## ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ

АВТОРЫ:

Ю.Я. ЛЮБАРСКИЙ Д.Т.Н.. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР «РОССЕТИ ФСК ЕЭС»

н.м. александров. НПП «ДИНАМИКА»

управления электрическими сетями все более и более используют программное обеспечение, основанное

на экспертных системах и искусственных нейронных сетях. Возникает вопрос о сочетаемости (и/или противоречии) этих двух различных методов.

**Ключевые слова:** управление электрическими сетями; искусственный интеллект; экспертные системы; нейросети.



управления электрическими

#### ВВЕДЕНИЕ

Современные системы управления электрическими сетями должны содержать интеллектуальную составляющую — комплексы программ, использующие методы искусственного интеллекта (ИИ). Это требование отражает уже укоренившийся термин «интеллектуальные сети». Однако существуют различные направления ИИ, и выбор разработчиком неподходящего направления может привести к лишним трудозатратам и/или к неудаче. Поэтому необходимо проанализировать существующие ИИ-направления, их достоинства и недостатки.

#### НЕЙРОСЕТИ и экспертные СИСТЕМЫ

**Экспертная система** — это компьютерная система, включающая в себя знания об определенной слабо структурированной и трудно формализуемой узкой предметной области, которая способна предлагать и объяснять пользователю разумные решения. Она состоит из базы знаний, механизма логического вывода и подсистемы объяснений и может иметь множество структурных составляющих меньшего размера [1].

Такая система включает в себя:

- базу данных;
- базу знаний о предметной об-
- модуль логического вывода;
- модули интерфейса с пользователями [2, 3].

Из исходных данных экспертная система логически выводит либо новые знания, либо рекомендации для пользователей. Логический вывод в современных развитых экспертных системах выполняется

специальными модулями — программами-рассуждениями. Существует ряд успешных применений таких систем для задач управления в электросетях.

Достоинства экспертной системы очевидны: универсальность, дружественный интерфейс с пользователями, интуитивная ясность результатов. Наличие специальной подсистемы объяснений облегчает ее верификацию и применение.

Для практического использования экспертной системы необходимо наполнить ее базу знаний большим объемом информации из предметной области. Это наполнение основано на эксплуатационных инструкциях, непременно имеющихся в эксплуатационных службах электросетей. Преобразование множества эксплуатационных инструкций в структуры базы знаний — весьма трудоемкий процесс, что является недостатком экспертной системы.

#### Искусственная нейронная сеть

(ИНС, нейросеть) [4] — это структура из множества простых элементов, а именно, моделей нейронов. Каждая такая модель суммирует входные сигналы (с определенными весовыми коэффициентами), подвергает взвешенную сумму нелинейному преобразованию. В структуре нейросети выделяют несколько слоев — входной, промежуточные и выходной. В процессе работы нейросеть по определенному алгоритму изменяет коэффициенты так, чтобы выходные сигналы удовлетворяли поставленной задаче. Нейронные сети не программируются, они обучаются. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это направление ИИ, пройдя путь от простых персептронов до современных больших систем, получило сейчас такое бурное развитие,

что теперь понятие ИИ часто отождествляют только с нейросетями. Игровые задачи (шахматы, игра го), управление беспилотным транспортом, боевые роботы — эти успешные применения говорят сами за себя.

Целесообразно определить достоинства и недостатки метода нейро-

Достоинствами нейросетей явля-

- 1. минимальные требования к программному обеспечению, поскольку, как правило, полученная пользователями нейросеть уже готова к использованию;
- 2. высокая скорость работы;
- 3. возможность обучения одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами;
- 4. в случае успешного обучения сеть сможет выбрать верный вариант даже на основе данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также неполных и/или «зашумленных», частично искаженных данных;
- 5. нейросети способны как к обучению с учителем, так и к самообучению (например, в игровых программах две изначально «пустые» системы обучаются, играя друг с другом).

Недостатками нейросетей являются:

- 1. сильная зависимость эффективности нейросети от степени ее обученности: при редких входных событиях обучение может продлиться неопределенно долго;
- 2. отсутствие объяснительной (обосновательной) функции Этот недостаток часто имеет фатальный характер (например, представьте себе медицинскую диагностическую систему, которая рекомендует хирургическое вмешательство и не обосновывает данное предложение)



Можно предположить, что для нейросетей (в электросетях) показаны, в первую очередь, следующие области применения:

- прогнозирование периодических процессов (например, краткосрочное прогнозирование электрических нагрузок электросетей);
- 2. распознавание образов в пространстве зрительного восприятия (например, при осмотре оборудования электросетей);
- 3. распознавание неисправностей оборудования электросетей.

