МИНИСТЕРСТВО ЭКОЛОГИИ И ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Акционерное общество «Жасыл даму»

Отчет по обновлению инструментов моделирования и по анализу выбросов ПГ в базовом сценарии

Астана, 2023 год

Лист согласования

Отчет по обновлению инструментов моделирования и по анализу выбросов ПГ в базовом сценарии

№	ФИО	Должность	Подпись
1	Кабдолданов Нуржан Кенесбаевич	Заместитель Председателя Правления, член Правления АО «Жасыл даму»	
2	Насирхан Рустам	Директор департамента моделирования, анализа и прогнозирования АО «Жасыл даму»	
3	Бакдолотов Айдын Айсултанович	Менеджер департамента моделирования, анализа и прогнозирования АО «Жасыл даму»	
4	Оразханова Альфия Саматовна	Менеджер департамента моделирования, анализа и прогнозирования АО «Жасыл даму»	

Содержание

Список рисунков 93
Список таблиц 93
1.Введение 94
2.Технико-экономический инструмент моделирование энергетических систем TIMES…… 96
2.1. Базовая структура и математическая формулировка модели TIMES 98
2.1.1. Экономика TIMES 98
2.1.2. Временной горизонт 99
2.1.3. Компоненты энергетической системы 101
2.1.4. Структура модели 102
2.1.5. Обзор атрибутов TIMES 103
2.1.6. Теоретические соображения 105
2.1.7. Определение функций спроса 108
2.1.8. Формулировка равновесия TIMES 109
2.1.9. Вычислительные соображения 109
2.2. Описание модели TIMES Казахстана 110
2.2.1. Основные параметры модели TIMES-KAZ 111
2.2.2. Целевая функция TIMES- KAZ 113
2.2.3. Уравнения модели TIMES 116
2.2.4. Сценарные условия модели TIMES 131
2.2.5. Климатические параметры 132
2.2.6. Дискретное условие инвестирование 133
2.3. Политики и меры 135
2.4. Сценарии выбросов ПГ 136
2.5. Результаты выбросов ПГ по сектору энергетики 137
2.6. Заключение 144
4. Введение в технико-экономический инструмент моделирования энергетических систем PyPSA 146
4.1.Данные модели PyPSA для электроэнергетики Казахстана 148
4.1.1. Управление рабочим процессом 148
4.1.2. Модель сетей и электростанций 153
4.1.3. Возобновляемые источники энергии 155
4.1.4. Метод пространственной кластеризации 158
4.1.5. Горизонт планирования 159

4.1.6. Интерфейс модели и модуля расчета 160
4.1.7. Базовый сценарий развития электроэнергетики 160
4.2. Моделирование базового сценария 164
4.2.1. Математическая формулировка задачи..... 165
4.2.2. Результаты моделирования 169
4.3. Заключение..... 174
5. Список литературы..... 175

Список рисунков

Рисунок 2.1.1. Временные срезы в пределах периодов 100
Рисунок 2.1.2 .Референтная энергетическая система (РЭС) 102
Рисунок 3.1.1. Пример правила Snakemake. 149
Рисунок 3.1.2. Направленный ациклический граф выполнения процессов для модели PyPSA Казахстан 150
Рисунок 3.1.3.Пример правила Snakemake с шаблонами подстановки. 151
Рисунок 3.1.4. Географическое расположение электрических сетей и генерации 154
Рисунок 3.1.5. Профиль суточного потенциала гидроэнергии Казахстана 156
Рисунок 3.1.6Профиль суточного потенциала солнечной энергии Казахстана 156
Рисунок 3.1.7. Профиль суточного потенциала ветровой энергии Казахстана 157
Рисунок 3.1.8 . Потенциал ветровой энергии. 157
Рисунок 3.1.9. Потенциал солнечной энергии. 158
Рисунок 3.1.10. Модель сетей Казахстана после кластеризации 159
Рисунок 3.1.11. Прогноз потребления электроэнергии в РК. 161
Рисунок 3.1.12. Прогноз изменения ВВП РК. 162
Рисунок 3.1.13. График изменения стоимости технологий 163
Рисунок 3.2.1. Оптимальный рост мощностей для разных технологий. 169
Рисунок 3.2.2. Капитальные затраты в годовом исчислении на каждую технологию 171
Рисунок 3.2.3. Годовой объем выбросов CO_2 сектора электроэнергии. 172
Рисунок 3.2.4. Оптимальное увеличение пропускной мощности линий электропередач между регионами. 172
Рисунок 3.2.5. Общие капитальные затраты в годовом исчислении. 173

Список таблиц

Таблица 2.2.1 . Коэффициенты выбросов от различных видов топлив 133
Таблица 2.2.2. Дискретные опции в модели TIMES-KAZ 135
Таблица 2.3.1 . Сводная таблица политик и мер по отраслям 135
Таблица 2.5.1 . Сценарии развития выбросов парниковых газов от сектора энергетики, МтСО2экв 137
Таблица 2.5.2 . Выработка электроэнергии, млдр квт*ч 138
Таблица 2.5.3 . Установленные мощности электростанций, ГВт 139
Таблица 2.6.1. Сравнение функций различных программных инструментов, схожих с PyPSA [11]. 147
Таблица 3.1.1 Краткое описание правил Snakemake для модели PyPSA KZ.... 151
Таблица 3.1.2. Обозначения регионов 159
Таблица 3.1.3. Прогнозируемые капитальные затраты на солнечные и ветровые электростанции и аккумуляторные батареи в базовом сценарии ($/МВт) 162
Таблица 3.2.1 Увеличение мощностей по областям 170

1. Введение

Технико-экономическое моделирование энергетической системы с помощью генератора моделей TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System или «Интегрированная система MARKAL-EFOM») в Казахстане имеет большую историю с 2009 года. На протяжении многих лет модель энергетической системы развивалась в исследовательских целях для подготовки научных публикаций и для подготовки материалов для различных проектов, таких как Национальные сообщения и двухгодичные доклады, для расчета цели ОНУВ и дорожной карты. Модели использовались и для международных организации, заинтересованных в проекциях выбросов ПГ (например, Программа Всемирного банка PMR (Partnership for Market Readiness – Партнерство по готовности рынка). Модель TIMES активно использовалась и для принятой 2 февраля 2023 года Стратегии по достижению углеродной нейтральности Казахстана до 2060 года и многие другие.

В рамках проекта «Поддержка зеленой экономики в Казахстане и Центральной Азии для низкоуглеродного экономического развития - Моделирование экономических, экологических и социальных последствий низкоуглеродного экономического развития в Казахстане» для Казахстана была разработана новая модель TIMES с целью анализа альтернативных вариантов развития энергетического сектора страны при различных сценариях на временном горизонте до 2060 года.

В данный момент модель TIMES-KAZ поддерживается в рабочем состоянии и своевременно проходит обновления и калибровку в соответствии с выходами новых данных по экономике РК, новых данных по новым технологиям доступным для развертывания и многих других.

В данной работе, описывается модель в текущем состоянии после обновления всех данных текущего года. В работе даны теоретические обоснования и математические формулировки уравнений модели Казахстана. Приводятся основные параметры модели Казахстана.

Среди основных работ, сделанных в модели, в текущем году были:

- Обновление базового года с 2017 по 2021 год;
- Обновление базы новых технологий;
- Обновление базовых шаблонов энергетической системы;
- Обновление проекции драйверов спроса;
- Обновление коэффициентов эластичности спроса к драйверам;
- Обновление конечного спроса на энергетические ресурсы;
- Калибровка модели по историческим значениям экономической и энергетической системы.

В представленном аналитическом документе излагаются подробные математические оценки, которые основаны на двух ключевых сценариях: базовом и сценарии декарбонизации. Эти сценарии обращают внимание на различные государственные политики и стратегические подходы, которые прямо

или косвенно связаны с уменьшением выбросов газов, усугубляющих эффект парникового явления. Сначала был проведен анализ этих политик и мер, направленный на определение их потенциального охвата и влияния на экосистему. После этого, для более глубокого понимания предполагаемых эффектов, было выполнено моделирование данных стратегий и их последующий расчет с целью оценки возможного снижения уровней выбросов парниковых газов.

В общем, отчет служит не просто статическим перечнем данных, но и динамичным инструментом для изучения различных стратегий сокращения выбросов. Он предоставляет ценную информацию, которая может помочь законодателям, экологам и другим заинтересованным сторонам в принятии обоснованных решений в области экологической политики. Данный анализ включает в себя не только текущие методы уменьшения выбросов, но и исследует перспективы их дальнейшего развития, предоставляя таким образом комплексный взгляд на проблему. По результатам моделирования можно судить о потенциальной эффективности различных политических решений и стратегий, что дает возможность для их оптимизации и, в конечном итоге, для достижения более существенного снижения выбросов парниковых газов.

2. Технико-экономический инструмент моделирование энергетических систем TIMES

TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System или «Интегрированная система MARKAL-EFOM») представляет собой продвинутый инструмент для создания технико-экономических моделей различных энергетических систем, будь то местные, национальные, межрегиональные или даже глобальные масштабы. Эта система предоставляет обширную и технологически насыщенную платформу, которая позволяет отразить изменчивую динамику энергетической системы на протяжении различных временных интервалов.

Подробная информация по семейству моделей TIMES доступна на сайте Международного энергетического агентства [1].

В основе TIMES лежит подробное технологическое представление, что делает его особенно ценным для анализа и моделирования. Хотя этот инструмент чаще всего используется для анализа энергетического сектора в целом, его гибкость позволяет применять его также для изучения специфических подсекторов в рамках энергетики. Например, он может быть адаптирован для подробного рассмотрения таких областей, как сектор производства электроэнергии или системы централизованного теплоснабжения. TIMES является мощным и универсальным инструментом, который может служить незаменимым помощником для специалистов в области энергетики при анализе и прогнозировании развития различных аспектов энергосистем.

Оценка потребности в энергии для различных конечных потребителей, таких как поездки на автомобилях, авиаперевозки, освещение в домах, потребление электроэнергии бытовыми приборами или потребление парового тепла в сфере производства бумаги, является ключевым моментом в планировании. Пользователь предоставляет подробную информацию об этих потребностях для каждого региона, чтобы гарантировать точное следование референтному сценарию. Эта информация становится отправной точкой для разработки стратегии.

В дополнение к этому, предоставляются данные о текущем состоянии энергетического оборудования в различных отраслях. Пользователь также описывает особенности новых технологий, которые могут быть внедрены в ближайшем будущем. Эти характеристики включают в себя их эффективность, стоимость и возможное влияние на окружающую среду. Кроме того, внимание уделяется текущим и потенциальным источникам первичной энергии. Учитывается их доступность, возможные риски и преимущества, чтобы обеспечить надежное и устойчивое энергоснабжение в будущем.

Модель TIMES использует различные входные показатели для того, чтобы оптимизировать процесс предоставления энергетических услуг с наименьшими финансовыми затратами. Это достигается путем комбинирования решений по инвестированию в новое оборудование и методов его последующей

[1] https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times

эксплуатации, определения источников первичного энергоснабжения и стратегий торговли энергией в различных регионах. Например, в случае увеличения потребления электроэнергии для освещения в жилых помещениях по сравнению с базовыми показателями (это может быть вызвано понижением цен на осветительные системы или изменением прогноза по росту ВВП), необходимо либо использовать уже имеющееся электрогенерирующее оборудование более активно, либо рассмотреть возможность установки нового, возможно, более эффективного оборудования.

При выборе конкретного типа генерирующего оборудования и используемого для этого топлива модель проводит глубокий анализ. Она учитывает характеристики различных доступных технологий генерации, финансовую составляющую энергоснабжения и устанавливает соответствие с экологическими стандартами. В итоге TIMES функционирует как комплексно структурированная модель, охватывающая все аспекты современной энергетической инфраструктуры.

В охват модели входит объемом информации, который выходит далеко за рамки одних лишь энергетических аспектов. Она включает в себя подробный анализ выбросов, воздействующих на окружающую среду, и может даже содержать информацию о материалах, прямо или косвенно взаимодействующих с работой энергетической системы. Это не только инструмент для оценки потребления энергии, но и мощный ресурс для исследования экологических последствий. Такое полное понимание делает ее ключевым инструментом при анализе энергетической и экологической политики. Модель учитывает множество технологических аспектов и различные виды топлива в разных секторах экономики. Благодаря такому детальному рассмотрению она предоставляет уникальную возможность глубокого понимания последствий принятия тех или иных политических решений. Это позволяет специалистам делать осознанные выборы, основываясь на научно-обоснованной информации, что, в свою очередь, способствует формированию более устойчивой и экологически безопасной энергетической политики.

Модель энергетической системы TIMES представляет собой сложное представление о взаимосвязях между количеством и стоимостью различных товаров. В этой системе стремятся к равновесию между спросом и предложением, что означает, что цены и объемы предложения этих товаров в каждый конкретный период времени совпадают с тем, что рынок действительно требует. То есть, производители адаптируют свое производство так, чтобы соответствовать потребностям потребителей без излишеств. Одним из ключевых аспектов этого равновесия является его способность максимизировать общий экономический излишек. Это означает, что система работает наиболее эффективно, когда разница между готовностью потребителей платить и стоимостью производства товаров оптимизирована, что в итоге способствует благосостоянию экономики в целом.

2.1. Базовая структура и математическая формулировка модели TIMES

2.1.1. Экономика TIMES

Экономика TIMES представляет собой сложную систему, охватывающую широкий спектр субъектов, включая производителей и потребителей различных товаров. Эти товары можно в общих чертах разделить на энергоносители, материалы, энергетические услуги и выбросы. В этой сложной сети энергетический рынок в первую очередь функционирует по принципу конкуренции. По сути, это означает, что рынок естественным образом принимает конкурентную позицию для каждого доступного товара.

Однако, бывают случаи, когда этот конкурентный сценарий по умолчанию может оказаться нереалистичным. Разработчик модели по разным причинам может ввести нормативные или другие формы ограничений для определенных сегментов энергетической системы. Такие добровольные интервенции могут изменить естественный баланс рынка. Вместо полностью конкурентного рынка в результате может возникнуть состояние частичного регулирования. Следовательно, динамика спроса и предложения достигает уникального равновесия. Это равновесие направлено на максимизацию чистого общего излишка, показателя, который, по сути, представляет собой совокупную стоимость излишков как производителей, так и потребителей.

Важно отметить, что TIMES не всегда строго придерживается принципов рынка совершенной конкуренции. Разработчикам моделей разрешено отклоняться от этого стандартного предположения путем включения конкретных ограничений, определяемых пользователем. Некоторые примеры этих ограничений включают ограничения на проникновение определенных технологий, ограничения выбросов или введение внешних цен на нефть. Более того, несовершенство рынка — не просто следствие этих ограничений. Они также могут возникнуть в результате преднамеренных политических решений или рыночных вмешательств. Налоги, субсидии и барьерные ставки являются яркими примерами таких мер. Эти элементы не только отражают сложности реального мира, но и позволяют более детально представить энергетическую экономику в модели TIMES.

При выполнении задачи определения равновесия TIMES настраивает функционирование энергетической системы с учетом определенного временного интервала, и целью здесь является минимизация общих затрат системы. В другой интерпретации это также можно рассматривать как максимизацию чистого общего излишка. При этом важно отметить, что TIMES не просто статически рассматривает данный момент времени. Модель функционирует динамично, учитывая все инвестиционные решения, которые нужно принять на протяжении каждого периода, имея при этом полное понимание всех будущих событий и переменных. Эта способность модели прогнозировать и учитывать будущие события в текущем моменте дает основания говорить о том, что TIMES обладает

свойством совершенного предвидения, что делает ее особенно ценной при планировании и анализе энергетических систем.

