

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ РАСЧЕТА ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

А.В. Конухов, А.В. Прохоров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Расчет максимально допустимого перетока активной мощности (МДП) в контролируемых сечениях (КС), на данный момент, осуществляется на основе процесса последовательного утяжеления режима. На каждом шаге утяжеления выполняется расчет установившегося режима с помощью метода Ньютона-Рафсона, который также является итерационным и времязатратным. Кроме того, длительность расчета возрастает с увеличением размерности модели энергосистемы.

В настоящее время на этапах краткосрочного планирования и управления электрическим режимом автоматизированный расчет МДП выполняется с помощью ИУС «СМЗУ». При этом время, отводимое на расчет МДП, в рамках реализуемых деловых процессов, ограничено. В связи с этим, в ряде случаев прибегают к применению упрощенных алгоритмов расчета, загромождающих результаты оценки фактических и прогнозных значений МДП. В данной работе выдвигается гипотеза, что избавиться от итеративных вычислительных процедур и тем самым ускорить расчет МДП позволит разработка метода, основанного на использовании радиально-базисной нейронной сети (RBFN). Ускорение расчета МДП обеспечит дополнительные возможности для повышения эффективности краткосрочного планирования и управления электрическими режимами.

## ОБОСНОВАНИЯ ПОДХОДА

Значение МДП является одним из входных параметров для таких этапов краткосрочного планирования энергетического режима как ВСВГО и ПЭР. МДП для данных этапов, в ОЭС Сибири, определяются в ПО «ГРОМ» с использованием технологии СМЗУ на основании параметров режима энергосистемы в характерных сутках с аналогичными или близкими схемно-режимными и балансовыми ситуациями. Производить расчёты МДП в рамках решения оптимизационных задач ВСВГО, и ПЭР в настоящее время не представляется невозможным, так как процедуры итерационного расчета являются чрезмерно длительными. Предполагается, что новый алгоритм расчета МДП, основанный на применении ИНС, позволит существенно снизить время расчета. Это в свою очередь повысит эффективность краткосрочного планирования энергетического режима.

Кроме того, на этапе управления электрическим режимом ИУС «СМЗУ» рассчитывает значения МДП на основании телеметрической информации о текущей схемно-режимной ситуации. Однако при изменении топологии сети существует риск скачкообразного изменения значения МДП и ИУС «СМЗУ» переходит в режим ускоренного цикла расчета, в котором определяется МДП только по критерию 20% запаса статической устойчивости. Отказ от расчета

других критериев МДП обусловлен необходимостью снизить время расчета СМЗУ при изменении топологии сети и как можно быстрее предоставить диспетчерскому персоналу данные о сетевых ограничениях. Данное допущение может привести к тому, что при изменении топологии сети, переток мощности по КС будет превышать значения МДП с ПА по критерию 8% запаса статической устойчивости в послеаварийном режиме, а диспетчер узнает об этом только по результатам следующего цикла СМЗУ (спустя 3-4 минуты). Ожидается, что ускорение расчета допустимых перетоков с помощью предлагаемого метода позволит отображать значение МДП на диспетчерском щите спустя несколько секунд после этапа оценки состояния, что позволит повысить эффективность управления электрическим режимом.

Одним из путей ускорения расчета допустимых перетоков в КС является создание алгоритма, который исключает необходимость выполнения итерационных процедур (утяжеление, расчет режима) непосредственно в процессе решения технологической задачи (реализации делового процесса). Применение искусственных нейронных сетей (ИНС) позволяет решить данную задачу. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными и выходными данными, а также выполнять обобщение. Это может быть полезным при решении задачи поиска допустимых перетоков по активной мощности, так как существует множество факторов, влияющих на величину МДП.

#### МЕТОДИКИ ОБУЧЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ИНС

В ходе исследования была определена методика обучения ИНС. Основной её идеей является использование в качестве источника данных для обучения искусственно сгенерированного набора данных на основе модели СМЗУ. Файлы расчетной модели, выгружаемые из СМЗУ, служат основой для искусственной генерации электрических режимов.

Искусственная генерация электрических режимов необходима ввиду недостаточности объема ретроспективной информации СМЗУ для формирования обучающей выборки для каждой топологии сети и для каждого возможного критерия МДП.

