

УДК 669 : 02/09 : 658.58

А.Ю. СОКОЛОВ

Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАИ», Україна

МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ ПОДХОД В ЗАДАЧАХ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Статья посвящена решению задачи технической диагностики сложных распределенных систем. Исследуются диагностические модели в виде набора правил «симптом-дефект» при условии, когда необходимо учитывать время на проверку наличия дефектов. При этом возникает задача оптимизации проверок наименьшего множества дефектов, что обеспечивает минимизацию времени на все проверки. Для организации распределенного контроля и диагностики состояния системы применяется мультиагентная технология. Задача технической диагностики может быть сформулирована и решена как в случае бинарной логики, так и в нечеткой постановке.

модель «симптом-дефект», агент, диагностика

1. Модели «Симптом-дефект» и «Агент-дефект»

Пусть $F = \{f_l\}_{l=1}^{N_F}$ и $S = \{s_m\}_{m=1}^{N_S}$ определяют множества возможных отказов и симптомов соответственно. Тогда существует многозначное отображение

$$\Psi : S \rightarrow F, \quad (1)$$

которое можно представить в виде бинарной либо нечеткой *диагностической матрицы* (табл. 1), отражающей влияние симптомов и дефектов в виде логических значений $I = \{0,1\}$ [1]. В случае нечеткой диагностической матрицы $I = [0,1]$.

Таблица 1

Структура бинарной диагностической матрицы

S/F	f_1	...	f_{N_F}
s_1	1	...	0
...	0	...	1
s_{N_S}	1	...	1

Табл. 1 может быть представлена в виде набора продукций, отражающих причинно-следственные отношения связи наблюдаемых симптомов и порождающих их дефектов, например,

IF s_1 is True AND s_4 is True THEN f_3 is True.

Отображение «симптом-дефект» является двунаправленным ориентированным графом, в котором каждый дефект непосредственно связан с прояв-

ляющимися в этом случае симптомами и наоборот. Обычно методы диагностики решают задачу определения дефектов, используя отображение «симптом-дефект». В задаче моделирования системы, напротив, задается отображение «дефект-симптом».

Такой способ организации взаимосвязи удобен для формализации опыта оператора, специализирующегося на диагностике технической системы, но также может быть использован для формализации диагностических знаний в области медицины, экономики, социологии.

В настоящей работе предлагается дополнить данную систему множеством агентов, ответственных за наблюдаемыми симптомами. Распределение системы на агентное представление, как правило, осуществляется по физическому принципу разделения системы на подсистемы [3, 5].

Агентное представление в задачах диагностики позволяет осуществлять диагностику распределенных систем, учитывая активность агентов в выдвижении гипотез о возможных дефектах и возможность их общения с целью минимизации множества возможных дефектов в ответственных подсистемах. Агентный подход с использованием нечеткой логики позволяет также выдвигать гипотезы о возможных дефектах не только после выявления симптома, но и на начальной стадии изменений, когда нет полной уверенности в том или ином развитии симптома.

Спектр задач діагностики при агентном підході можна сформулювати так [1]:

- (1) обнаружить максимально возможное множество дефектов;
- (2) обнаружить дефекты как можно быстрее;
- (3) выделить минимальное подмножество дефектов, послуживших причиной проявившихся симптомов;
- (4) исключить ложные дефекты.

В данной статье рассматривается задача диагностики в смысле задачи (3). При этом если время на тестирование одинаково для всех дефектов, задачи (3) и (2) совпадают.

Для решения задачи введем в рассмотрение множество диагностических распределенных агентов.

Пусть задано множество агентов $A = \{a_i\}_{i=1}^{N_A}$, $N_A \leq N_F$ и существует отображение

$$\xi : A \rightarrow F, \tag{2}$$

удовлетворяющее следующим условиям:

$$\begin{aligned} \xi(A) &= F; \\ \forall i, j \neq i \in N_A \quad \xi(a_i) &\neq \xi(a_j); \\ \forall i, j \neq i \in N_F \quad \xi^{-1}(f_i) &= \xi^{-1}(f_j). \end{aligned}$$

Это означает, что каждый агент ответственен за несколько дефектов, а один дефект распознается только одним агентом. Способ, по которому множество F распределяется по агентам A является возлагается на эксперта предметной области.

