
Техническая диагностика и контролепригодные системы

УДК 681.518.5:004.052.32

Д. В. Ефанов, д-р техн. наук

В. В. Хорошев

ООО «ЛокоТех-Сигнал»,

Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»

Российский университет транспорта, Москва

БИНАРНО – ТЕРНАРНЫЕ ВОПРОСНИКИ

Теория вопросников позволяет решать разнообразные задачи дискретного поиска и идентификации, эффективным ее приложением является техническая диагностика систем автоматики и управления. Вопросник представляет собой совокупность событий и вопросов, которые необходимо поставить для решения задачи идентификации данных событий. Соответственно в технической диагностике – это множество состояний технического объекта и множество проверок, позволяющих эти состояния идентифицировать. Особую роль теория вопросников может сыграть в развитии тестового обеспечения при повышении уровня автоматизации и управления с внедрением развитых средств технического диагностирования и мониторинга.

Авторы статьи фокусируют свое внимание на исследованиях особых типов вопросников – таких, которые содержат как вопросы с двумя исходами (бинарные вопросы), так и вопросы с тремя исходами (тернарные вопросы). Рассмотрение именно данного сочетания вопросов важно потому, что при построении вопросника для фиксированного множества событий в таком случае потребуется меньшее количество вопросов, чем в бинарном вопроснике. При этом тернарные вопросы гораздо чаще встречаются на практике, чем вопросы с большим числом исходов. Использование бинарно-тернарных вопросников при решении задач идентификации может оказать влияние на среднее значение цены обхода и оказаться эффективнее применения чисто бинарных вопросников. Это актуально, например, при ограничениях на среднее время идентификации событий.

В работе описаны основные особенности бинарно-тернарных вопросников, представлено описание метода динамического программирования для оптимизации данного класса вопросников, приводятся примеры реализации вопросников в системах автоматики и управления на железнодорожном транспорте.

задачи распознавания и идентификации, дискретный поиск, вопросник, анкета, оптимизация вопросников, техническая диагностика дискретных систем.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-3-391-422

Введение

Проблемы распознавания и дискретного поиска встречаются в практике довольно часто [1, 2]. К ним относятся совершенно различные по своей природе и физической реализации приложения. Одним из таких приложений является техническая диагностика устройств автоматики и вычислительной техники, в задачи которой входит определение технического состояния объекта и локализация дефекта [3]. Удобным математическим аппаратом, позволяющим находить решение указанной задачи, является теория вопросников [4].

Возникновение теории вопросников связывают с именем К. Ф. Пикара, который в середине XX века предложил эту теорию как математический аппарат идентификации различного рода событий. Одной из первых работ на эту тему является его книга [5]. Впоследствии он продолжил развитие данной теории наряду со своими соотечественниками [6–8]. В техническую диагностику данный математический аппарат был введен в конце 1960-х гг. известным специалистом П. П. Пархоменко [9, 10]. В настоящее время аппарат теории вопросников позволяет решать задачу выбора наиболее эффективного способа идентификации (расознавания, разделения и т. д.) событий по заранее выбранному критерию.

В самом общем смысле вопросник представляет собой совокупность множества идентифицируемых событий $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ и множества необходимых для его разделения вопросов $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$. Если вопросы таковы, что позволяют разделить исходное множество событий на одноэлементные подмножества, то говорят, что решается задача полной идентификации. В противном случае решается задача неполной идентификации. При решении задачи идентификации учитывают такие параметры, как «важность» идентифицируемого события и «стоимость» постановки каждого вопроса. Показателем «важности» в технической диагностике может являться вероятность возникновения того или иного события, дефекта, а показателем «стоимости» проверки – время проведения этой проверки, ее эффективность или понесенные затраты. Таким образом, задача идентификации событий может быть решена различными способами за различную цену, что определяется последовательностью постановки вопросов. Центральной задачей теории вопросников является задача оптимизации вопросника по критерию минимума средней цены идентификации события [11]. Вопросник с наименьшей стоимостью является оптимальным вопросником, а вопросник, близкий к оптимальному, – квазиоптимальным.

Существуют универсальные методы оптимизации, такие как метод ветвей и границ [12] и метод динамического программирования [13], позволяющие получить оптимальный вопросник любого вида. Эти методы, однако, имеют экспоненциальную сложность от числа идентифицируемых событий и вследствие этого – ограниченную применимость. Как правило, число идентифицируемых событий ограничивается 30–35, что вызвано сложностью решения задач, основанных на переборе вариантов, даже с применением современной вычислительной техники. По этой причине во многих практических задачах ограничиваются получением не оптимального вопросника, а квазиоптимального.

Особый класс вопросников представляют бинарные вопросники – такие вопросники включают в себя только вопросы с двумя исходами, имеющими аналогию с ответами «да» и «нет» («идентифицирован» или «не идентифицирован») [14]. Такие вопросники естественно возникают в технике при решении задач технической диагностики, когда, например, следует установить отказавший компонент устройства или системы [15, 16]. Теория бинарных вопросников развита в работах А. Ю. Аржененко [17–24]. Им предложены более простые методы оптимизации бинарных вопросников, чем традиционные, а также описаны вопросники, допускающие ошибки и неопределенные ответы.

Некоторые задачи идентификации могут включать в себя и вопросы с бóльшим числом исходов [25]. К примеру, при технической диагностике некоторые процедуры при одной проверке могут дать выявление сразу нескольких событий [26]. Вопросники, включающие в себя вопросы с различным числом исходов, называются гетерогенными [27]. Если все вопросы имеют одинаковое число исходов, то такие вопросники называют гомогенными. Бинарные вопросники относятся к гомогенным вопросникам. Следующим за бинарным вопросом по числу исходов является тернарный вопрос, допускающий три варианта ответа (три исхода) [28]. Увеличение числа исходов позволяет уменьшить число вопросов для одного и того же множества идентифицируемых событий, но увеличение числа исходов вопросов в реальности ограничивается здравым смыслом, а также полнотой и глубиной диагностирования. Тем не менее ряд задач, таких, например, как поиск оптимального (или квазиоптимального) вопросника с ограничением на значение средней цены идентификации события, может быть решен с применением как бинарных вопросов, так и вопросов с бóльшим числом исходов.

Данная статья посвящена анализу гетерогенных вопросников, включающих в себя только бинарные и тернарные вопросы – *бинарно-тернарных вопросников*.

1. Особенности бинарно-тернарных вопросников

Вопросники могут быть заданы несколькими количеством способов. Наименее наглядным способом является перечисление всех допустимых вопросов с указанием способов разбиения исходного множества идентифицируемых событий $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ на подмножества $X_{y_i}^k$, где $y_i \in Y$, $k \in \{1; 2; \dots; n\}$. К примеру, вопросник может быть задан списком:

$$\begin{aligned} y_1 &= \{x_1, x_2, x_3\} \cup \{x_4, x_5, x_6\} \cup \{x_7, x_8, x_9\}; \\ y_2 &= \{x_1, x_4, x_7\} \cup \{x_2, x_5, x_8\} \cup \{x_3, x_6, x_9\}; \\ y_3 &= \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_9\} \cup \{x_5, x_6, x_7, x_8\}; \\ y_4 &= \{x_1, x_3, x_6, x_7\} \cup \{x_2, x_4, x_5, x_8, x_9\}; \\ y_5 &= \{x_2, x_3, x_5, x_7, x_8\} \cup \{x_1, x_4, x_6, x_9\}; \\ y_6 &= \{x_1, x_2, x_5, x_6, x_9\} \cup \{x_3, x_4, x_7, x_8\}. \end{aligned}$$

Естественной формой задания, вытекающей из предыдущей, является задание вопросника в виде матрицы (табл. 1), содержащей по вертикали все идентифицируемые события, а по горизонтали – все допустимые для решения задачи разделения вопросы. На пересечении строки и столбца такой матрицы указывается условный номер исхода каждого вопроса при постановке его на множестве событий $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$. Кроме того, в матрице для каждого события указывается значение весового коэффициента $\omega(x_j)$, $x_j \in X$, а для каждого вопроса указывается значение цены $c(y_i)$ и весового коэффициента $\omega(y_i)$, $y_i \in Y$. Весовой коэффициент каждого вопроса складывается из суммы весовых коэффициентов событий, входящих в подмножества его исходов. При этом весовой коэффициент вопроса зависит от последовательности его постановки. Часто весовые коэффициенты нормируют и задают в виде условных вероятностей идентифицируемых событий:

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

При этом $\sum_{j=1}^m p(x_j) = 1$.

Таблица 1
Анкета рассматриваемого вопросника

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	1	0	2	1	0	2	1	0
y_3	$c(y_3)$	1	1	1	1	0	0	0	0	1
y_4	$c(y_4)$	1	0	1	0	0	1	1	0	0
y_5	$c(y_5)$	0	1	1	0	1	0	1	1	0
y_6	$c(y_6)$	1	1	0	0	1	1	0	0	1
$p(x_j)$		$p(x_1)$	$p(x_2)$	$p(x_3)$	$p(x_4)$	$p(x_5)$	$p(x_6)$	$p(x_7)$	$p(x_8)$	$p(x_9)$

Способ задания вопросника в виде матрицы называют также заданием в виде анкеты [14].

Наиболее наглядной формой задания вопросника является задание его в виде древовидного ориентированного графа [4, 10, 11]. Вершины в вопроснике могут иметь только исходящие дуги, только входящую дугу (в древовидном графе она всегда одна) или и те и другие. Первые и третьи виды вершин соответствуют корневому вопросу и промежуточным вопросам, вторые – идентифицируемым событиям. Каждая исходящая из вершины-вопроса дуга соответствует его исходу. Возле вершин, не имеющих исходящих дуг, приписывают в виде чисел значения весовых коэффициентов. Возле вершин, имеющих исходящие дуги, также приписывают в виде чисел значения весовых коэффициентов, а в виде чисел в скобках – значения цен вопросов. На рис. 1 представлены различные вопросники, позволяющие решить задачу полной идентификации для рассматриваемого примера.

Число исходов каждого вопроса называют его основанием и обозначают как $\alpha(y_i)$ (на рисунках номера исходов следуют справа налево в порядке возрастания для каждого вопроса). Если основания всех вопросов одинаковые, то вопросник является гомогенным (однородным). При этом бинарные вопросники – это те, для которых $\forall y_i \in Y \alpha(y_i) = 2$ (их также называют дихотомичными вопросниками). Вопросники, для которых $\forall y_i \in Y \alpha(y_i) > 2$, называются полихотомичными. Если вопросы имеют различающиеся основания, вопросники называются гетерогенными.

