УДК 004.052.42+681.518.5
DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-10-875-885

ТЕРНАРНЫЕ ВОПРОСНИКИ С ОШИБКАМИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ В ОТВЕТАХ

Д. В. Ефанов, В. В. Хорошев

Российский университет транспорта, 127994, Москва, Россия
E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Развита теория вопросников, изучены особенности вопросников с вопросами, имеющими одинаковое количество ответов (гомогенных вопросников). Внимание уделено вопросникам, вопросы в которых имеют три ответа — тернарным вопросникам. Такие вопросники могут использоваться при решении широкого круга задач дискретного поиска и идентификации, в том числе технической диагностики. По сравнению с бинарными вопросниками тернарные вопросники могут характеризоваться гораздо меньшей ценой обхода для одинаковых множеств идентифицируемых событий. Это обстоятельство существенно при ограничении на максимальное значение цены обхода вопросника (применительно к задачам технической диагностики, это, например, ограничение на время проведения процедуры технического диагностирования). Рассмотрены вопросники, вопросы в которых допускают возникновение ошибок, а ответы — неопределенности. Описаны способы построения вопросников по матричной форме задания в виде анкеты с ошибками и неопределенностями, а также особенности оптимизации таких вопросников.

Ключевые слова: *идентификация событий, техническая диагностика, теория вопросников, полихотомичные вопросники, бинарные вопросники, тернарные вопросники, ошибки в ответах, неопределенные ответы, построение вопросника*

Введение. Использование вопросников позволяет решать широкий круг задач дискретного поиска, включая задачи распознавания и технической диагностики [1].

Вопросником называется совокупность вопросов $Q \subseteq Y$ ($Y = \{y_1, y_2, ..., y_n\}$ — множество допустимых вопросов), ставящихся в определенной последовательности, позволяющая идентифицировать события из заданного множества $X = \{x_1, x_2, ..., x_m\}$ [2]. Каждый вопрос y_i в вопроснике разбивает множество идентифицируемых событий X на α_i непересекающихся подмножеств, где α_i является числом ответов на него (исходов). Значение α_i определяется спецификой решаемой задачи. Каждому идентифицируемому событию из множества $X = \{x_1, x_2, ..., x_m\}$ соответствует некоторый весовой коэффициент $\omega(x_j)$, $x_j \in X$; каждому вопросу из $Y = \{y_1, y_2, ..., y_n\}$ — определенные цена $c(y_i)$ и весовой коэффициент $\omega(y_i)$, $y_i \in Y$. Весовой коэффициент для каждого вопроса является суммой весовых коэффициентов разделяемых им событий. Как правило, весовые коэффициенты нормируются:

$$p(x_j) = \frac{\omega(x_j)}{\sum_{j=1}^{m} \omega(x_j)}, \quad \sum_{j=1}^{m} p(x_j) = 1.$$

В технической диагностике вопросом является проверка, а его ценой — затраты на ее реализацию, под весом события понимается условная вероятность возникновения дефекта [3, 4].

Удобной формой представления вопросника является древовидный ориентированный взвешенный граф, в котором висячим вершинам соответствуют идентифицируемые события, а корневой и всем промежуточным — требующиеся для решения задачи идентификации вопросы. Множество $Y=\{y_1, y_2, ..., y_n\}$ может содержать больше вопросов, чем необходимо для решения задачи полной идентификации. В некоторых задачах полное разделение всех событий невозможно, т.е. решается задача неполной идентификации. Для разделения событий $X=\{x_1, x_2, ..., x_m\}$ на одноэлементные подмножества может быть построено различное число вопросников, которые характеризуются средней ценой идентификации — математическим ожиданием затрат на решение поставленной задачи:

$$C=\sum_{i=1}^{n} p(y_i)c(y_i). \quad (1)$$

Наиболее часто на практике является поиск вопросника для заданных исходных условий, имеющего минимальную среднюю цену идентификации событий [5, 6].

Исходя из специфики конкретной задачи может быть построен вопросник: гетерогенный (в нем хотя бы два вопроса имеют разные основания), либо гомогенный (с одинаковыми основаниями) [7—10]. Из гомогенных наиболее широко распространены бинарные вопросники — в них все вопросы имеют по два ответа [11]. Их оптимизации посвящено много работ, в том числе [12—17]. Известно [3], что вопросник любого вида может быть преобразован в бинарный, в таком вопроснике, предназначенном для идентификации тех же событий из множества $X=\{x_1, x_2, ..., x_m\}$, вопросов будет больше. От цен вопросов будет зависеть и средняя цена обхода вопросника.

Гетерогенные и гомогенные вопросники с основаниями вопросов $\alpha(y_i)>2$ $(\forall y_i \in Y)$ могут давать меньшую цену обхода при идентификации множества $X=\{x_1, x_2, ..., x_m\}$, чем бинарные вопросники. При этом следует учитывать и возможности практического использования таких вопросников исходя из специфики решаемой задачи.

