

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

**ДИНАМИКА
НЕЛИНЕЙНЫХ
ДИСКРЕТНЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

**Материалы
XIV Всероссийской научно-технической
конференции**

ДНДС–2021

Чебоксары
2021

УДК 621.3:004(063)

ББК 381:321Я73

Д44

Редакционная коллегия:

ректор, канд. экон. наук, доцент *А.Ю. Александров*;

д-р техн. наук, профессор *Г.А. Белов*;

канд. техн. наук, доцент *А.В. Серебрянников*

Печатается по решению Ученого совета

Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова

Динамика нелинейных дискретных электротехнических
Д44 и электронных систем: материалы XIV Всерос. науч.-техн.
конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. 536 с.

ISBN 978-5-7677-3286-9

Рассматриваются вопросы математических основ и математического моделирования нелинейных дискретных систем, цифровой обработки сигналов, построения и анализа устройств и систем силовой электроники, систем электроэнергетики и электропривода.

Для научных работников, инженеров, менеджеров и студентов старших курсов.

УДК 621.3:004(063)

ББК 381:321Я73

© Издательство

Чувашского университета, 2021

ISBN 978-5-7677-3286-9

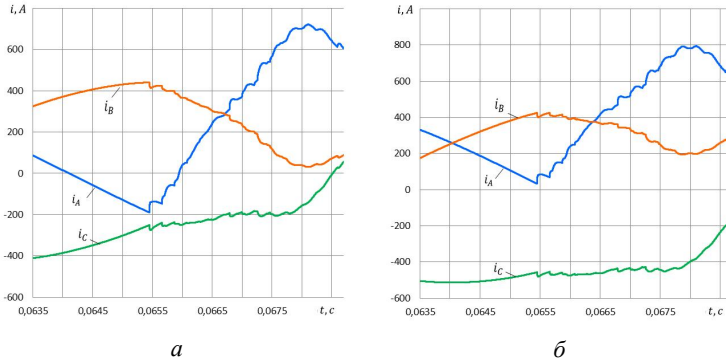


Рис. 3. Фазные токи в месте установки полукомплекта волнового ОМП: измерения на шинах А (а), измерения на шинах В (б)

Предлагаемый способ в рассматриваемом примере имеет низкую погрешность:

$$Dm_f = m_f - \hat{m}_f = 15 \text{ м.}$$

Таким образом, обобщён двухсторонний волновой метод определения места повреждения на кабельно-воздушных ЛЭП. Предложенный метод может использоваться на ЛЭП с любым количеством кабельных вставок.

Литература

1. Limitations of Traveling Wave Fault Location / A. Fedorov [et al.] // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg. 2020. PP. 21–25. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281153.
2. Marx S., Tong Y., Mynam M. V. Traveling-Wave Fault Locating for Multiterminal and Hybrid Transmission Lines // 45th Annual Western Protective Relay Conference Spokane, October 16–18, 2018.

Степанова Д.А., Антонов В.И., Наумов В.А.
(Чебоксары, ООО НПП «ЭКРА»; ЧГУ)

ПРЕОДОЛЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОСТИ ДАННЫХ В УМНЫХ УСТРОЙСТВАХ ЗАЩИТЫ

Режимы, в которых релейная защита должна срабатывать, относят к классу отслеживаемых, а режимы, в которых запреще-

но срабатывать – к классу альтернативных [1]. В интеллектуальных устройствах релейной защиты для распознавания режимов и отнесения их к определенным классам используются классификаторы. Такие устройства релейной защиты обладают развитым интеллектом, создаваемым нейронными сетями глубокого обучения. Они впервые введены в релейную защиту в работе [2], и получили название умных устройств защиты (Smart Protection Device – SPD).

Способность умных устройств защиты к распознаванию режимов электрической сети достигается их обучением [2–6], причем все стадии обучения, включающие в себя формирование обучающей выборки на основе разыгрывания полного множества сценариев имитационного моделирования, выбор опорных прецедентов для глубокого обучения нейронной сети, а также подтверждение эффективности обучения, умное устройство защиты проходит еще на этапе разработки.

Совершенство умных устройств защиты достигается благодаря надлежащей обучающей выборке, ибо недостаточно продуманный подход к ее формированию может привести к взрывному росту размера обучающей выборки нейронной сети, превращая задачу обучения в невыполнимую. Этот вычислительный эффект известен как «проклятие размерности».