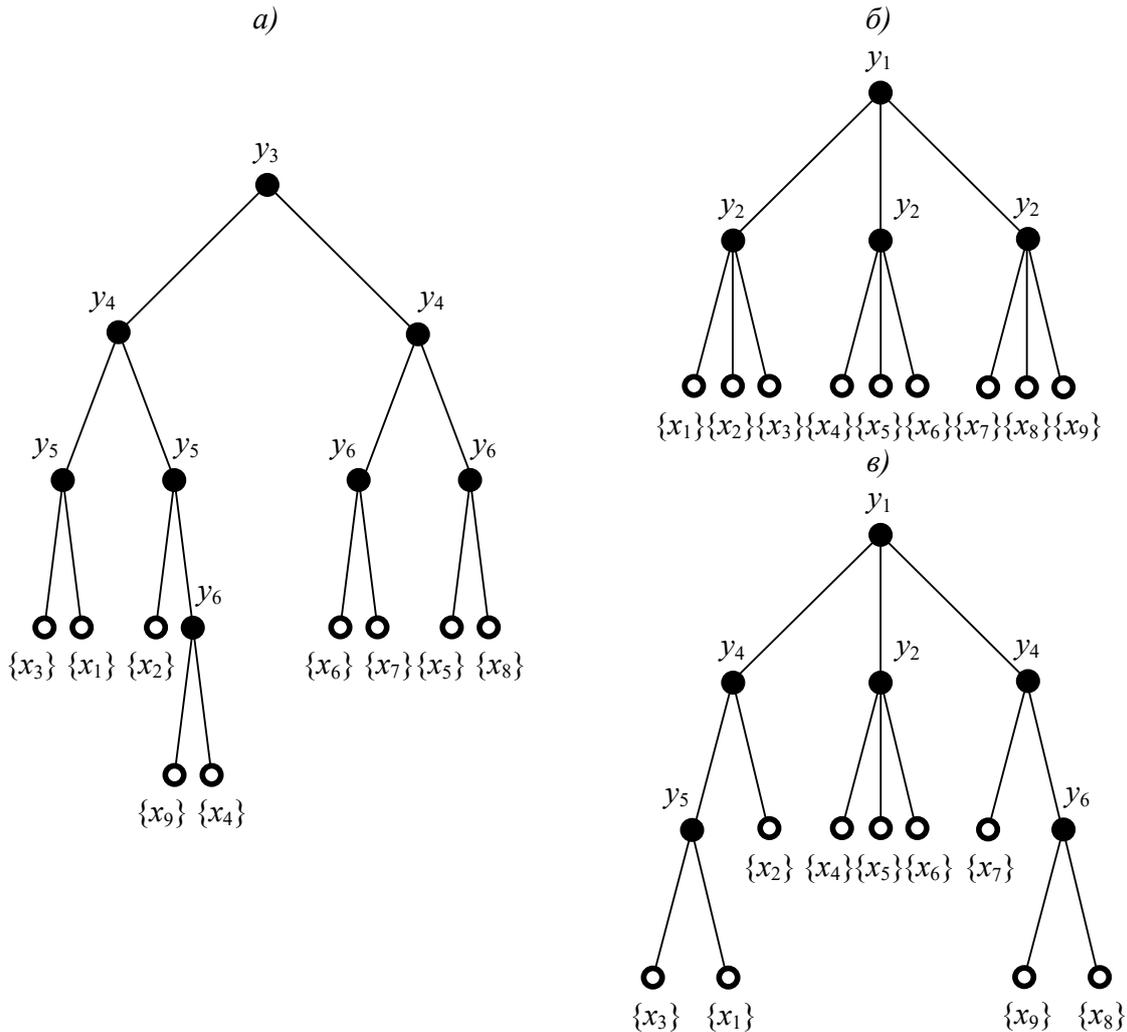


Рис. 1. Задание вопросника графом: *a* – вопросник, состоящий из бинарных вопросов; *б* – вопросник, состоящий из тернарных вопросов; *в* – вопросник, состоящий из бинарных и тернарных вопросов

Для каждого конкретного вопросника может быть определена средняя стоимость идентификации множества событий $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, называемая ценой обхода вопросника:

$$C = \sum_{i=1}^n p(y_i) c(y_i). \quad (2)$$

Различные вопросники могут иметь различное значение цены обхода.

К примеру, зададимся значениями вероятностей идентификации событий и цен вопросов для рассмотренной выше анкеты (табл. 1): $c(y_1) = 3$; $c(y_2) = 4$; $c(y_3) = 3$; $c(y_4) = 1$; $c(y_5) = 2$; $c(y_6) = 1$; $p(x_1) = 0,1$; $p(x_2) = 0,1$; $p(x_3) = 0,05$; $p(x_4) = 0,2$; $p(x_5) = 0,1$; $p(x_6) = 0,05$; $p(x_7) = 0,1$; $p(x_8) = 0,15$; $p(x_9) = 0,15$.

Для вопросника на рис. 1,а:

$$\begin{aligned} C_1 &= 3 \cdot 1,00 + 4 \cdot (0,1 + 0,1 + 0,05 + 0,2 + 0,15) + 2 \cdot (0,1 + 0,05) + \\ &+ 2 \cdot (0,1 + 0,2 + 0,15) + 1 \cdot (0,2 + 0,15) + 1 \cdot (0,1 + 0,05 + 0,1 + 0,15) + \\ &+ 1 \cdot (0,05 + 0,1) + 1 \cdot (0,1 + 0,15) = \\ &= 3 + 0,6 + 0,3 + 0,9 + 0,35 + 0,5 + 0,15 + 0,25 = 6,05. \end{aligned}$$

Для вопросника на рис. 1,б:

$$\begin{aligned} C_2 &= 3 \cdot 1,00 + 4 \cdot (0,1 + 0,1 + 0,05) + 4 \cdot (0,2 + 0,1 + 0,05) + 4 \cdot (0,1 + 0,15 + 0,15) = \\ &= 3 + 1 + 1,4 + 1,6 = 7. \end{aligned}$$

Для вопросника на рис. 1,в:

$$\begin{aligned} C_3 &= 3 \cdot 1,00 + 1 \cdot (0,1 + 0,1 + 0,05) + 2 \cdot (0,1 + 0,05) + \\ &+ 4 \cdot (0,2 + 0,1 + 0,05) + 1 \cdot (0,1 + 0,15 + 0,15) + 1 \cdot (0,15 + 0,15) = \\ &= 3 + 0,25 + 0,3 + 1,4 + 0,4 + 0,3 = 5,65. \end{aligned}$$

Сравнивая значения цен обхода каждого вопросника, отмечаем, что $C_3 < C_1 < C_2$. Таким образом, алгоритм диагностирования, реализованный по третьему вопроснику, позволяет идентифицировать события в среднем быстрее, чем алгоритм, реализованный по всем остальным вопросникам. При этом отметим, что в третьем алгоритме использованы и бинарные, и тернарные вопросы. В зависимости от соотношения цен вопросов и весовых коэффициентов идентифицируемых событий может быть выгоден тот или иной вариант.

Основной задачей теории вопросников является поиск оптимального по критерию минимума значения C вопросника, для которого $C = C_{\min}$. Например, вопросник, приведенный на рис. 1, в имеет наименьшую цену из всех трех вопросников, однако может существовать вопросник с меньшей ценой обхода. Методы оптимизации вопросников определяются исходя из вида вопросника и особенностей соотношения между ценами вопросов и весовых коэффициентов идентифицируемых событий [29]. На рис. 2 приведена классификация вопросников, основанная на выделении вопросов с различными основаниями. Каждый из таких вопросников может иметь и специальный вид, например: включать только равновесные события или иметь только равноценные вопросы. Кроме того, вопросник может содержать вопросы, допускающие ошибки и неопределенные ответы.

Следует отметить, что можно оптимизировать вопросник непосредственно по анкете (см. табл. 1) и получить гетерогенный вопросник. Если

есть ограничение на вид вопросника и виды задаваемых вопросов, то можно отдельно оптимизировать только бинарный вопросник или отдельно только тернарный вопросник.

Для решения задачи идентификации событий $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ минимально необходимо Y_{\min} вопросов. Число Y_{\min} определяется основаниями вопросов в вопроснике. Например, для бинарных вопросников это $Y_{\min} = \lceil \log_2 m \rceil$ (запись $\lceil \dots \rceil$ обозначает целое сверху от вычисляемого значения), а для тернарных вопросников $Y_{\min} = \lceil \log_3 m \rceil$. Неизбыточное множество вопросов Y задается таким образом, что $|Y| \geq Y_{\min}$. В случае если $|Y| = Y_{\min}$, вопросник называется компактным, иначе – некомпактным.

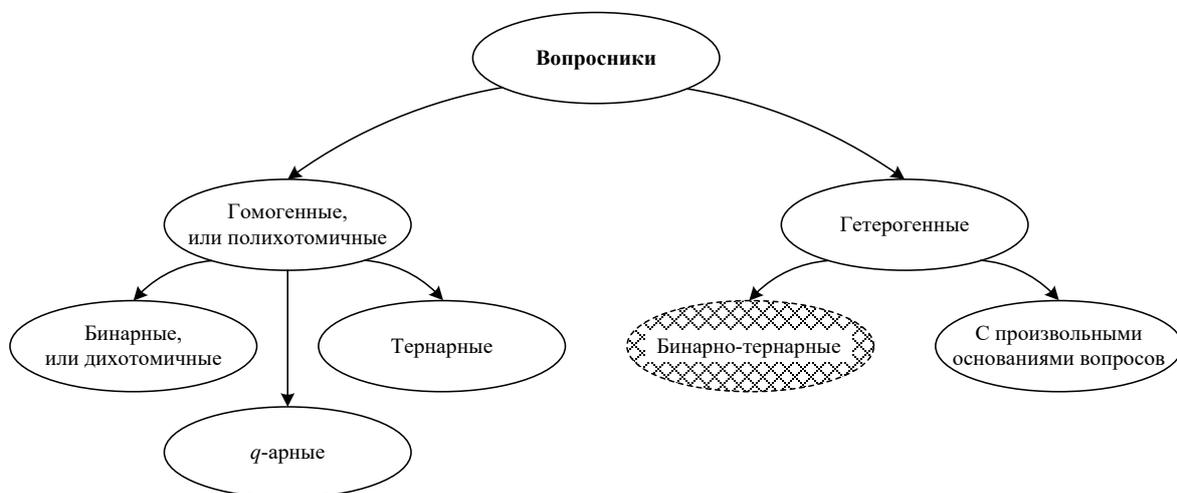


Рис. 2. Классификация вопросников

Рассмотрим подробнее особенности оптимизации бинарно-тернарных вопросников.

2. Оптимальные бинарно-тернарные вопросники

Построить оптимальный по цене обхода вопросник можно путем полного перебора всех вариантов постановки вопросов сначала на полном множестве идентифицируемых событий, затем на каждом из получаемых подмножеств. При этом среди всех полученных вопросников может быть выбран тот, который имеет минимальную цену обхода. С увеличением числа идентифицируемых событий число процедур по построению вопросников существенно увеличивается.