В [18] рассмотрены вопросники, включающие в себя вопросы с основаниями $\alpha(y_i)=3$ $(\forall y_i \in Y)$ — так называемые *тернарные*. Их использование может оказаться эффективным для различных задач идентификации, в особенности связанных с ограничением на значение средней цены идентификации событий. В настоящей статье рассматриваются особенности построения и оптимизации тернарных вопросников, вопросы в которых могут допускать ошибочные ответы, а сами ответы могут быть неопределенными. Подобная задача решалась в [11] для класса бинарных вопросников.

Тернарные вопросники включают в себя вопросы с тремя ответами (условно обозначим их цифрами 2, 1 и 0). Соответственно при постановке тернарного вопроса y_i, $y_i \in Y$, на исходном множестве событий $X=\{x_1, x_2, ..., x_m\}$ получаются три непересекающихся подмножества $X_{y_i}^2$, $X_{y_i}^1$ и $X_{y_i}^0$ (рис. 1):

$$X_{y_i}^2 \cap X_{y_i}^1 = \varnothing, X_{y_i}^2 \cap X_{y_i}^0 = \varnothing, X_{y_i}^1 \cap X_{y_i}^0 = \varnothing; \quad (2)$$

$$X_{y_i}^2 \cup X_{y_i}^1 \cup X_{y_i}^0 = X. \quad (3)$$

Следует отметить, что при постановке тернарного вопроса на полном множестве исходных событий $X=\{x_1, x_2, ..., x_m\}$ всегда получаются три ответа. Если тернарный вопрос ставится на каком-либо подмножестве идентифицируемых событий, число ответов может быть меньше трех (два или один). В последнем случае постановка вопроса не имеет смысла на соответствующем подмножестве, так как не разделяет его на подмножества. При двух ответах тернарный вопрос преобразуется в бинарный. Далее будем такой вопрос дополнять фиктивным ответом, соответствующим тому ответу тернарного вопроса, для которого $X_{y_i}^k = \varnothing$, $k = 2,1,0$.

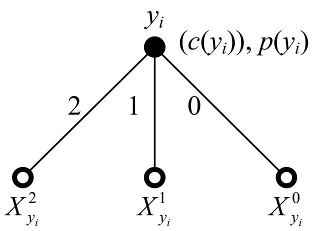

Рис. 1

Удобно задавать все разбиения исходного множества событий $X = \{x_1, x_2, ..., x_m\}$ вопросами из множества $Y = \{y_1, y_2, ..., y_n\}$ в виде анкеты [11]. Анкета представляет собой ($n \times m$)-матрицу $\left\| b_{ij} \right\|$, такую что $b_{ij} = \beta$, если событие x_j принадлежит исходу β вопроса y_i. Анкета будет логически полной, если с ее помощью разделить любую пару событий. В табл. 1 приведена анкета, включающая тернарные вопросы.

Таблица 1

y_i	$c(y_i)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
y_1	$c(y_1)$	2	2	2	1	1	1	0	0	0
y_2	$c(y_2)$	2	2	2	2	1	1	1	1	0
y_3	$c(y_3)$	2	1	0	0	0	2	2	1	1
y_4	$c(y_4)$	2	1	0	2	1	0	2	1	0
$p(x_j)$		$p(x_1)$	$p(x_2)$	$p(x_3)$	$p(x_4)$	$p(x_5)$	$p(x_6)$	$p(x_7)$	$p(x_8)$	$p(x_9)$

На основе анкет можно построить большое количество вопросников. Даже если перебирать последовательно все n вопросов без учета получающихся подмножеств идентифицируемых событий, это число будет определяться величиной $N = n!$. Каждый такой вопросник будет характеризоваться средней ценой обхода, а также числом вопросов, необходимых для полной идентификации событий. Тернарный вопросник называется компактным, если для разделения событий по нему требуется множество вопросов мощностью $Y_{\min} = \lceil \log_3 m \rceil$, где m — число идентифицируемых событий, а запись $\lceil ... \rceil$ обозначает целое сверху от вычисляемого значения. Для рассматриваемого примера (см. табл. 1) компактный вопросник характеризуется числом $Y_{\min} = \lceil \log_3 9 \rceil = 2$. Если число вопросов, необходимых для полной идентификации событий из множества $X = \{x_1, x_2, ..., x_m\}$, больше $Y_{\min}$, то вопросник является некомпактным. Тернарные компактные и некомпактные вопросники приведены на рис. 2.

Вопросник с минимальной ценой обхода называется оптимальным. Из всего множества вопросников для рассматриваемого случая путем перебора может быть найден оптимальный вопросник. На среднюю цену обхода влияют не только последовательности постановки вопросов, но и значения цен вопросов и весовых коэффициентов событий. Для оптимизации вопросников могут быть использованы методы ветвей и границ [19] и метод динамического программирования [20] (применительно к вопросникам эти методы подробно описаны в [1, 3]).