2.1.2. Временной горизонт

Временной горизонт модели — это расчетный период времени начиная с базового года до финального года и он, далее, разбивается на несколько периодов. Пользователь определяет их количество, причем каждый период может охватывать несколько лет. В программном обеспечении TIMES, все годы в пределах выбранного временного интервала рассматриваются как полностью идентичные. Единственное исключение — это целевая функция затрат, которая учитывает разные платежи для каждого года внутри рассматриваемого периода.

В случае других параметров, таких как мощности, товарные потоки, уровни использования оборудования и прочее, любые вводимые данные или результаты, полученные для определенного периода t, применяются ко всем годам этого временного интервала. Однако стоит отметить исключение для инвестиционных переменных: обычно такие параметры вводятся лишь однажды за весь период. Это значит, что инвестиции, как правило, учитываются при начальном этапе ввода данных для каждого из рассматриваемых временных отрезков.

Начальный период в модели ассоциируется с прошлым временным интервалом, в течение которого модель ограничена и не может проявлять свою свободу действий. В этот период все ключевые показатели определяются пользователем на основе их реальных исторических значений. Профессионалы в этой области часто советуют использовать начальный период, который охватывает один календарный год. Это делается с целью упрощения процесса калибровки, основанного на установленной статистике в области энергетики.

Калибровка в соответствии с начальным периодом играет ключевую роль при настройке модели TIMES. Этот процесс требует тщательного внимания к деталям и точности. Основными переменными, которые требуют корректировки в этом контексте, являются: рабочие характеристики и уровни функционирования различных технологий. Кроме того, это включает в себя объемы добычи, экспортные и импортные операции, производство и потребление всех видов энергетических ресурсов. Если модель также рассматривает выбросы, то и они также подлежат калибровке в этом процессе.

Наряду с периодами времени, существуют также другие временные промежутки. Эти промежутки, часто именуемые временными срезами, предоставляют возможность для индивидуальной настройки в зависимости от потребностей или предпочтений пользователя. Таким образом, люди могут самостоятельно определить, как долго будет длиться тот или иной интервал, исходя из своих желаний и целей. Это дает гибкость в планировании и учете времени, позволяя каждому выбирать наиболее подходящий для себя формат.

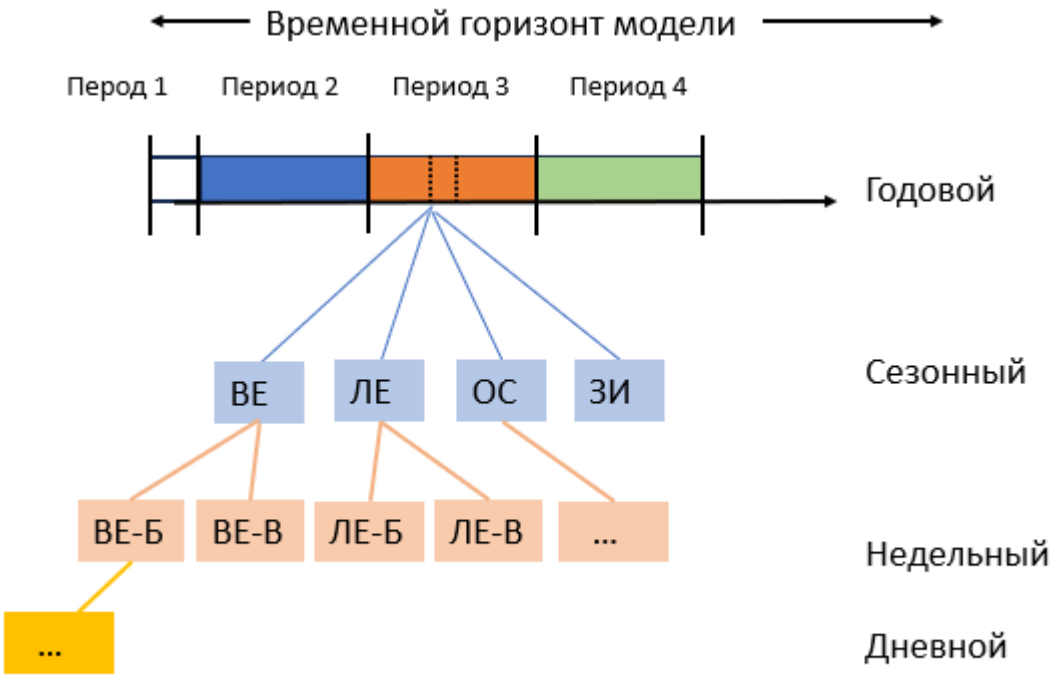

Рисунок 2.1.1. Временные срезы в пределах периодов

Пользователь может часто столкнуться с необходимостью учитывать различные временные интервалы, такие как разные времена года, части дня и ночи или даже разделение на рабочие и выходные дни. Понимание этих временных отрезков становится крайне важным в некоторых ситуациях. Например, когда стоимость и метод производства определенного источника энергии могут кардинально отличаться в зависимости от сезона. Это особенно актуально, если хранение определенного энергетического продукта связано с высокими издержками. Именно поэтому необходимо точное согласование между производством и потреблением такого ресурса. Также стоит учитывать, что сами технологии производства энергии могут иметь специфические особенности, которые зависят от времени года. Примером этого могут служить ветровые станции или гидроэлектростанции, работающие на речных потоках. В таких условиях необходимо точное планирование и мониторинг деятельности технологических установок в каждом временном интервале.

Некоторые товары и услуги, такие как электроэнергия, централизованное теплоснабжение, природный газ, промышленный пар или водород, требуют особого внимания к временным параметрам. Это связано с тем, что они могут иметь различные характеристики или стоимость в зависимости от времени суток или года.

Дополнительное обоснование для разбивки времени на субгодовые интервалы связано с необходимостью вложений в дорогостоящую инфраструктуру. Эта инфраструктура должна иметь мощность, способную справляться с максимальным спросом на товар в определенные моменты

времени. Существуют различные технологические решения, позволяющие хранить товар в одних временных промежутках с целью его последующей отгрузки в другие периоды. Эти методы и технологии можно исследовать, определять и создавать модели для их эффективного использования.

Важность такого подхода заключается в том, что компании могут оптимизировать свои ресурсы, обеспечивая наиболее эффективное использование инфраструктуры. Это может привести к сокращению издержек, так как предприятиям не придется вкладывать огромные средства в мощности, которые будут использоваться только периодически. По сути, это предоставляет возможность для более гибкого и рационального планирования в области управления товарными запасами и распределения ресурсов.

2.1.3. Компоненты энергетической системы

Энергетическая экономика TIMES характеризуется тремя ключевыми компонентами:

1. **Технологии (или процессы)**: Эти элементы могут быть представлены различными физическими сущностями, такими как заводы, транспортные средства или даже бытовые устройства. Их основная функция - преобразование одних типов товаров в другие. Некоторые из них, такие как добывающие предприятия или импортные механизмы, служат первоисточниками товаров. Другие, такие как электростанции или нефтеперерабатывающие заводы, преобразуют исходные материалы в энергию или другие товары. Есть и такие устройства, которые используют энергию напрямую, превращая её в конечные услуги для потребителей, например, автомобили или системы отопления.

2. **Товары**: Этот элемент включает в себя различные энергоносители, энергетические услуги, материалы и даже денежные потоки или выбросы. Каждый товар может быть произведен одним процессом и потребляться другим, создавая сложную сеть взаимодействия между различными технологиями и процессами.

3. **Товарные потоки**: они служат мостом между технологиями и товарами, представляя собой конкретное количество товара, проходящее через определенный процесс. Эти потоки указывают на то, как и где товар производится или потребляется. Например, рассмотрим электричество, произведенное ветряной турбиной определенного типа. При учете временного интервала и географического региона, где это происходит, мы получим представление о конкретном товарном потоке.

Таким образом, модель TIMES дает нам понимание о том, как различные технологии, товары и потоки взаимодействуют друг с другом, создавая сложную сеть в энергетической экономике.

2.1.4. Структура модели

Для глубокого понимания связей и взаимодействия между различными элементами полезно воспользоваться графическим представлением. Одним из таких методов является использование сетевой диаграммы, получившей название референтной энергетической системы (РЭС). В такой диаграмме каждый процесс, протекающий в системе, изображается в форме прямоугольника. А товары, которые являются результатом или исходным материалом этих процессов, представлены вертикальными линиями.

Чтобы показать направление и характер передачи материалов или ресурсов, используются связующие звенья. Эти связующие звенья объединяют прямоугольники, представляющие технологические блоки, с вертикальными линиями товаров. Это позволяет наглядно увидеть, какой товар или ресурс поступает на вход в технологический блок, и какой продукт или материал получается на выходе. Таким образом, РЭС обеспечивает целостное и системное представление о функционировании всей системы, позволяя легко отследить пути движения товарных потоков и взаимодействие различных элементов.

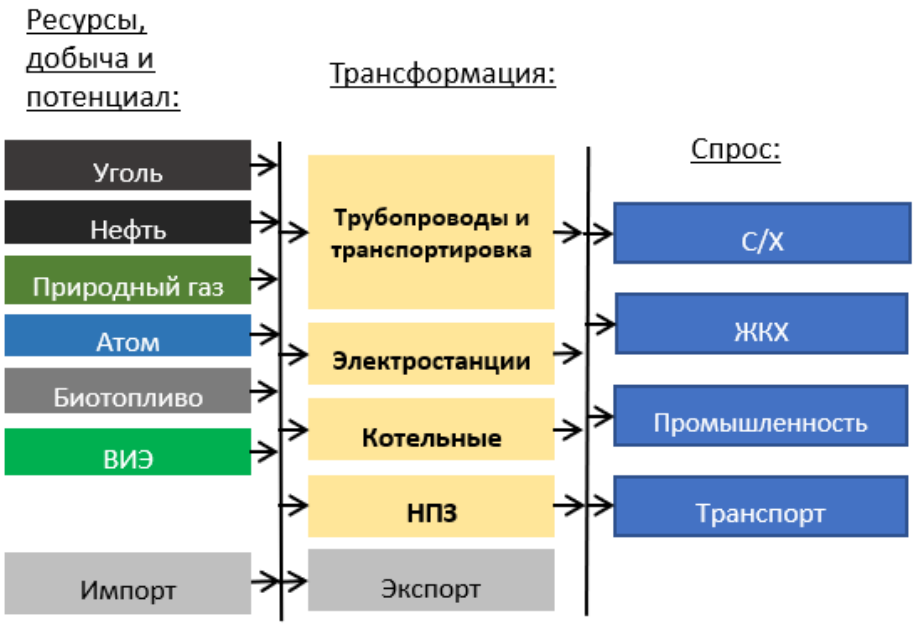

Рисунок 2.1.2 .Референтная энергетическая система (РЭС)

На рисунке изображена референтная энергетическая система, содержащая секторальный спрос на энергетические услуги. Существует технологии конечной поставки энергии, в которых используются энергоносители (товары) уголь, газ, нефтепродукты и электричество соответственно. Эти энергоносители, в свою очередь, производятся по другим технологиям, представленным на схеме в секторе трансформации. Для завершения цепочки на стороне первичной энергии на диаграмме также представлены источник добычи угля, природного газа, биотоплива, атома и возобновляемых источников энергии. Предусмотрена возможность экспорта и импорта при необходимости.

Модель TIMES имеет сложную структуру, которая в конечном итоге формируется на основе различных переменных и уравнений. Эти уравнения разрабатываются путем объединения основных уравнений, характерных для TIMES, и информации, предоставленной пользователем. Все эти данные в совокупности служат для определения уникальной базы данных каждой модели TIMES.

2.1.5. Обзор атрибутов TIMES

В модели TIMES все границы и ограничения настраиваются и задаются с помощью определенных атрибутов. Эти атрибуты могут быть ассоциированы с различными элементами, такими как процессы, товары, потоки данных или даже с уникальными переменными, разработанными специально для внедрения нововведений в функциональность TIMES. Данная система претерпела множество изменений с течением времени. Следует отметить, что последние версии TIMES включают в себя ряд новых атрибутов, которые ранее были недоступны. Эти инновации предоставляют пользователю более продвинутые и мощные инструменты для моделирования, что позволяет улучшить и сделать более гибким весь процесс управления и настройки. Эта эволюция системы подтверждает стремление к постоянному расширению возможностей и предоставлению усовершенствованных средств для пользователей.

Атрибуты в системах и процессах обычно делятся на две основные категории: кардинальные и порядковые. Кардинальные атрибуты выражаются через конкретные числовые значения. Например, они могут указывать на количество определенных элементов или размер определенной единицы. С другой стороны, порядковые атрибуты связаны с упорядоченными последовательностями или множествами, где отдельные элементы могут следовать друг за другом в определенном порядке.

Приведя пример из области процессов, можно упомянуть, что для их описания иногда используются порядковые атрибуты. Эти атрибуты помогают детализировать подмножества потоков. После их определения, они становятся основой для создания конкретных ограничений, связанных с потоком.

Стоит также обратить внимание на кардинальные атрибуты, которые в контексте многих систем обычно определяются как параметры. Эти параметры играют ключевую роль в определении и настройке различных элементов системы.

Технические параметры

Технические параметры служат важным индикаторами в любом процессе и включают в себя такие показатели, как эффективность процесса, различные коэффициенты готовности, расход материалов на каждую единицу действия, соотношение использованного топлива к единице деятельности, общий технический ресурс, который обеспечивает выполнение процесса, затраченное время на строительные работы, продолжительность и временные рамки

демонтажных работ, а также общий объем потребляемых и освобожденных материалов в ходе строительства и демонтажа.

Эффективность отражает степень успешности выполнения задачи, а коэффициенты готовности дают представление о степени завершенности процесса. Входные и выходные данные детализируют, сколько ресурсов затрачивается и высвобождается на каждом этапе процесса. Эти параметры могут быть адаптированы и определены различными способами, учитывая конкретные требования к гибкости процесса, временные интервалы, выбранные для определенных действий, а также временные рамки, в течение которых используются различные материалы.

Стоит отметить, что некоторые из упомянутых параметров могут быть актуальными только для специфических процессов. Например, процессы, связанные с хранением товаров, или процессы торговли между различными регионами могут иметь свои уникальные технические параметры. Это подчеркивает важность индивидуального подхода к каждому процессу и адаптации параметров под конкретные условия и требования.

Экономические параметры

Экономические показатели и аспекты производства и обслуживания играют критически важную роль в принятии решений. Эти параметры включают в себя широкий спектр различных затрат, таких как те, что связаны с инвестициями в процесс или технологию, демонтажем после окончания срока службы, текущим обслуживанием и даже ежедневной эксплуатацией.

Когда рассматривается инвестирование в технологию, инвестиционные затраты возникают один раз, именно в момент, когда происходит приобретение технологии или начальное вложение в процесс. Эти затраты представляют собой начальный капиталовложение. Далее, есть фиксированные ежегодные затраты, которые накладываются каждый год на каждую единицу мощности используемой технологии. Эти затраты не зависят от того, насколько активно технология используется; они возникают даже если технология временно выведена из эксплуатации. К тому же, в зависимости от степени использования технологии, возникают годовые переменные затраты, которые рассчитываются на основе объема деятельности или эксплуатации технологии.

Помимо прямых затрат на технологию и ее обслуживание, стоит учитывать и другие экономические параметры. Налоги и субсидии, например, могут быть установлены на определенные этапы инвестирования или производства, что позволяет регулировать экономическую стоимость процесса. Субсидии могут снижать затраты, тогда как налоги увеличивают их.

Другие ключевые экономические показатели включают экономический срок службы процесса и ставку дисконтирования. Экономический срок службы определяет период, в течение которого основные инвестиции в процесс будут полностью амортизированы. Интересно отметить, что этот срок может не совпадать с фактическим временем эксплуатации технологии. Ставка

дисконтирования, определяет временную стоимость денег и используется для расчета будущих платежей в современных условиях. Оба этих параметра играют важную роль в определении итоговой экономической стоимости проекта или инвестиции.

