

# РАЗРАБОТКА КАСКАДА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РЕГИОНА

**Бурлов Вячеслав Георгиевич,**  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, [burlovvg@mail.ru](mailto:burlovvg@mail.ru)

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-8-53-60

**Авдеева Марина Олеговна,**  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, [avdeeva\\_mo@spbstu.ru](mailto:avdeeva_mo@spbstu.ru)

**Manuscript received** 24 June 2024;  
**Accepted** 12 July 2024

**Полюхович Максим Алексеевич,**  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого, г. Санкт-Петербург, Россия,  
[polyuhovich\\_ma@spbstu.ru](mailto:polyuhovich_ma@spbstu.ru)

**Ключевые слова:** управление безопасностью,  
искусственный интеллект, нейронные сети,  
модель решения, передача электроэнергии,  
моделирование, прогнозирование

Влияние гидрометеорологических факторов на процесс передачи электроэнергии может привести к срывам процесса электроснабжения. Основой деятельности человека является решение. Следовательно, для достижения цели деятельности системообразующим фактором должно являться решение человека. На основе модели решения разработана структурная схема системы управления электроснабжением региона. При этом лицо, принимающее решение (ЛПР), в процессе своей деятельности оперирует двумя процессами: идентификация и нейтрализация группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии. В связи с большим объёмом данных, поступающих на вход системы управления электроснабжением региона, часть задач поддержки управления должна быть автоматизирована с целью снижения влияния человеческого фактора. Наиболее подходящей технологией для достижения поставленной цели является искусственный интеллект, реализация которого видится авторами статьи на базе каскада нейронных сетей. В качестве предмета исследования рассматриваются процессы обеспечения безопасности электроснабжения в условиях неопределённости факторов окружающей среды. Из массива данных, характеризующих состояние окружающей среды, реализация каскада нейронных сетей позволяет получить характеристики системы управления электроснабжением региона – среднее время проявления, идентификации и нейтрализации группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии. Анализ данных характеристик позволяет определить показатель безопасности электроснабжения региона. При несоответствии показателя безопасности требуемому значению подход на основе каскада нейронных сетей позволяет решить обратную задачу поддержки управления, определяя при этом требуемое среднее время идентификации и нейтрализации группы факторов. Главное достоинство полученных результатов заключается в том, что имеется возможность изменения состава моделей каскада нейронных сетей для решения отличных по тематике задач. Разработанный каскад нейронных сетей предполагается реализовать в унифицированную систему моделей, с помощью которой можно будет осуществлять поддержку управления безопасностью объектов при различных ситуациях, возникающих в условиях неопределённости.

#### Информация об авторах:

**Бурлов Вячеслав Георгиевич,** доктор технических наук, профессор Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0000-0001-7603-9786

**Авдеева Марина Олеговна,** кандидат экономических наук, доцент, доцент Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0000-0002-5531-3579

**Полюхович Максим Алексеевич,** ассистент Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0000-0003-2722-5552

#### Для цитирования:

Бурлов В.Г., Авдеева М.О., Полюхович М.А. Разработка каскада нейронных сетей для поддержки управления безопасностью электроснабжения региона // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №8. С. 53-60.

#### For citation:

Burlov V.G., Avdeeva M.O., Polyukhovich M.A. Development of a neural networks cascade to support the electric power supply safety management of region. *T-Comm*, vol. 18, no. 8, pp. 53-60. (in Russian)

## Введение

В связи с ускоренным развитием компьютерных наук технологии искусственного интеллекта (ИИ) находят своё применение во многих отраслях народного хозяйства: сельское хозяйство, строительство, промышленность, культура и искусство и т.д. Основным направлением применения технологий ИИ остаётся робототехника, в сфере которой на основе данных технологий создаются экспертные системы, системы технического зрения и информационно-аналитические системы [1]. Тенденции развития в сфере электроэнергетики также направлены на широкое внедрение ИИ и объединение электросетевой и информационной инфраструктур. Существующие энергосистемы претерпевают быстрый переход к их более активным, гибким и «умным» аналогам интеллектуальной сети, что создает огромные проблемы во многих областях, например, интеграция различных распределенных возобновляемых источников энергии [2-3], безопасность киберпространства [4-6], управление спросом и формирование решений по планированию и эксплуатации системы [7-9]. Выполнение расширенных функций интеллектуальной сети прочно опирается на базовую информационную и коммуникационную инфраструктуру, а также на эффективную обработку огромного количества данных, генерируемых из различных источников, например, интеллектуальных счетчиков, векторных единиц измерения и различных типов датчиков.

Одной из особенностей процесса передачи электрической энергии является его непрерывность. Во всей технологической цепочке от источника до конечного пользователя происходит постоянный процесс генерации, распределения и потребления электроэнергии, поэтому очевидно, что среди прочих показателей электроснабжения наибольший интерес в рамках обеспечения жизнедеятельности региона представляет собой продолжительность перерыва электроснабжения [10]. Основополагающей идеей плана цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса до 2030 г. является уменьшение продолжительности перерывов электроснабжения [11].

Проблема обеспечения бесперебойности электроснабжения потребителей заключается в том, что на объект электроэнергетической отрасли постоянно воздействует ряд различных факторов:

- окружающей среды (внешняя среда системы);
- организационных и технических (внутренняя среда системы).

