

Д.В. ЖЕЛЕЗНОВ, Е.М. ТАРАСОВ, А.Г. ИСАЙЧЕВА, Т.И. МИХЕЕВА  
**РАЗРАБОТКА ОБУЧАЕМОГО КЛАССИФИКАТОРА  
СОСТОЯНИЙ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ С МНОГОМЕРНЫМИ  
ИНФОРМАТИВНЫМИ ПРИЗНАКАМИ**

---

*Железнов Д.В., Тарасов Е.М., Исайчева А.Г., Михеева Т.И. Разработка обучаемого классификатора состояний рельсовых линий с многомерными информативными признаками.*

**Аннотация.** Значительное количество отказов в системах интервального управления движением поездов связано с воздействием возмущающих факторов в широком диапазоне изменения на единственный информационный признак, характеризующий состояние рельсовых линий. В работе предложено определять состояния объекта контроля принципами распознавания образов с многомерными информативными признаками. В качестве признаков предложено использовать амплитуды напряжений и токов на входе и выходе рельсового четырехполосника. В качестве полинома решающей функции – ортогональный многочлен Эрмита, позволяющий путем усложнения порядка и размерности увеличить глубину распознавания и обеспечить относительную инвариантность к возмущающим воздействиям. При решении задачи распознавания состояний рельсовых линий в качестве критерия качества использована относительная погрешность вычисления границ классов решающими функциями.

Работоспособность предложенной методики демонстрируется результатами исследования распознавания состояний рельсовых линий с «обученной» решающей функцией.

**Ключевые слова:** классификатор состояний, решающая функция, множество признаков.

---

**1. Введение.** В алгоритме функционирования технологического процесса на транспорте используется информация первичных датчиков — рельсовых цепей, в которых чувствительным элементом датчика служат рельсовые линии (РЛ). Поэтому надежность работы первичных датчиков определяет надежность функционирования всей системы автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте [1].

В настоящее время устройства контроля состояний рельсовых линий проектируются по одноканальной схеме с использованием при классификации одного признака — амплитуды напряжения на выходе рельсовой линии. Значительное увеличение интенсивности движения поездов в последние годы привели к существенному повышению возмущающих воздействий на рельсовые линии, и оценка их состояний по одному признаку приводит к фиксации состояния «ложной занятости» при фактически свободном или «ложной свободности» при фактически занятом поездом участке контроля [2]. Наиболее эффективным методом решения проблемы является способ оценки состояния рельсовых линий, реализованный принципами

распознавания образов с множеством информативных признаков и решающих функций.

Распознавание устанавливает зависимость соответствия  $i$ -го образа, задаваемого в виде совокупности признаков к конкретному классу из множества взаимоисключающих классов. Это означает, что существует однозначное отображение множества признаков, являющихся числовым множеством  $\{X\}$  на множестве классов  $\{S\}=\{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ , размерность которого известна заранее. В случае распознавания состояний рельсовых линий классы можно заменить номерами  $1, 2, \dots, k$ , и представлять последние в виде натуральных чисел, что описывает распознавание как отображение признакового пространства на конечное множество натуральных чисел [3, 4].

В распознавании состояний рельсовых линий множество признаков может быть представлено в виде измеренных  $p$ -значений характеристик электрических параметров рельсовых линий  $x_1, x_2, \dots, x_p$ . При этом размерность признаков равна определенному числу  $n$ . Тогда распознавание состояний РЛ сводится к  $pn$ -аргументной функции вида  $k=d(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{ij}, x_{pn})$ , где  $x_{ij}$  —  $j$ -ое измеренное значение  $i$ -го признака,  $i=1, 2, \dots, p$ ,  $j=1, 2, \dots, n$ , причем данная функция, как правило, называется решающей функцией и однозначна при конкретных  $p$  и  $n$ .

Важнейшей особенностью распознавания состояний РЛ является то, что признаки  $\{x_{ij}\}_{p \times n}$  подвержены возмущениям, вероятностный характер которых отражается на всех этапах: от процесса получения самих измерений и заканчивая вычислением значений решающей функции  $d(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{ij}, x_{pn})$  [2]. Дестабилизирующие факторы представляются в распознавании состояний РЛ как погрешности аналогово-цифровых преобразователей, первичных датчиков съема информации; как ошибки округления при вычислениях, что является следствием малой размерности разрядной сетки микропроцессоров, установленных у объектов измерений. Взаимодействие возмущений между собой приводит к тому, что признаки  $x_{ij}$  также имеют погрешности с различными знаками, и в результате обучения решающей функции разработчикам, как правило, приходится учитывать границы изменений этих возмущений и при синтезе решающих функций использовать признаки с различными знаками возмущений, что помогает добиться относительной нечувствительности на начальном признаковом уровне обработки информации [5].

Использование методов распознавания образов перед другими методами, используемыми в настоящее время для определения

состояний рельсовых линий, позволяет расширить эксплуатационные возможности классификатора состояний рельсовых линий за счет специфичной обработки измеренной информации и априорного формирования кластеров состояний.

**2. Основные задачи, возникающие при создании обучаемого классификатора состояний рельсовых линий.** В общем случае состояния рельсовых линий могут быть кластеризованы на классы: свободного и исправного состояний рельсовой линии; занятого состояния; неисправного (излома рельсовой линии) состояний, а также диагностический класс, который, в свою очередь, может подразделяться на ряд подклассов. Возможности подхода с обучаемыми классификаторами состояний позволяют организовать внутреннюю логику развития распознающей системы с иерархической структурой, которая путем формирования в процессе обучения решающих функций оптимальной сложности и разумной селекцией признаков повышает точность распознавания; а в целом обеспечивает более высокую надежность и безопасность перевозочного процесса, что особенно важно для систем автоматизации технологических процессов на железнодорожном транспорте.

Основными задачами, требующими решения при создании обучаемого классификатора состояний объекта с многомерными информативными признаками, функционирующего в условиях воздействия значительных дестабилизирующих факторов, являются:

- определение характеристик электрических параметров, описывающих состояния рельсовых линий и служащих первичными информативными признаками;
- формирование априорного словаря признаков;
- выбор вида решающей функции;
- определение сложности решающей функции;
- разработка алгоритма «обучения» решающей функции;
- исследование инвариантных свойств решающей функции обученного классификатора.

**3. Процедура выбора оптимального набора информативных признаков.** Процедура формирования адекватного множества признаков, учитывающая трудности, которые связаны с реализацией процессов выделения и селекции признаков из априорного словаря, и обеспечивающая в то же время необходимое качество распознавания, представляет собой одну из наиболее трудных задач при построении классификаторов состояний рельсовых линий.

В априорный словарь признаков обычно включаются все признаки, характеризующие состояние объекта распознавания,

которые могут быть представлены в виде набора данных, полученных путем измерения и формирования  $n$  признаков, принадлежащих образам различных классов состояний [5-7]. При этом возникает задача селекции признаков и исключения из априорного словаря малоинформативных признаков. Задача выбора  $n_1 < n$  признаков эквивалентна задаче выбора минимального числа признаков из множества  $m$ , обеспечивающих заданное качество распознавания.