В [4, 10] доказано следующее важное в теории вопросников положение.

Теорема. Оптимальный вопросник состоит из оптимальных подвопросников.

Таким образом, оптимальный вопросник может быть построен путем выбора для каждого подмножества идентифицируемых событий на каждом шаге наилучшего варианта разбиения с помощью исходного множества вопросов. Алгоритмом, позволяющим строить оптимальные вопросники из оптимальных подвопросников, является алгоритм метода динамического программирования. Данный метод подразумевает первоначальный поиск всех возможных подмножеств разбиения исходного множества событий с числом элементов не менее двух (они называются ситуациями, а число событий в соответствующем подмножестве – порядком t ситуации) и определение для каждого полученного подмножества событий наилучшего с точки зрения цены обхода вопроса по уравнению оптимальности Р. Э. Беллмана:

$$C_{\min}(L_t, X_t) = \min_{y \in Y_t} \left\{ c(y) + \sum_{k=1}^{k=a(y)} p_k C_{\min}(L_t^k, X_{t,y}^k) \right\}, \quad (3)$$

где t – порядок ситуации (число событий в разделяемом подмножестве);
 (L_t, X_t) – ситуация L_t порядка t , включающая в себя подмножество идентифицируемых событий X_t , которые могут быть разделены вопросами из подмножества вопросов Y_t , имеющих смысл для идентифицируемого подмножества событий;

$c(y)$ – цена вопроса $y \in Y_t$;

$C_{\min}(L_t^k, X_{t,y}^k)$ – наименьшая цена разбиения ситуации $(L_t^k, X_{t,y}^k)$ на k подмножеств $X_{t,y}^k$ при постановке вопроса $y \in Y_t$;

$p_k = \frac{\sum_{x \in L_t^k} p(x)}{\sum_{x \in L_t} p(x)}$ – условная вероятность идентификации событий по каждому исходу.

Метод динамического программирования позволяет строить оптимальный вопросник, двигаясь от висячих вершин к корню. Альтернативой использованию метода динамического программирования является применение метода ветвей и границ, который позволяет строить оптимальный вопросник от корня к висячим вершинам [4].

Для построения оптимального вопросника по анкете, заданной таблицей 1, пользуясь методом динамического программирования, следует проделать определенные шаги.

Шаг 1. Проверяется логическая полнота анкеты.

На данном этапе анализируется сама анкета и выясняется, возможна ли идентификация всех событий по ней или нет, нет ли в анкете вопросов, не имеющих смысла. Возможность идентификации полного множества событий проверяется путем попарного сравнения всех столбцов анкеты. Если любые два столбца содержат отличия хотя бы в одной строке, то решается задача полной идентификации. В противном случае вопросник позволяет решить только задачу неполной идентификации. Вопросы, не имеющие смысла, – это те вопросы в анкете, строки которых заполнены одинаковыми цифрами номеров исходов.

Для рассматриваемого примера анкета является логически полной и позволяет решать задачу полной идентификации событий. При этом все вопросы имеют смысл для исходного множества событий и позволяют разделить его на два непустых подмножества.

Шаг 2. Осуществляется поиск всех ситуаций.

Данный шаг позволяет сократить число рассматриваемых подмножеств событий, которые нужно брать в расчет при оптимизации.

Приведем список всех пересечений подмножеств исходов вопросов.

$$y_1: \{x_1, x_2, x_3\} \cup \{x_4, x_5, x_6\} \cup \{x_7, x_8, x_9\};$$

$$y_2: \{x_1, x_4, x_7\} \cup \{x_2, x_5, x_8\} \cup \{x_3, x_6, x_9\};$$

$$y_3: \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_9\} \cup \{x_5, x_6, x_7, x_8\};$$

$$y_4: \{x_1, x_3, x_6, x_7\} \cup \{x_2, x_4, x_5, x_8, x_9\};$$

$$y_5: \{x_1, x_4, x_6, x_9\} \cup \{x_2, x_3, x_5, x_7, x_8\};$$

$$y_6: \{x_1, x_2, x_5, x_6, x_9\} \cup \{x_3, x_4, x_7, x_8\};$$

$$y_1 \cap y_2: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$$

$$y_1 \cap y_3: \{x_1, x_2, x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5, x_6\} \cup \{x_7, x_8\} \cup \{x_9\};$$

$$y_1 \cap y_4: \{x_1, x_3\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4, x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8, x_9\};$$

$$y_1 \cap y_5: \{x_1\} \cup \{x_2, x_3\} \cup \{x_4, x_6\} \cup \{x_5\} \cup \{x_7, x_8\} \cup \{x_9\};$$

$$y_1 \cap y_6: \{x_1, x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5, x_6\} \cup \{x_7, x_8\} \cup \{x_9\};$$

$$y_2 \cap y_3: \{x_1, x_4\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3, x_9\} \cup \{x_5, x_8\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\};$$

$$y_2 \cap y_4: \{x_1, x_7\} \cup \{x_2, x_5, x_8\} \cup \{x_3, x_6\} \cup \{x_4\} \cup \{x_9\};$$

$$\begin{aligned}y_2 \cap y_5: & \{x_1, x_4\} \cup \{x_2, x_5, x_8\} \cup \{x_3\} \cup \{x_6, x_9\} \cup \{x_7\}; \\y_2 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2, x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4, x_7\} \cup \{x_6, x_9\} \cup \{x_8\}; \\y_3 \cap y_4: & \{x_1, x_2, x_9\} \cup \{x_3, x_4\} \cup \{x_5, x_6\} \cup \{x_7, x_8\}; \\y_3 \cap y_5: & \{x_1, x_4, x_9\} \cup \{x_2, x_3\} \cup \{x_5, x_7, x_8\} \cup \{x_6\}; \\y_3 \cap y_6: & \{x_1, x_2, x_9\} \cup \{x_3, x_4\} \cup \{x_5, x_6\} \cup \{x_7, x_8\}; \\y_4 \cap y_5: & \{x_1, x_6\} \cup \{x_2, x_5, x_8\} \cup \{x_3, x_7\} \cup \{x_4, x_9\}; \\y_4 \cap y_6: & \{x_1, x_6\} \cup \{x_3, x_7\} \cup \{x_2, x_5, x_9\} \cup \{x_4, x_8\}; \\y_5 \cap y_6: & \{x_2, x_5\} \cup \{x_3, x_7, x_8\} \cup \{x_1, x_6, x_9\} \cup \{x_4\}; \\y_1 \cap y_2 \cap y_3: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_2 \cap y_4: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_2 \cap y_5: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_2 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_3 \cap y_4: & \{x_1, x_3\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_3 \cap y_5: & \{x_1\} \cup \{x_2, x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7, x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_3 \cap y_6: & \{x_1, x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5, x_6\} \cup \{x_7, x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_4 \cap y_5: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_4 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5, x_8\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_9\}; \\y_2 \cap y_3 \cap y_4: & \{x_1, x_4\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_5, x_8\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_9\}; \\y_2 \cap y_3 \cap y_5: & \{x_2\} \cup \{x_1, x_4\} \cup \{x_3\} \cup \{x_5, x_7\} \cup \{x_6\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_2 \cap y_3 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_2 \cap y_4 \cap y_5: & \{x_1\} \cup \{x_2, x_5, x_8\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_9\}; \\y_2 \cap y_4 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2, x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_2 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2, x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_3 \cap y_4 \cap y_5: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4, x_9\} \cup \{x_5, x_8\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\}; \\y_3 \cap y_4 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2, x_9\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\};\end{aligned}$$

$y_3 \cap y_5 \cap y_6: \{x_1, x_9\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7, x_8\};$
 $y_4 \cap y_5 \cap y_6: \{x_1, x_6\} \cup \{x_2, x_5\} \cup \{x_3, x_7\} \cup \{x_4\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_2 \cap y_3 \cap y_4: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_2 \cap y_3 \cap y_5: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_2 \cap y_3 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_2 \cap y_4 \cap y_5: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_2 \cap y_4 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_2 \cap y_5 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_5: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_3 \cap y_5 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7, x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_4 \cap y_5 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_2 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_5: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5, x_8\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_9\};$
 $y_2 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_2 \cap y_3 \cap y_5 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_2 \cap y_4 \cap y_5 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2, x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_3 \cap y_4 \cap y_5 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_2 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_5: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_2 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_2 \cap y_3 \cap y_5 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_2 \cap y_4 \cap y_5 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_5 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_2 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_5 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$
 $y_1 \cap y_2 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_5 \cap y_6: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}.$

После получения такого списка выбираются все неповторяющиеся ситуации порядков $t \geq 2$.

Шаг 3. Анализируются ситуации и осуществляется построение оптимальных подвопросников для разделения событий, находящихся в них.

Осуществляется процесс получения оптимальных подвопросников, позволяющих разделить все ситуации всех порядков. Результаты анализа приводятся в табл. 2–6. Результатом оптимизации является вопросник, приведенный на рис. 3. Цена обхода полученного оптимального вопросника определяется величиной $C = 4,5$. Полученная величина меньше, чем для произвольных вопросников, приведенных на рис. 2.

Если рассмотреть вопросник, включающий в себя только бинарные вопросы (исключив вопросы y_1 и y_2), то метод динамического программирования даст оптимальный бинарный вопросник с ценой обхода $C = 4,7$ (рис. 4). Данная величина меньше цен обхода произвольных вопросников, приведенных на рис. 1, но больше, чем вопросника с бинарными и тернарными вопросами. Таким образом, наличие тернарных вопросов в ряде случаев может оказаться выгодным при построении вопросника с наименьшей ценой обхода.

