

## *Техническая диагностика и прогнозирование*

УДК 656.25:004.942

**С. В. Бочкарев,  
А. А. Лыков, канд. техн. наук,  
Д. С. Марков, канд. техн. наук**

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,  
Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДНОГО УСТРОЙСТВА**

Предложен комбинированный метод диагностирования стрелочного переводного устройства (СПУ), разработанный на основе двух подходов: многокритериальной оценки диагностического параметра и нейросетевого. Комбинированный метод позволил увеличить достоверность диагностирования технологических и технических состояний СПУ за счет достоинств метода.

системы технического диагностирования и мониторинга; стрелочное переводное устройство; диагностический параметр; диагностический критерий; метод многокритериальной оценки диагностического параметра; нейронная сеть; комбинированный метод диагностирования

#### **Введение**

Внедрение систем технического диагностирования и мониторинга (СТДМ), основным назначением которых является повышение безопасности, безотказности функционирования устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) и, как следствие, повышение безопасности и бесперебойности движения поездов, позволит перейти на обслуживание устройств ЖАТ «по состоянию» [1, 2]. Однако применяемые ныне в СТДМ методы анализа диагностических параметров основных устройств ЖАТ и, в первую очередь, стрелочного переводного устройства (СПУ), включающего стрелочный перевод, стрелочный электропривод (СЭП) и схему управления, позволяют фиксировать только проявление неисправностей (увеличение времени перевода стрелки, потерю контроля и др.), но не указывают на причину и место возникновения [3, 4].

Повышение полноты и достоверности диагностирования предполагает выбор или разработку новых диагностических методов и моделей, обеспечивающих автоматизацию анализа технических состояний (ТС) СПУ в СТДМ.

## 1 Основные положения

Введем ряд определений:

– *диагностический параметр (ДП)* – физическая измеряемая величина, количественно характеризующая состояние объекта диагностирования (например, ток перевода стрелки, напряжение в линейных проводах схемы управления СЭП);

– *диагностический признак диагностического параметра (ДПДП)* – количественное измеряемое свойство диагностического параметра (например, амплитуда напряжения в линейных проводах; площадь фигуры, ограниченной функцией напряжения; отклонение от среднего значения рабочего тока перевода и т. п.);

– *диагностический критерий диагностического параметра (ДКДП)* – диагностический признак, отобранный в ходе экспериментальных или теоретических исследований из множества ДПДП в качестве критерия технического состояния объекта для построения диагностических моделей (ДМ); один ДП может характеризоваться в зависимости от количества технических состояний диагностируемого устройства целой совокупностью ДКДП;

– *диагностическая область ( $O_j$ )* – множество возможных значений совокупности ДКДП, характеризующих одно конкретное техническое состояние объекта.

Предложенные определения позволяют сформулировать требования к методам и моделям диагностирования СПУ:

– обеспечение выбора таких значений ДКП, принадлежащих  $O_j \equiv k$ , которые не пересекаются со значениями других областей для всех  $O_j: j = \overline{1, J}$  ( $j \neq k$ ), где  $J$  – количество диагностических областей, соответствующее техническим состояниям СПУ, различаемым по данному ДП;

– учет технологических разбросов параметров диагностируемых устройств, их старения и колебания значений ДКДП в процессе эксплуатации;

– чувствительность к изменениям значений ДКДП относительно диагностических областей  $O_j$ ;

– использование в ДМ данных по ДКДП, полученных в результате измерений существующими или перспективными средствами СТДМ;

– относительная простота алгоритмизации и программной реализации ДМ;

– автоматизация процедур диагностирования в СТДМ на основе программной реализации ДМ;

– выполнение процедур диагностирования в реальном масштабе времени.

На основе сформулированных выше требований был проведен анализ известных методов диагностирования технических устройств и выбрано два направления синтеза ДМ СПУ: метод многокритериальной оценки ДП [5] и нейросетевой метод [6].