Отображение (2) можно представить в виде бинарной либо нечеткой **матрицы ответственности** агентов (табл. 2).

Таблица 2
Бинарная матрица ответственности

A / F	f_1	...	f_{N_F}
a_1	1	...	0
...	0	...	
a_{N_A}	0	...	1

2. Мультиагентная диагностическая модель

Прежде всего, необходимо определить механизм информирования агентов A о наблюдаемых сим-

птомах S . Это можно задать в виде нового отображения $\vartheta : S \rightarrow A$ либо передачи агенту информации в виде логического выражения, получаемого из диагностической матрицы от менеджера процесса диагностики.

Предположим, что все агенты получают информацию о дефектах из диагностической матрицы.

Пусть $S_O \subseteq S$ есть подмножество симптомов, наблюдаемых системой агентов.

Тогда из диагностической матрицы (1) можно сформировать **диагностическую гипотезу** - логическое выражение в конъюнктивной нормальной форме, то есть из $\psi|_{S_O} : S \rightarrow F$ можно определить

$$\sigma = \bigvee_{i=1}^{D(S_O)} \left(\bigwedge_{j \in C_i(S_O)} f_j \right), \tag{3}$$

где $D(S_O)$ - количество дизъюнкций; $C_i(S_O)$ - множество индексов i -й конъюнкции.

Формула (3) задает минимальное количество дизъюнкций дефектов, являющихся причиной проявления наблюдаемых симптомов, то есть являются необходимым условием обеспечения S_O из диагностической матрицы. Очевидно, что достаточное условие σ_{full} является избыточным с точки зрения задачи диагностирования и не рассматривается на практике.

Тогда задача оптимизации может быть сформулирована следующим образом: найти минимальное подмножество дефектов $F_0 \subset F$ для которых диагностическая гипотеза (3) при наблюдаемых симптомах S_O сохраняется истинной:

$$card(F_0 \in F | \sigma(F_0) = true) \rightarrow \min. \tag{4}$$

Теперь можно сформулировать задачу **уточнения дефектов** в терминах кооперативной логики. Согласно [4] кооперативная логика - это логика, позволяющая проводить рассуждения а коалиции агентов, и оценивать силу коалиции.

Системы коалиционной логики базируются на понятии кооперативной модальности: унарного модального оператора, индексированного множест-

вом агентов, которые используются для представления факта, что данное множество агентов может кооперироваться таким образом, что делает **истинным** логическое выражение, являющееся аргументом оператора.

В коалиционной логике, например, формула $[1, 2](p \wedge q)$ выражает факт, что коалиция агентов $\{1, 2\}$ может кооперироваться так, что формула $(p \wedge q)$ будет истинной.

Ключевая идея применения коалиционной логики в мультиагентной диагностике отказов заключается в том, что каждый агент должен проверить множество дефектов, определяемых отображением (2).

Стратегия выбора дефектов агентом позволяет оптимизировать общее время на проверку истинности (4). Способность к созданию коалиции позволяет также избежать ненужных проверок.

Рассмотрим множество дефектов как множество пропозициональных логических переменных, имеющих значения *true* или *false*.

Тогда можно ввести в рассмотрение коалиционную логику вида

$$M = \langle A, F, Af_1, \dots, Af_{N_A}, \theta \rangle, \quad (5)$$

где $A = \{a_i\}_{i=1}^{N_A}$ – конечное не пустое множество агентов; $F = \{f_l\}_{l=1}^{N_F}$ – конечное не пустое множество дефектов (пропозициональных переменных); Af_1, \dots, Af_{N_A} – распределение F по элементам из A , подразумевая, что Af_i есть подмножество F , находящееся под управлением $a_i \in A$; $\theta: F \rightarrow \{true, false\}$ – пропозициональная логическая функция, определяющая начальное логическое значение каждой пропозициональной переменной (как правило, заранее не известно о наличии дефектов, поэтому начальное значение равно *false*).

