

## Анализ потенциального внедрения ВИЭ в энергосистему Краснодарского Края

Основная цель данного отчета — разработка комплексного подхода к снижению энергодефицитности в регионах с использованием возобновляемых источников энергии.

Согласно данным АО АТС, за последние несколько лет (с 2016 по 2020 год) на территории Краснодарского края должны были быть введены в эксплуатацию несколько пилотных ВЭС, но на данный момент все проекты находятся либо в стадии проектирования, либо в стадии строительства.

*Таблица 1 — список электростанций с ВИЭ, строительство которых запланировано в Краснодарском Крае*

Название электростанции	Тип Электростанции	Статус	Предполагаемая мощность (МВт)
Краснодарский ветропарк	ВЭС	Строится, ввод в 2030 г.	1000
Щербиновский	ВЭС	Строится	99
Северская	СЭС	Проектируется	44,1
Мостовская	СЭС	Проектируется	44,1
Тихорецкая-1	СЭС	Проектируется	9,98
Гиагинский ветропарк	ВЭС	Строится	195
Ейская	ВЭС	Строится, ввод в 2030 г.	72
Береговая	ВЭС	Строится	90
Лабинская	СЭС	Строится	44,1
Армавирская	СЭС	Проектируется	29,4
Кошехабльский ветропарк	ВЭС	Строится	102
Шовгеновская	СЭС	Строится	4,9

Суммарно планируется ввод ВЭС мощностью 1558 МВт и СЭС мощностью 177 МВт (к уже существующим 150 и 4 МВт мощности соответственно), что будет составлять 67,5% от нынешней мощности всех

электростанций в Краснодарском крае. Именно эта перспективная мощность и будет использоваться как одна из основ для решения проблемы энергодефицитности в регионах с помощью технологий ВИЭ.

Один из путей решения проблемы энергодефицитности – введение новых мощностей (электростанций), которые позволят снизить нагрузку на существующие электростанции и ослабить существующую в регионе проблему энергодефицитности. Население Краснодарского края растет, город Краснодар после переписи населения 2021 года стал городом-миллионником; в регион пребывают все большее количество людей, поэтому проблема энергодефицитности будет усугубляться и дальше, если не вводить новые мощности.

При строительстве новых электростанций следует отдать предпочтение электростанциям с использованием технологий ВИЭ, так как с течением времени данные электростанции будут проявлять всю большую эффективность, а при своевременной модернизации они не потеряют свою актуальность долгие годы. На территории Краснодарского края одинаково эффективны будут как ветряные электростанции, так и солнечные электростанции, так как регион находится на юге страны, там мало осадков и много солнечных дней. Наиболее выгодным расположением для ВЭС является расположение у берегов Черного моря, так как там есть почти постоянный поток ветра, благодаря которому ВЭС будут работать эффективнее и стабильнее.

### **Исследование по сокращению энергодефицитности Краснодарского края с помощью технологий ВИЭ**

Для Краснодарского края было рассчитано среднее значение КИУМ по трем точкам внутри административных границ региона, расположенным равноудаленно друг от друга, в максимально возможной степени. Коэффициент использования установленной мощности — характеристика эффективности работы электростанций; КИУМ равен отношению

среднеарифметической мощности к установленной мощности электроустановки за определённый интервал времени.

В данном исследовании для определения КИУМ СЭС в регионе использовались спутники MERRA, которые обладают несколькими преимуществами по сравнению с другими спутниками, собирающими климатические данные. Они предоставляют наблюдения с интервалом в 1 час и имеют пространственное разрешение  $1/2^\circ$  широты и  $2/3^\circ$  долготы, что соответствует примерно  $50 \times 50$  км по Европе.

Для моделирования выходной мощности фотоэлектрических систем использовалась модель Global Solar Energy Estimator (GSEE). При расчете КИУМ модель использует три показателя: прямое излучение, диффузное излучение и температуру.

Расчет КИУМ СЭС происходит следующим образом. Во-первых, значения линейно интерполируются из ячеек сетки MERRA в заданные координаты. Затем спутник оценивает долю диффузного излучения с помощью модели BRL (Boland Ridley Lauret), которая показала лучшие результаты среди множества подобных моделей. Модель BRL требует индекса ясности, который оценивается на основе данных MERRA. SARAH (Solar Radiation Heliosat) предоставляет как прямое, так и общее освещение. Затем вычисляется освещенность на плоскости фотоэлектрической панели. Модель также способна моделировать системы слежения с одной или двумя осями (наклон и азимут). В данном исследовании данные были собраны для установок с двухосным отслеживанием солнца, поскольку значительная часть СЭС может быть интегрирована в энергосистему России в долгосрочной перспективе, когда большинство установок, вероятно, будут оснащены двухосным отслеживанием.

Выходная мощность панели рассчитывается на основе освещенности в плоскости, определенной на предыдущих этапах. Это делается с использованием модели относительной производительности СЭС, которая предоставляет кривые эффективности панели в зависимости от температуры.

Температура панели оценивается на основе температуры окружающей среды с учетом влияния освещенности.

Для расчета выходной мощности ВЭС используется модель Virtual Wind Farm (VWF). В качестве типовой установки ВЭС используется Simens Gamesa sg 4.5. Основной алгоритм моделирования глобальных климатических данных, таких как скорость ветра, называется реанализ. Реанализ становится все более популярным в исследованиях возобновляемых источников энергии из-за своей удобства и глобального охвата. Однако использование реанализа для синтеза выходной мощности ВЭС требует тщательной проверки. В сообществе исследователей ВЭС преобладает подход использования моделей уменьшенного масштаба и более подробных данных о местности. Коммерческие инструменты, такие как WaSP, Virtual Met Masts, 3TIER и Vortex, широко используются в сообществе ветроэнергетики из-за их высокой точности, которая достигается за счет увеличения вычислительных ресурсов и требований к данным.

Кроме того, для Краснодарского края был построен график, на котором отображены все среднегодовые значения КИУМ. Этот график позволяет визуально сравнить эффективность использования мощностей в разных регионах и выявить возможные тенденции. Также был проведен анализ линии тренда, который позволяет определить рост или снижение среднегодовых показателей КИУМ в долгосрочной перспективе. Это позволяет выявить общие тенденции в изменении эффективности использования мощностей во всех регионах.

Для сбора данных, необходимых для дальнейших расчетов, автором была создана автоматизированная система на основе языка программирования Python и двух библиотек: Pandas и Selenium. Pandas - инструмент для анализа и обработки данных с открытым исходным кодом. Selenium – библиотека для автоматизации взаимодействия с веб интерфейсами. Разработанная система собирает данные по множеству заданных точек, а последующая обработка

данных позволяет перейти к усредненным показателям по региону или более крупной энергосистеме.

Согласно проведенным расчетам показателей КИУМ СЭС на территории Краснодарского края, за последние 40 лет средние показатели КИУМ за год показали существенный рост, несмотря на то, что каждые несколько лет среднегодовые коэффициенты показывали значительный рост, а затем сменялись падением. Эти циклы длились 4-7 лет, и на момент последнего проведенного измерения (2020 год) показатель был на пике этого цикла, соответственно, в дальнейшем должен наблюдаться незначительный спад. Исходя из тренда и проведенного исследования, в перспективе среднегодовые показатели КИУМ СЭС будут увеличиваться, что делает регион благоприятным для развития солнечной энергетики.



Рисунок 1 – среднегодовые значения КИУМ СЭС в Краснодарском крае с 1980 по 2020 год

Исследование показателей КИУМ ВЭС для Краснодарского края показало, что в целом среднегодовые коэффициенты незначительно поменялись за 40 лет исследования. При этом были годы аномального роста и падения показателей в течение нескольких десятилетий. Показатель тренда восходящий, что свидетельствует о росте среднегодовых значений с течением времени. В перспективе будет наблюдаться дальнейший постепенный рост значений КИУМ, что благоприятно скажется на развитии ветряной энергетики на территории Краснодарского края.



*Рисунок 2 – среднегодовые значения КИУМ ВЭС в Краснодарском крае с 1980 по 2020 год*

Таким образом, Краснодарский край можно назвать регионом, в котором возможно гармоничное развитие как солнечной энергетики, так и ветроэнергетики

## **Использование ВИЭ для сокращения энергодефицитности региона**

Для сбора данных, необходимых для дальнейших расчетов, автором была создана автоматизированная система на основе языка программирования Python и трех библиотек: Pandas, Matplotlib, NumPy. Pandas - инструмент для анализа и обработки данных с открытым исходным кодом. Matplotlib — инструмент для построения графиков. NumPy — инструмент для математических вычислений. Разработанная система представляет собой инструмент анализа и моделирования процессов, связанных с производством энергии с использованием солнечных и ветряных электростанций. В ходе выполнения программы происходит чтение данных, содержащих информацию о годовом спросе на электроэнергию, а также о производстве энергии указанными типами станций. Следующим шагом является нахождение оптимальных коэффициентов, которые позволяют объединить графики производства энергии от СЭС и ВЭС, с учетом годового спроса.

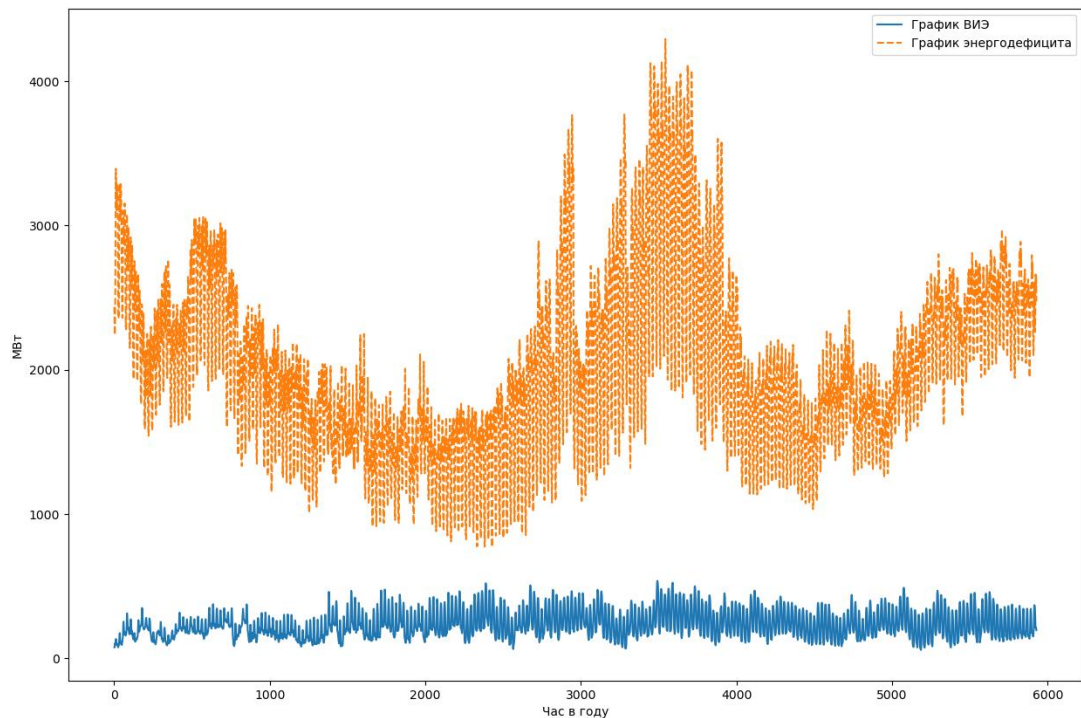
Полученные оптимальные коэффициенты используются для формирования объединенного графика энергопотребления, который затем анализируется на предмет соответствия годовому спросу на электроэнергию. Для этой цели рассчитывается сумма превышения и недостатка энергии между объединенным графиком и графиком годового спроса.

Чтобы найти оптимальные коэффициенты, были использованы следующие модели:

1) Распределение 50 на 50 — этот подход использует равные веса для каждой переменной. Это означает, что каждая переменная имеет одинаковое влияние на итоговый результат. Были созданы модели с несколькими

коэффициентами: 500 МВт, 1000 МВт, 3000 МВт у солнечных и ветряных электростанций.

1.1) Модель, где используется мощность генерации 500 МВт для солнечных и ветряных электростанций

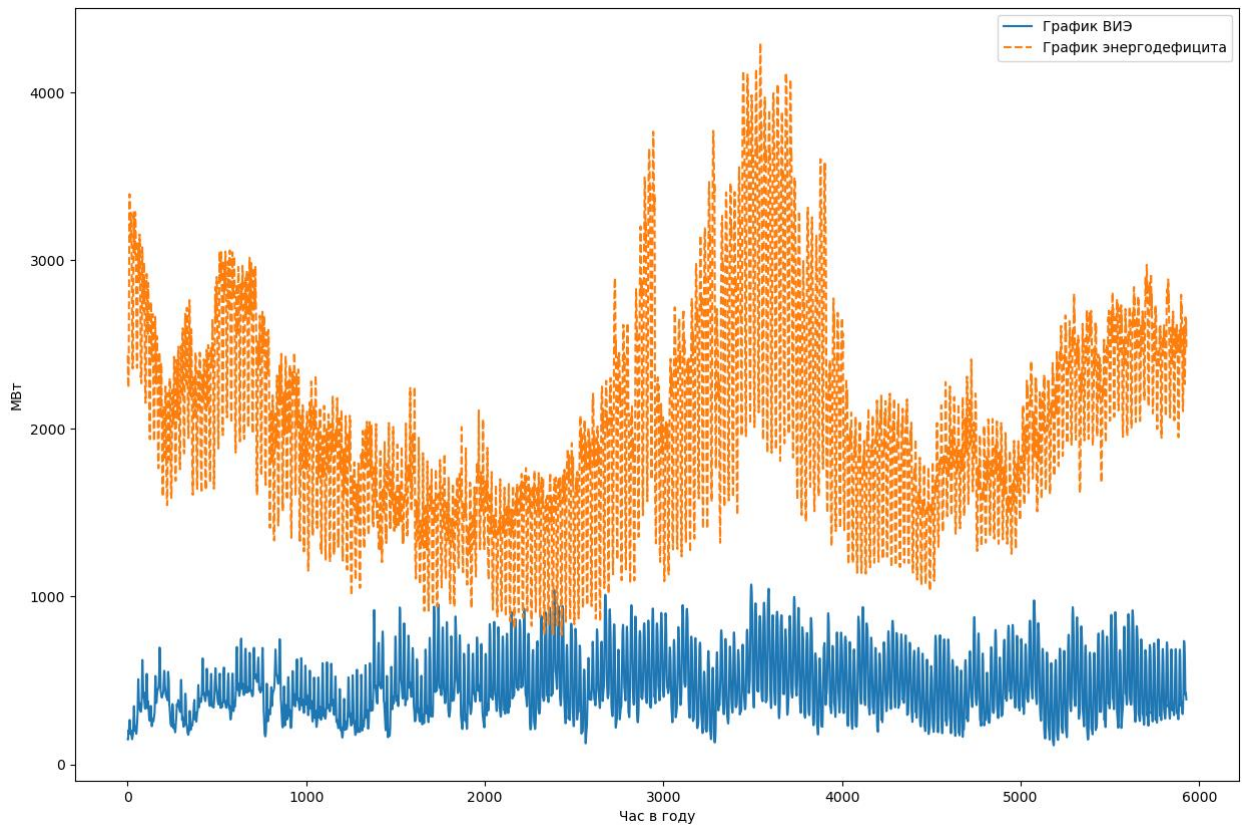


*Рисунок 3 – график сокращения энергодефицитности с помощью ввода новых объектов СЭС и ВЭС; у каждого вида ЭС суммарная мощность 500МВт*

В данной модели демонстрируется недостаточное количество мощности для обоих видов электростанций. При таком количестве введённых мощностей энергодефицитность сократится на 12%

1.2) Модель, где используется мощность генерации 500 МВт для солнечных и ветряных электростанций

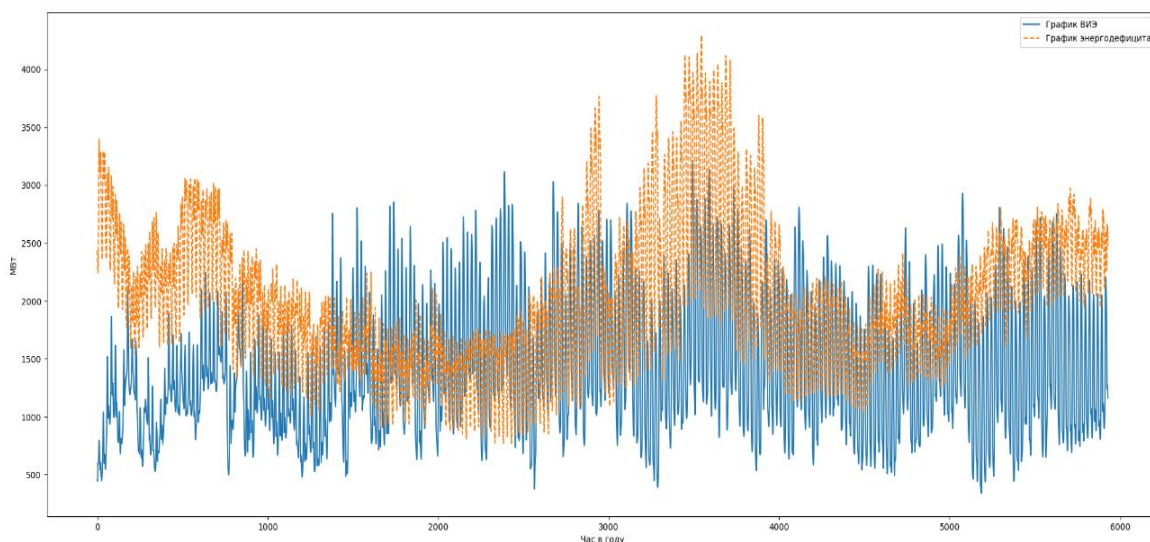




*Рисунок 4 – график сокращения энергодефицитности с помощью ввода новых объектов СЭС и ВЭС; у каждого вида ЭС суммарная мощность 1000 МВт*

В модели с увеличенным в 2 раза количеством мощностей СЭС и ВЭС общая картина остаётся прежней — демонстрируется недостаточное количество мощности для обоих видов электростанций. При таком количестве введённых мощностей энергодефицитность сократится приблизительно на 24%

1.3) Модель, где используется мощность генерации 3000 МВт для солнечных и ветряных электростанций



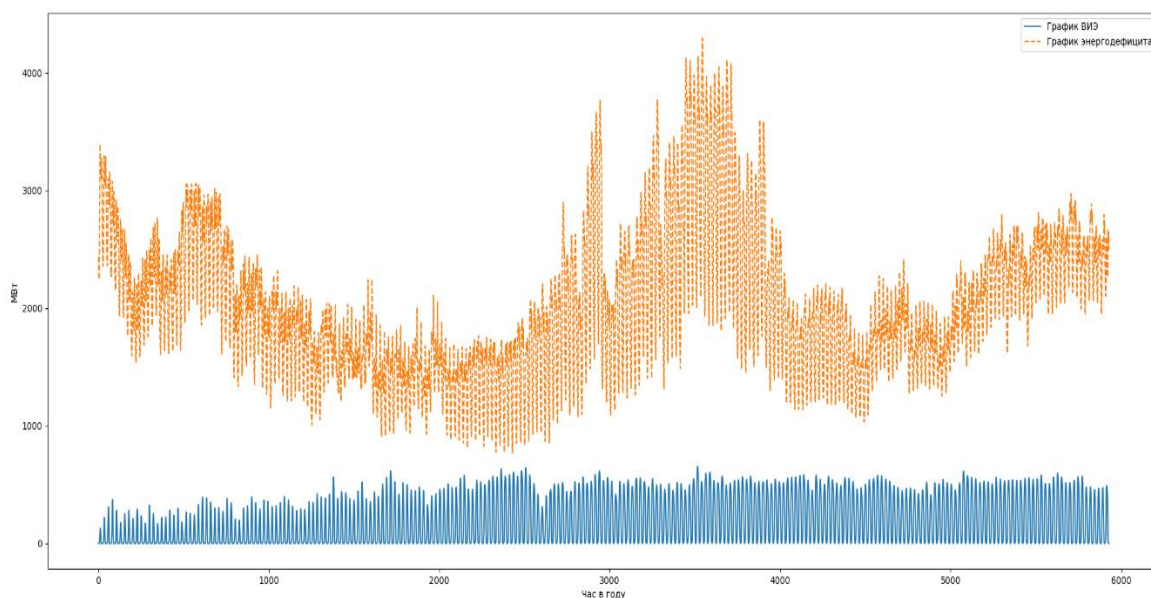
*Рисунок 5 – график сокращения энергодефицитности с помощью ввода новых объектов СЭС и ВЭС; у каждого вида ЭС суммарная мощность 3000 МВт*

В модели с данным количеством мощности удалось устранить энергодефицитность, добившись профицита производства электроэнергии (в общей сумме на 4,5%), но данное количество мощности является слишком большим для региона. Кроме того, строительство такого количества мощностей ВИЭ не входит в нынешние планы развития электроэнергетики Краснодарского края и России в целом.

*Вывод:* Данные модели предполагают сбалансированное развитие солнечных и ветряных электростанций в регионе, но одинаковое сочетание мощности электростанций не так эффективно сокращает энергодефицитность.

2) 100% на одну переменную, 0% на другую — данный подход дает всю значимость одной переменной, игнорируя остальные. Были созданы модели, где предполагается введение 1000 МВт мощностей для ВЭС и 0 МВт для СЭС, также была рассчитана модель, где выделяется 1000 МВт будущих мощностей для СЭС и 0 МВт для ВЭС.

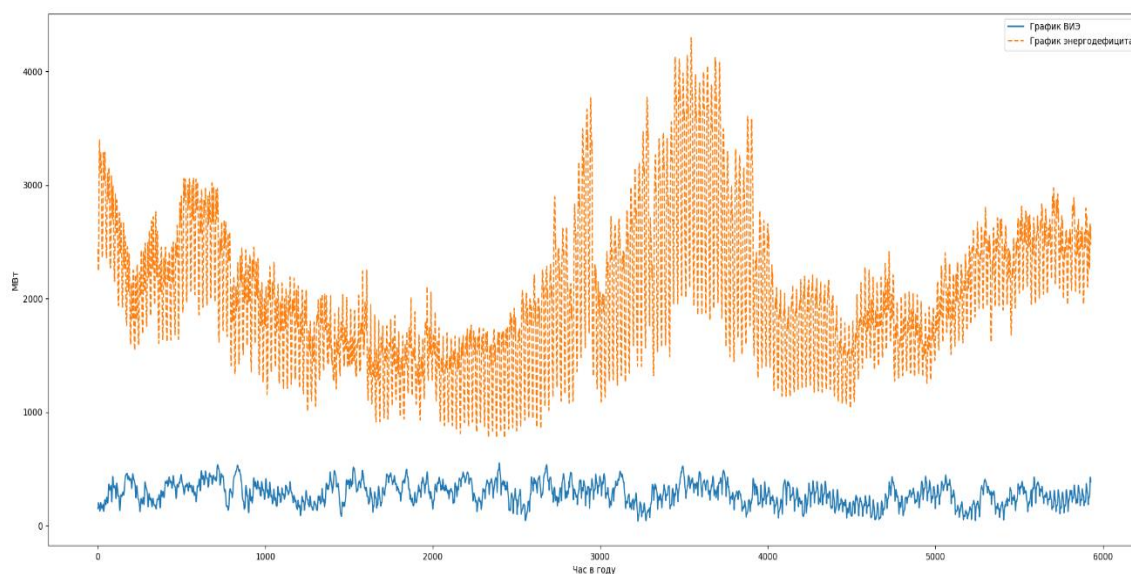
2.1) Модель, где используется мощность генерации 1000 МВт для СЭС и 0 МВт для ВЭС



*Рисунок 6 – график сокращения энергодефицитности с помощью ввода новых объектов СЭС мощностью 1000 МВт*

При введении новых солнечных электростанций общей мощностью 1000 МВт энергодефицитность в регионе сократится на 9,5%. При этом введение данного количества мощностей не входит в ближайшие планы.

2.2) Модель, где используется мощность генерации 1000 МВт для ВЭС и 0МВт для СЭС



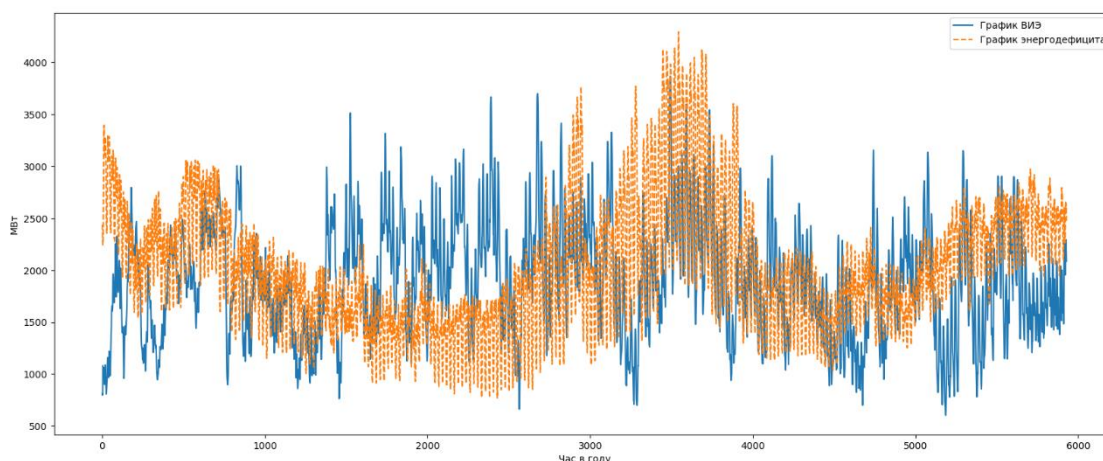
*Рисунок 7 – график сокращения энергодефицитности с помощью ввода новых объектов ВЭС мощностью 1000 МВт*

В данной модели энергодефицитность сокращается на 14%. Введение такого количества мощностей входит в планы региона до 2040 года, поэтому данную модель можно назвать реалистичной, но недостаточной — введение исключительно одного вида мощностей является не самой рациональной энергетической политикой.

*Вывод:* данные модели также не являются достаточно эффективными по той причине, что введение исключительно одного вида электростанций (из нескольких возможных в ВИЭ) может быть крайне неэффективным ввиду отсутствия равномерного распределения генерации на протяжении всего года, а также низкой аккумуляции подобного вида электроэнергии.

3) Метод наименьших квадратов — этот метод используется для поиска наилучшей аппроксимации данных, которая минимизирует сумму квадратов разностей между наблюдаемыми значениями (годовым дефицитом электроэнергии) и значениями, предсказанными моделью (объединенным графиком производства энергии от СЭС и ВЭС). Использование метода наименьших квадратов обеспечивает математически обоснованный подход к определению оптимальных коэффициентов, что позволяет учесть как можно больше информации из исходных данных и минимизировать ошибку аппроксимации. При этом, основной недостаток модели, выявленный при расчетах — слишком большое количество превышения графика дефицита электроэнергии, вследствие чего приходится применять дополнительные инструменты изменения коэффициентов, уменьшая полученные значения на 10-20%.

### 3.1) Метод наименьших квадратов (без уменьшения)

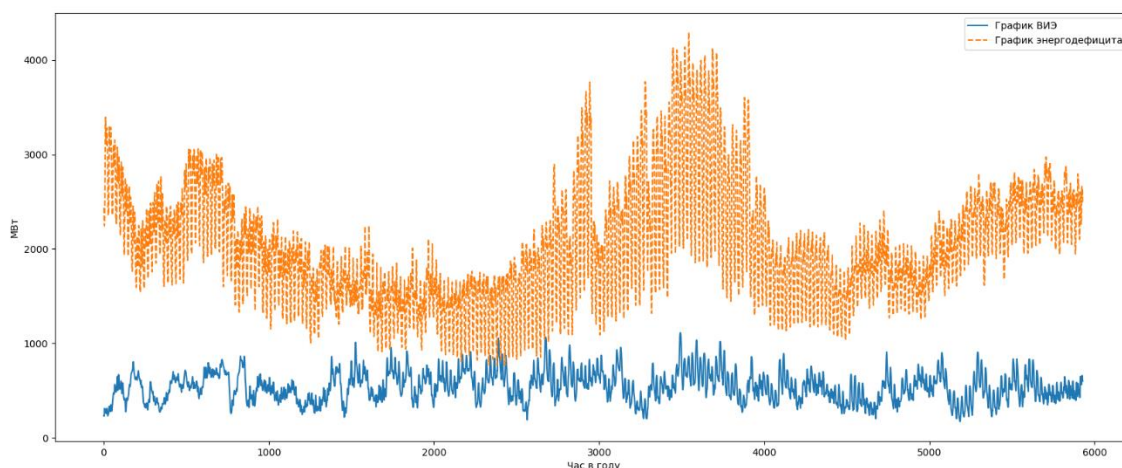


*Рисунок 8 – график сокращения энергодефицитности с помощью метода наименьших квадратов для новых объектов ВЭС и СЭС*

Согласно данному методу, оптимальное количество мощностей для наиболее эффективного сокращения энергодефицитности составляет 1912 МВт для СЭС и 5394 МВт для ВЭС, что составляет 308% от нынешней мощности всех электростанций в Краснодарском крае. При данной модели энергодефицитность сокращается на 94%, тем самым почти полностью закрывая потребность в экспорте электроэнергии из других регионов. Но при этом, такое большое количество мощностей в ближайшей перспективе невозможно возвести ввиду разных причин: экономической нецелесообразности, отсутствия запланированного строительства такого количества мощностей, а также высокий риск при слишком большой мощности ВИЭ относительно других источников электроэнергии в энергетическом балансе региона.

3.2) Метод наименьших квадратов (с приведением к прогнозу по введению новых мощностей ВИЭ до 2030 г.)



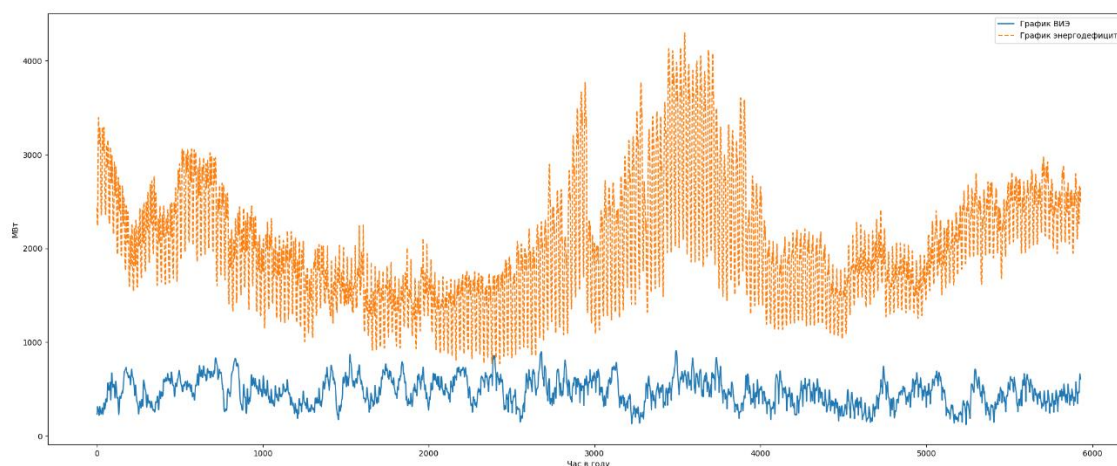


*Рисунок 9 – график сокращения энергодефицитности с помощью метода наименьших квадратов для новых объектов ВЭС и СЭС с поправкой на объемы введения новых мощностей ВИЭ к 2030г*

В данной модели количество вводимых мощностей ВЭС составляет 1558 МВт, количество мощностей СЭС — 552 МВт (По прогнозам, количество вводимых мощностей до 2030 г. составляют 1558 МВт для ВЭС и 177 для СЭС). При таких мощностях получится сократить энергодефицитность на 27%, что в целом является более эффективным, чем в прошлых моделях с распределением мощностей поровну.

Вывод: метод наименьших квадратов является эффективным инструментом для решения проблемы энергодефицитности; в то же время, мощностей, необходимых для закрытия энергодефицитности, необходимо намного больше, чем сейчас существует в регионе в целом.

4) Кроме того, была построена модель сокращения энергодефицитности в соответствии с прогнозируемым количеством введенных мощностей до 2030 года (1558 МВт для ВЭС и 177 МВт для СЭС)



*Рисунок 10 – график сокращения энергодефицитности в соответствии с прогнозом по введению новых мощностей ВИЭ к 2030 году*

При введении всех планируемых мощностей энергодефицитность региона сократится на 24%, что является одним из самых эффективных показателей среди остальных моделей, указанных в исследовании.

В результате исследования удалось рассмотреть несколько моделей замещения. Некоторые модели оказались слишком нереалистичными и не соответствующими требованиям. Кроме того, подобные модели оказались экономически нецелесообразными. Наиболее реалистичными и эффективными оказались две модели: модель, построенная при помощи метода наименьших квадратов с поправкой на объемы введения новых электростанций с технологией ВИЭ в Краснодарском крае до 2030 года и модель, построенная на основе точных данных о введении новых мощностей ВИЭ до 2030 года.

В первой модели предполагается введение новых ВЭС мощностью 1558 МВт и новых СЭС мощностью 552 МВт, что в целом соответствует планам по развитию ВИЭ в регионе. При такой модели энергодефицитность сокращается на 27%.

Во второй модели предполагается введение новых мощностей в точности с соответствием с планами по строительству новых электростанций на территории Краснодарского края — 1558 МВт для ВЭС и 177 МВт для СЭС.

В результате энергодефицитность сокращается на 24%, что является показателем, близким к наиболее эффективному.

Благодаря введению новых мощностей возможно будет значительно сократить энергодефицитность, тем самым избавив регион от одной из самых важных проблем. В перспективе, при введении более большого количества мощностей, можно добиться превращения региона в регион с профицитным количеством электроэнергии, что позволит экспортировать электроэнергию в соседние регионы, например, в Республику Крым и Севастополь. Вновь введенные объекты ВИЭ смогут идеально функционировать в рамках существующей энергосистемой Краснодарского края, где будут представлены разнообразные типы электростанций, поддерживающие баланс энергосистемы и не допускающие переработок.

Таким образом, оба сценария (модели) являются благоприятными, есть различие лишь в степени их влияния на проблему. Наиболее приоритетным является первая модель, так как при ней замещение происходит наиболее эффективно. При этом и вторую модель можно рассматривать как возможный сценарий развития, так как введение всех мощностей может быть не осуществлено ввиду различных проблем: выявление неблагоприятных условий в процессе строительства и при проектировании объектов, непредвиденные эксцессы, ввиду которых стало невозможным полноценное возведение объектов, а также недостаток финансирования вследствие перерасчета стоимости выполнения работ.

При первом сценарии сокращение энергодефицитности возможно на 27 %, при втором – на 24 %. В обоих случаях снижение энергодефицитности позволит добавить устойчивости как энергосистеме всего региона, так и ОЭС Юга в целом.