Решение задачи попутно должно обеспечивать селекцию признаков по информативности. В случае независимых признаков, вычисляя качество распознавания для совокупности из множества  $\{m\}$  признаков, включающего исследуемый признак, а затем для совокупности, не содержащего данный признак, можно определить, сравнивая качество определения информативности (или распознавания) каждого признака, следует выбрать те  $n_1 < n$  признаков, информативность которых больше [8]. Эта процедура решения поставленной задачи обеспечивает оптимальное решение только на уровне гипотезы о независимости признаков.

В случае зависимых признаков подобная процедура состоит из следующих этапов:

- ряд признаков исключается поочередно, как в описанной выше процедуре;

- в пространстве оставшихся  $(n-1)$  признаков определяется качество распознавания;

- исключению подлежит тот признак, отсутствие которого наименее сильно изменило качество распознавания;

- поочередно исключаются остальные  $(n-1)$  признаков, а из группы в  $(n-1)$  исключается второй признак;

- процедура повторяется  $(n-n_1)$  раз.

Подобная процедура не позволяет оценивать качество распознавания при одновременном исключении нескольких признаков. Некоторые авторы считают оптимальной процедуру полного перебора по той причине, что малоинформативные сами по себе, но сильно коррелированные признаки могут составлять малоинформативную систему [8]. Априорные матрицы признаков, образов и классов имеют вид:

$$M_N = \begin{bmatrix} X_1^T \\ X_2^T \\ \vdots \\ X_i^T \\ \vdots \\ X_m^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$M_S = \begin{bmatrix} X_1^T \\ X_2^T \\ \vdots \\ X_i^T \\ \vdots \\ X_m^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$M_K = \underbrace{\begin{bmatrix} X_1^T \\ X_2^T \\ \vdots \\ X_i^T \\ \vdots \\ X_m^T \end{bmatrix}}_{\text{классы (n) образы (m)}} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}}_{\text{матрицы признаков}}, \quad (3)$$

где  $X_j^T$  — транспонированный вектор столбец  $X_i$ ;  $x_{mn}$  — значения информативных признаков;  $M_i$  — классы состояний,  $i \in N, S, K$ .

Очевидно, совокупность признаков должна в наибольшей степени характеризовать те свойства объекта распознавания (РЛ), которые принципиальны для их распознавания. При этом от размерности  $p$ -признакового пространства в значительной степени зависит процедура «обучения», классификации, достоверность распознавания, затраты на измерения характеристик объекта распознавания.

Уменьшение количества информативных признаков снижает затраты на измерение и вычисление, но также может снизить

точность распознавания. Но если время на обучение или корректировку коэффициентов решающей функции в реальном времени жестко ограничено (особенно в динамике движения поездов), то повышение размерности пространства признаков оказывается единственным средством увеличения точности и достоверности до необходимого уровня.

Рельсовая линия, как многополюсник с распределенными параметрами, характеризуется входными и выходными электрическими параметрами [9], в качестве которых возможно применить [2]:

– комплексные амплитуды напряжения на входе рельсового четырехполюсника;

– комплексные амплитуды тока на входе рельсового четырехполюсника;

– комплексные амплитуды напряжения на выходе рельсового четырехполюсника.

Множества образов, сформированных с использованием указанных шести признаков, имеют вид:

$$m_{iN} = \{U_{1N}, \varphi_{1N}, I_{1N}, \psi_{1N}, U_{2N}, \varphi_{2N}\}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

$$m_{jS} = \{U_{1S}, \varphi_{1S}, I_{1S}, \psi_{1S}, U_{2S}, \varphi_{2S}\}, j = 1, 2, \dots, l, \quad (5)$$

$$m_{pK} = \{U_{1K}, \varphi_{1K}, I_{1K}, \psi_{1K}, U_{2K}, \varphi_{2K}\}, p = 1, 2, \dots, q, \quad (6)$$

где  $n \neq l \neq q$ ,  $m_N, m_S, m_K$  – соответственно, образы  $NSK$  классов.

**4. Определение вида и порядка полинома решающей функции классификатора.** Следующая задача, связанная с разработкой обучаемого классификатора состояний рельсовых линий, состоит в отыскании оптимальных решающих процедур, необходимых при классификации. Решающие функции (РФ) можно получить рядом способов. В тех случаях, когда о распознаваемых образах имеются полные априорные сведения, РФ могут быть точно определены на основе этой информации, но если об образах имеются немногочисленные априорные сведения, то при построении распознающей системы используются обучающие процедуры. На первом этапе выбираются решающие функции полиномами минимального порядка, а затем, в процессе выполнения итеративных шагов, РФ доводятся до оптимального либо приемлемого вида.

Наиболее удобными РФ, имеющими наименьшую чувствительность, являются линейные РФ, которые можно обобщить и

на случай нелинейных границ классов. Обобщить линейные РФ удобнее введением РФ, вида [10]:

$$d_i(X) = C_1 f_1(X) + C_2 f_2(X) + \dots + C_k f_k(X) + C_{k+1} = \sum_{i=1}^{k+1} C_i f_i(X), \quad (7)$$

где  $\{f_i(X)\}, i=1,2,\dots,k$  — действительные однозначные функционалы образа  $(X)$ ,  $f_{k+1}(X)=1$ , а  $(k+1)$  — число членов разложения. Соотношение (7) представляет бесконечное множество решающих функций, и применение несложного преобразования позволяет работать с ними как с линейными. Если представить (7) в виде  $d(X)=C^T X^*$ , где

$$C=(C_1, C_2, \dots, C_k, C_{k+1})^T, \mathbf{a},$$

$$X^* = \begin{Bmatrix} f_1(X) \\ f_2(X) \\ \cdot \\ \cdot \\ f_k(X) \\ 1 \end{Bmatrix}, \quad (8)$$

функция  $\{f_i(X)\}$ , после того как их значения вычислены, будет представлять собой просто набор чисел, а вектор  $X^*$  — обычный  $k$ -мерный вектор, дополненный единицей.

Таким образом, хотя в  $K$ -мерном пространстве РФ можно считать линейными, в  $n$ -мерном пространстве исходных образов они полностью сохраняют нелинейный характер.

Количество членов в полиноме РФ (порядок полинома) определяется по критерию качества распознавания, то есть сравнением общего разброса вычисленных значений РФ с показателем классов. Если он больше вычисленного ранее, то ранее принятый порядок полинома РФ достаточен, если же нет, то требуется выбрать другой вид РФ.

Привлекателен подход с использованием в качестве решающих функций  $d_i(X)$ , где  $i$ -индекс класса, полиномов Эрмита [11], обеспечивающих требуемое качество классификации состояний рельсовой линии при минимальной сложности решающих функций.