## 2 Многокритериальная и нейросетевая диагностические модели

Рассмотрим синтез ДМ СПУ с использованием в качестве ДП тока перевода стрелки  $I_p$ . Представление  $I_p$  в качестве ДП понимается как совокупность измеренных значений за время работы двигателя. Существующие СТДМ не выполняют функцию автоматизированного анализа тока перевода стрелки для диагностирования СПУ. Выявляются только работа стрелки на фрикцию и невозможность ее перевода, далее технологи визуально оценивают графики и делают заключение о техническом состоянии СПУ. Результат диагностирования зависит как от объективных (качество измерений), так и субъективных (квалификация, дисциплинированность технологов) факторов и не всегда достоверен.

Граф состояний схемы управления СЭП (рис. 1) показывает, что СПУ может находиться в плюсовом  $C_1$ , минусовом  $C_2$  крайних положениях (исправные ТС), осуществлять перевод из плюсового положения в минусовое ( $C_3$ ) и наоборот ( $C_4$ ) (диагностическая область  $O_1$ ). Неисправности возникают в любом из перечисленных ТС и в одном случае приводят к потере контроля крайнего положения  $C_5, C_6$ , а в другом – к невозможности перевода стрелки  $C_7, C_8$ .

Ниже приведен перечень неисправностей, которые могут породить переход СПУ в состояния  $C_7, C_8$ :

- короткое замыкание якоря двигателя ( $O_2$ );
- искрение щеток в двигателе ( $O_3$ );
- грязный коллектор в двигателе ( $O_4$ );
- разрегулировка стрелочного перевода ( $O_5$ );
- грязные башмаки ( $O_6$ ).

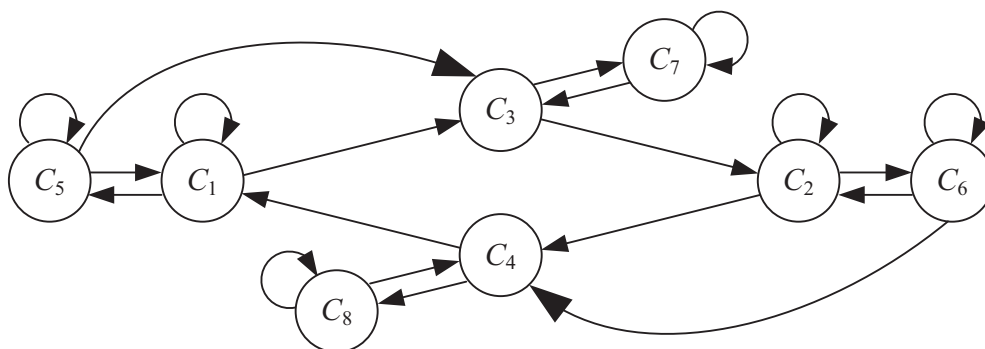


Рис. 1. Граф состояний схемы управления СЭП

Экспериментальные исследования (более 1000 переводов) на реальных СПУ с имитацией указанных неисправностей позволили на основе анализа графиков  $I_p$  выбрать в качестве ДКДП для ДМ по методу многокритериальной оценки ДП [5, 7] три ДПДП ( $d_1, d_2, d_3$ ) с допустимыми диапазонами изменения  $\Delta d_1\{C_{7,8}\}$ ,  $\Delta d_2\{C_{7,8}\}$ ,  $\Delta d_3\{C_{7,8}\}$ :

– среднее значение рабочего тока  $I_{p,cp}(d_1)$ :

$$I_{p,cp} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{p,i}}{n}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество значений рабочего тока за один перевод с частотой измерения 100 значений в секунду;  $I_{p,i}$  – значения рабочего тока перевода;

– средний разброс значений  $I_p(d_2)$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}(I_{p,i} - I_{p,cp})^2}; \quad (2)$$

– среднее приведенное колебание ( $d_3$ ):

$$K_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta I_{pi}}{m}, \quad (3)$$

где  $m$  – число колебаний значений рабочего тока;  $\Delta I_{pi}$  – разность между двумя соседними минимальным и максимальным значениями рабочего тока.