Приведем пример подсчета оптимальной цены подвопросника по формуле (3) для ситуации четвертого порядка $\{x_1, x_4, x_6, x_9\}$:

$$C_{\min}(x_1, x_4, x_6, x_9) = \min \left\{ \begin{array}{l} c(y_1) + \frac{p(x_4) + p(x_6)}{p(x_1) + p(x_4) + p(x_6) + p(x_9)} C_{\min}(x_4, x_6); \\ c(y_2) + \frac{p(x_1) + p(x_4)}{p(x_1) + p(x_4) + p(x_6) + p(x_9)} C_{\min}(x_1, x_4) + \\ + \frac{p(x_6) + p(x_9)}{p(x_1) + p(x_4) + p(x_6) + p(x_9)} C_{\min}(x_6, x_9); \\ c(y_3) + \frac{p(x_1) + p(x_4) + p(x_9)}{p(x_1) + p(x_4) + p(x_6) + p(x_9)} C_{\min}(x_1, x_4, x_9); \\ c(y_4) + \frac{p(x_1) + p(x_6)}{p(x_1) + p(x_4) + p(x_6) + p(x_9)} C_{\min}(x_1, x_6) + \\ + \frac{p(x_4) + p(x_9)}{p(x_1) + p(x_4) + p(x_6) + p(x_9)} C_{\min}(x_4, x_9); \\ c(y_6) + \frac{p(x_1) + p(x_6) + p(x_9)}{p(x_1) + p(x_4) + p(x_6) + p(x_9)} C_{\min}(x_1, x_6, x_9); \end{array} \right\} =$$

$$= \min\{3,50; 5,00; 4,40; 2,60; 2,50\} = 2,50.$$

Таблица 2

Результаты анализа ситуаций $t = 2$ порядка

L_2	y	L_t	C_{opt}	y_{opt}
$\{x_1, x_2\}$	y_2, y_4, y_5	$\{x_1\}, \{x_2\}$	1	y_4
$\{x_1, x_3\}$	y_2, y_5, y_6	$\{x_1\}, \{x_3\}$	1	y_6
$\{x_1, x_4\}$	y_1, y_4, y_6	$\{x_1\}, \{x_4\}$	1	y_4, y_6
$\{x_1, x_6\}$	y_1, y_2, y_3	$\{x_1\}, \{x_6\}$	3	y_1, y_3
$\{x_1, x_7\}$	y_1, y_3, y_5, y_6	$\{x_1\}, \{x_7\}$	1	y_6
$\{x_1, x_9\}$	y_1, y_2, y_4	$\{x_1\}, \{x_9\}$	1	y_4
$\{x_2, x_3\}$	y_2, y_4, y_6	$\{x_2\}, \{x_3\}$	1	y_4, y_6
$\{x_2, x_5\}$	y_1, y_3	$\{x_2\}, \{x_5\}$	3	y_1, y_3
$\{x_2, x_9\}$	y_1, y_2, y_5	$\{x_2\}, \{x_9\}$	2	y_5
$\{x_3, x_4\}$	y_1, y_2, y_4, y_5	$\{x_3\}, \{x_4\}$	1	y_4
$\{x_3, x_6\}$	y_1, y_3, y_5, y_6	$\{x_3\}, \{x_6\}$	1	y_6
$\{x_3, x_7\}$	y_1, y_2, y_3	$\{x_3\}, \{x_7\}$	3	y_1
$\{x_3, x_9\}$	y_1, y_4, y_5, y_6	$\{x_3\}, \{x_9\}$	1	y_4
$\{x_4, x_5\}$	y_2, y_3, y_5, y_6	$\{x_4\}, \{x_8\}$	1	y_6
$\{x_4, x_6\}$	y_2, y_3, y_4, y_6	$\{x_4\}, \{x_9\}$	1	y_4, y_6
$\{x_4, x_8\}$	y_1, y_2, y_3, y_5	$\{x_5\}, \{x_6\}$	2	y_5
$\{x_4, x_9\}$	y_1, y_2, y_6	$\{x_5\}, \{x_7\}$	1	y_6
$\{x_5, x_6\}$	y_2, y_4, y_5	$\{x_5\}, \{x_8\}$	1	y_4
$\{x_5, x_8\}$	y_1, y_6	$\{x_6\}, \{x_7\}$	1	y_6
$\{x_6, x_9\}$	y_1, y_3, y_4	$\{x_6\}, \{x_9\}$	1	y_4
$\{x_7, x_8\}$	y_2, y_4	$\{x_7\}, \{x_8\}$	1	y_4
$\{x_8, x_9\}$	y_2, y_3, y_5, y_6	$\{x_8\}, \{x_9\}$	1	y_6

Таблица 3

Результаты анализа ситуаций $t = 3$ порядка

L_3	y	L_t	C	C_{opt}	y_{opt}
1	2	3	4	5	6
$\{x_1, x_2, x_3\}$	y_2	$\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}$	4,00	1,60	y_4
	y_4	$\{x_1, x_3\}, \{x_2\}$	1,60		
	y_5	$\{x_1\}, \{x_2, x_3\}$	2,60		
	y_6	$\{x_1, x_2\}, \{x_3\}$	1,80		
$\{x_1, x_2, x_9\}$	y_1	$\{x_1, x_2\}, \{x_9\}$	3,57	1,71	y_5
	y_2	$\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_9\}$	4,00		
	y_4	$\{x_1\}, \{x_2, x_9\}$	3,42		
	y_5	$\{x_1, x_9\}, \{x_2\}$	1,71		
$\{x_1, x_4, x_7\}$	y_1	$\{x_1\}, \{x_4\}, \{x_7\}$	3,00	1,50	y_4
	y_3	$\{x_1, x_4\}, \{x_7\}$	3,75		
	y_4	$\{x_1, x_7\}, \{x_4\}$	1,50		
	y_5	$\{x_1, x_4\}, \{x_7\}$	2,75		

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6
$\{x_1, x_4, x_9\}$	y_1	$\{x_1, \{x_4, \{x_9\}\}$	3,00	1,56	y_6
	y_2	$\{x_1, x_4, \{x_9\}\}$	4,67		
	y_4	$\{x_1, \{x_4, x_9\}\}$	1,78		
	y_6	$\{x_1, x_9, \{x_4\}\}$	1,56		
$\{x_1, x_6, x_9\}$	y_1	$\{x_1, \{x_6, \{x_9\}\}$	3,00	2,50	y_4
	y_2	$\{x_1, \{x_6, x_9\}\}$	4,67		
	y_3	$\{x_1, x_9, \{x_6\}\}$	3,83		
	y_4	$\{x_1, x_6, \{x_9\}\}$	2,50		
$\{x_2, x_5, x_8\}$	y_1	$\{x_2, \{x_5, \{x_8\}\}$	3,00	2,71	y_6
	y_3	$\{x_2, \{x_5, x_8\}\}$	3,71		
	y_6	$\{x_2, x_5, \{x_8\}\}$	2,71		
$\{x_2, x_5, x_9\}$	y_1	$\{x_2, \{x_5, \{x_9\}\}$	3,00	3,00	y_1
	y_2	$\{x_2, x_5, \{x_9\}\}$	5,71		
	y_3	$\{x_2, x_9, \{x_5\}\}$	4,43		
	y_5	$\{x_2, x_5, \{x_9\}\}$	3,71		
$\{x_3, x_6, x_9\}$	y_1	$\{x_3, \{x_6, \{x_9\}\}$	3,00	1,40	y_4
	y_3	$\{x_3, x_9, \{x_6\}\}$	3,80		
	y_4	$\{x_3, x_6, \{x_9\}\}$	1,40		
	y_5	$\{x_3, \{x_6, x_9\}\}$	2,80		
	y_6	$\{x_3, \{x_6, x_9\}\}$	1,80		
$\{x_3, x_7, x_8\}$	y_1	$\{x_3, \{x_7, x_8\}\}$	3,83	2,50	y_4
	y_2	$\{x_3, \{x_7, \{x_8\}\}\}$	4,00		
	y_3	$\{x_3, \{x_7, x_8\}\}$	3,83		
	y_4	$\{x_3, x_7, \{x_8\}\}$	2,50		
$\{x_4, x_5, x_6\}$	y_2	$\{x_4, \{x_5, \{x_6\}\}$	4,00	1,43	y_6
	y_3	$\{x_4, \{x_5, x_6\}\}$	3,43		
	y_4	$\{x_4, x_5, \{x_6\}\}$	1,86		
	y_5	$\{x_4, x_6, \{x_5\}\}$	2,71		
	y_6	$\{x_4, \{x_5, x_6\}\}$	1,43		
$\{x_5, x_7, x_8\}$	y_1	$\{x_5, \{x_7, x_8\}\}$	3,71	1,71	y_6
	y_2	$\{x_5, x_8, \{x_7\}\}$	4,71		
	y_4	$\{x_5, x_8, \{x_7\}\}$	1,71		
	y_6	$\{x_5, \{x_7, x_8\}\}$	1,71		
$\{x_7, x_8, x_9\}$	y_2	$\{x_7, \{x_8, \{x_9\}\}$	4,00	1,63	y_6
	y_3	$\{x_7, x_8, \{x_9\}\}$	3,63		
	y_4	$\{x_7, \{x_8, x_9\}\}$	1,75		
	y_5	$\{x_7, x_8, \{x_9\}\}$	2,63		
	y_6	$\{x_7, x_8, \{x_9\}\}$	1,63		

Таблица 4

Результаты анализа ситуаций $t = 4$ порядка

L_4	y	L_t	C	C_{opt}	y_{opt}
$\{x_1, x_3, x_6, x_7\}$	y_1	$\{x_1, x_3\}, \{x_6\}, \{x_7\}$	3,50	3,50	y_1
	y_2	$\{x_1, x_7\}, \{x_3, x_6\}$	5,00		
	y_5	$\{x_1, x_6\}, \{x_3, x_7\}$	5,00		
	y_6	$\{x_1, x_6\}, \{x_3, x_7\}$	4,00		
$\{x_1, x_4, x_6, x_9\}$	y_1	$\{x_1\}, \{x_4, x_6\}, \{x_9\}$	3,50	2,50	y_6
	y_2	$\{x_1, x_4\}, \{x_6, x_9\}$	5,00		
	y_3	$\{x_1, x_4, x_9\}, \{x_6\}$	4,40		
	y_4	$\{x_1, x_6\}, \{x_4, x_9\}$	2,60		
	y_6	$\{x_1, x_6, x_9\}, \{x_4\}$	2,50		
$\{x_3, x_4, x_7, x_8\}$	y_1	$\{x_3\}, \{x_4\}, \{x_7, x_8\}$	3,50	3,30	y_4
	y_3	$\{x_3, x_4\}, \{x_7, x_8\}$	4,00		
	y_4	$\{x_3, x_7\}, \{x_4, x_8\}$	3,30		
	y_5	$\{x_3, x_7, x_8\}, \{x_4\}$	3,95		
$\{x_5, x_6, x_7, x_8\}$	y_1	$\{x_5, x_6\}, \{x_7, x_8\}$	4,00	2,00	y_6
	y_2	$\{x_5, x_8\}, \{x_6\}, \{x_7\}$	4,63		
	y_5	$\{x_5, x_7, x_8\}, \{x_6\}$	3,50		
	y_6	$\{x_5, x_6\}, \{x_7, x_8\}$	2,00		