Представление данных факторов в виде совокупности пространственных географических (обусловленных территориальным расположением объекта управления) и технико-технологических (обусловленных особенностью процесса передачи электроэнергии) данных позволяет сформировать базу данных системы управления электроснабжением региона.

Лицо, принимающее решение (ЛПР), в связи с ограничением на ресурсы не всегда своевременно формирует решения, что подтверждается согласно отчётам Минэнерго России статистическими данными об аварийности на объектах электроэнергетики. Наиболее высокий показатель аварийности отмечается при эксплуатации воздушных линий электропередачи (ВЛЭП), так как сам характер их функционирования и расположения содействует деструктивному воздействию на объект

управления факторов окружающей среды, в большей степени гидрометеорологических. В связи с этим устанавливается приоритет в применении технологий ИИ для своевременного анализа условий среды с целью прогнозирования состояния объекта на ближайший период времени [12].

В настоящее время технологии ИИ в сфере электроэнергетики уже широко применяются в ряде таких стран, как Германия, Япония, Китай, США, Франция, Южная Корея [13]. В Российской Федерации разработана национальная стратегия развития ИИ до 2030 г. [14], которая содержит основные тренды развития электроэнергетической отрасли. К основным трендам относятся: интеллектуальная энергетика, цифровая энергетика, «умные» цифровые двойники и др.

Современное состояние указанной проблемной области выражается в следующих направлениях исследований в мировой науке:

1. Разработка модели прогнозирования нагрузки на интеллектуальную сеть на основе свёрточной нейронной сети [15-17]. Модель позволяет анализировать характеристики переменной модели и определять входные данные прогнозной модели, используя методы корреляционного анализа, чтобы понять влияние фактических затрат на электроэнергию, погоды и других факторов на изменения в электрической сети. Рассматривается комплексная модель прогнозирования надёжности электрических сетей, которая состоит отдельно из двух частей: моделирование отказов, моделирование плановых отключений. Для этого предлагается трехуровневая модель искусственной нейронной сети для прогнозирования надёжности элементов электрической сети с учетом сбоев. Искусственная нейронная сеть обучается с использованием статистических данных надёжности элементов электрической сети.

2. Применение многоагентной динамической теории игр [18-20]. Данный подход направлен на разработку многоагентной динамической модели игры «защита-атака-защита» для определения критических элементов ВЛЭП.

3. Применение «deep learning» (отрасль машинного обучения) [21-23]. Данное направление исследований направлено на прогнозирование нагрузки, обнаружение и диагностику неисправностей, оценку безопасности и стабильности энергосистемы, интеграцию и управление возобновляемыми источниками энергии, а также управление активами и обслуживание электрической сети.

ИИ можно определить как область информатики, которая автоматизирует разумное поведение человека. Основой деятельности человека является решение. Следовательно, для создания и развития систем поддержки управления безопасностью электроснабжения необходимо сформировать условия для разработки ИИ на основе модели решения человека. Согласно анализу научных публикаций за последнее десятилетие, идейные направления в сфере становления и совершенствования ИИ такой концепции пока не придерживались.

Цель данного исследования заключается в разработке модели каскада нейронных сетей для поддержки управления безопасностью электроснабжения региона на основе модели решения человека. Такой подход направлен на частичную реализацию функций ЛПР, что позволит снизить влияние «человеческого фактора» в условиях неопределённости окружающей среды и ограничениях на время. В связи с этим авторами были выделены следующие задачи:

- 1) разработать структурную схему системы управления электроснабжением региона на основе системной интеграции процессов обеспечения безопасности электроснабжения;
- 2) проработать модель каскада нейронных сетей;
- 3) выбрать средства реализации данной системы моделей каскада нейронных сетей.

Объектом исследования является система управления электроснабжением региона. Предметом исследования являются процессы обеспечения безопасности электроснабжения.

Научная гипотеза заключается в следующем: применение технологий ИИ, впервые разработанного на основе модели решения человека, для поддержки управления безопасностью электроснабжения региона позволит предотвратить перебои в электроснабжении потребителей.

Ожидаемым результатом исследования является модель каскада нейронных сетей для поддержки управления безопасностью электроснабжения региона. Научная новизна представленных результатов заключается в том, что впервые разработана модель ИИ на базе лежащей в основе деятельности модели решения человека. Полученная модель каскада нейронных сетей позволит обеспечивать безопасность объекта системы электроснабжения, в частности ВЛЭП, в условиях воздействия гидрометеорологических факторов внешней среды, в чём содержится её практическая значимость для топливно-энергетического комплекса с полным соответствием стратегическому направлению плана цифровой трансформации до 2030 г.

### Методология исследования

Ранее в исследованиях [24-25] была получена модель решения человека:

$$P = f(\Delta t_{\text{ИИ}}, \Delta t_{\text{ИУ}}, \Delta t_{\text{ИВ}}), \quad (1)$$

где  $P$  – показатель эффективности управления электроснабжением региона,  $\Delta t_{\text{ИВ}}$  – среднее время проявления группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии,  $\Delta t_{\text{ИУ}}$  – среднее время идентификации группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии,  $\Delta t_{\text{ИИ}}$  – среднее время нейтрализации группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии.