Для получения многочленов Эрмита используется рекуррентное соотношение:

$$H_{k+1}(x) - 2xH_k(x) + 2kH_{k-1}(x) = 0, \quad k \geq 1. \quad (9)$$

Эти функции ортогональны относительно весовой функции  $u(x) = \exp(-x^2)$ , причем интервал ортогональности составляет  $-\infty < x < \infty$ ; это обстоятельство делает использование таких функций чрезвычайно удобным, поскольку освобождает от забот относительно диапазона изменения переменных, который у принятых выше информативных признаков рельсовых линий значительный.

Определив коэффициент  $A_k = \int_a^b u(x) \phi_k^{*2}(x) dx$  и подставив его в

соотношение  $\phi_k(x) = \sqrt{\frac{u(x)}{A_k}} \phi_k^*(x)$ , можно показать, что

ортонормированные многочлены Эрмита определяются следующим соотношением:

$$\phi_k(x) = \frac{\exp(-x^2/2) H_k(x)}{\sqrt{2^k k! \sqrt{\pi}}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

Формула (9) представлена для одной переменной, а решающая функция многих переменных классификатора состояний рельсовых линий с использованием многочленов Эрмита с учетом (10) имеет вид:

$$d_j(X) = \sum_{i=1}^n C_{ij} \phi_j(X), \quad (11)$$

где  $\phi_j(X) = \prod \phi_k(x_i)$  — ортонормированные функции Эрмита.

Для определения состояний рельсовых линий удобно воспользоваться последовательным алгоритмом классификации [12] основанным на информации множества решающих функций, когда каждому классу соответствует своя решающая функция и показатель класса:

$$d_j(X) \equiv \left\{ \begin{array}{l} d_N(X) \\ d_S(X) \\ d_K(X) \end{array} \right\},$$

где  $d_N(X)$  — решающая функция класса свободного и исправного состояний рельсовых линий,  $d_S(X)$  — решающая функция класса занятого и исправного состояний рельсовых линий,  $d_K(X)$  — решающая функция класса неисправного состояния рельсовых линий (излом рельсовой линии).

Последовательный алгоритм определения состояний рельсовых линий с множеством решающих функций приведен на рисунке 1.

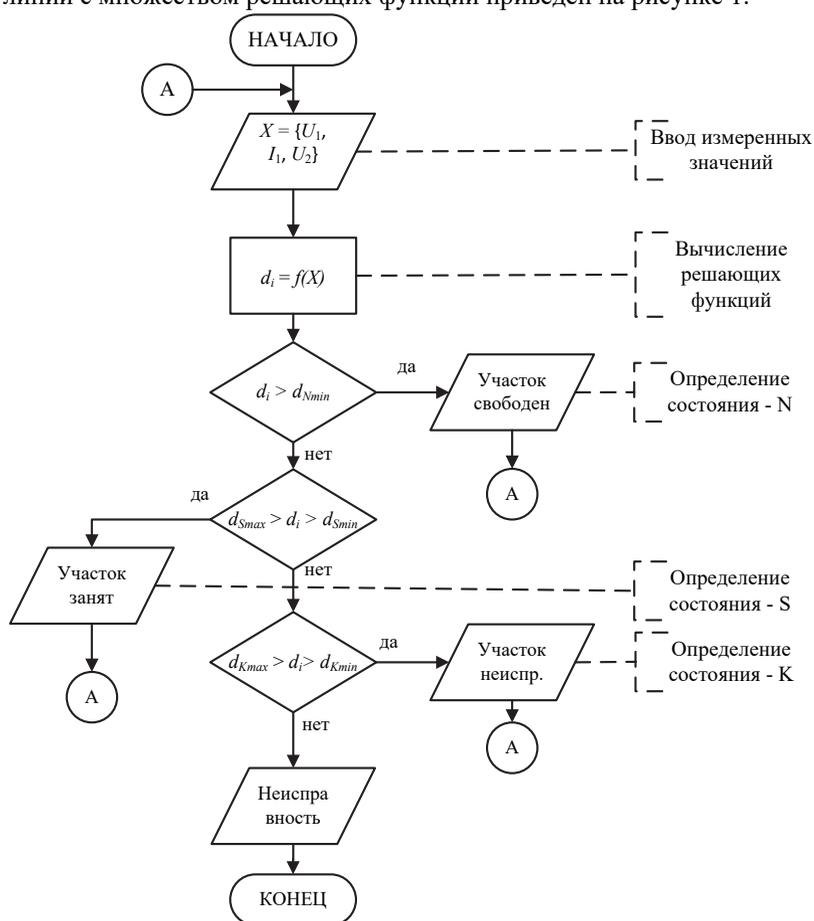


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения состояний рельсовых линий с множеством решающих функций:  $d_i$  — текущая решающая функция,  $d_N$ ,  $d_S$ ,  $d_K$  — решающие функции классов, соответствующих состояниям рельсовых линий

Выбрав вид решающих функций с использованием многочленов Эрмита, необходимо провести процедуру их «обучения», в процессе которой определяются коэффициенты и сложность (порядок полинома) решающих функций  $d_N(x_{N_i})$ ,  $d_S(x_{S_i})$ ,  $d_K(x_{K_i})$ . Для определения коэффициентов РФ в работе используется репрезентативная «обучающая» выборка образов, и этот этап является этапом «обучения» решающей функции классификатора [13]. В этом процессе используется «обучающая» выборка образов  $L = \{X_1^j, X_2^j, \dots, X_n^j, Y_j, j = 1, 2, \dots, l\}$ , в которую входят как образы, принадлежащие к одному классу  $X_n^j$ , так и образы, принадлежащие другим классам  $Y_j$ . Известно, что при полном отсутствии информации вероятностного характера общее количество образов, отбираемых для разбиения на  $n$  классов, удовлетворительных к обобщению, должно быть, по крайней мере, равно утроенной размерности векторов образов, то есть  $V_k = 3(n+1)$  [14]. Если  $M > V_k$ , где  $M$  — число образов обучающей выборки, и обучающее множество распознается правильно, то полученное решение классификатора и, соответственно, его способность к обобщению можно считать удовлетворительной. Эмпирическим правилом служит выбор числа образов  $M \approx 10V_k$  [15].

Способность классификатора к обобщению проверяется при предъявлении ему данных, не вошедших в обучающую выборку образов. Следует отметить, что признаки, вошедшие в обучающую выборку, должны обладать репрезентативностью по отношению к «полевым» данным [3, 16].