Таблица 5

Результаты анализа ситуаций $t = 5$ порядка

L_5	y	L_t	C	C_{opt}	y_{opt}
$\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_9\}$	y_1	$\{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_9\}$	3,67	2,41	y_6
	y_2	$\{x_1, x_4\}, \{x_2\}, \{x_3, x_9\}$	4,83		
	y_5	$\{x_1, x_4, x_9\}, \{x_2, x_3\}$	3,42		
	y_6	$\{x_1, x_2, x_9\}, \{x_3, x_4\}$	2,41		
$\{x_1, x_2, x_5, x_6, x_9\}$	y_1	$\{x_1, x_2\}, \{x_5, x_6\}, \{x_9\}$	3,70	3,70	y_1
	y_2	$\{x_1\}, \{x_2, x_5\}, \{x_6, x_9\}$	5,60		
	y_3	$\{x_1, x_2, x_9\}, \{x_5, x_6\}$	4,50		
	y_4	$\{x_1, x_6\}, \{x_2, x_5, x_9\}$	4,00		
	y_5	$\{x_1, x_6, x_9\}, \{x_2, x_5\}$	4,70		
$\{x_2, x_3, x_5, x_7, x_8\}$	y_1	$\{x_2, x_3\}, \{x_5\}, \{x_7, x_8\}$	3,80	3,20	y_4
	y_2	$\{x_2, x_5, x_8\}, \{x_3\}, \{x_7\}$	5,90		
	y_3	$\{x_2, x_3\}, \{x_5, x_7, x_8\}$	4,50		
	y_4	$\{x_2, x_5, x_8\}, \{x_3, x_7\}$	3,20		
	y_6	$\{x_2, x_5\}, \{x_3, x_7, x_8\}$	3,70		
$\{x_2, x_4, x_5, x_8, x_9\}$	y_1	$\{x_2\}, \{x_4, x_5\}, \{x_8, x_9\}$	3,86	3,50	y_6
	y_2	$\{x_4\}, \{x_2, x_5, x_8\}, \{x_9\}$	5,36		
	y_5	$\{x_2, x_5, x_8\}, \{x_4, x_9\}$	3,86		
	y_6	$\{x_2, x_5, x_9\}, \{x_4, x_8\}$	3,50		

Таблица 6
Результаты анализа ситуаций $t = 9$ порядка

L_9	y	L_t	C	C_{opt}	y_{opt}
$\{x_1 \div x_9\}$	y_1	$\{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\}$	4,55	4,50	y_4, y_6
	y_2	$\{x_1, x_4, x_7\}, \{x_2, x_5, x_8\}, \{x_3, x_6, x_9\}$	5,89		
	y_3	$\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_9\}, \{x_5, x_6, x_7, x_8\}$	5,25		
	y_4	$\{x_1, x_3, x_6, x_7\}, \{x_2, x_4, x_5, x_8, x_9\}$	4,50		
	y_5	$\{x_1, x_4, x_6, x_9\}, \{x_2, x_3, x_5, x_7, x_8\}$	4,85		
	y_6	$\{x_1, x_2, x_5, x_6, x_9\}, \{x_3, x_4, x_7, x_8\}$	4,50		

Сложность метода динамического программирования является экспоненциальной [14], что с увеличением числа идентифицируемых событий приводит к существенному усложнению решаемой задачи (в том числе даже при использовании современных вычислительных систем). Поэтому на практике могут применяться приближенные методы, дающие квазиоптимальные вопросники.

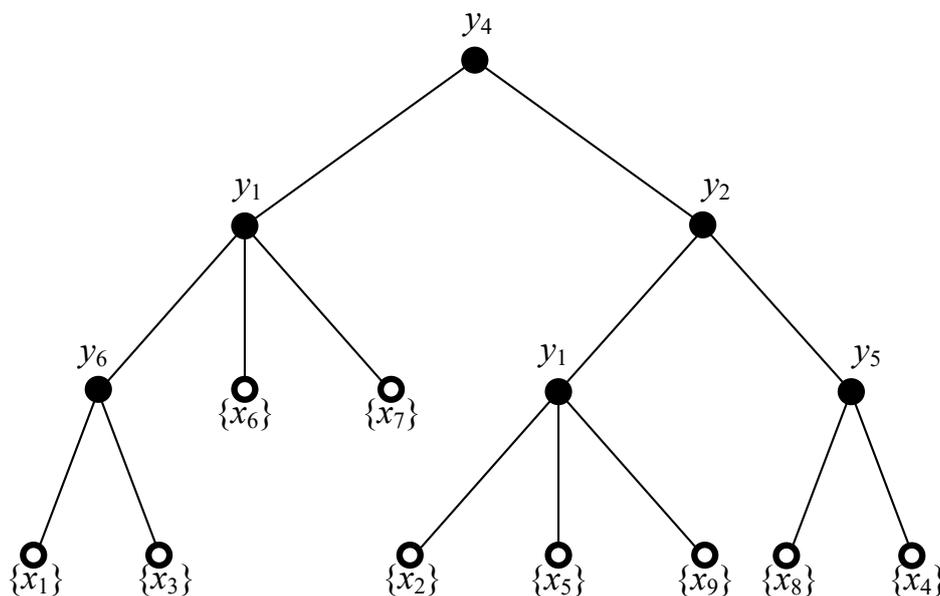


Рис. 3. Оптимальный вопросник с бинарными и тернарными вопросами

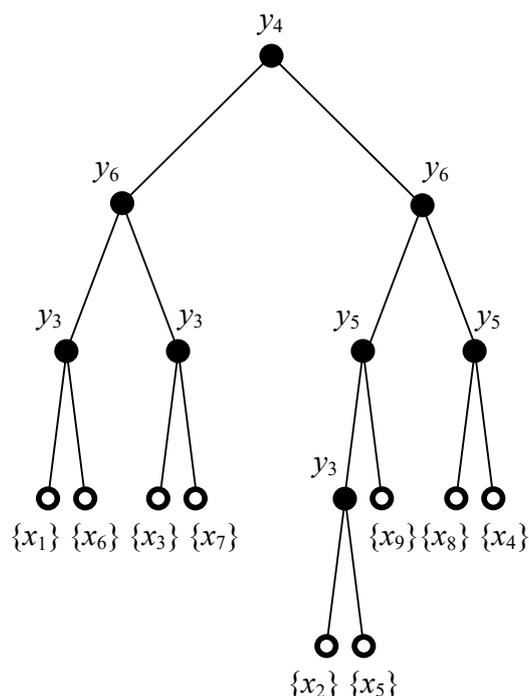


Рис. 4. Оптимальный бинарный вопросник

3. Некоторые свойства бинарно-тернарных вопросников

Сравнивая между собой бинарные и бинарно-тернарные вопросники, отметим несколько особенностей последних, позволяющих говорить о некотором их преимуществе перед первыми.

Свойство 1. Бинарно-тернарный вопросник требует меньшего числа постановок вопросов, чем бинарный, позволяющий идентифицировать то же множество событий.

Данное свойство следует из того факта, что один тернарный вопрос идентифицирует три события, а бинарный – только два, т. е. процесс идентификации закончится «быстрее», если используются не только бинарные вопросы, но еще и тернарные. Для примера сравним вопросники на рис. 3 и 4. Бинарно-тернарный вопросник состоит из шести вопросов, тогда как бинарный – из восьми.

Свойство 2. Максимальная длина маршрута в бинарно-тернарном вопроснике может оказаться такой же или меньшей, чем в бинарном вопроснике.

Под маршрутом понимается последовательность вершин и ребер, ведущая от корневой вершины графа к какой-либо из висячих вершин. Число ребер в маршруте является его длиной.

Свойство 2 связано также с процессом идентификации событий из заданного множества и «быстротой» его завершения. Чем меньше длина маршрута, тем меньшее количество вопросов требуется для идентификации любых событий по вопроснику. Вновь сравним для примера вопросники, приведенные на рис. 3 и 4: максимальная длина маршрута в первом равна трем, во втором – четырем.

Представленные особенности бинарно-тернарных вопросников следует учитывать при синтезе алгоритмов идентификации событий с ограничениями на время проведения данной процедуры или на максимальное число вопросов, требующихся для решения поставленной задачи.

4. Приложение вопросников в технической диагностике систем автоматики и управления

Техническое диагностирование устройств и систем автоматики производится на различных уровнях их реализации и на всех этапах их жизненного цикла [30]. Процедуры по техническому диагностированию могут выполняться как автоматически, так и с привлечением сервисного персонала.

Так как технически оборудовать устройства и системы автоматики развитыми средствами встроенного и внешнего диагностирования не всегда возможно, во всех областях промышленности и транспорта требуется использовать техническое диагностирование с привлечением сервисного персонала, а также проводить процедуры по техническому обслуживанию. С целью снижения влияния человеческого фактора на процесс диагностирования, а также повышения уровня автоматизации внедряются средства внешнего технического диагностирования и мониторинга [31]. В состав систем технического диагностирования и мониторинга входят датчики физических величин и специализированные диагностические приборы (датчики могут быть интегрированы в приборы, а могут быть внешними, например датчики получения данных от искусственных сооружений и организации систем структурированного мониторинга [32, 33]), сети передачи первичной или преобразованной диагностической информации, устройства концентрации, аналитики и вывода данных конечному пользователю. Сконцентрируем внимание на системах технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики [34].

Системы мониторинга устройств железнодорожной автоматики включают в себя все обозначенные выше уровни. Основными объектами мониторинга являются устройства автоматики, расположенные в непосредственной близости к железнодорожному полотну, – напольное технологическое оборудование. По статистике именно на напольное оборудование приходится подавляющее число отказов устройств железнодорожной автоматики [35]. К напольному оборудованию относятся рельсовые цепи, средства управления железнодорожными стрелками, светофоры, объекты децентрализованных систем автоблокировки и переездной автоматики и т. п. Наиболее уязвимыми являются средства управления железнодорожными стрелками и оборудование рельсовых цепей. Данные объекты железнодорожной автоматики особенно восприимчивы к изменению климатических условий эксплуатации, состоянию верхнего строения пути, воздействиям со стороны подвижного состава.

На рис. 5 представлен схематический план произвольной промежуточной станции в однониточном исполнении (такие станции широко распространены на железных дорогах). Для позиционирования подвижных единиц используется 18 рельсовых цепей (8 разветвленных и 10 неразветвленных). Для перемещения поездов с одного пути на другой на станции уложено 15 стрелочных переводов, оборудованных устройствами автоматического управления. Движение регулируется с помощью 14 поездных и 5 маневровых светофоров. Это основные объекты мониторинга. В современных системах мониторинга они контролируются только косвенно по состоянию централизованных объектов автоматики (постовых устройств) [36].