Допустимые диапазоны изменения критериев  $\Delta d_1\{C_{7,8}\}$ ,  $\Delta d_2\{C_{7,8}\}$ ,  $\Delta d_3\{C_{7,8}\}$  для рассмотренных ТС и неисправностей  $C_i$  образуют диагностические области  $O_1 \dots O_6$  в трехмерной системе координат. Далее для каждого графика тока перевода рассчитываются ДКП (координаты  ${}^0d_1, {}^0d_2, {}^0d_3$  в трехмерной системе координат). Полученная точка наносится на диагностическое пространство и рассчитывается кратчайшее расстояние  $r$  до выделенных диагностических областей. Принадлежность этой точки к одной из областей ( $C({}^0d_1, {}^0d_2, {}^0d_3) \in O_i$ ) позволяет определить соответствующее ТС СПУ.

Недостатками метода многокритериальной оценки ДП являются:

- отсутствие формализованных процедур выбора ДКДП;
- необходимость настройки и верификации алгоритма анализа ДП при изменении количества ДКДП;
- отсутствие четких границ диагностических областей;
- корректировка метода определения расстояний до диагностических областей в зависимости от количества ДКП.

В разработанной ДМ СПУ по току перевода на основе нейросетевого метода [6] количество нейронов во входном слое  $n = 310$  и определяется множеством значений тока за один перевод стрелки, а в выходном слое –  $m = 6$  по количеству выявляемых ТС.

Для повышения скорости обучения нейронной сети все значения множества измеренных значений тока нормализованы, т. е. приведены к диапазону  $[0; 1]$  по следующей формуле:

$$z = \frac{(I - I_{\min})(l_2 - l_1)}{I_{\max} - I_{\min}} + l_1, \quad (4)$$

где  $I$  – значения тока перевода, которые необходимо нормализовать;  $[I_{\min}, I_{\max}]$  – диапазон изменения значений тока перевода  $I [0; 10]$ ;  $[l_1, l_2]$  – интервал, к которому будет приведено значение тока перевода  $I [0; 1]$ .

Определение необходимого количества синаптических весовых коэффициентов  $L_w$  выполняется по выражению [8]:

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_w \leq m \left( \frac{N}{m} + 1 \right) (n + m + 1) + m, \quad (5)$$

где  $n$  – количество значений тока перевода;  $N = 600$  – количество обучающих графиков тока перевода (размерность обучающей выборки).

После определения  $L_w$  ( $L_w = 5688$ ) рассчитывается число нейронов в скрытых слоях:

$$L = \frac{L_w}{n + m} = 18. \quad (6)$$

Для выбора наилучшей конфигурации были исследованы сети с различным количеством нейронов в скрытых слоях. Экспериментальным путем выбрана сеть с двумя скрытыми слоями: количество нейронов в первом  $L_1 = 10$ , а во втором  $L_2 = 8$ . При такой архитектуре сеть обучалась наилучшим образом.

Состояние нейронов промежуточного и выходного слоев определяется как сумма состояний его входов:  $S_i = \sum_{i=1}^n I_i w_i$ , где  $I_i$  – входной сигнал,  $w_i$  – вес синапса. Сумматор выполняет сложение сигналов, поступающих по синаптическим связям от других нейронов, и внешних входных сигналов. Нелинейный преобразователь реализует нелинейную функцию одного аргумента – выхода сумматора (функцию активации).

Для обучения многослойной сети использовался метод *RProp* [9], который позволил ускорить процесс обучения нейронной сети за счет учета только знаков частных производных функции активации.

Недостатками нейросетевого метода являются:

- необходимость выполнения трудоемких и не полностью формализованных процедур обучения нейросети;
- сложность выбора архитектуры сети и метода обучения;
- необходимость нормализации входных данных;
- закрытость выбора ДКДП.

Расчеты, выполненные по алгоритмам ДМ многокритериальной оценки ДП и по алгоритмам нейросетевой ДМ, показали, что ошибочно распознаются 3,6% и 3,8% графиков тока  $I_p$  соответственно.

