

## Диагностирование подвижного состава с применением RBF-сетей

И.И. Лакин✉

Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта, г. Москва, Российская Федерация

✉Lakin16@mail.ru

### Резюме

Современные автоматизированные системы управления создаются как киберфизические производственные структуры, когда информация собирается из нескольких информационных массивов для принятия управленческих решений. При техническом обслуживании и ремонте тягового подвижного состава в автоматизированные системы управления должны поступать сведения с бортовых сетей диагностирования для обнаружения предотказных состояний оборудования и планирования индивидуального объема ремонта. Определяется принадлежность диагностируемого события по близости к вектору класса. В статье за основу взяты из сети Интернет примеры расчета принадлежности объекта диагностирования к одному из возможных классов по данным обучающей выборки, на базе которых разработана собственная программа на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications в среде MS Excel. Программа верифицирована на тестовых примерах. Она автоматически определяет объем обучающей выборки и число классов, позволяет проводить многоитерационные расчеты. Предложено контролировать процент принадлежности к каждому классу. С помощью программы выполнены расчеты для специально составленной обучающей выборки токов четырех тяговых электродвигателей одной секции локомотива – по десять событий для каждого класса. Всего задано пять классов: исправное состояние («норма») и отказы каждого из четырех двигателей. Данные имеют случайный разброс значений в пределах класса. Смоделированы одновременные отказы и предотказные состояния одного, двух и трех двигателей. Расчеты показали высокую результативность метода, особенно в части определения принадлежности к классу «норма». Сделан вывод об эффективности представленного алгоритма. Предлагается использовать его как инкапсулированный в программное обеспечение при планировании индивидуального объема технического обслуживания и ремонта с постоянным обучением за счет пополнения выборки.

### Ключевые слова

RBF-сети, программирование на Visual Basic for Applications, диагностирование отказов тягового подвижного состава, автоматизированные системы управления, техническое обслуживание и ремонт

### Для цитирования

Лакин И.И. Диагностирование подвижного состава с применением RBF-сетей / И.И. Лакин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 133–142. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).133-142.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 13.06.2024 г.; поступила после рецензирования: 12.09.2024 г.; принята к публикации: 13.09.2024 г.

## Rolling stock diagnostics using RBF networks

I.I. Lakin✉

Engineering Center of Railway Transport, Moscow, the Russian Federation

✉Lakin16@mail.ru

### Abstract

Modern automated control systems are created as cyberphysical production systems, when information is collected from several information systems for making management decisions. During maintenance and repair of traction rolling stock, automated control systems must receive information from on-board diagnostic systems to determine the pre-failure conditions of the equipment and plan an individual repair volume. The affiliation of the diagnosed event is determined by proximity to the class vector. The article is based on examples from the Internet of calculating the belonging of the diagnostic object to one of the possible classes according to the training sample data, based on which a proprietary program in the algorithmic language Visual Basic for Applications in the MS Excel environment has been developed. The program has been verified using test examples. The program automatically determines the size of the training sample and the number of classes, and allows to perform many iterative calculations. It is proposed to control the percentage of belonging to each class. Using the program, calculations were performed for a specially compiled training sample of the currents in four traction electric motors of one section of the locomotive: 10 events for each class. There are 5 classes in total: serviceable condition («normal») and failures of each of the four engines. The data has a random spread of values within the class. Simultaneous failures and pre-failure conditions of one, two and three engines are simulated. Calculations have shown the high efficiency of the method, especially in terms of determining the belonging to the «norm» class. The conclusion is made about the effectiveness of the proposed algorithm. It is proposed to use it as encapsulated in software when planning an individual volume of maintenance and repair with constant training by replenishing the sample.

**Keywords**

RBF networks, VBA programming, diagnostics of traction rolling stock failures, automated control systems, maintenance and repair

**For citation**Lakin I.I. Diagnostirovanie podvizhnogo sostava s primeneniem RBF-setei [Rolling Stock Diagnostics using RBF networks]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 133–142. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).133-142.**Article Info**

Received: June 13, 2024; Revised: September 12, 2024; Accepted: September 13, 2024.

**Введение**

Одна из главных характеристик сложного оборудования локомотивов – это надежность [1], что в полной мере относится и к тяговому подвижному составу (ТПС) [2]. Один из главных способов обеспечения надежности – система планово-предупредительного технического обслуживания и ремонта (ТОиР) [3]. Один из главных показателей надежности – коэффициент технической готовности (в ОАО «РЖД» – коэффициент готовности к эксплуатации), характеризующий долю простоя ТПС на ТОиР. Один из основных способов повышения использования ТПС – диагностирование отказов на этапе предотказного состояния.

Современный ТОиР должен быть обеспечен автоматизированной системой управления (АСУ) [4–6] с обязательным использованием бортовых, стационарных и переносных автоматизированных систем технического диагностирования [7]. Очень важно в АСУ ТОиР по принципу инкапсуляции использовать современные математические методы, тем самым повышая качество принятия управленческих решений [8–10].

Современная АСУ ТОиР должна создаваться как киберфизическая производственная система (Cyber Physical Production System – CPPS) [11], объединяя в себе информацию других АСУ, прежде всего бортовых автоматизированных систем технического диагностирования. Этому научно-практическому направлению посвящен целый ряд работ, имеющих важное значение для ТОиР [12–15]. Именно бортовое диагностирование позволяет определить индивидуальный объем ТОиР. Автором в рамках работы над АСУ ТОиР тягового подвижного состава рассмотрен один из самых распространенных простейших видов искусственных нейронных сетей для определения принадлежности объекта к одному из возможных классов из обучающей выборки – сеть радиально-

базисных функций (Radial Basis Function Networks), предложенная в 1988 г. [16, 17].

