

Прогнозирование скорости ветрового потока как составляющей части климатических факторов в задаче учета тепловых процессов при расчете установившегося режима электрических сетей

А.О. Шепелев, С.Ю. Швецов

Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

Аннотация: увеличение точности расчета установившегося режима возможно при учете тепловых процессов, протекающих в проводниках электрической энергии. Скорость ветрового потока в свою очередь имеет значительное значение при определении температуры проводника. В данной статье рассмотрены значения скорости ветра за 11-летний период. Проведен анализ временного ряда и протестированы модели прогнозирования целевой переменной, а также проведено сравнение результатов прогнозирования.

Ключевые слова: расчет режима электрических сетей, тепловые процессы, скорость ветрового потока, модели прогнозирования, нейронная сеть прямого распространения, ансамблевые методы.

I. Введение.

Ранее нами была рассмотрена возможность прогнозирования температуры окружающей среды с использованием современных методов анализа временных рядов. Полученные результаты удовлетворяли техническим требованиям, предъявляемым к задачам оперативного расчета температурного режима [1]. Однако повышение точности определения температуры проводников требует более детального учета внешних тепловых воздействий [2,3]. Одним из наиболее значимых факторов, влияющих на тепловое состояние проводников, является скорость ветрового потока, так как именно она определяет эффективность теплоотдачи от проводника в окружающую среду.

В задачах энергетики, особенно при моделировании режимов работы воздушных линий электропередачи, точный прогноз скорости ветра становится критически важным. Учет ветрового охлаждения позволяет уточнить допустимые токовые нагрузки и повысить надежность работы электросетевого оборудования.

Несмотря на значительное внимание к прогнозированию погодных условий в целом [4-7], точностные и структурные особенности модели ветрового потока в контексте применения в энергетике остаются недостаточно исследованными. Особенно это касается исторически длительных периодов наблюдений, а также выбора моделей, способных обеспечить устойчивые результаты в условиях климатической изменчивости [5]. Это обуславливает необходимость анализа доступных данных и апробации современных методов прогнозирования применительно к конкретным техническим задачам электроэнергетики.

II. Постановка задачи.

Для анализа метеоусловий был использован временной ряд, содержащий данные о скорости ветра (F_f), с интервалом в 30 минут за период с 1 мая 2013 года по 1 мая 2024 года. После исключения неполных записей итоговый объем выборки составил 174 768 наблюдений.

Задачей настоящего исследования является построение и сравнение различных моделей машинного обучения для прогнозирования скорости ветра на основе временного ряда за 11-летний период.

III. Теория.

Для подготовки данных к машинному анализу были выделены следующие признаки, представленные в виде вещественных чисел:

Скорость ветра (F_f), м/с; Год (year); Сезон (season); Месяц (month); День месяца (day); День года (dayofyear); Час (hour); Минуты (minute).

На Рис.1 представлена степень линейной зависимости между признаками. Наблюдается умеренная зависимость скорости ветра от месяца и суток, что обосновано природной цикличностью погодных условий.

Гистограмма распределения [8] показывает асимметричное распределение с длинным правым хвостом, что говорит о наличии

экстремальных значений. Основная масса наблюдений сосредоточена в диапазоне до 5 м/с.

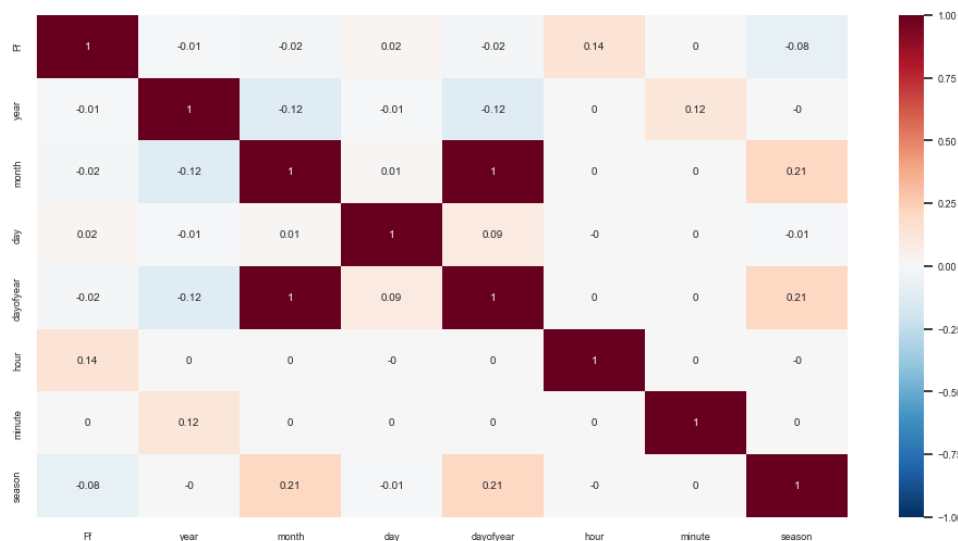


Рис. 1. Матрица линейной корреляции переменных.

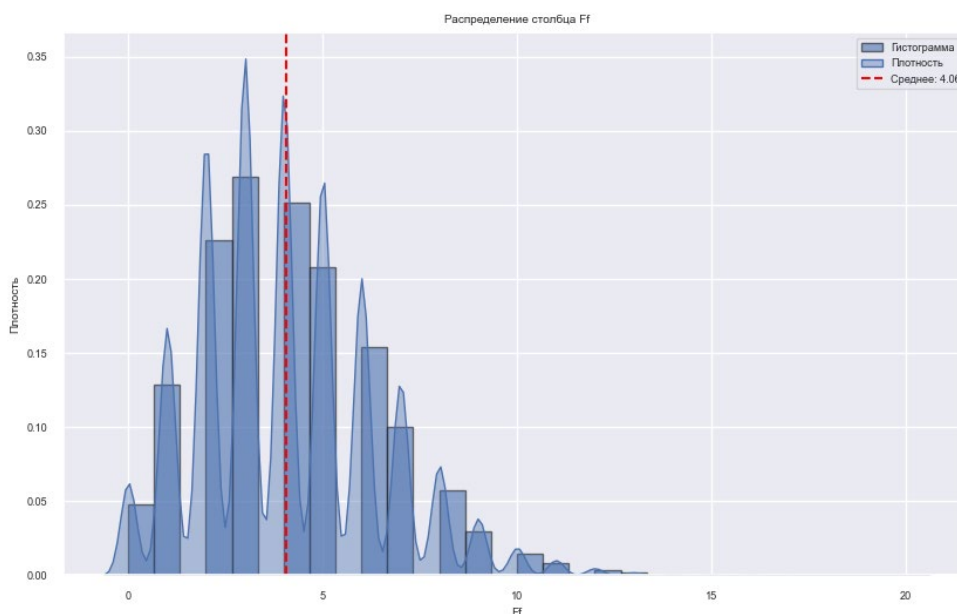


Рис.2. Распределение значений переменной скорости ветра (Ff).

Для того чтобы точно удостовериться в ненормальности распределения данных необходимо провести тест Колмогорова-Смирнова, а также построить график квантиль-квантиль (QQ-график).

Тест Колмогорова–Смирнова используется для проверки гипотезы о нормальном распределении данных при больших выборках данных [9].

Показатель статистики теста отражает максимальное расстояние между эмпирической функцией распределения выборки и теоретическим нормальным распределением. Значение p-value показывает вероятность того, что наблюдаемое отклонение могло возникнуть случайно при условии, что данные действительно нормальны.

В данном случае:

Статистика = 0.126 — относительно большое отклонение;

p-value = 0.000 — значительно меньше общепринятого порога 0.05.

QQ-график используется для визуальной проверки нормальности распределения [10]. Он сопоставляет квантили исследуемого распределения с теоретически нормальным. Существенные отклонения точек от диагональной линии указывают на ненормальность данных.

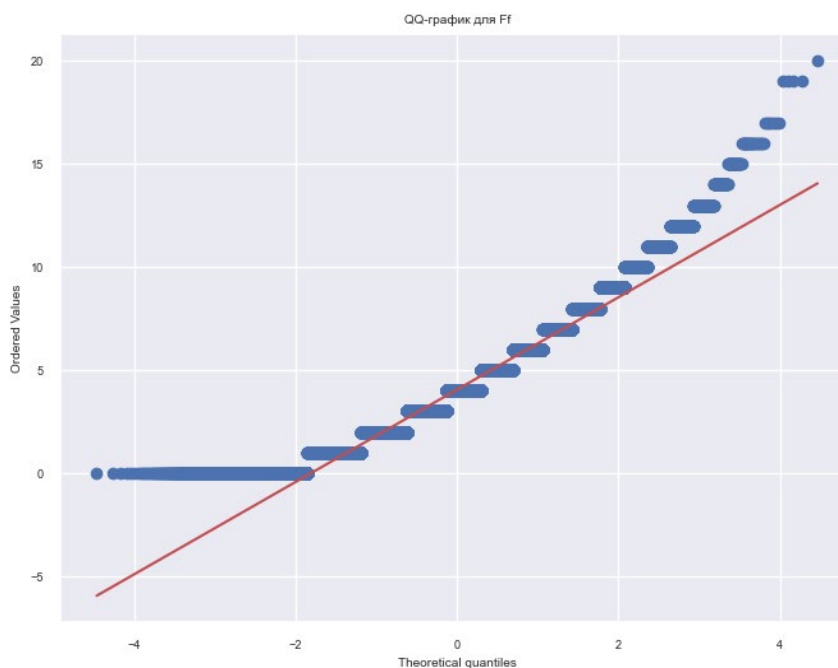


Рис.3. QQ-график переменной скорости ветра (Ff).

Проведенные исследования означают, что гипотеза о нормальности распределения отвергается с высокой уверенностью. Следовательно, распределение скорости ветра не является нормальным, что необходимо учитывать при выборе методов прогнозирования.

Для прогнозирования скорости ветра были протестированы следующие модели машинного обучения: линейная регрессия (LR), метод опорных векторов (SVR), случайный лес: стандартный (RF) и оптимизированный с помощью GridSearchCV (RF optimized), градиентный бустинг: стандартный (XGB) и оптимизированный (XGB optimized), нейронная сеть прямого распространения (FNN) с 7 входными признаками, ReLU-активацией, без скрытых слоев, AutoML на базе библиотеки flaml.

Для оценки точности прогнозов использовались следующие метрики: R^2 – коэффициент детерминации, MAE – средняя абсолютная ошибка, RMSE – корень из средней квадратичной ошибки, MAPE – средняя абсолютная процентная ошибка (без учета нулевых значений).

IV. Результаты экспериментов.

Таблица 1

Оценка качества обучения моделей

Название модели	R2	MAE	RMSE	MAPE (без учета нулевых значений)
LR	0,01	2,26	2,67	84,13
SVR	-0,05	2,29	2,74	76,95
RF	-0,13	2,31	2,85	60,17
RF optimized	0,10	2,04	2,55	68,57
XGB	0,07	2,07	2,59	63,86
XGB optimized	0,13	2,01	2,51	73,12
FNN	0,12	2,06	2,51	78,51
AutoML	-0,01	2,20	2,70	60,50

Наилучшие результаты по точности продемонстрировала модель XGB optimized, показавшая наименьшие значения MAE и RMSE, а также наивысший R^2 среди протестированных моделей.

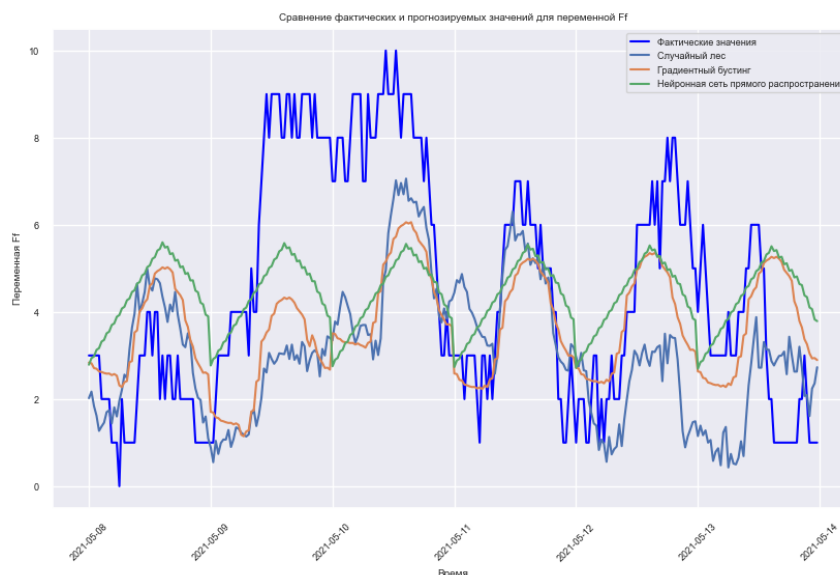


Рис. 4. График распределения прогнозных и действительных значений для температуры окружающей среды без настройки параметров

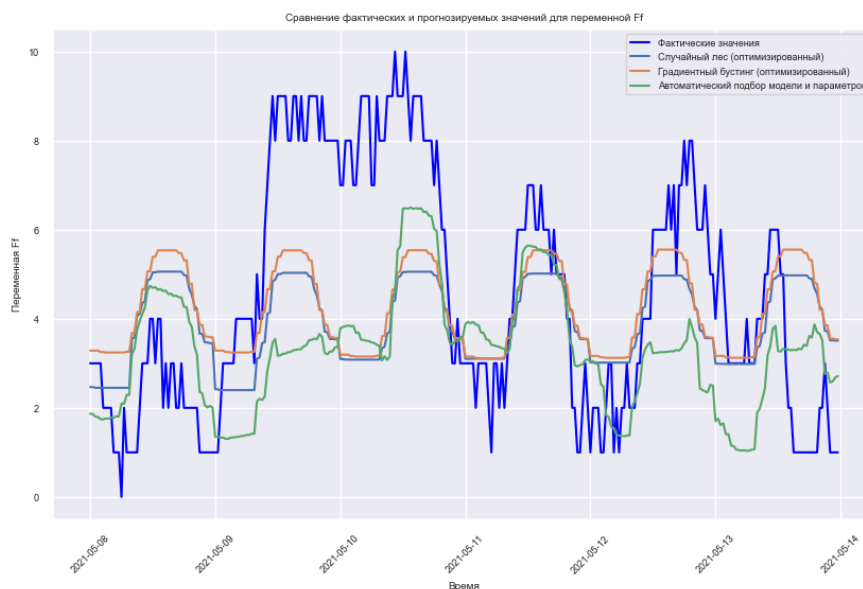


Рис. 5. График распределения прогнозных и действительных значений для температуры окружающей среды с автоматически подобранными параметрами

Графики показывают, что после настройки параметров модели улучшается точность прогнозирования.

В Таблице 2 показано сопоставление прогнозных значений и реальных измерений скорости ветра за 11 мая 2021 года. Расхождения в большинстве случаев минимальны, за исключением отдельных часов с высокими отклонениями, что может быть связано с внезапными погодными изменениями или ограничениями модели.

Таблица 2

Анализ прогнозных значений (XGB optimized) с фактическими данными скорости ветра

Дата и время	Фактические данные	XGB optimized	Дельта
11.05.2021 00:00	3,00	3,15	0,15
11.05.2021 01:00	3,00	3,15	0,15
11.05.2021 02:00	2,00	3,12	1,12
11.05.2021 03:00	3,00	3,11	0,11
11.05.2021 04:00	3,00	3,11	0,11
11.05.2021 05:00	1,00	3,11	2,11
11.05.2021 06:00	3,00	3,11	0,11
11.05.2021 07:00	3,00	3,13	0,13
11.05.2021 08:00	3,00	3,57	0,57
11.05.2021 09:00	4,00	4,09	0,09
11.05.2021 10:00	6,00	4,65	1,35
11.05.2021 11:00	6,00	5,05	0,95
11.05.2021 12:00	7,00	5,39	1,61
11.05.2021 13:00	7,00	5,54	1,46
11.05.2021 14:00	6,00	5,54	0,46
11.05.2021 15:00	6,00	5,54	0,46
11.05.2021 16:00	6,00	5,54	0,46
11.05.2021 17:00	6,00	5,46	0,54
11.05.2021 18:00	5,00	5,30	0,30
11.05.2021 19:00	5,00	4,77	0,23
11.05.2021 20:00	4,00	4,18	0,18
11.05.2021 21:00	2,00	3,85	1,85
11.05.2021 22:00	1,00	3,57	2,57
11.05.2021 23:00	3,00	3,55	0,55

V. Обсуждение результатов.

Наилучший результат показала модель градиентного бустинга с автоматической оптимизацией параметров (XGB optimized). Несмотря на сравнительно низкие значения R^2 , модель обеспечила минимальные ошибки по метрикам MAE и RMSE.

VI. Выводы и заключение.

В ходе работы были изучены и сравнены различные алгоритмы машинного обучения для задачи краткосрочного прогноза скорости ветра. Для повышения точности прогноза в будущем планируется:

использование моделей, учитывающих временную зависимость (LSTM, GRU);

применение ансамблей и методов повышения стабильности прогнозирования.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке интеллектуальных систем прогнозирования в энергетике и метеомониторинге.

Литература

1. Швецов С. Ю., Шепелев А. О. Расчет и анализ установившихся режимов с учётом тепловых процессов при прогнозировании климатических факторов // Актуальные вопросы энергетики: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Омск, 23–24 мая 2024 года. Омск: Омский государственный технический университет, 2024. С. 90-95.

2. X Jia, H Sun, Y Ma, Z Liu, X Dong Calculation of Available Transmission Capacity of Power Grid Considering the Influence of Environmental Factors / DOI: 10.1109/ITOEC53115.2022.9734295 // IEEE 6th Information

Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China : IEEE, 2022. P. 1843–1847.

3. Шепелев А. О. Анализ влияния климатических факторов на допустимые перетоки активной мощности в энергосистемах // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2024. Т. 67, № 1. С. 105-114.

4. Frank S., Sexauer J., Mohagheghi S. Temperature-Dependent Power Flow / DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2266409 // IEEE Transactions on Power System. 2013. Vol. 28, № 4. Pp. 4007–4018.

5. Kotni L. A proposed algorithm for an overhead transmission line conductor temperature rise calculation / DOI: 10.1002/etep.1715 // International Transactions On Electrical Energy Systems Int. Trans. Electr. Energ. Syst. 2014. 24. pp. 578–596.

6. Гринченко Н. Н., Потапова В. Ю., Тарасов А. С. Алгоритмы прогнозирования погодных условий в системах сбора и обработки метеорологических данных // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 2. С. 113-119.

7. Матренин П. В., Манусов В. З., Игумнова Е. А. Устойчивое краткосрочное прогнозирование скорости ветра с помощью адаптивных компактных нейронных сетей // Проблемы региональной энергетики. 2020. № 3(47). С. 69-80.

8. Мензелинцева Н. В., Иванова Ю. П., Добринская А. А., Соколова Е. В., Соловьева Т. В., Иванова О. О., Постникова Е. А. Законы распределения скоростей воздушного потока, характерных для городов компактной конфигурации (на примере г. Ставрополь) // Инженерный вестник Дона, 2024, № 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2024/9731/.

9. Азаров В. Н., Иванова Ю. П., Добринская А. А., Иванова О. О., Соломахин М. С., Самофалов Д. В. Исследование законов распределения ветровых потоков городов компактной и линейной конфигурации (на

примере г. Ставрополя и г. Волгограда) // Инженерный вестник Дона, 2024, № 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2024/9732

10. Горяев В. М., Бембитов Д. Б., Мучкаев Д. Н., Аль-Килани В. Х. Модель SARIMA и статистика скользящего окна для локальных метеоданных // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 6. С. 31-38.

References

1. Shvetcov S. Ju., Shepelev A. O. Aktual'nyye voprosy energetiki: Materialy VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, Omsk, 23–24 maya 2024 goda. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet, 2024. pp. 90-95.

2. X Jia, H Sun, Y Ma, Z Liu, X Dong. DOI: 10.1109/ITOEC53115.2022.9734295 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China: IEEE, 2022. pp. 1843–1847.

3. Shepelev A. O. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika. 2024. T. 67, № 1. pp. 105-114.

4. Frank S., Sexauer J., Mohagheghi. S. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2266409 IEEE Transactions on Power System. 2013. Vol. 28, № 4. pp. 4007–4018.

5. Lahouari Kotni. DOI: 10.1002/etep.1715 International Transactions On Electrical Energy Systems Int. Trans. Electr. Energ. Syst. 2014. 24. pp. 578–596.

6. Grinchenko N. N., Potapova V. Ju., Tarasov A. S. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2018. № 2. pp. 113-119.

7. Matrenin P. V., Manusov V. Z., Igumnova E. A. Problemy regional'noy energetiki. 2020. № 3(47). pp. 69-80.

8. Menzelinceva N. V., Ivanova Ju. P., Dobrinskaja A. A., Sokolova E. V., Solov'eva T. V., Ivanova O. O., Postnikova E. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, № 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2024/9731/.



9. Azarov V. N., Ivanova Ju. P., Dobrinskaja A. A., Ivanova O. O., Solomahin M. S., Samofalov D. V. Inzhenernyy vestnik Dona, 2024, № 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2024/9732

10. Goryayev V. M., Bembitov D. B., Muchkayev D. N., Al'-Kilani V. KH. Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii. 2019. № 6. pp. 31-38.

Дата поступления: 27.06.2025

Дата публикации: 25.08.2025