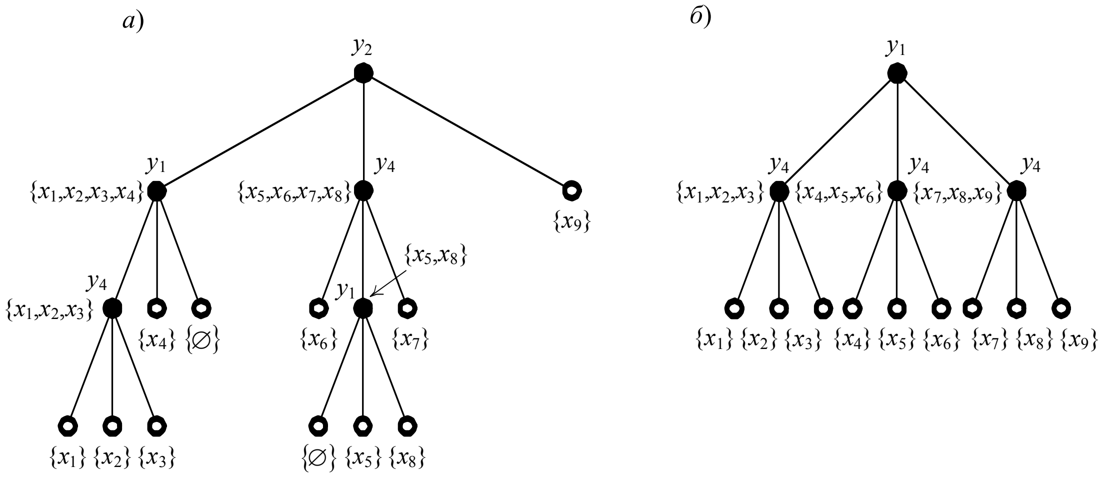

Рис. 2

Тернарные вопросники с вопросами, допускающими ошибки в ответах. Рассмотрим особый вид тернарных вопросников, допускающих вопросы, которые могут содержать ошибочные ответы. В этом случае исходное множество событий $X=\{x_1, x_2, ..., x_m\}$ разбивается на подмножества $X_{y_i}^2$, $X_{y_i}^1$ и $X_{y_i}^0$ такие, что хотя бы одно из равенств в выражении (2) становится неверным:

$$X_{y_i}^2 \cap X_{y_i}^1 = X_{y_i}^{12}, X_{y_i}^2 \cap X_{y_i}^0 = X_{y_i}^{20}, X_{y_i}^1 \cap X_{y_i}^0 = X_{y_i}^{10}. \qquad (4)$$

Хотя бы одно из пересечений подмножеств ответов $X_{y_i}^2$, $X_{y_i}^1$ и $X_{y_i}^0$ должно оказаться непустым:

$$W_{y_i} = X_{y_i}^{12} \cup X_{y_i}^{20} \cup X_{y_i}^{10} \neq \varnothing. \qquad (5)$$

Условие (5) подразумевает, что для любого события $x_j \in W_{y_i}$ ответ на вопрос y_i является неоднозначным. От того, какие подмножества $X_{y_i}^{12}$, $X_{y_i}^{20}$ и $X_{y_i}^{10}$ являются непустыми, зависит неоднозначность между ответами. Если отдельно не указано, в каких ответах возможны ошибки, то для обозначения событий, входящих в пересечения подмножеств $X_{y_i}^2$, $X_{y_i}^1$ и $X_{y_i}^0$ можно ввести знак „×“. Таким образом, элемент анкеты $b_{ij} = \times$, если $x_j \in W_{y_i}$.

Пример анкеты, включающей в себя вопросы, допускающие ошибки в ответах, приведен в табл. 2.

Таблица 2

y_i	$c(y_i)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
y_1	$c(y_1)$	2	2	×	1	0	0	0
y_2	$c(y_2)$	2	1	0	×	×	1	1
y_3	$c(y_3)$	×	1	0	2	1	0	×
y_4	$c(y_4)$	2	×	0	0	1	2	0
y_5	$c(y_5)$	×	×	0	2	1	0	2
y_6	$c(y_6)$	0	1	1	0	2	2	2
$p(x_j)$		$p(x_1)$	$p(x_2)$	$p(x_3)$	$p(x_4)$	$p(x_5)$	$p(x_6)$	$p(x_7)$

Анкета будет являться логически полной, т.е. такой, по которой может быть построен вопросник, разделяющий все события, если любая пара событий (x_{j_1}, x_{j_2}) может быть разделена на разные подмножества хотя бы одним вопросом y_i. Условие формально может быть записано таким образом:

$$\forall x_{j_1}, x_{j_2} \in X\Big|_{j_1 \neq j_2}: \quad \exists y_i : \left(x_{j_1} \in X_{y_i}^k\right) \& \left(x_{j_2} \notin X_{y_i}^k\right). \tag{6}$$

Для оценки логической полноты такой анкеты прибегают к матрице различий [3], представляющей собой булеву ($n \times C_m^2$)-матрицу $\left\| d_{kj_1j_2} \right\|$, элементы которой $d_{kj_1j_2} = 1$, если вопрос y_i различает пару событий $\left(x_{j_1}, x_{j_2}\right)$, т.е.:

$$d_{kj_1j_2} = 1 \Leftrightarrow \left(x_{j_1} \in X_{y_i}^k\right) \& \left(x_{j_2} \notin X_{y_i}^k\right), \tag{7}$$

k — номер вопроса, а индексы j_1 и j_2 — пары разделяемых событий.