Цель исследования – анализ информативности диагностирования технического состояния оборудования с использованием методики RBF-сетей (Radial basis function network), где параметры события рассматриваются как координаты нормализованных векторов.

Для верификации исследования взят учебный пример расчета RBF-сети в среде MS Excel с использованием встроенных функций [18]. Сначала был воспроизведен пример, затем он же реализован на алгоритмическом языке программирования Visual Basic for Applications (VBA) в среде MS Excel [19, 20] с верификацией результатов. Далее разработана собственная программа с расширенной функциональностью и выполнено исследование.

**Разработанное программное обеспечение**

Перед стартом программы необходимо ввести в лист Excel исходные данные (рис. 1). В строке с символом «#» вводятся данные о диагностируемом объекте  $X_0$  (строка 5), а начиная с символа «@» – данные обучающей выборки  $X_i$ , число которых ограничено возможностями Excel (1 млн строк):  $i < 1\,000\,000$ .

	A	B	C	D	E	F
3						
4		Расчитанный класс	Sigma	1	2	3
5	#		0.1	500	800	900
6						
7						
8						
9	@					
10	№	Класс		1	2	3
11	1	Класс 1		1	2	3

**Рис. 1.** Исходные данные для расчета**Fig. 1.** Initial data for calculation

Символы «#» и «@» нужны для возможности менять верхнюю часть листа – программа автоматически найдет начало информации. Также программа позволяет задавать любое число параметров  $K$ , но их число у диагностируемого объекта  $X_0$  и у обучающей выборки  $X_i$

должно совпадать. У  $X_0$  дополнительно считывается заданное значение активационной функции  $\sigma$  («ширина окон активационных функций нейронов скрытого шара»), определяющий влияние расходимости радиуса. По умолчанию  $\sigma = 0,1$ . У обучающей выборки  $X_i$  дополнительно считывается класс принадлежности каждого элемента: любая текстовая информация (в примере – это «класс 1»). Далее будет предложено определять класс принадлежности события к отказу, предотказному или работоспособному состоянию в процессе расчета.

После старта программы (нажатием клавиш Alt-F8 – Enter) создаются и обнуляются рабочие массивы  $S(EvnMax, PrmMax)$ ,  $Class(ClsMax,1)$  и  $ClassSrt(ClsMax,1)$ . Далее с текущего листа считываются в массив  $S$  все исходные данные  $X_0$  и  $X_i$  с автоматическим определением заданного числа параметров  $PrmMx \leq PrmMax$  и объема обучающей выборки  $EvnMx \leq EvnMax$ . Одновременно определяется число классов  $ClsMx \leq ClsMax$ . Сами классы записываются в массив  $Class$ . При успешном считывании данных переменная  $ys = true$ , в противном случае работа программы завершается: *if not ys then Exit Function*.

Рассматриваемый метод предполагает нормализацию исходных параметров, которые рассматриваются как координаты многомерного вектора: каждая координата делится на евклидово расстояние  $md$  – корень квадратный из суммы квадратов координат:

```
For k = 0 To EvnMx
  md = 0
  For kk = 1 To PrmMx
    md = md + (S(k, kk))
  Next kk
  md = (md) ^ (0.5)
  For kk = 1 To PrmMx
    S(k, kk) = S(k, kk) / md
  Next kk
Next k
```

В результате нормализации все параметры (вершины векторов) как бы находятся в круге радиуса 1 при  $K = 2$ , в шаре при  $K = 3$  и т.д. с границами 1 каждая. В результате параметры  $\{1, 2, 3\}$ ,  $\{10, 20, 30\}$ ,  $\{100, 200, 300\}$  будут восприняты как относящиеся к одному классу. Например, фотообъект будет отнесен к своему классу независимо от размера объекта. Эту особенность методики следует учитывать при формировании классов.

После нормализации параметров программа рассчитывает функцию активации  $F_i$  для каждого события, кроме диагностируемого, и записывает результаты расчета в массив  $S$ :

```
For k = 1 To EvnMx
  Fi = 0
  For kk = 1 To PrmMx
    Fi = Fi + S(k, kk) * S(0, kk)
  Next kk
  Fi = Fi - 1
  Fi = Fi / ((Sigma) ^ (2))
  Fi = Exp(Fi)
  S(k, PrmMax) = Fi
Next k
```

Функция активации события  $i$  представляет собой экспоненциальное выражение вида:

$$F_i = \sum (\text{Exp}(X_i \cdot X_0 - 1) / \sigma^2).$$

Произведение нормализованных координат  $X_i \cdot X_0 \leq 1$ . Тогда  $(X_i \cdot X_0) - 1 \leq 0$ . Так как  $\sigma^2 > 0$ , то степень экспоненты всегда отрицательная. Значит функция всегда  $F_i > 0$ , но  $F_i \leq 1$ . С ростом произведения  $(X_i \cdot X_0)$   $F_i \rightarrow 1$ : с ростом каждой координаты ( $X_i \rightarrow 1$ ,  $X_0 \rightarrow 1$ ), с ростом значимости параметра растет его вклад в  $F_i$ . Максимальное значение  $F_i = 1$  будет при  $X_i = 1$ ,  $X_0 = 1$ .

