



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

«ВЛИЯНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ НА ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ»

Авторы:

Шлапак Михаил Родионович – студент ИШЭ ТПУ
Прохоров Антон Викторович – доцент к.т.н. ТПУ

Новосибирск - 2025



Актуальность работы



Проблема: в оптимизационных расчетах для задач управления режимами ограничения пропускной способности задаются постоянными.



Решение: использование ИНС для расчёта допустимых перетоков активной мощности.



Актуальность: безытерационный способ расчёта позволяет сократить время расчёта и использовать актуальные ДП в оптимизационном цикле.

Раннее разработанное решение

Прототип №1. ПО для обучения ИНС и оценки с её помощью МДП.

Недостатки:

- **Отсутствие учёта** величины реактивной мощности генераторов во входном слое ИНС.
- Тестирование на режимах с **неизменной** топологией.
- **Неполная** автоматизация процесса обучения ИНС.

Задачи:

- Автоматизация процесса обучения ИНС.
- Модификация конфигурации ИНС с целью добавления реактивной мощности генерации в инъекции.
- Оценить эффект от учёта реактивной мощности генераторов электростанций во входном слое ИНС на ретроспективных режимах СМЗУ.

* далее: **конфигурация ИНС** – состав входных и выходных параметров нейронной сети.



ИНС тестировалась на примере контролируемого сечения ОЭС Сибири: **Братск – Иркутск**

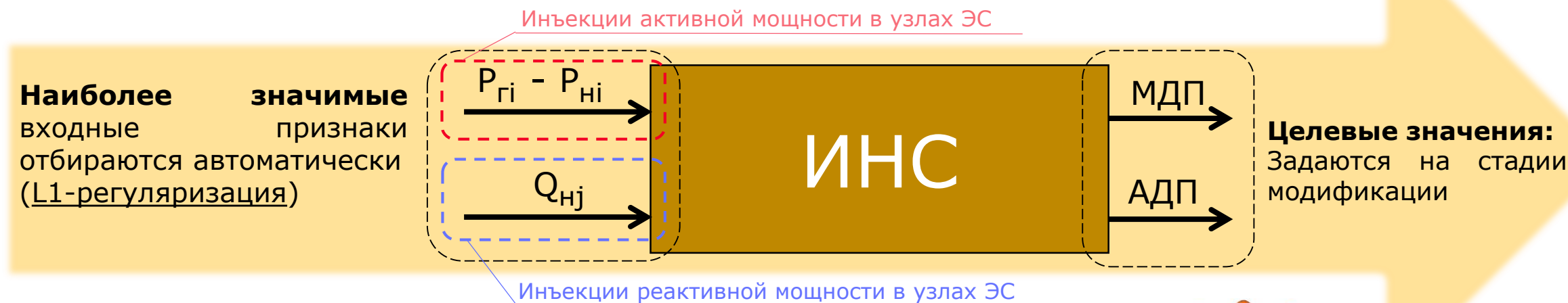
Таблица 1 — Результаты тестирования

Источник формирования обучающей выборки ИНС	Искусственно сгенерированные режимы	Ретроспективные данные СМЗУ
Количество режимов в выборке	4250	1557
Максимальная абсолютная ошибка, МВт	-3,9	-1,76
Максимальная относительная ошибка, %	54,2	23,1
Время расчёта	≈ 0,1 с	

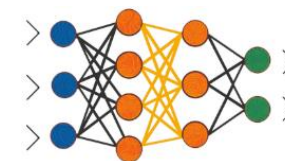
Используемое ПО для задач исследования

Прототип №2. Модифицированное ПО для обучения ИНС и оценки с её помощью МДП и АДП

Конфигурация ИНС в составе модифицированного ПО:



Используемая **архитектура ИНС** – многослойный перцептрон (MLP)



Набор данных для обучения формируется путём модификации файла формата «.rg2» реального режима энергосистемы, принимаемого в качестве базового



Для каждого критерия назначения допустимого перетока и для каждой топологии обучается отдельная ИНС



В текущей конфигурации **не учитывается** реактивная мощность генераторов (Q_g) электростанций в составе входного слоя ИНС

