

Диагностика сложных технических систем

М.Е.Бушуева, В.В.Беляков*

*Нижегородский государственный технический университет
ул. Минина 24, Нижний Новгород, 603600, Россия*

В работе рассматриваются теоретические аспекты построения диагностики сложных технических систем. Показана возможность обеспечения их диагностирования. Представлен теоретико-математический аппарат обеспечения контролепригодности сложных технических систем. Поставлены и предложено решение трех основных задач обеспечения контролепригодности. Излагаются основные положения как однокритериальной, так и многокритериальной оптимизации глубины диагностирования сложных технических систем при кратных дефектах. Приводится числовой пример многокритериальной оптимизации глубины диагностирования сложной технической системы.

Используются и вводятся следующие ключевые термины и понятия: объект диагностирования; конструкционные единицы; контролепригодность; кратные дефекты; диагностические модели и методы их анализа; множество характеристических параметров объекта диагностирования (входные и выходные показатели, внешние шумы и внутренние помехи); вероятность состояния объекта диагностирования; условия работоспособности; признаки наличия дефектов; коэффициент глубины поиска дефекта; стоимость реализации дополнительных точек контроля; метод свертывания векторного критерия оптимальности к аддитивному критерию оптимальности с весовыми коэффициентами относительной важности частных критериев.

Приведенные в работе методы и алгоритмы обладают высокой степенью универсальности и могут быть использованы в любых областях науки и техники, где требуются надежная диагностика и контроль работоспособности технических объектов, систем или изделий.

1. Введение

Повышение качества функционирования и определение действительного технического состояния изделий (объектов, систем) является важной проблемой, от правильного решения которой зависит эффект их использования. В обеспечении требуемого уровня качества функционирования и надежности сложных технических систем особая роль принадлежит методам технического диагностирования. Резервом повышения надежности является переход от планово-предупредительного обслуживания и ремонта к обслуживанию и ремонту по действительному техническому состоянию. Использование этой стратегии обслуживания требует широкого применения средств и методов автоматизированного контроля и диагностирования. В связи с этим возникает необходимость обеспечения такого свойства изделия (объекта технического диагностирования), которое позволило бы с минимальными затратами достоверно определить его техническое состояние. Это свойство получило название *контролепригодность*.

Если сложный технический объект проектируется без учета требований кон-

* Тел./Fax: +7-8312-366364; E-mail: amf@adm.nntu.sci-nnov.ru

тролепригодности, то около 50–60% общего времени ремонта требуется на поиск дефектов. Процент затрат времени еще более возрастает, если они являются кратными. Отсюда следует, какими огромными резервами экономии финансовых средств можно располагать при эксплуатации сложных технических систем. В тоже время, вопросы обеспечения контролепригодности и организации диагностирования сложных технических объектов на этапе их проектирования исследованы еще слабо, особенно это касается объектов, в которых возможны кратные дефекты и ставится задача их локализации. Разработка методов обеспечения контролепригодности и использование программных средств в виде пакета прикладных программ должно существенно упростить проектирование объектов, которые обладают свойством приспособленности к техническому диагностированию.

Проект Программы НАТО Наука для Мира *“Разработка радиационно-стойких полупроводниковых приборов для систем связи и прецизионных измерений с использованием шумового анализа”* напрямую направлен на повышение надежности сложных технических полупроводниковых объектов, работающих в тяжелых условиях эксплуатации. В связи с этим, проблема обеспечения контролепригодности этих технических объектов является весьма актуальной. Рассматриваемые в работе методы и алгоритмы обеспечения контролепригодности, особенно при кратных дефектах, в объекте являются частью общей проблемы обеспечения контролепригодности технических систем.

Материал, изложенный в работе, базируется на результатах научных исследований представленных в работах [1–3].

2. Обеспечение диагностирования при эксплуатации сложных технических систем

Техническая диагностика. Непрерывное усложнение технических объектов и рост степени автоматизации процесса управления выдвигают на передний план проблему оптимальной организации эксплуатации сложных технических объектов. Важную роль при этом отводят определению состояния объектов, которое вследствие воздействия внешних и внутренних факторов изменяется с течением времени. Разрешением всех вопросов, связанных с определением состояния технических объектов и характера его изменения с течением времени, занимается *техническая диагностика*, целью которой является *установление состояния объекта диагностирования* (рис.1). При контроле осуществляется, как правило, *качественная оценка* (работоспособен, неработоспособен, имеется дефект, дефект отсутствует и т.п.). Однако при измерениях и выполнении контрольных операций можно получить и *количественную оценку* (степень работоспособности).

Решение задач технической диагностики целесообразно начинать в процессе проектирования объекта. Исходя из условий использования и эксплуатации проектируемого объекта, разрабатывают *диагностические модели*, эффективность которых в значительной мере зависит от степени приспособленности конструкции объекта к техническому диагностированию, а также применяемых методов и средств технической диагностики. *Приспособленность конструкции объекта к техническому диагностированию* определяется как *контролепригодность*.

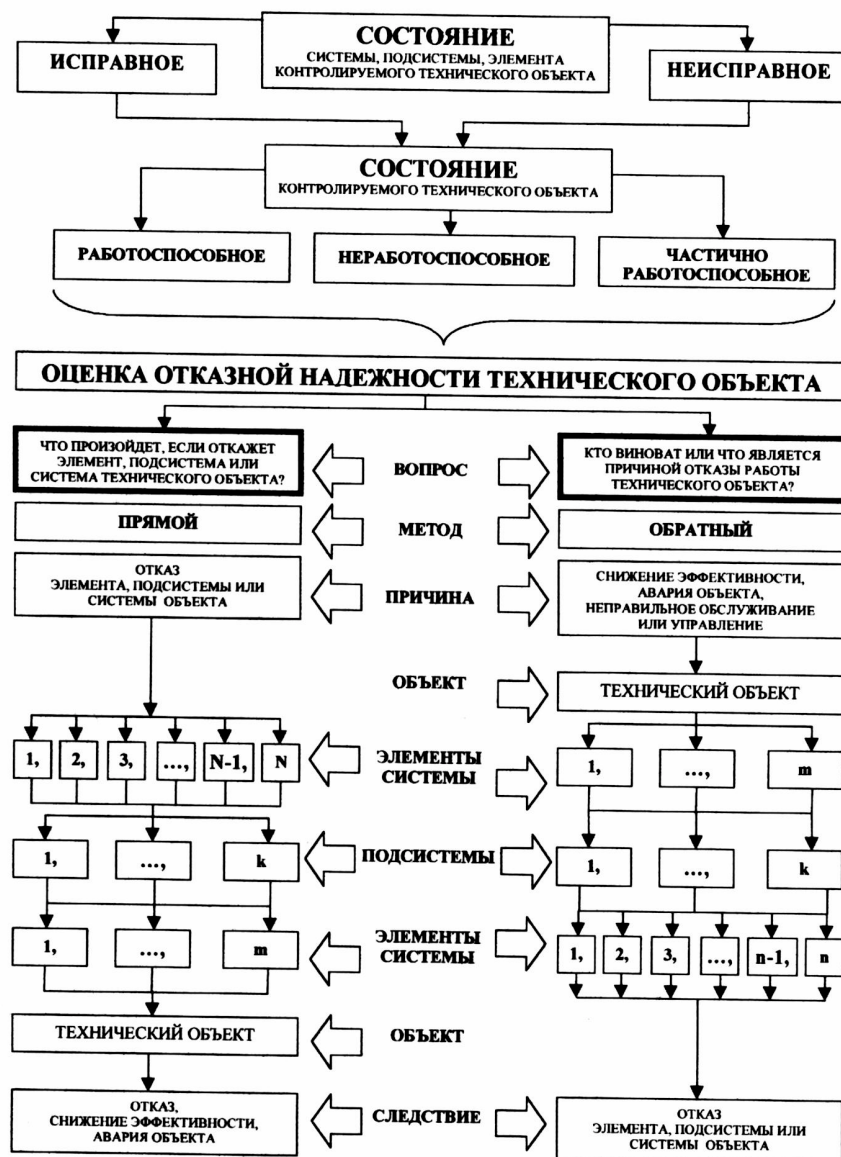


Рис. 1. Схема работоспособности и контроля диагностируемого технического объекта

Анализ диагностических моделей объекта позволяет сформулировать условие работоспособности, определить признаки неисправностей и выбрать ограниченное множество характеристик, показателей или параметров, которые следует контролировать в процессе диагностирования. При выборе методов диагностирования необходимо учитывать возможность их технической реализации, конструктивное исполнение и условия эксплуатации объекта. При этом должно быть установлено, какие встроенные или внешние технические средства будут использоваться в процессе диагностирования. В результате должны быть решены вопросы конструкционного порядка, связанные с объектом и встроенными средствами диагностирования, а также разработано техническое задание на внешние средства диагностирования. С учетом условий эксплуатации объекта должна быть определена целесообразная степень автоматизации процесса диагностирования, разработаны функциональные и структурные схемы технических средств, выработаны принципы и форма обработки контрольной информации и получены технические решения для конкретных диагностических устройств.

Диагностические модели. Оптимальные решения задач технической диагностики сложных объектов могут быть получены только в результате анализа множества N состояний, в которых эти объекты могут находиться в период эксплуатации. В связи с этим требуются специальные методы для теоретического анализа множества возможных состояний сложных технических объектов. Подобные методы основываются на исследовании аналитических описаний или графическо-аналитических представлений основных свойств технических объектов, как объектов диагностирования, которые могут быть названы их диагностическими моделями. Их классификация представлена на рис. 2.

Дискретные модели определяют состояние объекта только для последовательности дискретных значений независимой переменной, например, времени, но без учета характера протекания процесса в промежутках.

Непрерывные модели представляют состояние объекта в том случае, когда рассматриваемые процессы протекают в непрерывно изменяющемся времени, которое является аргументом соответствующих функций. Непрерывные модели составляют наибольшую группу, так как основные процессы изменений качества технических объектов носят непрерывный характер.

Непрерывные объекты при решении задач диагностирования можно представить *аналитической моделью* – адекватным математическим (формульным) описанием объекта в виде совокупности функциональных соотношений, дифференциальных или передаточных функций. Аналитические модели широко используются для описания объектов любых типов, например, механических, электрических, электромеханических или пневмогидравлических. При этом неисправности объекта моделируются как недопустимые изменения значений параметров диагностирования.

Однако большой класс технических объектов не допускает использования аналитических методов моделирования по своей структуре, или же создание полной аналитической модели бывает затруднительно из-за отсутствия соответствующей информации. В этом случае для решения задачи различимости дефектов объектов предлагается использовать *топологическую модель*.

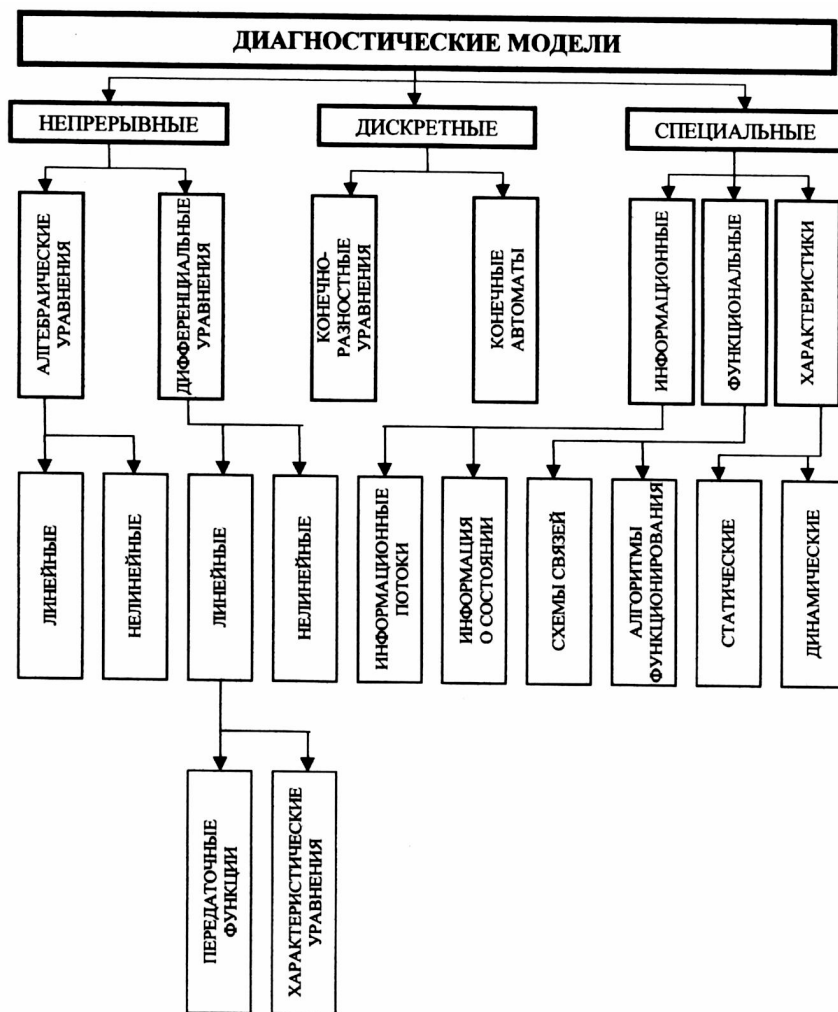


Рис. 2. Классификация диагностических моделей

Топологическая модель задается в пространстве параметров совместным представлением совокупности физических свойств объекта и его топологии в виде графа или матрицы с указанием причинно-следственных связей между физическими свойствами.