Возникает проблема: если параметр  $K$  является значимым, но его численное значение меньше других, то его влияние будет незаслуженно низким. Например, если у выпрямительно-инверторного преобразователя есть параметры «Минимальный угол открытия тиристорov»  $\alpha_0 < 15$  эл. град. и «Регулируемый угол открытия тиристорov»  $\alpha_p < 157$  эл. град., то по расчету  $\alpha_p$  будет оказывать большее влияние, чем  $\alpha_0$ , а на самом деле наоборот. Таким образом, желательна дополнительная нормализация. Например, привести углы открытия тиристорov в процентах от максимально ожидаемого значения.

Для повышения эффективности метода также возможен подбор размерности. Например, у тягового электродвигателя ток меняется в пределах 0–1 200 А, напряжение в пределах 0–1 000 В, а ступени ослабления поля от 0 до 4, то есть смысл представить последний параметр как 0, 300, 600, 900, 1 200.

После расчета значений функции активации по каждому событию в массиве  $S$ , следует просуммировать их по каждому классу в массиве  $Class$ :

```
For k = 1 To ClsMx
  For kk = 1 To EvnMx
```

Рассчитанный класс	Sigma	Параметры			
		1	2	3	4
<b>Класс 1</b>	0,1	500	800	900	
Вероятность принадлежности	Класс 1	Класс 3	Класс 4	Класс 2	Класс 5
	71,96%	27,20%	0,83%	0,00%	0,00%

Рис. 2. Вывод результатов расчета

Fig. 2. Output of calculation results

```

If Class(k, 0) = S(kk, 0) Then
  Class(k, 1) = Class(k, 1) + S(kk,
PrmMax)
  End If
Next kk
Class(k, 1) = Class(k, 1)
Next k

```

В рассматриваемой методике класс принадлежности определяется максимальным значением суммы  $\Sigma F_i$ , но интересно видеть и ближайшие классы. Для этого в программе выполнена сортировка классов, которые заносятся в массив *ClassSrt*. Класс, соответствующий первому элементу, считается классом принадлежности диагностируемого события  $X_0$ . Дополнительно для возможности анализа выводятся отсортированные данные *ClassSrt* как процент суммы  $\Sigma F_i$  класса к общей сумме  $\Sigma \Sigma F_i$  (рис. 2):

```

ss = 0
For k = 1 To ClsMx
  ss = ss + ClassSrt(k, 1)
Next k
For k = 1 To ClsMx
  ClassSrt(k, 1) = ClassSrt(k, 1) / ss

```

```
Next k
```

Все действия с массивами (кроме ввода и вывода информации) оформлены как функция, возвращающая значение true при корректном завершении расчета:

```
Function RBFUniversal(S, EvnMx, PrmMx, Class,
ClassSrt, ClsMx, PrmMax, Sigma) As Boolean.
```

Весь описанный процесс также оформлен как функция:

```
Function RBFStat() As Boolean
```

для возможности многоитерационных расчетов: сама программа Sub AAA() запускается по одному из возможных вариантов по задаваемому вручную значению варианта Zdn. При Zdn = 1 запускается вариант с одним расчетом, остальные – многоитерационные.

### Факторный анализ

В алгоритме ширина окна по умолчанию  $\sigma = 0,1$ . Многоитерационным расчетом для рассмотренного примера получена зависимость процента соответственно классу при различных значениях  $\sigma$  (рис. 3). При всех значениях  $\sigma$  соответствие было правильным – классу 1. Но про-

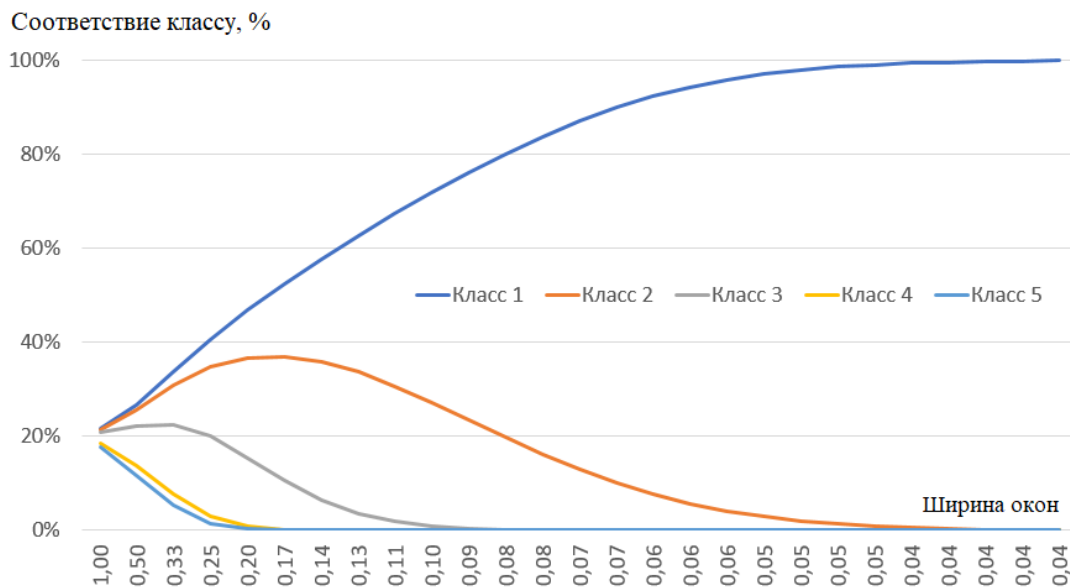


Рис. 3. Влияние ширины окна на результаты расчета

Fig. 3. The influence of window width on calculation results

цент соответствия (по сути, вероятность принадлежности классу 1) существенно рос и достиг 99,8 % при  $\sigma = 0,04$ . При  $\sigma = 0,1$  соответствие было 77 %, что тоже существенно.