2.1.6. Теоретические соображения

Модели частичного равновесия основываются на концепции, которая заключается в том, что модели одновременно регулируют и стабилизируют процессы производства и потребления различных товаров, таких как топливо, различные материалы и услуги. Они взаимосвязаны таким образом, что цена производства определенного товара напрямую влияет на его спрос на рынке. Однако это не односторонний процесс, так как спрос на товар также определяет его цену. Суть этого механизма заключается в том, что, когда рыночные условия достигают определенного равновесия, это проявляется в определенных ценах p* и соответствующих им объемах продаж q*. В такой момент ни один потребитель не стремится приобрести товар в объеме меньше q*, а производители не заинтересованы в увеличении объемов производства выше q* за указанную цену p*. Важно понимать, что как p*, так и q* не являются статичными числами, а представляют собой векторные значения, которые соответствуют разным моделируемым товарам на рынке.

Для более глубокого понимания, следует отметить, что, когда каждый из рынков достигает своего равновесного состояния, это ведет к максимизации общего экономического излишка, что, в свою очередь, является индикатором оптимальной эффективности экономики в целом.

Классификация моделей энергетической системы

В современном мире существует огромное разнообразие энергетических моделей, применяемых различными странами и организациями. Эти модели созданы с различными целями и акцентами, чтобы подчеркнуть определенные аспекты, которые могут быть актуальны для разных стейкхолдеров или конкретных ситуаций.

Некоторые модели могут сосредотачиваться на краткосрочном оперативном планировании, в то время как другие включают в себя долгосрочные инвестиционные решения. Также стоит отметить, что одним из ключевых различий между этими моделями является уровень детализации, с которым они представляют различные товары и используемые технологии. Эта степень детализации может сильно варьироваться, начиная от общих категорий и заканчивая конкретными технологиями и продуктами. Этот аспект, в частности, помогает определить классификацию моделей, делая ее более структурированной и понятной. На основе вышесказанного можно выделить две основные категории моделей, которые будут подробно рассмотрены далее, хотя это и является лишь упрощенной классификацией среди множества возможных подходов к моделированию в энергетике.

Модели «Сверху-вниз»

На одной из сторон точек широкого спектра модельных инструментов находятся модели общего равновесия. В этих моделях каждый отдельный сектор экономики описывается с помощью специальной производственной функции. Эта функция предназначена для имитации возможных изменений и замен между ключевыми факторами производства. Важно отметить, что эти факторы, такие как энергия, капитал и труд, также группируются и суммируются в несколько крупных категорий или переменных. К числу таких моделей можно отнести разнообразные модели, которые представляют национальные или даже глобальные энергетические системы.

Часто модели общего равновесия охарактеризованы как "нисходящие" или «сверху-вниз». Под этим понимается, что в моделировании используется относительно ограниченное количество глобальных переменных и уравнений для представления всей экономической системы. Основные параметры, которые формируют производственные функции, тщательно высчитываются для каждого сектора, чтобы они могли точно отражать экономическую деятельность и распределение ресурсов за определенный базовый исторический год.

При разработке различных политических сценариев, комбинация ресурсов, необходимых для создания единицы продукции в определенном секторе, может изменяться. Эти изменения зависят от того, какую эластичность замещения выбрал пользователь модели. Обычно отраслевые производственные функции имеют стандартную формулировку, но, безусловно, могут адаптироваться и изменяться в зависимости от конкретных требований и условий.

Секторальные производственные функции обычно имеют вид:

$$X_s = A_0\left(B_K \cdot K_s^{\rho} + B_L \cdot L_S^{\rho} + B_E \cdot E_S^{\rho}\right)^{1/\rho} \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{X_S}$ – выпуск сектора *S*,

$\boldsymbol{K_S}$, $\boldsymbol{L_S}$, и $\boldsymbol{E_S}$ – входные ресурсы в виде капитала, труда и энергоресурсов необходимы для производства одной единицы выпуска в секторе *S*,

$\boldsymbol{\rho}$ – коэффициент эластичности замещения,

$\boldsymbol{A_0}$ и $\boldsymbol{B}$ **-** поправочные коэффициенты.

Выбор коэффициента эластичности замещения ρ определяет легкость или сложность замены одного фактора производства другим: чем меньше ρ (но все же больше или равно 1), тем легче заменить факторы производства для производства того же объема продукции. из сектора S. Также нужно отметить, что степень взаимозаменяемости факторов производства не различается среди факторов производства — легкость, с которой капитал может заменить труд, равна легкости, с которой капитал может заменить энергию, сохраняя при этом

тот же уровень продукции. Модели общего равновесия могут также использовать альтернативные формы производственной функции, но сохраняют основную идею явной взаимозаменяемости факторов производства.

Модели «Снизу-верх»

На противоположной стороне спектра располагаются модели с глубокой детализацией и четким технологическим уклоном. Эти модели, прежде всего, фокусируются на аспектах энергетического сектора экономики. В них каждая ключевая технология, используемая в энергетическом секторе, раскрывается через глубокое описание ее компонентов, функциональных характеристик, стоимостных показателей и многих других технических и экономических параметров. В таких моделях, которые часто называют моделями «снизу вверх», энергетический сектор представляет собой обширную сеть технологий, взаимосвязанных между собой через их ресурсы и продукты (это могут быть различные формы энергии, материалы, выбросы в атмосферу или потребность в дополнительных услугах).

Некоторые из этих моделей, ориентированных «снизу вверх», рассматривают частичное равновесие на основе максимизации совокупного выигрыша (с учетом интересов как потребителей, так и производителей), в то время как другие модели затрагивают различные стратегии и поведенческие механизмы экономических участников. В таких моделях, каждая отдельная единица продукции в определенной отрасли (например, один миллиард километров, пройденных транспортными средствами, или огромное количество энергии, потраченное на кондиционирование воздуха в домах) формируется на основе результатов, достигнутых с помощью множества технологий. Это означает, что функции производства в каждом секторе определяются косвенно, в отличие от прямого определения в более обобщенных моделях. Эти косвенные функции могут быть особенно сложными, учитывая многогранность и сложность основной энергетической инфраструктуры каждой отдельной отрасли.

Гибридные модели

Вышеупомянутая дихотомия действительно успешно описывала более ранние модели, с течением времени границы между этими категориями становятся менее ярко выраженными благодаря инновациям и разработкам в каждом из этих направлений. На протяжении последних лет в моделях, основанных на принципе "сверху вниз", стали просматриваться детали, которые раньше были нехарактерны для них. В частности, многие модели общего равновесия теперь интегрируют более детальное разделение на виды топлива и технологические процессы в основных энергетических секторах, таких как производство электроэнергии или снабжение ресурсами, такими как нефть и газ. Эти изменения в агрегированных моделях демонстрируют их эволюцию и стремление к более глубокому и детальному анализу ситуации в энергетическом секторе.

С другой стороны, присутствует ряд более продвинутых моделей, работающих по принципу «снизу вверх». Они стремятся в верхние слои экономической системы, чтобы понять последствия влияния всей экономики на энергетический сектор. К примеру, модель TIMES формирует запросы на конечное потребление, такие как спрос на промышленные товары. Этот спрос реагирует на изменения в ценах на товары, что позволяет модели учесть, как изменения цен на энергоносители влияют на экономический рост и наоборот.

Важно отметить ключевые различия между двумя категориями этих моделей. Рассмотрим подробнее:

1. Модели типа "сверху-вниз" прежде всего фокусируются на общемакроэкономическом аспекте. Это означает, что такие модели рассматривают переменные, которые находятся за пределами исключительного интереса энергетического сектора. Примеры таких переменных включают, но не ограничиваются ими, факторами такими как уровень заработной платы, общие тенденции потребления, а также процентные ставки. Их цель - предоставить широкий контекст, в рамках которого функционирует энергетический сектор.

2. В то время как модели "снизу-вверх" углубленно занимаются темой технологий, которые присутствуют в энергетическом секторе. Они не только предоставляют детальную картину существующих технологий, но и пытаются прогнозировать будущие инновации. Эти модели также обладают возможностью учитывать широкий спектр торгуемых товаров. Другой заметной особенностью этих моделей является их способность адаптироваться к более мелким, направленным на конкретные технологии или товары, политическим мерам. Это делает их исключительно полезными для анализа и прогнозирования микроуровневых тенденций в рамках энергетической политики.

Таким образом, выбор между этими двумя типами моделей в значительной степени зависит от конкретных задач исследования. Невозможно однозначно сказать, что одна модель лучше другой; каждая из них имеет свои преимущества и ограничения.

2.1.7. Определение функций спроса

Вычислительный метод основан на теореме эквивалентности:

«Экономическое равновесие спроса и предложения достигается, когда сумма излишков производителей и потребителей максимизируется»

Вычислительный метод делает акцент на поиске оптимальной точки, где интересы производителей и потребителей сходятся для достижения экономической выгоды. Важность этой теоремы не может быть недооценена, так как она служит основой для разработки эффективных стратегий управления ресурсами и формирования предложения на рынке.

Есть следующая функция спроса для каждой категории спроса i:

$$DM_i/DM_i{}^0 = (p_i/p_i^0)^{E_i} \qquad (2)$$

или:

$$p_i = p_i^0 \cdot (DM_i/DM_i{}^0)^{1/E_i}$$

где верхний индекс «0» указывает на базовый случай, а эластичность Ei отрицательна. Обратите также внимание, что эластичность может иметь два разных значения: одно для изменений спроса в сторону увеличения, другое — для изменений в сторону уменьшения.

2.1.8. Формулировка равновесия TIMES

При неэластичном спросе (т. е. чистой минимизации затрат) модель TIMES можно записать в виде следующей линейной программы:

$$Min\ c \cdot X \qquad (3)$$

при $\sum_k VAR_{ACT_{k,j}}(t) \geq DM_i(t) \quad i = 1,2, \ldots., I; t = 1, .., T$ (4)

и $B \cdot X \geq b$ (5)

где X — вектор всех переменных TIMES, а I — количество категорий спроса.

Другими словами:

• (3) выражает общую дисконтированную стоимость, которую необходимо минимизировать;

• (4) — набор ограничений удовлетворения спроса, где переменные VAR_ACT — это уровни активности технологий конечного использования, а правые части DM — это экзогенные требования, которые необходимо удовлетворить;

• (5) — это набор всех других ограничений TIMES.

Когда спрос эластичен, TIMES должен вычислить равновесие спроса и предложения в задаче оптимизации (3)–(5), где сторона спроса приспосабливается к изменениям цен, а преобладающие цены спроса представляют собой предельные издержки категории спроса.

2.1.9. Вычислительные соображения

В каждом спектре потребительского спроса, который может изменяться в зависимости от ценовых флуктуаций, необходимо тщательно определить множество переменных. При этом каждая из этих переменных имеет

установленную верхнюю границу, но, кроме этого, она не вносит дополнительных ограничений в систему.

При расширении линейной программы, она увеличивается за счет добавления новых переменных. Однако число ограничений в этой программе не увеличивается, сравнивая с первоначальной неэластичной линейной программой, исключая учет верхних границ. В контексте современного программного обеспечения для линейного программирования интересно отметить, что общее количество переменных почти не оказывает влияния на время вычислений. Это верно независимо от того, имеют ли эти переменные установленные границы или нет.

Важность этого замечания проявляется, особенно когда мы рассматриваем моделирование в системе TIMES. Включение в эту систему эластичных потребностей практически не влияет на продолжительность вычислительного процесса или на сложность управления результирующей линейной программой. Это становится особенно значимым, учитывая гигантские размеры линейных программ, которые обычно возникают при моделировании мультирегиональных или глобальных экономических систем в рамках TIMES.

2.2. Описание модели TIMES Казахстана

Технико-экономическая модель частичного равновесия энергетической системы Казахстана, TIMES-KAZ, была изначальна разработана в рамках проекта Германского общества по международному сотрудничеству (GIZ) «Поддержка «зелёной экономики» в Казахстане и Центральной Азии для низкоуглеродного экономического развития», финансируемого Федеральным министерством окружающей среды, охраны природы и безопасности ядерных реакторов (BMU) в рамках Германской инициативы по климату (IKI).

Модель TIMES-KAZ создана для секторов сжигания согласно классификации МГЭИК ООН и охватывает все основные парниковые газы: CO2, CH4, N2O.

Модель TIMES-KAZ – это целостная технологическая модель «снизу вверх», использующая линейное программирование на средне- и долгосрочных временных горизонтах для создания наименее затратной энергетической системы, оптимизированной в соответствии с рядом пользовательских ограничений. Модель TIMES-KAZ описывает развитие энергетической системы в Казахстане с подробной информацией об имеющихся технологиях и их стоимости.

Сильной стороной модели является детальное представление на технологическом уровне всех секторов сжигания, представляющих интерес с точки зрения снижения выбросов ПГ. Одноко, надо учитывать, что модель не учитывает взаимодействие секторов сжигания на остальные отрасли экономики, и, соответственно не может учитывать межсекторальное взаимодействие с ними.

2.2.1. Основные параметры модели TIMES-KAZ

Базовым годом модели TIMES- KAZ является 2021 год.

Временной горизонт: новая модель TIMES охватывает период с 2021 по 2060 год. Модель «перекалиброванa» с использованием самых последних отраслевых данных. Внутригодовое представление системы было уточнено, чтобы можно было лучше представить ключевые технологии, такие как ветер, солнце, современные обогреватели, хранение и т. д.

Временные срезы:

Для того чтобы детально отследить и адекватно представить колебания спроса на электроэнергию в течение календарного года, а также отразить динамику производства электричества из переменных возобновляемых источников, важно разбить год на определенное количество "временных сегментов". Эти сегменты, по сути, являются отдельными временными промежутками, которые имеют схожие особенности в отношении потребления и производства энергии.

Применение такого деления на временные промежутки обеспечивает более точное представление о том, как меняется потребность в электроэнергии в разное время года, учитывая, например, сезонные особенности, дневные и ночные пики потребления и другие факторы. Также это деление учитывает колебания в производстве энергии из-за особенностей работы технологий возобновляемых источников, таких как солнечные панели или ветрогенераторы, чья производительность может значительно меняться в зависимости от погодных условий и времени суток.

Таким образом, создание этих временных интервалов позволяет не только отслеживать динамику спроса, но и адаптировать систему электроснабжения к изменяющимся условиям производства возобновляемой энергии, обеспечивая более эффективное и устойчивое функционирование электроэнергетической системы.

По причинам производительности модели количество временных интервалов должно быть разумным, чтобы гарантировать, что время решения, требуемое моделью, не будет очень большим.

Определение временных интервалов в TIMES-KZ следующее:

Сезоны:

- Весна
- Лето
- Осень
- Зима

Срез день/ночь:

- Ночной период
- Ранний утренний период
- Утренний период
- Дневной период
- Послеобеденный период
- Вечерний период

Ставка дисконтирования: Общая ставка дисконтирования 5% и ставки дисконтирования для конкретных технологий (определенные в Scen_Hurdle_Rates.xls) 7% - 45%.

В модели используются следующие стандартные единицы измерения:

1. Все денежные величины в модели выражены в постоянных ценах базового года. Денежные единицы - доллары США. Инвестиционные затраты выражаются в $/kW для процессов, мощность которых выражается в GW, и в $/GJ в год для всех других технологий. Стоимость энергоносителей выражается в $/GJ. Результаты по инвестициям и затратам представлены в миллионах долларов.

2. Энергия выражается в петаджоулях (PJ). Это единицы энергии по умолчанию в модели. В отчете о результатах модели (VEDA-BE) есть возможность автоматической смены единиц измерения.