Оператор (ЛПР) для достижения цели деятельности по обеспечению региона электроэнергией сосредоточен на выполнении двух функций:

- 1) идентификация группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии (информационно-аналитическая работа);
- 2) нейтрализация группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии (выработка команды по задействованию ресурсов).

В настоящем исследовании принимается, что под группой факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии, понимаются гидрометеорологические факторы, которые при определённых условиях способны вывести из строя объект электроэнергетической системы. Нарушение работы одного из объектов системы электроснабжения приводит к цепной реакции на всей технологической цепочке, из-за чего без электроэнергии остаются потребители региона. Тяжесть последствий деструктивного

воздействия гидрометеорологических факторов на элементы процесса передачи электроэнергии зависит от их количественных показателей, продолжительности воздействия, а также от географических условий рассматриваемой территории.

При этом необходимо отметить, что важно учитывать также категорию потребителей, так как понятие «регион» предполагает совокупность различных по своему назначению электроприёмников. Категория потребителей является важной характеристикой, напрямую влияющей на требования к системе управления электроснабжением региона. Наибольшее воздействие на объекты электроэнергетики оказывают такие гидрометеорологические факторы, как температура окружающей среды, скорость ветра, влажность.

Кроме того, их одновременное совместное воздействие приводит к формированию неблагоприятных климатических условий. Например, образование гололёдно-изморозевого отложения. Указанные угрозы нарушения электроснабжения региона способны привести к длительным перебоим процесса передачи электроэнергии потребителям в связи со значительными масштабами разрушений и зачастую недоступностью повреждённых участков для ремонта и восстановления, особенно в осенне-зимний период года. Совместное действие гидрометеорологических факторов даже при средних многолетних значениях (нормах) метеорологических условий способно также привести к аварийной ситуации на объекте электроэнергетики. Поэтому с целью обеспечения безопасности электроснабжения необходим круглосуточный мониторинг состояния окружающей среды с целью определения возможной угрозы нарушения электроснабжения региона.

На вход системы управления электроснабжением региона поступают данные Гидрометцентра России, исходя из которых определяется среднее время проявления группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии. Затем, используя характеризующие процесс электроснабжения данные, каскад нейронных сетей на базе модели ИИ «выполняет» две функции:

- осуществляет информационно-аналитическую работу, рассчитывая среднее время процесса идентификации группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии;
- рассчитывает ресурсы по задействованию технического и кадрового обеспечения, определяя среднее время процесса нейтрализации группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии.

Модель решения человека является системообразующим фактором (СОФ) системы управления электроснабжением региона. На основе СОФ реализуется системная интеграция процессов обеспечения безопасности электроснабжения, что позволяет разработать следующую структурную схему (рис. 1).

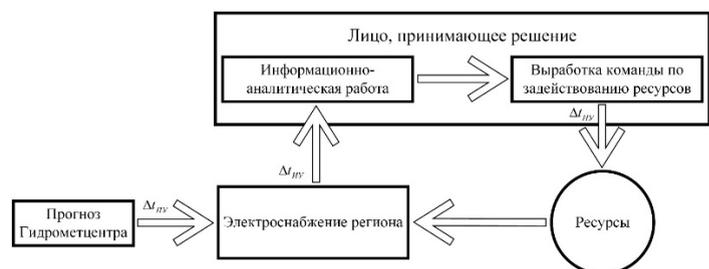


Рис. 1. Структурная схема системы управления электроснабжением региона

В исследовании [26] получено соотношение следующего вида, которое можно использовать для расчёта показателя эффективности управления электроснабжением региона:

$$P = \frac{v_1 v_2}{\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – величина, обратная среднему времени проявления группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии,  $v_1$  – величина, обратная среднему времени идентификации группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии,  $v_2$  – величина, обратная среднему времени нейтрализации группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии.

По соотношению (2) производится расчёт показателя эффективности управления электроснабжением региона, который тождественно равен показателю безопасности электроснабжения, так как объект управления способен выполнять своё предназначение только лишь в том случае, если для него ЛПР созданы безопасные условия. В соотношение подставляются значения  $v_1$  и  $v_2$ , полученные для текущих средних времен идентификации ( $y_1$ ) и нейтрализации ( $z_1$ ) группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии. Значение  $\lambda$  устанавливается на основе анализа данных прогноза Гидрометцентра России и не зависит от ЛПР. Анализ информации, полученной от Гидрометцентра России, заключается в определении среднего времени проявления группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии ( $x_1$ ). На основе обработанных данных ИИ рассчитывает показатель безопасности (P).

Затем осуществляется сравнение полученного в результате проведённых расчётов показателя с требуемым показателем безопасности (P\*). Если безопасность электроснабжения не обеспечивается на должном уровне, то есть расчётный показатель меньше требуемого показателя, необходимо решить обратную задачу поддержки управления (таблица 1). Так как вектор управления содержит два компонента, а именно процесс идентификации и процесс нейтрализации группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии, то ИИ подбирает такие средние времена данных процессов ( $y_2$  и  $z_2$ ), при которых будет достигаться требуемый показатель безопасности электроснабжения региона (P\*).