Необходимость обучения ИНС под каждую топологию сети, влияющую на значение МДП, и для каждого критерия МДП обусловлена разным перечнем влияющих факторов в каждом из случаев, что требует индивидуального подбора гиперпараметров ИНС для обеспечения приемлемой точности. В дальнейшем подбор гиперпараметров ИНС и определение влияющих факторов будет осуществляться автоматизировано.

Логика обучения ИНС по данным искусственно сгенерированных режимов приведена на Рис. 1а. Процесс оценки МДП на основе обученных моделей изображен на Рис. 1б.

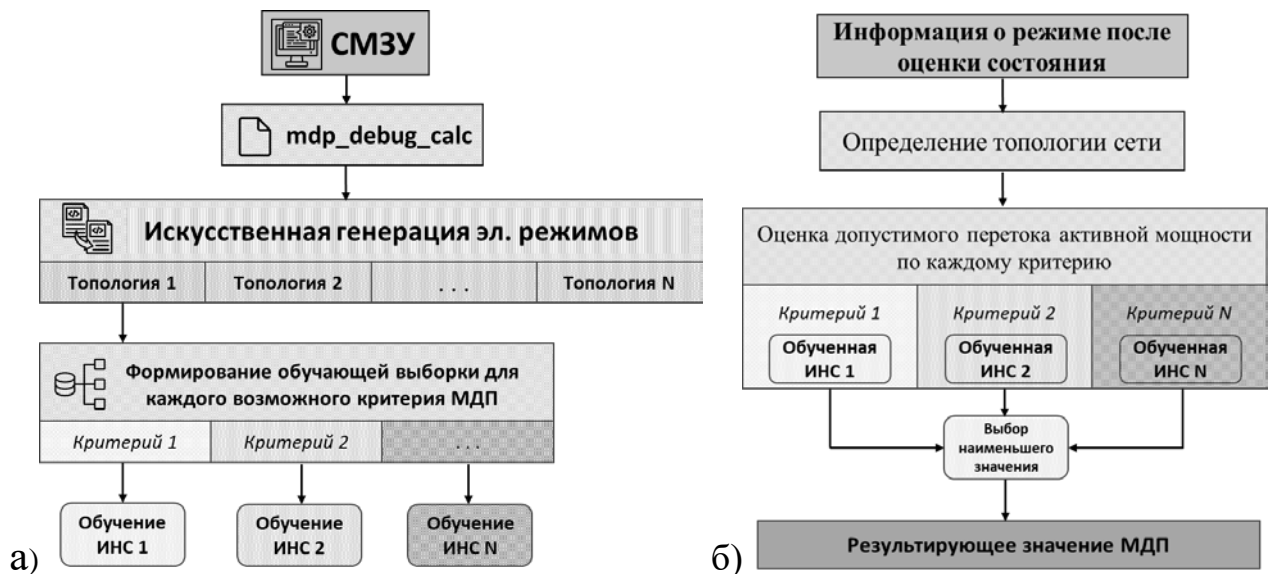


Рис. 1. а) Логика обучения ИНС по данным искусственно сгенерированных режимов.

б) Процесс оценки МДП с помощью нейросети.

## ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для апробации предложенного метода расчета МДП с помощью нейросети было выбрано контролируемое сечение Братск – Иркутск.

Состав сечения:

- ВЛ 500кВ Братский ПП – ПС Новозиминская;
- ВЛ 500кВ БГЭС– ПС Тулун № 1;
- ВЛ 500кВ БГЭС– ПС Тулун № 2.

По данному КС в зависимости от схемно-режимной ситуации МДП достигается как по токовому критерию в послеаварийном режиме, так и по 8% запасу статической апериодической устойчивости в послеаварийном режиме. Исходя из этого, исследована способность ИНС определять значение МДП по разным критериям.

Первые эксперименты были направлены на создание модели ИНС, подбор ее гиперпараметров и обучении на ретроспективных данных СМЗУ за 5 дней. Оценка точности определения МДП без ПА происходила на валидационной выборке, состоявшей из данных СМЗУ за 2 дня, которые не участвовали в обучении ИНС. Параметры ИНС приведены в таблице 1.