3. Мощность выражается в гигаваттах (GW) для сектора энергетики, когенерации и тепла и выражается в специальных единицах измерения для других процессов и технологий. Это единицы измерения по умолчанию, используемые в модели, чтобы избежать проблем с масштабированием и способствовать сходимости модели. Вывод может быть преобразован в желаемые пользователем единицы.

4. Потребности в энергетических услугах: для транспортного сектора потребность выражается в пассажиро-километрах (pkm) или тонно-километрах (tkm); для конкретных промышленных секторов, которые детально моделируются (например, цемент), потребности выражаются в миллионах тонн (Mt) физического производства (например, Mt произведенного цемента).

5. Выбросы парниковых газов выражаются в тысячах тонн (ktCO2eq).

Секторы спроса

Секторы спроса в референтной энергетической системе можно определить как «поставки энергетических ресурсов потребителям для деятельности, которая не является деятельностью, что преобразовывает или трансформирует топливо, как это определено в другом месте в структуре энергетического баланса».

В модель включены следующие секторы спроса:

1) Промышленность разделена на подсекторы с учетом потребления энергии в Казахстане:

▪ Железо и сталь

▪ Неметаллические полезные ископаемые, разделенные на производство цемента и производство прочих неметаллических полезных ископаемых

▪ Цветные металлы, разделенные на алюминий, медь, свинец, цинк, прочие цветные металлы.

▪ Продовольствие, напитки и табак

▪ Химическая и нефтехимическая промышленность разделена на удобрения, нефтехимию и другие.

▪ Добыча полезных ископаемых

▪ Строительная промышленность

▪ Другая промышленность (все другие виды промышленной деятельности в стране)

2) Жилые помещения, что разделены на индивидуальные дома (DTA *) и квартиры (APA *), в 4 типичных районах страны (2 * 4 = 8 типов жилья).

3) Коммерческий сектор, который включает частную и государственную деятельность. Общественное (уличное) освещение также относится к коммерческому сектору.

4) Сельское хозяйство, которое включает использование энергии для сельского хозяйства, лесного хозяйства и рыболовства.

5) Транспорт:

▪ Дорожный транспорт
▪ Железнодорожный транспорт
▪ Международная авиация
▪ Внутренняя навигация

MODEL STATISTICS

COMMODITY COUNTS: 635

PROCESS COUNTS: 2304

USER CONSTRAINTS: 227

BLOCKS OF EQUATIONS: 105

SINGLE EQUATIONS: 102,410

BLOCKS OF VARIABLES: 16

SINGLE VARIABLES: 116,836

NON ZERO ELEMENTS: 1,159,134

2.2.2. Целевая функция TIMES- KAZ

Целевая функция модели в полном виде со всеми переменными является сложным математическим выражением. Здесь приводится в упрощенной формулировке с общими указаниями элементы затрат, составляющие целевую функцию, а именно:

Капитальные затраты, которые включают в себя инвестиции и демонтажные работы, не просто рассматриваются как единоразовые расходы. Вместо этого они преобразуются в последовательные потоки годовых платежей. Эти платежи тщательно рассчитываются для каждого года горизонта планирования. К тому же, если речь идет о долгосрочном периоде, который выходит за рамки указанного горизонта, такие расходы, как демонтаж, и потенциальные доходы от переработки также принимаются во внимание. Весь этот процесс проводится в соответствии с принципами и методологиями, упомянутыми ранее в документе. Эти принципы обеспечивают систематический и прозрачный подход к расчетам, позволяя получить наиболее точное представление о будущих финансовых обязательствах.

Ликвидационная стоимость всех инвестиционных активов, которые остаются в работе на момент завершения расчетного временного горизонта, определяется как разовый финансовый доход. Этот доход представляет собой сумму, которая должна быть вычтена из общих расходов. Считается, что этот доход будет получен в течение года, который идет непосредственно после завершения горизонта. После определения этого дохода, его текущая стоимость пересчитывается, учитывая дисконтирование к тому году, который выбран пользователем в качестве базового. Таким образом, дисконтирование позволяет привести будущий потенциальный доход к его текущему эквиваленту, что делает процесс оценки более точным и понятным для инвестора.

Остальные затраты добавляются к годовым платежам капитальных затрат, чтобы сформировать величину ANNCOST, указанную ниже.

TIMES вычисляет с учетом экономических показателей различных регионов, вычисляя чистую приведенную стоимость затрат для каждого из них на протяжении определенного временного периода. Это делается путем дисконтирования годовых затрат до определенного пользователем базового года, что позволяет учитывать временную стоимость денег. После этого этапа, региональные дисконтированные затраты объединяются в одну общую стоимость. Эта общая стоимость, в свою очередь, служит ключевым показателем или целевой функцией для модели TIMES. Основной задачей модели в этом контексте является минимизация данной целевой функции при поиске оптимального равновесия в расчетах, чтобы обеспечить наиболее экономически эффективный сценарий для всех рассматриваемых регионов.

$$NPV = \sum_{r=1}^{R} \sum_{y \in YEARS} (1 + d_{r,y})^{REFYR-y} \bullet ANNCOST(r, y) \qquad (6)$$

где:

NPV чистая приведенная стоимость общих затрат для всех регионов (целевая функция TIMES);

ANNCOST(r,y) общие годовые затраты в регионе r и году y;

$\boldsymbol{d_{r,y}}$ это общая ставка дисконтирования;

REFYR базовый год для дисконтирования;

YEARS это набор лет, в течение которых имеются затраты, включая все годы в горизонте, плюс прошлые годы (до начального периода); и

R совокупность регионов.

В самой модели TIMES-KAZ, уровнения целевой функции выглядит следующим образом.

Общая целевая функция модели TIMES-KAZ

EQ_OBJ.. - OBJZ + VAR_OBJ(KZK,OBJVAR,USD) + VAR_OBJ(KZK,OBJINV,USD) + VAR_OBJ(KZK,OBJFIX,USD) - VAR_OBJ(KZK,OBJSAL,USD) =E= 0 ; (LHS = 0)

Элемент целевой функции – фиксированные затраты - Fixed Costs

EQ_OBJFIX(KZK,USD).. 6.07569206726745E-5*VAR_NCAP(KZK,2021,EVTRANS_H-H) + 6.07569206726745E-5*VAR_NCAP(KZK,2021,EVTRANS_H-HM) + 6.07569206726745E-5*VAR_NCAP(KZK,2021,EVTRANS_HM-ML) + 0.607569206726745*VAR_NCAP(KZK,2021,FT-HETBIOLOG01) + 0.607569206726745*VAR_NCAP(KZK,2021,FT-RSDLTHD00) + 0.607569206726745*VAR_NCAP(KZK,2021,FT-TERLTHD00) + EPS*VAR_NCAP(KZK,2021,STRCOACOK00) + EPS*VAR_NCAP(KZK,2021,STRGASBFG00) + 9.53661711471776*VAR_NCAP(KZK,2021,STRBIOBGSN_ST01)

…

20.6165555744325*VAR_NCAP(KZK,2025,TER_TS_WH_LOG_N_ST) + 10.8597706488323*VAR_NCAP(KZK,2025,TER_TS_WH_LTH_N_IM) + 88.5384705886121*VAR_NCAP(KZK,2025,TER_TS_WH_SOL_N_IM01) + 94.736163529815*VAR_NCAP(KZK,2025,TER_TS_WH_SOL_N_IM02)

Элемент целевой функции – инвестиционные затраты - Investment component

EQ_OBJINV(KZK,USD).. 22.7849224482728*VAR_NCAP(KZK,2021,FT-AGRLTH00) + 5.69623061206819*VAR_NCAP(KZK,2021,FT-INDHTH00) + 5.69623061206819*VAR_NCAP(KZK,2021,FT-SUPHTH00) + 1.02469507659596*VAR_NCAP(KZK,2021,SPR_COABCO_EXTR)

…

+ 497.330117902351*VAR_NCAP(KZK,2025,TER_TS_WH_SOL_N_IM01) + 532.143226155516*VAR_NCAP(KZK,2025,TER_TS_WH_SOL_N_IM02) - VAR_OBJ(KZK,OBJINV,USD) =E= -170497.264005954 ; (LHS = 0, INFES = 170497.264005954 ****)

Элемент целевой функции – остатоные затраты - Salvage

EQ_OBJSALV(KZK,USD).. 5.71077132478025*VAR_NCAP(KZK,2021,FT-AGRLTH00) + 1.42769283119506*VAR_NCAP(KZK,2021,FT-INDHTH00) + 1.42769283119506*VAR_NCAP(KZK,2021,FT-SUPHTH00) + 0.256827701448302*VAR_NCAP(KZK,2021,SPR_COABCO_EXTR)

…

+ 76.4838412346046*VAR_NCAP(KZK,2025,TER_TS_WH_LTH_N_IM) + 289.887913627409*VAR_NCAP(KZK,2025,TER_TS_WH_SOL_N_IM01) + 310.180067581327*VAR_NCAP(KZK,2025,TER_TS_WH_SOL_N_IM02) - VAR_OBJ(KZK,OBJSAL,USD) =E= 0 ; (LHS = 0)

Элемент целевой функции – переменные операционные затраты - Variable operating costs

EQ_OBJVAR(KZK,USD).. 0.1*VAR_ACT(KZK,2021,2021,DELIV_LTH_A1,RN) + 0.1*VAR_ACT(KZK,2021,2021,DELIV_LTH_A1,RL) + 0.1*VAR_ACT(KZK,2021,2021,DELIV_LTH_A1,RM) + 0.1*VAR_ACT(KZK,2021,2021,DELIV_LTH_A1,RD) + 0.1*VAR_ACT(KZK,2021,2021,DELIV_LTH_A1,RA)

…

+ 4.12331111488649E-6*VAR_ACT(KZK,2025,2025,Dum_TER_Retrofit,ANNUAL) - VAR_OBJ(KZK,OBJVAR,USD) =E= 0 ; (LHS = -8976.25130506263, INFES = 8976.25130506263 ****)

2.2.3. Уравнения модели TIMES

Модель TIMES стремится минимизировать общую дисконтированную стоимость при этом, следуя ряду уравнений или ограничений, которые обеспечивают корректное отражение реальной энергетической системы. Эти ограничения являются отражением физических и логических отношений, важных для моделирования. Они играют ключевую роль в гарантировании достоверности и надежности решений, генерируемых моделью.

Существует несколько различных видов ограничений в модели TIMES. Некоторые из них связаны с определенными физическими параметрами, в то время как другие описывают общие логические принципы или связи между компонентами системы.

Однако стоит отметить, что если хотя бы одно накладываемых ограничений не выполняется, то весь результат моделирования может быть признан недействительным. Такое состояние, когда модель не может удовлетворить все ограничения, обычно говорит о проблеме в входных данных

или о том, что было установлено чрезмерное или неправильное требование. Это может быть вызвано ошибками в данных или неправильной интерпретацией требований к системе.

Ниже приводятся уровнения модели TIMES-KAZ.

Определение переменных активности процесса

TIMES — это сложная система, которая позволяет распознавать как переменные активности, так и переменные потока. Чтобы создать понимание между этими двумя типами переменных, вводится определенное ограничение. Суть этого ограничения заключается в том, чтобы приравнивать общую переменную активности VAR_ACT(r,v,t,p,s) к своему соответствующему аналогу из переменных потока VAR_FLO(r,v,t,p,c,s), причем так, чтобы веса были правильно установлены.

Эта интеграция начинается с определения основного набора товаров, который отражает активность и, по сути, мощность соответствующего процесса. В ситуации, где у нас есть простой процесс с потреблением одного товара и производством другого, пользователь модели может легко выбрать один из потоков, чтобы задать активность и таким образом нормализовать весь процесс, будь то на входе или на выходе.

Однако, когда речь идет о сложных процессах, где много различных товаров, возможно разных категорий, участвующих в процессе как входные или выходные данные, задача становится сложнее. В этом контексте разработчик модели должен сначала определить, какая основная группа товаров (pcg) будет служить в качестве реперной точки для определения активности. Эта группа может включать, например, разные источники энергии, определенные типы материалов или даже выбросы парниковых газов.

После выбора этой реперной группы товаров, следующим шагом для моделировщика будет решение о том, через что лучше определить активность: через входящие потоки или через исходящие, принадлежащие к выбранной группе. В итоге, на концептуальном уровне, это приводит к формированию определенных взаимосвязей между данными переменными. Ниже приводится уровнение активности.

EQ_ACTFLO(r,v,t,p,s) – Activity definition

VAR_ACT(r,v,t,p,s) = **SUM{***c in pcg of* ***VAR_FLO(r,v,t,p,c,s)*** */ ACTFLO(r,v p,c)***}**

(7)

где *ACTFLO(r,v,p,c)* коэффициент конверсии (часто равен единице) от активности процесса к потоку конкретного товара.

Данное уравнение в модели Казахстана выглядит следующим образом.

```
EQ_ACTFLO(KZK,2021,2021,EUPV00,RM)..
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EUPV00,RM) -
        VAR_FLO(KZK,2021,2021,EUPV00,ELCMLO,RM) -
        VAR_FLO(KZK,2021,2021,EUPV00,ELCSPP,RM) =E= 0 ; (LHS = 0)

EQ_ACTFLO(KZK,2021,2021,EUPV00,RD)..
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EUPV00,RD) -
        VAR_FLO(KZK,2021,2021,EUPV00,ELCMLO,RD) -
        VAR_FLO(KZK,2021,2021,EUPV00,ELCSPP,RD) =E= 0 ; (LHS = 0)
```

Уравнение ограничений на активность процессов.

```
EQG_ACTBND(KZK,2021,EXPELCR1,ANNUAL)..
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,RN) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,RL) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,RM) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,RD) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,RA) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,RE) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,SN) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,SL) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,SM) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,SD) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,SA) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,SE) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,FN) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,FL) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,FM) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,FD) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,FA) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,FE) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,WN) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,WL) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,WM) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,WD) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,WA) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,WE) =G= 19.4497794 ;

EQG_ACTBND(KZK,2021,EXPGASNAT_R1_E01,ANNUAL)..
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPGASNAT_R1_E01,R) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPGASNAT_R1_E01,S) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPGASNAT_R1_E01,F) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPGASNAT_R1_E01,W) =G=
        509.66837496 ;
```

```
EQL_ACTBND(KZK,2021,EXPELCR1,ANNUAL)..
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,RN) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,RL) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,RM) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,RD) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,RA) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,RE) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,SN) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,SL) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,SM) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,SD) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,SA) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,SE) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,FN) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,FL) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,FM) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,FD) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,FA) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,FE) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,WN) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,WL) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,WM) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,WD) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,WA) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,WE) =L= 20.473452 ; (LHS =
        0)

EQL_ACTBND(KZK,2021,EXPGASNAT_R1_E01,ANNUAL)..
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPGASNAT_R1_E01,R) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPGASNAT_R1_E01,S) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPGASNAT_R1_E01,F) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPGASNAT_R1_E01,W) =L= 630 ;
        (LHS = 0)
```

Утилизация мощностей

В разные моменты времени конкретная модель может решить задействовать часть или даже всю установленную мощность, опираясь на коэффициент доступности соответствующей технологии. Важно понимать, что, основываясь на определенных параметрах и условиях, модель может принять решение о неиспользовании всей доступной мощности в некоторых временных интервалах или даже на протяжении одного, двух или более полных периодов. Подобное решение будет направлено на достижение главной цели: сокращение общих затрат. Если создатели модели посчитают это необходимым, они могут задать параметры, обеспечивающие использование отдельными технологиями их максимальных возможностей.

Дополнительно, стоит отметить следующее: для каждой технологии p, определенного временного периода t, года выпуска v, конкретного региона r и интервала времени s, активность данной технологии должна оставаться в пределах ее доступной мощности. Эти границы определяются с помощью коэффициента доступности, который устанавливается пользователем или разработчиком.