Настоящий доклад посвящен изложению стратегии, позволяющей поддерживать необходимый потенциал обучающей выборки, и обеспечить умному устройству защиты требуемый уровень распознаваемости режимов электрической системы.

Постановка задачи. Возможно несколько подходов к исключению избыточности обучающей выборки. Рассмотрим их возможности на примере изменения признакового пространства интеллектуального дискриминатора поврежденных фаз [6], рассчитанного на функционирование в режиме однофазного короткого замыкания на землю.

На рис. 1 показано отображение замеров особой фазы X (признаки отслеживаемых режимов), отстающей $x - 1$ и опережающей $x + 1$ фаз (признаки альтернативных режимов) в признаковом пространстве дискриминатора при имитационном моделировании однофазного короткого замыкания на землю.

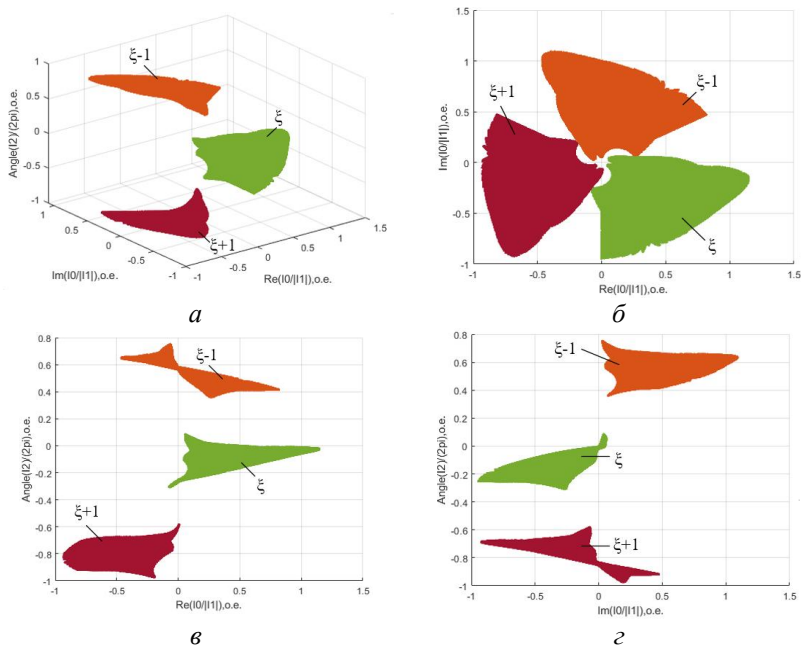


Рис. 1. Отображение замеров дискриминатора при однофазном коротком замыкании в признаковом пространстве (а) и в проекциях (б)–(д) на плоскости. Подпространства замеров дискриминаторов особой, отстающей и опережающей фаз обозначены как X, X - 1 и X+1 соответственно

Целью обучения интеллектуального дискриминатора является придание ему способности распознавать режимы электрической системы, подразумевающей собой отделение отслеживаемых режимов электрической сети от альтернативных [4-6]. Для достижения этой цели необходимо обеспечить приемлемую мощность обучающей выборки. Но это устремление часто приводит к избыточности данных при обучении дискриминатора. Это значительно усложняет обучение, а иногда делает его практически невозможным. Поэтому необходимо уменьшить размер обучающей выборки, исключая прецеденты, лежащие внутри класса и не оказывающие влияния на принятие решения. Необходимо найти оболочку, окаймляющую признаковое пространство дискриминатора.

Управление размером обучающей выборки. Будем рассматривать подходы к формированию рачительной обучающей

выборки на основе подпространства замеров дискриминатора особой фазы X , уже полученных в результате имитационного моделирования (рис. 1). Необходимо найти границы подпространства путем построения оболочки.

Применение **выпуклой формы** [7] (рис. 2) дает наиболее простой алгоритм построения оболочки.