Если все столбцы матрицы $\left\| d_{kj_1j_2} \right\|$ содержат хотя бы по одной единице, то анкета является логически полной. В противном случае для пары событий $\left(x_{j_1}, x_{j_2}\right)$, не имеющей разделяющего вопроса, останется нулевой столбец.

Для построения матрицы различий в отсутствие ошибок в ответах может быть использована функция троичной логики, задаваемая таблицей истинности (табл. 3). Эта функция $f = 1$ в том случае, если троичные переменные $a \neq b$, функция используется для сравнения: $f = a\Delta_{\neq} b$.

Таблица 3

a	*b*		
	2	1	0
2	0	1	1
1	1	0	1
0	1	1	0

Наличие вопросов, допускающих ошибки в ответах, приводит к тому, что описанную выше функцию требуется доопределить, так как появляется четвертый вариант исхода — ошибочный ответ „×“. Доопределим операцию сравнения таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$f = a\Delta_{\neq} \times = 0. \tag{8}$$

Анализ анкеты (см. табл. 2) показал, что она является логически полной.

Использование функции сравнения позволяет построить матрицу различий и установить полноту анкеты. Кроме того, по матрице различий можно оценить избыточность анкеты: если возможно удаление какого-либо вопроса с сохранением полноты, анкета избыточна. Анализ избыточности бинарных анкет [11] аналогичен анализу избыточности тернарных анкет.

Рассмотрим процедуру построения вопросника по анкете, в которой имеются вопросы, допускающие ошибки в ответах (рис. 3). Пусть в качестве корневого выбран вопрос y_2. Постановка этого вопроса на множестве всех событий разбивает последнее на три подмножества, если вопрос, ответ на который допускает ошибку, включается в подмножества всех трех ответов. Таким образом, подмножества $X_{y_2}^2 = \{x_1, x_4, x_5\}$, $X_{y_2}^1 = \{x_2, x_4, x_5, x_6, x_7\}$ и $X_{y_2}^0 = \{x_3, x_4, x_5\}$. Множество $W_{y_2} = \{x_4, x_5\}$ включено в каждый из ответов на корневой вопрос. Подмножества $X_{y_2}^2$ и $X_{y_2}^0$ разделяются соответственно вопросами y_4 и y_3. Подмножество $X_{y_2}^1$ разделено вопросом y_5. Указанный вариант разбиения не является единственным, в чем можно убедиться, проанализировав анкету. Вопрос y_5 на полученном подмножестве событий $X_{y_2}^1$ также допускает ошибки — в идентификации события x_2. Оно включается в каждое из подмножеств исходов данного вопроса. Процедура разбиений повторяется до тех пор, пока все события, которые можно разделить, не окажутся разделенными.

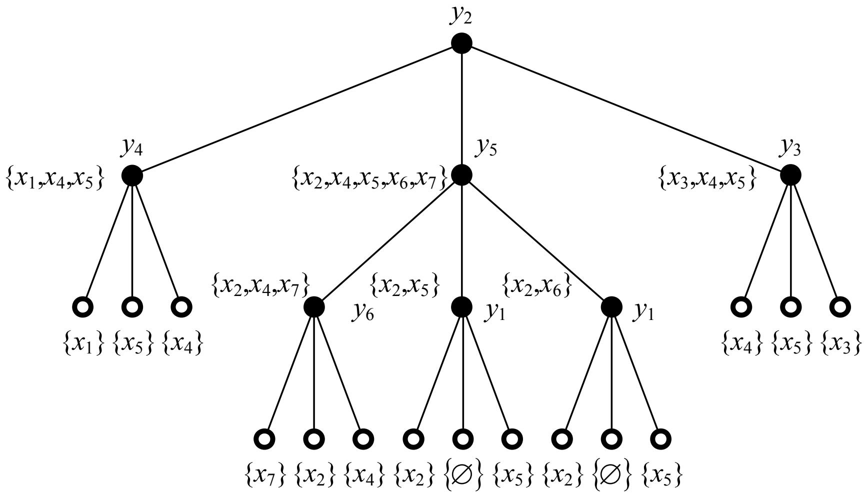

Рис. 3

Ключевым отличием полученного вопросника от вопросников, не допускающих ошибок в ответах, является возможность идентификации одного и того же события сразу по нескольким маршрутам в графе. Кроме того, отличием является и то, что число возможных вопросников существенно увеличивается ввиду наличия различных вариантов идентификации одного и того же события.