Если модель представляется в виде графа, то вершинам соответствуют параметры объекта (выходные и входные, основные и вспомогательные, структурные параметры), а дугам – известные аналитические или статистические зависимости и качественные соотношения между параметрами.

Задача технического диагностирования формулируется как определение диагностических параметров, позволяющих найти дефект в объекте. Множество диагностических параметров считается эффективным, если оно удовлетворяет следующим требованиям: 1) полного описания всех классов дефектов; 2) наибольшей чувствительностью к изменению значений структурных параметров; 3) минимальности состава; 4) доступности для контроля и измерения; 5) минимума стоимости и времени контроля всех параметров; 6) достаточной степени делимости при распознавании отдельных дефектов.

Наряду с топологическими моделями широкое распространение при решении задач технической диагностики получили *двузначные логические модели*, охватывающие большой класс реальных технических объектов, представленных блочной функциональной или структурной схемами. При построении логической модели каждому функциональному элементу ставится в соответствие совокупность логических блоков так, чтобы выход каждого логического блока характеризовался только одним параметром, и при этом оставляются только те входы, которые формируют данный выход.

Применение логической модели основывается на применении допусковых способов диагностирования, характеризующихся тем, что заключение о правильности функционирования объекта делается на основании качественной оценки некоторой совокупности диагностических параметров. Если значение сигнала находится в допустимых пределах, то значение данного выходного сигнала полагается равным 1, в противном случае – 0.

Методы анализа диагностических моделей. На основе построенной модели осуществляется поиск дефектов. Программа поиска дефектов может осуществляться различными способами (см. рис. 3), например, используются методы теории графов. Для этого предлагается построить упорядоченный граф, по которому строится матрица диапазонов контрольных пар, строки которой соответствуют проверкам, а столбцы – номерам блоков. При этом элементы строки равны 1, если проверки охватывают данные блоки, и 0 – в противном случае. Условие различимости дефектов формулируется как условие различимости столбцов матрицы, в случае неразличимости предполагается введение дополнительных точек контроля. В целом же методы, используемые при исследовании диагностических моделей разделяются на аналитические, графические и графоаналитические.

Аналитические методы позволяют применять удобные способы оптимизации и получать соотношения, характеризующие объект при изменении его состояния.

Графические методы обладают большой наглядностью и могут служить как непосредственно, так и для иллюстрации аналитических методов.

Графоаналитические методы представляют собой различные комбинации графических и аналитических методов.

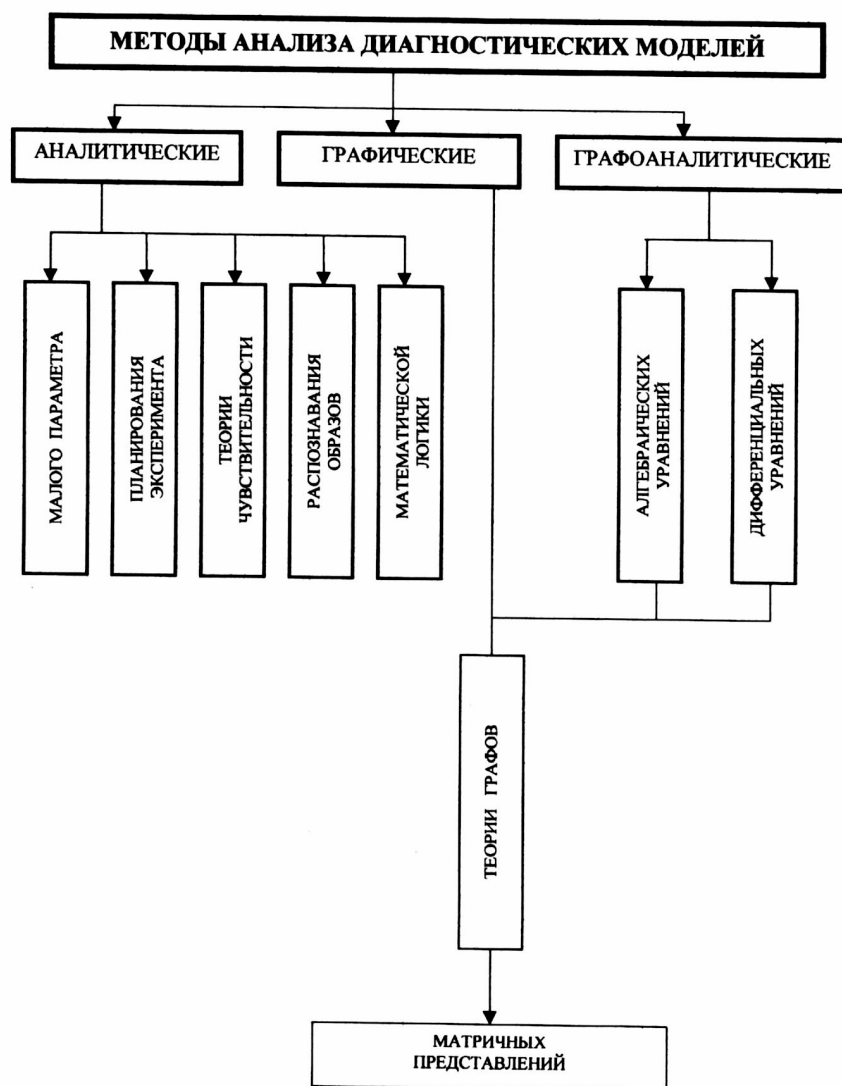


Рис. 3. Классификация методов, используемых при исследовании диагностических моделей

Следует отметить, что в большинстве диагностических моделей и методов анализа вопросы контролепригодности рассмотрены недостаточно, что затрудняет практическое применение представленных на рис. 3 методов и соответствующих им алгоритмов диагностирования.

Классификация параметров, определяющих функционирование сложного объекта. Пусть задан сложный технический объект диагностирования. Выделим в нем такие составные части, с точностью до которых желательно проводить поиск дефектов. В качестве таких частей могут быть системы, подсистемы или элементы. Нижний уровень разбиения называют *сменными блоками*, подразумевая при этом, что в каждом конкретном случае сменный блок может состоять как из одного, так и из нескольких съемных конструктивных узлов (деталей) или элементов.

Если отвлечься от внутренней структуры и процессов, протекающих внутри объекта (структурной единицы – сменного блока), то в общем случае его можно рассматривать (рис. 4) как “черный ящик”, связанный с окружающим миром (другими объектами, структурными единицами, системами, средой и т.п.) через посредство внешних связей: x_i ($i = 1, 2, \dots, m$) – входные параметры; y_j ($j = 1, 2, \dots, n$) – выходные параметры; z_k ($k = 1, 2, \dots, l$) – внешние шумы; α_γ ($\gamma = 1, 2, \dots, \xi$) – внутренние помехи, возникающие в структуре объекта из-за износа, поломок и дефектов.

Обычно элементы множеств $\{x_i\}$, $\{y_j\}$, $\{z_k\}$, $\{\alpha_\gamma\}$ – случайные последовательности.

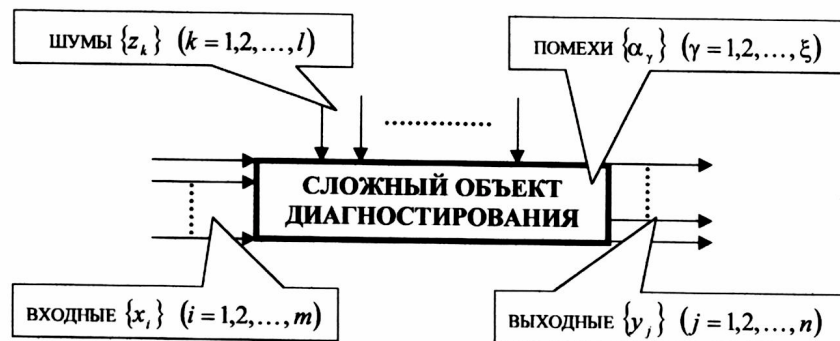


Рис. 4. Схема сложного объекта диагностирования

Множество выходных величин $\{y_j\} \equiv Y$ называется параметрами обследуемого объекта. Среди наблюдаемого множества выходных величин имеются такие R , которые с точки зрения конкретной задачи являются второстепенными: $R \subset Y$, $R \neq \emptyset$. Элементы подмножества R характеризуют основные функции процесса, для реали-

зации которого создан объект и они называются его характеристиками.

При переходе из одного состояния в другое элементы множества Y меняются и в общем случае значения выходных величин $\{v_j\}$, а следовательно и характеристики R , зависят от нескольких подмножеств факторов: входных величин $X \equiv \{x_i\}$; внешних шумов $\{z_k\}$; внутренних помех $\{\alpha_\gamma\}$, которые составляют некое множество $K \subset [\{x_i\}, \{z_k\}, \{\alpha_\gamma\}]$ и начальные условия $K(0)$. Помехи и шумы могут быть относительно входных величин как аддитивными, так и мультипликативными. Множество K является составной частью более широкого множества N внешних параметров (рис.5). Внутренние параметры диагностируемой системы также, как и значения величин $\{v_j\}$, меняются в зависимости от входных сигналов $\{x_i\}$, шумов $\{z_k\}$ и помех $\{\alpha_\gamma\}$.

Множество внутренних параметров разбивается на ряд подмножеств:

1. Параметры процесса функционирования объекта образуют характеристики множества подпроцессов, составляющих основной процесс функционирования структурного блока (элемента), позволяющий выполнять ему свое функциональное назначение. Эти параметры образуют множество F такое, что $F \subset M$, $Y \cap F \neq \emptyset$.

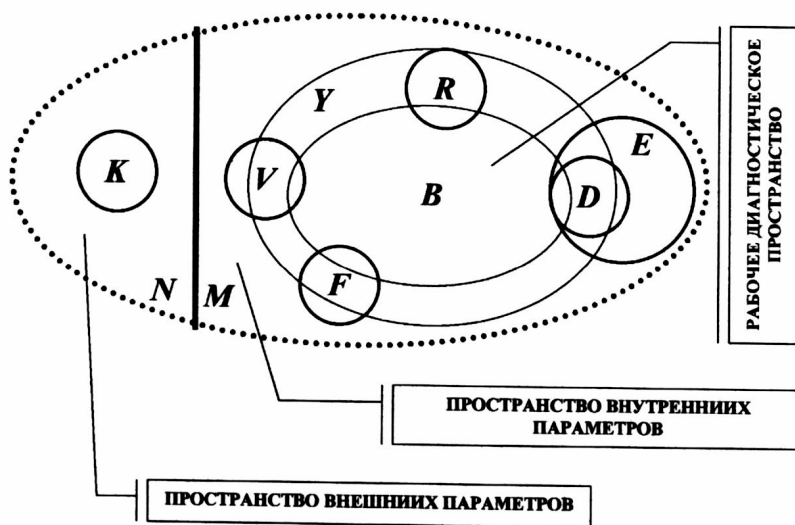


Рис. 5. Принцип разбиения множества характеристических параметров диагностируемого объекта

При этом полагается, что $R \cap F = \emptyset$, то есть не пересекаются, а также $Y \setminus R = Y^*$, $Y^* \cap F \neq \emptyset$, где Y^* – подмножество выходных величин объекта, не являющихся характеристиками.