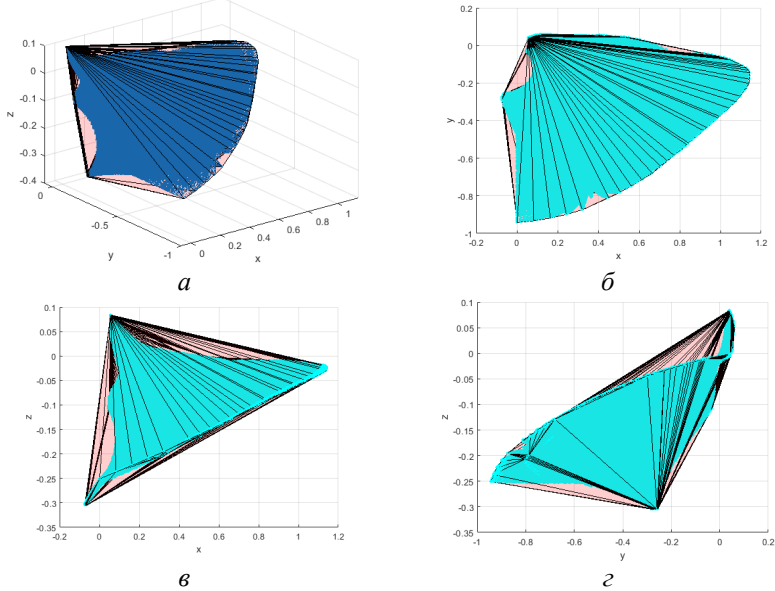


Рис. 2. Оболочка подпространства отслеживаемых режимов, сформированная с помощью выпуклой формы (а), и его проекции (б)–(г) на плоскости

Этот метод формирует выпуклую оболочку с минимальным объёмом, однако даёт переоценку области в пустых местах внутренних изгибов (области, отмеченные светлым фоном) внутри оболочки (рис 2, а), в связи с чем будут получены не все отслеживаемые области. Этот эффект иллюстрирует рис. 3.

Улучшенным вариантом метода является применение **вогнутой формы** [7]. Вогнутая оболочка позволяет учесть внутренние изгибы области прецедентов отслеживаемого режима, в связи с чем улучшается распознавание формы облака (рис. 4). Однако этот метод страдает множественностью решения, определения для одного и того же облака точек нескольких вогнутых

оболочек. Поэтому возможна как переоценка, так и недооценка отслеживаемого режима.

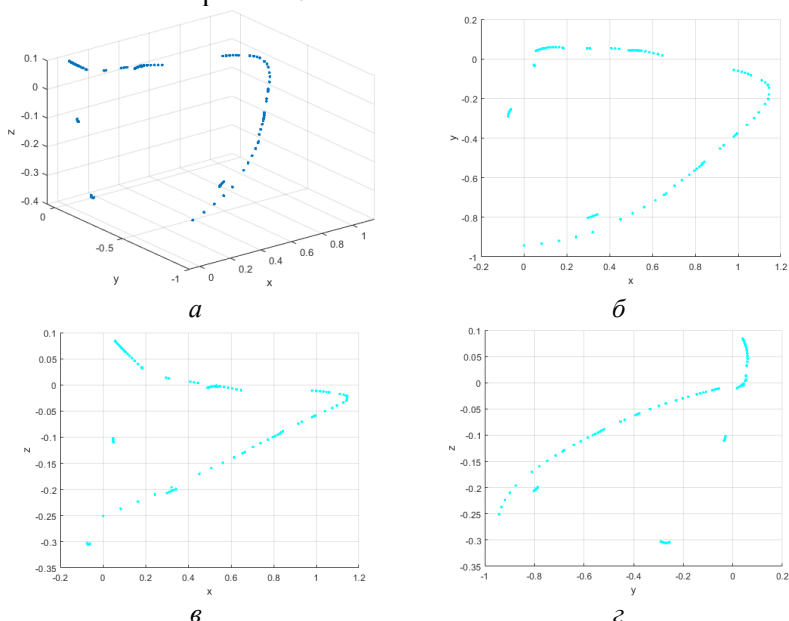


Рис. 3. Граничные точки выпуклой оболочки (а) признакового пространства и их проекции (б)–(г) на плоскости

Более совершенным методом, применяющим для определения наилучшего контура регулирование степени вогнутости, является **альфа-форма** [8-9].

Альфа-форма (рис. 5) фильтрует выпуклую оболочку, полученную с помощью триангуляции Делоне. Конечным результатом триангуляции Делоне является его выпуклая оболочка, содержащая различные треугольники в двумерном представлении облака точек или тетраэдры в трехмерном исполнении. Границы треугольников имеют определенную длину. Идея альфа-форм заключается в удалении некоторых из границ, формирующих пустые области оболочки, обволакивающей облако исходных точек.

Рис. 6 демонстрирует результат применения стратегии формирования обучающей выборки в признаковом пространстве интеллектуального дискриминатора [6] для режима однофазного короткого замыкания на землю.