Последнее применение следует оговорить: речь идет не об окончательной диагностике повреждений

оборудования, а только о выявлении подозрения повреждения. Заметим также, что из-за редкости повреждений полноценные обученные диагностические нейросети для электросетей появятся нескоро. В принципе, возможно предварительное самообучение с цифровым двойником электросети, но такого двойника пока нет.

#### ВОЗМОЖНОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ И НЕЙРОСЕТЕЙ

Экспертные системы и нейросети можно использовать совместно, если найти для определенного множества задач правильное разделение функций этих систем, при котором недостатки влияют слабо, а достоинства суммируются. Для каждой группы задач из области управления в электросетях подобное разделение функций оказывается разным. Рассмотрим некоторые примеры.

#### КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Автоматизация этой важной функции включает осмотр элементов оборудования электросетей. Здесь основной задачей является распознавание образов, для чего целесообразно использовать нейросеть.

Далее требуется определить, имеется ли повреждение оборудования или опасность такого повреждения. Нейросеть может сформировать информацию о подозрении такого повреждения. Так как объяснительная функция в нейросети отсутствует, управление следует передать

специальной экспертной системе, которая:

- по результатам осмотра и необходимых измерений попытается определить основательность подозрений;
- выработает план необходимых действий, включая (если требуется) дополнительные измерения и испытания, ремонтные мероприятия.

Взаимодействие нейросетей и экспертных систем для диагностики повреждений иллюстрирует рис. 1.

#### АНАЛИЗ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ

Для решения этой важной задачи не требуется применения нейросетей — достаточно применить экспертную систему анализа нештатных ситуаций, которая использует для представления знаний формализм структурированных семантически сетей, а для работы с правилами — специализированный логический вывод с помощью специальных программ-рассуждений [5].

Для представления эксплуатационного опыта в разрабатываемой системе следует решить две задачи:

- выбрать формализм для такого представления;
- преобразовать невербальный опыт в рамки выбранного формализма.

При выборе формализма необходимо стремиться к его максимальной близости к «человеческим» представлениям. Этому требованию отвечает использование формализма рассуждения, понимаемого как рядмыслей, суждений, умозаключений на какую-нибудь тему, изложенных в логически последовательной форме. Далее полагаем, что эта цепочка суждений представляется в виде по-

# Увеличенный срок гарантии

Учитывая тридцатилетний положительный опыт эксплуатации оборудования НТЦ «Механотроника» и постоянную работу над повышением качества продукции, было принято решение об увеличении гарантийного срока на все выпускаемые с 1 марта 2020 устройства до пяти с половиной лет со дня отгрузки.

С момента выхода первых устройств релейной защиты БМРЗ компания НТЦ «Механотроника» продолжает выполнять большой объем НИОКР по развитию технической базы, обновлению и дальнейшему развитию программного обеспечения и модернизации аппаратной части устройств.



**БМР3** 

БМПА

БМЦС

БРЧН

ДУГА-БЦ

ΔΥΓΑ-Ο

БПК

КБП

РКИ-МТ

· | | 1

Шкафы РЗА

ΑСУ ΤΠ

сопт-мт



Возможны дополнительные сервисные контракты



Управление сервиса Тел.: 8 (800) 250-63-60 E-mail: service@mtrele.ru

ООО «НТЦ «Механотроника» более 30 лет разрабатывает и производит интеллектуальные устройства релейной защиты и автоматики. Развиваясь и совершенствуясь, предприятие наращивает выпуск существующих устройств и решений и создает новые, превосходящие по своим параметрам продукцию мирового уровня.





следовательности модулей-вопросов, каждый из которых состоит из:

- текста вопроса;
- анализа ответа.

Близость такого формализма к человеческим суждениям достигается тем, что вопросы формулируются на естественном языке человека.

Приведем примеры вопросов, используемых в реализованных системах.

Система анализа нештатных ситуаций в электрических сетях выглядит

#### (a)

#### оборудование шина объект \*75, узлы, выключатели вкл?

Запрашивается оборудование вида «шина», принадлежащее энергетическому объекту с номером \*75, такое, что эти шины через электрические узлы связаны с выключателями, находящимися во включенном положении.

#### (a1)

#### оборудование, узлы, выключатели, узлы, выключатели изменение?

Запрашивается оборудование, которое через электрические узлы присоединено к выключателям, которые, в свою очередь, через узлы присоединены к выключателям, положение которых изменилось.

В практических системах для решения задач одного вопроса, даже весьма сложного, оказывается недостаточно — в рассуждение входит множество иерархически выстроенных вопросов. Так, при распознавании ситуации «дальнего» резервирования система сначала определяет «погашенные» шины подстанций и отключившиеся линии, затем — срабатывание защит на подстанции с погашен-

ными шинами и на смежных присоединениях. Учитываются ступени сработавших защит линий. На подстанции, где имелось повреждение, вызвавшее ситуацию дальнего резервирования, защита работает первой ступенью, а на смежных подстанциях — последними ступенями.