Проверено влияние неравномерности выборок. В предыдущих примерах у каждого из пяти классов было семь событий. На рис. 4 показано изменение соответствия классам при увеличении событий от 7 до 37 в классе 1, которому и принадлежит диагностируемое событие. Процент соответствия растет. На рис. 5 число событий растет у альтернативного класса 2. В результате происходит смена диагностируемого класса. Та-

ким образом, размер выборки влияет на диагноз: желательно брать выборки одинаковых размеров. Однако, если есть четкое соответствие диагностируемого события классу, то тогда влияния нет.

#### Диагностирование технического состояния

Рассмотрен пример диагностирования четырех тяговых электродвигателей (ТЭД) типа НБ-514Е четырехосной секции локомотива серии ЗЭС5К. Для этого создано пять классов. Первый – нормальная работа двигателей, когда разброс токов не более 5 % (табл. 1), еще четыре – отказы ТЭД, когда их ток примерно в 2

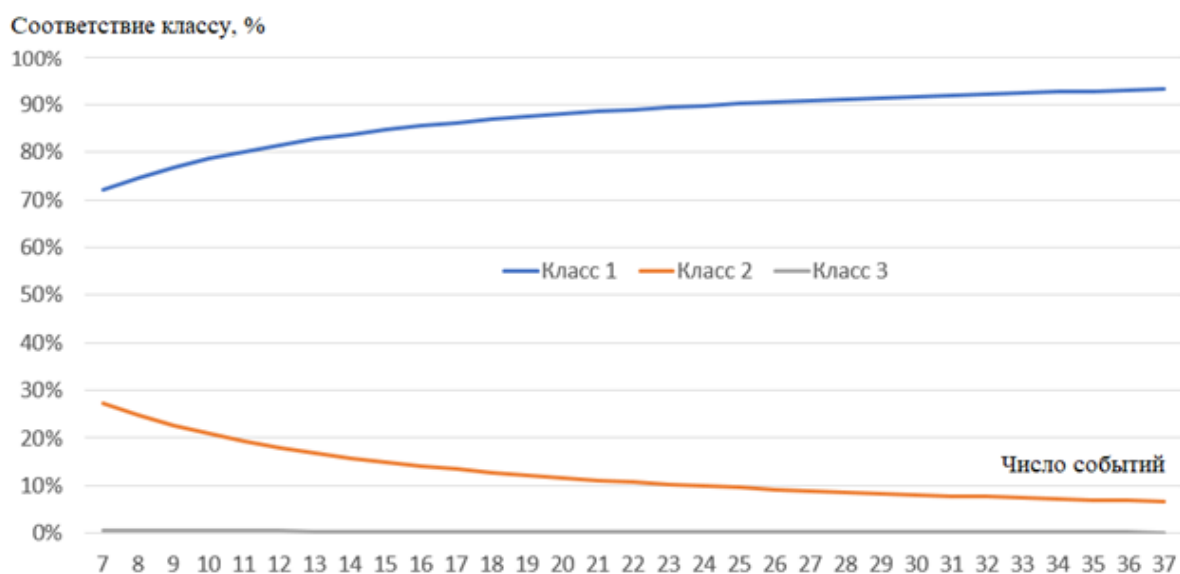


Рис. 4. Зависимость соответствия классу от числа событий в Классе 1  
Fig. 4. Dependence of class compliance on the number of events in Class 1

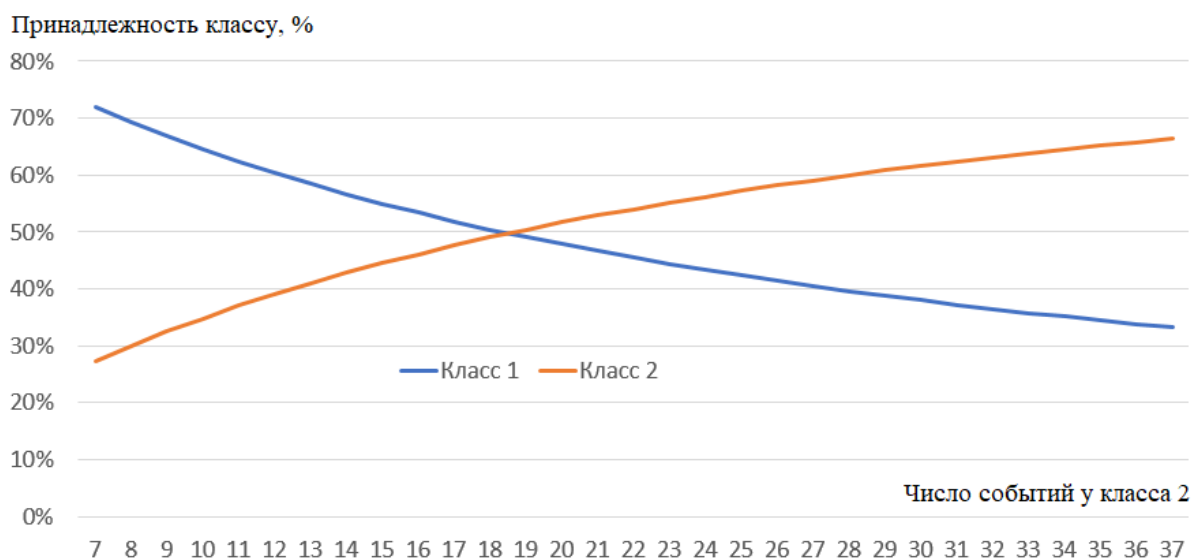


Рис. 5. Зависимость соответствия классу от числа событий в Классе 2  
Fig. 5. Dependence of class compliance on the number of events in Class 2

раза меньше, чем у других (табл. 2). Для каждого класса создано по десять событий (всего 50), в каждом из которых данные имеют случайный разброс. При этом важно не абсолютное значение тока, а их соотношение у ТЭД.