EQ_CAPACT (r,v,t,p,s) - Use of capacity

VAR_ACT (r,v,t,p,s) ≤ or =

*AF(r,v,t,p,s)**
*PRC_CAPACT(r,p))*FR(r,s)*VAR_CAP(r,v,t,p)*

(8)

Здесь PRC_CAPACT(r,p) — коэффициент преобразования между единицами мощности и активности (часто равный 1, за исключением электростанций). Параметр FR(r,s) равен (дробной) продолжительности интервала времени s. Коэффициент доступности AF также служит для указания характера ограничения как неравенства или равенства. В последнем случае мощность приходится использовать полностью. Обратите внимание, что «переменная» CAP(r,v,t,p) не определена явно в TIMES. Вместо этого оно заменяется частью (меньше или равной 1) инвестиционной переменной VAR_NCAP(r,v,p) суммы прошлых инвестиций, которые все еще действуют.

В модели TIMES-KAZ уровнение утилизации мощности выглядит следующим образом.

```
EQL_CAPACT(KZK,2021,2021,AGRMACOILDSL_E00,ANNUAL)..
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRMACOILDSL_E00,ANNUAL) =L=
        4.61459692367999 ; (LHS = 0)

EQL_CAPACT(KZK,2021,2021,AGRSTA_E00,ANNUAL)..
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTA_E00,ANNUAL) =L=
        58.821032724 ; (LHS = 0)

EQE_CAPACT(KZK,2020,2021,TER_BU_TP,ANNUAL)..
        VAR_ACT(KZK,2020,2021,TER_BU_TP,ANNUAL) =E= 45000 ;

EQE_CAPACT(KZK,2020,2021,TER_BU_TS,ANNUAL)..
        VAR_ACT(KZK,2020,2021,TER_BU_TS,ANNUAL) =E= 55000 ;
        (LHS = 0, INFES = 55000 ****)

EQG_CAPACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,ANNUAL)..
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,RN) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,RL) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,RM) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,RD) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,RA) +
```

```
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,RE) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,SN) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,SL) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,SM) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,SD) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,SA) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,SE) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,FN) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,FL) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,FM) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,FD) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,FA) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,FE) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,WN) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,WL) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,WM) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,WD) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,WA) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,WE) =G=
2.071293696 ;

EQG_CAPACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTBIOLOG_E00,ANNUAL)..
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTBIOLOG_E00,ANNUAL) =G=
0.0071832 ;
```

Уравнение баланса товаров

В каждый период и временной отрезок, процесс производства в определенном регионе, суммированное с количеством товаров, ввозимых из других районов, должно точно соответствовать общему объему, который либо удовлетворяется внутри этого региона, либо отправляется на экспорт во внешние регионы. В программном продукте TIMES существует особенное ограничение баланса, которое может быть или больше или равно (≥) или равно (=). Управление этим ограничением лежит на плечах пользователя модели, который может установить его, используя специфический параметр, связанный с каждым конкретным товаром.

Стандартное ограничение для материалов обычно устанавливается как равное, что означает, что объем произведенных и импортированных товаров должен строго соответствовать количеству, которое потребляется или отправляется на экспорт. С другой стороны, для энергетических ресурсов, выбросов и общего спроса, стандартное ограничение чаще всего устанавливается как неравенство, что позволяет возможность наличия избыточного производства.

Когда речь идет о товарах, которые имеют определенные временные рамки или интервалы, этот баланс или ограничение должны применяться на

протяжении каждого установленного временного промежутка. Это обеспечивает постоянное соответствие и равновесие между спросом и предложением на протяжении всего времени.

Балансовое уравнение может казаться сложным, особенно когда рассматривается множество условий, таких как параметры производства или потребления определенного товара. Эти условия формируют набор переменных и ограничений, которые определяют равновесие на рынке. Рассмотрим, например, конкретный товар, обозначенный как c. Для этого товара, в зависимости от периода времени t или винтажа v, а также от определенного региона r и, при необходимости, интервала времени s (или же это может быть ежегодный интервал, если другие интервалы не указаны), у нас есть определенное ограничение. Это ограничение гласит, что для каждого товара должно быть равновесие между тем, как этот товар распределяется, и тем, как он закупается. Под распределением мы понимаем общее потребление данного товара в регионе плюс то, сколько этого товара экспортируется за его пределы. В то время как под закупкой понимается общий объем производства данного товара в этом регионе плюс импорт этого товара из других регионов. Таким образом, балансовое ограничение стремится обеспечить, чтобы поставка и спрос на товар были в равновесии.

[Sum *{over all* ***p,c*** *∈TOP(r,p,c,"out")of:*
[*VAR_FLO(r,v,t,p,c,s)* + *VAR_SOUT(r,v,t,p,c,s)***STG_EFF(r,v,p)*] *}*** +

Sum *{over all* ***p,c*** *∈RPC_IRE(r,p,c,"imp") of*
*:****VAR_IRE(r,t,p,c,s,"imp")****}+*

Sum *{over all* ***p*** *of: Release(r,t,p,c)******VAR_NCAP(r,t,p,c)****}]* *******
COM_IE(r,t,c,s)

≥ or = **(9)**

Sum *{over all* ***p,c*** *∈* ***TOP(r,p,c,"in")*** *of:* ***VAR_FLO(r,v,t,p,c,s)*** **+**
VAR_SIN(r,v,t,p,c,s)*}* **+**

Sum {*over all* ***p,c∈ RPC_IRE(r,p,c,"exp")****} of:*

VAR_IRE(r,t,p,c,s,'exp") **+**

Sum *{over all* ***p*** *of: Sink(r,t,p,c)**VAR_NCAP(r,t,p,c)}* +

FR(c,s) ***VAR_DEM(c,t)***

где:

Ограничение ≥ для энергоресурсов и = для материалов и выбросов;

TOP(r,p,c,”in/out”) определяет, что существует поток ввода/вывода товара c в/из процесса p в регионе r;

RPC_IRE(r,p,c,”imp/exp”) определяет, что существует поток импорта/экспорта в/из региона r товара c через процесс p;

STG_EFF(r,v,p) – эффективность процесса хранения p;

COM_IE(r,t,c) эффективность инфраструктуры товара c;

Release(r,t,p,c) — это количество товара c, рекуперированного на единицу мощности демонтированного процесса p (полезно для представления некоторых материалов или топлива, которые рекуперируются при демонтаже объекта);

Sink(r,t,p,c) — количество товара c, необходимое на единицу новой мощности процесса p (полезно для представления некоторых материалов или топлива, израсходованных для строительства объекта);

FR(s) — это часть года, охваченная временными интервалами (равна 1 для товаров без временных интервалов).

В модели TIMES-KAZ представлена следующим образом.

```
EQG_COMBAL(KZK,2021,AGRBIOBGS,ANNUAL)..
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,FT-AGRBIOBGS00,ANNUAL) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,RN,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,RL,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,RM,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,RD,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,RA,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,RE,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,SN,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,SL,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,SM,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,SD,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,SA,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,SE,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,FN,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,FL,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,FM,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,FD,IMP) +
```

```
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,FA,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,FE,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,WN,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,WL,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,WM,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,WD,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,WA,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOBGS,WE,IMP) =G= 0
        ; (LHS = 0)

    EQG_COMBAL(KZK,2021,AGRBIOLOG,ANNUAL)..  -
        2*VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTBIOLOG_E00,ANNUAL) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,FT-AGRBIOLOG00,ANNUAL) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,RN,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,RL,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,RM,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,RD,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,RA,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,RE,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,SN,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,SL,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,SM,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,SD,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,SA,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,SE,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,FN,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,FL,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,FM,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,FD,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,FA,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,FE,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,WN,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,WL,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,WM,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,WD,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,WA,IMP) +
        VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRBIOLOG,WE,IMP) =G= 0
        ; (LHS = 0)

EQE_COMPRD(KZK,2021,AGRSTHT,ANNUAL)..
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,RN) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,RL) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,RM) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,RD) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,RA) +
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,RE) +
```

```
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,SN) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,SL) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,SM) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,SD) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,SA) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,SE) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,FN) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,FL) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,FM) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,FD) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,FA) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,FE) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,WN) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,WL) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,WM) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,WD) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,WA) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,AGRSTHTAGRLTH_E00,WE) +
VAR_COMPRD(KZK,2021,AGRSTHT,ANNUAL) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,RN,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,RL,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,RM,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,RD,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,RA,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,RE,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,SN,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,SL,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,SM,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,SD,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,SA,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,SE,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,FN,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,FL,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,FM,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,FD,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,FA,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,FE,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,WN,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,WL,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,WM,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,WD,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,WA,IMP) +
VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,AGRSTHT,WE,IMP) =E= 0 ;
(LHS = 0)
```

Уравнение передачи мощностей (сохранение инвестиций)

Инвестиции в определенную технологию способствуют увеличению ее эффективности и установленной мощности на протяжении всего времени ее эксплуатации. Это означает, что при вложении средств в технологию ее потенциал и производительность растут, и этот рост сохраняется до того момента, когда технология достигает конца своего физического срока службы. Однако, когда этот срок заканчивается, общая производительность или мощность технологии уменьшается пропорционально сумме первоначальных инвестиций.

При попытке оценить, какова будет доступная мощность технологии в конкретный момент времени, используемая модель учитывает общую мощность, которая была достигнута благодаря всем прошедшим инвестициям. Некоторые из этих инвестиций могли быть сделаны даже до начала рассматриваемого временного интервала, но их влияние все еще актуально и ощущается в виде остаточной мощности технологии. Наряду с этим модель также учитывает инвестиции, которые были предусмотрены на начальном этапе или после его начала, и которые влияют на период до текущего момента.

Если попытаться определить общую мощность технологии p в регионе r на момент времени t, то это будет равносильно подсчету всех инвестиций, произведенных до этого момента, у которых срок эксплуатации еще не истек, плюс оставшейся мощности до момента завершения прогноза. Однако сложность в расчетах заключается в том, что используемая модель, TIMES, предполагает, что длительность временных интервалов может варьироваться. Это может привести к тому, что окончание срока действия определенных инвестиций может приходиться на середину будущего временного интервала.

EQ_CPT(r,t,p) - Capacity transfer

VAR_CAPT(r,t,p) *=* ***Sum****{over all periods t' preceding or equal to t such that t-t'<LIFE(r,t',p) of* ***VAR_NCAP(r,t',p)****} + RESID(r,t,p)*
(10)

где RESID(r,t,p) — (обеспечиваемая экзогенно) мощность технологии p за счет инвестиций, которые были сделаны до начального периода модели и все еще существуют в регионе r в момент времени t..

В модели TIMES-KAZ уравнение выглядит следующим образом.

EQE_CPT(KZK,2021,HPPGASNAT00)..
VAR_CAP(KZK,2021,HPPGASNAT00) =E= 13.2550136986301 ;
(LHS = 13.2550136986301)

EQE_CPT(KZK,2021,INDCHPAUT_00)..
VAR_CAP(KZK,2021,INDCHPAUT_00) =E= 2.304 ; (LHS = 2.304)

Уравнение частчичного потока

EQG_FLOFR(KZK,2021,RSD_APA1_AP_E01,RSD_APA1_AP,RN,UP).. -
VAR_ACT(KZK,2021,2021,RSD_APA1_AP_E01,RN) +
EPS*VAR_ACT(KZK,2021,2021,RSD_APA1_AP_E01,RL) +
EPS*VAR_ACT(KZK,2021,2021,RSD_APA1_AP_E01,RM) +
EPS*VAR_ACT(KZK,2021,2021,RSD_APA1_AP_E01,RD) +
EPS*VAR_ACT(KZK,2021,2021,RSD_APA1_AP_E01,RA) +
EPS*VAR_ACT(KZK,2021,2021,RSD_APA1_AP_E01,RE) =G= 0 ;
(LHS = 0)

Уравнение долей входных потоков товаров

EQG_INSHR(KZK,2021,2021,FT-AGROILDSL00,BIODSL,FT-
AGROILDSL00_NRGI,ANNUAL).. - VAR_FLO(KZK,2021,2021,FT-
AGROILDSL00,BIODSL,ANNUAL) =G= 0 ; (LHS = 0)

EQG_INSHR(KZK,2021,2021,FT-AGROILGSL00,BIOETH,FT-
AGROILGSL00_NRGI,ANNUAL).. - VAR_FLO(KZK,2021,2021,FT-
AGROILGSL00,BIOETH,ANNUAL) =G= 0 ; (LHS = 0)

EQE_INSHR(KZK,2021,2021,INDDEMCONE_00,INDBIOBGS,INDDEMCON
E_00_NRGI,RN).. -
VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDDEMCONE_00,INDBIOBGS,RN)
=E= 0 ; (LHS = 0)

EQE_INSHR(KZK,2021,2021,INDDEMCONE_00,INDBIOBGS,INDDEMCON
E_00_NRGI,RL).. -
VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDDEMCONE_00,INDBIOBGS,RL)
=E= 0 ; (LHS = 0)

Уравнение долей выходных потоков товаров

EQG_OUTSHR(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDCONHTH,INDHTHALC_
00_NRGO,R).. -
0.97*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDCONHTH,R) +
0.03*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDFBTHTH,R) +
0.03*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDISTHTH,R) +
0.03*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDMIQHTH,R) +
0.03*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDNFMHTH,R) +
0.03*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDNMMHTH,R) +
0.03*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDOTHHTH,R) +
0.03*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDPCHHTH,R) =G= 0
; (LHS = 0)

EQG_OUTSHR(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDCONHTH,INDHTHALC_
00_NRGO,S).. -
0.97*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDCONHTH,S) +
0.03*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDFBTHTH,S) +

0.03*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDISTHTH,S) +
0.03*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDMIQHTH,S) +
0.03*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDNFMHTH,S) +
0.03*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDNMMHTH,S) +
0.03*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDOTHHTH,S) +
0.03*VAR_FLO(KZK,2021,2021,INDHTHALC_00,INDPCHHTH,S) =G= 0
; (LHS = 0)

EQE_OUTSHR(KZK,2021,2021,EVTRANS_H-H,ELCLOSST,EVTRANS_H-H_NRGO,RN).. 0.021*VAR_FLO(KZK,2021,2021,EVTRANS_H-H,ELCHIG5,RN) - 0.979*VAR_FLO(KZK,2021,2021,EVTRANS_H-H,ELCLOSST,RN) =E= 0 ; (LHS = 0)

EQE_OUTSHR(KZK,2021,2021,EVTRANS_H-H,ELCLOSST,EVTRANS_H-H_NRGO,RL).. 0.021*VAR_FLO(KZK,2021,2021,EVTRANS_H-H,ELCHIG5,RL) - 0.979*VAR_FLO(KZK,2021,2021,EVTRANS_H-H,ELCLOSST,RL) =E= 0 ; (LHS = 0)

Уравнение пикового ограничение резервов (только товары с временными интервалами)

Предполагается, что в каждом конкретном временном промежутке и в каждом географическом регионе суммарная производственная мощность всех процессов, занимающихся выпуском товара, должна не просто соответствовать, но и превосходить средний уровень спроса. Когда мы говорим о моменте, в который наблюдается наибольший спрос (пик), этот избыток мощности измеряется в процентах от среднего уровня спроса. Этот процент, который мы определяем как пиковый коэффициент резерва, обозначенный как COM_PKRSV(r,t,c,s), не выбран случайно. Он служит для обеспечения безопасности и стабильности в условиях различных непредвиденных обстоятельств.

Среди таких обстоятельств можно выделить потенциальный дефицит товара, возникающий из-за нестабильности в поставках, что может быть обусловлено, например, колебаниями в уровне воды в резервуарах. Кроме того, стоит учитывать и непредвиденные аварии или простои в работе оборудования, а также моменты, когда реальный спрос на товар внезапно и значительно превышает средние показатели в пиковые интервалы. Этот коэффициент резерва, таким образом, действует как безопасный "запас прочности", предотвращающий негативные последствия от событий, которые не были учтены при моделировании.