Изменение формы вопросника (относительно вопросника без ошибок), когда каждое событие идентифицируется по отдельному маршруту, приводит к необходимости изменения способа определения средней цены его обхода.

Для каждого события $x_j \in W_{y_i}$, по аналогии с [11], введем дополнительную весовую функцию $\delta^k_{j,i}$, $k = 2,1,0$:

$$\delta^k_{j,i} \in [0;1]; \quad \sum_k \delta^k_{j,i} = 1. \tag{9}$$

Функции $\delta^k_{j,i}$ может быть приписан вероятностный смысл: значение $\delta^k_{j,i}$ есть вероятность того, что в состоянии x_j на вопрос y_i последует ответ „k“. Если в практических приложениях возникают ситуации, когда для ответов на вопрос не известны значения вероятности, будем полагать, что ответы на такие вопросы являются нечеткими множествами [21]. В таких ситуациях степень детерминированности исходов вопроса y_i определяется величинами:

$$\delta^k_{j,i} = \frac{\left|W_{y_i}\right|}{\left|X^k_{y_i}\right|}, \quad k = 2,1,0. \tag{10}$$

Значения функций $\delta^k_{j,i}$ будут мерой принадлежности события x_j к k-му исходу вопроса y_i.

Введя дополнительные весовые функции для подмножества событий $x_j \in W_{y_i}$, заменим выражение для подсчета цены идентификации события x_j:

$$C\left(x_j\right) = \sum q_\tau\left(x_i\right) c_\tau\left(x_i\right), \tag{11}$$

где $c_\tau\left(x_i\right)$ — цена идентификации события x_j по маршруту τ в вопроснике, а $q_\tau\left(x_i\right)$ — вероятность идентификации события x_j по маршруту τ в вопроснике

$$q_\tau\left(x_i\right) = \prod_{y_\tau} \delta^k_{j,i}. \tag{12}$$

В выражении (12) перемножаются все величины $\delta_{j,i}^{k}$ для всех вопросов, принадлежащих маршруту τ в вопроснике, а индекс подмножества исходов k определяется исходя из ответа на вопрос y_i. Если ответ на вопрос (исход k) является детерминированным, то $\delta_{j,i}^{k}=1$. Цену вопросника в этом случае можно определить по формуле:

$$C=\sum_{j=1}^{m} p\left(x_j\right) C\left(x_j\right). \tag{13}$$

Формула (13) аналогична формуле (1). Однако в (1) выполняется подсчет цен идентификаций событий с учетом каждого маршрута, а в формуле (13) — по средним ценам идентификации событий (11).

Оптимизация вопросников с вопросами, допускающими ошибки в ответах, ведется следующим образом.

Исходная анкета, включающая вопросы с ошибками, расширяется путем введения трех копий событий $x_j^{k,i}$, $k=2,1,0$ (по каждому из возможных исходов вопроса), для каждого из вопросов y_i.

Если существует несколько вопросов, для которых событие x_j в анкете обозначено знаком „×“, вводятся три копии событий $x_j^{k,i}$ по каждому из вопросов.

Если в состоянии x_j ответом на вопрос y_i был исход „k“, то в состояниях x_j^{k} ответом также будет „k“.

Для каждого нового события вводятся весовые нормированные функции:

$$p\left(x_j^{k,i}\right)=p\left(x_j\right) \prod_{k=1}^{K} \delta_{j,i}^{k}, \quad k=2,1,0, \tag{14}$$

где K — число вопросов, ответы на которые не были достоверными.

Если произвести оптимизацию, выполнив только указанные выше шаги, то построенный вопросник будет разделять все введенные события $x_j^{k,i}$, $k=2,1,0$, но он не будет оптимален для исходной анкеты с вопросами, допускающими ошибки. При этом в полученном вопроснике могут оказаться и вопросы, которые разделяют пару вновь введенных событий-копий некоторого события x_j. Такие вопросы не имеют смысла. С целью получения оптимального решения для исходной анкеты требуется расширить множество вопросов $Y=\left\{y_1, y_2, \ldots, y_n\right\}$, введя в него множество мнимых вопросов Y^{φ}, число которых $\left|Y^{\varphi}\right|$ определяется числом событий во множестве $X=\left\{x_1, x_2, \ldots, x_m\right\}$, для каждого из которых существует хотя бы один вопрос, допускающий ошибку. Такие вопросы не будут тернарными, а будут иметь основание $3^{K}+1$. Значение элемента b_{ij} в расширяемой анкете определяется числом i в событии $x_j^{k,i}$.