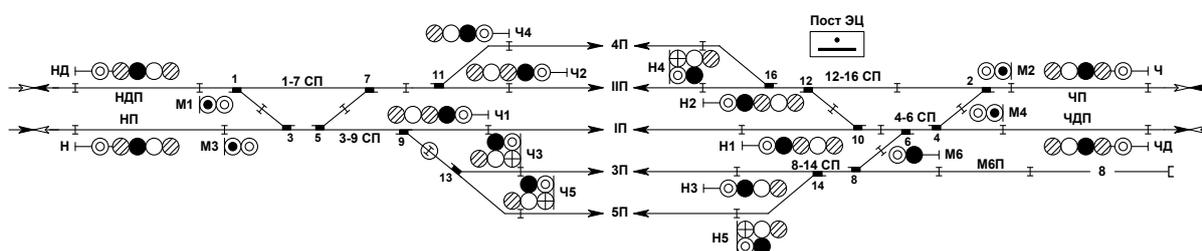


Рис. 5. Схематический план промежуточной станции

По причине того, что мониторинг устройств автоматики производится по средствам управления, располагаемым на посту централизации, качество диагностирования является низким. Глубина диагностирования является недостаточной (зачастую – до фиксации дефекта объекта диагностирования,

но не до конкретной его структурной единицы). Полнота диагностирования также является низкой. Требуется дополнительный анализ диагностической информации и привлечение сервисного персонала для идентификации диагностических событий [37].

Рассмотрим, к примеру, рельсовую цепь тональной частоты. В современных системах мониторинга устройств железнодорожной автоматики для мониторинга рельсовой цепи используют несколько параметров: дискретные состояния и напряжения на выходах генератора частот, путевого приемника, путевого реле, а также сопротивление изоляции кабеля, ведущего от постовых устройств автоматики к напольному оборудованию [38]. Изменяя эти параметры с малым периодом диагностирования (несколько секунд опроса датчиков), система технического диагностирования и мониторинга формирует массив диагностических признаков. Методы их распознавания подробно описаны, например, в [39]. Диагностические признаки соответствуют конкретным диагностическим ситуациям. Часть диагностических ситуаций может быть интерпретирована системой мониторинга автоматически, остальные требуют дополнительного ручного анализа.

Приведем простой пример. Системой мониторинга зафиксирован отказ рельсовой цепи, при котором наблюдаются такие значения диагностических параметров: требуемое значение напряжения на выходе генератора, отсутствие напряжения на путевом фильтре, отсутствие напряжения на путевом реле, сопротивление изоляции кабеля в норме. Отсюда следует сделать несколько выводов: дефект может быть связан с отказом путевого приемника, оборудования подключения приборов к рельсам, нарушением целостности рельсовой нити и т. д. Каждое из этих событий может возникать с какой-то вероятностью.

Имея в программном обеспечении системы технического диагностирования и мониторинга подсистему записи истории функционирования объектов диагностирования (архив), фиксируя изначально условия и исходные исторические данные об объектах диагностирования, а также анализируя статистические данные о состояниях объектов диагностирования, можно строить самообучающиеся системы мониторинга. Такие системы «настраиваются» на работу с конкретными объектами диагностирования, учитывают климатические условия эксплуатации объектов диагностирования, а также включают в себя развитые подсистемы поддержки принятия решений. Такие подсистемы целесообразно реализовывать на основе теории вопросников. В

подсистеме поддержки принятия решения строится вопросник, который учитывает все возможные диагностические события, специфику самого объекта диагностирования и выдает рекомендуемые для сервисного персонала действия, которые с определенной вероятностью приведут к результату – идентификации события дефекта. Такой вопросник может иметь произвольную форму и перестраиваться во времени с учетом как вероятностей возникновения различных диагностических событий, так и критичности их влияния на перевозочный процесс (влияния на готовность устройств автоматики к выполнению своих функций). Например, в [38] описывается процесс диагностирования рельсовых цепей тональной частоты и дан пример идентификации состояния рельсовой цепи при измерениях напряжений системой мониторинга. Данный процесс может быть представлен в виде вопросника.

На рис. 6 приведены вопросники, которые позволяют на основе анализа данных от рельсовой цепи автоматизировать идентификацию ряда диагностических событий в системах технического диагностирования и мониторинга. Данные вопросники позволяют реализовать процесс идентификации события по алгоритму, предложенному в [38]. Для примера представлено два варианта вопросников, которые могут быть реализованы в программном обеспечении системы. Они отличаются постановкой первого вопроса y_1 . В бинарном вопроснике этот вопрос звучит следующим образом: «Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $0 \leq U_{\text{пп}} \leq U_{\text{ост}}?$ » В бинарно-тернарном так: «Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $U_{\text{пп}} \leq U_{\text{мин}}$ и $U_{\text{пп}} \geq 0$ или $U_{\text{пп}} \leq U_{\text{мин}}$ и $U_{\text{пп}} \geq U_{\text{ост}}?$ ». Данные вопросы позволяют идентифицировать два диагностических события – x_1 («наличие логической занятости») и x_2 («напряжение $U_{\text{ост}}$ выше нормы»). Следующий вопрос в бинарном вопроснике (y_2) формулируется так: «Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $U_{\text{ост}} \leq U_{\text{пп}} \leq U_{\text{мин}}?$ ». Вопрос y_3 в бинарном вопроснике (y_2 в бинарно-тернарном вопроснике): « $U_{\text{мин}} \leq U_{\text{пп}} \leq U_{\text{крит}}?$ ». Данные вопросы различают событие x_3 («предотказное состояние рельсовой цепи»). Вопрос y_4 в бинарном вопроснике (y_3 в бинарно-тернарном вопроснике): « $U_{\text{крит}} \leq U_{\text{пп}} \leq U_{\text{макс}}?$ ». Данные вопросы различают событие x_4 («параметры рельсовой цепи в норме»). Вопрос y_5 в бинарном вопроснике (y_4 в бинарно-тернарном вопроснике): « $U_{\text{макс}} \leq U_{\text{пп}} \leq \infty?$ ». Если «да», то фиксируется событие x_5 («логическая свобода рельсовой цепи»), иначе – фиксируется событие x_6 («дефект в другом устройстве рельсовой цепи»). Форма вопросника определяется на этапе разработки подсистемы поддержки принятия решений и влияет на среднее время идентификации событий по вопроснику. Такие вопросники

могут «наращиваться», а также «объединяться» в «систему вопросников» для повышения полноты и глубины диагностирования.

Можно повысить информативность системы мониторинга за счет добавления диагностических параметров, например включения датчиков целостности устройств подключения аппаратуры к рельсам, дополнительных датчиков зондирования рельсов, получения данных от средств самодиагностирования генераторов, фильтров и реле и т. д. Например, в работе [40] рассмотрено влияние различных параметров на асимметрию тягового тока. Измеряется падение напряжения на секциях основных обмоток дроссель-трансформаторов, установленных в начале и в конце рельсовой цепи. Способ измерения предполагает участие человека в данном процессе, однако он может быть автоматизирован с помощью специализированных датчиков получения необходимой диагностической информации с автоматической передачей результатов мониторинга в концентратор информации.

По результатам измерений вычисляются коэффициенты асимметрии тягового тока в начале и в конце рельсовой цепи, а также степень ослабления тягового тока в каждой рельсовой нити. Это позволяет анализировать причины возникновения повышенной асимметрии тягового тока.

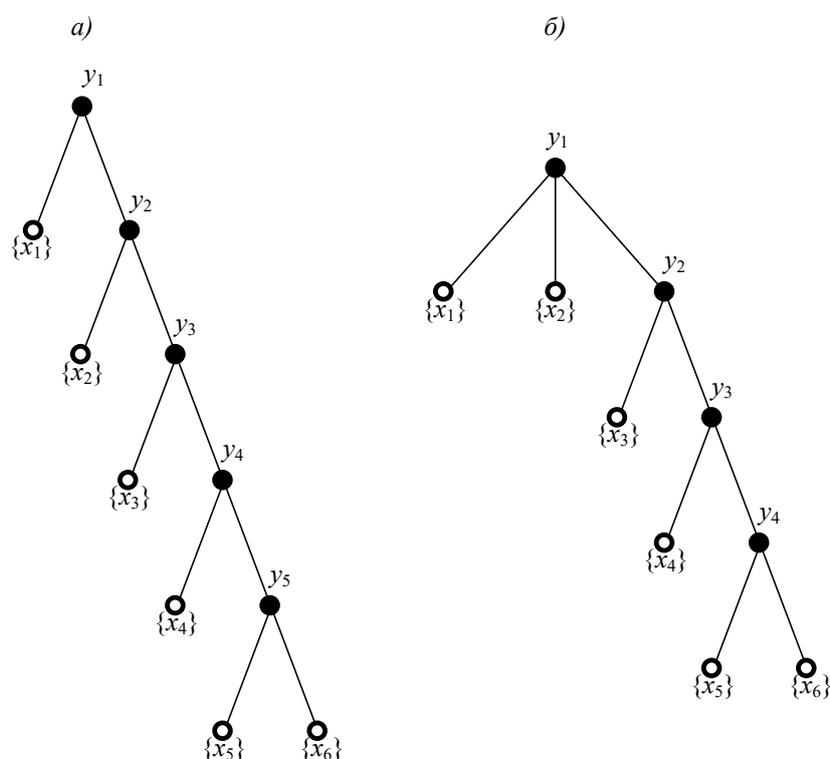


Рис. 6. Вопросник для идентификации состояния рельсовой цепи тональной частоты:
а – бинарная форма; б – бинарно-тернарная форма

Построим вопросник для данного «расширения» возможностей системы мониторинга. Вопросы формулируются следующим образом: y_1 – «Степень уменьшения тягового тока в рельсовых нитях примерно одинакова, а тяговый ток больше в начале и в конце одной из рельсовой нити?»; y_2 – «Тяговый ток больше втекает в рельсовую нить, к которой подключены цепи заземления, и быстрее в ней уменьшается?»; y_3 – «Степень уменьшения тягового тока такова, что в конце рельсовой нити, к которой подключены цепи заземления, оказывается меньше, чем в другой нити?»; y_4 – «Тяговый ток меньше и в начале, и в конце рельсовой нити, к которой подключены цепи заземления, при более высокой степени уменьшения тягового тока в ней?». Ответами на вопросы и идентифицируемыми ими событиями при положительном исходе соответственно будут события: x_1 – «Причиной асимметрии тягового тока является повышенное сопротивление рельсовых стыковых соединителей в другой рельсовой нити»; x_2 – «Причиной асимметрии является пониженное сопротивление цепей заземления»; x_3 – «Асимметрия вызывается дополнительно и повышенным сопротивлением рельсовых стыковых соединителей в другой рельсовой нити»; x_4 – «Причиной асимметрии тягового тока является совместное повышенное сопротивление рельсовых стыковых соединителей и пониженное сопротивление цепей заземления в этой рельсовой нити». Если вопросы не дают результата, то фиксируется событие x_5 – «Причина в других устройствах рельсовой цепи».

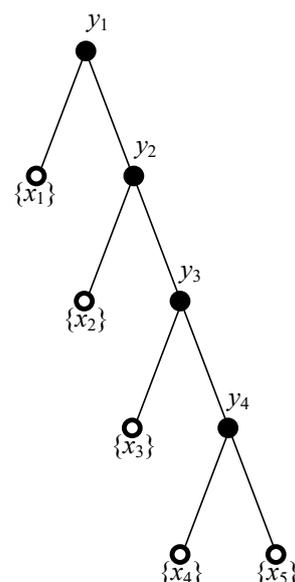


Рис. 7. Вопросник для идентификации причин асимметрии тягового тока

Фиксация рассмотренных событий позволяет идентифицировать последующие варианты проведения ручных измерений сервисным персоналом – конкретную рельсовую нить и структурные единицы (токопроводящие или изолирующие) для проведения измерений.