Алгоритм оценки ДП при помощи ИНС

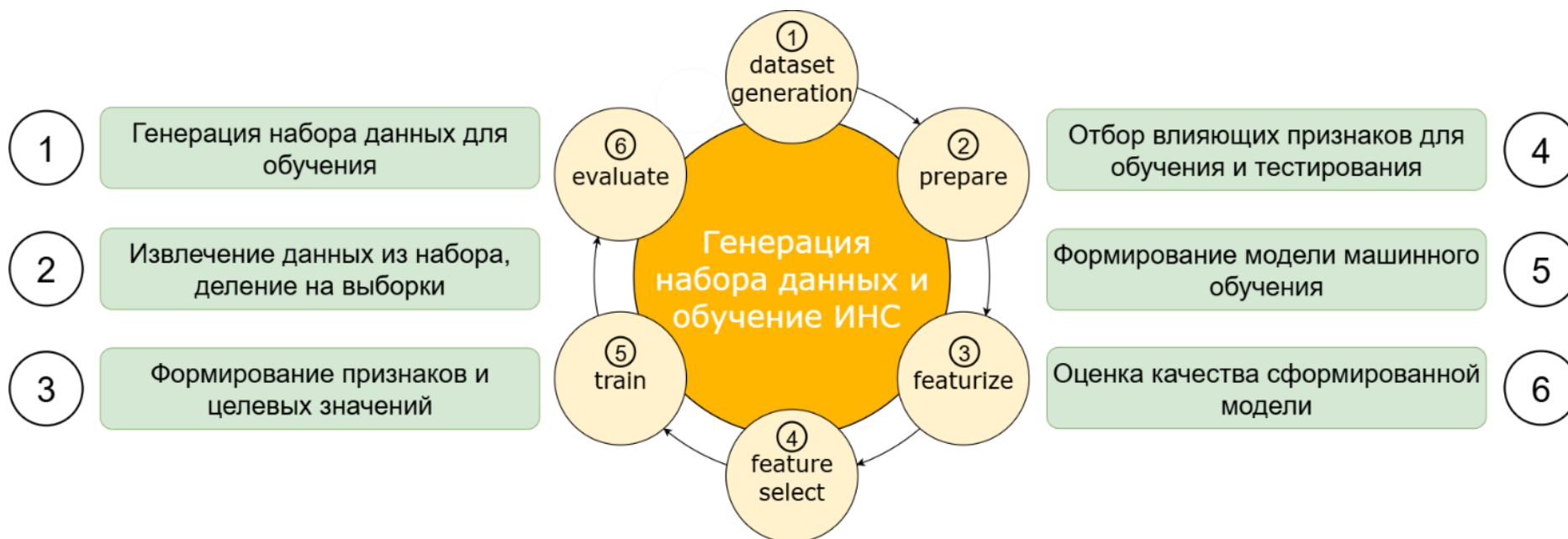


Рисунок 1 — Алгоритм генерации режимов и обучения ИНС

Особенности:

- Для формирования выборки используется **искусственная генерация** режимов.
- Подбор гиперпараметров методом **случайного поиска**.
- Тестирование ИНС на **сгенерированной выборке** и на **ретроспективных режимах СМЗУ**, собранных за двое суток.

Используемые инструменты:



DVC – инструмент для управления версиями моделей в ML-проектах.



Python – высокоуровневый, интерпретируемый язык программирования.



PyCharm – среда разработки для программирования на языке Python.

Подбор гиперпараметров


Теоретические сведения

Гиперпараметры — параметры машинного обучения, которые используются для управления процессом обучения. Значения гиперпараметров устанавливаются **перед началом обучения**, в отличие от значений других параметров (весов узлов), которые определяются во время обучения. От подобранных гиперпараметров в значительной степени зависит **качество обучения** нейронной сети. В таблице 2 приведены гиперпараметры, которые подбирались перед обучением ИНС.

Таблица 2 — Подобранные гиперпараметры, наилучший результат из всех итераций


Коэффициент L1 регуляризации	Скорость обучения	Коэффициент L2 регуляризации	Количество скрытых слоев и нейронов
0,1	0,001	0,01	[32, 64]

 Цикл подбора гиперпараметров включает **100 итераций** обучения модели с различными гиперпараметрами.

 **Допущение:** во всех дальнейших опытах был использован единый, заранее найденный набор значений гиперпараметров, показавший наилучший результат на валидационной выборке для исходного состава входных признаков (из таблицы 2).

Исходные данные

Состав контролируемого сечения

 ВЛ 500кВ Братский ПП – ПС Новозиминская (ВЛ-560);

 ВЛ 500кВ БГЭС– ПС Тулун, 1 цепь (ВЛ-561);

 ВЛ 500кВ БГЭС– ПС Тулун, 2 цепь (ВЛ-562)

Ремонтная схема во всех используемых режимах СМЗУ

Зашунтировано УПК Тыреть 500 кВ и ремонт ВЛ 500 кВ Братская ГЭС – Тулун №2 (ВЛ-562)