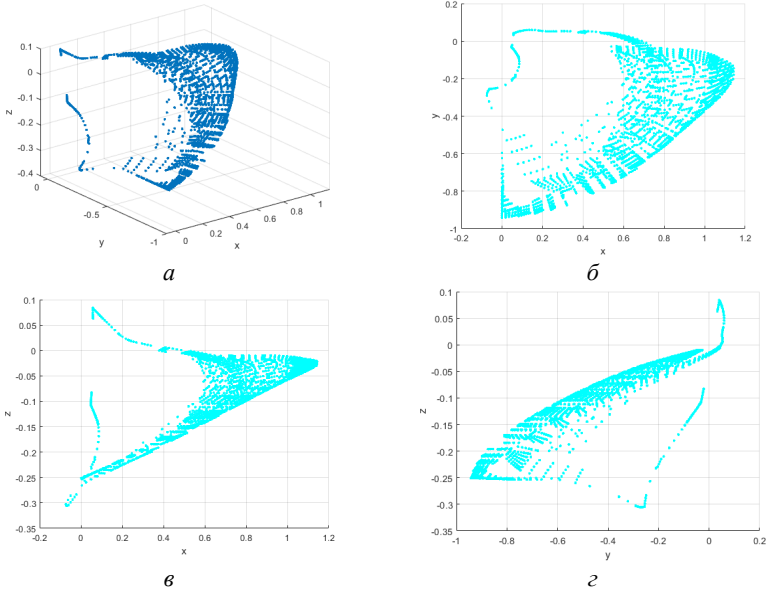


Рис. 4. Граничные точки вогнутой оболочки (*a*) признакового пространства и их проекции (*б*)–(*г*) на плоскости

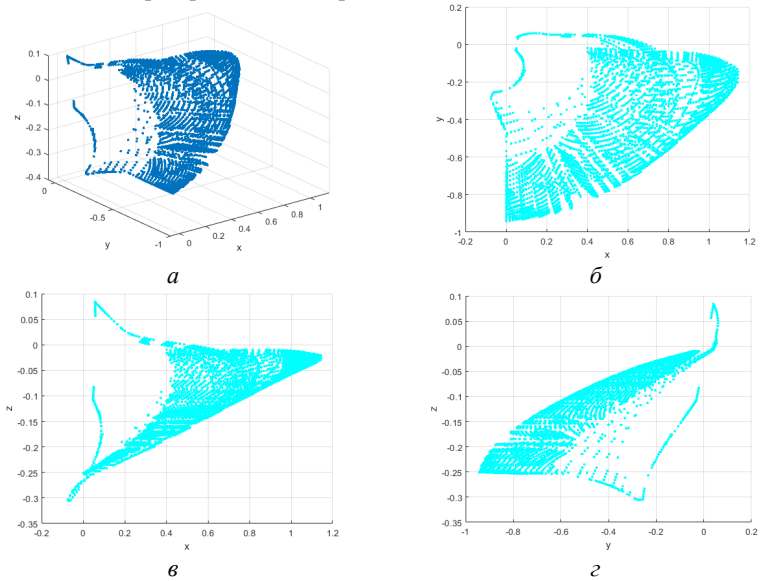


Рис. 5. Граничные точки альфа-формы (*a*) признакового пространства и их проекции (*б*)–(*г*) на плоскости

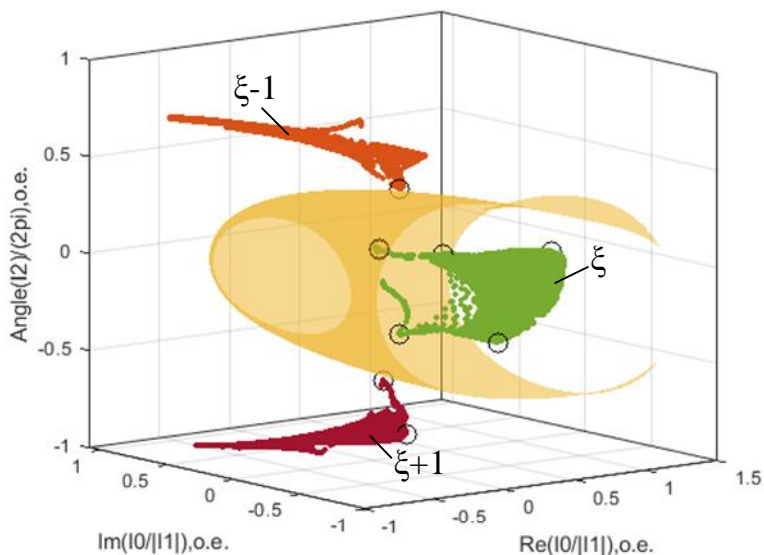


Рис. 6. Настройка признакового пространства интеллектуального дискриминатора в режиме однофазного короткого замыкания на землю. Обозначения соответствуют обозначениям рис. 1; на рисунке кружочками обозначены опорные прецеденты, участвующие в построении оптимальной разделяющей поверхности

Сравнение рис. 4–6 показывает, что оболочка альфа-формы имеет более гибкий контур, учитывающий весь объем облака исходных точек.