ДМ многокритериальной оценки ДП целесообразно использовать при отсутствии нормализованных входных данных, а нейросетевой метод – при наличии уже нормализованных данных и для исключения необходимости выделения диагностических областей.

Таким образом, и нейросетевая ДМ и ДМ многокритериальной оценки ДП имеют ограниченные области применения и не полностью отвечают сформулированным выше требованиям. Для более полного удовлетворения предъявленных требований и повышения достоверности диагностирования будет целесообразен основанный на комплексном использовании обеих ДМ комбинированный метод [8].

### 3 Комбинированный метод

Для исключения процедуры нормализации входных данных при нейросетевом методе, вызванной особенностями измерений в СТДМ, выделения диагностических областей и определения кратчайшего расстояния до них при многокритериальной оценке ДП, была использована комбинация двух методов. Комбинированный метод позволил сохранить все преимущества нейросетевого метода, детально учитывая характер задачи. В таком случае входными данными для нейросетевого метода являются ДКДП, значения которых вычисляются методом многокритериальной оценки диагностического параметра.

Рассмотрим синтез ДМ на основе комбинированного метода. Технические состояния СПУ, выявляемые при анализе графиков тока перевода:  $DN_1$  – исправный перевод стрелки,  $DN_2$  – короткое замыкание якоря двигателя,  $DN_3$  – искрение щеток в двигателе,  $DN_4$  – грязный коллектор в двигателе,  $DN_5$  – разрегулировка стрелочного перевода,  $DN_6$  – грязные башмаки. По методу многокритериальной оценки параметра рассчитываются значения ДКДП  $d_j\{P_i(C_i)\}$  для каждого графика тока перевода  $P_i(C_i)$  в количестве 1000 примеров на каждую  $DN_k$  (данные можно получить из архива комплекса задач «Мониторинг»). Далее вместо построения диагностических областей полученные значения ДКДП  $d_j\{P_i(C_i)\}$  подаются на вход нейронной сети.

Размерность входного массива определяется количеством ДКДП, следовательно, число нейронов во входном слое  $n = 3$ . На выходе нейросетевой модели получаем результат диагностирования СПУ: дается заключение об исправности устройства или указывается список неисправностей, поэтому число нейронов в выходном слое  $m = 6$  (рис. 2). Для классификации графиков тока перевода использовалась однослойная нейронная сеть. Число нейронов в промежуточном слое выбрано экспериментальным путем и составило 10. При такой архитектуре нейронная сеть обучается наилучшим образом. Обучение однослойной сети также производилось методом *RProp*. Для определения количества синаптических весов  $L_w$  использовалась формула (5) – их количество составляет 90, тогда количество нейронов в промежуточном слое:

$$L = \frac{L_w}{n + m} = 10, \quad (7)$$

где  $n = 3$ ,  $m = 6$ .

В выходном слое  $D_1 - D_6$  – результат диагностирования соответствующих неисправностей  $DN_1 - DN_6$ . Закодированы состояния  $D_1 - D_6$  следующим образом:

$\{1, 0, 0, 0, 0, 0\}$  – исправный перевод одиночной стрелки;

$\{0, 1, 0, 0, 0, 0\}$  – короткое замыкание якоря двигателя;

$\{0, 0, 1, 0, 0, 0\}$  – искрение щеток в двигателе;

$\{0, 0, 0, 1, 0, 0\}$  – грязный коллектор в двигателе;

$\{0, 0, 0, 0, 1, 0\}$  – разрегулировка стрелочного перевода;

$\{0, 0, 0, 0, 0, 1\}$  – грязные башмаки.

Функция активации нейронов выходного слоя логистическая:

$$f(a) = \frac{1}{1 + e^{-a}}, \quad (8)$$

где  $a$  – средневзвешенная сумма, которая вычисляется при определении выходного значения нейрона.

После успешного обучения нейронной сети проводилась проверка правильности ее функционирования на тестовых примерах, отличных от обучающей выборки. Проверка показала возможность применения данной нейронной сети для целей технического диагностирования СПУ.