Исторические и статистические данные позволят в системе поддержки принятия решений выбирать последовательности постановки вопросов для решения задачи идентификации.

Внедрение подсистем поддержки принятия решений в программное обеспечение систем технического диагностирования и мониторинга позволяет усовершенствовать технологию их функционирования.

Заключение

Бинарно-тернарные вопросники – это тот класс гетерогенных вопросников, который может эффективно использоваться в практических задачах разделения и идентификации событий. При этом бинарно-тернарный вопросник по сравнению с бинарным вопросником, построенным для того же множества идентифицируемых событий, при одинаковых ценах вопросов будет иметь меньше вопросов и, соответственно, меньшую цену обхода. Отмеченное преимущество может оказаться востребованным при ограничениях на максимальное время идентификации событий.

Использование вопросников при диагностировании устройств и систем автоматики и управления может быть востребовано на всех этапах их жизненного цикла. Их использование целесообразно прежде всего при разработке подсистем поддержки принятия решений в современных системах технического диагностирования и мониторинга. Их внедрение позволяет усовершенствовать технологии мониторинга и повысить эффективность в плане повышения информативности в процессе расследования причин возникновения неисправностей сервисным персоналом эксплуатационных предприятий.

Еще одним приложением бинарно-тернарных вопросников могут оказаться системы технического обучения, строящиеся на основе моделей древовидных графов и подразумевающие различные сценарии обучения при различных вариантах исходов, выбираемых пользователями [41].

Следует отметить, что вопросники в области железнодорожного транспорта могут быть использованы не только в решении задач технической диагностики и обучения. Например, они могут оказаться эффективным реше-

нием и для интеллектуальных систем оперативного диспетчерского управления (*train management systems, TMS*) и систем автоведения, подразумевающим формирование именно «подсказки» или «рекомендации» техническому персоналу по выполнению каких-либо действий [42, 43].

Библиографический список

1. Аржененко А. Ю. Дискретный поиск. Теория вопросников / А. Ю. Аржененко, В. А. Вестяк. – М. : Изд-во МАИ, 2012. – 159 с.
2. Микони С. В. Теория принятия управленческих решений. – СПб. : Лань, 2015. – 448 с.
3. Hahanov V. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services. – New York: Springer International Publishing AG, 2018. – 279 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-54825-8.
4. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.
5. Picard C. F. Théorie des Questionnaires. – Paris: Gauthier-Villars, 1965. – 127 p.
6. Dubail F. Algorithmes de Questionnaires Réalisable, Optimaux au Sens de Différents Critères. – These présentée à l'Université de Lyon. 1967. – 56 p.
7. Chesari Y. Questionnaire, Codage et tris. – Institut Blasé Pascal, Paris, 1968. – 164 p.
8. Retolla S. Extension de l'algorithme d'Huffman à une classe de Questionnaires à Sauces. – These présentée à l'Université de Lyon, 1969. – 64 p.
9. Пархоменко П. П. Оптимальные вопросники с неравными ценами вопросов / П. П. Пархоменко // Доклады АН СССР. – 1969. – Том 184. – № 1. – С. 51–54.
10. Пархоменко П. П. Теория вопросников (обзор) / П. П. Пархоменко // Автоматика и телемеханика. – 1970. – № 4. – С. 140–159.
11. Picard C. F. Graphs and Questionnaires. – Netherlands: North-Holland Publishing Company, 1980. – 431 p.
12. Land A. H., Doig A. G. An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems // *Econometrica*. – 1960. – Vol. 28. – No. 3. – Pp. 497–520.
13. Bellman R. E. Dynamic Programming. – Princeton University Press, Princeton NJ, 1957. – 392 p.
14. Аржененко А. Ю. Оптимальные бинарные вопросники / А. Ю. Аржененко, Б. Н. Чугаев. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
15. Ярмолик В. Н. Контроль и диагностика цифровых узлов ЭВМ / В. Н. Ярмолик. – Минск: «Наука и техника», 1988. – 240 с.
16. Яблонский С. В. Некоторые вопросы надежности и контроля управляющих систем // Математические вопросы кибернетики / под ред. С. В. Яблонского. – Вып. 1. – М. : Главная редакция физико-математической литературы, 1988. – С. 5–25.
17. Аржененко А. Ю. Оптимизация компактных вопросников / А. Ю. Аржененко, Б. Н. Чугаев // Электронное моделирование. – 1984. – № 4. – С. 59–64.
18. Аржененко А. Ю. Оптимизация транзитивных бинарных вопросников / А. Ю. Аржененко, Б. Н. Чугаев // Автоматика и телемеханика. – 1985. – № 2. – С. 159–164.
19. Аржененко А. Ю. Оптимизация бинарных вопросников / А. Ю. Аржененко, О. Г. Казакова, Б. Н. Чугаев // Автоматика и телемеханика. – 1985. – № 11. – С. 138–144.
20. Аржененко А. Ю. Оптимизация бинарных вопросников, содержащих вопросы с переменной ценой / А. Ю. Аржененко, О. Г. Казакова, В. А. Неясов // Автоматика и телемеханика. – 1989. – № 6. – С. 139–149.

21. Аржененко А. Ю. Оптимизация бинарных вопросников методом толерантной замены / А. Ю. Аржененко, А. В. Бондаренко // Электронное моделирование. – 1990. – № 3. – С. 53–57.
22. Аржененко А. Ю. Алгоритм выбора оптимальной структуры избыточного компактного вопросника / А. Ю. Аржененко, А. В. Бондаренко // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 5. – С. 163–169.
23. Аржененко А. Ю. Модификация метода толерантных перестановок в почти равномерных компактных анкетах / А. Ю. Аржененко, В. А. Вестяк // Автоматика и телемеханика. – 2012. – № 7. – С. 109–118.
24. Чугаев Б. Н. Оптимальная идентификация случайных событий / Б. Н. Чугаев, А. Ю. Аржененко // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. – 2013. – № 2. – С. 188–190.
25. Пархоменко П. П. Вопросники и организационные иерархии / П. П. Пархоменко // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 163–174.
26. 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 // 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.
27. Duncan G. Heterogeneous Questionnaire Theory // SIAM Journal on Applied Mathematics. – 1974. – Vol. 27. – Issue 1. – Pp. 59–71. – DOI: 10.1137/0127005.
28. Ефанов Д. В. Оптимизация полихотомичных вопросников методом корневого вопроса / Д. В. Ефанов, А. Н. Павлов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – № 4. – С. 125–134.
29. Сапожников Вл. В. Классификация вопросников / Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, А. Н. Павлов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 4. – С. 128–137.
30. Гавзов Д. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем / Д. В. Гавзов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 8. – С. 3–50.
31. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 171 с.
32. Belyi A. A., Karapetov E. S., Efimenko Yu. I. Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint-Petersburg example) // Procedia Engineering. Vol. 189, 2017. – Pp. 145–151. – DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.024.
33. Белый А. А. Проектирование и организация системы мониторинга мостовых сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях / А. А. Белый, А. А. Барановский, Д. Е. Воробьев, К. Ю. Долинский, Л. К. Дьяченко, Г. В. Осадчий // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т. 14. – № 2. – С. 211–222.
34. Efanov D. V. New Architecture of Monitoring Systems of Train Traffic Control Devices at Wayside Stations // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, September 14-17, 2018. – Pp. 276–280. – DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524788.
35. Сапожников В. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. Пособие / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. И. Шамапов // под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. – 318 с.

36. Heidmann L. Smart Point Machines: Paving the Way for Predictive Maintenance // Signal+Draht, 2018, issue 9. – Pp. 70–75.
37. Ефанов Д. В. Особенности функционирования систем технического диагностирования и мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры / Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Том 4. – № 3. – С. 333–354.
38. Ефанов Д. В. Мониторинг параметров рельсовых цепей тональной частоты / Д. В. Ефанов, Н. А. Богданов // Транспорт Урала. – 2013. – № 1. – С. 36–42.
39. Биргер И. А. Техническая диагностика. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.
40. Шаманов В. И. Формирование информации о состоянии рельсовых линий для систем автоматического контроля и удаленного мониторинга // Региональная информатика и информационная безопасность : сб. трудов. – Вып. 5. – СПб. : СПОЙСУ, 2018. – С. 290–293.
41. Ефанов Д. В. Техническое обучение как сервис / Д. В. Ефанов, Д. Г. Плотников, Г. В. Осадчий, В. В. Хорошев // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 5. – С. 46–49.
42. Pan D., Zheng Y., Zhang C. On Intelligent Automatic Train Control of Railway Moving Automatic Block Systems Based on Multi-Agent Systems // Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China, 29-31 July 2010. Pp. 4471–4476.
43. Кокурин И. М. Технологические основы инновационной системы автоматического управления движением поездов / И. М. Кокурин, Д. В. Ефанов // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 5. – С. 19–23. – DOI: 10.34649/AT.2019.5.5.003.

Dmitrii V. Efanov,

Valerii V. Khoroshev

“LocoTech-Signal” LLC,

«Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport»,

Russian University of Transport, Moscow

BINARY-TERNARY QUESTIONNAIRES

The questionnaires theory allows solving various problems of discrete search and identification, including its effective application is the automation and control systems technical diagnostics. The questionnaire is a set of events and questions that must be asked for identifying events. Interpreting into technical diagnostics, events are a set of technical object states, questions are a set of checks that allow identifying states. The questionnaires theory can contribute to technical diagnostics and monitoring tools development. Such testing tools will increase the level of automation and control. The authors of the article conduct research on specific types of questionnaires: that contain questions with two outcomes (binary questions) and questions with three outcomes (ternary questions). The research of such a questions combination is important for the constructing of a fixed questionnaire events. This questionnaire will require a smaller number of questions than in a binary questionnaire. At the same time, ternary questions are much more common in practice than questions with a widerange of outcomes. In addition, the use of such questionnaires in practice may have an impact on the average value of the costs for implementation and prove to be more efficient than using only binary questionnaires. This is especially important with restrictions on the average time of event identification. The paper

describes the main binary-ternary questionnaires features, describes the dynamic programming method for optimizing this class of questionnaires, and also provides examples of the questionnaires implementation in automation and remote control systems in railway transport.

detection and identification, discrete search, questionnaire, form, questionnaire optimization, discrete system technical diagnostics.