Применяемый подход к формированию обучающей выборки позволяет обеспечить информационную достаточность пространства прецедентов для обучения умного устройства защиты.

Выводы

1. Правильно выбранная размерность пространства прецедентов и достаточная мощность обучающей выборки гарантирует однозначность решения задачи классификации режимов электрической системы, приближая интеллект умного устройства защиты нового поколения к его предельным границам.

2. Выявление граничных прецедентов обучающей выборки с помощью методов определения оболочек прецедентов в признаковом пространстве позволяет разрешить проблему «проклятия

размерности». Наилучшую аппроксимацию оболочки прецедентов отслеживаемых режимов, состоящей из граничных прецедентов, дает метод альфа-форм.

Литература

1. *Лямец Ю. Я., Кержаев Д. В.* Иерархия режимов электроэнергетических систем в методологии обучения релейной защиты // Вестник Чувашского университета. 2007. № 2. С. 134–147.

2. *Fundamental Principles of Smart Protection Device / V. Antonov [et al.]* // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC) PP. 130–133. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281227

3. *Stepanova D. A., Naumov V. A., Antonov V. I.* Deep Learning in Relay Protection of Digital Power Industry // 2019 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA) PP. 299–315. DOI: 10.1109/гpa47751.2019.8958378.

4. *Степанова Д. А., Наумов В. А., Антонов В. И.* Задачи классификации и глубокого обучения в релейной защите цифровой электроэнергетики // РЕЛАВЭКСПО-2019: сб. докладов науч.-техн. конф. молодых специалистов (Чебоксары, 23–26 апреля 2019 г.). Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 116–122.

5. *Степанова Д. А., Наумов В. А., Антонов В. И.* Фундаментальные основы глубокого обучения в релейной защите // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. (Чебоксары, 14–16 ноября 2019 г.). Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 594–601.

6. *Степанова Д. А., Антонов В. И., Наумов В. А.* Основы интеллектуального дискриминатора режимов земляных коротких замыканий в электрической системе // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2021». Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. С. 134–141.

7. *Коршунов Ю. М.* Математические основы кибернетики: учеб. пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987. 496 с.

8. *Edelsbrunner H., Kirkpatrick D. G., Seidel R.* On the shape of a set of points in the plane // *IEEE Transactions on Information Theory*. 1983. Vol. IT-29. No. 4. PP. 551–559.

9. *Al-Mestarehi B., Obaidat M.* Creating a Complete Model of the Wooden Pattern from Laser Scanner Point Clouds Using Alpha Shapes // *Jordan Journal of Civil Engineering*. 2019. Vol. 13. No. 2. PP. 269–279.

Наумов В.А., Солдатов А.В., Иванов Н.Г.,
Александрова М.И., Степанова Д.А.
(Чебоксары, ООО НПП «ЭКРА»; ЧГУ)

ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА В ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Дифференциальная защита трансформатора (ДЗТ) является основной быстродействующей защитой силового трансформатора от всех видов коротких замыканий (КЗ). Для правильной работы ДЗТ при внешних и внутренних КЗ уставки защиты отстраиваются от небалансов в установившихся режимах КЗ. Однако опыт эксплуатации показал, что такой принцип настройки ДЗТ не гарантирует селективности и чувствительности защиты в переходных режимах с насыщением трансформаторов тока (ТТ). После нескольких случаев развития аварий, вызванных потерей селективности релейной защиты (РЗ) из-за насыщения ТТ в переходном режиме, был выпущен приказ Минэнерго России № 101 от 13 февраля 2019 г. [1] о необходимости проверки правильности работы РЗ при насыщении ТТ в переходных режимах. Согласно приказу технические характеристики устройств РЗ и автоматики должны содержать сведения о минимально необходимом сроке достоверного измерения значения тока – времени до насыщения, при котором обеспечивается надежная и селективная работа защиты.

В настоящей работе исследуется влияние насыщения ТТ на функционирование ДЗТ при внешних и внутренних КЗ.