Также верно

$$F = \bigcup_{i=1}^{N_A} Af_i,$$

т.е. каждый дефект контролируется некоторым

агентом, и $Af_i \cap Af_j = \emptyset$ для $a_i \neq a_j \in A$. Так что нет дефектов, контролируемых более чем одним агентом.

В задаче диагностики дефектом мы полагаем, что начальное истинностное значение всех дефектов из F равно *false*.

Пусть C – коалиция агентов из множества A , то есть $C \subseteq A$. Тогда можно определить F_C для

$$\bigcup_{a_i \in C} Af_i.$$

Имея модель (5) и коалицию C в M , определим оценку C как функцию:

$$\theta_C: F_C \rightarrow \{true, false\}.$$

Тогда оценка C – это функция, которая задает истинностные значения пропозициональным переменным, управляемым членами коалиции C . В задаче диагностики оценка C означает проверку наличия дефектов соответствующим агентом (тестирование дефекта за определенное время).

Пусть $M \oplus \theta_C$ представляет собой модель, идентичную модели M за исключением значений, назначенных функцией оценки θ_C участников коалиции C .

Тогда имея модель $M = \langle A, F, Af_1, \dots, Af_{N_A}, \theta \rangle$ и

формулу $\sigma = \bigvee_{i=1}^{D(S_O)} \left(\bigwedge_{j \in C_i(S_O)} f_j \right)$ можно записать об-

щую диагностическую задачу (d -задачу) $M \models^d \sigma$ как выражение того, что σ удовлетворяется (т.е. имеет значение *true*) в M . В соответствии с общей модальной логикой правило для отношения \models^d следующие:

- $M \models^d T$;
- $M \models^d f$ если $\theta(f) = true$ (где $f \in F$);
- $M \models^d \neg \phi$ если $M \not\models^d \phi$;
- $M \models^d \phi \vee \psi$ если $M \models^d \phi$ или $M \models^d \psi$;

- $M \models^d \diamond_C \varphi$ если существует оценка θ_C для коалиции C такая, что $M \oplus \theta_C \models^d \varphi$.

В терминах модальной логики задача диагностики теперь формулируется следующим образом: для модели $M = \langle A, F, Af_1, \dots, Af_{N_A}, \theta \rangle$ и формулы

$$\sigma = \bigvee_{i=1}^{D(S_O)} \left(\bigwedge_{j \in C_i(S_O)} f_j \right)$$

необходимо найти минимальную коалицию агентов $C \subseteq A$, для которой $M \models^d \diamond_C \sigma$ остается истинной. Тогда задача оптимизации формулируется как

$$card \left(F_C \in F \mid M \models^d \diamond_{C(F_C)} \sigma \right) \rightarrow \min. \quad (6)$$

В настоящем исследовании мы предполагаем, что все дефекты равновероятны, независимы и равнозначны.

Пусть $F_C = \{F_{pos}, F_{neg}, F_{rest}\}$, где F_{pos} – множество дефектов, действительно имеющих место, подтвердившихся проверкой соответствующим агентом и приводящих к наблюдаемым симптомам S_O ; F_{neg} – множество дефектов, проверенных агентами, но не подтвердившихся; F_{rest} – оставшееся множество дефектов, не проверенных агентами, но способных быть причиной симптомов S_O в соответствии с диагностической матрицей (1). Если время для проверки одного дефекта равно t_f , то максимальное время, затраченное на проверку, равно

$$T_S = t_f \cdot card(F_{pos} \cup F_{neg}). \quad (7)$$

При распараллеливании процесса проверки дефектов за счет мультиагентного подхода общее время T_{MA}

$$T_{MA} \leq T_S.$$

В худшем случае $T_{MA} = T_S$, если $T_{MA} = t_f \cdot \max_{i=1, \dots, N_A} card(Af_i)$ и существует $Af_i = \{F_{pos} \cup F_{neg}\}$. Минимальное же время при мультиагентном подходе может быть $T_{MA} = t_f$, ес-

ли количество агентов совпадает с количеством дефектов F_C . Таким образом, $t_f \leq T_{MA} \leq T_S$.

