

Формирование эвристических программ интеллектуальной поддержки диагностирования аналоговых промышленных объектов

А.В. Емашов

Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия

iyemashov@gmail.com

Статья поступила 16.02.2016, принята 25.03.2016

В статье рассматривается процесс формирования эвристических программ диагностирования промышленных объектов на примере дизель-генераторной установки и датчика давления «Метран 150». Рассмотрена сущность эвристических программ диагностирования промышленных объектов. В результате постоянного взаимодействия формирователей оперативной и долговременной информации определяется предварительный диагноз, а посредством обратных связей осуществляется непрерывное обучение данных формирователей. Реализация эвристических программ диагностирования промышленных объектов может быть представлена с помощью языка высокого уровня, которым является эвристическое программирование. Известно довольно много программ частного и общего характера для решения определенного класса задач, однако отсутствие в теории эвристического программирования формальных правил поиска эвристик затрудняет практическое применение этого метода для решения прикладных задач. Поэтому задача формирования эвристических программ диагностирования, представленная на конкретных примерах, является самостоятельной и требует индивидуального подхода. В рамках заявленной проблематики автором приведены таблицы связей между признаками проявления и соответствующими им неисправностями, осуществлен синтез диагностической таблицы связей на основе технической документации, производственного опыта и экспертных оценок. Построен алгоритм поиска неисправностей с использованием информационного метода, сформулирована постановка задачи по формализации синтеза оптимальных алгоритмов диагностирования промышленных объектов. Рассмотрены функциональные уравнения для условно оптимального алгоритма диагностирования данных промышленных объектов. Отмечено, что подобные программы позволяют комплексно учитывать производственный и научно-исследовательский опыт в процессе формирования долговременной и оперативной информации с последующей адаптацией к конкретным условиям на основе статистической обработки реализованных массивов диагностической информации.

Ключевые слова: промышленный объект; диагностика; эвристическая программа; диагностическая информация.

Forming heuristic programmes for intellectual support of the diagnosis of analog industrial projects

A.V. Emashov

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

iyemashov@gmail.com

Received 16.02.2016, accepted 25.03.2016

The article examines the formation process of heuristic diagnostic programmes for industrial objects on the example of a diesel generator set and pressure sensor «Metran 150». The entity of heuristic diagnostic programmes for industrial objects is considered. As a result of continuous interaction of the generator of operational information and the generator of long-term information, the preliminary diagnosis is created, and by means of back couplings, the continuous training of the generator of operational information and the generator of long-term information is carried out. Implementation of heuristic diagnostic programmes of industrial objects can be realized by means of the high level language of heuristic programming. Many programmes of quotient and general character are known for solving the certain class of tasks. However, the absence of the formal rules to search heuristics in the theory of heuristic programming makes it difficult to apply this method for solving application-oriented tasks. Therefore, the task for forming heuristic diagnostic programmes presented on specific examples is independent and requires an individual approach. Relationship tables are given to demonstrate connections between evidences of fault event and the faults corresponding to them. Based on technical documentation, operational experience and expert estimations, synthesis for the relationship diagnostic table is accomplished. Fault tracing algorithm is built with the use of information method. The problem definition is formulated on formalization of the synthesis of the optimum algorithms for diagnosing industrial objects. Functional equations for conditionally optimum algorithm to diagnose such industrial objects are considered. As a result, such programs allow to take into account both production and scientific and research experience in complex in the process of long-term and operational information with adaptation to certain conditions on the basis of static handling of embodied arrays of diagnostic information.

Key words: industrial object; diagnosis; heuristic programme; diagnostic information.

Введение

В настоящее время является актуальной проблема формирования эффективной взаимосвязи ассоциативного и формально-логического мышления специалистов в области диагностики промышленных объектов и компьютерных программ по обработке диагностической информации, полученной на основании стендовых испытаний, научно-производственного опыта и любых других источников информации о состоянии объектов диагностики.

Первые попытки создания компьютерных программ игры в шахматы, основанных только на формально-логической обработке исходной информации, не дали сколько-нибудь серьезных результатов, и только впитав опыт лучших мастеров шахматного искусства, то есть их эвристические приемы, эти программы позволяют обыгрывать чемпионов мира.

В данной статье предлагается решать задачу всего лишь по интеллектуальной поддержке процесса формирования диагноза состояния промышленного объекта (ПО). Для того чтобы статья имела прикладной характер, в качестве конкретных объектов исследования выбраны датчик давления (ДД) и дизель-генераторная установка (ДГУ).

Постановка задачи. При системно-структурном подходе к автоматизации процесса принятия решений в социально-экономических, технических и других больших системах возникает проблема создания обобщенной модели структуры и законов функционирования системы.

Если в памяти вычислительной машины имеется каким-то образом сформированная модель управления, то с ее помощью можно предвидеть последствия принятия тех или иных решений и выбрать оптимальное из допустимого множества решений в соответствии с заданным критерием управления на основании описания конкретной ситуации, возникшей в объекте управления.