На точность классификации состояния участка контроля существенное влияние оказывает порядок полинома решающих функций  $d_N(x_{N_i})$ ,  $d_S(x_{S_i})$ ,  $d_K(x_{K_i})$  — чем он выше, тем выше становится и распознающая возможность решающих функций. При этом на начальном этапе порядок полинома решающих функций  $d_N(x_{N_i})$ ,  $d_S(x_{S_i})$ ,  $d_K(x_{K_i})$  выбирается минимальной, а затем, в процессе итерации, доводится до оптимального либо приемлемого вида. Выбранный порядок полинома решающих функций  $d_N(x_{N_i})$ ,  $d_S(x_{S_i})$ ,  $d_K(x_{K_i})$  на промежуточном этапе проверяется критерием Фишера, то есть производится сравнение общего разброса вычисленных значений решающих функций  $d_N(x_{N_i})$ ,  $d_S(x_{S_i})$ ,  $d_K(x_{K_i})$  с соответствующими показателями классов. Если он больше

вычисленного ранее, то полученный порядок полинома решающих функций  $d_N(x_{N_i})$ ,  $d_S(x_{S_i})$ ,  $d_K(x_{K_i})$  достаточен, если же нет, то требуется выбрать другой, более высокий порядок полинома решающих функций. Следующий порядок полинома соответствует функциям второго порядка, затем третьего и т.д. В результате выбора порядка полинома решающих функций получаем множество, состоящее из  $(y+1)$  ортонормированных функций  $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_y(x)$ , где  $y$  — порядок полинома решающей функции. Исследования, проведенные авторами, показали, что для поставленной задачи, достаточным является первая степень полинома решающих функций.

Ввиду того, что в каждое из трех выбранных состояний рельсовых линий входит подмножество состояний, зависящих от изменения первичных параметров рельсовой линии от изменения возмущающих воздействий, то получаем множество  $d_i(x_i)$  ( $i = N, S, K$ ) в виде линейной комбинации функции  $\varphi(x)$  с неизвестными коэффициентами  $C$ , то есть:

$$d_j(X) = \sum_{i=1}^n C_{ij} \phi_j(X),$$

$$d_{N_i}(x_{N_i}) = \sum_{j=1}^{(r+1)^p} C_{N_j} \cdot \varphi_{N_j}(x_{N_i}),$$

$$i=1..n1,$$

$$d_{S_i}(x_{S_i}) = \sum_{j=1}^{(r+1)^p} C_{S_j} \cdot \varphi_{S_j}(x_{S_i}),$$

$$i=1..s1,$$

$$d_{K_i}(x_{K_i}) = \sum_{j=1}^{(r+1)^p} C_{K_j} \cdot \varphi_{K_j}(x_{K_i}),$$

$$i=1..k1,$$

где  $n1$ ,  $s1$ ,  $k1$  — диапазон подсостояний (образов) в классах состояний, соответственно,  $p$  — количество информативных признаков рабочего

алфавита (равняется трем: амплитуды входных и выходных параметров рельсового четырехполосника —  $U_1, I_1$  и  $U_2$ ),  $r=1$  порядок полинома решающей функции,  $C_{N_j}, C_{S_j}, C_{K_j}$  — коэффициенты,  $\varphi_{N_j}(x_{N_i}), \varphi_{S_j}(x_{S_i}), \varphi_{K_j}(x_{K_i})$  — ортогональные функции.

Для представления полиномиальной решающей функции число необходимых членов зависит от порядка полинома  $y$  и размерности (числа признаков-аргументов)  $h$ :

$$Q_y^h = \frac{(h+y)!}{y!h!}, \quad (12)$$

где  $h$  — размерность полинома. Так как рабочий алфавит априорно состоит из трех признаков ( $U_1, I_1, U_2$ ), то количество сочетаний  $Q_y^h = 6$ .

Поэтому ортогональные функции  $\varphi_{N_j}(x_{N_i}), \varphi_{S_j}(x_{S_i}), \varphi_{K_j}(x_{K_i})$  определяются как:

*класс N:*

$$\begin{aligned} \varphi_{N_1}(x_{N_i}) &= \phi_1(U_{1N_i}) \cdot \phi_1(I_{1N_i}) \cdot \phi_1(U_{2N_i}) \\ \varphi_{N_2}(x_{N_i}) &= \phi_1(U_{1N_i}) \cdot \phi_2(I_{1N_i}) \cdot \phi_1(U_{2N_i}) \\ \varphi_{N_3}(x_{N_i}) &= \phi_1(U_{1N_i}) \cdot \phi_1(I_{1N_i}) \cdot \phi_2(U_{2N_i}) \\ \varphi_{N_4}(x_{N_i}) &= \phi_2(U_{1N_i}) \cdot \phi_2(I_{1N_i}) \cdot \phi_1(U_{2N_i}) \\ \varphi_{N_5}(x_{N_i}) &= \phi_2(U_{1N_i}) \cdot \phi_1(I_{1N_i}) \cdot \phi_1(U_{2N_i}) \\ \varphi_{N_6}(x_{N_i}) &= \phi_2(U_{1N_i}) \cdot \phi_1(I_{1N_i}) \cdot \phi_2(U_{2N_i}) \end{aligned}, \quad (13)$$

*класс S:*

$$\begin{aligned} \varphi_{S_1}(x_{S_i}) &= \phi_1(U_{1S_i}) \cdot \phi_1(I_{1S_i}) \cdot \phi_1(U_{2S_i}) \\ \varphi_{S_2}(x_{S_i}) &= \phi_1(U_{1S_i}) \cdot \phi_2(I_{1S_i}) \cdot \phi_1(U_{2S_i}) \\ \varphi_{S_3}(x_{S_i}) &= \phi_1(U_{1S_i}) \cdot \phi_1(I_{1S_i}) \cdot \phi_2(U_{2S_i}) \\ \varphi_{S_4}(x_{S_i}) &= \phi_2(U_{1S_i}) \cdot \phi_2(I_{1S_i}) \cdot \phi_1(U_{2S_i}) \\ \varphi_{S_5}(x_{S_i}) &= \phi_2(U_{1S_i}) \cdot \phi_1(I_{1S_i}) \cdot \phi_1(U_{2S_i}) \\ \varphi_{S_6}(x_{S_i}) &= \phi_2(U_{1S_i}) \cdot \phi_1(I_{1S_i}) \cdot \phi_2(U_{2S_i}) \end{aligned}, \quad (14)$$

*класс K:*

$$\begin{aligned}
\varphi_{K_1}(x_{K_i}) &= \phi_1(U_{1K_i}) \cdot \phi_1(I_{1K_i}) \cdot \phi_1(U_{2K_i}) \\
\varphi_{K_2}(x_{K_i}) &= \phi_1(U_{1K_i}) \cdot \phi_2(I_{1K_i}) \cdot \phi_1(U_{2K_i}) \\
\varphi_{K_3}(x_{K_i}) &= \phi_1(U_{1K_i}) \cdot \phi_1(I_{1K_i}) \cdot \phi_2(U_{2K_i}) \\
\varphi_{K_4}(x_{K_i}) &= \phi_2(U_{1K_i}) \cdot \phi_2(I_{1K_i}) \cdot \phi_1(U_{2K_i}) \\
\varphi_{K_5}(x_{K_i}) &= \phi_2(U_{1K_i}) \cdot \phi_1(I_{1K_i}) \cdot \phi_1(U_{2K_i}) \\
\varphi_{K_6}(x_{K_i}) &= \phi_2(U_{1K_i}) \cdot \phi_1(I_{1K_i}) \cdot \phi_2(U_{2K_i})
\end{aligned} \tag{15}$$

Ортонормированные многочлены  $\phi(U_1)$ ,  $\phi(U_2)$  и  $\phi(I_1)$  полиномов решающих функций для признаков  $U_1$ ,  $U_2$  и  $I_1$  определяются по (10).

