УДК 004.052.42

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОДХОДА И МЕТОДОВ ТЕОРИИ ВОПРОСНИКОВ

Д.В. Ефанов

ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения»,
Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9
E-mail: mitriche@yandex.ru

Приведена комплексная технология оптимизации алгоритмов диагностирования технических объектов, основанная на информационном подходе и методах теории вопросников. Предлагается выбор первой проверки на основе информационного подхода, а последовательности следующих проверок – методами теории вопросников. Такая технология оптимизации уменьшает число необходимых вычислений при процедуре построения алгоритмов диагностирования.

техническое диагностирование, алгоритм, энтропия, количество информации, вопросник, динамическое программирование

ВВЕДЕНИЕ

Техническое диагностирование – процесс определения состояния объекта с требуемой полнотой и глубиной обнаружения относительно состава дефектов [1]. Существуют различные методы и алгоритмы составления последовательностей проверок, позволяющие диагностировать объект с учетом различных исходных данных (вероятностей возникновения дефектов, времени и затрат на проверку, эффективности проверки и пр.). Актуальной является задача получения наиболее эффективной последовательности проверок для диагностирования технических объектов, другими словами, задача оптимизации по какому-либо критерию, например, по времени идентификации всех дефектов. Максимальное число критериев и теория вопросников [2, 3] позволяют учитывать информационный метод построения алгоритмов поиска дефектов [4]. При информационном подходе оценивается количество информации, даваемое каждой проверкой. После выбора первой проверки количество информации оценивается относительно оставшихся проверок и так далее до получения оптимальной последовательности. У метода имеется существенный недостаток: достаточно сложные вычисления при определении последовательности второй и последующих проверок. Теория вопросников рассматривает процесс получения оптимальных «деревьев» поиска дефектов (вопросников), вычисления при этом производятся тривиальные, но их количество зависит от используемого метода оптимизации.

Любой алгоритм диагностирования можно представить в виде вопросника. Элементарной проверке в таком случае соответствует вопрос. Чаще всего элементарные проверки известны, но их множество избыточно – в данном случае говорят о том, что рассматриваются так называемые реализуемые вопросники [5]. Методы оптимизации подобных типов вопросников обладают высокой сложностью, ввиду чего их применение на практике ограничено.

В статье приводится технология оптимизации алгоритмов диагностирования, основанная на выборе первого вопроса с применением информационного метода, а также последующей оптимизации получаемых подвопросников методами теории вопросников.

АЛГОРИТМ ВЫБОРА КОРНЕВОГО ВОПРОСА

В процедуре оптимизации вопросников очень важной является постановка первого вопроса. В [6] приведена теория выбора первого вопроса для бинарных вопросников (у таких вопросников каждый вопрос имеет два исхода), на основании которой сформулирован алгоритм метода получения близких к оптимальным вопросников, т.е. метода выбора корневого вопроса. Согласно данной теории в качестве корневого выбирается вопрос, обладающий максимальным отношением цены вопроса (ценой может быть время, затрачиваемое на проверку, эффективность проверки, материальные затраты и пр.) к суммарной вероятности его исхода. Корневой вопрос можно выбирать и иным образом. Приведем метод выбора корневого вопроса на основании информационного подхода. Сам алгоритм дан на рис. 1.

Каждая проверка дает некоторое количество информации I, которое можно оценить на основании формулы Шеннона

$$I(y_k) = H - H(y_k), \qquad (1)$$

где $H = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i$ – максимальная энтропия технического объекта; p_i – относительные веса событий; $H(y_k)$ – средняя условная энтропия состояния объекта после реализации проверки y_k.

Величина $H(y_k)$ вычисляется по формуле [2]:

$$H(y_k) = p(y_k)H(X) + p(\bar{y}_k)H(\bar{X}), \qquad (2)$$

где $H(X), H(\bar{X})$ – энтропии состояния технического объекта после проверки y_k. $H(X)$ характеризует энтропию положительного исхода проверки y_k, а $H(\bar{X})$ – энтропию отрицательного исхода. Данные величины можно вычислить по формулам:

$$\begin{cases} H(X) = -\sum_{i \in X} p_i \log_2 p_i, \\ H(\bar{X}) = H - H(X), \end{cases}$$

где X – множество, характеризующее количество элементов внутренней структуры технического объекта, в которых проверка π_k обнаруживает дефект.