Очевидно, что одним из главных преимуществ мультиагентного подхода является параллельность проверок дефектов и возможность взаимодействия агентов с целью исключения ненужных проверок.

Для организации взаимодействия агентов предлагается следующий протокол обмена информацией. Каждый агент принимает решение о необходимости проверки дефектов в соответствии с текущей ситуацией в смысле возможного влияния на истинность формулы σ . **Каждый агент выбирает такой дефект для проверки, чтобы формула σ стала истинной как можно скорее.**

При этом все агенты получают формулу σ для проверки.

На первом шаге агенты информируют друг друга, какие дефекты они планируют проверять. На следующем шаге результат проверки в виде истинностных значений пропозициональных переменных передается менеджеру диагностирования для оценки формулы σ . Если консенсус текущей коалиции не достигнут, (результат для формулы σ *false*), формула σ редуцируется в соответствии с текущими значениями проверенных дефектов и процесс повторяется.

Мы предполагаем, что все агенты проверяют дефекты одновременно за один шаг и на следующем шаге они обмениваются сообщениями о результатах проверки. Эта процедура повторяется до достижения консенсуса. Очевидно, что предлагаемая процедура конечна при условии достоверности наблюдаемых симптомов и истинности диагностической матрицы.

Блок-схема процедуры диагностирования приведена на рис. 1.

Пусть $C = \{a_{1C}, \dots, a_{N_C}\}$ – множество агентов, ответственных за σ . Для каждого агента a_{jC} сущест-

вует множество соответствующих дефектов $Af_{jC} = \{f_{1C}, \dots, f_{N_C}\} \subset F$.

Рассмотрим следующую эвристическую рекуррентную процедуру выбора дефектов, подлежащих проверке, из каждого элемента из $F_C = \{Af_{1C}, \dots, Af_{N_C}\}$.



Рис. 1. Алгоритм процедуры достижения консенсуса коалицией агентов

Пусть $\sigma_0 = \bigvee_{i=1}^{D_0} \left(\bigwedge_{j \in C_i^0} f_j \right)$ – исходная формула (3),

где $D_0 = D(S_0)$ – количество дизъюнктов в формуле; $C_i^0 = C_i(S_0)$ – множество индексов в i -й конъюнкции. Пусть $F_0 = \{F_{1C}^0, \dots, F_{N_C}^0\} = F_C$ – множество возможных дефектов, явившихся причиной наблюдаемых симптомов, распределенных по агентам из C . Далее мы предлагаем процедуру, применяемую ко всем агентам Ag для $C = \{a_{1C}, \dots, a_{N_C}\}$ на k -м шаге одновременно.

Назовем ее **α -процедурой**.

1. Уточнить $\sigma_k = \bigvee_{i=1}^{D_k} \left(\bigwedge_{j \in C_i^k} f_j \right)$ в соответствии с

результатами проверки дефектов на предыдущей итерации и сократить выражение за счет удаления избыточных и ложных конъюнкций.

2. Если $F_{Ag}^k \neq \emptyset$, то выбрать один дефект f_{Ag}

из F_{Ag}^k , принадлежащий конъюнкции из (3) с минимальным количеством элементов $\min \text{card}(C_i^k)$.

Если таких конъюнкций несколько, воспользоваться случайным выбором. Пусть $F_{Ag}^{k+1} = F_{Ag}^k \setminus f_{Ag}$, иначе остановка для процесса проверки текущим агентом.

3. Проверить f_{Ag} и установить надлежащее значение $f_{Ag} = \{true, false\}$.

4. Установить глобальное состояние $k = k + 1$ и перейти к пункту 1.

Предлагаемый алгоритм является сходящимся ввиду априорной достоверности множества симптомов, диагностической матрицы и итерационной процедуры редуцирования множества возможных дефектов.

Предлагаемую процедуру можно модифицировать за счет последовательного, а не параллельного опроса агентов. В кооперативной логике такая модель называется β -коалицией в противоположность к α -коалиции, рассмотренной выше [5].