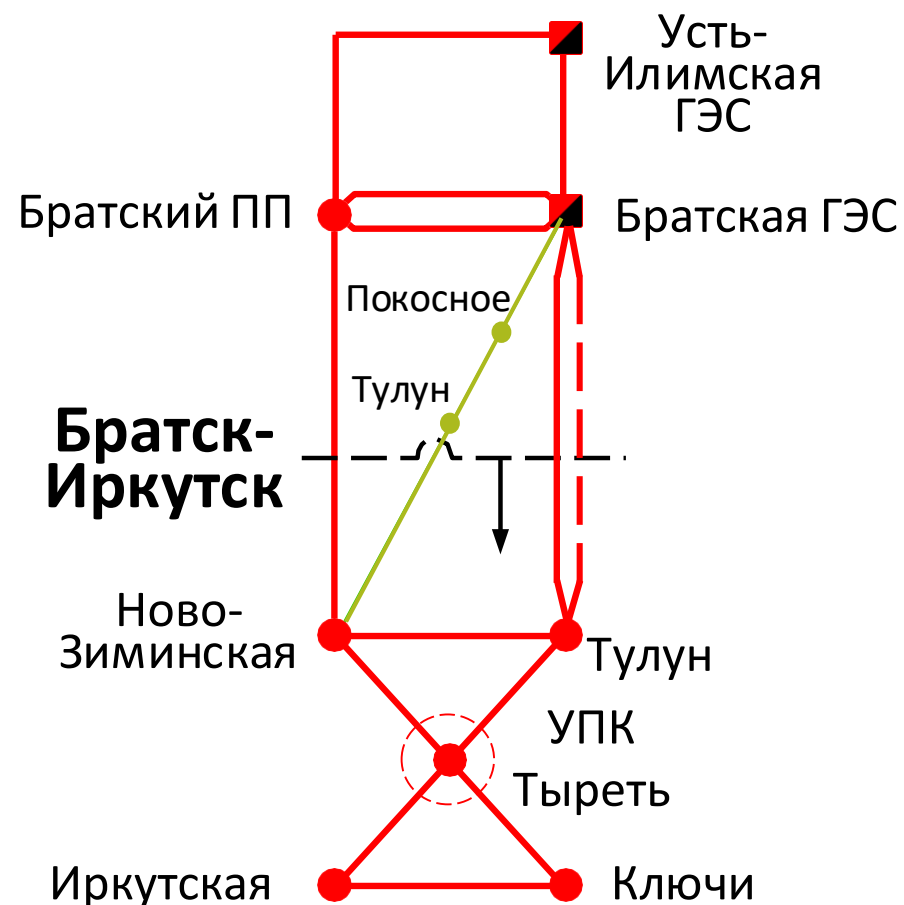
Критерий МДП без ПА

8% Р п.а. схема

Критерий АДП

8% Р исходная схема

Структура рассматриваемого сечения



Оценка точности обученной модели на искусственно сгенерированных режимах

Результат **оценки** модели, обученной с подобранными гиперпараметрами, приведён в таблице 3.

Таблица 3 — Результаты оценки МДП и АДП на **искусственно сгенерированной тестовой** выборке

Параметр	Гиперпараметры				Метрики		
	alpha (lasso)	lr_init	l2_penalty	neuron_per_layers	mae, МВт	mape, %	max_error, МВт
МДП без ПА	0,100	0,001	0,010	[32, 64]	0,703	0,048	7,982
АДП					0,872	0,043	10,891

Сведения об объёме используемых выборок:

- Состав **сгенерированной** выборки — 50 000 электрических режимов (время генерации \approx 17 часов);
- Состав **выделенной обучающей** выборки — 35 000 электрических режимов;
- Состав **выделенной валидационной** выборки — 10 000 электрических режимов;
- Состав **выделенной тестовой** выборки — 5 000 электрических режимов.

Распределение перетоков в тестовой выборке:

- **Диапазон изменения величины МДП без ПА в выборке** — 1415,54 – 1505,68 МВт;
- **Диапазон изменения величины АДП в выборке** — 1957,72 – 2099,87 МВт.