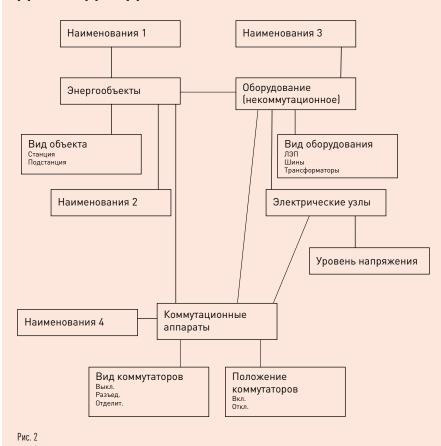
В системах, основанных на технологических рассуждениях, моделируются формализмы рассуждений. Для этого вопросы автоматически преобразуются в SQL-форму базы данных, выстраиваются цепочки модулей-запросов. Результатом является программа-рассуждение. В практических информационных системах может быть несколько подобных программ, а количество

вопросов в каждой из них может достигать сотен. Таким образом, при реализации системы требуется:

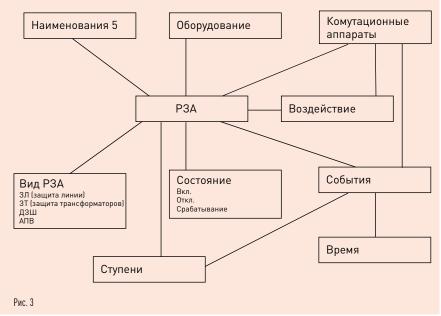
- преобразовать эксплуатационный опыт в формализмы рассужлений:
- преобразовать эти формализмы в множество программ-рассуждений.

Разработка баз знаний для технологических систем облегчается тем, что в каждой предметной области имеется устоявшаяся классификация понятий. Необходимо «вытащить» информацию из опыта технолога (это работа инженера по знаниям).

# ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРВИЧНОЙ СЕТИ ДЛЯ ЗАДАЧ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ



# ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ЗАДАЧ ДИСПЕТЧЕРСКОГО АНАЛИЗА



На рис. 2 показан пример структуры семантической сети для задач диспетчерского управления в электросетях. Понятия «семантическая сеть для представления РЗА» соединяются в однородные семантические группы. С помощью ограниченного естественного языка может быть организовано взаимодействие пользователей с интеллектуальной системой, которое будет основано на естественно-языковых вопросах. На рис. З изображена семантическая сеть для представления РЗА.

Определим простой естественноязыковый вопрос как фразу, структурно состоящую из:

- вопросной области (ВО);
- множества условий вопроса (УВ).

ВО задает то, что нужно определить, отвечая на вопрос. Примем, что в качестве ВО может использоваться имя одной из семантических групп.

В качестве УВ могут использоваться:

- семантические группы;
- элементы семантических групп;
- множества элементов одной семантической группы.

То есть ответ на вопрос, означает нахождение из множества элементов группы ВО такие, которые связаны с группами и элементами групп, заданными УВ.

Для определения ответа на вопрос экспертная система:

- анализирует вопрос, выделяя ВО и множество УВ;
- по семантической сети определяет, какие элементы группы ВО имеют связи с УВ.

В простейшем случае ответ на вопрос — это список элементов группы ВО, имеющих связи с УВ. Для пользователя ответ есть вербализация этого списка (заголовок списка — имя группы ВО, тело списка — тех-

# Рис. 4

нологические наименования УВ, релевантных элементам группы ВО).

Этот тип вопроса назовем определительным. Допускаются составные вопросы. В них часть условий выражаются придаточными конструкциями (типа «который»). При этом допускаются вложения придаточных вопросов друг в друга. Придаточные вопросы и вложенные конструкции отделяются запятой. Приведем пример.

#### Зопрос-

### объекты подстанции, трансформаторы, узлы, выключатели отключенные?

В этом вопросе запрашивается множество энергообъектов вида «подстанции», таких, которые имеют элементы оборудования вида «трансформатор», связанные через электрические узлы с коммутационными аппаратами вида «выключатель», находящимися в отключенном состоянии.

Придаточные вопросы формулируются при анализе так, что ответы на них автоматически используются в качестве дополнительного условия «внешнего» вопроса.

С помощью вопросов в экспертной системе может осуществляться взаимодействие с пользователями для достижения следующих целей:

- поиск информации в экспертной системе:
- контроль заполнения базы зна-
- простейшая коррекция содержимого базы знаний.