Величины $p(y_k)$ и $p(\bar{y}_k)$ – это вероятности положительного и отрицательного исходов проверки π_k соответственно:

$$\begin{cases} p(y_k) = \sum_{i \in X} p_i, \\ p(\bar{y}_k) = 1 - p(y_k). \end{cases}$$

При определении порядка реализации проверок необходимо учитывать не только количество информации, которое дает каждая проверка, но и время, затрачиваемое на ее реализацию. Введем коэффициент δ:

$$\delta_k = \frac{I(y_k)}{t}. \qquad (3)$$

Первой выбирается та проверка, которая обладает максимальным значением коэффициента δ_k:

$$y^0 = \max\{\delta_1, \delta_2, ..., \delta_n\}. \qquad (4)$$

В формуле (4) n – общее число проверок.

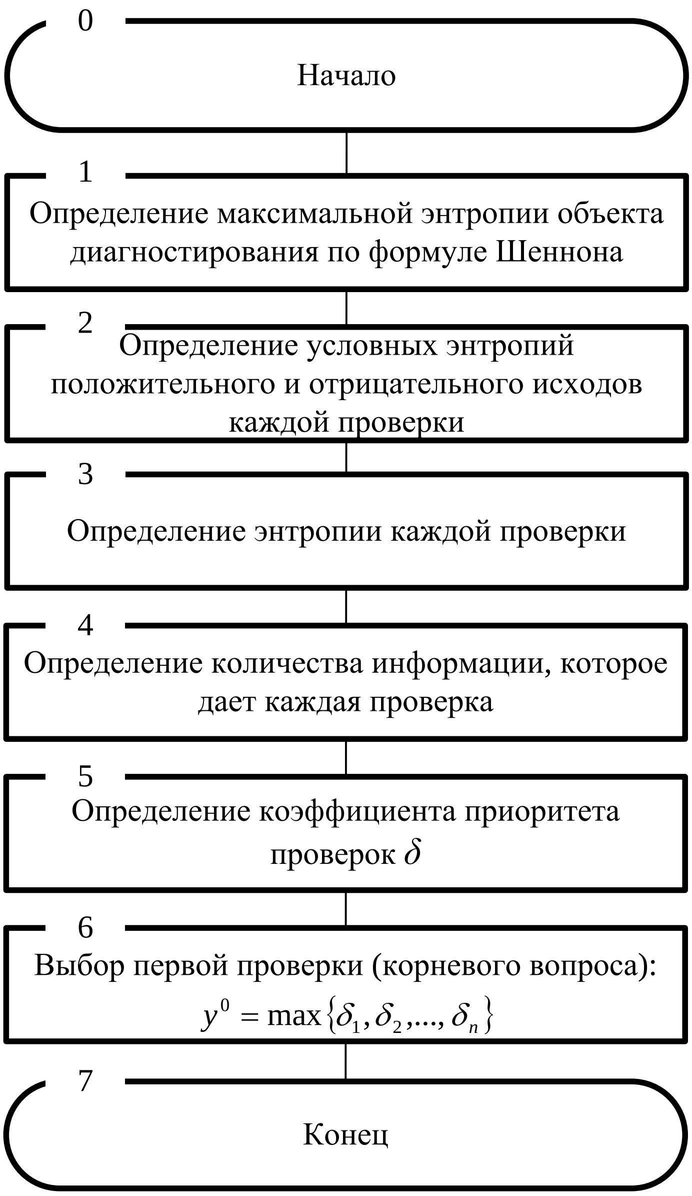

Рис. 1. Алгоритм выбора корневого вопроса
Fig. 1. Algorithm of a choice of a root question

Порядок действий по выбору первой проверки определяется алгоритмом, приведенным на рис. 1.

В результате использования совокупности информационного подхода и известных методов оптимизации вопросников требуется рассмотреть два подвопросника, определяемых отрицательным и положительным исходами корневого вопроса. В дальнейшем их будем обозначать 0 и 1 соответственно.

Пример оптимизации с использованием сочетания информационного подхода и метода динамического программирования

Рассмотрим технический объект, диагностическая модель которого приведена на рис. 2. Объект имеет два входа v_1 и v_2 и один выход. В структуре объекта выделяются пять элементов, соединенных разнообразными связями так, как это указано на рис. 2, при этом выходы элементов u_1 – u_4 одновременно являются входами других элементов структуры, а выход элемента 5 (u_5) – выходом самого технического объекта. Проверка i-го элемента, входы которого одновременно являются выходами других элементов, обеспечивает также проверку этих элементов. К примеру, проверка элемента u_2 означает и проверку элементов u_1 и u_3.

