

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»  
«Академия электротехнических наук Чувашской Республики»

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ЭНЕРГЕТИКИ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ  
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

**Материалы  
III Международной научно-технической  
конференции**

Чебоксары  
2019

УДК 621.3(06)  
ББК 31я43  
П78

*Редакционная коллегия:*

**В.Г. Ковалев**, канд. техн. наук, профессор (гл. редактор);  
**Г.С. Нудельман**, канд. техн. наук, профессор;  
**В.А. Щедрин**, канд. техн. наук, профессор (зам. гл. редактора);  
**В.В. Афанасьев**, д-р техн. наук, профессор;  
**Ю.М. Миронов**, д-р техн. наук, профессор;  
**Г.П. Свинцов**, д-р техн. наук, профессор;  
**А.А. Ильин**, канд. техн. наук, доцент;  
**О.А. Онисова**, канд. техн. наук, доцент

*Печатается по решению Научно-технического совета  
Чувашского государственного университета*

**П78 Проблемы** и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – 618 с.

ISBN 978-5-7677-2998-2

Представлены статьи и доклады третьей Международной научно-технической конференции, проведенной совместно с «Академией электротехнических наук Чувашской Республики», в которых приводятся и обсуждаются результаты актуальных научных исследований в области энергетики, электротехники и энергоэффективности, а также рассматриваются вопросы подготовки инженерных кадров.

Для преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов старших курсов энергетических специальностей вузов, инженерно-технического персонала предприятий и энергосистем.

ISBN 978-5-7677-2998-2

УДК 621.3(06)  
ББК 31я43

© Издательство  
Чувашского университета, 2019

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

Степанова Д.А., Наумов В.А., Антонов В.И., ЧГУ  
им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Излагаются фундаментальные основы глубокого обучения релейной защиты, основанной на разделении множеств прецедентов различных режимов электрической сети на классы отслеживаемых и альтернативных режимов. Демонстрируется применение различных классификаторов для решения задачи разграничения режимов электрической сети.*

***Ключевые слова:** классификация режимов электрической сети, обучение релейной защиты, глубокое обучение.*

### **Введение**

В традиционных методах релейной защиты характеристики срабатывания, разграничивающие отслеживаемые и альтернативные режимы, формируются по результатам либо расчетов, либо имитационного моделирования нормальных и аварийных режимов защищаемой электрической сети. Например, в реле сопротивления отслеживаемые и альтернативные режимы отображаются на плоскости контролируемых реле параметров в виде точек, характеризующихся координатами  $(R_j, X_j)$ . Необходимые для определения координат измеряемых реле параметры получают, например, с помощью методов адаптивного структурного анализа сигналов [1, 2].

В дальнейшем будем снабжать измерения релейной защиты класса отслеживаемых режимов признаком  $y_j = 1$ , а класса альтернативных –  $y_j = -1$ . Объект  $\mathbf{x}_j$ , обладающий соответствующим признаком  $y_j$ , будем называть прецедентом. Другими словами, обучение реле ведется на множестве прецедентов  $(\mathbf{X}; \mathbf{y})$  обучающей выборки:

$$\begin{aligned}(\mathbf{X}; \mathbf{y}) &= \{(\mathbf{x}_1; y_1), \dots, (\mathbf{x}_j; y_j), \dots, (\mathbf{x}_n; y_n)\} = \\ &= \{(R_1, X_1; y_1), \dots, (R_j, X_j; y_j), \dots, (R_n, X_n; y_n)\},\end{aligned}$$

где  $\mathbf{y}$  – вектор признаков объектов множества  $\mathbf{X}$ ,  $y_j \in \{-1, 1\}$ .

В классической теории селективность релейной защиты обеспечивается надлежащим выбором характеристик срабатывания, что может рассматриваться как процесс ее обучения. Целью обучения защиты является придание ей способности к классификации режимов электрической сети, заключающейся в разграничении отслеживаемых и альтернативных режимов. С этой точки зрения использование современных методов глубокого обучения для задач классификации режимов защищаемой электрической сети и обучения релейной защиты выглядит вполне обоснованным [3, 4].

Задачу обеспечения селективности защиты можно рассматривать как определение в темпе процесса принадлежности поступающих данных режима электрической сети к определенному классу в пространстве контролируемых параметров.