Для понимания на практике: представьте холодную страну, где пиковое потребление электроэнергии или природного газа приходится на зимние месяцы. В таких условиях общая генерирующая мощность, например, электростанции или газоснабжающего предприятия, должна быть рассчитана так, чтобы её хватало для удовлетворения повышенного спроса зимой, причем с надежным запасом. Если же речь идет о теплой стране, пиковое потребление электричества,

вероятно, будет связано с летним периодом, когда из-за жары растет спрос на кондиционирование воздуха. От пользователей зависит, какие именно временные промежутки они определяют как пиковые, исходя из специфики своего региона и потребностей.

Для любого заданного момента времени t, а также для конкретного региона r, необходимо иметь установленную мощность, которая будет достаточной для обеспечения потребностей даже в самые пиковые моменты спроса. Важно понимать, что в периоды с наивысшим спросом на продукт или услугу c, установленная мощность должна не только соответствовать потребностям, но и превышать их. Это превышение определяется коэффициентом безопасности E. Этот коэффициент носит название пикового коэффициента резерва и служит гарантией того, что потребности в мощности будут удовлетворены даже в условиях наивысшего спроса.

EQ_PEAK(r,t,c,s) - Commodity peak requirement

Sum *{over all* ***p*** *producing* ***c with c=pcg*** *of PRC_CAPACT(r,p)* *******
Peak(r,v,p,c,s) ****** *FR(s)* ****VAR_CAP(r,v,t,p) * VAR_ACTFLO(r,v,p,c)*** *} +*

Sum *{over all* ***p*** *producing* ***c*** *with* ***c≠pcg*** *of*

NCAP_PKCNT(r,v,p,c,s) ****VAR_FLO(r,v,t,p,c,s)}***
+VAR_IRE(r,t,p,c,s,i)

$$\geq \qquad \textbf{(11)}$$

*[1+ COM_PKRSV(r,t,c,s)] * [* ***Sum*** *{over all* ***p consuming c*** *of*
VAR_FLO(r,v,t,p,c,s) +VAR_IRE(r,t,p,c,s,e)} *]*

где:

COM_PKRSV(r,t,c,s) — это коэффициент резерва для конкретного региона для товара c в интервале времени, который учитывает неожиданные простои оборудования, пиковый спрос и неопределенную доступность ресурсов, а также

NCAP_PKCNT(r,v,p,c,s) определяет долю мощности технологии p в регионе r за период t и товара c (только электричество или тепло), которому разрешено вносить вклад в пиковую нагрузку в срезе s; многие типы процессов снабжения предсказуемо доступны во время пика и, таким образом, имеют пиковый коэффициент, равный 1, тогда как другим (например, ветряным турбинам или солнечным электростанциям в случае с электроэнергией) присваивается пиковый коэффициент меньше 1, поскольку они включены среднее значение доступно только частично на пике (например, ветряная турбина обычно имеет пиковый коэффициент 0,25 или 0,3, тогда как гидроэлектростанция, газовая станция или атомная электростанция обычно имеют пиковый коэффициент, равный 1).

В модели TIMES-KAZ имеет следующий вид.

```
EQ_PEAK(KZK,2021,ELCHIGG,RN)..  -
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,RN) +
        0.943396226415094*VAR_ACT(KZK,2021,2021,IMPELCR1,RN) +
        0.943396226415094*VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,ELCHIGG,RN,I
        MP) + EPS*VAR_FLO(KZK,2021,2021,EUWIND00,ELCHIGG,RN) -
        VAR_FLO(KZK,2021,2021,EVTRANS_H-H,ELCHIGG,RN) +
        0.943396226415094*VAR_FLO(KZK,2021,2021,PUCOABCO100,ELCHIG
        G,RN) +
        0.943396226415094*VAR_FLO(KZK,2021,2021,PUCOABIC100,ELCHIGG,
        RN) +
        0.943396226415094*VAR_FLO(KZK,2021,2021,PUCOASUB100,ELCHIGG
        ,RN)+
        0.943396226415094*VAR_FLO(KZK,2021,2021,PUGASNAT100,ELCHIGG
        ,RN) + 1.03584905660377*VAR_NCAP(KZK,2021,EUCOASUB100) +
        1.03584905660377*VAR_NCAP(KZK,2021,EUGASNAT100) +
        1.03584905660377*VAR_NCAP(KZK,2021,EUHYDSR100) =G= -
        16.7745396226415 ; (LHS = 0)

EQ_PEAK(KZK,2021,ELCHIGG,RL)..  -
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,EXPELCR1,RL) +
        0.943396226415094*VAR_ACT(KZK,2021,2021,IMPELCR1,RL) +
        0.943396226415094*VAR_IRE(KZK,2021,2021,IMPNRGZ,ELCHIGG,RL,I
        MP) + EPS*VAR_FLO(KZK,2021,2021,EUWIND00,ELCHIGG,RL) -
        VAR_FLO(KZK,2021,2021,EVTRANS_H-H,ELCHIGG,RL) +
        0.943396226415094*VAR_FLO(KZK,2021,2021,PUCOABCO100,ELCHIG
        G,RL) +
        0.943396226415094*VAR_FLO(KZK,2021,2021,PUCOABIC100,ELCHIGG,
        RL) +
        0.943396226415094*VAR_FLO(KZK,2021,2021,PUCOASUB100,ELCHIGG
        ,RL) +
        0.943396226415094*VAR_FLO(KZK,2021,2021,PUGASNAT100,ELCHIGG
        ,RL) + 0.621509433962264*VAR_NCAP(KZK,2021,EUCOASUB100) +
        0.621509433962264*VAR_NCAP(KZK,2021,EUGASNAT100) +
        0.621509433962264*VAR_NCAP(KZK,2021,EUHYDSR100) =G= -
        10.0647237735849 ; (LHS = 0)
```

Уравнение хранилищ

```
EQ_STGTSS(KZK,2021,2021,BAT_TRARPPC_E01,RN)..
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,BAT_TRARPPC_E01,RN) -
        VAR_ACT(KZK,2021,2021,BAT_TRARPPC_E01,RE) -
        VAR_SIN(KZK,2021,2021,BAT_TRARPPC_E01,TRAELC,RE) +
        VAR_SOUT(KZK,2021,2021,BAT_TRARPPC_E01,TRABATS,RE)
        =E= 0 ; (LHS = 0)
```

EQ_STGTSS(KZK,2021,2021,BAT_TRARPPC_E01,RL).. -
VAR_ACT(KZK,2021,2021,BAT_TRARPPC_E01,RN) +
VAR_ACT(KZK,2021,2021,BAT_TRARPPC_E01,RL) -
VAR_SIN(KZK,2021,2021,BAT_TRARPPC_E01,TRAELC,RN) +
VAR_SOUT(KZK,2021,2021,BAT_TRARPPC_E01,TRABATS,RN)
=E= 0 ; (LHS = 0)

2.2.4. Сценарные условия модели TIMES

К основным ограничениям, которые обычно учитываются в TIMES, добавляется возможность создания специфических, настраиваемых пользователем ограничений, обычно называемых пользовательскими ограничениями (UC). Эти UC позволяют учесть индивидуальные особенности и требования, которые пользователь считает важными. У каждого такого пользовательского ограничения есть свои коэффициенты, которые следуют определенным установленным правилам.

С последними модернизациями программного кода TIMES, возможности пользовательских ограничений стали еще более гибкими. Теперь пользователь может интегрировать практически любую переменную, присутствующую в TIMES. В качестве примера можно привести пользовательское ограничение, которое ставит ограничение на инвестиции в новые электростанции, независимо от их конструкции, или требует, чтобы определенная часть новых энергетических мощностей была обеспечена за счет возобновляемых источников.

Эти настраиваемые ограничения могут быть применены для различных временных рамок. Например, они могут помогать в моделировании альтернативных сценариев модернизации или продления эксплуатации существующего оборудования. UC часто используется для отслеживания общего количества товаров, потоков, технологий или даже целых направлений деятельности на протяжении времени. И благодаря недавним обновлениям в коде TIMES, эти ограничения стали гораздо более автономными и не требуют постоянных корректировок в зависимости от выбранного временного горизонта.

К тому же, чтобы сделать процесс создания таких пользовательских ограничений более простым и понятным, TIMES предоставляет удобный шаблон. С его помощью можно легко задать, какие переменные будут участвовать в ограничении и какие именно коэффициенты нужно установить для эффективного функционирования этого ограничения.

Уравнение пользовательских ограничений в модели TIMES-KAZ.

EQE_UCRT(UELE_GAS_CHPRTRF,KZK,2022)..
VAR_CAP(KZK,2022,PUGASNAT100) -
VAR_UCRT(UELE_GAS_CHPRTRF,KZK,2022) =E= 0 ; (LHS = 1.536, INFES = 1.536 ****)

EQE_UCRT(UELE_GAS_CHPRTRF,KZK,2025)..
VAR_CAP(KZK,2025,PUGASNAT100) -
VAR_UCRT(UELE_GAS_CHPRTRF,KZK,2025) =E= 0 ;

EQE_UCTS(LTRA__Share_ELC_Cars,2022,ANNUAL)..
2.2*VAR_ACT(KZK,2022,2022,TRARPPC_ELC_E01,ANNUAL) +
2.2*VAR_ACT(KZK,2022,2022,TRARPPC_ELC_N01,ANNUAL) +
2.2*VAR_ACT(KZK,2022,2022,TRARPPC_ELC_S01,ANNUAL) -
0.000140429798607381*VAR_COMPRD(KZK,2022,TRARPPC,ANNUAL) -
VAR_UCTS(LTRA__Share_ELC_Cars,2022,ANNUAL) =E= 0 ; (LHS = 0)

EQE_UCTS(LTRA__Share_ELC_Cars,2025,ANNUAL)..
2.2*VAR_ACT(KZK,2025,2025,TRARPPC_ELC_E01,ANNUAL) +
2.2*VAR_ACT(KZK,2025,2025,TRARPPC_ELC_N_IM,ANNUAL) +
2.2*VAR_ACT(KZK,2025,2025,TRARPPC_ELC_N01,ANNUAL) +
2.2*VAR_ACT(KZK,2025,2025,TRARPPC_ELC_S_IM,ANNUAL+
2.2*VAR_ACT(KZK,2025,2025,TRARPPC_ELC_S01,ANNUAL) -
0.00014898197334257 1*VAR_COMPRD(KZK,2025,TRARPPC,ANNUAL) -
VAR_UCTS(LTRA__Share_ELC_Cars,2025,ANNUAL) =E= 0 ; (LHS = 0)

EQE_UCRTS(UC_AGRPV_AND_BAT,KZK,2025,ANNUAL).. -
0.2*VAR_CAP(KZK,2025,EUPVSOLAGR102) +
VAR_CAP(KZK,2025,STGAGRELC) -
VAR_UCRTS(UC_AGRPV_AND_BAT,KZK,2025,ANNUAL) =E= 0 ;

EQE_UCRTS(UC_CAP_HP,KZK,2022,ANNUAL)..
VAR_NCAP(KZK,2022,HPPHETCOASUB_N_ST_01) +
VAR_NCAP(KZK,2022,HPPHETGASNAT_N_ST_01) -
VAR_UCRTS(UC_CAP_HP,KZK,2022,ANNUAL) =E= 0 ; (LHS = 0)

EQE_ACTEFF(KZK,2021,2021,EUCOASUB100,NRG,IN,RN).. -
3.2258064516129*VAR_ACT(KZK,2021,2021,EUCOASUB100,RN) +
VAR_FLO(KZK,2021,2021,EUCOASUB100,ELECOASUB,RN) =E= 0 ; (LHS = 0)

EQE_ACTEFF(KZK,2021,2021,EUCOASUB100,NRG,IN,RL).. -
3.2258064516129*VAR_ACT(KZK,2021,2021,EUCOASUB100,RL) +
VAR_FLO(KZK,2021,2021,EUCOASUB100,ELECOASUB,RL) =E= 0 ; (LHS = 0)

2.2.5. Климатические параметры

Модель энергетической системы имеет возможность рассчитывать выбросы парниковых газов. В данный момент учитываются три газа, таких как диоксид углерода, метан и закись азота. Ниже представлены коэффициенты для различных видов топлив.

Таблица 2.2.1 . Коэффициенты выбросов от различных видов топлив

	Уголь	СНГ	Бензин	Дизель		Природный газ
CO2	97	63.1	69.3	74.1		56.1
CH4	0.28	0.028	0.084	0.084		0.028
N2O	0.3975	0.0265	0.159	0.159		0.0265

Источник: данные модели TIMES Казахстана, кг/ГДж

2.2.6. Дискретное условие инвестирование

В многих ситуациях, свойство линейности, присущее модели TIMES, может не обеспечить достаточную точность при моделировании специфических инвестиционных задач. Представьте модель TIMES, которая используется для анализа масштаба сравнительно небольшого сообщества, например, города или небольшого района. Когда речь идет о таком масштабе, высокая детализация инвестиционных решений становится критически важной. Возьмем в качестве иллюстрации электростанцию. Модель может предложить строительство электростанц1ии определенной мощности, но при практической реализации необходимо учесть минимально допустимый размер этой электростанции. Например, строительство атомной электростанции мощностью всего 50 МВт может быть нерациональным и экономически нецелесообразным.

Кроме того, при многорегиональном моделировании возникают и другие сложные вопросы. Один из них: имеет ли смысл строить межрегиональные электросети или, например, газопроводы, учитывая дискретные изменения их размеров? Такие инвестиционные процессы, которые могут быть реализованы только с определенными, дискретными шагами, часто классифицируются как "кусковые" или ступенчатые инвестиции. Это отражает их особенность – необходимость в инвестировании с определенными интервалами, вместо непрерывного изменения масштаба.

Для многих видов инвестиционных проектов абсолютное значение размера не играет решающей роли. Возьмем, к примеру, модель, которая определяет необходимость покупки 10 950,52 электромобилей. В данном контексте округление до 10 950 автомобилей не вызывает значительных проблем, особенно учитывая, что рассматриваемое число представляет собой годовую статистику. Подобная логика применима к множеству бытовых и коммерческих устройств для отопления. Это же правило действует и для таких объектов, как ветровые турбины определенной мощности или промышленные котлы. В общем, речь идет о технологиях, у которых относительно невелик диапазон минимально возможных размеров или количеств. Таким образом, такие технологии и объекты не классифицируются как инвестиции, требующие точного подсчета каждой единицы или «кусочные» инвестиции.

Пользователь несет полную ответственность за принятие окончательного решения о том, подходит ли ему использование определенных технологий с

учетом ограничения минимального размера. Это решение требует тщательного анализа всех потенциальных преимуществ и возможных недостатков.

В системе TIMES предлагается разновидность однократного инвестиционного подхода, который представляет собой более универсальную версию по сравнению с ранее рассмотренным вариантом. В этом контексте утверждается, что все вложения в определенную технологию, обозначаемую как k, будут соответствовать одному из заранее установленных N значений: 0, S1(t), S2(t), …,SN(t). Эта особенность особенно актуальна, когда рассматриваются различные стандартные размеры инвестиций, которые часто встречаются в практике.

По мере анализа данных обозначений становится ясно, что упомянутые дискретные размеры инвестирования могут меняться в зависимости от конкретного временного промежутка. Таким образом, размер инвестиции, который был оптимальным в один период, может быть неэффективным в другой.

Тем не менее, если выделить N размеров в качестве последовательных кратных определенного числа S, это позволит организациям многократно инвестировать в конкретную технологию, при этом размер каждой инвестиции будет установлен заранее и соответствовать определенному стандарту. Такой подход может быть особенно полезен для тех, кто стремится к стабильности и предсказуемости в своих инвестиционных решениях.