Оценка точности обученной модели на ретроспективных режимах СМЗУ

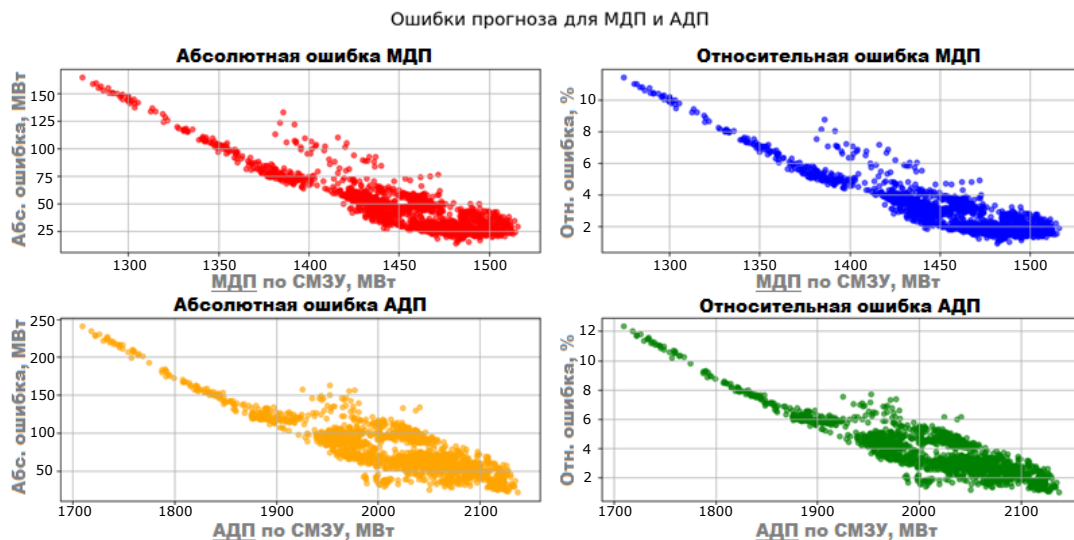


Рисунок 2 — Диаграммы ошибок

Таблица 4 — Полученные значения метрик

Метрики для МДП		Метрики для АДП	
mae, МВт	47,72	mae, МВт	82,09
mare, %	3,34	mare, %	4,16
max_absolute error, МВт	164,49	max_absolute error, МВт	240,82

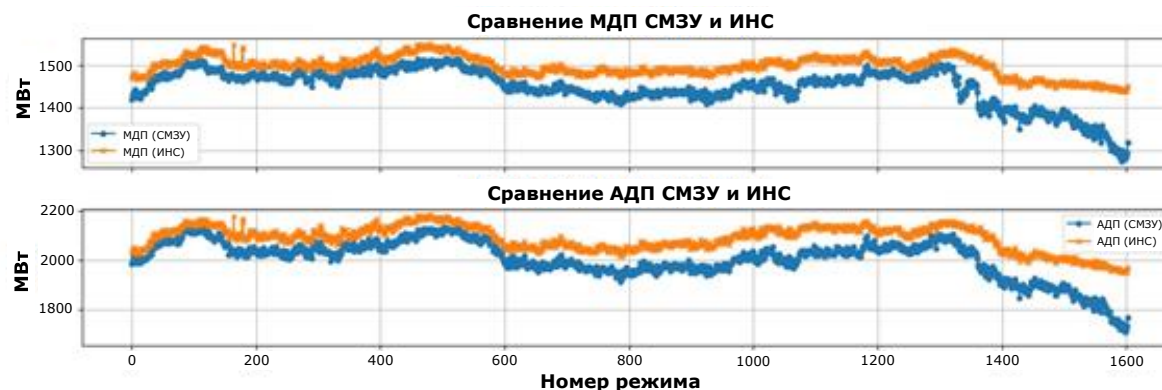


Рисунок 3 — Сравнение перетоков СМЗУ и ИНС

Исходные данные:

1603 файла СМЗУ расчётной модели ОЭС Сибири за период: **07.04.2023 - 08.04.2023.**

Из них:


- 69 режимов с постоянной топологией (08.04.2023_09:01:25 – 08.04.2023_11:02:51).

Изменённая конфигурация: учёт реактивной мощности генераторов во входном слое ИНС

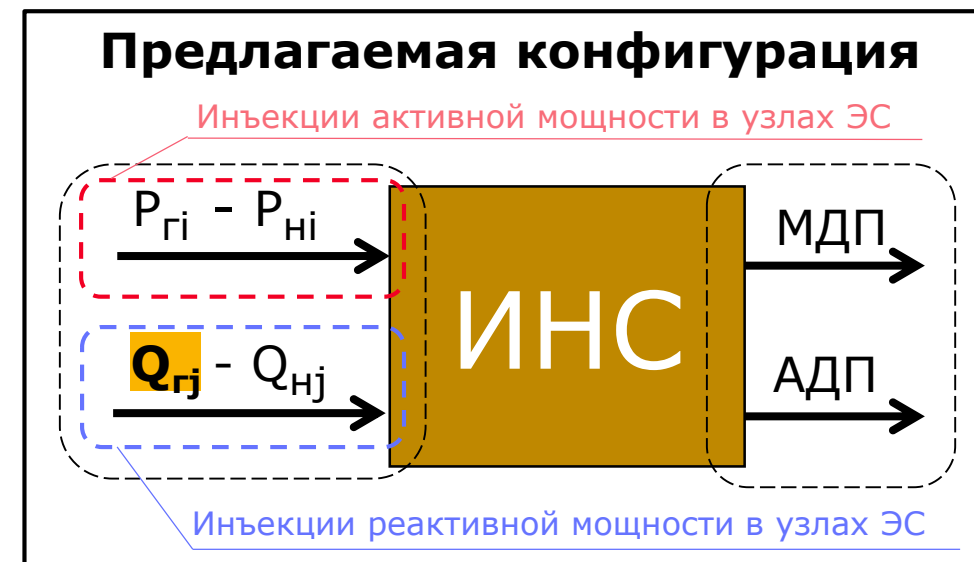
Последовательность учёта Q_g в модели:

Наиболее значимые инъекции отбираются автоматически при помощи алгоритма **Lasso-регрессии**.

1) Изначально (без учёта Q_g) была отобрана **81 инъекция Q** . В данных узлах присутствует генерация ($Q_g = 616,3$ МВАр), однако она не учитывается в инъекциях. Также не отбираются узлы генерации влияющих электростанций.

 Для оценки эффекта от учёта реактивной мощности в инъекциях была произведена **модификация** конфигурации ИНС: теперь инъекции Q содержат как мощность нагрузки, так и **генерации**, $\Rightarrow 616,3$ МВАр теперь учитываются при оценке ДП.

2) К 81 отобранной инъекции Q последовательно добавляются инъекции узлов влияющих электростанций (табл. 5). Результаты фиксируются на метриках.



! Суммарный объем **Q_g влияющих станций**, учтенный в экспериментах: 789,5 МВАр.

План экспериментов

План экспериментов по **поэтапному добавлению Q_г** влияющих станций приведен в таблице 5.

Таблица 5 — План экспериментов по добавлению Q_г

№ опыта	Описание изменений	Количество отобранный инъекций активной мощности (inj_P)	Количество отобранных инъекций реактивной мощности (inj_Q)	Величина Q _г , дополнительно учитываемая в инъекциях, МВар
1	Модель без учёта Q _г (исходная)	259	81	0
2	Модель с учётом Q _г в инъекциях (входах), отобранных в опыте 1		81	616,3
3	К входам из опыта 2 добавлена Q _г Гусиноозёрской ГРЭС		85	63,7
4	К входам из опыта 3 добавлена Q _г Харанорской ГРЭС		87	31,6
5	К входам из опыта 4 добавлена Q _г Ново-Иркутской ТЭЦ		90	136,9
6	К входам из опыта 5 добавлена Q _г Иркутской ТЭЦ-9, ТЭЦ-10, ТЭЦ-11		101	353,1
7	К входам из опыта 6 добавлена Q _г Иркутской ГЭС		106	204,2

Результат проведённых экспериментов

Результат опытов представлены на рисунке 4. По оси X – номер опыта, по оси Y – величина ошибки по ключевым метрикам. В каждом из опытов наблюдается снижение погрешности расчёта МДП и АДП по всем метрикам. Чем больше узлов влияющих электростанций добавляется во входной слой ИНС и **чем больше** объем реактивной мощности в этих узлах, **тем сильнее** снижается погрешность.