В задаче построения характеристик срабатывания традиционной релейной защиты усматриваются элементы теории искусственного интеллекта, если рассматривать характеристики срабатывания как инструмент при разграничении отслеживаемых и альтернативных режимов. Например, в случае реле сопротивления характеристика срабатывания в виде многоугольника (рис. 1) формируется с помощью ограничений-неравенств:

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{w}_i, \mathbf{x}_j \rangle + w_{0i} &\geq 0, \quad (i = \overline{1,3}), \\ \langle \mathbf{w}_i, \mathbf{x}_j \rangle + w_{0i} &\leq 0, \quad (i = 4). \end{aligned} \tag{1}$$

### ***Глубокое обучение релейной защиты***

Задача нахождения необходимой границы области срабатывания реле (рис. 1) может быть решена также на основе применения методов машинного обучения.

В терминах машинного обучения задачу формирования областей срабатывания, например, реле сопротивления можно рассматривать как определение принадлежности измерений реле к тем или иным классам в пространстве контролируемых параметров. Особенности глубокого обучения интеллектуального реле рассмотрим на примере линейного классификатора:

$$a(\mathbf{x}) = \text{sign}[f(\mathbf{x}, \mathbf{w})],$$

возвращающего признак принадлежности нового объекта  $x_j$  к определенному классу. Здесь  $f(x, w)$  – дискриминантная функция,  $w$  – вектор весов классификатора. Знак дискриминантной функции придает объекту  $x_j$  признак  $y_j$  принадлежности к определенному классу, обращая его в прецедент по следующим правилам:

$$f(x_j, w) > 0, \text{ то } y_j = 1;$$

$$f(x_j, w) < 0, \text{ то } y_j = -1,$$

или в универсальной форме:

$$y_j f(x_j, w) > 0.$$

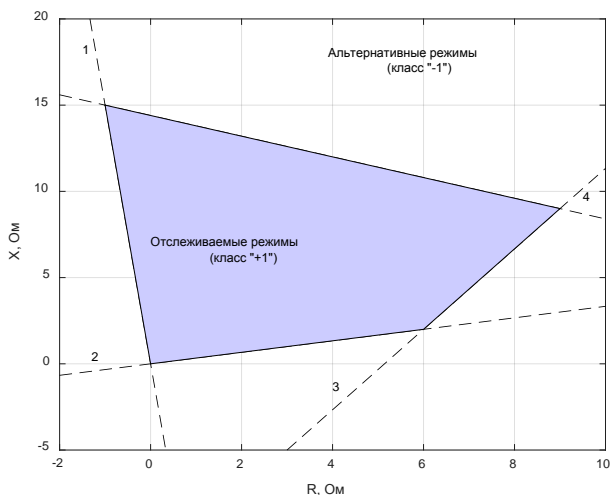


Рис. 1. Отображение отслеживаемых и альтернативных режимов электрической сети на характеристике реле сопротивления. Номера прямых соответствуют номерам уравнений в системе неравенств (1)

Необходимые свойства классификатору придает его предварительное обучение на выборке прецедентов  $(X; y)$ . Целью обучения является нахождение среди всех возможных разделяющих прямых

$$f(x, w) = \langle w, x \rangle + w_0 = 0$$

такой, которая расположена на максимально возможном расстоянии от ближайших прецедентов  $(\mathbf{x}_s; y_s)$  обоих классов, называемых опорными векторами. Здесь  $\langle \cdot \rangle$  – оператор скалярного произведения,  $w_0$  – скаляр, характеризующий смещение разделяющей прямой.

Особенность глубокого обучения защиты на основе линейного классификатора иллюстрируется рис. 2. Принципиальное несовершенство классификатора заключается в неспособности к линейному разделению распределенных множеств прецедентов, что потребует специфического участия учителя. Оно заключается в том, что разграничение прецедентов множеств альтернативных режимов, распределенных вокруг прецедентов отслеживаемых режимов, возможно только в результате последовательного обучения классификатора (а–г) непосредственно под управлением учителя.