Таблица 1

Результаты решения задач поддержки управления ИИ

Прямая задача поддержки управления			Обратная задача поддержки управления		
Переменная модели ИИ	Значение	Показатель безопасности	Переменная модели ИИ	Значение	Переменная модели ИИ
$\Delta t_{ny}$	$x_1$	P < P*	$\Delta t_{ny}$	$x_1$	$\Delta t_{ny} = y_2;$ $\Delta t_{ny} = z_2$
$\Delta t_{ny}$	$y_1$		Показатель безопасности	P*	
$\Delta t_{ny}$	$z_1$		–	–	

Проанализировав существующие методы и подходы к реализации нейронных сетей, было принято решение

использовать язык Python. Для достижения цели исследования требуется применение следующих инструментов обработки информации:

1. Нейронные сети для прогнозирования отдельных параметров, программная реализация которых осуществляется с помощью алгоритма обратного распространения ошибки на языке Python. Библиотека линейной алгебры numpy языка Python является очень удобным инструментом для реализации алгоритмов в области научных вычислений. Её универсальные функции предоставляют отличные решения для обучения нейронных сетей. Универсальная функция представляет собой оболочку над обычной функцией, с помощью которой реализуется возможность выполнять определенные действия над скалярными и векторными величинами, а также над массивами данных. Подобные функции выполняют действия над каждым элементом массива, поддерживают механизм транслирования, автоматически преобразуют типы данных и обеспечивают доступ к более тонким настройкам своей работы.

2. Многослойный перцептрон, входящий в состав разрабатываемой модели каскада нейронных сетей. Его реализация предполагается на основе языка Python.

Обычно однослойный перцептрон включает в себя следующие слои:

- 1) слой входного вектора (слой входных данных);
- 2) слой выходного вектора (слой выходных данных);
- 3) слой векторов промежуточного представления (скрытые слои).

Вычисления в подобной сети возможно представить в виде соотношения:

$$X_k = f(W_k \cdot X_{k-1} + B_k), X_n = G_w(X_0), \quad (3)$$

где  $G_w$  – функция, зависящая от весов, которые связывают нейроны и смещения.

Для достижения цели исследования требуются следующие библиотеки (модули кода), которые необходимо включить в программный код разрабатываемого каскада нейронных сетей:

- 1) библиотека «NumPy» – возможность работать с матрицами, массивами данных;
- 2) библиотека «Scikit-Learn» – реализация алгоритмов решения задач машинного обучения;
- 3) библиотека «TensorFlow» – построение нейронных сетей, их тренировка и тестирование;
- 4) библиотека «Keras» – «надстройка» над библиотекой TensorFlow для быстрой реализации нейронных сетей.

3. Сеть Кохонена, реализация которой также предполагается с помощью основ языка Python. Одна из его библиотек – Tensorflow, которая обозначена выше, позволяет реализовать различные алгоритмы нейронных сетей. Основной её целью является предоставление пользователю гибких, простых в использовании, но в то же время мощных инструментов для реализации задач из области построения и обучения нейронных сетей [27]. Использование возможностей Tensorflow позволяет решать задачи автоматического нахождения и классификации образов, достигая качества человеческого восприятия. Функции библиотеки объединяют вычислительную алгебру и методы оптимизации для легкого вычисления многих математических выражений.

Результаты

Для достижения цели исследования было принято решение дополнить разработанную систему управления электроснабжением региона моделью каскада нейронных сетей [28], которые на основе авторской гипотезы могут послужить аналогом человеческого интеллекта в данной системе. Применение такого подхода к решению поставленной задачи обусловлено, в первую очередь, необходимостью уменьшения ответственности на человека – главного звена в процессе обеспечения безопасности. В настоящее время человек (ЛПР) задействован на всех этапах формирования решения по предотвращению срыва процесса электроснабжения региона, ему требуется за короткое время обрабатывать значительный объём информации, выявлять причинно-следственные связи между условиями обстановки и состоянием объекта управления, прогнозировать дальнейшее развитие ситуации, предусматривать запас и хранение материальных ресурсов и подбор персонала с требуемой квалификацией.

На рисунке 2 представлена структурная схема информационной подсистемы системы управления электроснабжением региона с каскадом нейронных сетей, который сможет частично заменить ЛПР в автоматизированной системе.

- Каскад состоит из трех блоков нейронных сетей:
- блок для прогнозирования отдельных параметров;
  - многослойный перцептрон;
  - сеть Кохонена для кластеризации полученных значений.

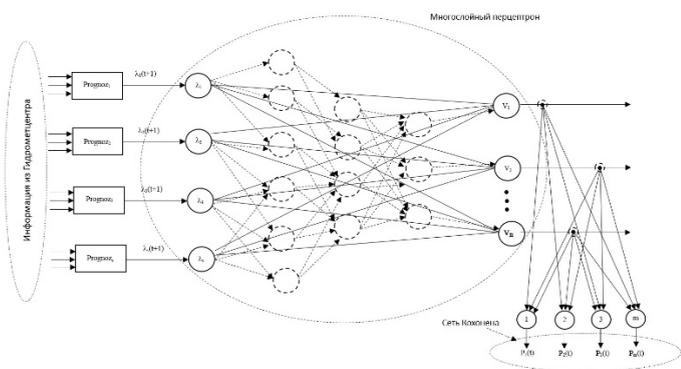


Рис. 2. Структурная схема информационной подсистемы системы управления электроснабжением региона (где  $\lambda$  – вектор внешних параметров системы,  $v$  – вектор внутренних параметров системы,  $P$  – показатель безопасности электроснабжения)

Для системы управления электроснабжением региона параметры системы могут быть представлены следующим образом:

1. Внешние параметры системы ( $\lambda$ ) – среднее время проявления группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии, которое зависит от гидрометеорологических факторов. Например, при образовании гололеда на ВЛЭП изменяется вес провода под воздействием ветровой и гололедной нагрузки, что приводит к обрыву линии электропередачи.