Последним этапом формирования решающих функций состояний рельсовых линий является проверка их репрезентативности на образах, не вошедших в обучающие выборки. Если в результате формирования получим решающую функцию с большой погрешностью классификации, то необходимо повысить порядок полинома решающей функции либо выбрать другой вид решающей функции [17, 18].

В качестве номера классов  $P_j$  в процессе обучения принимаются числовые значения с различными знаками: для класса  $N$  —  $P_N = +1$ ; для класса  $S$  —  $P_S = -0,5$ ; для класса  $K$  —  $P_K = -1$ . Выбранный принцип назначения номера класса  $d_N(x_{N_i}) > 0$ ,  $d_S(x_{S_i})$  и  $d_K(x_{K_i}) \leq 0$  позволяет обеспечить безопасность движения поездов, и появляется возможность двукратной проверки состояния объекта контроля [19, 20] по знаку, и значению решающей функции:

- если  $d_N(x_i) > 0$ , движение разрешено;
- если  $d_S(x_i)$  и  $d_K(x_i) \leq 0$ , движение запрещено.

Решающее правило при этом имеет вид:

$$\left. \begin{aligned}
&\text{если } P_N > d_N(x_i) \geq P_N + \Delta P \text{ и } d_N(x_i) > 0, \text{ то } x_i \in N; \\
&\text{если } P_S > d_S(x_i) \geq P_S + \Delta P \text{ и } d_S(x_i) \leq 0, \text{ то } x_i \in S \\
&\text{если } P_K > d_K(x_i) \geq P_K + \Delta P \text{ и } d_K(x_i) \leq 0, \text{ то } x_i \in K
\end{aligned} \right\}, \tag{16}$$

где  $\Delta P$  — допустимый предел отклонения величины  $d_j(x_i)$  от показателя класса  $P_j$ .

**5. Исследование обучаемого классификатора с многомерными информативными признаками.** Исходными данными при формировании решающих функций являются:

- а) длина контролируемой рельсовой линии;
- б) частота тока опроса рельсовых линий;
- в) величины сопротивлений в начале и в конце рельсовой линии;
- г) диапазон варьирования проводимости изоляции  $g_{из}$ ;
- д) априорный порядок решающей функции.

Информативные признаки и их математическое описание формируются математическими моделями электрических входных и выходных параметров рельсового четырехполюсника, представленного в форме матрицы «А» параметров и уравнений состояний рельсовой линии:

а) для класса  $N$

$$\begin{cases} U_{1N} = \frac{E(A_N Zn + B_N)}{(C_N Zn + D_N)Zo + A_N Zn + B_N} \\ U_{2N} = \frac{EZn}{(C_N Zn + D_N)Zo + A_N Zn + B_N}, \\ I_{1N} = \frac{E(C_N Zn + D_N)}{(C_N Zn + D_N)Zo + A_N Zn + B_N} \end{cases}, \quad (17)$$

б) для класса  $S$

$$\begin{cases} U_{1S} = \frac{E(A_S Zn + B_S)}{(C_S Zn + D_S)Zo + A_S Zn + B_S} \\ U_{2S} = \frac{EZn}{(C_S Zn + D_S)Zo + A_S Zn + B_S}, \\ I_{1S} = \frac{E(C_S Zn + D_S)}{(C_S Zn + D_S)Zo + A_S Zn + B_S} \end{cases}, \quad (18)$$

в) для класса  $K$

$$\begin{cases} U_{1K} = \frac{E(A_K Zn + B_K)}{(C_K Zn + D_K)Zo + A_K Zn + B_K} \\ U_{2K} = \frac{EZn}{(C_K Zn + D_K)Zo + A_K Zn + B_K}, \\ I_{1K} = \frac{E(C_K Zn + D_K)}{(C_K Zn + D_K)Zo + A_K Zn + B_K} \end{cases}, \quad (19)$$

где  $U_{1i}$ ,  $U_{2i}$ ,  $I_{1i}$  — амплитуды напряжений на входе и выходе и тока входе четырехполюсника рельсовой линии,  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$ ,  $D_i$ ,  $i \in N, S, K$  — коэффициенты четырехполюсника рельсовой линии в трех классах

состояний;  $Z_0$ ,  $Z_n$  — двухполюсники на входе и выходе рельсового четырехполосника;  $E$  — напряжение источника питания.

Погрешность классификации состояний участка контроля решающими функциями  $d_j(x_{j_i})$  для комбинации первичных информативных признаков оценивается формулой относительной погрешности:

$$\delta G_j = \left| \max \left[ \left( d_j(x_{j_i}) - P_j \right) / P_j \right], i=1..n, \right. \quad (20)$$

где  $P_j$  — истинный показатель  $j$ -го класса,  $d_j(x_{j_i})$  — вычисленное значение класса,  $n$  — размерность множества образов.

Оптимальной считается та решающая функция  $d_N(x_{N_i})$ ,  $d_S(x_{S_i})$ ,  $d_K(x_{K_i})$ , которая дает наименьшую относительную погрешность распознавания состояний рельсовой линии.

В работе сформированы решающие функции и исследовано качество распознавания состояний рельсовой линии при трех признаках  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $U_2$  для участка контроля рельсовой линии длиной 2.5 км, при частоте тока опроса рельсовых линий  $f_e=50$  Гц и  $Z_n = 0.2 \cdot e^{j50^\circ}$  Ом,  $Z_o = 0.1 \cdot e^{j0^\circ}$  Ом, при  $0.02 < g_{из} < 1$  См/км.

а) *формирование РФ класса N*. Решающая функция  $d_N(X)$  имеет вид:

$$d_N = 2.6791 \cdot \varphi_1 \cdot (U_{1N_i}) \cdot \varphi_1(I_{1N_i}) - 2.2196 \cdot \varphi_1 \cdot (U_{1N_i}) \cdot \varphi_2(I_{1N_i}) - 1.6249 \cdot \varphi_2 \cdot (U_{1N_i}) \cdot \varphi_1(I_{1N_i}) - 7.0483 \cdot \varphi_2 \cdot (U_{1N_i}) \cdot \varphi_2(I_{1N_i}). \quad (21)$$

На рисунке 2 приведены результаты исследования в среде Mathcad решающей функции (21) в виде области существования решающей функции в классе свободного и исправного состояний рельсовых линий при изменении проводимости изоляции на участке контроля от 1 до 0.02 См/км.