Цену мнимых вопросов из множества Y^{φ} определим равной нулю и условимся, что вопрос $y_i \in Y^{\varphi}$ можно задавать только в том случае, если нулевой исход мнимого вопроса не содержит ни одного события:

$$X_{y_i}^{0}=\varnothing, \quad y_i \in Y^{\varphi}. \tag{15}$$

Далее оптимизацию скорректированного вопросника проводят известными методами [1, 3, 11], с той лишь разницей, что на каждом этапе для мнимых вопросов необходима проверка условия (15). По завершении оптимизации все мнимые вопросы $y_i \in Y^{\varphi}$ отбрасываются.

Следует отметить, что рассматривались такие вопросники, вопросы в которых допускают неопределенную ошибку в ответе. Другими словами, не ясно, какому из трех ответов $X_{y_i}^2$, $X_{y_i}^1$ и $X_{y_i}^0$ на любой вопрос y_i может принадлежать событие. В реальности для ряда вопросов можно установить, в каких ответах на каждый вопрос возможна ошибка. Это обстоятельство упрощает процедуру доопределения значений в анкете и ее корректировки по сравнению с методом, интерпретирующим любую ошибку как переход в произвольное подмножество исходов вопроса.

Тернарные вопросники с неопределенными ответами. В ряде задач разделения и идентификации событий возникают такие ситуации, в которых какое-либо условие несущественно для выполнения того или иного правила. Примеры таких задач — бинарные таблицы решений [11]. Если физическая постановка задачи, математической моделью которой является анкета, допускает произвольный детерминированный ответ, то он считается неопределенным и обозначается знаком „—“. Обратимся к тернарным вопросникам с неопределенными ответами (табл. 4).

Таблица 4

y_i	$c(y_i)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
y_1	$c(y_1)$	2	2	—	1	0	0	0
y_2	$c(y_2)$	2	1	0	—	—	1	1
y_3	$c(y_3)$	—	1	0	2	1	0	—
y_4	$c(y_4)$	2	—	0	0	1	2	0
y_5	$c(y_5)$	—	—	0	2	1	0	2
y_6	$c(y_6)$	0	1	1	0	2	2	2
$p(x_j)$		$p(x_1)$	$p(x_2)$	$p(x_3)$	$p(x_4)$	$p(x_5)$	$p(x_6)$	$p(x_7)$

Анкета будет логически полной, если для любой пары событий $\left(x_{j_1}, x_{j_2}\right)$ существует хотя бы один вопрос y_i с определенными ответами, такими, что оба события принадлежат подмножествам разных его ответов. Анкета с неопределенными ответами может оказаться неполной, но затем может быть после доопределена.

Если анкета, включающая ответы с неопределенностями логически полна, ее заполнение может быть произвольным; в противном случае необходимо целенаправленное (осознанное) доопределение с учетом достижения полноты преобразованного варианта анкеты. Если речь идет о построении вопросника с минимальной ценой обхода, то задача усложняется: требуется особым образом доопределить анкету.

Анкету можно доопределить 3^{γ} способами, где γ — число неопределенностей в анкете. Построив все возможные вопросники и выбрав тот, у которого цена обхода является минимальной, придем к искомому результату. Однако число вариантов перебора оказывается существенным! Даже для рассматриваемого примера (см. табл. 4) оно составляет $3^6 = 729$. В [11] отмечается, что эффективного алгоритма с полиномиальной сложностью для решения этой задачи нет, поэтому задачу следует решать приближенными методами. Один из таких методов состоит в следующем.

Требуется доопределить строки анкеты, в которых проставлен знак „—“. Для этих целей строится матрица различий. Если в одном из сравниваемых столбцов анкеты есть „—“, в матрице различий ставится знак „—“. После этого матрица различий анализируется и находятся столбцы, не содержащие ни одного единичного значения. Значения на месте знака „—“ допределяются таким образом, чтобы существовал хотя бы один вопрос y_i, разделяющий соответствующую столбцу матрицы различий пару событий $\left(x_{j_1}, x_{j_2}\right)$. Если для одного вопроса существует несколько вариантов дополнения (несколько пар событий), то при доопределении анкеты стараются разделить пару событий с максимальной суммарной вероятностью $p_{j_1,j_2} = p_{j_1} + p_{j_2}$. Указанный подход рассмотрен в [11] для бинарных вопросников. Там же отмечено, что представленный метод позволяет получать решения с быстрым доопределением ответов на вопросы и обеспечивать при этом построение вопросника с ценой, близкой к минимальной.

Заключение. При построении вопросников с вопросами допускающими возникновение ошибок в ответах или неопределенностей, в отличие от классических вопросников, возможна идентификация одних и тех же событий по различным маршрутам. Адаптированные авторами алгоритмы определения средней цены обхода маршрута вопросника могут быть применимы и на случай рассмотрения вопросников с бóльшими основаниями. При этом с увеличением оснований вопросов процедура построения вопросника усложняется. Рассмотренные подходы к работе с тернарными вопросниками могут быть распространены не только на любой гомогенный, но и гетерогенный вопросник.