Решение указанной проблемы требует оперирования языком более высокого порядка, чем часто используемые языки уравнений (дифференциальных, функциональных, алгебраических, логических и др.), на которых базируются многие современные методы управления. При этом управление представляется как процесс нахождения решения системы уравнений, дающего экстремум оценочного функционала. Однако такой подход к описанию процесса управления не является единственно возможным. Более того, при этом подходе возникают практически непреодолимые трудности, когда речь идет об управлении большими системами. Размерность задач управления сложными системами столь велика, что даже быстродействующие вычислительные машины оказываются неспособными решать возникающие здесь системы уравнений.

С практической точки зрения более перспективным является управление большими системами по ситуациям, при котором процесс функционирования управляемого объекта определяется таблицей решений, входной строкой которой являются ситуации, а выходным столбцом — решения. На пересечении i -й строки и j -го столбца ставится 1, если по ситуации S_i требуется принять решение R_j , и 0 — в противоположном случае.

Таблицы решений, характеризующие функциони-

рование больших систем, имеют, как правило, весьма большое число строк и сравнительно небольшое число столбцов, причем эта разница становится тем ощутимее, чем выше уровень управления. Например, таблицы решений, характеризующие функционирование таких систем, как участок канала с несколькими шлюзами, морской порт, аэропорт, железнодорожный узел, вычислительная система, система предприятий и другие, имеют свыше 2 100 строк. Число столбцов в этих таблицах не превышает тысячи. Другими словами, множество ситуаций большой системы представляют собой совокупность родственных по управлению классов, число которых соответствует числу принимаемых решений. В связи с тем, что число возможных состояний (микроситуаций) большой системы огромно, а число принимаемых решений невелико, практическая реализация принципа ситуационного управления связана с решением проблемы разбиения множества микроситуаций на классы по числу принимаемых решений. Если такое разбиение получено, то управления по ситуациям выглядит так, как это описывалось выше. При этом строками таблицы решений являются макроситуации, характеризующие родственные по управлению классы микроситуаций.

Разбиение множества микроситуаций на классы связано с формализацией понятия микроситуации управляемого объекта и процесса обобщения микроситуаций. Решение этой проблемы требует оперирования языком, обладающим средствами имитации процессов формирования, обобщения и экстраполяции микроситуаций управляемого объекта [1–4].

Метод решения. Рассмотрим в общем виде сущность эвристической программы диагностирования промышленного объекта (ЭПД ПО). Обозначим через I_{∂} долговременную информацию, формируемую на основании обобщения и классификации имеющегося интуитивного, производственного и научно-исследовательского опыта, а через I_o — оперативную информацию, полученную от водителя и оператора-диагноста посредством стендовых испытаний. В этом случае диагноз:

$$D = \mathcal{E}(I_{\partial}, I_o),$$

где \mathcal{E} — совокупность эвристик.

Иными словами, диагноз D формируется эвристическими на основании долговременной I_{∂} и оперативной I_o информации, при этом I_{∂} и I_o не остаются постоянными, а корректируются и дополняются в процессе реализации ЭПД ПО, непрерывного обобщения производственного и научно-исследовательского опыта, т. е. формирователь оперативной информации (ФОИ) и формирователь долговременной информации (ФДИ) находятся в режиме непрерывного обучения. Таким образом, для n -го диагноза можно записать:

$$D_n = \mathcal{E}(I_{on}, I_{\partial(n-1)}),$$

$$I_{on} = f_1(D_n, I_{\partial(n-1)}, I_{o(n-1)}),$$

$$I_{\partial n} = f_2(D_n, I_{\partial(n-1)}, I_{on}),$$

где n — состояние, соответствующее n -му классу состояния ПО.

На рис. 1 приведена структурная схема ЭПД ПО. В формировании оперативной информации могут принимать участие любые специалисты, имеющие отношение к диагностируемому ПО. При формировании диагноза они могут принимать байесовское решение так же, как это делает консилиум врачей, формируя диагноз больного. В результате постоянного взаимодействия ФОИ и ФДИ формируется предварительный диагноз, а посредством обратных связей осуществляется непрерывное обучение ФОИ и ФДИ. ФДИ может быть реализован на ПЭВМ, где классифицируется и записыва-

ется обобщенная информация производственного и научно-исследовательского опыта.

Не останавливаясь на подробном описании приведенной ЭПД ПО, выделим некоторые основные ее свойства.

Гипотезы диагноза формируются на основании всей имеющейся исходной оперативной и долговременной информации по диагностированию промышленного объекта. Все формирователи информации и диагнозов непрерывно корректируются и дополняются путем внешнего обучения и самообучения в процессе реализации алгоритма и оценки действительного состояния промышленного объекта.

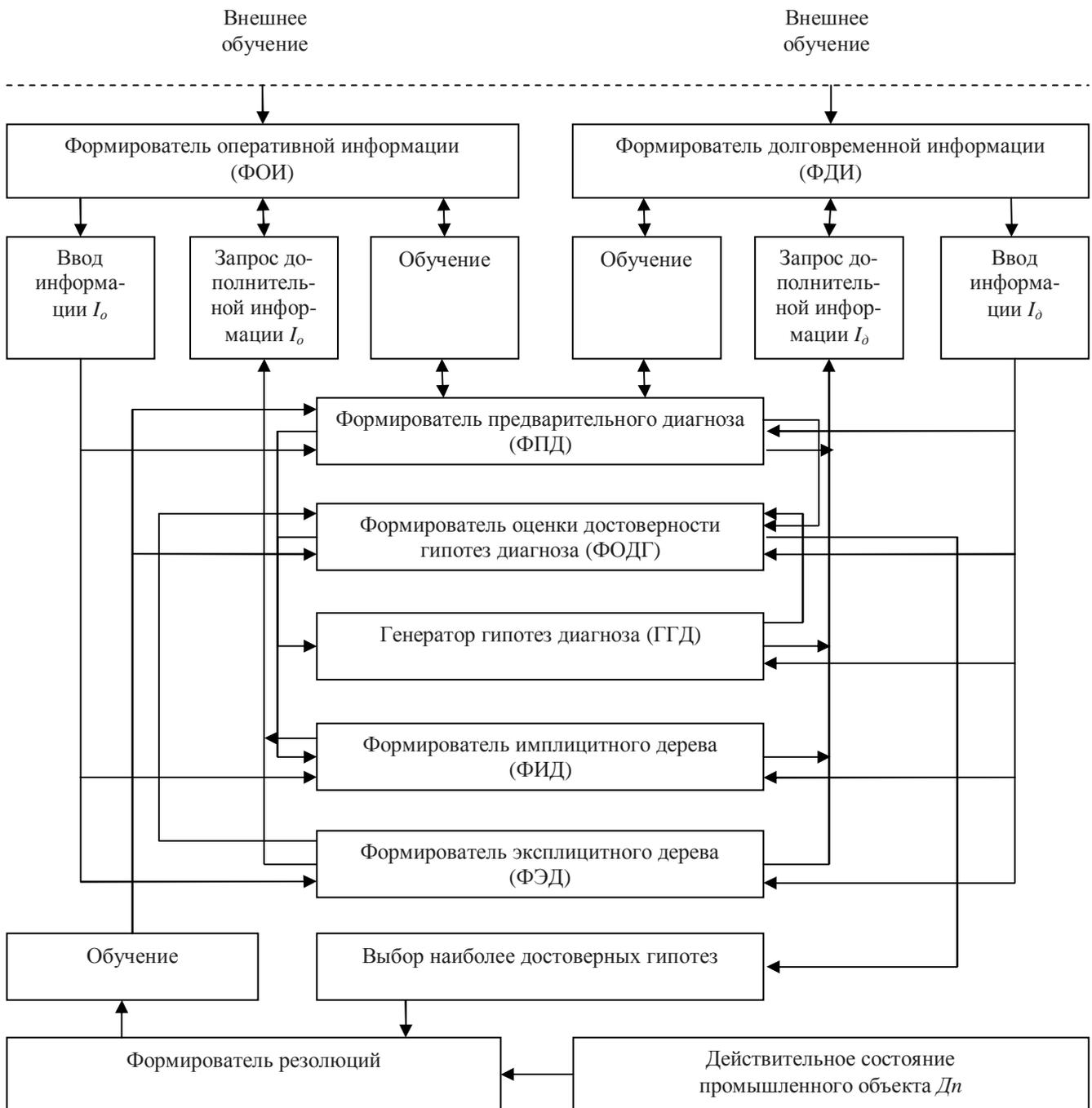


Рис. 1. Структурная схема ЭПД ПО

Гипотезы диагнозов могут быть получены даже при существенном недостатке исходной информации и на любом уровне, начиная от уровня диалога ФОИ и ФПД и кончая синтезом гипотез на уровне анализа эксплицитного дерева.

Информация запрашивается только по мере необходимости на любом уровне формирования гипотез диагноза.

Реализация ЭПД ПО возможна лишь на языке высокого уровня, каким является, например, эвристическое программирование. Его преимущества проявляются лишь в том случае, когда полную математическую модель построить нельзя или нецелесообразно из-за ее большой размерности.

Так, синтез исходного ФДИ в виде таблицы связей неисправностей и признаков их проявления (ТС) для двигателей ЗИЛ-5081.10 осуществлялся методом экспертных оценок. В результате была получена ТС размерностью 49×87.

Процесс диагностирования, например, датчика давления, обеспечивающий достаточную глубину и достоверность диагноза при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте, соответствующих необходимым требованиям, невозможно провести без использования современных средств диагностики и обработки полученных результатов посредством компьютерных программ. Существующие программы не дают необходимых результатов, так как не используют в полной мере возможности вычислительных машин, не способны эффективно аккумулировать имеющийся производственный и научно-исследовательский опыт и не имеют функции накопления и статистической обработки диагностической информации. Очевидно, что решать такую задачу необходимо системно, учитывая все факторы, повышающие качество процесса диагностирования.

Перспективным направлением в решении этой сложной проблемы, по мнению автора, может стать формирование эвристических программ диагностирования датчиков, например давления (ЭПД ДД), с использованием

языков программирования высокого уровня.

ЭПД ДД благодаря использованию способов сокращенного перебора, с учетом накопленного опыта, запрашивают лишь ту информацию, которая необходима в данной ситуации. Вообще, процесс технической диагностики, как правило, строго регламентирован, что и приводит к получению избыточной информации. При этом полученной информации почти всегда недостаточно для полной и качественной постановки диагноза. Это положение подтверждается на практике. Например, опытный оператор-диагност, используя ассоциативный способ сокращенного перебора, иногда ставит диагноз только по внешним признакам быстрее и точнее, чем менее опытный, действующий по заранее предписанному алгоритму с использованием современного диагностического оборудования.

Известно довольно много эвристических программ частного и общего характера для решения определенного класса задач. В тех случаях, когда удастся найти подходящие «эвристики», понижающие размерность задачи, эвристические программы оказываются эффективнее методов математического программирования. Однако отсутствие в теории эвристического программирования формальных правил поиска эвристик затрудняет практическое применение этого метода для решения прикладных задач, поэтому задача формирования ЭПД ДД является вполне самостоятельной и требует индивидуального подхода [5; 6].

Первым этапом формирования ЭПД ДД и ДГУ является синтез диагностической ТС на основе технической документации, производственного опыта и экспертных оценок.

Такая ТС взаимосвязи признаков проявления неисправностей (строки) и соответствующих им неисправностей (столбцы) представлена в табл. 1 и 2. ТС считается сформированной, если каждый ее столбец представляет собой код (тест), однозначно определяющий состояние ПО, например датчика давления.

Таблица 1

Фрагмент таблицы связей неисправностей и признаков их проявления для формирования ЭПД ДГУ

	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9	П10	П11	•	•	П59	П60	П61	П62	П63	П64	П65	П66	П67	П68	П69	
S1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
S17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
S18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
S19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

С практической точки зрения такие ТС, реализуемые на ЭВМ, позволяют оператору-диагносту в режиме диалога более обоснованно ставить предварительный диагноз. Эти ТС особенно эффективны, если оператор-диагност не имеет достаточного опыта.

К недостаткам такого способа обработки оперативной информации следует отнести малую глубину диагноза, возникающие иногда противоречия между выводимыми на печать наиболее вероятными неисправностями и малую достоверность некоторых диагнозов.

ТС ЭПД ДГУ размерностью 19×69 изображена частично. Sk и Pk — признаки и неисправности ДГУ соответственно. При внимательном рассмотрении можно понять, что разным признакам соответствует разное количество неисправностей.

Например, в соответствии с признаком S19 (чрезмерный шум) проблема может возникнуть по причине единственной неисправности — П69 (вращающиеся детали задевают неподвижные детали в центрифуге).

Признаку S2 (температура охлаждающей жидкости выше нормы) соответствует одна из десяти неисправностей (П2 — уровень охлаждающей жидкости ниже нормы, П3 — повреждены или засорены пылью теплоотводные пластины радиатора, П4 — шланг системы охлаждения смят, засорен или имеет утечку, П5 — ослабление приводного ремня вентилятора, П6 — уровень моторного масла выше или ниже нормы, П7 — поврежден или отсутствует кожух вентилятора, отсутствуют отражательные щитки рециркуляции воздуха, П8 — неисправна пробка радиатора, П9 — неисправен датчик температуры, П10 — неполное открытие жалюзи радиатора или неправильная регулировка термостата жалюзи, П11 — закрыты утепляющий чехол или передний фартук радиатора).

Изображен фрагмент ТС ЭПД ДД размерностью 16×64, в которой признак 9 (отказ сенсора) может возникнуть по причине единственной неисправности (выход за предельные значения кодов АЦП по каналу давления); признаку 1 (отказ платы АЦП) соответствует одна из 13-ти неисправностей (в процессе работы датчика данные с АЦП не поступают; время ожидания ответа от EEPROM АЦП превышает 100 мс; при включении данные с АЦП не поступают; некорректно считанные предельные значения кодов АЦП по каналам давления и температуры; выход за предельные значения кодов АЦП по каналу температуры; неправильное чтение: конфигурационного байта АЦП, информации о сенсоре, информации об АЦП, технологической информации, коэффициентов термокоррекции АЦП, идентификационного номера сенсора, пользовательской информации о сенсоре; невозможно снять защиту от записи в EEPROM АЦП).

Таким образом, данные ТС являются первым этапом разрабатываемой эвристической программы диагностирования ДГУ и ДД.

В процессе обучения или самообучения ТС меняется не только их размерность, но и величины вероятностей связей между неисправностями и признаками их проявления.

Если же одному признаку неисправности соответствуют несколько неисправностей, то необходимо решать задачи по оптимизации стратегии их поиска, на-

пример методами функционального динамического программирования. Для использования этих методов необходимо иметь полную информацию о надежности и стоимости проверок диагностируемых устройств.

Алгоритмы диагностирования можно разделить на условные и упорядоченные [13]. В условных алгоритмах диагностирования вывод каждой последующей проверки зависит от исхода предыдущей проверки, в то время как в упорядоченном алгоритме все проверки выполняются в фиксированном порядке, несмотря на то, каков исход предыдущей проверки.

При построении алгоритмов поиска неисправностей часто используется так называемый информационный метод [7–11].

Метод базируется на применении формулы К.Э. Шеннона для оценки энтропии (меры неопределенности) передаваемой информации [12]:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i. \quad (1)$$

При построении алгоритма поиска неисправностей вычисляется убыль энтропии, определяемая каждой проверкой Π_i . Приоритет отдается той проверке, которая дает максимальную убыль энтропии, т. е. чем больше имеется информации об объекте после проверки, тем она эффективнее. Поскольку каждая проверка подразумевает два исхода — положительный (дефект идентифицирован) и отрицательный (дефект не идентифицирован), убыль энтропии складывается из двух составляющих: убыли энтропии при положительном исходе проверки Π_i и убыли энтропии при отрицательном исходе проверки Π_i :

$$H_i = H_i^+ + H_i^-. \quad (2)$$

Убыль энтропии при положительном исходе проверки рассчитывается по формуле:

$$H_i^+ = -p_i \log_2 p_i. \quad (3)$$

В формуле (3) p_i — это сумма вероятностей идентифицируемых дефектов при выполнении проверки Π_i . Убыль энтропии при отрицательном исходе проверки определяется выражением:

$$H_i^- = -(1-p_i) \log_2 (1-p_i). \quad (4)$$

В формуле (4) $(1-p_i)$ есть вероятность необнаружения дефекта при выполнении i -й проверки. Подставляя (3) и (4) в (2), получаем конечную формулу для расчета убыли энтропии, даваемой i -й проверкой:

$$H_i = -p_i \log_2 p_i - (1-p_i) \log_2 (1-p_i). \quad (5)$$

Как видно из формулы (5), информационный подход не учитывает времени, затрачиваемого на каждую проверку. Для исключения этого пробела в [24] предложено вводить комплексный коэффициент для оценки эффективности проверки:

$$\gamma_i = \frac{H_i}{c_i}, \quad (6)$$

где c_i — цена проверки (время поиска дефекта).

Первой выполняется та проверка, которая имеет максимальное значение коэффициента эффективности γ_i .

Построим алгоритм поиска неисправностей для ДД с использованием информационного метода. Табл. 2 содержит все исходные данные к расчету. Ее необходимо расширить, введя столбцы H_i и γ_i .

После выполнения расчетов по формулам (5) и (6) получаем табл. 3.

Анализируя табл. 3, делаем вывод о том, что первой следует провести проверку П10 или П9, так как она имеет максимальную эффективность.

Табл. 2 преобразуется в табл. 3, где исключаются столбцы П10, П9 и строка S10, при этом вероятности возникновения дефектов пересчитываются с учетом

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1.$$

Таблица 2

Фрагмент таблицы связей неисправностей и признаков их проявления для формирования ЭПД ДД

Неисправность / Признак неисправности	П ₁	П ₂	П ₃	П ₄	П ₅	П ₆	П ₇	П ₈	П ₉	П ₁₀	$P(S_k)$
S ₁	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08
S ₂	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08
S ₃	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,06
S ₄	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,2
S ₅	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,2
S ₆	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,03
S ₇	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,02
S ₈	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0,15
S ₉	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,05
S ₁₀	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,13
$C(S_k)$	12	5	6	13	1	10	8	15	2	2	

Таблица 3

Исходная таблица связей с рассчитанными значениями H_i и γ_i

Неисправность / Признак неисправности	П ₁	П ₂	П ₃	П ₄	П ₅	П ₆	П ₇	П ₈	П ₉	П ₁₀	$P(S_k)$
S ₁	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08
S ₂	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08
S ₃	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,06
S ₄	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,2
S ₅	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,2
S ₆	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,03
S ₇	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,02
S ₈	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0,15
S ₉	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,05
S ₁₀	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,13
$C(S_k)$	12	5	6	20	1	10	8	15	2	2	
$H(S_k)$	0,402	0,402	0,327	0,986	0,141	0,61	0,286	0,61	0,557	0,557	
$\gamma(S_k)$	0,034	0,08	0,055	0,049	0,141	0,061	0,036	0,041	0,279	0,279	

В табл. 4 даны результаты пересчета вероятностей, а также расчет убыли энтропии и эффективности оставшихся проверок.

Максимальной эффективностью обладает проверка П5. Удаляя столбец П10 с единственной идентифицируемой неисправностью и строку S7, переходим к

табл. 5. Расчет ведется аналогично: пересчитываются вероятности и применяются формулы (5) и (6).

Аналогично отбрасываем проверки неисправностей и их признаков на III, IV, V этапах. Оставшиеся проверки в табл. 6 решают поставленную задачу поиска всех

признаков неисправностей, имеют практически одинаковую убыль энтропии, но различную эффективность благодаря различным временным значениям поиска неисправности. В качестве последней проверки должна использоваться П7.

Таблица 4

Таблица связей неисправностей и признаков их проявления с рассчитанными значениями H_i и γ_i на I этапе

Неисправность \ Признак неисправности	П ₁	П ₂	П ₃	П ₄	П ₅	П ₆	П ₇	П ₈	$P(S_k)$
S ₁	1	0	0	0	0	0	0	0	0,092
S ₂	0	1	0	0	0	0	0	0	0,092
S ₃	0	0	1	0	0	0	0	0	0,069
S ₄	0	0	0	1	0	0	0	0	0,23
S ₅	0	0	0	1	0	0	0	0	0,23
S ₆	0	0	0	1	0	0	0	0	0,034
S ₇	0	0	0	0	1	0	0	0	0,023
S ₈	0	0	0	0	0	1	0	1	0,172
S ₉	0	0	0	0	0	0	1	0	0,057
$C(S_k)$	12	5	6	20	1	10	8	15	
$H(S_k)$	0,443	0,443	0,362	0,999	0,158	0,662	0,315	0,662	
$\gamma(S_k)$	0,037	0,089	0,06	0,05	0,158	0,066	0,039	0,044	

Таблица 5

Таблица связей неисправностей и признаков их проявления с рассчитанными значениями H_i и γ_i на II этапе

Неисправность \ Признак неисправности	П ₁	П ₂	П ₃	П ₄	П ₆	П ₇	П ₈	$P(S_k)$
S ₁	1	0	0	0	0	0	0	0,094
S ₂	0	1	0	0	0	0	0	0,094
S ₃	0	0	1	0	0	0	0	0,071
S ₄	0	0	0	1	0	0	0	0,236
S ₅	0	0	0	1	0	0	0	0,236
S ₆	0	0	0	1	0	0	0	0,035
S ₈	0	0	0	0	1	0	1	0,176
S ₉	0	0	0	0	0	1	0	0,058
$C(S_k)$	12	5	6	20	10	8	15	
$H(S_k)$	0,45	0,45	0,37	0,999	0,671	0,319	0,671	
$\gamma(S_k)$	0,037	0,09	0,062	0,05	0,067	0,04	0,045	

Цена обхода такого дерева равна:

$$C = P(\Pi_{10})C(\Pi_{10}) + P(\Pi_9)C(\Pi_9) + P(\Pi_5)C(\Pi_5) + P(\Pi_6)C(\Pi_6) + P(\Pi_1)C(\Pi_1) + P(\Pi_7)C(\Pi_7) = 1 \cdot 2 + 0,87 \cdot 2 + 0,64 \cdot 1 + 0,62 \cdot 10 + 0,34 \cdot 8 = 13,3.$$

Нельзя, однако, утверждать, что полученный алгоритм поиска неисправностей является оптимальным.

Необходимо найти такие алгоритмы диагностирования (условный и упорядоченный), чтобы среднее

время, затраченное на их реализацию, было бы минимальным. Это связано с тем, что все проверки выполняются на одном оборудовании, т. е. стоимость использования оборудования будет одинаковой, а, следовательно, стоимость реализации алгоритма будет зависеть только от времени его выполнения.

Рассмотрим постановку задачи формализации синтеза оптимальных алгоритмов диагностирования ДГУ и ДД в общем случае [14].

Таблица 6

Таблица связей неисправностей и признаков их проявления с рассчитанными значениями H_i и γ_i на VI этапе

Неисправность / Признак неисправности	П4	П7	П8	$P(S_k)$
S4	1	0	0	0,418
S5	1	0	0	0,418
S6	1	0	0	0,062
S9	0	1	0	0,103
$C(S_k)$	20	8	15	
$H(S_k)$	0,475	0,478	0	
$\gamma(S_k)$	0,024	0,06	-	

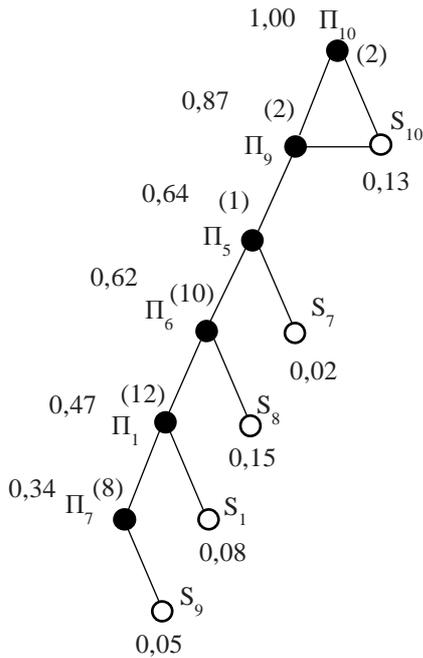


Рис. 2. Алгоритм поиска неисправностей, построенный по информационному методу

Для условного оптимального алгоритма диагностирования функциональное уравнение имеет следующий вид [15; 16]:

$$C(S_k) = \min_{\pi_i \in \Pi_k} [C_i + P(S_{ki}^0)C(S_{ki}^0) + P(S_{ki}^1)C(S_{ki}^1)],$$

где $i = 1, 2, \dots, m$ (m возможных проверок); $C(S_k)$ — минимальная стоимость диагностирования состояния системы, имеющей подмножество состояний S_k ; C_i — стоимость выполнения проверки π_j ; S_{ki}^0 — подмно-

жество состояний, в которое входят проверки π_i , т. е. состояния из S_k , для которого π_j имеет отрицательный исход; $C(S_{ki}^0)$ — средняя стоимость диагностирования состояния системы при условии, что это состояние входит в S_{ki}^0 ; S_{ki}^1 — подмножество состояний, в которое входят проверки π_j , т. е. состояния из S_k , для которого π_j имеет положительный исход; $C(S_{ki}^1)$ — средняя стоимость диагностирования состояния системы при условии, что это состояние входит в S_{ki}^1 ;

$$P(S_{ki}^0) = \frac{\sum_{S_t \in S_{ki}^0} P(S_t)}{\sum_{S_t \in S_{ki}} P(S_t)}$$
 — вероятность отрицательного исхода проверки π_i ; S_t — одно из состояний системы, входящих в множество $S = \{S_t\}$, $t = 1, 2, \dots, n$ возможных состояний системы; $P(S_{ki}^1) = 1 - P(S_{ki}^0)$ — вероятность положительного исхода проверки π_j .

Для упорядоченного оптимального алгоритма диагностирования имеем следующие уравнения динамического программирования при $r = 1$, $C_j = C(\Pi_r)$ для любой, $\pi_j \in \Pi_r$ при $r = 2$:

$$C(\Pi_r) = \min_{\pi_j \in \Pi_k} (C(\Pi_r/\pi_j) + C_j q(\Pi_r/\pi_j)),$$

где $\Pi_2 = \{\pi_j\}$, $j = 1, 2, \dots, r$ ($r \leq m$) — некоторое подмножество проверок из Π ;

$$q = \Pi_r/\pi_j = 1 - \sum_{S_t \in S_r} P(S_t);$$

$C(\pi_r)$ — средняя стоимость оптимальной упорядоченной программы диагностирования;
 $C(\Pi_r/\pi_j)$ — стоимость выполнения программы при исключении из нее проверки π_j ;
 S_{rj} — подмножество состояний, которые определены после выполнения всех проверок из Π_r/π_j .

Вывод

Эвристическое программирование позволяет расширить класс задач поиска неисправностей, решаемых с помощью ЦВМ. Эвристические программы позволяют решать задачи поиска неисправностей более высокой размерности благодаря использованию способов сокращения перебора, учитывающих опыт человека в решении подобных задач. В настоящее время создано большое число эвристических программ частного и общего характера для решения определенных классов задач. В тех случаях, когда удается найти подходящие «эвристики», понижающие размерность задачи управления, эвристические программы оказываются эффективнее методов математического программирования [1].

Следует также отметить, что ЭПД ПО — это бесконечно развивающиеся программы, которые уже в ближайшее время могут не только выполнять функции системы интеллектуальной поддержки в процессе

формирования диагноза и прогноза технического состояния ПО, но и успешно конкурировать с опытным оператором-диагностом, а также оказывать существенную помощь в обучении специалистов и студентов в области практической диагностики ПО [2].

Таким образом, на основе сформированных ТС ЭПД ДГУ и ДД, которые связывают признаки проявления с неисправностями, становится возможным:

1. Реализовать принцип системности при формировании диагноза.
2. Оптимизировать стратегию поиска неисправности.
3. Сформировать систему интеллектуальной поддержки формально-логических и интуитивных методов диагностики, которая сможет конкурировать с достаточно опытными специалистами.

Литература

1. Клыкков Ю.И. Ситуационное управление большими системами. М.: Энергия, 1974. 136 с.
2. Клыкков Ю.И. Семиотические методы управления в больших системах. М.: МДНТП, 1971. С. 67-81.
3. Клыкков Ю.И. Ситуационная модель управления большой системой // Изв. АН СССР. Сер. Техн. кибернетика. 1970. № 6. 134 с.
4. Поселов Д.А., Клыкков Ю.И. Ситуационное управление в АСУ // Управляющие системы и машины. 1972. № 1. С. 27-44.
5. Лузгин В.В. Структура, формирование и функционирование эвристических программ диагностирования промышленных объектов // Вестн. МАДИ (ГТУ). 2009. Вып. 4 (19). С. 25-29.
6. Лузгин В.В., Ульянов А.Д. Перспективные методы и алгоритмы диагностирования аналоговых промышленных объектов: научное издание // Труды Братского государственного университета. 2013. Т. 1. С. 225-231.
7. Ефанов Д.В. Построение оптимальных алгоритмов поиска неисправностей в технических объектах. СПб.: ПГУПС, 2014. 49 с.
8. Павлов А.Н. Теория вопросников и системы обучения поиску неисправностей в устройствах сигнализации, централизации и блокировки // Теоретические и практические аспекты развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики. СПб.: ПГУПС, 2012. Вып. 1. С. 98-104.
9. Перникис Б.Д., Ягудин Р.Ш. Предупреждение и устранение неисправностей в устройствах СЦБ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1994. 254 с.
10. Ефанов Д.В. Оптимизация алгоритмов диагностирования технических объектов на основе комплексного использования информационного подхода и методов теории вопросников // Изв. КГТУ. 2012. № 26. С. 96-103.
11. Синдеев И.М. К вопросу о синтезе логических схем для поиска неисправностей и контроля состояния сложных систем // Изв. акад. наук СССР. Сер. Техн. кибернетика. 1963. № 2. С. 22-28.
12. Шеннон К.Э. Математическая теория связи // Bell System. 1948. Т. 27. С. 379-423.
13. Верзаков Г.Ф., Киншт А.В., Рабинович В.И., Тамонен Л.С. Введение в техническую диагностику. М.: Энергия, 1968. 254 с.

14. Лузгин В.В., Басенко В.Н. Прикладные задачи синтеза оптимальных алгоритмов диагностирования // Технические средства и системы управления производственными процессами: межвуз. сб. Братск: БрИИ, 1991. С. 89-101.

15. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М.: Наука, 1965. 460 с.

16. Лузгин В.В., Панасов В.В., Витковский С.Л. Прикладные задачи синтеза оптимальных стратегий поиска неисправностей в промышленных объектах диагностики // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2007. Т. 2. С. 137-144.

References

1. Klykov Yu.I. Case management of large systems. M.: Energiya, 1974. 136 p.
2. Klykov Yu.I. Semiotics methods of management in big systems. M.: MDNTP, 1971. P. 67-81.
3. Klykov Yu.I. Situation-dependent model of control of big system // Izv. AN SSSR. Ser. Tekhn. kibernetika. 1970. № 6. 134 p.
4. Poselov D.A., Klykov Yu.I. Situation-dependent control in ACS // Upravlyayushchie sistemy i mashiny. 1972. № 1. P. 27-44.
5. Luzgin V.V. Structure, forming and functioning of heuristic program of diagnosis industrial objects // Vestn. MADI(GTU). 2009. Vyp. 4 (19). P. 25-29.
6. Luzgin V.V., Ulyanov A.D. Perspective methods and algorithms of diagnosing of analog industrial facilities: scientific publication // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. 2013. T. 1. P. 225-231.
7. Efanov D.V. Construction of optimal search algorithms fault in technical objects. SPb.: PGUPS, 2014. 49 p.
8. Pavlov A.N. Theory questionnaires and training system troubleshooting signaling devices, centralization and blocking // Theoretical and practical aspects of the development of railway automation and remote control systems. SPb.: PSTU, 2012. Vol. 1. P. 98-104.
9. Pernikis B.D., Yagudin R.Sh. Warning and fault in the signaling SCB devices. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Transport, 1994. 254 p.
10. Efanov D.V. Optimization algorithms for diagnosing technical objects based on an integrated use of information and methods of approach and questionnaires theory // KSTU News. 2012. № 26. P. 96-103.
11. Sindeev I.M. On Synthesis of logic circuits for troubleshooting and status monitoring of complex systems // Izv. akad. nauk SSSR. Ser. Tekhn. kibernetika. 1963. № 2. P. 22-28.
12. Shannon K.E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System. 1948. T. 27. P. 379-423.
13. Verzakov G.F., Kinsht A.V., Rabinovich V.I., Tamonen L.S. Introduction to technical diagnostics. M.: Energiya, 1968. 254 p.
14. Luzgin V.V., Basenko V.N. Applications synthesis of optimal algorithms diagnosis // Tekhnicheskie sredstva i sistemy upravleniya proizvodstvennymi protsessami: mezhvuz. sb. Bratsk: BrII, 1991. P. 89-101.
15. Bellman R., Dreifus S. Applications synthesis of optimal algorithms diagnosis. M.: Nauka, 1965. 460 p.
16. Luzgin V.V., Panasov V.V., Vitkovskii S.L. Application-oriented tasks of synthesis of optimum strategy of fault finding in diagnosis industrial objects // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2007. T. 2. P. 137-144.