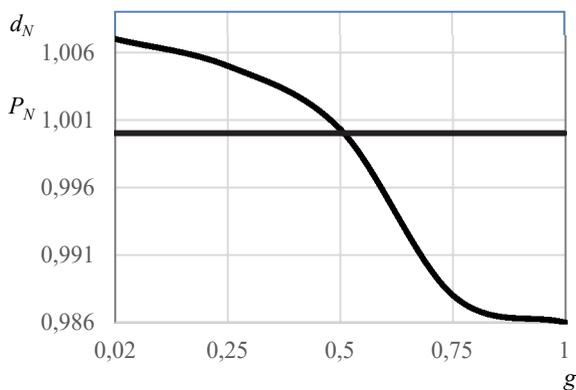


Рис. 2. Область существования решающей функции  $d_N$  : показатель класса  $P_N=1$

Из графиков следует, что максимальное отклонение решающей функции, вычисленное по формуле (14), от показателя класса  $P_N$  составляет 1.473%, что указывает на высокую инвариантность решающей функции к изменению проводимости изоляции на участке контроля. Минимальное возможное значение решающей функции  $d_N$  составляет 0.986, а максимальное —  $d_N = 1.007$ . Эти величины определяют минимальные и максимальные границы решающей функции в классе  $N$ , и используются в микропроцессорном классификаторе как пороговые значения.

б) *формирование РФ класса S*. Решающая функция  $d_S(X)$  имеет вид:

$$d_S = -6.1226 \cdot \varphi_1 \cdot (U_{1S_i}) \cdot \varphi_1(I_{1S_i}) - 0.8259 \cdot \varphi_1 \cdot (U_{1S_i}) \cdot \varphi_2(I_{1S_i}) + 41.6314 \cdot \varphi_2 \cdot (U_{1S_i}) \cdot \varphi_1(I_{1S_i}) + 28.2436 \cdot \varphi_2 \cdot (U_{1S_i}) \cdot \varphi_2(I_{1S_i}). \quad (22)$$

На рисунке 3 приведены результаты исследования в среде Mathcad решающей функции (22) в виде области существования решающей функции в классе занятого поездом и исправного состояний рельсовых линий при изменении проводимости изоляции на участке контроля от 1 до 0.02 См/км.

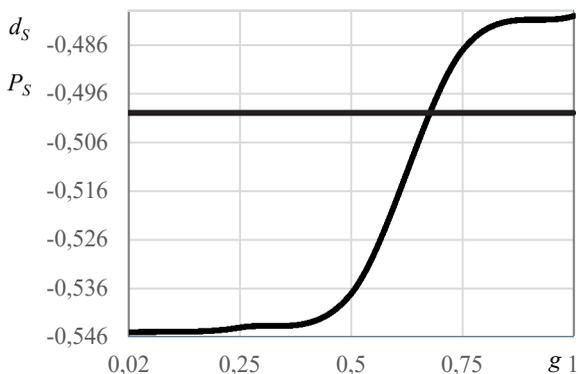


Рис. 3. Область существования решающей функции  $d_S$ : показатель класса  $P_S = -0.5$

Из графиков следует, что максимальное отклонение решающей функции, вычисленное по формуле (14), от показателя класса  $P_S$  составляет 1.371%, что показывает на высокую инвариантность к изменению проводимости изоляции на участке контроля. Минимально возможное значение решающей функции  $d_S$  составляет  $-0.545$ , а максимальное возможное значение  $d_S = -0.48$ . Эти величины определяют минимальные и максимальные границы решающей функции в классе  $S$ , и используются в микропроцессорном классификаторе, как пороговые значения границы области существования решающей функции  $d_S$ .

в) *формирование РФ класса K*. Решающая функция  $d_K(X)$  имеет вид:

$$d_K = -7.4613 \cdot \varphi_1 \cdot (U_{1K_i}) \cdot \varphi_1(I_{1K_i}) + 2.1029 \cdot \varphi_1 \cdot (U_{1K_i}) \cdot \varphi_2(I_{1K_i}) + 56.8385 \cdot \varphi_2 \cdot (U_{1K_i}) \cdot \varphi_1(I_{1K_i}) + 35.7538 \cdot \varphi_2 \cdot (U_{1K_i}) \cdot \varphi_2(I_{1K_i}) \quad (23)$$

На рисунке 4 приведены результаты исследования в среде Mathcad решающей функции (23) в виде области существования решающей функции в классе неисправного состояний рельсовых линий (излом рельсов) при изменении проводимости изоляции на участке контроля от 1 до 0.02 См/км.

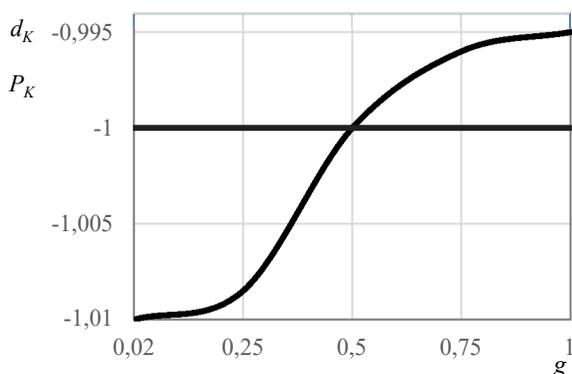


Рис. 4. Область существования решающей функции  $d_K$  : показатель класса  $P_K = -1$

Из графиков следует, что максимальное отклонение решающей функции, вычисленное по формуле (14), от показателя класса  $P_K$  составляет 1.1%, что показывает на высокую инвариантность к изменению проводимости изоляции на участке контроля. Минимальное возможное значение решающей функции  $d_K$  в контрольном режиме составляет  $-1.01$ , а максимальное возможное значение  $d_K = -0.995$ . Минимально возможное значение РФ  $d_S$  составляет  $-0.545$ , а максимальное возможное значение  $d_S = -0.48$ . Эти величины определяют минимальные и максимальные границы решающей функции в классе  $K$ , и используются в микропроцессорном классификаторе как пороговые значения границы области существования решающей функции  $d_K$ .

**6. Заключение.** Одним из эффективных путей повышения устойчивости информационных систем управления технологическими процессами на транспорте является применение основополагающих принципов распознавания образов при создании классификаторов состояний рельсовых линий, функционирующих в условиях воздействия значительных возмущений. Использование многочленов Эрмита в качестве полинома решающей функции позволяет существенно расширить диапазон правильного распознавания состояний рельсовых линий, синтезировать полиномы любого порядка и размерности. Использование такой функции объясняется тем условием, что ее легко воспроизвести, и она удовлетворяет условиям теоремы Вейерштрасса об аппроксимирующих свойствах полиномиальных ортогональных функций. Предложенный в работе алгоритм формирования

распознающего классификатора реализован в виде программы в среде Mathcad, удовлетворительные результаты, полученные в ходе исследований, подтверждают функциональные возможности подхода по разработке обучаемого классификатора состояний рельсовых линий с многомерными информативными признаками.