Во всех случаях диагностирование было верным (табл. 3). Первые пять примеров – все ТЭД исправны. Вероятность принадлежности к классу «норма» – 77,9 %. Остальные примеры – это отказы разных ТЭД. Причем ток отказавшего ТЭД отличался не в 2 раза, как в обучающей выборке, а на разные значения. Например, в примере № 10 отличие тока ТЭД 3 – на 30 %. В результате и принадлежность к классу отказа ТЭД 3 ниже – 62,4 %.

Приведенные примеры подтверждают возможность диагностирования отказа. Но наибольший эффект дает диагностирование предотказного состояния с предотвращением отказа во время планового ТОиР. В табл. 4 и на

рис. 6 приведены зависимости принадлежности к классам «норма» и «отказ ТЭД 1» в зависимости от значения тока первого ТЭД. При половине тока (500 А) процент отнесения к отказу – 94,51 %, а при нулевом токе – 99,99 %. Таким образом, предотказное состояние можно диагностировать по отрицательной динамике принадлежности к классу «норма». Дополнительно выполнен анализ эффективности метода при наличии двух и более отказов. На рис. 7 приведены результаты расчета для одновременного отказа ТЭД 1 и 2. Полученный результат оказался положительным: метод определил неисправное состояние и правильно классифицировал отказ. Графики отказов ТЭД 1 и 2 неодинаковые, так как их отказы заданы несовпадающими выборками. На рис. 8 приведены результаты расчета для одновременного отказа ТЭД 1, 2 и 3. Полученный результат также оказался положительным.

**Таблица 1.** Исходные данные при исправных тяговых электродвигателях

**Table 1.** Initial data for serviceable traction motors

Номер события Number of event	Токи диагностируемых тяговых электродвигателей, А Currents of diagnosed traction electric motors, А			
	ТЭД 1	ТЭД 2	ТЭД 3	ТЭД 4
1	800	810	790	800
2	900	920	800	810
3	500	520	510	500
4	450	455	445	455
5	850	860	840	855
6	700	700	700	700
7	750	775	745	755
8	830	844	820	835
9	950	970	960	955
10	1 100	1 150	1 050	1 120

**Таблица 2.** Исходные данные при неисправном ТЭД 3

**Table 2.** Initial data for faulty TEM (traction electric motor 3)

Номер события Number of event	Токи диагностируемых тяговых электродвигателей, А Currents of diagnosed traction electric motors, А			
	ТЭД 1	ТЭД 2	ТЭД 3	ТЭД 4
1	800	810	350	800
2	900	920	400	810
3	500	520	225	500
4	450	455	200	455
5	850	860	500	855
6	700	700	350	700
7	750	775	350	755
8	830	844	400	835
9	950	970	480	955
10	1 100	1 150	600	1 120

Таблица 3. Расчет принадлежности к классам тяговых электродвигателей

Table 3. Calculation of traction motor class classification

№ события Event №	Токи диагностируемых тяговых электродвигателей, А Currents of diagnosed traction electric motors, A				Принадлежность к классам, % Belonging to classes				
	ТЭД 1	ТЭД 2	ТЭД 3	ТЭД 4	Норма	ТЭД 1	ТЭД 2	ТЭД 3	ТЭД 4
1	500	500	500	500	77,90	5,05	3,78	3,80	9,47
2	850	840	860	855	77,90	5,15	4,55	3,34	9,02
3	300	300	300	300	77,90	5,05	3,78	3,80	9,47
4	530	540	550	560	77,90	7,25	7,00	4,26	3,40
5	1 200	1 190	1 170	1 195	77,90	4,47	3,75	4,47	8,96
6	500	1 000	1 000	1 000	5,26	95,00	0,03	0,05	0,15
7	500	800	790	820	19,64	79,00	0,23	0,35	0,62
8	100	700	710	720	0,06	99,94	0,00	0,00	0,00
9	833	400	850	840	3,25	0,04	96,66	0,02	0,02
10	1 000	1 100	700	1 050	34,38	1,38	1,58	62,41	1,58
11	777	800	750	500	22,51	0,44	0,19	0,51	76,34