2. Внутренние параметры системы ( $v$ ) – характеризующие процессы вектора управления средние времена идентификации и нейтрализации группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии.

3.  $P$  – показатель безопасности электроснабжения региона.

С учётом требований приказа Министерства энергетики

РФ от 12 июля 2018 г. № 548 «Об утверждении требований к обеспечению надёжности электроэнергетических систем, надёжности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем и объектов электроэнергетики» установим за требуемый показатель безопасности электроснабжения региона значение 0,8. Необходимо добиться определенных значений  $v$  при спрогнозированных на основе данных прогноза Гидрометцентра России значениях  $\lambda$ . Рассмотрим передачу электрической энергии в условиях двух обстановок (таблица 2):

- 1) Образование гололёдно-изморозевого отложения на ВЛЭП.
- 2) Воздействие сильного ветра на опоры ЛЭП.

Проанализировав данные прогноза Гидрометцентра России, ИИ определяет среднее время проявления группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии. Затем каскад нейронных сетей позволяет получить различные по затратам материальных и кадровых ресурсов варианты предотвращения нарушения электроснабжения, представленных в виде средних времён идентификации и нейтрализации установленной группы факторов. ЛПР формирует решение на основе одного из предложенных вариантов, учитывая имеющиеся ресурсы в виде технического инвентаря, технологических возможностей объекта электросетевой организации и кадрового состава.

Таблица 2

Результаты решения задачи поддержки управления ИИ при различных условиях обстановки

Прямая задача поддержки управления			Обратная задача поддержки управления		
Переменная модели ИИ	Значение	Показатель безопасности	Переменная модели ИИ	Значение	Переменная модели ИИ
<b>1. Образование гололёдно-изморозевого отложения на ВЛЭП</b>					
$\Delta t_{пу}$	13 ч	0,68 < 0,8	$\Delta t_{пу}$	13 ч	1 вариант: $\Delta t_{пу} = y_1 = 1$ ч; $\Delta t_{пу} = z_1 = 2$ ч; 2 вариант: $\Delta t_{пу} = y_2 = 2$ ч; $\Delta t_{пу} = z_1 = 1$ ч;
$\Delta t_{пу}$	3 ч		Показатель безопасности	0,8	n вариант: $\Delta t_{пу} = y_n$ ; $\Delta t_{пу} = z_n$ ;
$\Delta t_{пу}$	2,5 ч		–	–	n+1 вариант: $\Delta t_{пу} = y_{n+1} = 1,5$ ч; $\Delta t_{пу} = z_{n+1} = 1,5$ ч;
<b>2. Воздействие сильного ветра на опоры ЛЭП</b>					
$\Delta t_{пу}$	3 ч	0,7 < 0,8	$\Delta t_{пу}$	3 ч	1 вариант: $\Delta t_{пу} = y_1 = 0,3$ ч; $\Delta t_{пу} = z_1 = 0,4$ ч;
$\Delta t_{пу}$	0,67 ч		Показатель безопасности	0,8	2 вариант: $\Delta t_{пу} = y_2 = 0,4$ ч; $\Delta t_{пу} = z_1 = 0,3$ ч;
$\Delta t_{пу}$	0,5 ч		–	–	n вариант: $\Delta t_{пу} = y_n$ ; $\Delta t_{пу} = z_n$ ;
					n+1 вариант: $\Delta t_{пу} = y_{n+1} = 0,25$ ч; $\Delta t_{пу} = z_{n+1} = 0,45$ ч;

## Обсуждение

Применение ИИ в целях обеспечения безопасности объекта направлено на современное прогнозирование наступления неблагоприятного события путём обработки большого массива данных. Полученные при моделировании параметры состояния системы управления электроснабжением региона позволяют установить необходимость использования материальных и кадровых ресурсов для предотвращения перерыва в передаче электроэнергии от источника до потребителя при быстроизменяющихся параметрах внешней среды. Современные научно-технические достижения в области теории управления создают условия для внедрения ИИ в систему управления электроснабжением региона. Но до сих пор не решена проблема методологического уровня – отсутствует СОФ в виде модели решения человека. В связи с данной проблемой результаты деятельности по обеспечению безопасности объектов электроэнергетической отрасли не всегда соответствуют ожиданиям ЛПР.