## Литература

1. *Лябах Н.Н., Умрихин Н.Г.* Автоматизация процесса классификации интеллектуальных транспортных комплексов на основе экспертных систем // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2013. № 2(50). С. 98–103.
2. *Тарасов Е.М.* Принципы распознавания в классификаторах состояний рельсовых линий // М.: Маршрут. 2003. 156 с.
3. *Ивахненко А.Г.* Самообучающиеся системы // Киев: АН УССР. 1963. 328 с.
4. *Ту Дж., Гонсалес Р.* Принципы распознавания образов / Пер. с англ. И.Б. Гуревича / под ред. Ю.И. Журавлева // М.: Мир. 1978. 412 с.
5. *Михеева Т.И., Сапрыкин О.Н.* Нейросетевое управление пространственно-координированными объектами транспортной инфраструктуры // Самара: D.S. Style. 2011. 217 с.
6. *Фомин Я.А., Тарловский Г.Р.* Статистическая теория распознавания образов // М.: Радио и связь. 1986. 286 с.
7. *Баранов Р.П., Белоконь А.В., Фаворская М.Н.* Определение и приоритизация признаков объектов на изображении в системах распознавания // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2012. Т. 1. № 8. С. 328–329.
8. *Борисова И.А., Загоруйко Н.Г., Кутненко О.А.* Критерии информативности и пригодности подмножества признаков, основанные на функции сходства // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т.74. №1. С. 68–71.
9. *Галушкин А.И.* Синтез многослойных систем распознавания образов // М.: Энергия. 1974. 367 с.
10. *Tarasov E.M., Zhelezov D.V.* Development of an Intelligent System of Determinating the Coordinates and the Speed of the Train // Transport and Telecommunication Journal. 2015. vol. 17. no. 2. pp. 138–143.
11. *Потапов А.С.* Распознавание образов и машинное восприятие: Общий подход на основе минимальной длины описания // СПб.: Политехника. 2007. 548 с.
12. *Суетин П. К.* Классические ортогональные многочлены: 3-е изд., перераб. и доп. // М.: ФИЗМАТЛИТ. 2005. 480 с.
13. *Орлов А.И.* Математические методы теории классификации // Научный журнал КубГАУ. 2014. №95(01). С. 1–37.
14. *Tarasov E.M., Isaicheva A.G.* Technique of measurement of ultralow resistance of current conductive junction of rail lines as the problem of states object identification // Proceedings of Information Technology and Nanotechnology (ITNT - 2015). 2015. vol. 1490. pp. 397–401.
15. *Журавлёв Ю.И., Рязанов В.В., Сенько О.В.* Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения // М.: ФАЗИС. 2006. 176 с.
16. *Белоногов А.С., Куров М.Б.* Выбор решающей функции в задаче оценки электрических параметров рельсовых цепей // Наука и образование транспорту. Самара: СамГУПС. 2011. № 1. С. 69–71.

17. *Загоруйко Н. Г., Кутненко О. А.* Количественная мера компактности образов и метод ее повышения // Интеллектуализация обработки информации: Сб. докл. Девятой Международной конф. М.: Торус Пресс. 2012. С. 29–32.
18. *Неделько В.М.* Некоторые вопросы оценивания качества методов построения решающих функций // Вестник Томского государственного университета. 2013. №3(24). С. 123–132.
19. *Куров М.Б., Белоногов А.С., Смирнова Л.Б.* Метод удаленного мониторинга проводимости изоляции рельсовой линии // Наука и образование транспорту. Самара: СамГУПС. 2011. № 1. С. 100–101.
20. *Волик В.Г., Гуменников В.Б., Шорохов Н.С.* Измерение распределенных параметров рельсовой линии // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2015): Сб. науч. тр. международной научно-технической конференции. Самара: СамНЦ РАН. 2015. С. 48–51.

**Железнов Дмитрий Валерианович** — д-р техн. наук, доцент, ректор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный университет путей сообщения" (СамГУПС). Область научных интересов: разработка и создание методов и принципов инвариантности и распознавания состояний систем интервального управления движением поездов в условиях значительных возмущающих воздействий. Число научных публикаций — 85. zheleznov\_dim@mail.ru, <https://www.samgups.ru/>; ул. Свободы, 2В, Самара, 443066; р.т.: +7(846)2624112, Факс: +7(846)2623076.

**Тарасов Евгений Михайлович** — д-р техн. наук, профессор, проректор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный университет путей сообщения" (СамГУПС). Область научных интересов: разработка принципов инвариантности и распознавания состояний систем интервального управления движением поездов в условиях значительных возмущающих воздействий; разработка методов удаленного контроля состояния рельсовых линий и технической диагностики параметров рельсовой сети на магистральных железных дорогах. Число научных публикаций — 230. tarasov53em@yandex.ru, <https://www.samgups.ru/>; ул. Свободы, 2В, Самара, 443066; р.т.: +7(846)255-6735, Факс: +7(846)262-3076.

**Исайчева Алевтина Геннадьевна** — к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный университет путей сообщения" (СамГУПС). Область научных интересов: разработка методов удаленного контроля состояния рельсовых линий и технической диагностики параметров рельсовой сети на магистральных железных дорогах. Число научных публикаций — 43. aspirantsamit@rambler.ru; ул. Свободы, 2В, Самара, 443066; р.т.: +7(846)2556706, Факс: +7(846)2623076.

**Михеева Татьяна Ивановна** — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры организации и управления перевозками на транспорте, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет). Область научных интересов: структурно-параметрический анализ интеллектуальных транспортных систем, разработка принципов нейросетевого управления пространственно-координированными объектами транспортной инфраструктуры. Число научных публикаций — 125. mikheevati@mail.ru, <https://www.ssau.ru/>; Московское шоссе, 34, Самара, 443086; р.т.: +7(846)2674674, Факс: +7(846)2674674.

**D.V. ZHELEZNOV, E.M. TARASOV, A.G. ISAYCHEVA, T.I. MIKHEEVA**  
**DEVELOPMENT OF THE LEARNING CLASSIFIER OF RAIL**  
**LINES STATES WITH MULTIVARIATE INFORMATIVE**  
**FEATURES**

---

*Zheleznov D.V., Tarasov E.M., Isaycheva A.G., Mikheeva T.I.* **Development of the Learning Classifier of Rail Lines States with Multivariate Informative Features.**

**Abstract.** A considerable number of failures in the system of interval control of train traffic are associated with the impact of disturbing actions in a wide range of change in the only informative feature characterizing the rail lines states. In the paper, it is proposed to determine the state of the control object by the principles of the pattern recognition with multivariate informative features. It is suggested to use as the features the voltages and currents at the input and output of a quadripole, and as a polynomial of the decisive function — the Hermit's orthogonal polynomial, which allows increasing the depth of recognition and ensuring the relative invariance of disturbing actions by amplifying the order and dimension. In recognition of the rail lines states the relative error of calculating class boundaries by decisive functions is used as a quality criterion.