Таблица 1 Параметры ИНС

Тип нейросети	RBFN
Количество скрытых слоев	2
Функция активации	relu
Алгоритм оптимизации	Adam
Функция потерь	MSE
Количество нейронов в скрытых слоях	64
Кол-во эпох обучения	Автоматически определяемое

Сравнение результатов расчета МДП СМЗУ и МДП с помощью ИНС (МДП ИНС) по токовому критерию в послеаварийном режиме в нормальной схеме представлено на Рис. 2.

Дальнейшие эксперименты выполнялись, согласно предложенной методики, по определению МДП без ПА, с помощью нейросети, обученной на искусственно-сгенерированных режимах. Исследуемая схема сети:

- Ремонт ВЛ 500кВ Братская ГЭС – Тулун №2;
- Зашунтирован УПК Тыреть.

Сравнение результатов расчета МДП СМЗУ и МДП с помощью ИНС, обученной на искусственно сгенерированных режимах представлено на Рис 3. Точность оценки МДП при таком подходе немного ниже точности оценки МДП с помощью ИНС, обученной на ретроспективных данных (Таблица 2).

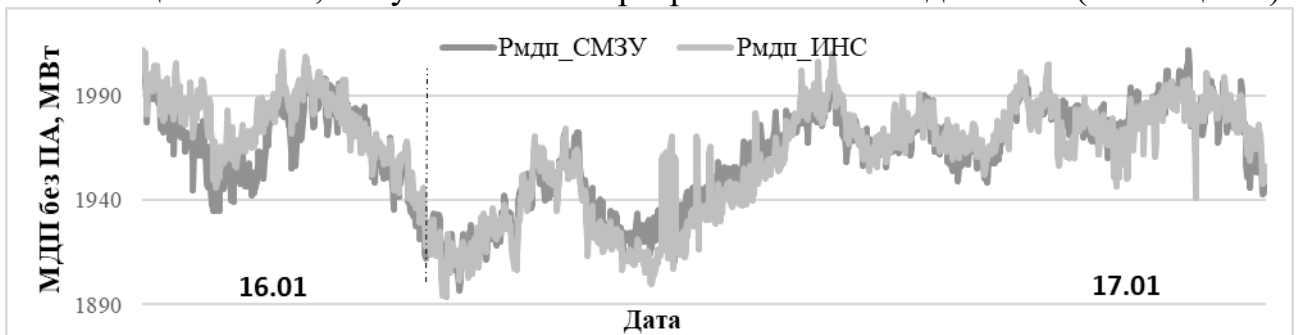


Рис. 2. Сравнительный анализ результатов расчета МДП СМЗУ и МДП ИНС в КС «Братск – Иркутск» (Токовый критерий)

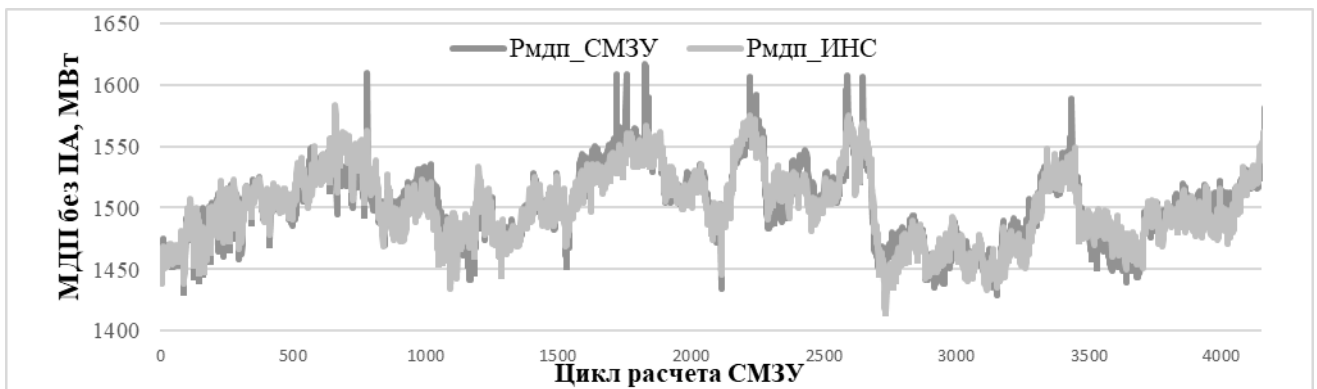


Рис. 3. Сравнительный анализ результатов расчета МДП СМЗУ и МДП ИНС в КС «Братск – Иркутск» (Критерий 8% запаса по статике)

Искусственная генерация электрических режимов осуществлялась на основе выгружаемого файла расчетной модели СМЗУ, в котором случайным образом изменялись значения активной и реактивной мощностей нагрузки, а также активной мощности генерации.