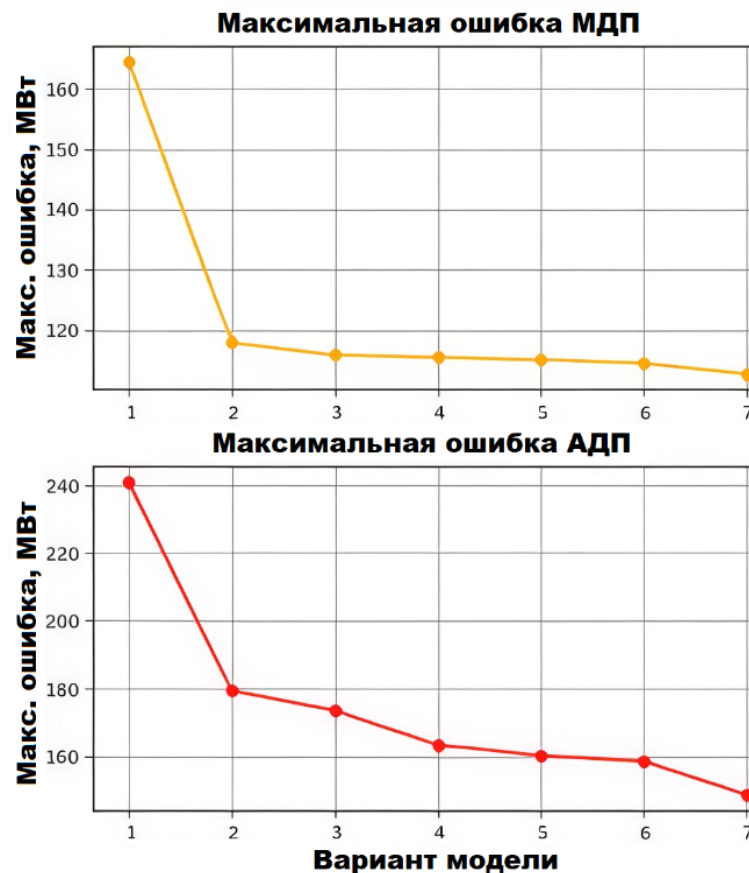
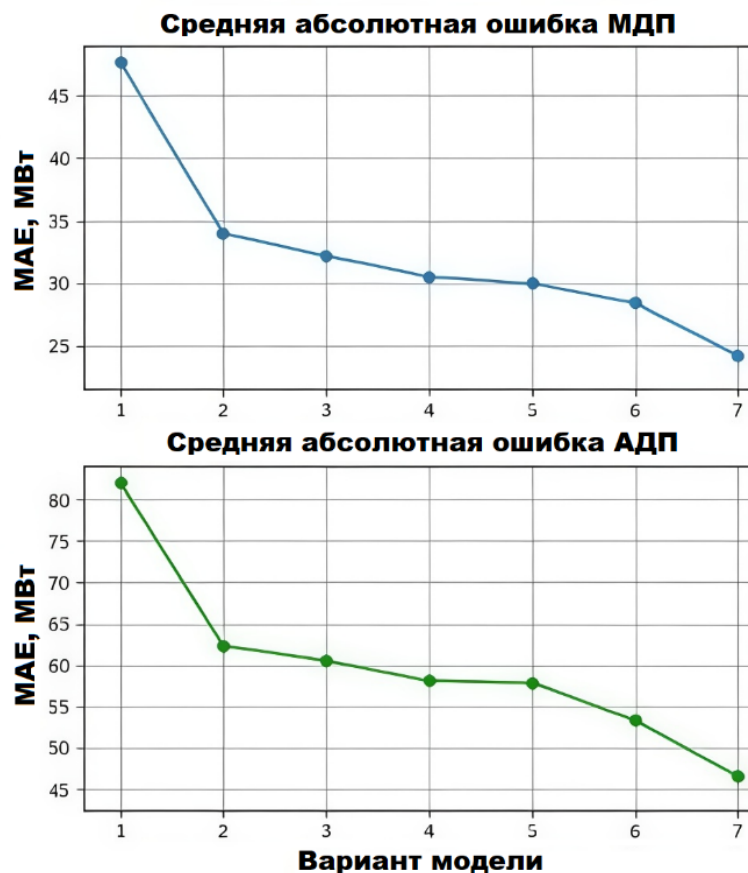


Таблица 6 — Учитываемые ЭС

№ опыта	Описание изменений
1	Модель без учёта Qg (исходная)
2	Модель с учётом Qg в инъекциях (входах), отобранных в опыте 1
3	К входам из опыта 2 добавлена Qg Гусиноозёрской ГРЭС
4	К входам из опыта 3 добавлена Qg Харанорской ГРЭС
5	К входам из опыта 4 добавлена Qg Ново-Иркутской ТЭЦ
6	К входам из опыта 5 добавлена Qg Иркутской ТЭЦ-9, ТЭЦ-10, ТЭЦ-11
7	К входам из опыта 6 добавлена Qg Иркутской ГЭС