Рассмотренный тип вопросников может применяться в различных задачах дискретного поиска, в том числе в приложениях технической диагностики. Для построения алгоритмов диагностирования в ряде задач требуется использование небинарных вопросников (это определяется допустимыми вопросами) [8, 13, 22]. Более того, несмотря на легкость преобразования любых вопросников в бинарные, у последних имеется весомый недостаток — при их использовании для идентификации одного и того же множества событий требуется больше вопросов, чем при применении других типов вопросников (в том числе тернарных). В зависимости от цены вопросов тернарного и бинарного вопросников этот фактор будет оказывать влияние на конечную цену обхода. Если на ее значение установлено ограничение, то в некоторых случаях использование гомогенных (и гетерогенных) вопросников может оказаться оправданным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пархоменко П. П.* Теория вопросников (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1970. № 4. С. 140—159.
2. *Picard C. F.* Graphs and Questionnaires. Netherlands: North-Holland Publishing Company, 1980. 431 p.
3. *Пархоменко П. П., Согомонян Е. С.* Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства). М.: Энергоатомиздат, 1981. 320 с.
4. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Основы теории надежности и технической диагностики. СПб: Лань, 2019. 588 с.
5. *Пархоменко П. П.* Оптимальные вопросники с неравными ценами вопросов // Доклады АН СССР. 1969. Т. 184, № 1. С. 51—54.
6. *Чугаев Б. Н., Аржененко А. Ю.* Оптимальная идентификация случайных событий // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. 2013. № 2. С. 188—190.
7. *Duncan G.* Heterogeneous Questionnaire Theory // SIAM J. on Applied Mathematics. 1974. Vol. 27, is. 1. P. 59—71. DOI: 10.1137/0127005.
8. *Пархоменко П. П.* Вопросники и организационные иерархии // Автоматика и телемеханика. 2010. № 6. С. 163—174.
9. *Аржененко А. Ю., Вестяк В. А.* Дискретный поиск. Теория вопросников. М.: Изд-во МАИ, 2012. 159 с.

10. *Efanov D. V., Khoroshev V. V., Osadchy G. V., Belyi A. A.* Optimization of Conditional Diagnostics Algorithms for Railway Electric Switch Mechanism Using the Theory of Questionnaires with Failure Statistics // Proc. of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS`2018). Kazan, Russia, September 14–17, 2018. P. 237—245. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524620.

11. *Аржененко А. Ю., Чугаев Б. Н.* Оптимальные бинарные вопросники. М.: Энергоатомиздат, 1989, 128 с.

12. *Аржененко А. Ю., Чугаев Б. Н.* Оптимизация транзитивных бинарных вопросников // Автоматика и телемеханика. 1985. № 2. С. 159—164.

13. *Аржененко А. Ю., Казакова О. Г., Чугаев Б. Н.* Оптимизация бинарных вопросников // Автоматика и телемеханика. 1985. № 11. С. 138—144.

14. *Аржененко А. Ю., Казакова О. Г., Неясов В. А.* Оптимизация бинарных вопросников, содержащих вопросы с переменной ценой // Автоматика и телемеханика. 1989. № 6. С. 139—149.

15. *Аржененко А. Ю., Бондаренко А. В.* Оптимизация бинарных вопросников методом толерантной замены // Электронное моделирование. 1990. № 3. С. 53—57.

16. *Аржененко А. Ю., Бондаренко А. В.* Алгоритм выбора оптимальной структуры неизбыточного компактного вопросника // Автоматика и телемеханика. 1991. № 5. С. 163—169.

17. *Аржененко А. Ю., Вестяк В. А.* Модификация метода толерантных перестановок в почти равномерных компактных анкетах // Автоматика и телемеханика. 2012. № 7. С. 109—118.

18. *Ефанов Д. В., Павлов А. Н.* Оптимизация полихотомичных вопросников методом корневого вопроса // Изв. Петербургского университета путей сообщения. 2012. № 4. С. 125—134.

19. *Land A. H., Doig A. G.* An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems // Econometrica. 1960. Vol. 28, N 3. P. 497—520.

20. *Bellman R. E.* Dynamic Programming. Princeton University Press, Princeton NJ, 1957. 392 p.

21. *Заде Л. А.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.

22. *Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Павлов А. Н.* Теория вопросников и поиск неисправностей в УКСПС // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 1. С. 30—33.

Сведения об авторах

Дмитрий Викторович Ефанов — д-р техн. наук, доцент; ООО „ЛокоТех-Сигнал“; Российский университет транспорта, кафедра автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте; E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Валерий Вячеславович Хорошев — Российский университет транспорта, кафедра автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте; ассистент; E-mail: hvv91@icloud.com

Поступила в редакцию 02.05.19 г.

Ссылка для цитирования: *Ефанов Д. В., Хорошев В. В.* Тернарные вопросники с ошибками и неопределенностями в ответах // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 10. С. 875—885.