2. Множество вспомогательных (сопутствующих) параметров V , в которое удобно включать остальные величины подпроцессов или характеристик вспомогательных процессов, не реализующих главный процесс и описывающих побочные явления – шумы, вибрации, нагревы, биения и другие сопутствующие факторы. Множество $V \subset M$, кроме того, $Y \cap V \neq \emptyset$, $R \cap V = \emptyset$.

3. Структурные параметры объекта объединены в подмножество $E \subset M$ и $Y \cap E \neq \emptyset$, $R \cap E = \emptyset$. Эта группа параметров связана со способом организации объекта, то есть сюда относятся физические, химические, электрические, геометрические свойства структурных блоков, характеристик динамических звеньев и другие сведения. Способ функционирования тесно связан со структурой организации объекта (элемента, сменного блока и т.д.), под которой понимается совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих структурных элементов, свойства и характер которых имеют существенное значение для работоспособности объекта (сменного блока). Структурная организация характеризуется рядом количественных параметров, которые и относятся к классу структурных. Отражение структурной организации объекта через посредство структурных параметров отображает его техническое состояние, выявление которого и является одной из задач технического диагностирования и которое изменяется под влиянием внешних условий, воздействий управления объектом, естественного износа и качества изготовления объекта (начальные условия состояния).

4. Дефектами $D \subset E$ называются подмножество несоответствий значений множества заранее заданных значений структурных параметров объекта. Если объект работает исправно, то $D = \emptyset$. Задача диагностирования согласно заключается в выявлении и оценке местонахождения элементов множества D . Часть из них может быть найдена путем непосредственных наблюдений или измерений. Однако большая часть дефектов определяется по их косвенным проявлениям в значениях элементов множеств R – характеристик процессов, F – параметров функционирования, V – вспомогательных и E – структурных параметров объекта.

5. Диагностическими параметрами называются элементы множеств R , F , V , E , содержащие информацию о неисправностях, над которыми установлены наблюдения и контроль. Существуют различия между множествами величин Y и диагностических параметров B . В отличие от параметров, образующих множество выходных величин, состав которого обычно не определен и не постоянен, на множество диагностических параметров накладываются дополнительные ограничения: эти параметры должны быть наиболее информативными и, кроме того, удобно измеряемыми или наблюдаемыми. Поэтому требования по составу элементов $b \in B$ связаны, прежде всего, с контролепригодностью объекта. Множество диагностических параметров, определенное на множестве вероятных состояний и дефектов, описывающих эти состояния, оптимизированное по какому-либо подходящему критерию (на-

пример, максимум информативности), образует (в выбранном формате) рабочее диагностическое пространство.

Таким образом, можно сформулировать задачу диагностирования сложного технического объекта как задачу обработки значений выходных параметров и их соответствия определенной оценке.

Обобщенная процедура анализа диагностической модели. Обобщенная структура выполнения анализа диагностической модели для получения диагностического обеспечения при проектировании технического объекта приведена на рис.6.

С целью обоснованного выбора совокупности диагностических показателей B , достаточной для решения задачи по оценке состояния технического объекта, необходимо упорядочить множество диагностических показателей, характеризующих его состояние, то есть выстроить в ряд по порядку, определяемому выбранными критериями.

Диагностическая модель объекта любого типа содержит в явном виде множество $B_{\Pi} (B_{\Pi} = \{b_{\Pi i}\}, i=1,2,\dots,N)$ – прямых показателей ($B_{\Pi} \subset B$), характеризующих состояние объекта. Они могут входить в диагностическую модель в виде аргументов или коэффициентов алгебраических и дифференциальных уравнений, операторов ветвей и других величин, непосредственно присутствующих в модели. В большинстве случаев в связи с технической сложностью или невозможностью, а также с учетом экономической целесообразности приходится из множества B_{Π} прямых показателей выбирать совокупность $B_{\Pi} (\bar{B}_{\Pi} = \{b_{\Pi i}\}, i=1,2,\dots,m)$ для их замеров и оценки в процессе диагностирования. Совокупность $\bar{B}_{\Pi}$ полностью упорядочивается введением отношения порядка P_1 в предположении, что $b_{\Pi i=p} > b_{\Pi i=q}$, если $u(b_{\Pi i=p}) > u(b_{\Pi i=q})$, где $u(b_{\Pi i})$ определяется на элементах B_{Π} , и вид его зависит от специфических особенностей объекта.

Если $\bar{B}_{\Pi} = B_{\Pi}$, то введенный порядок позволяет непосредственно разработать алгоритм и программу диагностирования. В этом случае программа предусматривает последовательность оценки показателей $b_{\Pi i}$ в порядке, определенном P_1 .

Если $\bar{B}_{\Pi} \subset B_{\Pi}$ и $\bar{B}_{\Pi} \neq B_{\Pi}$, то определяется разность $S = B_{\Pi} / \bar{B}_{\Pi}$ и выбирается подмножество $B_K (B_K = \{b_{Kj}\}, j=1,2,\dots,n)$ косвенных показателей. При этом мощность множества B_K должна быть такой, чтобы полностью компенсировать не-оцениваемые прямые показатели, то есть разность S . Подмножество косвенных показателей B_K полностью упорядочивается введением порядка P_2 в предположении, что $b_{Kj=p} > b_{Kj=q}$ если $v(b_{Kj=p}) > v(b_{Kj=q})$. В качестве критерия $v(b_{Kj})$, который определяется на элементах B_K , используется норма вектора чувствительности $v(b_{Kj}) = \|v(b_{Kj})\|$. Упорядоченное множество B_K косвенных показателей полностью определяет алгоритм и программу диагностирования.

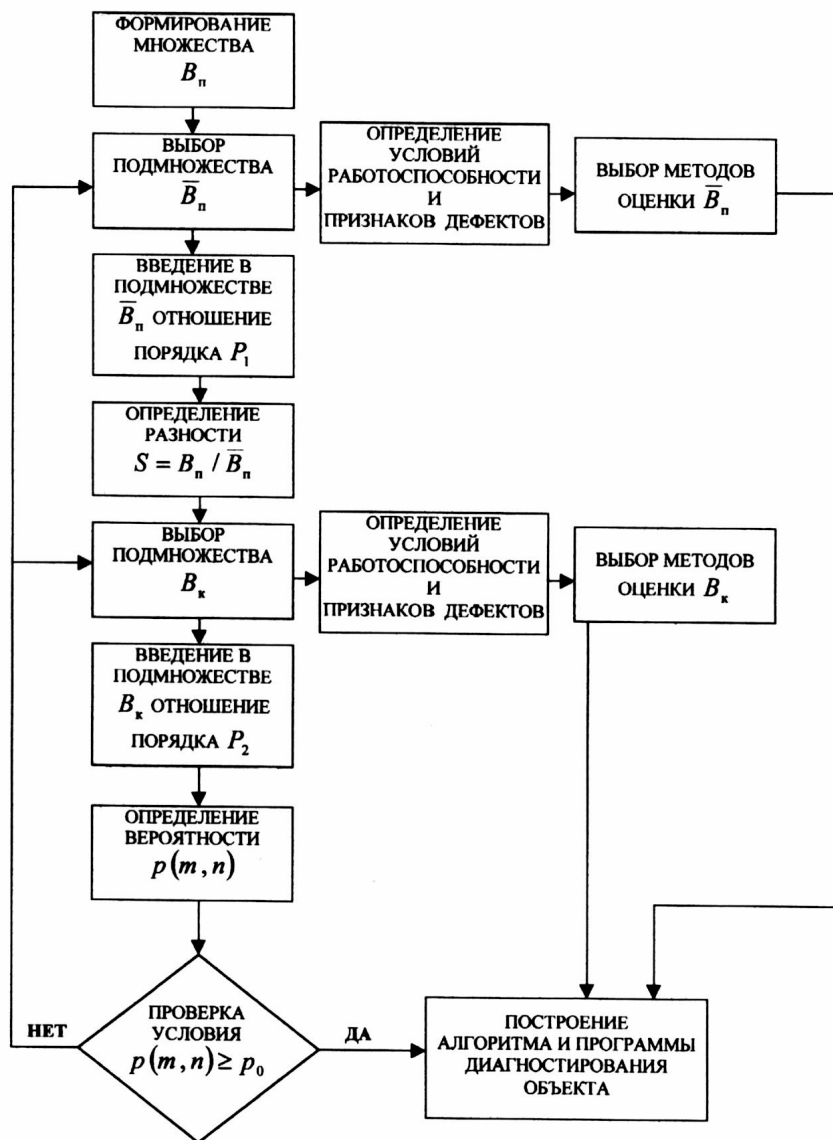


Рис. 6. Обобщенная структура выполнения анализа диагностической модели

С течением времени значения прямых показателей b_{pi} могут измениться, нарушая введенный порядок P_2 . Поэтому после его введения целесообразно установить пределы изменения показателей b_{pi} , в которых устанавливаемый порядок P_2 сохранится, для чего предусмотрена специальная методика, которая здесь не рассматривается.

Достаточность совокупностей прямых и косвенных показателей для оценки состояния объекта с заданной точностью определяется величиной вероятности

$$p(m, n) = \left[\sum_{i=1}^m u(b_{pi}) + \sum_{j=1}^n v(b_{kj}) \right] \left[\sum_{i=1}^M u(b_{pi}) + \sum_{j=1}^N v(b_{kj}) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где m и n – числа оцениваемых прямых и косвенных показателей соответственно. При необходимости обеспечить вероятность $p_0 = 1$ должны соблюдаться равенства $m = M$ и $n = N$, то есть оцениваться все прямые и косвенные показатели.

Если последнее условие не удовлетворяется, то необходимо пересматривать выбранную совокупность $\bar{B}_n$ и соответственно B_k , чтобы удовлетворить требованию правильной оценки состояния объекта по заданной вероятности p_0 .

После того как сформированы совокупности $\bar{B}_n$ и B_k , удовлетворяющие условию $p(m, n) \geq p_0$, необходимо определить условия работоспособности (УР) и признаки наличия дефектов (ПД) в объекте. Эти условия и признаки определяются как допустимые области изменения оцениваемых показателей $\bar{B}_n$ и B_k и, следовательно, представляют собой множества $\{УР_i\}$, $\{УР_j\}$, $\{ПД_i\}$, $\{ПД_j\}$ величин пределов допустимых изменений оцениваемых показателей. После чего данный этап разработки диагностического обеспечения заканчивается выбором методов оценки прямых и косвенных показателей, характеризующих состояние объекта. В завершение процедуры разработки диагностического обеспечения строятся алгоритмы и программы диагностирования объекта.

Алгоритмы и программы диагностирования. Алгоритмы диагностирования представляют собой последовательность действий по оценке выбранных прямых $\bar{B}_n$ и косвенных B_k диагностических показателей. Они позволяют определять последовательности: выполнения проверок отдельных конструктивных частей (блоков) объекта при поиске дефектов; диагностических показателей, характеризующих работоспособность всего объекта или его отдельного блока при обнаружении в нем дефектов; операций при обработке полученной информации. Принцип построения алгоритмов во многом зависит от вида диагностической модели. Они могут строиться на основе статистических данных, характеризующих надежность объекта и стоимость выполнения отдельных операций, или исходя из анализа структуры и особенностей функционирования объектов диагностирования.

Совокупность алгоритмов по определенному принципу объединяется в программу диагностирования. К основным принципам объединения алгоритмов отно-

сятся: последовательный, параллельный и смешанный. При этом при построении программы диагностирования по одному из указанных принципов ставится задача – определить минимальное число $N_{\min}$ ветвей программы исходя из следующих условий. Время ее выполнения не должно превышать допустимого, показатель готовности объекта не должен быть ниже требуемого.