Обычно при моделировании крупных инвестиций используются целочисленные переменные, то есть переменные, значения которых могут быть только неотрицательными целыми числами (0, 1, 2,…). Математическая формулировка выглядит следующим образом:

$$VAR_NCAP(p,t) = \sum_{i=1}^{N} S_i(p,t) \times Z_i(p,t) each \rightleftarrows t = 1,..,T$$

$$c$$

$$Z_i(p,t) = 0 or 1$$

и

$$\sum_{i=1}^{N} Z_i(p,t) \leq 1$$

Второе и третье ограничения вместе взятые означают, что не более одной из переменных Z равна 1, а все остальные равны нулю. Таким образом, первое ограничение теперь означает, что NCAP равен одному из предустановленных размеров или равен 0, что является желаемым результатом.

Хотя формулировка единовременных инвестиций выглядит простой, она оказывает глубокое влияние на конечную программу оптимизации.

Действительно, задачи MIP, как известно, сложнее решать, чем задачи LP, и на самом деле многие свойства линейных программ, обсуждавшиеся в предыдущих главах, не справедливы для MIP, включая теорию двойственности, дополнительную нежесткость и т. д. Обратите внимание, что ограничение, которое Z(p,t) должно быть равно 0 или 1, что противоречит свойству делимости линейных программ. Это означает, что область осуществимости целочисленных переменных (и, следовательно, некоторых инвестиционных переменных) больше не является непрерывной, что значительно затрудняет применение чисто алгебраических методов для решения MIP. Фактически, практически все алгоритмы решения MIP используют (по крайней мере, в некоторой степени) частичные перечислительные схемы, которые, как правило, требуют много времени и менее надежны, чем алгебраические методы, используемые в LP.

Таблица 2.2.2. Дискретные опции в модели TIMES-KAZ

	CHP Natural Gas fired CC	CHP Sub-bituminous IGCC	CHP Sub-bituminous Supercritical	ELC NUC New	ELC Natural Gas CombinedCycle	ELC Natural Gas GT	ELC Sub-bituminous IGCC
	5.25	5.75	5.5	5.6	5.25	5.15	5.5
	5.5	6.5	6	6.2	5.5	5.3	6
	5.75	7.25	6.5	6.8	5.75	5.45	6.5
	6	8	7	7.4	6	5.6	7
	6.25			8	6.25	5.75	7.5
	6.5				6.5	5.9	
	6.75					6.05	
	7				7	6.2	
	7.25					6.35	

Источник: данные модели TIMES Казахстана

2.3. Политики и меры

Ниже приведена сводная таблица политик и мер по отраслям сжигания топлива и летучих эмиссий, которые использовались для дальнейшего анализа по снижению выбросов парниковых газов.

Таблица 2.3.1 . Сводная таблица политик и мер по отраслям

Политика или мера	Цель	Краткое описание

Доля природного газа в выработке электроэнергии	20% в 2020 году, 25% в 2030 году.	В Концепции по переходу к «зеленой» экономике и в Концепции развития ТЭК (обновляется на данный момент) заложена цель по достижению цели по увеличению доли природного газа в выработке электроэнергии.
Увеличение доли ВИЭ в выработке электроэнергии	3% в 2020 году, 6% в 2025 году, 15% в 2030 году.	Цель заложена в Концепции по переходу к «зеленой» экономике и в Концепции развития ТЭК (обновляется на данный момент). Цель на 2030 год была увеличена с 10% до 15% Президентом РК на совещании по развитию электроэнергетической отрасли в мае 2021 года.
Снижение доли угля в выработке электроэнергии	40% к 2030 году	Цель официально на была заявлена на международном уровне премьер-министром РК Маминым А.У. во время выступления на Конференции сторон РКИК ООН в 2 ноября 2021 года в городе Глазго
Строительство Атомной электрической станции	1.5 ГВт к 2030 году, 2.0 ГВт к 2050 году	Цель изначально была заложена в Концепцию по переходу к "зеленой" экономике. В последнее время, эта тема была опять поднята в связи с ростом потребления электроэнергии и прогнозируемым дефицитом мощностей в ближайшем будущем.
Углеродный налог на неквотируемые сектора системой торговли выбросами	4 доллара США за тонну CO2 в 2023 году и далее с ежегодным увеличением на 4 доллара США.	Данная мера планировалась в рамках Дорожной карты реализации ОНУВ, подготовленной при поддержке Всемирного банка (см раздел по Межсекторальным политикам и мерам)

2.4. Сценарии выбросов ПГ

В данном разделе приводится информация по сценариям – базовый и декарбонизационный. Общие предположения, используемые для всех сценариев:

- ВВП в период 2024-2028 согласно Прогнозу социально-экономического развития РК (МНЭ РК) и далее по 5,0% в год;
- Рост населения в период 2024-2028 согласно Прогнозу социально-экономического развития РК (МНЭ РК) и далее ежегодные темпы роста в диапазоне 0,8-0,9% в год;
- Добыча нефти повышается до пика (115 миллион тонн) 2035 году;

Базовый сценарий

Этот сценарий включает в себя принятые меры и политики, которые нацелены прямо на снижение выбросов парниковых газов:

- Доля выработки электроэнергии на природном газе на уровне 20% и 25% в 2020 и 2030 годах соответственно;
- Доля выработки электроэнергии на ВИЭ на уровне 3%, 6%, 15% в 2020, 2025 и 2030 годах.

Декарбонизационный сценарий

Этот сценарий включает в себя возможные к принятию меры и политики, которые нацелены прямо на снижение выбросов ПГ:

- Доля выработки на угле на уровне 40% к 2030 году;
- Ввод атомной электрической станции (АЭС) мощностью 1,2 ГВт в 2030 году, 1,2 ГВт в 2035, 2,4 ГВт в 2040 и 1,2 ГВт в 2045;
- Углеродный налог на неквотируемые сектора системой торговли выбросами.

2.5. Результаты выбросов ПГ по сектору энергетики

Выбросы парниковых газов для всех сценариев представлены на таблице ниже. Необходимо учесть, что это выбросы ПГ от секторов энергетики по сжиганию и летучим эмиссиям, что покрывается моделью, но не охватывает все сектора, от которых производятся выбросы ПГ.

Таблица 2.5.1 . Сценарии развития выбросов парниковых газов от сектора энергетики, MtCO2экв

	Факт	Базовый				Декарбонизационный			
	2021	2030	2040	2050	2060	2030	2040	2050	2060
Производство электроэнергии	105.1	121.7	135.0	140.9	145.7	79.0	64.8	43.6	0.0
Производство теплоэнергии	13.5	14.4	14.7	16.4	17.9	11.8	4.6	0.6	0.0
Нефтепереработка	1.9	2.1	2.7	2.9	3.3	1.5	1.3	1.2	0.0
Промышленность	30.4	38.6	50.5	55.9	56.8	36.1	26.4	18.7	0.5
Транспорт	25.2	26.9	33.6	36.1	39.3	24.9	20.0	19.6	0.0
Сектор услуг	33.5	37.1	39.4	46.5	47.7	19.1	9.8	3.3	0.0
Население	6.5	8.2	8.4	8.7	10.9	3.9	1.5	0.5	0.0
Сельское хозяйство	3.1	3.3	3.7	4.2	4.4	3.3	3.4	1.6	0.0
Прочие сектора	2.3	2.6	3.2	3.4	3.5	2.4	1.3	1.1	0.1
Летучие - твердые виды	9.7	10.3	11.2	11.9	12.7	6.9	2.9	2.3	0.0

Летучие - нефтегаз	30.8	38.1	54.0	65.7	69.8	58.0	104.6	76.8	3.2
Всего	**261.9**	**303.6**	**356.5**	**392.6**	**412.0**	**246.9**	**240.6**	**169.2**	**3.8**

Источник: результаты модели TIMES Казахстана

Примечание: охвачены выбросы ПГ по секторам сжигания энергетики и летучие выбросы ПГ

На основе представленных данных становится очевидным, что в отсутствие дополнительных регулятивных мер выбросы парниковых газов (ПГ) в секторе энергетики продолжают увеличиваться в базовом прогнозном сценарии. Это растущая тенденция видна на протяжении всего рассматриваемого временного интервала.

Для достижения климатически желательных показателей, а именно снижения выбросов ПГ относительно уровня 1990 года в секторе энергетики на 15% или более, требуется принятие дополнительных мер по регулированию. В контексте нашего исследования к этим дополнительным мерам можно отнести несколько ключевых пунктов.

Первоочередной является снижение зависимости от угля в процессе производства электроэнергии. Наша цель — уменьшить его долю до 40% в общем энергетическом балансе к 2030 году. После этого временного рубежа, уровень использования угля для этих целей должен оставаться не выше указанного порога.

Второй пункт — это активация атомных электростанций (АЭС) как альтернативного и более экологически чистого источника энергии. Это может стать дополнительным фактором, снижающим общий уровень выбросов.

Третьим важным элементом является введение углеродного налога, особенно в отношении тех секторов, которые сейчас не подпадают под квотирование выбросов. Этот финансовый инструмент может стимулировать более ответственное отношение к экологии и снижение выбросов ПГ.

В совокупности эти меры могут значительно скорректировать текущую негативную картину и привести к снижению выбросов ПГ в секторе энергетики, приблизив нас к экологическим целям, описанным в данной работе.

Производство тепло- и электроэнергии

В производстве тепло- и электроэнергии выбросы ПГ по сценариям представлены ниже.

*Таблица 2.5.2 . Выработка электроэнергии, млдр квт*ч*

	Факт	Базовый				Декарбонизационный			
	2021	2030	2040	2050	2060	2030	2040	2050	2060
Уголь	77.6	89.1	86.4	43.2	33.6	45.7	21.8	3.8	0.0
Природный газ	22.4	28.5	58.3	96.8	117.4	32.3	65.9	81.8	0.0
ГЭС большие	9.3	11.2	13.3	13.3	7.4	13.3	13.3	13.3	7.4

ГЭС малые	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	3.9	3.9	3.9
Атом	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.4	33.6	42.0	210.0
Солнце	1.8	1.0	5.4	35.1	57.7	6.9	13.8	32.8	112.8
Ветер	2.4	0.8	1.8	9.5	10.0	8.7	17.3	38.5	119.3
Биоэнергия	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Водород	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	13.4	30.0	50.0
Всего	114.4	131.3	165.2	197.9	226.1	122.4	183.0	246.1	503.4

Источник: результаты модели TIMES Казахстана

В каждом из рассматриваемых прогнозных вариантов, производство электричества демонстрирует тенденцию к росту. В базовом сценарии, к 2030 году ожидается увеличение выработки на приблизительно 15%, и к 2060 году это число должно удвоиться. Однако, в сценарии, который фокусируется на декарбонизации энергетики, рост выработки электроэнергии к 2030 году составляет около 8%, но к 2060 году этот показатель возрастает в четыре раза по сравнению с текущим уровнем.

Что касается составляющих энергетического баланса, во всех сценариях отмечается сокращение доли угля в структуре выработки электроэнергии. В то же время, происходит увеличение производства электричества на природном газе, а также на гидро-, солнечной и ветровой энергии. Это особенно заметно в базовом сценарии, где темпы роста выработки на природном газе значительно превышают аналогичные показатели для угля.

В сценарии декарбонизации также учитываются и другие виды энергии. В частности, в этот сценарий включена энергия от атомных электростанций, а также возможность использования водородной энергии. В этой связи, структура выработки электроэнергии в этом сценарии предполагает существенное сокращение доли угля в пользу более экологически чистых источников.

В целом, анализ различных сценариев показывает, что независимо от выбранной стратегии, доля угля в энергетическом балансе сокращается. Однако, степень этого сокращения и замены угля другими источниками энергии значительно зависят от конкретных подходов к развитию энергетического сектора. В базовом сценарии рост, в основном, обусловлен увеличением использования природного газа, в то время как в сценарии декарбонизации акцент делается на широкомасштабном внедрении возобновляемых и экологически чистых источников энергии.

Таблица 2.5.3 . Установленные мощности электростанций, ГВт

	Факт	Базовый				Декарбонизационный			
	2021	2030	2040	2050	2060	2030	2040	2050	2060
Уголь	14.5	16.6	18.8	11.7	10.1	15.3	13.2	4.3	3.5
Природный газ	3.9	5.6	11.0	20.4	26.9	6.2	12.9	19.3	19.8
ГЭС большие	2.6	2.6	3.1	3.1	1.7	3.1	3.1	3.1	1.7
ГЭС малые	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.9	0.9	0.9
Атом	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	4.8	6.0	30.0
Солнце	1.0	0.6	3.2	20.4	33.6	4.1	8.7	20.9	72.6

Ветер	0.7	0.3	0.6	3.2	3.4	2.8	5.6	12.6	38.9
Биоэнергия	0.0	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0
Водород	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	1.1	1.9
Всего	24.0	25.9	37.0	59.1	76.0	34.0	50.1	68.4	169.3

Источник: результаты модели TIMES Казахстана

В области производства тепловой энергии основной источник выбросов в атмосферу представлен установками типа котельных. Такая специфика возникает из-за того, что выбросы от теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) уже учитываются в рамках сектора производства электрической энергии. В сценариях, направленных на декарбонизацию, заметно снижение уровня выбросов. Эта тенденция обусловлена расширением использования ТЭЦ в качестве источников теплоснабжения, что считается более экологически чистым вариантом.

Следует отметить, что, когда речь идет о декарбонизационной стратегии, наблюдается значительное уменьшение уровня выбросов вредных веществ в атмосферу. Это во многом связано с тем, что происходит большой переход на использование теплоэлектроцентралей как основных источников тепловой энергии. Такие установки часто работают на более экологически чистых видах топлива или используют более современные методы очистки выбросов, что делает их предпочтительным выбором в контексте устойчивого развития.

В секторе производства тепловой энергии важную роль играют котельные, особенно если рассматривать их влияние на экологию. Однако, с учетом стремления к снижению уровня выбросов и переходу на более устойчивые источники энергии, ТЭЦ начинают занимать все более значимую позицию. Это подтверждается сценариями, ориентированными на декарбонизацию, где наблюдается существенное сокращение выбросов за счет перехода на теплоснабжение от этих источников.

Сектор промышленности

Рост экономической активности непосредственно связан с увеличением парниковых газов и выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, особенно в промышленном секторе. Однако стоит отметить, что в рамках сценария, направленного на декарбонизацию экономики, наблюдается тенденция к снижению уровня эмиссий парниковых газов. Один из ключевых факторов, способствующих такому положительному изменению, — это внедрение новых технологий в промышленность, и, в частности, использование водорода в процессе производства стали.

В традиционных методах получения стали применяются топливо и кокс, что сопровождается большим количеством выбросов. Однако в новых технологических подходах, таких как восстановление железной руды с использованием водорода, этот процесс становится значительно менее загрязняющим. В этом методе, железная руда подвергается восстановлению водородом в твердом состоянии, в результате чего образуется так называемое "губчатое" железо.

Это губчатое железо далее поступает в электродуговую печь, где используются электроды для генерации электрического тока. Этот ток обеспечивает необходимую температуру для плавления губчатого железа и последующего получения стали. Поскольку весь процесс происходит без использования традиционных углеродсодержащих топлив, уровень выбросов парниковых газов существенно снижается.

В целом, интеграция таких технологий в промышленный сектор не только поддерживает экономический рост, но и способствует улучшению экологической ситуации, что является крайне важным в контексте глобального изменения климата.

Транспортный сектор

В базовом сценарии развития, выбросы парниковых газов (ПГ) наблюдают увеличение, что является прямым результатом экономического роста и увеличения потребности в транспортных услугах, включая грузоперевозки и пассажирские перевозки. Этот рост в выбросах связан с более интенсивным использованием транспорта, который часто работает на источниках энергии, производящих большие количества парниковых газов.