В области обеспечения безопасности электроснабжения региона основная трудность заключается в раннем обнаружении группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии. В связи с непостоянством погодных явлений, в частности, изменением их интенсивности за короткий промежуток времени, целесообразно создать и поддерживать функционирование системы мониторинга состояния окружающей среды. Разработанная информационная подсистема системы управления электроснабжением региона на основе каскада нейронных сетей как раз является тем инструментом, который позволит ЛПР своевременно реагировать на фиксированную группу факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии, и в кратчайшие сроки разрабатывать перечень мероприятий по реагированию на условия обстановки.

Главное достоинство полученных результатов заключается в том, что имеется возможность изменения состава моделей каскада нейронных сетей для решения отличных по тематике задач. Разработанный каскад нейронных сетей предполагается реализовать в унифицированную систему моделей, с помощью которой можно будет осуществлять поддержку управления безопасностью объектов при различных ситуациях, возникающих в условиях неопределённости.

## Заключение

На основе разработанной модели ИИ имеется возможность установить характеристики процессов управления, основанных на идентификации и нейтрализации группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии. Оперирование установленными характеристиками позволяет обеспечить устойчивое электроснабжение потребителей с надлежащим качеством. В случае, если показатель безопасности электроснабжения не соответствует требуемому значению, применение ИИ для решения обратной задачи поддержки управления позволяет определить характеристики процессов управления: среднее время идентификации и среднее время нейтрализации группы факторов, приводящих к возникновению нарушения процесса передачи электроэнергии. Таким образом, поддержка управления безопасностью электроснабжения региона заключается в

том, что ЛПР выбирает перечень мероприятий из предложенных ИИ вариантов действий по предотвращению деструктивного воздействия установленной группы факторов с учётом имеющихся ресурсов. Полученный научный результат позволяет обеспечивать безопасность объекта электроэнергетической отрасли при ограничениях на ресурсы системы управления электроснабжением региона.

## Литература

1. Попова Н.И., Локтев И.В. Элементы искусственного интеллекта в контексте национальной безопасности // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. №2. С. 131-135.
2. Воиловский С.С. Стратегические тренды энергетического развития северных территорий России // АИС. 2022. №49. С. 23-37.
3. Усачева И.В., Ромасевич Е.П. Алгоритмы и методики расчета эксплуатационных переходных режимов системы электроснабжения промышленного предприятия сложной конфигурации // НАУ. 2020. №61-1 (61). С. 47-52.
4. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Исследование кибербезопасности прогностических алгоритмов управления для установок распределенной генерации // Системы анализа и обработки данных. 2021. №2 (82). С. 19-34.
5. Аметов Ф.Р., Бекиров Э.А. Разработка математической модели и алгоритма для реализации кибербезопасности систем управления объектов электроэнергетики // ТВИМ. 2022. №1 (54). С. 30-39.
6. Хлопов О.А. Проблемы кибербезопасности и защиты критической инфраструктуры // The Scientific Heritage. 2020. №45-5 (45). С. 64-69.
7. Ран Н.А., Антипов А.В., Городничева Е.В. Применение элементов теории вероятностей при решении задач электроэнергетики // СНВ. 2022. №2. С. 315-319.
8. Никольский Н.В., Королева Л.П. Исследование методов анализа больших данных на предмет применимости для решения экономических задач в электроэнергетике // Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы. 2023. №1. С. 132-139.
9. Казымов И.М., Боярков Д.А., Компанец Б.С. Подходы к определению величины экономического ущерба и рисков выхода из строя оборудования электроэнергетики // Век качества. 2022. №3. С. 150-162.
10. Мусин А.Х., Зарубин А.А. Количественная оценка ожидаемого аварийного недоотпуска электроэнергии как показателя риска электроснабжения городов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. №3-4. С. 75-81.
11. Парень А.А., Терещенко А.С. Ретроспектива: инновационные и цифровые решения в энергетической отрасли // Известия СПбГЭУ. 2023. №2 (140). С. 126-130.
12. Карыбекова Б.К., Элчиева М.С., Сатыбалды У.Ж. Мероприятия по повышению надёжности в электрических сетях // ReFocus. 2023. №1. 127-130.
13. Крайнов К.Р., Кротков Е.А. Интеграция интеллектуальных систем автоматического управления в энергосистемы: преимущества и недостатки // Стольпинский вестник. 2023. №11. С. 5148-5160.
14. Массель Л.В. Современный этап развития искусственного интеллекта (ИИ) и применение методов и систем ИИ в энергетике // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 4 (24). С. 5-20.
15. Xiang S., Zhen C., Peng J., Zhang L., Pu Z. Power load prediction of smart grid based on deep learning. Procedia Computer Science, 228, pp. 762-773. 2023. -<https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.11.090>
16. Hong Y.Y., Chan Y.H. Short-term electric load forecasting using particle swarm optimization-based convolutional neural network. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 126. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106773>
17. Zhang Q., Ma W., Li G., Ding J., Xie M. Fault diagnosis of power grid based on variational mode decomposition and convolutional neural

network // Electric Power Systems Research, 208. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107871>

18. *Domyshv A., Sidorov D.* Optimization of the Structure of Power System Multi-Agent Control // IFAC-PapersOnLine. Vol. 55, 2022, pp. 250-255. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.044>

19. *Su K., Jiang L., Liu J.* Power source–power grid coordinated typhoon defense strategy based on multiagent dynamic game theory // Global Energy Interconnection, no. 4(3), 2021, pp. 285-294. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2021.07.008>