#### 4 Алгоритм комбинированного метода

На основе комбинированного метода разработан алгоритм диагностирования СПУ (рис. 3).

Назначение операторов алгоритма таково.

1–13 – метод многокритериальной оценки:

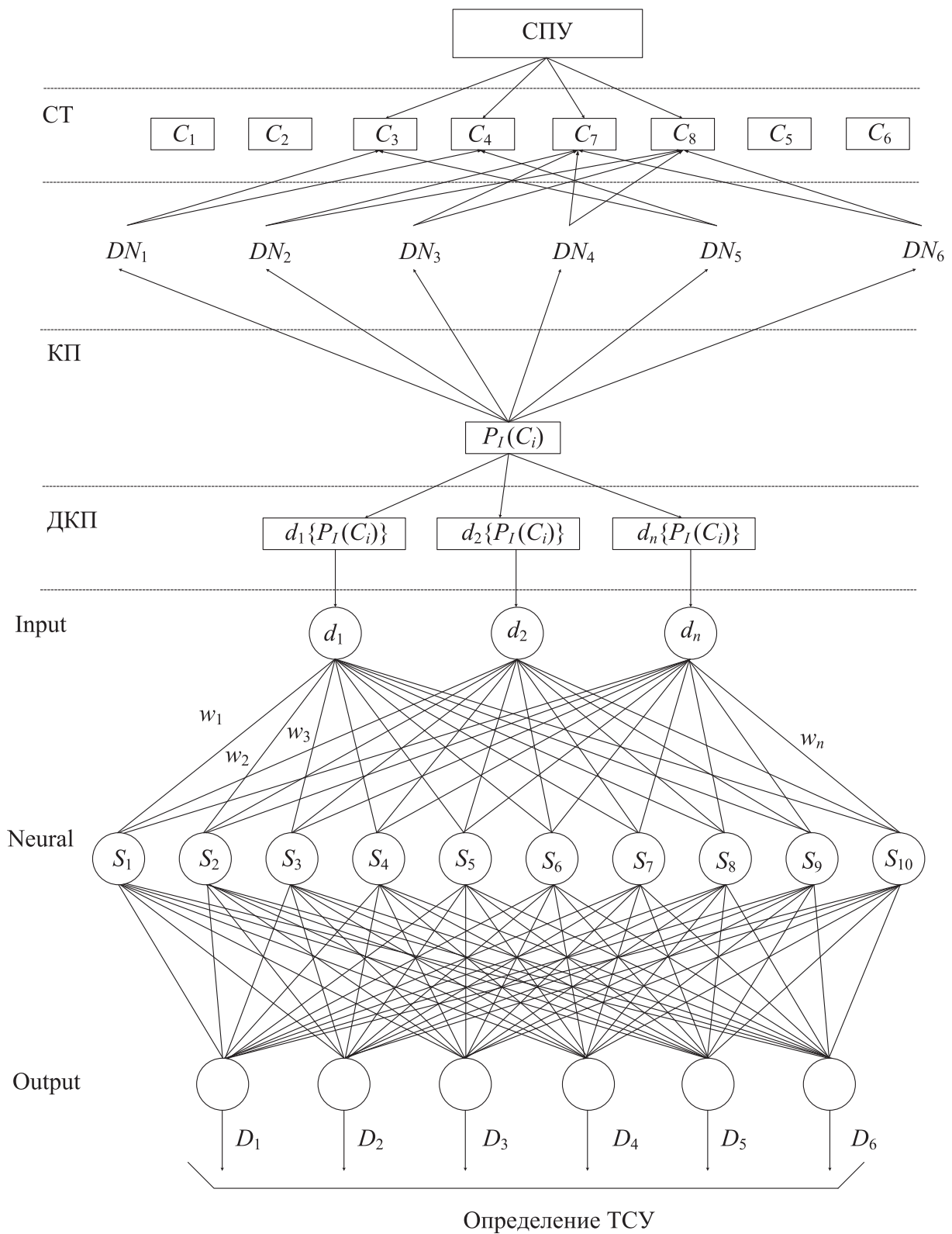


Рис. 2. Логическая схема комбинированного метода диагностирования СПУ



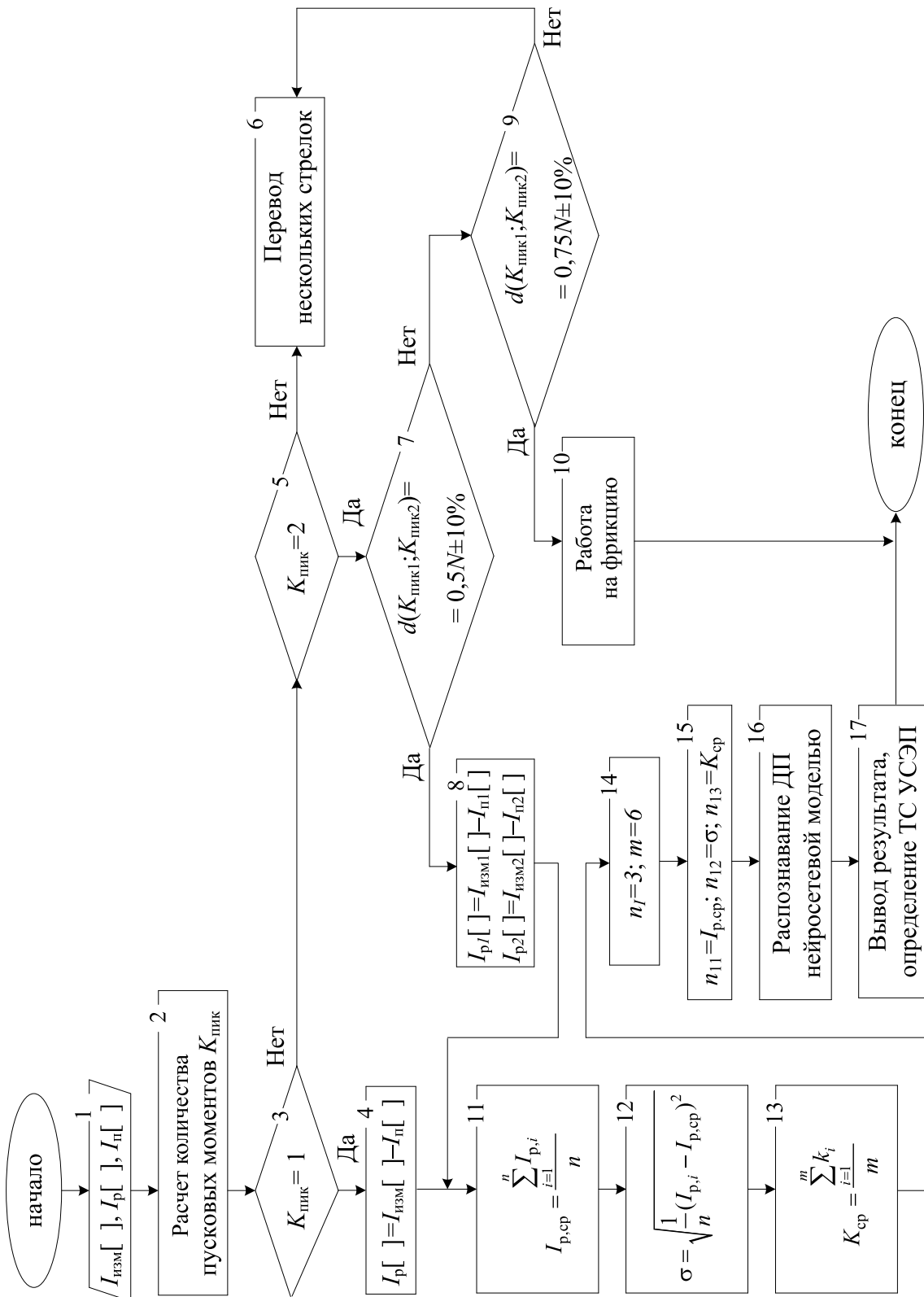


Рис. 3. Алгоритм комплексного метода диагностирования СПУ

1 –  $I [M]$  – входной массив измеренных значений тока перевода, по которым строится график,  $I_p [ ]$  – массив для заполнения измеренными значениями рабочего тока перевода стрелки,  $I_n [ ]$  – массив для заполнения измеренных значений тока перевода стрелки в пусковой момент ЭД;