References

1. Arzhenenko A. Yu., Vestyak V. A. (2012) Discrete search. Theory of questionnaires. [Diskretnyj poisk. Teoriya voprosnikov], Moscow: Publishing House of Moscow Aviation Institute [Izdatel'stvo MAI], 2012. – 159 p.
2. Mikoni S. V. (2015) Theory of management decision making [Teoriya prinyatiya upravlencheskih reshenij], St. Petersburg: Publishing House «Lan'» [Izdatel'stvo «Lan'»], 2015. – 448 p.
3. Hahanov V. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services. – New York: Springer International Publishing AG, 2018. – 279 p. – doi: 10.1007/978-3-319-54825-8.
4. Parkhomenko P. P., Sogomonyan E. S. (1981) Fundamentals of technical diagnostics (optimization of diagnostic algorithms, hardware tools) [Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizaciya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnye sredstva)], Moscow: Energoatomizdat, 1981. – 320 p.
5. Picard C. F. Théorie des Questionnaires. – Paris: Gauthier-Villars, 1965. – 127 p.
6. Dubail F. Algorithmes de Questionnaires Réalisable, Optimaux an Sens se Different Criteres. – These presentee a l'Universite de Lyon. 1967. – 56 p.
7. Chesari Y. Questionnaire, Codageettris. – Institute Blasé Pascal, Paris, 1968. – 164 p.
8. Retolla S. Extension de l'algorithme d'Huffman à Uneclasse de Questionnaire Saves Counts. – These présentée à l'Universite de Lyon, 1969. – 64 p.
9. Parkhomenko P. P. (1969) Optimal questionnaires with unequal prices of questions [Optimal'nye voprosniki s neravnymi cenami voprosov], Reports of the USSR Academy of Sciences [Doklady AN SSSR]. – 1969. – Vol. 184. – Issue 1. – Pp. 51–54.
10. Parkhomenko P. P. (1970) Theory of questionnaires (review) [Teoriya voprosnikov (obzor)], Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]. – 1970. – Issue 4. – Pp. 140–159.
11. Picard C. F. Graphs and Questionnaires. – Netherlands: North-Holland Publishing Company, 1980. – 431 p.
12. Land A. H., Doig A. G. An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems, Econometrica. – 1960. – Vol. 28. – No. 3. – Pp. 497–520.
13. Bellman R. E. Dynamic Programming. – Princeton University Press, Princeton NJ, 1957. – 392 p.
14. Arzhenenko A. Yu., Chugaev B. N. (1989) Optimal binary questionnaires [Optimal'nye binarnye voprosniki], Moscow: Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1989. – 128 p.
15. Yarmolik V. N. (1988) Testing and diagnostics of digital computer nodes [Kontrol' i diagnostika cifrovyyh uzlov EHVM], Minsk: "Science and technology" [«Nauka i tekhnika»], 1988. – 240 p.
16. Yablonskij S. V. (1988) Some questions of reliability and control of control systems [Nekotorye voprosy nadezhnosti i kontrolya upravlyayushchih sistem], Mathematical problems of cybernetics: Vol. 1 [Matematicheskie voprosy kibernetiki: Vyp. 1] – Edition S.V. Yablonskij, Moscow: Main editors of physical and mathematical literature [Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury], 1988. – Pp. 5–25.

17. Arzhenenko A. Yu., Chugaev B. N. (1984) Compact Questionnaire Optimization [Optimizaciya kompaktnyh voprosnikov], *Electronic Modeling [Elektronnoe Modelirovaniye]*. 1984. Issue 4. – Pp. 59–64.
18. Arzhenenko A. Yu., Chugaev B. N. (1985) Optimization of transitive binary questionnaires [Optimizaciya tranzitivnyh binarnyh voprosnikov], *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*. 1985. Issue 2. – Pp. 159–164.
19. Arzhenenko A. Yu., Kazakova O. G., Chugaev B. N. (1985) Optimization of binary questionnaires [Optimizaciya binarnyh voprosnikov], *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*. 1985. Issue 11. – Pp. 138–144.
20. Arzhenenko A. Yu., Kazakova O. G., Neyasov V. A. (1989) Optimization of binary questionnaires containing variable price questions [Optimizaciya binarnyh voprosnikov, sodержashchih voprosy s peremennoj cenoy], *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*. 1989. Issue 6. – Pp. 139–149.
21. Arzhenenko A. Yu., Bondarenko A. V. (1990) Optimization of binary questionnaires using the method of tolerant replacement [Optimizaciya binarnyh voprosnikov metodom tolerantnoj zameny], *Electronic Modeling [Elektronnoe Modelirovaniye]*. 1990. Issue 3. – Pp. 53–57.
22. Arzhenenko A. Yu., Bondarenko A. V. (1991) Algorithm for choosing the optimal structure of an inexact compact questionnaire [Algoritm vybora optimal'noj struktury neizbytochnogo kompaktnogo voprosnika], *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*. 1991. Issue 5. – Pp. 163–169.
23. Arzhenenko A. Yu., Vestyak V. A. (2012) Modification of the method of tolerant rearrangements in almost uniform compact questionnaires [Modifikaciya metoda tolerantnyh perestanovok v pochti ravnomernyh kompaktnyh anketah], *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*. 2012. Issue 7. – Pp. 109–118.
24. Chugaev B. N., Arzhenenko A. Yu. (2013) Optimal Identification of Random Events [Optimal'naya identifikaciya sluchajnyh sobytij], *Economics, Statistics and Informatics [Ekonomika, statistika i informatika. Vestnik UMO]*. 2013. Issue 2. – Pp. 188–190.
25. Parkhomenko P. P. (2010) Questionnaires and Organizational Hierarchies [Voprosniki i organizacionnye ierarhii], *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*. 2010. Issue 6. – Pp. 163–174.
26. 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, *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.
27. Duncan G. Heterogeneous Questionnaire Theory, *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 1974. Vol. 27. Issue 1. – Pp. 59–71. DOI: 10.1137/0127005.
28. Efanov D. V., Pavlov A. N. (2012) Optimization of polyphotomous questionnaires using the root question method [Optimizaciya polihotomichnyh voprosnikov metodom korneвого voprosa], *Proceedings of Petersburg Transport University [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya]*. 2012. Issue 4. – Pp. 125–134.
29. Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Pavlov A. N. (2011) Questionnaire classification [Klassifikaciya voprosnikov], *Proceedings of Rostov State Transport University [Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya]*. 2011. Issue 4. – Pp. 128–137.
30. Gavzov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. (1994) Methods for ensuring the safety of discrete systems [Metody obespecheniya bezopasnosti diskretnyh sistem], *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*. 1994. Issue 8. – Pp. 3–50.

31. Efanov D. V. (2016) Concurrent checking and monitoring of railway automation and remote control devices [Funkcional'nyj kontrol' i monitoring ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki], St.Petersburg: Publishing house of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university [FGBOU VO PGUPS], 2016. – 171 p.
32. Belyi A. A., Karapetov E. S., Efimenko Yu. I. (2017) Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint-Petersburg example), *Procedia Engineering*. Vol. 189, 2017. – Pp. 145–151. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.024.
33. Belyj A. A., Baranovskij A. A., Vorob'ev D. E., Dolinskij K. Yu., D'yachenko L. K., Osadchij G. V. (2017) Design and organisation of structural health monitoring system on high-speed railway bridge constructions [Proektirovanie i organizaciya sistemy monitoringa mostovyh sooruzhenij na vysokoskorostnyh zheleznodorozhnyh magistralyah], *Proceedings of Petersburg Transport University [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya]*. 2017. Vol. 14. Issue2. – Pp. 211–222.
34. Efanov D. V. New Architecture of Monitoring Systems of Train Traffic Control Devices at Wayside Stations, *Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs'2018)*, Kazan, Russia, September 14-17, 2018. – Pp. 276–280. doi: 10.1109/EWDTs.2018.8524788.
35. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Efanov D. V., Shamanov V. I. (2017) Reliability of railway automation systems, remote control and communications: Textbook [Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki, telemekhaniki i svyazi: ucheb. Posobie], Edition VI.V. Sapozhnikova. – Moscow: «Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport» [FGBU DPO «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte»], 2017. – 318 p.
36. Heidmann L. (2018) Smart Point Machines: Paving the Way for Predictive Maintenance, *Signal+Draht*, 2018, issue 9. – Pp. 70–75.
37. Efanov D. V. (2018) Features of the functioning of technical diagnosis and monitoring systems of railway infrastructure objects [Osobennosti funkcionirovaniya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringa ob"ektov zheleznodorozhnoj infrastruktury], *Automation on Transport [Avtomatika na transporte]*, 2018, Vol. 4, Issue 3. – Pp. 333–354.
38. Efanov D. V., Bogdanov N. A. (2013) Monitoring of audio frequency track circuit parameters [Monitoring parametrov rel'sovyh cepej tonal'noj chastity], *Transport of the Ural [Transport Urala]*. 2013. Issue 1. – Pp. 36–42.
39. Birger I. A. (1978) Technical diagnostics [Tekhnicheskaya diagnostika]. – Moscow: Engineering [Mashinostroenie], 1978. – 240 p.
40. Shamanov V. I. (2018) Formation of information on the situation of rail lines for systems of automatic control and remote monitoring [Formirovanie informacii o sostoyanii rel'sovyh linij dlya sistem avtomaticheskogo kontrolya i udalennogo monitoringa], *Regional informatics and information security [Regional'naya informatika i informacionnaya bezopasnost']*, *Proceedings*, Issue 5. St. Petersburg: SPOISU, 2018. – Pp. 290–293.
41. Efanov D. V., Plotnikov D. G., Osadchij G. V., Horoshev V. V. (2018) Technical training as a service [Tekhnicheskoe obuchenie kak servis], *Transport of the RF [Transport Rossijskoj Federacii]*, 2018, Issue 5. – Pp. 46–49.
42. Pan D., Zheng Y., Zhang C. (2010) On Intelligent Automatic Train Control of Railway Moving Automatic Block Systems Based on Multi-Agent Systems, *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, Beijing, China, 29-31 July 2010. – Pp. 4471–4476.

43. Kokurin I. M., Efanov D. V. (2019) [Tekhnologicheskie osnovy innovacionnoj sistemy avto-maticheskogo upravleniya dvizheniem poezdov], Automation, Remote Control and Communication [Avtomatika, svyaz', informatika], 2019. – № 5. – Pp. 19–23. – DOI: 10.34649/AT.2019.5.5.003.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Вл. В. Сапожниковым.
Поступила в редакцию 21.03.2019, принята к публикации 16.05.2019.*

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – доктор технических наук, доцент, руководитель направления систем мониторинга и диагностики ООО «ЛокоТехСигнал», профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта.

e-mail: TrES-4b@yandex.ru

ХОРОШЕВ Валерий Вячеславович – аспирант, ассистент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта.

e-mail: hvv91@icloud.com

© Ефанов Д. В., Хорошев В. В., 2019