TERNARY QUESTIONNAIRES WITH ERRORS AND UNCERTAINTIES IN THE ANSWERS

D. V. Efanov, V. V. Khoroshev

Russian University of Transport, 127994, Moscow, Russia
E-mail: TrES-4b@yandex.ru

A theory of questionnaires is development in the direction of studying the questionnaires features with questions with equal number of outcomes (homogeneous questionnaires). A special attention is given to ternary questionnaires in which the questions have three outcomes. Such questionnaires may be used to solve a wide range of discrete search, identification, and technical diagnostics tasks. Compared to binary questionnaires, ternary questionnaires may turn out to be questionnaires with a much lower cost for identical sets of identifiable events. The advantage is considered as a significant one when maximum cost of the questionnaire is limited, e. g., in the tasks of technical diagnostics with limited time for diagnosis. The questionnaires in which the questions allow for occurrence of errors, and the answers – for uncertainties, are studied. Methods of constructing questionnaires with errors and uncertainties for the matrix form of the task are described, and specifics of optimization of such questionnaires are considered.

Keywords: event identification, technical diagnostics, theory of questionnaires, homogeneous questionnaires, binary questionnaires, ternary questionnaires, errors in answers, uncertain answers, questionnaire formation

REFERENCES

1.Parkhomenko P.P. *Automation and Remote Control*, 1970, no. 4, pp. 140–159. (in Russ.)
2.Picard C.F. *Graphs and Questionnaires*, Netherlands, North-Holland Publishing Company, 1980, 431 p.
3.Parkhomenko P.P., Sogomonyan E.S. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnyye sredstva)* (Fundamentals of Technical Diagnostics (Optimization of Diagnostic Algorithms, Hardware)), *Moscow*, 1981, 320 *p. (in Russ.)*
4.Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V., Efanov D.V. *Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki* (Fundamentals of the Theory of Reliability and Technical Diagnostics), St. Petersburg, 2019, 588 *p. (in Russ.)*
5.Parkhomenko P.P. *Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1969, no. 1(184), pp. 51–54. (in Russ.)
6.Chugaev B.N., Arzhenenko A.Yu. *Statistics and Economics*, 2013, no. 2, pp. 188–190. (in Russ.)
7.Duncan G. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1974, no. 1(27), pp. 59–71. DOI: 10.1137/0127005.
8.Parkhomenko P.P. *Automation and Remote Control*, 2010, no. 6(71), pp. 1124–1134.
9.Arzhenenko A.Yu., Vestyak V.A. *Diskretnyy poisk. Teoriya voprosnikov* (Discrete Search. Questionnaire Theory), Moscow, 2012, 159 p. (in Russ.)
10. Efanov D.V., Khoroshev V.V., Osadchy G.V., Belyi A.A. *Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS`2018)*, Kazan, Russia, September 14–17, 2018, pp. 237–245. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524620.
11. Arzhenenko A.Yu., Chugaev B.N. *Optimal'nyye binarnyye voprosniki* (Optimal Binary Questionnaires), Moscow, 1989, 128 p. (in Russ.)
12. Arzhenenko A.Yu., Chugaev B.N. *Automation and Remote Control*, 1985, no. 2, pp. 159–164. (in Russ.)
13. Arzhenenko A.Yu., Kazakova O.G., Chugayev B.N. *Automation and Remote Control*, 1985, no. 11, pp. 138–144. (in Russ.)
14. Arzhenenko A.Yu., Kazakova O.G., Neyasov V.A. *Automation and Remote Control*, 1989, no. 6, pp. 139–149. (in Russ.)
15. Arzhenenko A.Y., Bondarenko A.V. *Electronic Modeling*, 1990, no. 3, pp. 53–57. (in Russ.)
16. Arzhenenko A.Y., Bondarenko A.V. *Automation and Remote Control*, 1991, no. 5, pp. 163–169. (in Russ.)
17. Arzhenenko A.Y., Vestyak V.A. *Automation and Remote Control*, 2012, no. 7(73), pp. 1195–1201.
18. Efanov D.V., Pavlov A.N. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2012, no. 4, pp. 125–134. (in Russ.)
19. Land A.H., Doig A.G. *Econometrica*, 1960, no. 3(28), pp. 497–520.
20. Bellman R.E. *Dynamic Programming*, Princeton University Press, Princeton NJ, 1957, 392 p.
21. Zadeh L.A. *Information Sciences*, 1975, vol. 1, pp. 119–249.
22. Sapozhnikov Vl.V., Efanov D.V., Pavlov A.N. *Automation, communication and Informatics*, 2012, no. 1, pp. 30–33. (in Russ.)

Data on authors

Dmitry V. Efanov — Dr. Sci., Associate Professor; "LocoTech-Signal" LLC; Russian University of Transport, Department of Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport; E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Valery V. Khoroshev — Russian University of Transport, Department of Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport; Assistant; E-mail: hvv91@icloud.com

For citation: Efanov D. V., Khoroshev V. V. Ternary questionnaires with errors and uncertainties in the answers. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 10. P. 875—885 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-10-875-885