20. *Wang G., Chao Y., Cao Y., Jiang T., Han W., Chen Z.* A comprehensive review of research works based on evolutionary game theory for sustainable energy development. Energy Reports. Elsevier Ltd. 2022, November 1. 2022, November 1. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.231>

21. *Akhtar S., Adeel M., Iqbal M., Namoun A., Tufail A., Kim K.H.* (Deep learning methods utilization in electric power systems. Energy Reports. 2023, November 1. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.028>

22. *Mirshekali H., Keshavarz A., Dashti R., Hafezi S., Shaker H.R.* Deep learning-based fault location framework in power distribution grids employing convolutional neural network based on capsule network // Electric Power Systems Research, 2023. 223. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109529>

23. *Bitirgen K., Filik Ü.B.* A hybrid deep learning model for discrimination of physical disturbance and cyber-attack detection in smart grid //

International Journal of Critical Infrastructure Protection, 40. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2022.100582>

24. *Burlov V., Polyukhovich M., Mankov V., Logvinova Yu.* Development of safety management technology of electric power networks in order to sustainable development // Paper presented at the E3S Web of Conferences. Vol. 274. 2021. 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE – 2021). France, 2021. P. 10004. doi:10.1051/e3sconf/202127410004

25. *Бурлов В.Г., Полюхович М.А.* Модель геоинформационного управления безопасностью электроснабжения региона в условиях обледенения воздушных линий электропередачи // Информация и космос. 2023. № 2. С. 84-94.

26. *Грозмани Е.С., Петров С.В.* Разработка модели процесса управления информационной безопасностью киберфизической системы // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. №1. С. 38-43.

27. *Кузнецова А.В., Мохов В.А., Алгазали С.М.М.* Алгоритмы обучения искусственных нейронных сетей: учебно-методическое пособие по изучению дисциплины Искусственный интеллект и мягкие вычисления. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2020. 72 с.

28. *Шумков Е.А.* Построение системы поддержки принятия решений на базе нейросетевых технологий // Научные труды КубГТУ. 2022. № 6. С. 28-39.

## DEVELOPMENT OF A NEURAL NETWORKS CASCADE TO SUPPORT THE ELECTRIC POWER SUPPLY SAFETY MANAGEMENT OF REGION

**Vyacheslav G. Burlov**, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia, [burlovvg@mail.ru](mailto:burlovvg@mail.ru)

**Marina O. Avdeeva**, University of Aerospace Instrumentations, St. Petersburg, Russia, [avdeeva\\_mo@spbstu.ru](mailto:avdeeva_mo@spbstu.ru)

**Maxim A. Polyukhovich**, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia, [polyuhovich\\_ma@spbstu.ru](mailto:polyuhovich_ma@spbstu.ru)

### Abstract

The influence of hydrometeorological factors on the electric power transmission process can lead to disruptions in the electric power supply process. The basis of human activity is the decision. Therefore, in order to achieve the goal of the activity, the system-forming factor must be the human decision. Based on the decision model, a structural diagram of the electric power supply management system of region has been developed. In this case, the decision maker (DM) operates two processes in the course of activity: identification and neutralization of a factors group leading to the occurrence of an electric power transmission process disruption. Due to the large volume of data coming to the input of the electric power supply management system of region, some of the control support tasks must be automated in order to reduce the influence of the human factor. The most suitable technology for achieving this goal is artificial intelligence, the implementation of which is seen by the authors of the article on the basis of a neural networks cascade. The subject of the study is the electric power supply safety ensuring processes in conditions of environmental factors uncertainty. From a data array characterizing the state of the environment, the implementation of a neural networks cascade makes it possible to obtain the characteristics of the electric power supply management system of region - the average time of manifestation, identification and neutralization of the factors group leading to the occurrence of an electric power transmission process disruption. The analysis of these characteristics allows to determine the safety indicator of the electric power supply of region. If the safety indicator does not correspond to the required value, the approach based on the neural networks cascade allows to solve the inverse control support problem, determining the required average time of identification and neutralization of the factors group. The main advantage of the obtained results is that it is possible to change the composition of the neural networks cascade to solve problems that differ in subject matter. The developed neural networks cascade is supposed to be implemented in a unified system of models, with the help of which it will be possible to support the safety management of objects in various situations arising under conditions of uncertainty.

**Keywords:** safety management, artificial intelligence, neural networks, decision model, electric power transmission, modeling, forecasting.