4 – выделение рабочего тока при одиночном переводе стрелки;

5, 7, 9 – определение работы стрелки на фрикцию, перевод спаренных стрелок либо перевод нескольких стрелок;

8 – выделение рабочего тока при спаренном переводе стрелки;

11, 12, 13 – расчет диагностических признаков: среднее значение рабочего тока, отклонение от среднего и среднее приведенное колебание;

14–17 – нейросетевой метод:

14 – определение количества нейронов  $n$  во входном слое сети (по количеству диагностических признаков) и  $m$  в выходном слое (по количеству распознаваемых ТС);

15 – передача значений ДКДП на вход нейронной сети;

16 – распознавание ДКДП заранее обученной нейронной сетью;

17 – определение ТСУ СПУ.

Разработанный нами алгоритм комбинированного метода позволил сократить процент ошибочного распознавания до 3,1 %.

## Заключение

В данной работе на основе ДП, ДПДП, ДКДП, диагностических областей:

– сформулированы требования к методам диагностирования СПУ;

– выполнен синтез диагностической модели СПУ на основе метода многокритериальной оценки ДП;

– выполнен синтез нейросетевой диагностической модели СПУ;

– определены достоинства и недостатки нейросетевой и многокритериальной ДМ;

– показана целесообразность комбинированного метода.

Перспективы использования метода:

– разработка ДМ на основе множества ДП, каждый из которых имеет свое подмножество ДКДП;

– разработка приложений предложенных методов и ДМ для других устройств ЖАТ и, в первую очередь, для рельсовых цепей.

## Библиографический список

1. Молодцов В. П. Системы диспетчерского контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие / В. П. Молодцов,

- А. А. Иванов. – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 140 с.
2. Ефанов Д. В. Метод кодирования состояний диагностируемых объектов / Д. В. Ефанов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 2. – С. 74–85.
  3. Ефанов Д. В. Функциональное диагностирование стрелочных электроприводов переменного тока / Д. В. Ефанов, Е. В. Басалаев, В. Г. Алексеев // Транспорт Урала. – 2012. – № 4. – С. 26–29.
  4. Волков А. А. Выявление предотказов стрелочных электроприводов / А. А. Волков, Д. С. Першин, С. Н. Григорьев // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 4. – С. 16–18.
  5. Бочкарев С. В. Метод определения технического состояния устройств железнодорожной автоматики / С. В. Бочкарев, А. А. Лыков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – № 4. – С. 45–50.
  6. Зуев Д. В. Анализ диагностической информации / Д. В. Зуев, С. В. Бочкарев, В. В. Дмитриев // Автоматика, связь и информатика. – 2013. – № 9. – С. 16–18.
  7. Бочкарев С. В. Автоматизация выявления отказов в схемах управления стрелочными электроприводами. Интеллектуальные технологии на транспорте : сб. материалов I Международной научно-практической конференции «Интеллект Транс-2011» / С. В. Бочкарев, А. А. Лыков. – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2011. – С. 46–48.
  8. Zuev D., Bochkarev S. Solution of the problem of noninvariance of using connectionist method for image recognition. Materials of the II international research and practice conference, vol. I, Munich, Germany, December 18–19, 2012, pp. 257–259.
  9. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс / С. Хайкин. – Москва : Вильямс, 2006. – 1104 с.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В. В. Сапожниковым  
Поступила в редакцию 29.10.2014  
Контактная информация: bastdrew@mail.ru*

© Бочкарев С. В., Лыков А. А., Марков Д. С., 2015