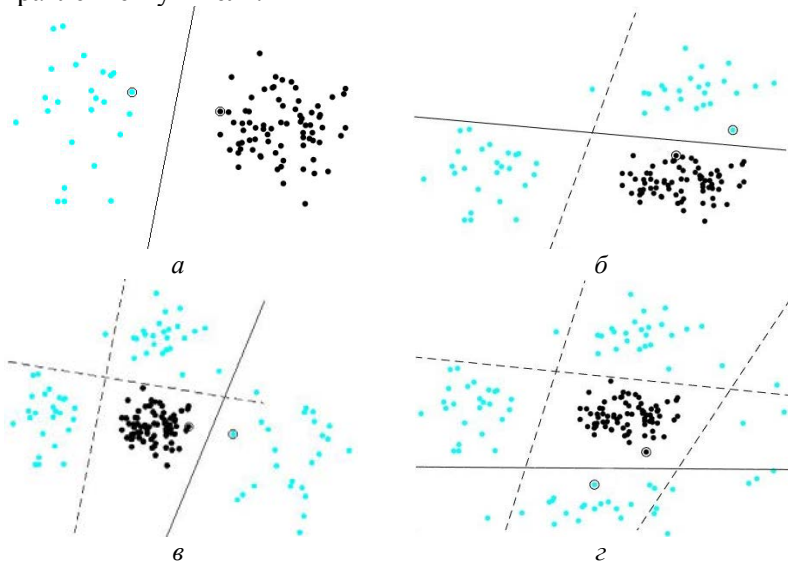


Рис. 2. Особенности обучения интеллектуального реле сопротивления на основе линейного классификатора (темные точки – прецеденты отслеживаемых режимов (класс «+1»), светлые точки – альтернативные режимы (класс «-1»), кружочки – опорные векторы, сплошная линия – разделяющая линия текущего этапа, штриховые линии – аналогичные линии прошлых этапов)

В результате обучения интеллектуальное реле приобретает характеристику срабатывания, приведенную на рис. 3, *a*.

При классификации большинства реальных данных линейная разделимость невозможна. Выход из этого положения находят в использовании алгоритма глубокого обучения с ядрами. Интеллектуальная релейная защита в этом случае приобретает способность к разграничению сложных несвязанных областей. Так, характеристика срабатывания в виде многоугольника (рис. 3, *a*) для интеллектуального реле на основе линейных классификаторов будет с присущим ему изяществом сформирована нелинейным классификатором (рис. 3, *б*).

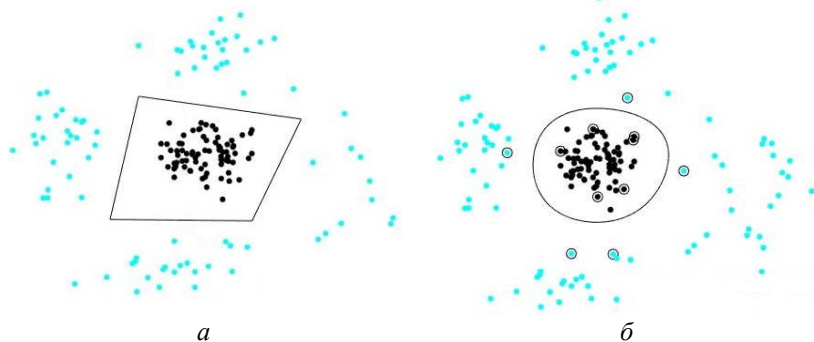


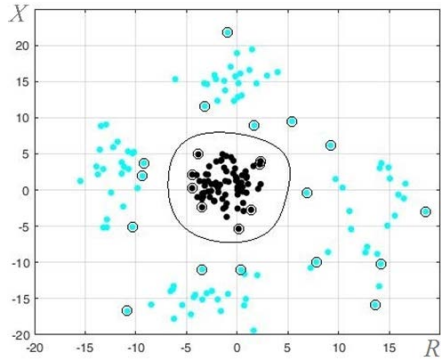
Рис. 3. Характеристики интеллектуальных реле сопротивления, использующих линейные (*a*) и нелинейные (*б*) классификаторы. Обозначения соответствуют обозначениям рис. 2

Главной особенностью нелинейного классификатора

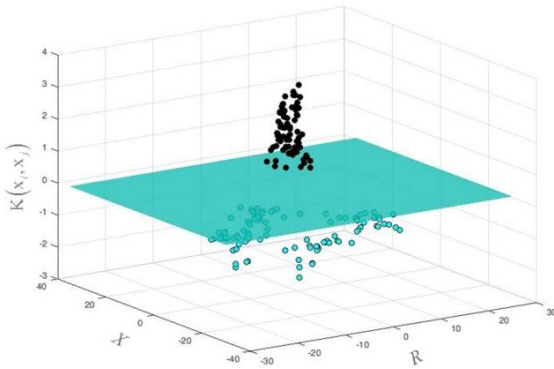
$$f(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \langle \mathbf{w}, \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) \rangle + w_0 = 0$$

является применение специальных ядер. В результате прецеденты из исходного пространства отображаются в пространство более высокой размерности, где множество становится линейно разделимым (рис. 4) [5].