Чаще всего построение программ диагностирования осуществляют двумя способами: на основе теории расписаний, либо комбинаторного подхода.

В первом случае программу диагностирования рассматривают как оценку множества показателей, характеризующих состояние объекта. Для каждого из них организуется определенная последовательность операций, которые характеризуются временем выполнения. Программа диагностирования представляется в виде расписания, определяющего эту последовательность. Во втором случае задачу построения программы диагностирования рассматривают как выполнение комплекса операций с помощью определенного ограниченного объема технических средств диагностирования. Каждое из них может выполнять соответствующий набор операций. Программа диагностирования представляется в виде маршрута, определяющего последовательность использования технических средств диагностирования.

Сложные технические объекты состоят из разнородных частей (структурных единиц, блоков), которые следует диагностировать через различные промежутки времени. В подобных случаях программа диагностирования должна учитывать различные периоды проверки структурных единиц. Программу составляют в два этапа. На первом группируют отдельные блоки по периодам их проверок, а на втором – определяют последовательность проверок. Если в качестве показателей, характеризующих безотказность отдельных частей технического объекта, использовать интенсивность отказов, а для характеристики их контролепригодности – длительность диагностирования, то можно построить программу для всего объекта, ориентируясь на обеспечение требуемой величины отсутствия в нем дефекта в заданный момент времени.

3. Контролепригодность сложных технических систем

Контролепригодность объектов диагностирования и методы ее оценки. Внедрение технических средств диагностирования дает нужный эффект только при условии удовлетворения требований контролепригодности объектов, которая определяется как *приспособляемость объекта к диагностированию*, обеспечивающая легкость его проверки. Эта задача должна быть решена уже на стадии проектирования, причем без существенного увеличения затрат. В зависимости от особенностей использования и эксплуатации объект диагностирования может характеризоваться различным *уровнем контролепригодности*, который определяется по значениям *показателей контролепригодности*. Номенклатуру и значения этих показателей контролепригодности для каждого проектируемого объекта диагностирования следует задавать с учетом технических требований на объект, его вида и назначения, информации об аналогах и возможности сравнения контролепригодности однотипных объектов диагностирования. Показатели контролепригодности диагностируемых объектов разделены на четыре группы: 1) показатели, характеризующие полноту

диагностирования; 2) показатели, характеризующие прямые затраты на диагностирование объекта; 3) вспомогательные показатели, характеризующие отдельные элементы организации процесса диагностирования; 4) показатели, характеризующие степень унификации объектов и технических средств диагностирования.

При оценке уровня контролепригодности сложного технического объекта, состоящего из m блоков (структурных единиц), каждый из которых оценивается по n показателям $K_i^{(0)}$, при условии, что для каждого показателя определено эталонное значение $K_i^{(3)}$, можно использовать комплексный показатель уровня контролепригодности объекта диагностирования, который определяется

$$K = \sum_{j=1}^m \alpha_j \left\{ \sum_{i=1}^n \beta_i \left[1 - \frac{K_i^{(3)} - K_i^{(0)}}{K_i^{(3)}} \right] \right\}_j, \quad (2)$$

где α_j – коэффициент веса j -го блока, β_i – коэффициент веса i -го показателя,

причем $\sum_{j=1}^m \alpha_j = 1$ и $\sum_{i=1}^n \beta_i = 1$.

Помимо уровня контролепригодности сложных технических объектов на стадии проектирования требуется определить категорию контролепригодности объекта диагностирования, под которой понимается качественная характеристика приспособляемости объекта к диагностированию соответствующими техническими средствами. Категория может задаваться как на весь объект, так и на его отдельные блоки, если они диагностируются самостоятельно локальными техническими средствами диагностики. Однако и в том, и другом случае требования по контролепригодности должны быть одинаково высокими. Для одного и того же объекта диагностирования категории контролепригодности на различных этапах его жизни (создания, эксплуатации или ремонта) различны, поскольку при этом задачи диагностирования и применяемые технические средства также различаются. Категорий контролепригодности объектов устанавливается в зависимости от сочетания групп конструкционного исполнения объектов диагностирования, определяющих приспособленность объекта к решению задач диагностирования. При оценке каждой категории используются вполне определенные показатели контролепригодности.

Условия диагностирования объектов. Технический объект может находиться в конечном множестве состояний S (см. рис. 1). При этом задачей диагностирования является определение, в каком состоянии S_i ($i = 1, 2, \dots, n$) из данного множества S находится объект диагностирования в момент его контроля (оценки, тестирования). Если при диагностировании можно установить все возможные состояния объекта, он удовлетворяет условию диагностирования.

В общем случае условие диагностирования по результатам исследований, математически можно определить из уравнения: $Y = B_n X$. Здесь Y и X – поливектора первого ранга, описывающие множества выходных и входных параметров объекта

диагностирования, а B_{Π} – поливектор второго ранга, описывающий множество прямых диагностических параметров. Компоненты тензора $B_{\Pi} = \{b_{ij}\}$ зависят от конструкционных параметров и характеристик элементов, из которых состоит объект: $b_{ij} = \varphi_{ij}(k_1, k_2, \dots, k_{s-1}, k_s)$, $\forall i, j = 1, 2, \dots, n$, где $k_1, \dots, k_s$ – конструкционные параметры и характеристики элементов объекта диагностирования; s – общее число конструкционных элементов технического объекта. Математическим условием диагностирования объекта по входам $X = \{x_i\}$ и выходам $Y = \{y_i\}$ является линейная независимость l уравнений связи:
$$\sum_{i,j}^n c_{kij} b_{ij} = c_{kij} b^{ij} = 0, \quad \forall k = 1, 2, \dots, l;$$

$i, j = 1, 2, \dots, n$ или неравенства нулю определителя $\det C \neq 0$, где $C = \{c_{kij}\}$ – поливектор третьего ранга постоянных характеристик системы, полученных из анализа системы уравнений $b_{ij} = \varphi_{ij}(k_1, k_2, \dots, k_{s-1}, k_s)$ и не зависящих от изменения состояния объекта диагностирования и внешних переменных. Следует заметить, что выражение $c_{kij} b^{ij} = 0$ является необходимым условием, а зависимость $\det C \neq 0$ – необходимым и достаточным условием.

Приведенные условия диагностирования справедливы, если объект обладает следующими свойствами:

1) состояние объекта диагностирования характеризуется совокупностью оцениваемых прямых показателей $B_{\Pi} = \{b_{ij}\}$, ($\forall i, j = 1, 2, \dots, n$);

2) анализ структуры объекта диагностирования позволяет составить $l = (n-1)n$ уравнений связи вида $c_{kij} b^{ij} = 0$, ($\forall k = 1, 2, \dots, l; i, j = 1, 2, \dots, n$);

3) входы $X = \{x_i\}$ и выходы $Y = \{y_i\}$, ($\forall i, j = 1, 2, \dots, n$) объекта диагностирования – контролируемые.

Если технический объект отвечает условию диагностирования, то необходимо провести синтез объекта диагностирования на предмет количества точек и глубины диагностирования. Это обеспечивается при конструировании объекта путем целенаправленного размещения структурных элементов диагностирования объекта в конструкционные единицы.

Обеспечение контролепригодности размещением компонентов объекта в конструкционные единицы. Одной из проблем синтеза контролепригодных технических объектов является проблема оптимального размещения компонентов объекта в конструктивные единицы (блоки), с точностью до которых осуществляется диагностирование.

Конструкционные единицы. Под конструкционными единицами понимается такое объединение элементов, которое дает распознавание дефектов любой кратности с точностью до образованных блоков. Причем следует заметить, что структурные элементы, составляющие одну конструкционную единицу, могут располагаться

в любом месте объекта, то есть их объединение в блок только логическое. Оптимальное размещение структурных элементов в конструктивных единицах обеспечивается возможностью применения минимального множества точек контроля. При этом возможную *кратность дефекта* в объекте следует считать произвольной.

В рассмотрение вводится упорядоченный граф $G(V, U)$ с n вершинами, представляющий логическую модель объекта диагностирования. Предполагается, что существует некоторое разбиение множества V вершин на непересекающиеся подмножества V_i :

$$V = \bigcup_{i=1}^k V_i \quad (V_i \cap V_j = \emptyset, \forall i \neq j). \quad (3)$$

Такое разбиение соответствует разбиению графа G на подграфы $G_1, \dots, G_k$ с множеством вершин $V_1, \dots, V_k$. Подграфы $G_1, \dots, G_k$ называются *конструктивными единицами*. Для определения разбиения объекта на конструктивные единицы необходимо определить способ разбиения множества V на подмножества V_i ($i=1, 2, \dots, k$).

Кратные дефекты. Для синтеза контролепригодных объектов непрерывного действия наиболее удобной является логическая модель. Эта модель в основном используется для объектов, которые имеют четко выраженные функциональные блоки. Для объектов другой структуры может использоваться в качестве модели граф причинно-следственных связей.

Пусть $G(V, U)$ –упорядоченный граф с n вершинами, представляющий модель объекта диагностирования непрерывного действия, где V и U –множества вершин и дуг. Вершинами графа являются блоки логической модели, а дугами – связи между блоками. При этом $X = \{x_1, \dots, x_q\}$ ($q \leq n$) –множество входов графа $G(V, U)$, а $Y = \{y_1, \dots, y_v\}$ ($v \geq 1$) –множество выходов.

Определение 1. Вершины x и m образуют контрольную пару (x, m) , если в соответствующей системе сигнал, подаваемый на вход элемента x , может быть снят на выходе элемента m . При этом вершина m называется контрольной точкой.

Определение 2. Вектором проверки контрольной пары (x, m) называется n -мерный вектор $b(x, m) = (b_1, \dots, b_n)$, компонента b_k которого равна 1, если существует хотя бы один путь от x к m , содержащий вершину i , и в противном случае $b_k = 0$.

При работе с графами удобно использовать их математическое описание – *матрицы*. В данной работе применяются матрицы достижимости, проверок и матрица ϵ нарушающих Φ -множеств.

Пусть для графа $G(V, U)$ на n вершинах задано некоторое исходное множество Y контрольных точек и построены все возможные контрольные пары (x, m) .

Определение 3. Матрицей проверок $B_Y = \|b_{ij}\|$ ($\forall i=1, \dots, z; \forall j=1, \dots, n$) на множестве Y контрольных точек назовем матрицу, в которой $b_{ij}=1$, если вершина j входит в проверку i -й контрольной пары, $b_{ij}=0$ – в противном случае.

Наиболее простой способ построения матрицы проверок основан на использовании матрицы достижимости $D = \|d_{ij}\|$ ($\forall i=1, \dots, n; \forall j=1, \dots, n$) графа $G(V, U)$. Для того, чтобы получить вектор–строку матрицы проверок, соответствующую проверке $b(i, j)$ ($i < j$), необходимо в матрице достижимости взять строку под номером i и столбец под номером j , а затем совершить их логическое покомпонентное перемножение. Так строятся все вектор–строки матрицы проверок B_Y .

Известно, что в объекте диагностирования возможны как *одиночные*, так и *кратные дефекты*.

Пусть для упорядоченного графа $G(V, U)$ с n вершинами задан некоторый набор контрольных пар: $(x_k, x_l), \dots, (x_r, x_s), (x_f, x_t), \dots, (x_m, x_d)$.

Определение 4. Два одиночных дефекта $\{\mu_1\}$, $\{\mu_2\}$ называются эквивалентными на заданном множестве точек контроля R , если $b_{\mu 1} = b_{\mu 2}$, где $b_{\mu i}$ –столбец матрицы проверок B_R ($\forall i=1, \dots, n$).