Таблица 4. Расчет принадлежности ТЭД 1 к неисправному классу

Table 4. Calculation of the belonging of TEM 1 to the faulty class

№ события Event №	Токи диагностируемых тяговых электродвигателей, А Currents of diagnosed traction electric motors, A				Принадлежность к классам, % Belonging to classes				
	ТЭД 1	ТЭД 2	ТЭД 3	ТЭД 4	Норма Norm	ТЭД 1	ТЭД 2	ТЭД 3	ТЭД 4
1	1 000	1 000	1 000	1 000	77,76	5,04	3,77	3,97	9,45
2	900	1 000	1 000	1 000	74,56	13,35	2,45	2,76	2,45
3	800	1 000	1 000	1 000	60,97	31,93	1,35	1,56	4,19
4	700	1 000	1 000	1 000	36,98	59,91	0,55	0,68	1,89
5	600	1 000	1 000	1 000	15,78	83,26	0,15	0,21	0,60
6	500	1 000	1 000	1 000	5,26	94,51	0,03	0,05	0,15
7	400	1 000	1 000	1 000	1,55	98,40	0,03	0,01	0,01
8	300	1 000	1 000	1 000	0,43	99,88	0,00	0,00	0,01
9	200	1 000	1 000	1 000	0,12	99,88	0,00	0,00	0,00
10	100	1 000	1 000	1 000	0,03	99,97	0,00	0,00	0,00
11	0	1 000	1 000	1 000	0,01	99,99	0,00	0,00	0,00

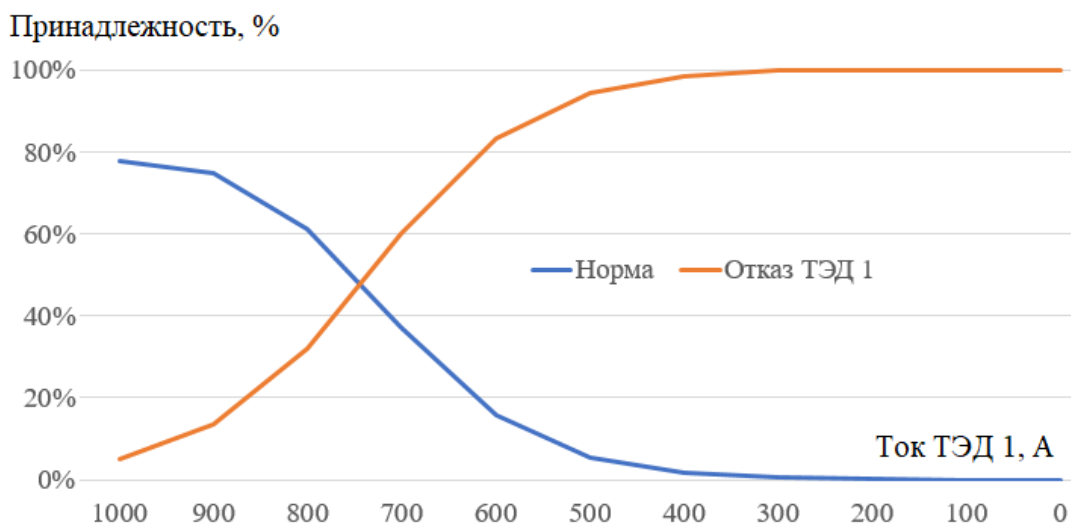


Рис. 6. Зависимость соответствия классам «норма» и «ТЭД 1» от разброса токов

Fig. 6. Dependence of compliance with the classes «norm» and «TED 1» on the spread of currents

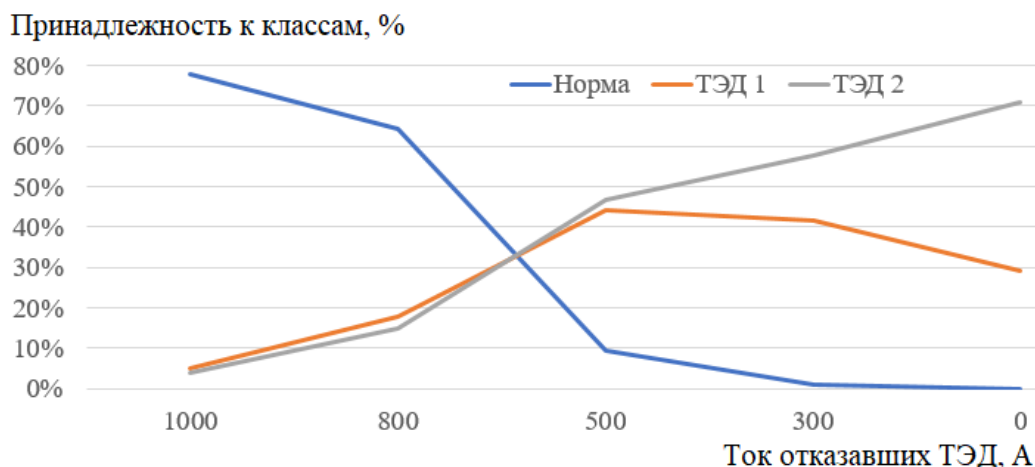


Рис. 7. Зависимость соответствия классам при отказах ТЭД 1 и 2  
Fig. 7. Dependence of compliance with classes in case of failures of TED 1 and 2

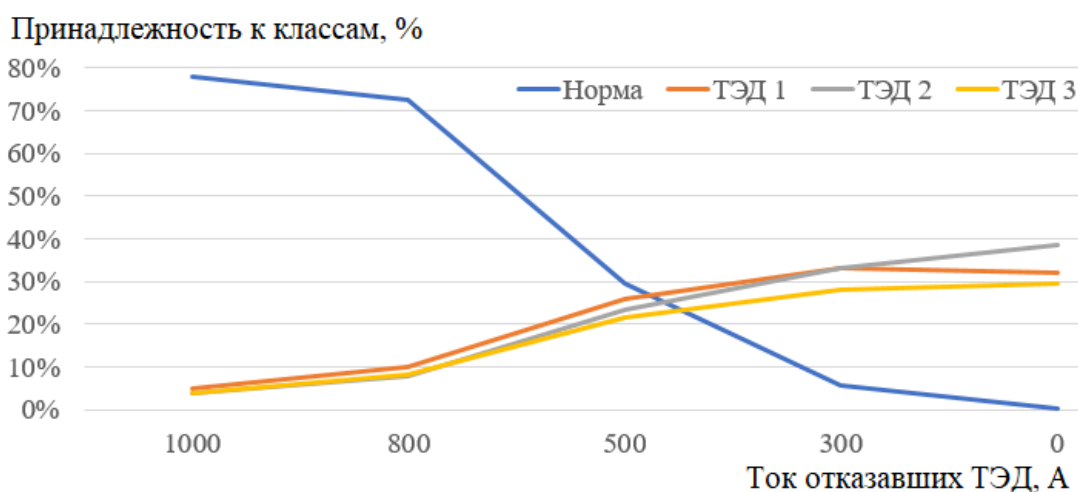


Рис. 8. Зависимость соответствия классам при отказах ТЭД 1, 2 и 3  
Fig. 8. Dependence of compliance with classes in case of failures of TEM 1, 2 and 3

## Заключение

Применение RBF-сетей может быть эффективным при диагностировании отказов однотипного оборудования локомотивов, что доказано на примере параллельно работающих ТЭД с помощью специально разработанной программы на алгоритмическом языке VBA в среде MS Excel. Разработанная программа может быть инкапсулирована в АСУ ТОиР для ее использова-

ния как диагностической. При этом реализуется принцип постоянного самообучения по мере накопления статистических данных.

Полученные результаты позволяют автору в дальнейшей своей научно-практической работе использовать разработанный метод для его инкапсуляции в АСУ ТОиР.

## Список литературы

1. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. Введ. 2022–01–01. М. : Российский институт стандартизации, 2021. 40 с.
2. Горский А.В., Воробьев А.А. Надежность электроподвижного состава. М. : Маршрут, 2005. 303 с.
3. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава / В.А. Гапанович, В.Е. Андреев, Митрохин Ю.В. и др. М. : ИРИС-ГРУПП, 2012. 575 с.
4. Автоматизированная система управления локомотивным хозяйством. АСУТ / И.К. Лакин, Ю.В. Смирнов, А.Ю. Тимченко и др. М. : Отраслевой центр внедрения новой техники и технологий, 2002. 514 с.
5. Шабалин Н.Г. Организация эксплуатации и технического обслуживания тягового подвижного состава с использованием современных информационных технологий : дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 171 с.



6. Пустовой И.В. Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов : дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2018. 181 с.
7. Семёнов А.П. Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2021. 379 с.
8. Грачев В.В. Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля технического состояния локомотивов : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2019. 434 с.
9. Аболмасов А.А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания : дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 180 с.
10. Лакин И.К., Пустовой И.В., Аболмасов А.А. Автоматизированная система управления эксплуатационным жизненным циклом локомотивов // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава : тр. всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Красноярск, 2020. С. 223–242.
11. Ratchev S. Cyber Physical Production Systems // Connected Everything : сайт. URL : <https://connectedeverything.ac.uk/wp-content/uploads/2018/06/cyber-physical-production-systems.pdf> (Дата обращения 07.06.2024).
12. Лакин И.И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 195 с.
13. Хромов И.Ю. Анализ влияния режимов эксплуатации на техническое состояние локомотивов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2021. 187 с.
14. Мельников В.А. Совершенствование методов диагностирования тепловозов 2ТЭ116У с применением данных бортовых систем управления : дис. ... канд. техн. наук. М., 2022. 210 с.
15. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К.В. Липа, А.А. Белинский, В.Н. Пустовой и др. М. : Локомотивные Технологии, 2015. 212 с.
16. Moody J., Darken C.J. Fast Learning in Networks of Locally-Tuned Processing Units // Neural Computation. 1989. Vol. 1. Iss. 2. P. 281–294. DOI:10.1162/neco.1989.1.2.281.
17. Сеть радиальных базисных функций // Распознавание : сайт. URL : [http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Сеть\\_радиальных\\_базисных\\_функций](http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Сеть_радиальных_базисных_функций) (Дата обращения 07.06.2024).
18. Проектирование RBF-сети в MS Excel // Rutube : сайт. URL : <https://rutube.ru/video/d259ee0113d687e0961a1cbfe83eb32e/> (Дата обращения 07.06.2024).
19. Уокенбах Д. Excel 2010: профессиональное программирование на VBA. М. [и др] : Диалектика, 2012. 944 с.
20. Справочник по VBA для Excel // Microsoft Learn : сайт. URL : <https://learn.microsoft.com/ru-ru/office/vba/api/overview/excel> (Дата обращения 07.06.2024).