Serviceability of the proposed method is demonstrated by the results of rail lines states recognition with a "trained" decisive function.

**Keywords:** classifier of states, decisive function, multivariate features.

---

**Zheleznov Dmitry Valerianovich** — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, rector, Samara State Transport University. Research interests: design and development of methods and principles of invariance and recognition of system states of interval train control in major disturbing actions. The number of publications — 85. zheleznov\_dim@mail.ru, <https://www.samgups.ru/>; 2B, Svoboda str., Samara, 443066, Russia; office phone: +7(846)2624112, Fax: +7(846)2623076.

**Tarasov Evgeniy Mikhailovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, vice-rector, Samara State Transport University. Research interests: development of the principles of invariance and recognition of systems states of interval train control in major disturbing actions, development of remote control of rail lines and technical diagnostics parameters of the rail network on the railways. The number of publications — 230. tarasov53em@yandex.ru, <https://www.samgups.ru/>; 2B, Svoboda str., Samara, 443066, Russia; office phone: +7(846)255-6735, Fax: +7(846)262-3076.

**Isaycheva Alevtina Genadievna** — Ph.D., associate professor, associate professor of automation, telemechanics and communication on railway transport department, Samara State Transport University. Research interests: development of remote control of rail lines and methods of technical diagnostics parameters of the rail network of trunk railways. The number of publications — 43. aspirantsamiit@rambler.ru; 2B, Svoboda str., Samara, 443066, Russia; office phone: +7(846)2556706, Fax: +7(846)2623076.

**Mikheyeva Tatyana Ivanovna** — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, professor of organization of transportation and management on transport department, Samara University. Research interests: structural-parametric analysis of intelligent transport systems, the development of the principles of neural network control of space-coordinated transport infrastructure objects. The number of publications — 125. mikheevati@mail.ru,

## References

1. Lyabakh N.N., Umrihin N.G. [Automation of the process of classification of intelligent transport complexes on basis of expert systems]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija – Herald of the Rostov State Transport University*. 2013. vol. 2(50). pp. 98–103. (In Russ.).
2. Tarasov E.M. *Principy raspoznavanija v klassifikatorah sostojanij rel'sovyh linij* [Principles of recognition of rail lines states classifiers]. Moscow: Marshrut. 2003. 156 p. (In Russ.).
3. Ivakhnenko A.G. *Samoobuchajushhiesja sistemy* [Self-learning system]. Kiev: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. 1963. 328 p. (In Russ.).
4. Tou J. T., Gonzalez R. C. *Pattern recognition principles*. Addison-Wesley Pub. Co. 1974. 395 p. (Russ. ed.: Tu Dzh., Gonsales R. *Principy raspoznavanija obrazov*. M.: Mir. 1978. 412 p.).
5. Mikheeva T.I., Saprykin O.N. *Nejrosetevoe upravlenie prostranstvenno koordinirovannymi ob'ektami transportnoj infrastruktury*. [Neural network management space-coordinated transport infrastructure objects]. Samara: D.S. Style. 2011. 217 p. (In Russ.).
6. Fomin J.A., Tarlovskii G.R. *Statisticheskaja teorija raspoznavanija obrazov* [Statistical theory of pattern recognition]. Moscow: Radio and Communications. 1986. 286 p. (In Russ.).
7. Baranov R.P., Belokon A.V., Favorskaja M.N. [Definition and prioritization features of objects in the image of recognition systems]. *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki – Actual problems of aviation and astronautics*. 2012. Issue 1. vol. 8. pp. 328–329. (In Russ.).
8. Borisova I.A., Zagoruiko N.G., Kutnenko O.A. [Criteria informative and suitability of subsets based on similarity of function]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Diagnosis materials*. 2008. Issue 74. vol. 1. pp. 68–71. (In Russ.).
9. Galushkin A.I. *Sintez mnogoslojnyh sistem raspoznavanija obrazov* [Synthesis of multilayer pattern recognition systems]. Moscow: Energy. 1974. 367 p. (In Russ.).
10. Tarasov E.M., Zheleznov D.V. Development of an Intelligent System of Determinating the Coordinates and the Speed of the Train. *Transport and Telecommunication Journal*. 2016. vol. 17. no. 2. pp. 138–143.
11. Potapov A.S. *Raspoznavanie obrazov i mashinnoe vosprijatie: Obshhij podhod na osnove minimal'noj dliny opisaniya* [Pattern recognition and machine perception: The general approach on the basis of a minimum description length]. Sankt-Peterburg: University of Technology. 2007. 548 p. (In Russ.).
12. Suetin P.K. *Klassicheskie ortogonal'nye mnogochleny* [Classical orthogonal polynomials]. Moscow: FIZMATLIT. 2005. 480 p. (In Russ.).
13. Orlov A.I. [Mathematical methods of the theory of classification]. *Nauchnyj zhurnal KubGAU – Scientific Journal KubGAU*. 2014. vol. 95(01). pp. 1–37. (In Russ.).
14. Tarasov E.M., Isaicheva A.G. [Technique of measurement of ultralow resistance of current conductive junction of rail lines as the problem of states object identification]. *Proceedings of Information Technology and Nanotechnology (ITNT – 2015)*. 2015. vol. 1490. pp. 397–401.
15. Zhuravlev J.I., Ryazanov V.V., Senko O.V. *Raspoznavanie. Matematicheskie metody. Programmnaja sistema. Prakticheskie primenenija* [Recognition. Mathematical methods. Software system. Practical applications]. Moscow: Fazis. 2006. 176 p. (In Russ.).

16. Belonogov A.S., Kurov M.B. [Selecting a decisive function in the problem of estimation of the electrical parameters of track circuits]. *Nauka i obrazovanie transportu – Science and education for Transport*. 2011. vol. 1. pp. 69–71. (In Russ.).
17. Zagoruiko N.G., Kutnenko O.A. [Quantitative measure of a compact manner and method of its increase] *Intellektualizacija obrabotki informacii: Sb. dokl. Devjatoj Mezhdunarodnoj konf.* [Intellectualization information processing. Coll. papers 9 Int. Conf]. Moscow: Torus Press. 2012. pp 29–32. (In Russ.).
18. Nedelko V.M. [Some questions of estimation of quality of construction methods of decision functions]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the Tomsk State University*. 2013. vol. 3(24). pp 123–132. (In Russ.).
19. Kurov M.B., Belonogov A.S., Smirnova L.B. [The remote monitoring method isolation conduction of rail line]. *Nauka i obrazovanie transportu – Science and Education for Transport*. 2011. vol. 1. pp. 100–101. (In Russ.).
20. Volik V.G., Gumennikov V.B., Shorohov N.S. [The measurement of distributed parameters of the rail line] *Perspektivnye informacionnye tehnologii (PIT 2015): Sb. nauch. tr. mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* [Prospective information technology (PIT 2015) studies of the International scientific and technical conference]. Samara: SamNC RAN. 2015. pp. 48–51. (In Russ.).