Результаты экспериментов подтверждают состоятельность предложенного подхода к формированию обучающей выборки на основе искусственно сгенерированных режимов. Точность определения МДП без ПА является удовлетворительной (Таблица 2).

Таблица 2 Ошибка расчета МДП без ПА с помощью ИНС

Источник формирования обучающей выборки ИНС	Искусственно-сгенерированные режимы	Ретроспективные данные СМЗУ
Кол-во режимов в валидационной выборке	4250	1557
Максимальная относительная ошибка, %	-3,9	-1,76
Максимальная абсолютная ошибка, МВт	54,2	23,1
Кол-во режимов с ошибкой >2%	18	0
Кол-во режимов с ошибкой >1%	387	82
Кол-во режимов с ошибкой >0,5%	2120	368
Кол-во режимов с ошибкой >0,1%	3400	1262

Таким образом, еще до наступления схемной ситуации, которая определяет значение МДП, могут быть сформированы модели в виде ИНС, способные оценивать значение допустимого перетока по заданному определяющему критерию. Однако необходимо учитывать, что ИНС будет являться актуальной до того момента, пока параметры схемы и состав элементов модели СМЗУ остаются неизменными

Повторное обучение ИНС необходимо выполнять при следующих значимых изменениях модели энергосистемы:

1. Изменение сопротивлений ветвей, входящих в сечение и ветвей участвующих в моделировании аварийных процессов;
2. Добавление в схему энергосистемы новых генерирующих мощностей, выработка которых может повлиять на переток активной мощности по КС;
3. Добавление в схему энергосистемы ВЛ, которые могут повлиять на значение МДП в КС.
4. Добавление в схему энергосистемы СКРМ, которые могут повлиять на значение МДП в КС

## РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Обосновано применение ИНС для повышения скорости оценки допустимых перетоков активной мощности.
2. Предложена методика оценки допустимых перетоков активной мощности с использованием ИНС.
3. Показано, что применение ИНС позволяет значительно сократить время оценки допустимых перетоков.
4. Применены следующие методы повышения точности ИНС:
  - увеличение размера обучающей выборки;

- удаление из обучающей выборки коррелирующих между собой признаков;
- прореживание входных данных, с помощью Dropout слоев;
- применение L1 и L2 регуляризации данных;
- подбор коэффициента скорости обучения.

5. Выполнено сравнение результаты расчета МДП с помощью СМЗУ и с помощью ИНС на примере расчетов для сечения Братск-Иркутск ОЭС Сибири.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного исследования предложен метод определения допустимых перетоков активной мощности по КС, основанный на применении искусственной нейронной сети RBFN. Результаты вычислительных экспериментов по обучению ИНС на модели ОЭС Сибири подтверждают, что применение ИНС позволяет определять значения допустимых перетоков по активной мощности с сохранением точности за минимальное время (до 0,1 с.).

Эксперименты по определению МДП с помощью ИНС, обученной на искусственно сгенерированных данных, показали удовлетворительную точность, что подтверждает возможность практического применения предложенных решений.

Дальнейшие исследования будут направлены на развитие методики и ее применение для оценки МДП с учетом противоаварийной автоматики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по устойчивости энергосистем / Министерство энергетики Российской Федерации. – Москва: НЦ ЭНАС, 2018. – 25 с.
2. Machine/Deeping Learning in power system stability margin prediction and contingency screening
3. Положение по управлению режимами работы энергосистемы в операционной зоне Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири. – Кемерово: АО «СО ЕЭС», 2022
4. Приложение №3.1 к договору о присоединении к торговой системе оптового рынка «Регламент проведения расчетов выбора состава включенного генерирующего оборудования» ; Москва, 2009. – 24с.
5. Руководство пользователя TensorFlow.
6. Руководство пользователя Keras.
7. Руководство пользователя RastrWin3.