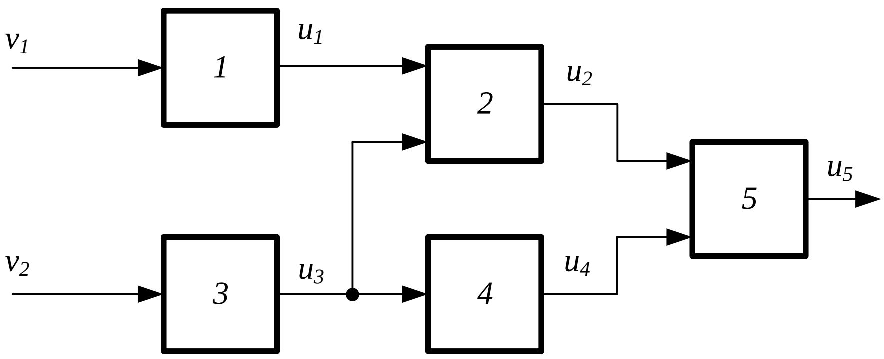

Рис. 2. Диагностическая модель
Fig. 2. Diagnostic model

Предположим, вероятности выхода из строя каждого из элементов структуры рассматриваемого технического объекта различны и описываются следующим множеством $p_1 – p_5$:

$$\{0,20,5\ 0,15\ 0,05\ 0,1\}.$$

Установим «цену» каждой проверки – время, затрачиваемое на идентификацию события отказа/работоспособности технического объекта. Цены идентификации событий определены ниже (данные даны в минутах):

$$\{2\ 3\ 5\ 4\ 1\}.$$

В табл. 1 приводится описание диагностической модели с принятыми исходными данными: в строках таблицы расположены проверки (y_i), в столбцах – проверяемые элементы структуры (x_j). Символом 0 обозначено событие обнаружения дефекта, 1 – событие необнаружения дефекта. Более того, каждому событию поставлена в соответствие вероятность, а каждой проверке – цена. Указанная форма записи исходных данных называется анкетной или матричной.

Таблица 1. Анкета
Table 1. Matrix of questions

Проверки	Идентифицируемые события					$c(y_i)$
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	
y_1	0	1	1	1	1	2
y_2	0	0	0	1	1	3
y_3	1	1	0	1	1	5
y_4	1	1	0	0	1	4
y_5	0	0	0	0	0	1
$p(x_j)$	0,2	0,5	0,15	0,05	0,1	

Поставим задачу выбора оптимальной последовательности производимых проверок в техническом объекте, при которой обеспечивается идентификация всех возможных событий.

Используем алгоритм, приведенный на рис. 1. Результат расчета сведем в табл. 2.

Таблица 2. Выбор корневого вопроса
Table 2. A choice of a root question

Проверки	$t(y_k)$	$H(y_k)$	$I(y_k)$	$\delta(y_k)$
$\boldsymbol{y_1}$	**2**	**1,25994437**	**0,66327531**	**0,33163765**
y_2	3	1,25093427	0,6722854	0,22409513
y_3	5	1,34735533	0,57586434	0,11517287
y_4	4	1,12909413	0,79412554	0,19853139
y_5	1	1,92321967	0	0

Таким образом, реализация первой проверки y_1 является наиболее эффективной. Это и будет корень вопросника. Данная проверка (вопрос) идентифицирует дефект элемента x_1 и оставляет неопознанными дефекты элементов $x_2 - x_5$.

Относительно множества $\{x_2, x_3, x_4, x_5\}$ необходима постановка следующих вопросов. Определим последовательность постановки вопросов методом динамического программирования [4 – 6].

Построение вопросника ведется поэтапно от висячих вершин к корню, при этом осуществляется направленный перебор с выбором на каждом этапе оптимального по цене обхода подвопросника (используется уравнение Беллмана):

$$C_o(L,Y) = \min_{y \in L_n} \left\{ c(y) + \sum_{n=1}^{a(y)} p_n C_o(L_n, Y_n) \right\}, \tag{5}$$

где $p_n = \dfrac{\sum_{x \in L_n} p(x)}{\sum_{x \in L} p(x)}$ – условная вероятность; L_n – подмножества, на которые вопрос y разбивает подмножество событий L.

Прежде всего исключим проверку y_5 (см. табл. 1) – она не дает возможности идентифицировать ни единое событие. Затем найдем все возможные пересечения вопросов, дающие классы разбиений исходного множества дефектов.

y_1: {1}, {2,3,4,5}
y_2: {1,2,3}, {4,5}
y_3: {3}, {1,2,4,5}
y_4: {3,4}, {1,2,5}
$y_1 \cap y_2$: {1}, {2,3}, {4,5}
$y_1 \cap y_3$: {1}, {3}, {2,4,5}
$y_1 \cap y_4$: {1}, {3,4}, {2,5}
$y_2 \cap y_3$: {1,2}, {3}, {4,5}
$y_2 \cap y_4 = y_1 \cap y_2 \cap y_4 = y_1 \cap y_2 \cap y_3 \cap y_4$:
{1}, {2}, {3}, {4}, {5}
$y_3 \cap y_4$: {1,2,5}, {3}, {4}
$y_1 \cap y_2 \cap y_3$: {1}, {2}, {3}, {4,5}
$y_1 \cap y_3 \cap y_4$: {1}, {2,5}, {3}, {4}
$y_2 \cap y_3 \cap y_4$: {1,2}, {3}, {4}, {5}

Получив классы пересечений, заключаем, что следует рассмотреть 13 случаев из возможных 31 для исходной анкеты. Существует несколько классов разбиений по количеству идентифицируемых событий: какое-то количество ситуаций с порядком от первого до четвертого. Последовательно рассматриваются ситуации всех порядков, начиная со второго. Ситуации порядка 1 отбрасываются, так как не несут смысла для процесса идентификации. Выпишем допустимые ситуации второго порядка, анализируя список ситуаций (см. табл. 3). В столбце L^2 представлены все ситуации второго порядка, в столбце y – вопросы, позволяющие идентифицировать дефекты, входящие в ситуацию, в столбце L_n – разбиения ситуации вопросами y, в столбце C_0 – цена оптимального вопроса, а в столбце y_0 – оптимальный вопрос.

Таблица 3. Ситуации второго порядка
Table 3. Situations of the second rank

L^2	y	L_n	C_o	y_o
{4,5}	y_4	{4}, {5}	4	y_4
{1,2}	y_1	{1}, {2}	2	y_1
{3,4}	y_2, y_3	{3}, {4}	3	y_2
{2,3}	y_3, y_4	{2}, {3}	4	y_4
{2,5}	y_2	{2}, {5}	3	y_2

Используя выражение (5), поясним строку {3,4} табл. 3:

$$C_o = \min\{c(y_3); c(y_4)\} = c(y_4) = 4.$$

В табл. 4 представлены все допустимые ситуации третьего порядка.

Таблица 4. Ситуации третьего порядка
Table 4. Situations of the third rank

L^3	y	L_n	C	C_o	y_o
{1,2,3}	y_1	{1}, {2,3}	5,059	5,059	y_1
	y_3	{1,2}, {3}	6,647		
	y_4	{1,2}, {3}	5,647		
{2,4,5}	y_2	{2}, {4,5}	3,923	3,923	y_2
	y_4	{2,5}, {4}	6,769		
{1,2,5}	y_1	{1}, {2,5}	4,25	4,25	y_1
	y_2	{1,2}, {5}	4,75		

Приведем пример расчета для множества строк *{1,2,3}:*

$$C_o = \min\left\{\begin{array}{l} c(y_1) + \dfrac{p_2+p_3}{p_1+p_2+p_3} c_o(y_2,y_3); \\ c(y_3) + \dfrac{p_1+p_2}{p_1+p_2+p_3} c_o(y_1,y_2); \\ c(y_4) + \dfrac{p_1+p_2}{p_1+p_2+p_3} c_o(y_1,y_2) \end{array}\right\} = \min\left\{\begin{array}{l} 2 + \dfrac{0,5+0,15}{0,2+0,5+0,15}4; \\ 5 + \dfrac{0,2+0,5}{0,2+0,5+0,15}2; \\ 4 + \dfrac{0,2+0,5}{0,2+0,5+0,15}2 \end{array}\right\} =$$

$$= \min\{5,059; 6,647; 5,647\} = 5,059.$$

На рис. 3 приводятся подвопросники, оптимально идентифицирующие ситуации третьего порядка.

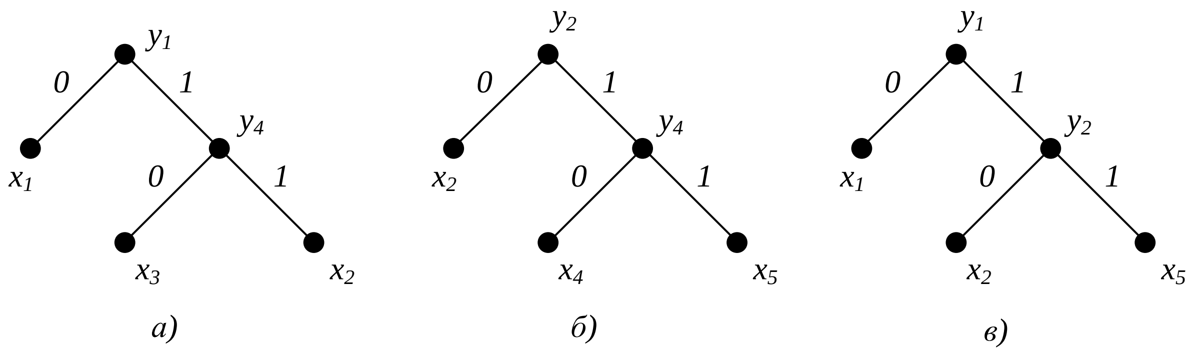

Рис. 3. Оптимальные подвопросники для идентификации ситуаций:
а) {1,2,3}; б) {2,4,5}; в) {1,2,5}
Fig. 3. Optimum questionnaires for identification of situations:
a) {1,2,3}; б) {2,4,5}; в) {1,2,5}

По аналогии с табл. 3, 4 получаются и ситуации последнего, четвертого порядка (таблица и сам расчет здесь не приводятся). Итогом являются два вопросника, оптимальный из которых имеет цену обхода, равную 4,999. Он же является «составляющей» оптимального вопросника для диагностирования исходного технического объекта (рис. 4). Видно также, что для идентификации всех дефектов достаточно трех проверок, выполненных в такой последовательности: y_1, y_2, y_4.

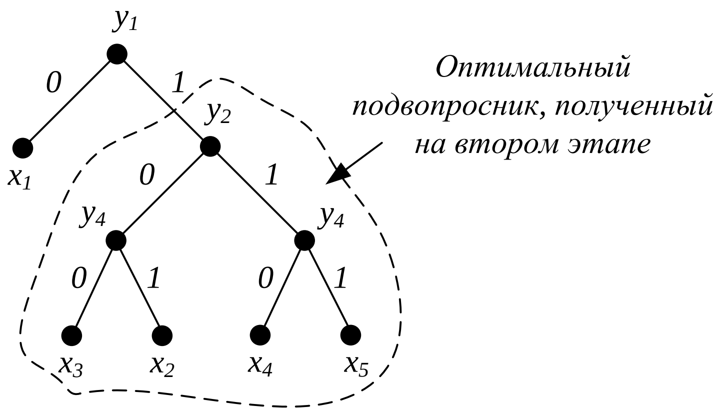

Рис. 4. Оптимальный вопросник
Fig. 4. Optimum questionnaires

Среднее время идентификации всех дефектов (цена обхода) определяется суммой всех произведений цен и весов вопросов в нем:

$$C = \sum_{i=1}^{n} c_i p_i = 2 \cdot 1 + 3 \cdot 0{,}8 + 4 \cdot 0{,}65 + 4 \cdot 0{,}15 = 7{,}6., \qquad (6)$$

где n – число вопросов в вопроснике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное использование информационного подхода и методов теории вопросников позволяет получать оптимальные по времени поиска неисправностей алгоритмы диагностирования. Кроме того, отметим универсальность приведенной технологии, дополняющей множество известных методов оптимизации вопросников: всегда существует возможность использования информационного подхода для выбора корневого вопроса. Процесс дальнейшей оптимизации ведется с применением известных методов [5].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сапожников, В.В. Основы технической диагностики / В.В. Сапожников, Вл.В. Сапожников. - М.: Маршрут, 2004. – 316 с.
2. Picard, C.F. Graphes et questionnaires. Paris: Ganthier – Villars. 1972. Vol. 1, P. 146; Vol. 2., P. 212.
3. Пархоменко, П.П. Теория вопросников / П.П. Пархоменко // Автоматика и телемеханика. – 1970. – № 4. – С. 140 – 159.
4. Калявин, В.П. Основы теории надежности и диагностики: учебник / В.П. Калявин. - СПб.: Элмор, 1998. – 172 с.
5. Пархоменко, П.П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П.П. Пархоменко, Е.С. Согомонян. - М.: Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.
6. Аржененко, А.Ю. Оптимальные бинарные вопросники / А.Ю. Аржененко, Б.Н. Чугаев. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128с.

OPTIMISATION OF ALGORITHMS DIAGNOSING ON TECHNICAL OBJECTS ON A BASIS OF COMPLEX USAGE INFORMATIVE AND QUESTIONNAIRE METHODS

D.V. Efanov

There is a complex method of diagnosing algorithms optimisation on technical objects, which is based on informative and qestionnaire methods. For the first verification is informative method and for the next is questionnaire method. Such optimisation reduce a number of computings during the diagnosing algorithms building.

technical diagnosing, algorithm, entropy, amount of information, questionnary, dynamic programming