## References

1. N. I. Popova, I. V. Loktev, "Elements of artificial intelligence in the context of national security", *Interexpo Geo-Siberia*. 2022. No. 2, pp. 131-135.
2. S. S. Vopilovsky, "Strategic trends in energy development of the northern territories of Russia", *AiS*. 2022. No. 49, pp. 23-37.
3. I. V. Usacheva, E. P. Romasevich, "Algorithms and methods for calculating operational transient modes of the power supply system of an industrial enterprise of complex configuration", *NAU*. 2020. No. 61-1 (61), pp. 47-52.
4. Yu. N. Bulatov, A. V. Kryukov, "Study of cybersecurity of predictive control algorithms for distributed generation installations", *Data analysis and processing systems*. 2021. No. 2 (82), pp. 19-34.
5. F. R. Ametov, E. A. Bekirov, "Development of a mathematical model and algorithm for implementing cybersecurity of control systems of electric power facilities", *TVIM*. 2022. No. 1 (54), pp. 30-39.
6. O. A. Khlopov, "Problems of cybersecurity and protection of critical infrastructure", *The Scientific Heritage*. 2020. No. 45-5 (45), pp. 64-69.
7. N. A. Ran, A. V. Antipov, E. V. Gorodnicheva, "Application of elements of probability theory in solving problems of electric power engineering", *SNV*. 2022. No. 2, pp. 315-319.
8. N. V. Nikolsky, L. P. Koroleva, "Study of big data analysis methods for applicability to solving economic problems in the electric power industry", *Innovative Economics: information, analytics, forecasts*. 2023. No. 1, pp. 132-139.
9. I. M. Kazymov, D. A. Boyarkov, B. S. Kompaneets, "Approaches to determining the amount of economic damage and risks of failure of electric power equipment", *Century of quality*. 2022. No. 3, pp. 150-162.
10. A. Kh. Musin, A. A. Zarubin, "Quantitative assessment of expected emergency undersupply of electric power as an indicator of risk of electric power supply of cities", *News of higher education institutions. Problems of energy*. 2013. No. 3-4, pp. 75-81.
11. A. A. Paren, A. S. Tereshchenko, "Retrospective: innovative and digital solutions in the energy sector", *Izvestia SPbGEU*. 2023. No. 2 (140), pp. 126-130.
12. B. K. Karybekova, M. S. Elchieva, U. Zh. Satybaldy, "Measures to improve reliability in electrical networks", *ReFocus*. 2023. No. 1, pp. 127-130.
13. K. R. Kraynov, E. A. Krotkov, "Integration of intelligent automatic control systems into power systems: advantages and disadvantages", *Stolypin Bulletin*. 2023. No. 11, pp. 5148-5160.
14. L. V. Massel, "The current stage of development of artificial intelligence (AI) and the application of AI methods and systems in energy", *Information and mathematical technologies in science and management*. 2021. No. 4 (24), pp. 5-20.
15. S. Xiang, C. Zhen, J. Peng, L. Zhang, Z. Pu, "Power load prediction of smart grid based on deep learning", *Procedia Computer Science*. 2023. No. 228, pp. 762-773.
16. Y. Y. Hong, Y. H. Chan, "Short-term electric load forecasting using particle swarm optimization-based convolutional neural network", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. No. 126.
17. Q. Zhang, W. Ma, G. Li, J. Ding, M. Xie, "Fault diagnosis of power grid based on variational mode decomposition and convolutional neural network", *Electric Power Systems Research*. 2022. No. 208.
18. A. Domyshev, D. Sidorov, "Optimization of the Structure of Power System Multi-Agent Control", *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55, pp. 250-255.
19. K. Su, L. Jiang, J. Liu, "Power source-power grid coordinated typhoon defense strategy based on multiagent dynamic game theory", *Global Energy Interconnection*. 2021. No. 4(3), pp. 285-294.
20. G. Wang, Y. Chao, Y. Cao, T. Jiang, W. Han, Z. Chen, "A comprehensive review of research works based on evolutionary game theory for sustainable energy development", *Energy Reports*. 2022.
21. S. Akhtar, M. Adeel, M. Iqbal, A. Namoun, A. Tufail, K. H. Kim, "Deep learning methods utilization in electric power systems", *Energy Reports*. 2023.
22. H. Mirshekali, A. Keshavarz, R. Dashti, S. Hafezi, H. R. Shaker, "Deep learning-based fault location framework in power distribution grids employing convolutional neural network based on capsule network", *Electric Power Systems Research*. 2023. No. 223.
23. K. Bitirgen, ? B. Filik, "A hybrid deep learning model for discrimination of physical disturbance and cyber-attack detection in smart grid", *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2023. No. 40.
24. V. Burlov, M. Polyukhov, V. Mankov, Yu. Logvinova, "Development of safety management technology of electric power networks in order to sustainable development", *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 274. P. 10004.
25. V.G. Burlov, M.A. Polyukhov, "Model of geoinformation management of electric power supply safety of the region in conditions of icing of overhead power lines", *Information and Space*. 2023. No. 2, pp. 84-94.
26. E.S. Grozmani, S.V. Petrov, "Development of a model of the information security management process for a cyber-physical system", *T-Comm*. 2022. No. 1, pp. 38-43.
27. A.V. Kuznetsova, V.A. Mokhov, S.M.M. Algazali, "Algorithms for training artificial neural networks: a teaching aid for studying the discipline Artificial Intelligence and Soft Computing", *Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk: PSRSPU (NPI)*, 2020. 72 p.
28. E.A. Shumkov, "Construction of a decision support system based on neural network technologies", *Scientific works of KubSTU*. 2022. No. 6, pp. 28-39.

## Information about authors:

**Vyacheslav G. Burlov**, doctor of technical sciences, professor of Higher School of Technosphere Safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia  
**Marina O. Avdeeva**, candidate of economic sciences, associate professor, associate professor of Higher School of Technospheric Safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

**Maxim A. Polyukhov**, assistant of Higher School of Technosphere Safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia