭ коммутаторов первого каскада, множеств $T_{j1}, j = 1, 2, \dots, n/2, T_{j2}, j = n/2+1, n/2+2, \dots, n$ и $Q_{i1}, i = 1, 2, \dots, r$. Остальные КЭ остаются разомкнутыми. Множества всех разомнутых КЭ образуют точный разрез Γ_1 между первыми входами в P_1и P_r. Действительно, любой путь из первого входа

P_1 в первый вход P_r проходит через один КЭ, принадлежащий разрезу Γ_1 в коммутаторах второго и третьего каскадов.

Точные разрезы Γ_2, Γ_3 и Γ_4 строятся таким же образом.

Минимальное множество цепей. Пусть Λ - минимальное множество цепей, покрывающих коммутатор размера nxn. Покрываем каждый коммутатор P_i цепью $\Lambda_i \subset \Lambda$, начинающейся в вершине β_i и окачивающейся в вершине β_n со стороны выхода из него, а коммутаторы Q_i покрываем той же цепью $\Lambda_i \subset \Lambda$, начинающейся и оканчивающейся в тех же вершинах, но со стороны входов. Через коммутатор T_{β_n} соединим вход β_n из коммутатора P_i со входом β_n коммутатора Q_i. Через коммутатор T_{β_1} соединим вход β_1 из коммутатора P_{i+1} со входом β_1 в коммутатор Q_i. Наконец, в коммутаторе P_i соединим вход β_1 со свободным входом a, а в коммутаторе Q_r – вход β_n со свободным выходом β. Этим самым построена элементарная цепь. Повторяя процесс для всех цепей $\Lambda_i \subset \Lambda$, получим множество из $(n+1)/2$ цепей из P_i в Q_i. Таким же образом можно построить систему из $r/2+1$ цепей, покрывающих каждый КЭ коммутатора T_j. Таким образом построено оптимизированное множество из $(n+1)/2 + r/2 + 2$ элементарных цепей, покрывающих коммутационную схему $\nu(n, r, n)$.

Алгоритм диагностирования. Операцию по проверке неисправных КЭ в трехкаскадной схеме разовой коммутации $\nu(n, r, n)$ выплняется так же, как и в случае проверки отдельного коммутатора. Вероятность оценки по цепям оценивается значением

$$p_\Lambda = max\left\{r(n^2 - n - 1), n(r^2 - r + 1)p\right\} \tag{3}$$

Вероятность оценки по точным разрезам оценивается значением

$$p_\Gamma = 4max\left\{\frac{r(n/2)^n p^{n/2}}{(n/2)!}, \frac{n(r/2)^r p^{r/2}}{(r/2)!}\right\} \tag{4}$$

Из сравнения (3) и (4) следует, что при $n, r > 2$ $p_\Lambda > p_\Gamma$ и поэтому сначала надо проверять по четырем разрезам Γ, и затем по цепям Λ . В заключение отметим, что для многокаскадных схем множество цепей строится таким образом, что первые цепи покрывают коммутаторы крайних каскадов, затем цепи покрывают коммутаторы вторые от края коммутаторы и т.д. Операции проверки проводятся в соотвествии с описанными ранее алгоритмами.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены вопросы диагностики коммутационных систем, в которых возможны отказы КЭ, заключающиеся в том, что они могут несрабатывать (или срабатывать) при подаче на управляющее устройство соответствующего сигнала управления. Разработанный алгоритм диагностирования основан на покрытии коммутационной схемы, представленной в виде графа, минимальной системой точных разрезов и элементарных цепей. По значениям прохождения или непрохождения сигналов через соответствующие разрезы и цепи определяется наличие неисправных КЭ, а зетем и их локализация. Применение алгоритма иллюстрируется диагностикой коммутатора и трехкаскадной схемы разовой коммутации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhao Y, Meyr F.J, Lombardi F. Analyzing and Diagnosing Interconnect Faults in Bus-Structured Systems. *IEEE Design and Test of Computers*, 2002, vol. 19, no. 1, pp. 54–64.

2. Fang T.Y.,Wu C.l. Fault-Diagnosis for a Class of Multistage Interconnecion Network. *IEEE Transacion on Computers*. vol. C-30, no. 10, 1981, pp. 743–758.

3. Гармаш В.А. Диагностика многошинных систем коммутации. *Информационные процессы*, 2003, том 3, № 2, стр. 109–113.