Все одиночные дефекты можно разделить на классы эквивалентности одиночных дефектов. *Класс эквивалентных одиночных дефектов* является k -элементным, когда матрица проверок B_R содержит k одинаковых столбцов, причем номера этих столбцов соответствуют элементам этого класса. Очевидно, что для различимости дефектов необходимо, чтобы все столбцы в матрице проверок были различны. Таким образом, если дефекты $\{\mu_1\}$ и $\{\mu_2\}$ эквивалентны, то в матрице проверок B_R существует соотношение вида

$$b_{\mu 1} = b_{\mu 2}. \quad (4)$$

Для нарушения этого соотношения достаточно добавить к множеству R дополнительную контрольную точку t такую, чтобы в векторе проверки $b(x, t)$

$$b_{\mu 1} \neq b_{\mu 2}. \quad (5)$$

Утверждение 1. Если $\mu_1 < \mu_2$, то для выполнения условия (5) необходимо, чтобы дополнительная точка контроля удовлетворяла одному из следующих условий: 1) $t = \mu_1$; 2) $t = \mu_2$, если все пути от некоторого входа x до вершины μ_2 не содержат вершины μ_1 ; 3) $t > \mu_1$, если среди путей, соединяющих некоторый вход x с вершиной t , нет ни одного, содержащего вершину μ_2 , но существует хотя бы

один, содержащий вершину μ_1 ; 4) $m > \mu_2$, если среди путей, соединяющих некоторый вход x с вершиной m , нет ни одного, содержащего вершину μ_1 , но существует хотя бы один, содержащий вершину μ_2 .

Множество вершин Φ графа $G(V, U)$ называется *нарушающим* соотношением (4), если все вершины множества Φ удовлетворяют одному из условий утверждения 1. При этом нарушающее Φ -множество определяется в виде вектора γ , получаемого путем сложения по mod двух строк под номерами μ_1 и μ_2 матрицы достижимости D графа $G(V, U)$. Ненулевые компоненты вектора γ указывают на номера точек контроля, которые разбивают соотношение (4). В результате будет получена система $\{\phi_i\}$ ($\forall i = 1, \dots, N$) нарушающих множеств, которая представляет собой максимальную совокупность точек контроля и позволяет определить любой одиночный дефект.

Определение 5. Если в матрице проверок B_R , построенной на заданном множестве точек контроля R , проверки $b(x_k, x_l), \dots, b(x_r, x_s)$ имеют нулевые результаты, а проверки $b(x_f, x_t), \dots, b(x_m, x_d)$ – единичные, то вектор вида

$$\sigma = b(x_k, x_l) \wedge \dots \wedge b(x_r, x_s) \wedge b(x_f, x_t) \wedge \dots \wedge b(x_m, x_d) \quad (6)$$

называется вектором поиска одиночного дефекта.

Следовательно, если взять логическое произведение всех строк матрицы B_R , имеющих результат 0, и отрицание всех строк, имеющих результат 1, то единственный ненулевой компонент вектора σ укажет неисправный блок. Если в объекте диагностирования в некоторый момент времени одновременно отказало некоторое множество блоков, то совокупность номеров $\{\eta_1, \dots, \eta_k\}$, соответствующих вершинам графа $G(V, U)$, представляющего модель объекта диагностирования, называется *дефектом кратности k* ($1 \leq k \leq n$).

Определение 6. Два дефекта $\{\eta_1, \dots, \eta_k\}$ и $\{\mu_1, \dots, \mu_r\}$ эквивалентны на заданном множестве точек контроля R только тогда, когда из не покрывающих друг друга столбцов матрицы B_R можно построить две линейные комбинации, удовлетворяющие следующим условиям:

$$b_{\eta_1} \vee b_{\eta_2} \vee \dots \vee b_{\eta_k} = b_{\mu_1} \vee b_{\mu_2} \vee \dots \vee b_{\mu_r}, \quad (7)$$

где b_i – столбец с номером i в матрице B_R .

Все кратные дефекты можно разделить на классы эквивалентности кратных дефектов. *Класс эквивалентных кратных дефектов* является k -элементным, если из столбцов матрицы проверок B_R можно построить k линейных комбинаций, удовлетворяющих условию (7).

Точка контроля m нарушает соотношение вида (7), если существует проверка

$b(x, m)$, добавление которой к матрице B_R приводит ее к виду, не позволяющему построить соотношение (4) из столбцов $b_{\eta 1}, b_{\eta 2}, \dots, b_{\eta k}, b_{\mu 1}, b_{\mu 2}, \dots, b_{\mu r}$.

Утверждение 2. Соотношение (7) будет нарушено тогда и только тогда, когда к исходному множеству Y точек контроля будет добавлена хотя бы одна такая, что вектор проверки новой контрольной пары $b(x, m) = \{b_1, \dots, b_f\}$ удовлетворяет соотношению

$$\bigvee_{j=1}^k b_{\eta j} \neq \bigvee_{i=1}^r b_{\mu i}. \quad (8)$$

Утверждение 3. Для выполнения соотношения (8) необходимо и достаточно, чтобы дополнительная точка контроля m удовлетворяла одному из следующих условий: 1) все пути от некоторого входа x до вершины m , содержащие хотя бы одну из вершин множества $\{\eta_1, \dots, \eta_k\}$, не содержат ни одной вершины множества $\{\mu_1, \dots, \mu_r\}$; 2) все пути от некоторого входа x до вершины m , содержащие хотя бы одну из вершин множества $\{\mu_1, \dots, \mu_r\}$, не содержат ни одной вершины множества $\{\eta_1, \dots, \eta_k\}$.

Множество вершин Φ графа $G(V, U)$ называется *нарушающим* соотношению (7), если все вершины множества Φ , и только они удовлетворяют условиям 1 и 2.

Для каждого соотношения вида (7) можно построить нарушающее множество Φ . В результате будет получена система $\{\Phi_i\}$ ($\forall i = 1, \dots, K$) нарушающих множеств, которая представляет собой максимальную совокупность *дополнительных точек контроля*.

Множество $T = \{t_j\}$ называется *покрытием системы множеств $\{\Phi_i\}$* (где Φ_i — нарушающее множество для эквивалентных дефектов любой кратности), если для любого Φ_i существует t_j такое, что $t_j \in \Phi_i$.

В качестве *дополнительного* множества M точек контроля, которое в совокупности с исходным Y позволяет осуществить поиск любого дефекта произвольной кратности, необходимо и достаточно взять любое покрытие системы нарушающих множеств $\{\Phi_i\}$.

Покрытие системы множеств $\{\Phi_i\}$, содержащее минимальное число элементов, называется *минимальным*. Определение минимального покрытия системы множеств $\{\Phi_i\}$ удобно свести к определению минимального покрытия некоторой матрицы ε из нулей и единиц. Матрица ε определяется следующим образом: $\varepsilon = \|\varepsilon_{ij}\|$ ($\forall i = 1, \dots, K; \forall j = 1, \dots, n$), где $\varepsilon_{ij} = 1$, если $j \in \Phi_i$, и $\varepsilon_{ij} = 0$ в противном случае.

Во многих случаях минимальное дополнительное множество точек контроля определяется неоднозначно. Может быть получено несколько таких множеств, причем все они будут содержать одинаковое число элементов. В общем случае выбор минимального дополнительного множества точек контроля осуществляться в соответствии с условием задачи.

Три задачи обеспечения контролепригодности: *Задача 1.* Размещение ограниченного количества компонентов объекта в конструкционных единицах с учетом обнаружения кратных дефектов. *Задача 2.* Размещение компонентов объекта в конструкционных единицах при жестком закреплении за ними отдельных компонентов и с учетом обнаружения дефектов любой кратности. *Задача 3.* Размещение компонентов объекта в конструкционных единицах по минимуму стоимости точек контроля и с учетом обнаружения дефектов любой кратности. Решение названных задач реализует метод формирования свойств контролепригодности объекта диагностирования.

Задача 1. Разместить компоненты объекта в конструкционных единицах ограниченного объема с учетом поиска кратных дефектов. Решение осуществляется следующим образом. С помощью матрицы проверок B_Y , построенной на множестве Y выходных вершин графа $G(V, U)$, выделяются все классы эквивалентности одиночных дефектов $D_1, D_2, \dots, D_L$.

Каждый класс эквивалентности $D_1, D_2, \dots, D_L$ определит свой конструкционный блок $B_1, B_2, \dots, B_L$. Если все блоки удовлетворяют ограничению на количество элементов, то далее рассматриваются эквивалентные дефекты кратности не более 2. Если существуют блоки большего объема, то необходимо разбить их на более мелкие с помощью введения дополнительных точек контроля. Для этого каждый класс эквивалентности, определяющий не удовлетворяющий конструктора блок, разбивается на двухэлементные множества путем построения всех возможных сочетаний по два из элементов этого класса. Для каждого из двухэлементных множеств определяется нарушающее ϕ -множество. Полученные ϕ -множества составят матрицу ϵ , где строки соответствуют полученным двухэлементным множествам, а столбцы образованным блокам.

По матрице ϵ последовательно определяется необходимое количество точек контроля для получения блоков нужного объема.

Для поиска эквивалентных дефектов кратности не более 2 строят матрицу проверок B_{Y^*} на множестве точек контроля $|Y^*| = |Y| + |M|$, где Y – множество выходных вершин; M – множество дополнительных точек контроля, разбивающих эквивалентные одиночные дефекты. В матрице B_{Y^*} оставляют по одному элементу из каждой конструкционной единицы (блока), а столбцы, соответствующие остальным элементам, вычеркивают из матрицы.

По матрице проверок B_{Y^*} строят линейные комбинации, определяющие эквивалентные дефекты кратности не более 2.

Далее вершины графа $G(V, U)$ необходимо разместить в подграфы $G_1(V_1, U_1), \dots, G_k(V_k, U_k)$ следующим образом: все вершины, составляющие линейную комбинацию L_i , должны размещаться в одном подграфе.

Полученные подграфы $G_1(V_1, U_1), \dots, G_k(V_k, U_k)$ (блоки) должны удовлетворять ограничению задачи на количество компонентов объекта в конструкционной единице, то есть в подграфе (блоке) может быть размещено ограниченное количество вершин.

Если все полученные подграфы удовлетворяют условию ограничения, то следует перейти к определению эквивалентных дефектов кратности не более 3. Если существует подграф $G_i(V_i, U_i)$, не удовлетворяющий условию ограничения, то с помощью введения дополнительных точек контроля необходимо разбить множество вершин, составляющих $G_i(V_i, U_i)$, на более мелкие.

С помощью матрицы ε , состоящей из нарушающих φ -множеств классов эквивалентности одиночных дефектов и линейных комбинаций подграфа $G_i(V_i, U_i)$, находятся дополнительные точки контроля. Для этого в матрице ε из полученных столбцов нужно выбрать столбец, содержащий максимальное количество единиц, например b_r , тогда r – точка контроля. Столбец, определяющий точку контроля r , вычеркивается из матрицы ε , а также вычеркиваются все строки матрицы, имеющие единицы в столбце r .

Теперь имеется новое множество точек контроля $|Y^{**}| = |Y^*| + r$, на котором строим матрицу проверок $B_{Y^{**}}$. По этой матрице вновь находим линейные комбинации, определяющие эквивалентные дефекты кратности не более 2. Вершины графа $G(V, U)$ распределяются по подграфам $G_1(V_1, U_1), \dots, G_p(V_p, U_p)$ (блокам), используя следующее правило.

Все вершины, составляющие линейную комбинацию L_i должны размещаться в одном подграфе. Причем, если одна и та же вершина принадлежит нескольким линейным комбинациям, то все вершины, составляющие эти линейные комбинации, должны находиться в одном подграфе.

Если полученные подграфы $G_1(V_1, U_1), \dots, G_p(V_p, U_p)$ удовлетворяют условиям ограничения, то рассматривают дефекты следующей кратности. Если условие не выполнено, то из столбцов, определяющих максимальное дополнительное множество точек контроля, выбирают содержащие наибольшее количество единиц. Затем строится матрица проверок на новом множестве точек контроля.

Далее поэтапно рассматриваются эквивалентные дефекты кратности не более 3, 4, ..., n . При этом на каждом этапе происходит распределение элементов по блокам согласно вышеизложенной процедуре. Если при этом образовались блоки большей размерности, чем требуется, то необходимо ввести дополнительные точки контроля для разбиения блоков на более мелкие.

Результатом этой задачи является распределение вершин графа $G(V, U)$ (компонентов объекта) в подграфы $G_1(V_1, U_1), \dots, G_t(V_t, U_t)$, (конструкционные единицы) так, что становится возможным определить дефект любой кратности с точностью до конструкционной единицы.

Задача 2. Разместить компоненты объекта в конструкционные единицы при жестком закреплении за ними отдельных компонентов и с учетом обнаружения дефектов любой кратности.

Пусть $G(V, U)$ – упорядоченный граф, представляющий модель объекта диагностирования. Задача состоит в нахождении такого допустимого разбиения графа $G(V, U)$ на подграфы, которое требует жесткого закрепления за подграфами $G_1(V_1, U_1), \dots, G_k(V_k, U_k)$ отдельных компонентов объекта (вершин графа) с учетом обнаружения дефектов любой кратности.

Как и в предыдущей задаче, последовательно определяются классы эквивалентности кратности $1, 2, \dots, n$, объединяя при этом элементы одного класса в конструкционные блоки. Если на каком-либо этапе образовались блоки, в которых находятся множества несовместимых вершин, то их необходимо разбить на более мелкие с помощью ввода дополнительных точек контроля.

В результате получается некоторое множество M дополнительных точек контроля, которое, в совокупности с исходным, даст разбиение графа $G(V, U)$ на подграфы $G_1(V_1, U_1), \dots, G_w(V_w, U_w)$, не содержащие множеств несовместимых вершин.

Задача 3. Разместить компоненты объекта в конструкционные единицы по минимуму стоимости точек контроля с учетом обнаружения дефектов любой кратности.

Задача состоит в нахождении такого допустимого разбиения упорядоченного графа $G(V, U)$ на подграфы $G_1(V_1, U_1), \dots, G_k(V_k, U_k)$, когда при минимальной стоимости реализации точек контроля каждая конструкционная единица содержит ограниченное количество компонентов объекта.

Пусть множество Y (множество выходных вершин) – начальное множество точек контроля. Каждая вершина из множества $L (|L| = |V| - |Y|)$ может являться дополнительной точкой контроля. Поставим в соответствие каждой вершине графа из множества L стоимость ее реализации как точки контроля – $c_i (i = 1, k)$.

Для решения этой задачи может быть использован алгоритм, приведенный в задаче 1. Разбиение графа $G(V, U)$ (объекта) на подграфы $G_1(V_1, U_1), \dots, G_k(V_k, U_k)$ (блоки) осуществляется аналогичным образом, как в задаче 1, отличие состоит в выборе дополнительных точек контроля.

Если на каком-либо этапе разбиения вершин по подграфам был получен подграф $G_i(V_i, U_i)$, не удовлетворяющий ограничению на объем, то дополнительная точка контроля, разбивающая этот подграф, будет найдена по следующему правилу. Для каждого двухэлементного множества или каждой линейной комбинации, со-

державшей вершины подграфа $G_i(V_i, U_i)$, строится нарушающее φ -множество. Полученную систему множеств φ_i ($i = 1, g$) представляют в виде матрицы ϵ . Каждому столбцу матрицы ϵ ставится в соответствие величина $p_i = t_i / c_i$, где c_i – стоимость реализации точки контроля, t_i – количество единиц в столбце.

В качестве дополнительной точки контроля r берется та точка, у которой $p_r = \max p_i$. Если одной точки недостаточно для получения блока нужного объема, то по этому же правилу последовательно находятся все необходимые дополнительные точки контроля.

В результате решения полученные подграфы (конструкционные блоки) должны удовлетворять условию ограничения на количество вершин (элементов); при этом стоимость реализации точек контроля будет минимальной.

Поиск дефектов любой кратности с точностью до конструкционной единицы осуществляется с помощью матрицы проверок B_p на множестве точек контроля $P(|P| = |Y| + |M|)$, где строкам соответствуют элементарные проверки, а столбцам – найденные конструкционные единицы. Для поиска дефектов к матрице проверок, построенной на конечном множестве точек контроля (исходное плюс дополнительное множество точек контроля), добавляется еще один столбец. Подавая сигнал поочередно на каждый из входов или на все входы одновременно (в зависимости от модели) и снимая результат с каждой из выходных точек, заполним последний столбец нулями и единицами, где единица соответствует допустимому, а ноль – недопустимому сигналу.

Предположим, что получили дополнительный вектор-столбец в матрице проверок B_p . Вычеркнем из матрицы строки, содержащие 1 в дополнительном столбце и все столбцы, имеющие в этих строках ненулевые элементы. В результате номера столбцов, оставшихся в матрице B_p , будут указывать на предположительно неисправные конструкционные блоки. Из оставшихся строк выбирается та, которая содержит одну единицу. Найденная ненулевая компонента и определит неисправный блок. Далее необходимо заменить неисправные элементы системы и повторить процедуру проверки. Если еще существуют неисправные блоки, то они будут выявлены аналогичным образом.

4. Многокритериальная оптимизация глубины диагностирования сложных технических систем при кратных дефектах

Решение проблем контролепригодности вновь создаваемого объекта должно вестись одновременно с разработкой средств его диагностирования. Проектирование контролепригодных объектов состоит во включении в проект таких схемных решений, которые давали бы возможность легко диагностировать объект, находить дефекты, настраивать и налаживать его. Один из эффективных методов обеспечения контролепригодности заключается в определении множества диагностических параметров, позволяющих сократить затраты времени на обслуживание и восстановление объекта. Существует ряд показателей, характеризующих конструкцион-

ную приспособленность объекта к поиску дефектов, которые вводятся для количественной оценки контролепригодности.

Коэффициент глубины поиска дефекта. В качестве количественного показателя контролепригодности используем коэффициент глубины поиска дефекта.

Коэффициент глубины поиска дефекта любой кратности от 1 до n определяется из выражения

$$K_{г.п}(Z) = F_n(Z) / S_n, \quad (9)$$

где $F_n(Z)$ – число однозначно выявляемых дефектов кратности от 1 до n на множестве Z точек контроля, S_n – общее число возможных дефектов кратности от 1 до n .

Известно решение задач увеличения коэффициента глубины поиска дефекта при различных ограничениях, но при условии, что в объекте возможны только одиночные дефекты.

Однокритериальная оптимизация контролепригодности объекта диагностирования. В данном подразделе приводятся постановки четырех задач однокритериальной оптимизации контролепригодности объекта диагностирования и алгоритмы их решения на основе метода ветвей и границ с учетом, что в объекте возможны дефекты любой кратности. В *задаче 1* рассмотрена максимизация коэффициента глубины поиска кратного дефекта на заданном числе точек контроля. В *задаче 2* – максимизация коэффициента глубины поиска кратного дефекта при ограничении на стоимость реализации точек контроля. В *задаче 3* – минимизация затрат на заданном значении коэффициента глубины поиска кратного дефекта. В *задаче 4* – минимизация числа точек контроля на заданном значении глубины поиска кратного дефекта.

Задача 1. Требуется максимизировать коэффициент глубины поиска кратного дефекта на заданном числе точек контроля.

Пусть объект диагностирования задан в виде упорядоченного графа $G(V, U)$ с n вершинами, где V и U – множества вершин и дуг соответственно. Известно множество Y точек контроля, обусловленных назначением и конструкционным исполнением объекта диагностирования. При этом Y – множество выходных вершин ($|Y| = \nu$). Также задано число m дополнительно организуемых точек контроля. Требуется дополнить множество Y точек контроля множеством M ($|M| = m$) так, чтобы на множестве $Y \cup M$ достигалось максимальное значение коэффициента глубины поиска дефекта кратности от 1 до n .

Коэффициент глубины поиска дефекта кратности от 1 до n определяется из выражения (9). В этом выражении S_n – число возможных дефектов кратности от 1 до n , которое определяется зависимостью $S_n = \sum_{k=1}^n C_n^k - 1$, где n – число возможных одиночных дефектов в объекте (число элементов); C_n^k – число сочетаний из n элементов по k .

Ранее кратные дефекты определялись линейными комбинациями, состоящими

из не покрывающих друг друга столбцов. В данном разделе это условие неправомерно, так как в знаменателе формулы (9) учитываются все возможные комбинации из n элементов, поэтому числитель должен содержать все однозначно распознаваемые дефекты, определяемые как не покрывающими, так и покрывающими друг друга столбцами.

Определение 7. Дефект называется однозначно распознаваемым, если на множестве точек контроля Z его можно локализовать по матрице B_Z за конечное число шагов.

Для определения однозначно распознаваемых дефектов на множестве Z точек контроля предлагается следующий алгоритм. 1) Строится матрица проверок B_Z . 2) В матрице выбираются столбцы, определяющие данный дефект. 3) Из матрицы B_Z вычеркиваются строки, которые не имеют единиц в выбранных столбцах, а затем вычеркиваются столбцы, имеющие единицы в этих строках. 4) Среди всех оставшихся строк отыскивается та, которая имеет одну единицу. Найденную строку и столбец, содержащий единицу в этой строке, вычеркивают из матрицы проверок. Далее в матрице опять определяют строку, которая содержит всего одну единицу, и если такая существует, то повторяется вышеизложенный процесс вычеркивания. 5) При вычеркивании строк возможны 2 варианта: а) все строки вычеркнуты из матрицы B_Z , тогда исследуемый дефект называется *однозначно распознаваемым*; б) на каком-либо шаге не найдена строка, содержащая всего одну единицу, тогда исследуемый дефект не является однозначно распознаваемым.

Для решения поставленной задачи определим множество $P(|P| = n - v)$, каждый элемент которого может претендовать на дополнительную точку контроля. Из этого множества нужно выделить множество M , чтобы выполнялось условие:

$$K_{\Gamma\P}(Y \cup M) = \max_{M_j \subset P} K_{\Gamma\P}(Y \cup M_j), \quad (10)$$

где M_j – j -е дополнительное множество точек контроля, M – дополнительное множество точек контроля, при котором количество различных дефектов любой кратности оказывается наибольшим.

Полученная задача является задачей *дискретной оптимизации*, которую можно решить с помощью *метода ветвей и границ*. Этот метод позволяет сохранить число рассматриваемых решений путем исключения подмножеств вариантов, заведомо не дающих оптимума. Дальнейший перебор ведется среди остающихся вариантов, множество которых называется *перспективными*.

При решении поставленных задач в данном разделе в конце каждого шага будет оставаться только одно множество, которое может претендовать на дальнейшее рассмотрение. Это множество и будет перспективным.

Ветвление производится следующим образом:

1-й шаг. Имеется множество $P(|P| = n - v)$. Строится конечное число M_{j1} ($j = 1, n - v$) множеств, где каждое множество состоит из одного элемента множеств

ва P , и все множества M_{j1} различны. За оценку на данном шаге принимаем выражение

$$K_{г.п}(Y \cup M_1) = \max_{M_{j1} \subset P} K_{г.п}(Y \cup M_{j1}), \quad (11)$$

где M_1 – дополнительное множество точек контроля, при котором $K_{г.п}$ максимально ($\max K_{г.п}$).

m-й шаг. Имеем перспективное множество M_{m-1} ($|M_{m-1}| = m-1$), полученное на предыдущем ($m-1$) шаге. Строим конечное число множеств M_{jm} ($|M_{jm}| = m$). Каждое из них будет получено путем включения какой-либо одной точки из множества P в множество M_{m-1} . За оценку на m -м шаге принимается выражение

$$K_{г.п}(Y \cup M_m) = \max_{M_{jm} \subset P} K_{г.п}(Y \cup M_{jm}), \quad (12)$$

где M_m ($|M_m| = m$) – дополнительное множество точек контроля, при котором $\max K_{г.п}$. Таким образом, множество M_m – искомое множество M .

Задача 2. Требуется максимизировать коэффициент глубины поиска кратного дефекта при ограничении на стоимость реализации точек контроля. По аналогии с предыдущей задачей из множества V вершин графа $G(V, U)$ выделяется подмножество $P \subset V$ ($|P| = n-v$), при этом любая точка $p \in P$, добавленная к множеству Y , порождает неравенство $K_{г.п i}(Y \cup \{p\}) \geq K_{г.п i}(Y)$.

Поставим в соответствие точке контроля $p \in P$ стоимость $c(p)$ ее реализации. Требуется дополнить множество Y точек контроля множеством $M \subset P$ так, чтобы на множестве $Y \cup M$ достигалось максимальное значение коэффициента глубины поиска дефекта любой кратности, то есть

$$K_{г.п}(Y \cup M) = \max_{M_j \subset P} K_{г.п}(Y \cup M_j) \quad (13)$$

при

$$C(M_j) \leq C^*, \quad (14)$$

где $C(M_j)$ – значение стоимости реализации множества M_j точек контроля; C^* – допустимое значение стоимости реализации точек контроля.

В результате получена задача оптимизации, которая может быть решена методом ветвей и границ. Решение будет состоять из последовательного выполнения ряда шагов. Причем на каждом из шагов оценка будет состоять из двух этапов. На

первом этапе вычислим стоимость точек контроля каждого множества $C(M_j)$. Из множеств M_j выбираются те, у которых выполняется условие (14). Если такие множества существуют, то следует переход ко второму этапу, где находится оптимальное множество M . Оценкой на этом этапе служит выражение (13).

Таким образом, за ряд шагов будет получено множество M , которое и будет искомым множеством, при котором $K_{г.п}$ максимален и выполняется условие ограничения на стоимость.

Задача 3. Требуется минимизировать затраты на заданном значении коэффициента глубины поиска кратного дефекта.

Известно множество Y точек контроля, обусловленное назначением и конструктивным исполнением объекта. Требуется дополнить множество Y множеством M , для того, чтобы при минимальных затратах выполнялось условие $K_{г.п}(Y \cup M) \geq \xi$.

По аналогии с предыдущими задачами определяется множество $P(|P| = n - v)$. Каждой точке p_i , принадлежащей множеству P , поставлена в соответствие стоимость ее реализации $c(p_i)$. Из множества P требуется выделить подмножество $M(|M| = m)$ точек контроля, стоимость реализации которых

$$C_{\text{реал}}(M) = \min_{M_j \subset P} C(M_j) \quad (15)$$

при условии, что

$$K_{г.п}(Y \cup M_j) \geq \xi, \quad (16)$$

а величина $\xi = \text{const}$. Здесь M_j – множества, которые могут претендовать на искомое множество дополнительных точек контроля.

Задача решается с помощью метода ветвей и границ. Так как на перспективное множество накладываются условия (15) и (16), то оценку построенных множеств каждого шага необходимо производить в два этапа. На первом этапе определяют коэффициент глубины поиска дефекта каждого из множеств M_j , и выбираются те множества, где условие (16) правомерно. На втором этапе оценкой будет являться выражение (15). Таким образом, необходимо выбрать такое множество M , стоимость реализации которого минимальна и при этом $K_{г.п}(Y \cup M) \geq \xi$.

Задача 4. Требуется минимизировать число точек контроля на заданном значении глубины поиска кратного дефекта.

По-прежнему полагаем, что модель исследуемой системы представлена упорядоченным графом $G(V, U)$ и известно множество $Y(|Y| = v)$ точек контроля, обусловленных назначением и конструкционным исполнением объекта.

Необходимо найти такое минимальное множество M точек контроля, при котором бы на множестве $Y \cup M$ выполнялось условие $K_{г.п}(Y \cup M) \geq \xi$, при котором

$$K_{г.п}(Y \cup M) = \max_{M_j \subset P} K_{г.п}(Y \cup M_j), \quad (17)$$

где M_j – множества, претендующие на дополнительное множество точек контроля.

Данную задачу, как и предыдущие, можно решить методом ветвей и границ. Для каждого множества M_j определяется $K_{г.п}$. Оценкой на каждом шаге будет служить выражение (17), причем если найденное множество M удовлетворяет условию $K_{г.п}(Y \cup M) \geq \xi$, то M – искомое множество дополнительных точек контроля.

Из представленных задач видно, что во всех случаях они носили однокритериальный характер. Однако на практике построения реальных систем диагностирования сложных технических объектов требуется отыскание одновременно экстремумов двух и более целевых функций, определяющих характер системы диагностирования.

Многокритериальная оптимизация глубины диагностирования. Эффект от применения технических средств диагностирования подчас настолько не существен, что применение их может ставиться под сомнение. Причина заключается в слабой приспособленности технических систем к диагностированию, что не позволяет в полной мере осуществлять его процедуру. Приспособленность объекта к диагностированию, позволяющее достоверно определить его техническое состояние, принято называть контролепригодностью. Обеспечение контролепригодности может быть осуществлено назначением точек контроля. Однако часто в полном объеме конструкционно реализовать точки контроля не представляется возможным, а в некоторых случаях стоимость их реализации может быть значительной.

Количественно контролепригодность объекта можно оценить коэффициентом глубины поиска дефекта, определяемого выражением (9), то есть $K_{г.п}(M) = F_n(M)/S_n$, где $F_n(M)$ – число однозначно выявляемых дефектов кратности от 1 до n на множестве M точек контроля; S_n – общее число возможных дефектов кратности от 1 до n .

Известно, что увеличение коэффициента глубины поиска дефекта приводит к увеличению коэффициента готовности объекта диагностирования. В настоящей работе предлагается процедура назначения заданного числа точек контроля, обеспечивающих максимизацию коэффициента глубины поиска дефекта при минимальных затратах на их реализацию.

Постановка задачи. Пусть объект диагностирования задан в виде упорядоченного графа $G(V, U)$ с n вершинами, где V и U – соответственно множества вершин и дуг. Вершинам графа $G(V, U)$ ставятся в соответствие блоки объекта диагностирования, а дугам – связи между блоками. Известно множество $Y(|Y| = v)$ точек контроля, обусловленных назначением и конструкционным исполнением объекта диагностирования. Из множества $V(|V| = n)$ выделяется подмножество $P(P \subset V, |P| = n - v)$. Каждой точке $p_i \in P$ ставится в соответствие стоимость

$c(p_i)$ ($i = 1, n - v$) ее реализации. При этом задано число m дополнительно организуемых точек контроля. Требуется дополнить множество Y точек контроля множеством M^* ($M^* \subset P, |M^*| = m$) так, чтобы на множестве $Y \cup M^*$ коэффициент глубины поиска дефекта любой кратности стремился к максимуму, а стоимость реализации назначенных точек контроля была минимальной.

Тогда математическая постановка задачи имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} K_{г.п}(M^* \cup Y) &= \max_{M \subset P} K_{г.п}(M \cup Y), \\ C(M^*) &= \min_{M \subset P} C(M), \\ |M| &= m, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где $C(M) = \sum_{i \in M} c(p_i)$ – значение стоимости реализации множества M точек контроля объекта диагностирования.

Решение задачи. Рассматриваемая задача относится к классу *многокритериальных задач*. Для ее решения можно использовать метод свертывания векторного критерия. Этот метод оптимизации учитывает относительную важность частных критериев оптимальности с помощью построения скалярной функции F , являющейся обобщенным критерием оптимальности. Функция F с аддитивным критерием оптимальности имеет вид:

$$F_{\Sigma}(w, Q(x)) = \sum_{i=1}^2 w_i Q_i(x), \quad (19)$$

где $Q(x) = \{Q_1(x), Q_2(x)\}$ – вектор частных критериев, причем $Q_1(x)$ соответствует нормированному коэффициенту глубины поиска дефекта любой кратности ($N_K(Y \cup M)$), $Q_2(x)$ – нормированной стоимости реализации дополнительных точек контроля ($N_C(M)$); $w = \{w_1, w_2\}$ – весовые коэффициенты относительной важности частных критериев, которым при решении предлагается дать точные численные оценки.

Для нормирования частных критериев примем одинаковую шкалу измерения $[\alpha, \beta]$, причем $[\alpha, \beta] = [1, 2]$ для $K_{г.п}(Y \cup M)$, и $[\alpha, \beta] = [2, 1]$ для $C(M)$. В результате для нормирования $K_{г.п}(Y \cup M)$ получаем следующую формулу:

$$N_K(Y \cup M) = \frac{K_{г.п}(Y \cup M) - \min_{M \subset P} K_{г.п}(M \cup Y)}{\max_{M \subset P} K_{г.п}(M \cup Y) - \min_{M \subset P} K_{г.п}(M \cup Y)} (\beta - \alpha) + \alpha. \quad (20)$$

Для нормирования $C(M)$:

$$N_C(M) = \frac{C(M) - \min_{M \subset P} C(M)}{\max_{M \subset P} C(M) - \min_{M \subset P} C(M)} (\beta - \alpha) + \alpha. \quad (21)$$

В результате задача сводится к решению *однокритериальной задачи* оптимизации:

$$F(w, Q(Y \cup M)) = \max_{M \subset P} F(w, Q(Y \cup M)) = \max_{M \subset P} \{w_1 N_K(Y \cup M) + w_2 N_C(M)\}, \quad (22)$$

Полученная задача является задачей *дискретной оптимизации*, которую можно решить с помощью *метода ветвей и границ*.

Ветвление производится следующим образом:

I-й шаг. Имеется множество $P(|P| = n - v)$. Строится конечное число $M_{1j} (j = 1, n - v)$ множеств, где каждое множество состоит из одного элемента множества P , и все множества M_{1j} различны. За оценку на данном шаге принимается выражение

$$F(w, Q(Y \cup M_1)) = \max_{M_{1j} \subset P} F(w, Q(Y \cup M_{1j})) =$$

$$= \max_{M_{1j} \subset P} \{w_1 N_K(Y \cup M_{1j}) + w_2 N_C(M_{1j})\},$$

где M_1 – дополнительное множество точек контроля, при котором $F(w, Q(Y \cup M_{1j}))$ максимально, то есть $\max F(w, Q(Y \cup M_{1j}))$.

...m-й шаг. Имеется *перспективное множество* $M_{m-1} (|M_{m-1}| = m - 1)$, полученное на предыдущем $(m-1)$ шаге. Строится конечное число множеств $M_{mj} (|M_{mj}| = m)$. Каждое из них будет получено путем включения какой-либо одной точки из множества P в множество M_{m-1} . За оценку на m -м шаге примется

$$F(w, Q(Y \cup M_m)) = \max_{M_{mj} \subset P} F(w, Q(Y \cup M_{mj})) =$$

$$= \max_{M_{mj} \subset P} \{w_1 N_K(Y \cup M_{mj}) + w_2 N_C(M_{mj})\},$$

где $M_m (|M_m| = m)$ – дополнительное множество точек контроля, при котором $\max F(w, Q(Y \cup M_{mj}))$. Таким образом, множество M_m – искомое множество $M^* (|M^*| = m)$. При этом на множестве $Y \cup M^*$ коэффициент глубины поиска дефекта любой кратности достигает оптимального соотношения со стоимостью реализации дополнительных точек контроля.

5. Численный пример многокритериальной оптимизации глубины диагностирования сложных технических систем при кратных дефектах

В качестве примера по применению многокритериальной оптимизации в задаче диагностики сложных технических систем рассмотрим объект, модель которого представлена в форме упорядоченного графа $G(U, V)$ на рис.7. Известно исходное множество $Y = \{6\}$ точек контроля.

Задано число $m = 2$ дополнительно организуемых точек контроля, также заданы стоимости реализации точек, претендующих на дополнительные точки контроля, представленные в следующей таблице:

Стоимости реализации точек контроля

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
5 ед.	7 ед.	6 ед.	8 ед.	4 ед.

Требуется дополнить множество Y множеством M ($|M| = 2$) так, чтобы на множестве $Y \cup M$ достигалось максимальное значение $K_{г.л.}$ при минимальных затратах на дополнительные точки контроля. Заданы следующие весовые коэффициенты $w_1 = 0,7$; $w_2 = 0,3$.