### References

1. GOST R 27.102-2021. Nadezhnost' v tekhnike. Nadezhnost' ob'ekta. Terminy i opredeleniya [State Standard R 27.102-2021. Dependability in technics. Dependability of item. Terms and definitions]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii Publ., 2021. 40 p.
2. Gorskii A.V., Vorob'ev A.A. Nadezhnost' elektropodvizhnogo sostava [Reliability of electric rolling stock]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 303 p.
3. Gapanovich V.A., Andreev V.E., Mitrokhin Yu.V., Yagovkin A.N., Ivanov K.V., Alferov V.Yu., Kiselev V.I., Lakin I.K., Ivanov A.A. Eksploatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie podvizhnogo sostava [Operation and maintenance of rolling stock]. Moscow: IRIS-GRUPP Publ., 2012. 575 p.
4. Lakin I.K., Smirnov Yu.V., Timchenko A.Yu., Bushuev I.V. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya lokomotivnym khozyaistvom. ASUT [Automated locomotive management system. ALMS]. Moscow: Otrasevoi tsentr vnedreniya novoi tekhniki i tekhnologii Publ., 2002. 514 p.
5. Shabalin N.G. Organizatsiya ekspluatatsii i tekhnicheskogo obsluzhivaniya tyagovogo podvizhnogo sostava s ispol'zovaniem sovremennykh informatsionnykh tekhnologii [Organization of operation and maintenance of traction rolling stock using modern information technologies]. Ph.D.'s theses. Moscow, 1999. 171 p.
6. Pustovoi I.V. Razrabotka informatsionno-dinamicheskoi modeli upravleniya servisnym tekhnicheskim obsluzhivaniem i remontom lokomotivov [Development of an information-dynamic management model for maintenance and repair of locomotives]. Ph.D.'s theses. Omsk, 2018. 181 p.
7. Semenov A.P. Model' upravleniya zhizennym tsiklom lokomotivov s ispol'zovaniem sovremennykh metodov tekhnicheskogo diagnostirovaniya [Model of locomotive life cycle management using modern methods of technical diagnostics]. Doctor's theses. Moscow, 2021, 379 p.
8. Grachev V.V. Nauchnye osnovy primeneniya metodov intellektual'nogo analiza dannykh dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov [Scientific bases of application of data mining methods for monitoring the technical condition of locomotives]. Doctor's theses. Saint Petersburg, 2019. 434 p.
9. Abolmasov A.A. Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem tyagovogo podvizhnogo sostava v usloviyakh servisnogo obsluzhivaniya [Technical state management of the traction rolling stock in the conditions of service maintenance]. Ph.D.'s theses. Moscow: MIIT, 2017. 180 p.
10. Lakin I.K., Pustovoy I.V., Abolmasov A.A. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya ekspluatatsionnym zhizennym tsiklom lokomotivov [Automated control system for the operational life cycle of locomotives]. *Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Eksploatatsiya i obsluzhivanie elektronnoy i mikroprotsessornoy oborudovaniya tyagovogo podvizhnogo sostava»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International participation «Operation and maintenance of electronic and microprocessor equipment of traction rolling stock»]. Krasnoyarsk, 2020, pp. 223–242.

11. Ratchev S. Cyber Physical Production Systems. Available at: [https:// connectedeverything.ac.uk/wp-content/uploads/2018/06/cyber-physical-production-systems.pdf](https://connectedeverything.ac.uk/wp-content/uploads/2018/06/cyber-physical-production-systems.pdf) (Accessed June 7, 2024).
12. Lakin I.I. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov po dannym bortovykh apparatno-programmykh kompleksov [Monitoring of the technical state of locomotives according to on-board hardware-software complexes]. Ph.D.'s theses. Moscow: МИТ, 2016. 195 p.
13. Khromov I.Yu. Analiz vliyaniya rezhimov ekspluatatsii na tekhnicheskoe sostoyanie lokomotivov [Analysis of the influence of operating modes on the technical condition of locomotives]. Ph.D.'s theses. Moscow, 2021. 187 p.
14. Mel'nikov V.A. Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniya teplovozov 2TE116U s primeneniem dannykh bortovykh sistem upravleniya [Improvement of methods for diagnosing diesel locomotives 2TE116U using data from on-board control systems]. Ph.D.'s theses. Moscow, 2022. 210 p.
15. Lipa K.V., Belinskii A.A., Pustovoi V.N. et al. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov ekspluatatsii lokomotivov. Teoriya i praktika [Monitoring of technical condition and operating modes of locomotives. Theory and practice]. Moscow: Lokomotivnye Tekhnologii Publ., 2015. 212 p.
16. Moody J., Darken C.J. Fast Learning in Networks of Locally-Tuned Processing Units. *Neural Computation*, 1989, vol. 1, iss. 2, pp. 281–294. DOI:10.1162/neco.1989.1.2.281.
17. Set' radial'nykh bazisnykh funktsii (elektronnyi resurs) [Network of radial basis functions (electronic resource)]. Available at: [http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Сеть\\_радиальных\\_базисных\\_функций](http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Сеть_радиальных_базисных_функций) (Accessed June 7, 2024).
18. Proektirovanie RBF-seti v MS Excel (elektronnyi resurs) [RBF network design in MS Excel (electronic resource)]. Available at: <https://rutube.ru/video/d259ee0113d687e0961a1cbfe83eb32e/> (Accessed June 7, 2024).
19. Walkenbach J. Excel 2010: professional'noe programmirovaniye na VBA [Excel 2010: professional programming in VBA]. Moscow, Saint Petersburg, Kiev: Dialektika Publ., 2012. 944 p.
20. Spravochnik po VBA dlya Excel (elektronnyi resurs) [VBA Handbook for Excel (electronic resource)]. Available at: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/office/vba/api/overview/excel> (Accessed June 7, 2024).

#### Информация об авторах

*Лакин Игорь Игоревич*, кандидат технических наук, ведущий эксперт группы интеграции систем управления, диагностики, безопасности и радиосвязи, Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта, г. Москва; e-mail: Lakin16@mail.ru.

#### Information about the authors

*Igor' I. Lakin*, Ph.D. in Engineering Science, Leading Expert of the Control, Diagnostic, Safety and Radio Communication Systems Integration Group, Railway Engineering Center, Moscow; e-mail: Lakin16@mail.ru.