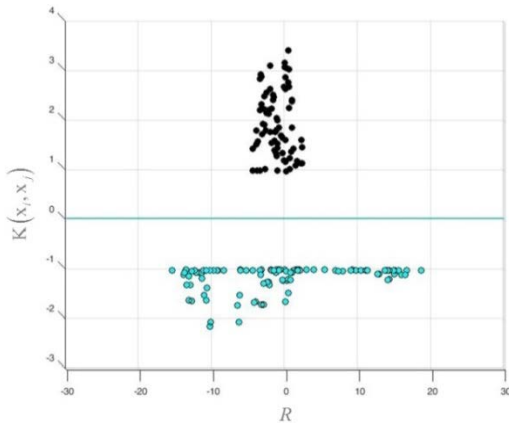
Прецеденты из исходного пространства (*a*) отображаются с помощью ядер в новом спрямляющем пространстве (*б*), в котором впоследствии становятся линейно разделимым (*в*). Рис. 4, *a* демонстрирует проекцию спрямляющего пространства на плоскость ( $R, X$ ). Обозначения даны на рис. 2.



*a*



*б*



*в*

Рис. 4. Спрямяющее пространство, найденное нелинейным классификатором



Важно, что в случае применения нелинейного классификатора исключается необходимость знания самой функции  $\varphi(\mathbf{x})$ , формирующей ядро, поскольку дискриминантная функция полностью определяется непосредственно через ядро. Таким образом, использование в ходе работы реле нелинейного классификатора упрощает реализацию метода искусственного интеллекта в терминалах релейной защиты.

### **Выводы**

1. Интеллектуальная релейная защита на стадии разработки своего алгоритмического обеспечения использует для глубокого обучения имитационное моделирование и в ходе своей эксплуатации требует сопровождения учителем, придающим объектам измерения признаки прецедента.

2. Глубокое обучение релейной защиты требует применения нейронных сетей, способных решать задачу разграничения несвязанных областей контролируемых релейной защитой отслеживаемых и альтернативных режимов электрической сети даже в случае нахождения в них анклавов противоположных режимов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория для инженера / В.И. Антонов, В.А. Наумов, М.Н. Кудряшова, Д.А. Степанова. // Журнал «Релейная защита и автоматизация». – 21 июня 2019 г. – № 2 (35). – С. 18-27.

2. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике: монография / В.И. Антонов. Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. – Чебоксары, 2018. – 334 с.

3. Степанова, Д.А. Задачи классификации и глубокого обучения в релейной защите цифровой электроэнергетики / Д.А. Степанова, В.А. Наумов, В.И. Антонов. // РЕЛАВЭКСПО-2019: Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России: сб. докл. научно-техн. конф. молодых специалистов. – Чебоксары. – 23-26 апр. 2019. – С. 116-122.

4. Степанова, Д.А. К теории глубокого обучения релейной защиты / Д.А. Степанова, В.А. Наумов, В.И. Антонов. // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: мате-

риалы 13-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 319-327.

5. *Вьюгин, В.В.* Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования / В.В. Вьюгин. – М.: МЦНМО, 2013. – 387 с.

**Авторы:**

**Степанова Дарья Александровна**, техник группы разработки интеллектуальных электрических устройств сектора научного сопровождения продукции департамента отдела автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», бакалавр факультета энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова по профилю «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: [stepanova\\_da@ekra.ru](mailto:stepanova_da@ekra.ru).

**Наутов Владимир Александрович**, кандидат технических наук, заместитель генерального директора - технический директор ООО НПП «ЭКРА». В 2001 г. окончил электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2002 г. защитил магистерскую диссертацию. В 2005 г. защитил во ВНИИЭ кандидатскую диссертацию «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор». E-mail: [nautov\\_vu@ekra.ru](mailto:nautov_vu@ekra.ru).

**Антонов Владислав Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ЧГУ им. И.Н. Ульянова, главный специалист департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». В 1978 г. окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2018 г. защитил в ЧГУ им. И.Н. Ульянова докторскую диссертацию «Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике». E-mail: [antonov\\_vi@ekra.ru](mailto:antonov_vi@ekra.ru).