По графу построим матрицу достижимости D :

$$D = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 1 & & & 1 & & 1 \\ & 1 & & 1 & 1 & 1 \\ & & 1 & & & 1 \\ & & & 1 & & 1 \\ & & & & 1 & 1 \\ & & & & & 1 \end{vmatrix} \end{matrix}$$

На множестве $Y = \{6\}$ построим матрицу проверок B_Y :

$$B_Y = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} b(1,6) \\ b(2,6) \\ b(3,6) \end{matrix} & \begin{vmatrix} 1 & & & 1 & & 1 \\ & 1 & & 1 & 1 & 1 \\ & & 1 & & & 1 \end{vmatrix} \end{matrix}$$

Определим величину S_n для заданной системы при $n = 6$:

$$S_n = 2^n - 1 = 63.$$

По матрице проверок B_Y определим $F_n(Y)$ (число однозначно выявляемых дефектов любой кратности на множестве точек контроля Y).

При этом дефект называется однозначно распознаваемым, на множестве точек контроля Y , если он обнаружим в системе без введения дополнительных точек контроля.

Для определения однозначно распознаваемых дефектов на множестве Y точек контроля предлагается следующий алгоритм. 1) Строим матрицу проверок B_Y .

2) Для рассмотрения предполагаемого дефекта в матрице выбираем столбцы, определяющие данный дефект. 3) Из матрицы B_Y вычеркиваем строки, которые не имеют единиц в выбранных столбцах, а затем вычеркиваем столбцы, имеющие единицы в этих строках. 4) Среди всех оставшихся строк ищем ту, которая имеет одну единицу. Найденную строку и столбец, содержащий единицу в этой строке, вычеркиваем из матрицы проверок. Далее в матрице опять ищем строку, которая содержит всего одну единицу, и если такая существует, то повторяем вышеизложенный процесс вычеркивания. 5) При вычеркивании строк возможны 2 варианта: а) все строки вычеркнуты из матрицы B_Y , тогда исследуемый дефект назовем однозначно различимым; б) на каком-либо шаге не найдена строка, содержащая всего одну единицу, тогда исследуемый дефект не является однозначно различимым. 6) Подобным образом (п. 1–5) последовательно рассматриваем все предполагаемые дефекты.

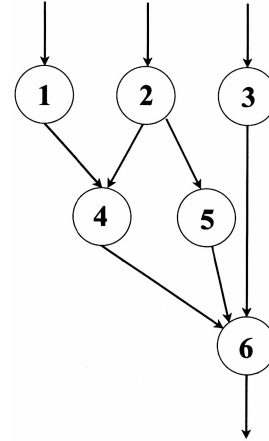


Рис. 7. Граф исследуемого объекта

Используя вышеприведенный алгоритм по матрице B_Y рассматриваемого примера, получим следующие однозначно выявляемые дефекты: $b_1, b_1 \vee b_3, b_3$.

При этом

$$K_{\text{гл}}(Y) = F_n(Y) / S_n = 3/63 = 0,0476.$$

Из множества точек $P = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ необходимо выбрать две точки, при которых $K_{\text{гл}}$ максимален.

1-й шаг. За оценку на данном шаге принимаем выражение

$$\begin{aligned} F(w, Q(Y \cup M_{1j})) &= \max_{M_{1j} \in P} \{F(w, Q(Y \cup M_{1j}))\} = \\ &= \max_{M_{1j} \in P} \{0,7N_k(Y \cup M_{1j}) + 0,3N_c(M_{1j})\}. \end{aligned} \quad (23)$$

При этом $Y \cup M_{11} = \{1, 6\}$, $Y \cup M_{12} = \{2, 6\}$, $Y \cup M_{13} = \{3, 6\}$, $Y \cup M_{14} = \{4, 6\}$, $Y \cup M_{15} = \{5, 6\}$.

Определим $K_{\text{гл}}(Y \cup M_{1j})$ и $N_k(Y \cup M_{1j})$ ($j = \overline{1,5}$) для полученных множеств точек контроля, исходя из выше предложенных формул (9), (19).

$$\begin{aligned} K_{\text{гл}}(Y \cup M_{11}) &= 0,079; N_k(Y \cup M_{11}) = 1; \\ K_{\text{гл}}(Y \cup M_{12}) &= 0,175; N_k(Y \cup M_{12}) = 1,34; \\ K_{\text{гл}}(Y \cup M_{13}) &= 0,111; N_k(Y \cup M_{13}) = 1,11; \\ K_{\text{гл}}(Y \cup M_{14}) &= 0,365; N_k(Y \cup M_{14}) = 2; \\ K_{\text{гл}}(Y \cup M_{15}) &= 0,079; N_k(Y \cup M_{15}) = 1. \end{aligned}$$

Определим $N_C(M_{1j})$, ($j = \overline{1,5}$), используя заданную стоимость реализации точек, претендующих на дополнительные точки контроля по формуле (20).

$$N_C(M_{11}) = 1,75; \quad N_C(M_{12}) = 1,25; \quad N_C(M_{13}) = 1,5; \\ N_C(M_{14}) = 1; \quad N_C(M_{15}) = 2.$$

Подставляя значения нормированных коэффициентов в выражение (22), определим значения обобщенных критериев оптимальности $F(w, Q(Y \cup M_{1j}))$ ($j = \overline{1,5}$).

$$F(w, Q(Y \cup M_{11})) = 1,225; \quad F(w, Q(Y \cup M_{12})) = 1,313; \\ F(w, Q(Y \cup M_{13})) = 1,227; \quad F(w, Q(Y \cup M_{14})) = 1,7; \\ F(w, Q(Y \cup M_{15})) = 1,3.$$

$F(w, Q(Y \cup M_1)) = 1,7$ и первой дополнительной точкой контроля является элемент, соответствующий вершине 4.

2-й шаг. Для выбора второй дополнительной точки контроля образуем множества $Y \cup M_{21} = \{1, 4, 6\}$, $Y \cup M_{22} = \{2, 4, 6\}$, $Y \cup M_{23} = \{3, 4, 6\}$, $Y \cup M_{24} = \{4, 5, 6\}$ и для каждого из них определим $K_{гп}(Y \cup M_{2j})$, $N_K(Y \cup M_{2j})$, $N_C(M_{2j})$ ($j = \overline{1,4}$) по формулам (5), (13), (14).

$$K_{гп}(Y \cup M_{21}) = 1; \quad N_K(Y \cup M_{21}) = 2; \quad N_C(M_{21}) = 1,667; \\ K_{гп}(Y \cup M_{22}) = 1; \quad N_K(Y \cup M_{22}) = 2; \quad N_C(M_{22}) = 1; \\ K_{гп}(Y \cup M_{23}) = 0,365; \quad N_K(Y \cup M_{23}) = 1; \quad N_C(M_{23}) = 1,333; \\ K_{гп}(Y \cup M_{24}) = 0,492; \quad N_K(Y \cup M_{24}) = 1,2; \quad N_C(M_{24}) = 2.$$

Определим значения обобщенных критериев оптимальности $F(w, Q(Y \cup M_{1j}))$ ($j = \overline{1,5}$) по формуле (16).

$$F(w, Q(Y \cup M_{21})) = 1,9; \quad F(w, Q(Y \cup M_{22})) = 1,7; \\ F(w, Q(Y \cup M_{23})) = 1,099; \quad F(w, Q(Y \cup M_{24})) = 1,44.$$

$F(w, Q(Y \cup M_2)) = 1,9$ и второй дополнительной точкой контроля назначаем элемент, определяемый вершиной 1.

Таким образом, для выполнения условия задачи должно быть следующее множество точек контроля, $Y \cup M = \{1, 4, 6\}$. При этом $K_{гп}(Y \cup M) = 1$, $C_{реал}(M) = 13$ ед.

6. Заключение

Приведенные в работе методы и алгоритмы обладают высокой степенью универсальности и могут быть использованы в любых областях науки и техники, где требуются надежная диагностика и контроль работоспособности технических объектов, систем или изделий.

Работа выполнена при частичной поддержке Отделения Науки НАТО, программа “Наука для Мира”, Проект SfP-973799 Semiconductors.

Литература

- [1] Бушуева М.Е. Методы и алгоритмы обеспечения контролепригодности сложных технических систем при кратных дефектах: Дис. ... канд. тех. наук 05.13.01/ НГТУ. Н.Новгород, 1997. –170 с.

- [2] Мозгалецкий А.В., Калявин В.П., Костанди Г.Г. Диагностирование электронных систем. - Л.: Судостроение, 1984. –224 с.
- [3] Беляков В.В., Бушуева М.Е., Сагунов В.И. Многокритериальная оптимизация в задачах оценки подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем. –Н.Новгород: НГТУ, 2001. 271 с.

Complex technical systems diagnosing ^{*)}

M.E.Bushueva, V.V.Belyakov *

*Nizhni Novgorod State Technical University
Minin Street, 24, Nizhni Novgorod, 603600, Russia*

1. Introduction

The increase of the operational quality and determination of actual operational state of any technical object or a system is a matter of great importance. To ensure the proper operation of complex technical systems, special attention is paid to methods of diagnosing. To achieve the above-mentioned goals successfully, scheduled maintenance should be replaced for the one on a true operational state basis. The latter will need a wide use of computerized testing and diagnosing methods. Thus, any object must have a certain quality that could reliably determine its operational status with minimal cost. Such quality was given name “check-ability”.

2. Complex technical systems diagnostics

The key points of operational diagnostics are discussed, and block diagrams are provided: for main diagnosing methods (fig. 1), diagnostic models (fig. 2), and methods of their analyses (fig. 3). A classification of the parameters that ensure proper operation of the complex object is also available. A technical object is represented as a “black box” with a number of external links: input and output parameters, external noise, and inner interference. The principle of splitting a set of characteristic parameters into a number of subsets is provided. The generalized structure of diagnosing model analyses at a design stage is also given. Sufficiency of direct and indirect indexes to say a true operational status at a pre-set accuracy is determined by a probability number; the latter must satisfy $p(m, n) \geq p_0$ where p_0 stands for a determined index of accuracy that enables proper estimation of an operational state.

3. Complex technical systems check-ability

The general information on complex technical systems check-ability and methods of its estimation is provided. An expression to compute complex index of check-ability is also available. To make check-ability possible the theory suggests placing the components of an object into the so-called “constructional units”. The terms “constructional units” and

^{*)} Proc. NATO Project SfP-973799 Semiconductors 1st Workshop. Nizhni Novgorod, 2001

* Phone/Fax: +7-8312-366364; E-mail: amf@adm.nntu.sci-nnov.ru

“multiple defects” with methods to detect them are introduced. Due check-ability may be achieved differently.

Task 1. By placing a limited number of components into constructional units with respect to multiple defects.

Task 2. By fixing components into constructional units rigidly with respect to possible defects of any multiplicity.

Task 3. By placing components into constructional units with minimal cost of checkpoints with possible defects of any multiplicity.

4. Multi-criteria optimization of complex technical systems diagnosing depth under multiple defects

The defect detection depth index (9) is introduced. The first stage optimizes a single criterion check-ability of diagnosed object that may have defects of any multiplicity on a branch and bound basis.

Task 1 covers the maximizing a multiple defect detection depth index on a provided number of checkpoints.

Task 2 deals with maximizing a multiple defect detection depth index with a restricted cost of checkpoints.

Task 3 minimizes costs for a given multiple defect detection depth index.

Task 4 minimizes an amount of checkpoints under a multiple defect detection depth index given.

The second stage disperses a given number of checkpoints to make a defect detection depth maximum with minimal costs. The use of the method of folding a vector criterion is suggested. Scalar function F , being a generalized additive criterion of optimality, determines the relative importance of optimality criteria. Vectors of partial criteria are brought to standard state for detection depth index by independence (20), for additional checkpoints installation – (21). As a result the task is reduced to a single-criterion optimization task. The resulting task is a discrete optimization task that can be solved with branch and bound method.

5. Numerical representation of multi-criteria optimization of complex technical systems diagnosing depth under multiple defect

The diagnosed object with its model represented in the form of an ordered graph $G(U, V)$ is discussed (fig. 7). The object has a number of checkpoints. Additional checkpoints are also included. Home check points must meet additionally – integrated points so that their total number would give the maximal defects detection depth index with minimal costs for additional check points placement.

6. Conclusion

The above given methods and algorithms are universal application and may be successfully used in all branches of science and technology that need the reliable diagnostics and operational check-up.

This work was partially supported by NATO's Scientific Affairs Division in the framework of the Science for Peace Programme (Project SfP-973799 Semiconductors).