Приведем синтезированное экспертной системой текстовое описание ситуации:

#### Ситуация: ДАЛЬНЕЕ РЕЗЕРВИРО-ВАНИЕ

Предположительно повреждение оборудования ВЛ 110 кВ «Волконка — Головинка»

- Срабатывание РЗА Головинка ВЛ Волконка ступ. 1
- Срабатывание защиты линии РЗЛ Волконка ВЛ 110 кВ «Волконка — Головинка»
- Отказ выключателя Волконка ВЛ 110 кВ Головинка
- HET YPOB
- Работа РЗА на смежных подстанциях.

Для «ручного» анализа диспетчером эта ситуация является весьма сложной: защиты работали на пяти ПС, на четырех ПС отключились выключатели, причем на ПС «Волконка» нет отключений — она полностью обесточилась. Экспертная система в этом случае дает исчерпывающее технологическое описание ситуации, понятное диспетчеру.

#### РОБОТИЗИРОВАННЫЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ НА ШИТАХ И ПАНЕЛЯХ РЗА ПОДСТАНЦИЙ

По нашему мнению, организация переключений на подстанциях с помощью робототехнических комплексов является перспективным методом [6-15]. Для этого потребуется, в частности, нейросеть для распознавания внешнего вида панелей релейной защиты и автоматики. Действие этой нейросети будет аналогично действию широко известной системы распознавания человеческих лиц. Экспертная система при этом будет использоваться для определения необходимых действий с органами управления панелями (рис. 4).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При создании интеллектуальной части систем управления электрическими сетями могут использоваться экспертные системы и искусственные нейронные сети. Необходимо только правильно выбирать их для различных приложений. Оказывается (при рассмотрении ряда примеров), что применение экспертных систем целесообразно для всех приложений, но для некоторых приложений требуется сочетание нейросетей и экспертных систем.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Таунсенд К., Фохт Д. Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ / Пер. с англ. В.А. Кондратенко, С.В. Трубицына. М.: Финансы и статистика. 1990. 320 с.
- 2. Любарский Ю.Я Интеллектуальные информационные системы. М.: Наука, 1990.
- 3. Любарский Ю.Я. Интеллектуальные модели рассуждений в советчике диспетчера электрических сетей // Электрические станции. 2017. № 3. C. 35-39.
- 4. Горбань А.Н., Дунин-Барковский В.Л. и др. Нейроинформатика. Новосибирск: Наука, 1998.

- Каковский С.К., Любарский Ю.Я. Программная система-советчик для управления электрическими сетями // Электрические станции, 2016.
- 6. Булгаков А.Г., Воробьев В.А. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление. Серия «Библиотека инженера». М.: Солон-Пресс, 2008.
- 7. Любарский Ю.Я., Хренников А.Ю. Интеллектуальные АСДУ. Доска объявлений для объемных решений // Новости электротехники. 2019. № 3. C. 30-31.
- 8. Любарский Ю.Я., Хренников А.Ю., Александров Н.М. Оперативное управление электростанциями и интернет вещей. Проблемы цифровизации // Новости электротехники. 2019. № 4-5. C. 22-26.
- 9. Любарский Ю.Я., Александров Н.М., Хренников А.Ю. Цифровизация для задач оперативного управления предприятиями электросетей и интернет вещей // Сб. трудов. Техническая сессия «Техническая политика для реализации задач стратегии развития электросетевого комплекса и цифровой трансформации» в рамках выставки «Электрические сети России», 3-6 декабря 2019.
- 10. Любарский Ю.Я. Оперативный диспетчерский анализ нештатных ситуаций в электриче-СКИХ СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ. Использование компьютерной поддержки на основе технологии экспертных систем // Промышленная энергетика. 2017. № 9. C. 2-6.
- 11. Любарский Ю.Я. Поиск повреждений в разветвленных распределительных электрических сетях: использование интернета вешей // Электрические станции. 2019. № 8. С. 38-40.
- 12. Любарский Ю.Я., Моржин Ю.И., Александров Н.М., Радин П.С. Формирование оперативной справки об аварии в энергосистеме // Энергия единой сети. 2018. № 3. С. 26-30.
- 13. Любарский Ю.Я., Хренников А.Ю. Компьютерная поддержка диспетчерских решений в интеллектуальных сетях // Библиотечка электротехника. Приложение к журналу «Энергетик». 2019 № 8. 91 с.
- 14. Любарский Ю.Я. Архитектура интеллектуальных систем с доской объявлений для управления электрическими сетями // Энергия единой сети. 2019. № 2. С. 20-22.
- 15. Любарский Ю.Я. Экспертные системы для диспетчерского управления интеллектуальными электрическими сетями // Энергия единой сети. 2019. № 1. С. 22-28.







Электрификация

Тел.: +7 (499) 181-52-02, доб. 131,145