Рисунок 4 — Снижение погрешности при учёте Qg

Наилучшая точность, достигнутая при учёте Qг в инъекциях

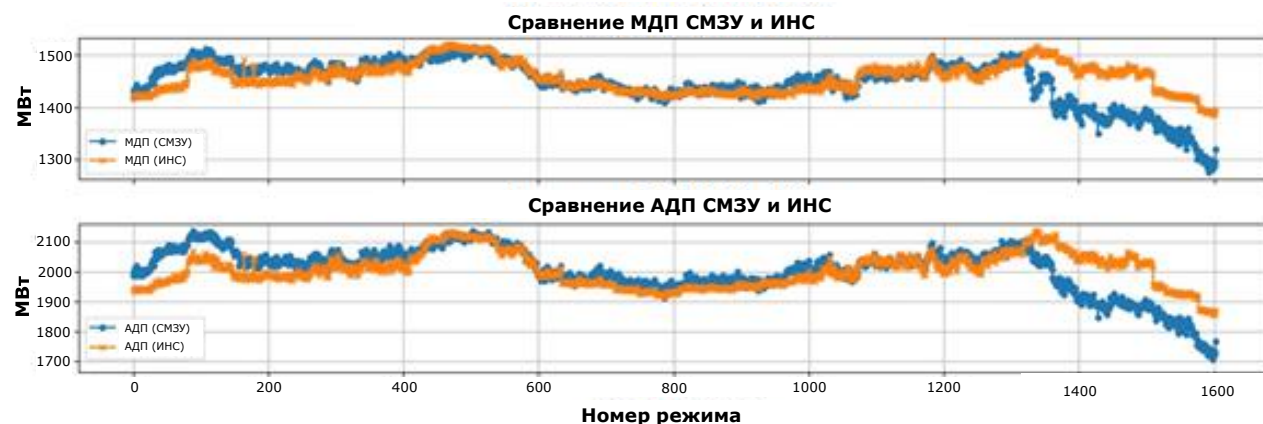


Рисунок 5 — Сравнение перетоков СМЗУ и ИНС для наилучшего случая

Таблица 7 — Оценка точности определения ДП в сравнении с результатами эксперимента №1

Метрика	МДП, МВт		АДП, МВт	
	Значение	Прирост точности	Значение	Прирост точности
mae, МВт	22,76	-24,96	44,37	-37,72
mare, %	1,62	-1,72	2,26	-1,90
max_absolute_error, МВт	123,43	-41,06	173,23	-67,59

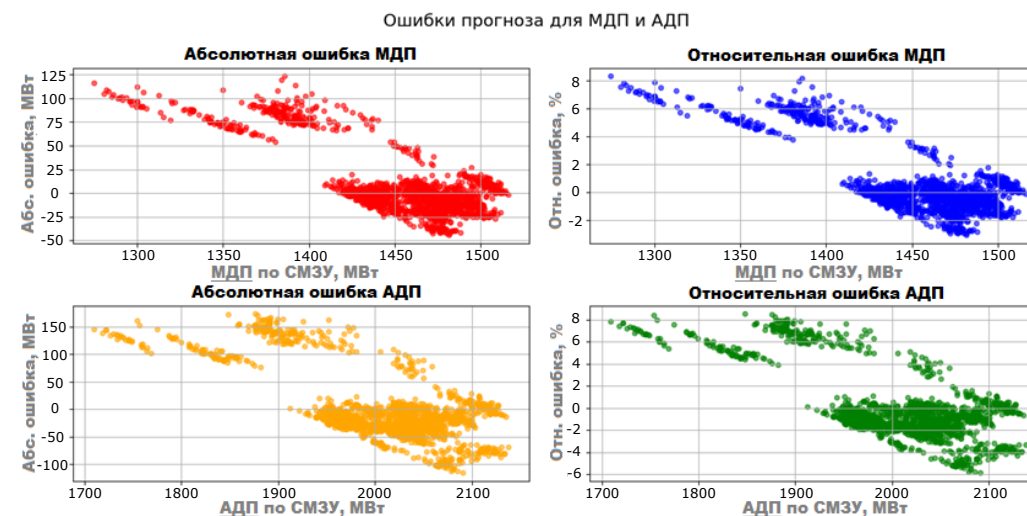


Рисунок 6 — Диаграммы ошибок

Результат:

Существенное повышение точности

Наиболее значимые причины погрешностей:

- Состав входных признаков
- Влияние топологии электрической сети

Сопоставление с результатами опыта №1

Ошибки прогноза для МДП и АДП

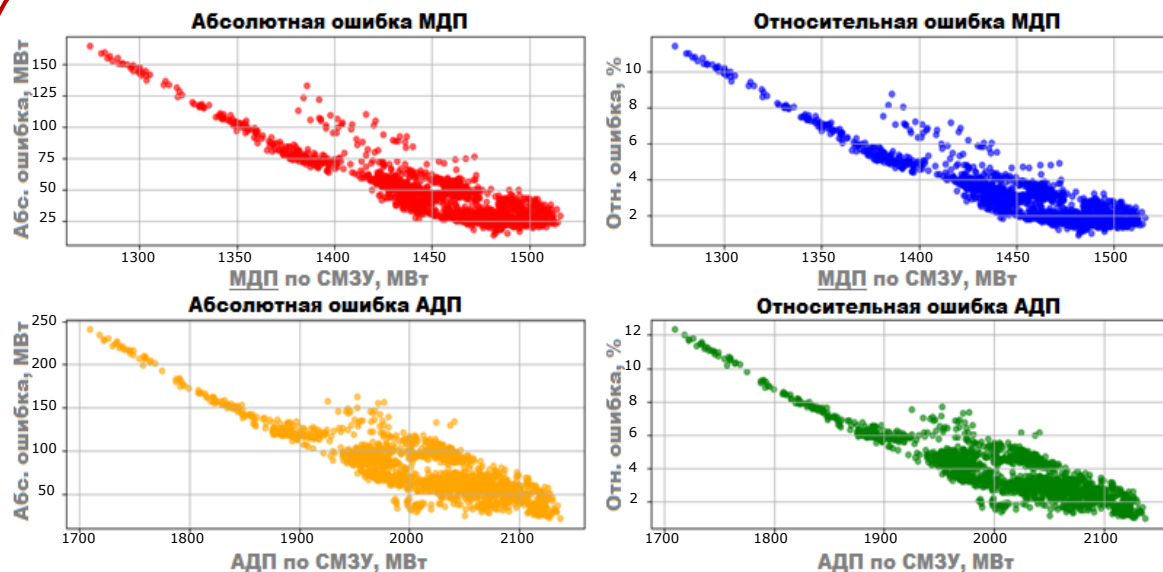


Рисунок 7 — Диаграммы ошибок для модели **без учёта Qg** в отобранных инъекциях реактивных мощностей

Ошибки прогноза для МДП и АДП

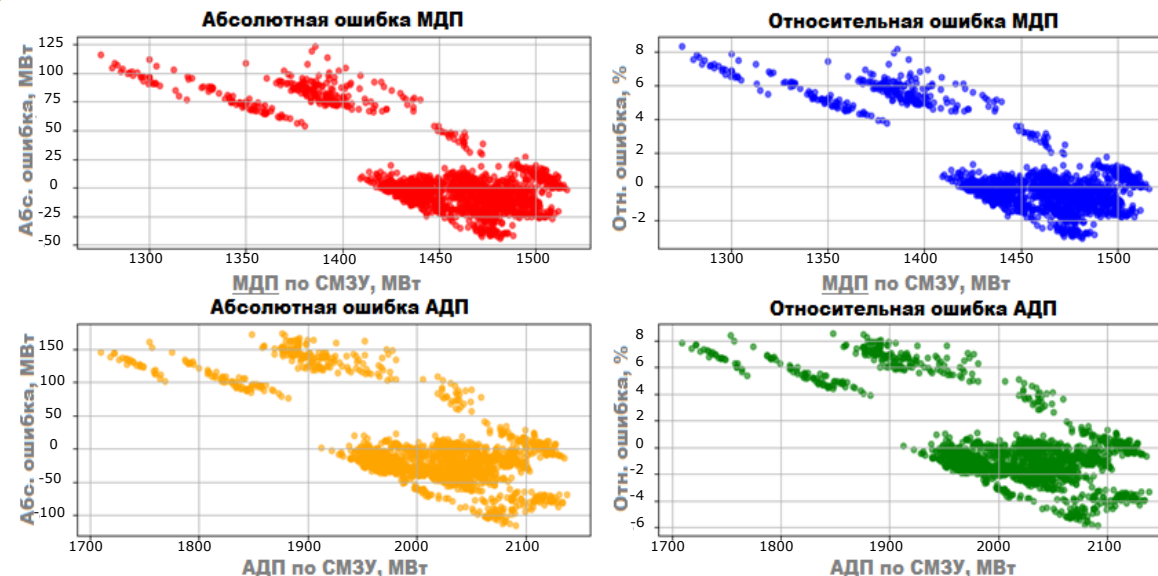


Рисунок 8 — Диаграммы ошибок для модели **с учётом Qg** в отобранных инъекциях реактивных мощностей и добавлением **Qg влияющих станций**

Заключение

Основные результаты исследования:

Результаты исследования подтвердили, что предложенная конфигурация ИНС позволяет получить более высокую точность оценки допустимых перетоков в сравнении с моделью, представленной ранее.

В рамках дальнейших исследований целесообразно:

В части модификации **конфигурации ИНС**:

- оценить влияние изменения топологии электрической сети на точность обученной модели;
- рассмотреть дополнительные входные параметры для ИНС;
- рассмотреть вопросы генерации данных для обучения ИНС, описывающих более широкую область существования электроэнергетического режима;
- проанализировать целесообразность учета инъекций реактивной мощности, отбрасываемых при регуляризации;
- выполнить обучение и тестирование ИНС с различными составами выходного слоя.

В части **модификации ПО**:

- алгоритмизировать способ отбора значимых инъекций.



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

«ВЛИЯНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ НА ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ»

Авторы:

Шлапак Михаил Родионович – студент ИШЭ ТПУ
Прохоров Антон Викторович – доцент к.т.н. ТПУ

Новосибирск - 2025