Предлагаемая далее **β -процедура** имеет вид:

1. Определить $\sigma_k = \bigvee_{i=1}^{D_k} \left(\bigwedge_{j \in C_i^k} f_j \right)$ для предыду-

щего шага или после модификации текущего шага.

2. Если $F_{Ag}^k \neq \emptyset$, то выбрать один дефект f_{Ag} из F_{Ag}^k , принадлежащий конъюнкции из (3) с мини-

мальным количеством элементов $\min \text{card}(C_i^k)$. Если таких конъюнкций несколько, воспользоваться случайным выбором. Пусть $F_{Ag}^{k+1} = F_{Ag}^k \setminus f_{Ag}$, иначе остановка для процесса проверки текущим агентом.

3. Если $\min \text{card}(C_i^k) = 1$ и $F_{Ag}^{k+1} = \emptyset$, то установить $f_{Ag} = true$ без проверок

иначе проверить f_{Ag} и установить подходящее значение $f_{Ag} = \{true, false\}$.

4. Уточнить $\sigma_k^{\text{mod}_{Ag}} = \bigvee_{i=1}^{D_k} \left(\bigwedge_{j \in C_i^k} f_j \right)$.

В соответствии со значением $f_{Ag} = \{true, false\}$ и сократить выражение за счет удаления избыточных и ложных конъюнкций.

Послать следующему агенту из $C = \{a_{1C}, \dots, a_{NC}\}$ модифицированную формулу $\sigma_k^{mod.Ag}$ и перейти к пункту 1. Если указанный агент – последний в списке, установить $\sigma_{k+1} = \sigma_k^{mod.Ag}$.

5. После окончательной проверки (3) для всех агентов коалиции установить глобальное состояние $k = k + 1$ и перейти к пункту 1.

Шаг 4 предусматривает определение очереди агентов для проверки информации. Эта очередь может быть организована как:

- список $C = \{a_{1C}, \dots, a_{NC}\}$;
- случайным образом;
- в обратном порядке к мощности множеств из in
 $F_k = \{F^k_{1C}, \dots, F^k_{NC}\}$.

Проиллюстрируем результаты теоретических исследований несколькими примерами.

Пример 1.

Пусть задана следующая диагностическая матрица

S/F	f_1	f_2	f_3	f_4
s_1			1	
s_2	1	1		
s_3		1	1	1
s_4			1	
s_5	1	1		

Пусть $S_O = \{s_2, s_3, s_5\}$ – наблюдаемые симптомы.

В соответствии с (3) имеем

$$\sigma = f_2 \vee (f_1 \wedge f_4), \quad \text{и} \quad D(S_O) = 2,$$

$$C_1(S_O) = \{2\}, \quad C_2(S_O) = \{1, 4\},$$

$$\sigma_{full} = f_2 \vee (f_1 \wedge f_4) \vee (f_2 \wedge f_1) \vee (f_2 \wedge f_4) \vee (f_2 \wedge f_1 \wedge f_4).$$

Пример 2.

Рассмотрим пример системы трех баков с жидкостью (рис. 2).

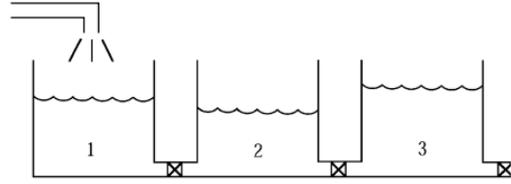


Рис. 2. Система трех баков
 Возможные дефекты представлены в следующей табл. 3.

Таблица 3
 Возможные дефекты

f_k	Описание дефекта
f_1	Дефект датчика потока F
f_2	Дефект датчика уровня L_1
f_3	Дефект датчика уровня L_2
f_4	Дефект датчика уровня L_3
f_5	Дефект управляющего крана U
f_6	Дефект управляющего клапана
f_7	Дефект насоса
f_8	Недостаток входного потока жидкости
f_9	Частичное засорение канала между баками Z_1 и Z_2
f_{10}	Частичное засорение канала между баками Z_2 и Z_3
f_{11}	Частичное засорение канала выхода системы
f_{12}	Утечка жидкости из бака Z_1
f_{13}	Утечка жидкости из бака Z_2
f_{14}	Утечка жидкости из бака Z_3

Предположим, что наличие дефектов определяется с использованием пяти симптомов, определяемых из уравнений описания физических процессов для системы трех баков [2]:

$$A_1 \frac{dL_1}{dt} = F - Q_{12} = F - \alpha_{12} S_{12} \sqrt{2g(L_1 - L_2)};$$

$$A_2 \frac{dL_2}{dt} = Q_{12} - Q_{23} = \alpha_{12} S_{12} \sqrt{2g(L_1 - L_2)} - \alpha_{23} S_{23} \sqrt{2g(L_2 - L_3)};$$

$$A_3 \frac{dL_3}{dt} = Q_{23} - Q_3 = \alpha_{23} S_{23} \sqrt{2g(L_2 - L_3)} - \alpha_3 S_3 \sqrt{2gL_3},$$

где F означает входной поток, Q_{12}, Q_{23}, Q_3 – потоки жидкости, текущие между баками и на выходе системы; A_1, A_2, A_3 – площади сечения в баках; $\alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_3$ – коэффициенты потока; S_{12}, S_{23}, S_3 –

площади сечений в каналах между баками. Эти уравнения задают баланс потоков в баках и являются результатом применения уравнений Бернулли.

Пусть $S = \{s_i\}_{i=1}^{N_S=5}$.

Представим следующую диагностическую матрицу [2]:

S/F	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}
s_1	1				1	1	1	1						
s_2	1	1	1						1			1		
s_3		1	1	1					1	1			1	
s_4			1	1						1	1			1
s_5	1	1	1	1							1	1	1	1

Создадим агентов, ответственных за дефекты. В соответствии с общей методологией «Топологическая декомпозиция системы является ключом для назначения диагностических агентов элементарному физическому процессу без анализа информационных потоков и построения отдельных диагностических моделей». Тогда имеем следующее распределение агентов за дефектами

Элемент системы	Агент	Список дефектов агента
Tank Z_1	a_1	f_2, f_9, f_{12}
Tank Z_2	a_2	f_3, f_{10}, f_{13}
Tank Z_3	a_3	f_4, f_{11}, f_{14}
Pump	a_4	f_1, f_5, f_6, f_7, f_8

Тогда модель $M = \langle A, F, Af_1, \dots, Af_{N_A}, \theta \rangle$ имеет следующую структуру:

$$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}, N_A = 4, F = \{f_1, \dots, f_{14}\},$$

$$Af_1 = \{f_2, f_9, f_{12}\}, Af_2 = \{f_3, f_{10}, f_{13}\},$$

$$Af_3 = \{f_4, f_{11}, f_{14}\}, Af_4 = \{f_1, f_5, f_6, f_7, f_8\},$$

$\theta(f_i) = false, i = \overline{1,14}$ (Мы не имеем априорной информации о дефектах).

Пусть имеет место $S_O = \{s_2, s_3, s_5\}$.

Тогда мы имеем

$$\sigma = f_2 \vee (f_9 \wedge f_{13}) \vee (f_9 \wedge f_{12}) \vee (f_{12} \wedge f_{13}),$$

и $D(S_O) = 4, C_1(S_O) = \{2\}, C_2(S_O) = \{9,13\},$
 $C_3(S_O) = \{9,12\}, C_4(S_O) = \{12,13\}.$

Применим α -процедуру.

В данном случае мы имеем дело с двумя агентами – $C = \{a_1, a_3\}$.

Кроме того,

$$F^0 = \{F_1^0, F_3^0\} = \{\{f_2, f_9, f_{12}\}, \{f_4, f_{11}, f_{14}\}\}.$$

Легко видеть, что в этом случае мы проверили все возможные дефекты из первоначального списка и не получили желаемо выигрыша, за исключением параллельности проверки каждым агентом:

Шаг	Действие	
0	$\sigma_0 = f_2 \vee (f_9 \wedge f_{13}) \vee (f_9 \wedge f_{12}) \vee (f_{12} \wedge f_{13}),$ $C_1^0 = \{2\}, C_2^0 = \{9,13\}, C_3^0 = \{9,12\}, C_4^0 = \{12,13\}$	
0	$Ag = a_1;$ $\min card(C_i^0) = 1;$ $f_{Ag} = f_2;$	$Ag = a_3;$ $\min card(C_i^0) = 2;$ $f_{Ag} = f_{12};$
0	Проверка: $f_2 = false$	Проверка: $f_{12} = true$
1	$\sigma_1 = f_9 \vee f_{13},$ $C_1^1 = \{9\}, C_2^1 = \{13\}$	
1	$Ag = a_1;$ $\min card(C_i^0) = 1;$ $f_{Ag} = f_9;$	$Ag = a_3;$ $\min card(C_i^0) = 1;$ $f_{Ag} = f_{13};$
1	Проверка: $f_9 = false$	Проверка: $f_{13} = true$

Применим теперь β - процедуру.

Шаг	Действие
0	$\sigma_0 = f_2 \vee (f_9 \wedge f_{13}) \vee (f_9 \wedge f_{12}) \vee (f_{12} \wedge f_{13}),$ $C_1^0 = \{2\}, C_2^0 = \{9,13\}, C_3^0 = \{9,12\}, C_4^0 = \{12,13\}$
0	$Ag = a_1; \min card(C_i^0) = 1; f_{Ag} = f_2;$ Проверка: $f_2 = false$
0	$\sigma_0^{mod_{a_1}} = (f_9 \wedge f_{13}) \vee (f_9 \wedge f_{12}) \vee (f_{12} \wedge f_{13}),$ $C_1^{0mod_{a_1}} = \{9,13\}, C_2^{0mod_{a_1}} = \{9,12\}, C_3^{0mod_{a_1}} = \{12,13\}$
0	$Ag = a_3; \min card(C_i^0) = 2;$ $f_{Ag} = f_{12};$ Проверка: $f_{12} = true$
1	$\sigma_1 = f_9 \vee f_{13}, C_1^1 = \{9\}, C_2^1 = \{13\}$
1	$Ag = a_1; \min card(C_i^0) = 1;$ $f_{Ag} = f_9;$ Проверка: $f_9 = false$
1	$\sigma_1^{mod_{a_1}} = f_{13}$
1	$Ag = a_3; \min card(C_i^0) = 1;$ $f_{Ag} = f_{13};$ Установить: $f_{13} = true$

Применение β -процедуры в этом случае уменьшило количество проверяемых дефектов в три раза и один раз вместо проверки значение дефекта было установлено логическим путем.

Выводы

Благодаря распределенному характеру дефектов и необходимости учета неопределенности в процессе диагностирования мультиагентный подход представляется достаточно эффективным средством решения задачи диагностики.

Принцип назначения агентов по подсистемам сложной системы представляется естественным и обоснованным.

Локальная база знаний агентов и правила коммуникации позволяют уточнить возможные диагнозы в бинарном или нечетком представлении диагностической матрицы.

В результате предложенного подхода разработана инженерная методика применения мультиагентной модели в решении задачи диагностики отказов.

Литература

1. Isermann R. Fault-Diagnosis Systems // Introduction from FD to FT. – Springer, 2006.
2. Soo Young Eo, Tae Suk Chang, Dongil Shin, En Sup Yoon. Cooperative problem solving in diagnostic agents for chemical processes. Computer & Chemical Engineering 24 (2000) 729. – 734 p.
3. Wooldridge M. An introduction to multi-agent systems. John Wiley&Sons. 2001.
4. Hoek W., Wooldridge M. On the logic of cooperation and propositional control. Artificial intelligence . – 164 (2005). – P. 81-119.
5. Pomeroy B.D., Spang H.A., Dausch M.E. Event-based architecture for diagnosis in control advisory systems // Artificial Intelligence in Engineering. – 1990. – 5. – P. 174-181.

Поступила в редакцию 26.02.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Илюшко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.