В контрасте с этим, декарбонизационный сценарий предполагает более ответственный подход к удовлетворению растущего спроса на транспортные услуги. В этом случае, увеличение потребности в грузоперевозках и пассажирских перевозках компенсируется через использование более экологически чистых видов транспорта и энергии. Таким образом, несмотря на рост экономической активности и спроса на транспорт, уровень выбросов парниковых газов фактически снижается.

В этом декарбонизационном сценарии, основное внимание уделяется переходу на более чистые источники энергии и технологии, которые позволяют снизить уровень выбросов ПГ. Это может включать в себя использование электрических транспортных средств, гибридных технологий и даже водородного топлива, что в совокупности позволяет эффективно снизить общий уровень загрязнения.

Сектор услуг

Уровень выбросов парниковых газов в сфере обслуживания уменьшается благодаря применению более энергоэффективных технологий и варьирует в зависимости от принимаемых экологических мер в соответствии с различными сценариями. Согласно наблюдениям, внедрение системы налогообложения на углерод дает заметный эффект в форме сокращения выбросов парниковых газов. Это является результатом не только улучшения используемых технологий, но и институциональных мер регулирования, таких как налоговые поощрения и штрафы.

Помимо того, увеличение энергоэффективности приводит к оптимизации процессов и уменьшению энергопотребления, что, в свою очередь, снижает общий объем выбросов вредных веществ в атмосферу. Это означает, что использование современных, энергоэффективных технологий является ключевым фактором в уменьшении экологического футпринта данного сектора.

Касательно мер в соответствии с различными экологическими сценариями, они могут варьировать от введения строже норм и стандартов до финансовых стимулов для использования зеленых технологий. Наиболее эффективным, как показывают исследования, является введение углеродного налога. Он стимулирует предприятия и организации сфокусироваться на использовании экологически чистых источников энергии и технологий, что приводит к значительному сокращению выбросов парниковых газов.

Население

В основном варианте прогноза, где применяются определенные экологические меры, уровень выбросов парниковых газов (ПГ) от жилых зданий превышает аналогичный показатель в сценарии полной декарбонизации. Эта аномалия объясняется переброской углерода из промышленных секторов, где он становится менее ценным и, как следствие, более доступным для использования населением. В других словах, когда уголь становится дешевым из-за снижения его потребления на производстве, его потребление в бытовом секторе, напротив, возрастает, что приводит к увеличению объема выбросов.

Тем не менее, введение углеродного налога может корректировать эту ситуацию в сторону уменьшения выбросов. Такой налог стимулирует домохозяйства к переходу на более экологически чистые источники энергии или снижению общего уровня потребления энергии. Этот налоговый механизм приводит к уменьшению потребления угля и, соответственно, к сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу от домохозяйств.

В результате, даже если базовый сценарий предполагает высокий уровень выбросов из-за переброски углерода из промышленных секторов, установление углеродного налога может служить эффективным инструментом для решения этой проблемы, мотивируя домохозяйства к более ответственному отношению к использованию энергетических ресурсов.

Сельское хозяйство

В каждом из рассмотренных сценариев до 2040 года предполагается увеличение выбросов парниковых газов (ПГ) в сфере аграрной экономики. Это связано с тем, что данная отрасль является одним из ключевых секторов экономического развития страны, и для неё запланирован активный рост. Но стоит отметить, что в контексте сценариев, ориентированных на декарбонизацию экономики, возможно снижение уровня этих выбросов. Подобная тенденция обусловлена переходом на более экологичные,

электрофицированные виды транспортных средств, которые используются в сельском хозяйстве.

Ожидается, что рост сельскохозяйственной отрасли будет одним из основных факторов, стимулирующих увеличение уровня выбросов ПГ, так как этот сектор играет важную роль в экономической структуре национального хозяйства. Таким образом, прогнозы до 2040 года указывают на необходимость принятия мер по снижению экологического воздействия данной отрасли.

Тем не менее, в сценариях, фокусирующихся на декарбонизации, прогнозируется некоторое снижение выбросов ПГ. Это становится возможным благодаря внедрению электрофицированных технологий в транспортной инфраструктуре сельского хозяйства. Переход на такие транспортные средства позволит снизить вредное воздействие на окружающую среду и сделать этот сектор более устойчивым с экологической точки зрения.

Сектор прочие

Выбросы ПГ в данном секторе относятся к тем выбросам, источники которых не идентифицированы и не распределены к соответствующим секторам.

Выбросы парниковых газов в секторе летучих эмиссий

В данной сфере уровни выбросов парниковых газов (ПГ) существенно зависят от политических решений и принимаемых мер в других отраслях. Например, если рассмотреть базовый сценарий, становится очевидным, что тенденция к увеличению выбросов наблюдается по всем видам летучих эмиссий. Это говорит о том, что без активного вмешательства мы можем ожидать увеличения уровней загрязнения.

С другой стороны, в сценарии, предусматривающем декарбонизацию, заметно снижение выбросов летучих эмиссий, связанных с использованием твердых видов топлива, в частности угля. Этот процесс поддерживается активным сокращением потребления угольных ресурсов в пользу более экологичных источников энергии.

Касательно летучих эмиссий, связанных с нефтью и природным газом, в этом сценарии наблюдается их рост до 2045 года. Это происходит из-за активного процесса газификации и расширения использования этих видов топлива. Однако после этого момента ожидается значительное снижение уровня эмиссий к концу прогнозируемого периода. Этот факт указывает на возможное переосмысление энергетической политики и переход к более устойчивым и экологически чистым источникам энергии.

Таким образом, взаимосвязь между различными секторами и их влияние на уровни выбросов ПГ являются ключевыми факторами, которые нужно учитывать при планировании долгосрочных стратегий по сокращению загрязнения. На выбросы в одной сфере могут оказывать значительное влияние

действия и решения в других сферах, и поэтому комплексный подход к уменьшению выбросов является критически важным.

2.6. Заключение

В заключении данной работы отмечается, что применение технико-экономического моделирования энергетической системы в Казахстане с помощью генератора моделей TIMES имеет глубокие корни, начиная с 2009 года. Эта интегрированная система существенно влияла на разработку исследовательских публикаций, а также на подготовку материалов для разнообразных национальных и международных проектов. Особое внимание следует уделить использованию этой модели для создания стратегических документов, таких как Стратегия по достижению углеродной нейтральности Казахстана до 2060 года, а также для взаимодействия с глобальными организациями, такими как Всемирный банк.

В последние годы был проведен обширный анализ энергетического сектора Казахстана в рамках проекта, направленного на поддержку зеленой экономики и низкоуглеродного экономического развития в Казахстане и Центральной Азии. Этот проект стал основой для создания новой модели TIMES, предназначенной для анализа различных сценариев развития энергетического сектора до 2060 года.

Следует подчеркнуть, что в настоящее время модель TIMES-KAZ постоянно обновляется и совершенствуется в соответствии с новыми экономическими данными РК и с учетом новых технологий. В ходе этой работы были представлены основные аспекты этой модели, а также ряд важных обновлений, выполненных в текущем году, от обновления базовых данных до калибровки модели с учетом исторической динамики экономической и энергетической системы страны.

Таким образом, данное исследование подтверждает значимость и актуальность продолжения разработки и совершенствования технико-экономического моделирования для дальнейшего развития энергетической системы Казахстана.

В данной работе изучены стратегии и методы для достижения углеродной нейтральности в сфере энергопроизводства. Два ключевых сценария, базовый и направленный на декарбонизацию, были разработаны и анализированы для прогнозного периода, охватывающего временной промежуток до 2060 года.

В базовом сценарии, который не предусматривает активных мер по сокращению выбросов парниковых газов, отмечается рост уровня этих выбросов на всем прогнозируемом временном горизонте. Это вызывает тревогу и подчеркивает необходимость принятия срочных мер для снижения воздействия на климат.

С другой стороны, в сценарии, ориентированном на декарбонизацию, наблюдается значительное улучшение показателей. Конкретно, выбросы

парниковых газов в секторе энергетики ожидаются на уровне минус 20% по сравнению с уровнем выбросов в 1990 году уже к 2030 году. Кроме того, этот показатель продолжает улучшаться, достигая уровней минус 40%, минус 54% и минус 99% к 2040, 2050 и 2060 годам соответственно.

Таким образом, полученные данные ясно указывают на то, что стратегии, направленные на декарбонизацию, могут существенно снизить воздействие энергетического сектора на окружающую среду и климат. Это подтверждает актуальность и неотложность задачи перехода к более чистым источникам энергии и эффективным методам ее производства для обеспечения устойчивого развития.

Исследование, направленное на декарбонизацию, не только подтвердило возможность существенного уменьшения выбросов парниковых газов, но и выявило конкретные методы для этого. Один из ключевых факторов — это широкомасштабное внедрение чистых и возобновляемых источников энергии, а также альтернативных вариантов, которые позволят отказаться от традиционных источников энергии, таких как уголь и нефть.

Другой важный элемент стратегии заключается в повышении энергоэффективности всей системы производства и потребления энергии. Это включает в себя не только разработку и внедрение более энергоэффективных технологий, но и оптимизацию существующих процессов. Совершенствование технологий может значительно уменьшить энергетические потери и сделать систему более устойчивой к внешним факторам.

Кроме того, электрификация различных процессов и индустрий представляет собой еще один важный шаг на пути к углеродной нейтральности. Это касается не только промышленных, но и бытовых процессов. Замена устаревших систем сгорания на электрические аналоги там, где это технически возможно и экономически целесообразно, может стать решающим фактором в сокращении выбросов парниковых газов.

Таким образом, комплексный подход, включающий полный переход на чистые и возобновляемые источники энергии, повышение энергоэффективности и широкую электрификацию, представляет собой реальный и достижимый путь к углеродной нейтральности. Это подтверждено результатами исследования, которое также обозначает важные направления для дальнейшей работы в этой области.

3. Введение в технико-экономический инструмент моделирования энергетических систем PyPSA

Python for Power System Analysis (PyPSA) — это набор программных инструментов на языке Python для анализа энергосистем [11]. PyPSA был разработан командой в Технологическом институте Карлсруэ (KIT), Карлсруэ, Германия, и сейчас PyPSA масштабировался и имеются различные участники по всему миру. Изначально на этом инструменте была разработана модель электроэнергетики и энергетики Европы, а сейчас ведутся активные работы по расширению модели на другие страны с учетом доступной информации, специфики экономики и энергосекторов стран.

В PyPSA уже включены модели традиционной генерации, переменной ветровой и солнечной генерации, различные технологии хранения электроэнергии, объединение с секторами природного газа, водорода, тепла и транспорта. PyPSA удобен тем, что все стадии решения оптимизационных задач транспарентны, каждый желающий может увидеть, какие данные берутся на входе и какие манипуляции с ними производятся. Также PyPSA хорошо масштабируется и поддерживает различные коммерческие и бесплатные пакеты для решения крупномасштабного линейного и квадратичного программирования.

PyPSA уже был применен для разработки и исследования модели европейского энергетического сектора для сравнения сценариев быстрого и медленного перехода на возобновляемые источники энергии [12], для моделирования сокращения энергопотребления зданий [13], тестирования новых методов управления умными электросетями [14].

Далее модель была расширена на Африку и мир, различные группы исследователей активно работают над разработкой моделей для других стран, включая США, Латинскую Америку и Казахстан и получила название PyPSA Earth [15]. Для Казахстана на данный момент существует рабочая модель PyPSA, которая базируется на открытых источниках – геопространственных данных со спутников, международных статистических агентств и свободного веб-картографического сервиса OpenStreetMaps. В PyPSA предусмотрены сценарии для прогнозирования изменения климата и роста на основе Shared Socioeconomic Pathways (SSP).

Целевая функция PyPSA Earth – оптимизация годовых капитальных затрат на выработку электроэнергии. В модели можно задавать различные ограничения, такие как лимиты выбросов CO2, доля возобновляемой энергетики, процент выработки электроэнергии каждого региона для собственных нужд, добавление требования по резерву мощностей и т.д.

Таблица 2.6.1. Сравнение функций различных программных инструментов, схожих с PyPSA [11].

				Анализ электрической сети				Экономический анализ							
	Программное обеспечение	**Версия**	**Бесплатное ПО**	**Power Flow**	**Continuation Power Flow**	**Dynamic Analysis**	**Transport Model**	**Linear OPF**	**SCLOPF**	**Nonlinear OPF**	**Multi-Period Optimisation**	**Unit Commitment**	**Оптимизация инвестиций**	**Другие сектора**
Инструменты электрической системы	MATPOWER	6	✓	✓	✓		✓	✓		✓				
	NEPLAN	5.5.8		✓		✓	✓	✓	✓	✓				✓
	pandapower	1.4.0	✓	✓			✓	✓		✓				
	PowerFactory	2017		✓		✓		✓	✓	✓				
	PowerWorld	19		✓		✓	✓	✓	✓	✓				
	PSAT	2.1.10	✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓		
	PSS/E	33.1		✓		✓		✓	✓	✓				
	PSS/SINCAL	13.5		✓		✓		✓		✓				✓
	PYPOWER	5.1.2	✓	✓			✓			✓				
	PyPSA	**0.11.0**	✓	✓			✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
Инструменты энергетической системы	calliope	0.5.2	✓				✓				✓		✓	✓
	minpower	4.3.10	✓				✓	✓			✓	✓		
	MOST	6	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		
	oemof	0.1.4	✓				✓				✓	✓	✓	✓
	OSeMOSYS	2017	✓				✓				✓		✓	✓
	PLEXOS	7.4					✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
	PowerGAMA	1.1	✓				✓	✓			✓			
	PRIMES	2017					✓	✓			✓	✓	✓	✓
	TIMES	2017					✓	✓			✓	✓	✓	✓
	urbs	0.7	✓				✓				✓	✓	✓	✓

В таблице выше представлено сравнение PyPSA с другими программными инструментами моделирования электричества и энергетики. Как мы видим, PyPSA универсален и имеет функционал, не уступающий коммерческим ПО.

Главной задачей пользователя, способной улучшить точность моделей PyPSA для какой-либо страны, является предоставление достоверных данных и реалистичных сценариев. Для Казахстана многие данные в ограниченном доступе, поэтому модель у разных пользователей может давать отличные друг от друга результаты. Тем не менее PyPSA хорошо подходит для сравнительного анализа различных сценариев развития страны и регионов.

3.1. Данные модели PyPSA для электроэнергетики Казахстана

3.1.1. Управление рабочим процессом

Управление рабочим процессом PyPSA-Earth осуществляется с помощью Snakemake - языка на основе Python и среды выполнения для рабочих процессов. Snakemake позволяет систематизировать и автоматизировать выполнение процессов через создание правил, где определены входящие и исходящие файлы для каждого процесса. Snakemake далее объединяет правила в цепочку для получения желаемого результата. Таким образом Snakemake помогает разрабатывать устойчивое программное обеспечение, которое обеспечивает воспроизводимую, адаптируемую и прозрачную работу.

PyPSA-Earth был реализован как отдельный набор правил в Snakemake, и для Казахстана были добавлены уникальные правила для форсирования определенных ограничений на модели нагрузки и линий передачи. Пользователь PyPSA-Earth может запустить модель с помощью одной строки кода и получить необходимый результат. Разделение всего процесса на более мелкие правила позволяет пользователю легче взаимодействовать с моделью и вносить изменения при необходимости.

Все конфигурации для запуска Snakemake указываются в файле config {}.yaml. Для разных запусков можно создать разные файлы конфигураций, что позволяет модифицировать параметры без модификации самих кодов. Каждое правило Snakemake состоит из нескольких базовых блоков, описанных на снимке ниже.

```
# Назнание правила
rule build_osm_network:

    # Вводные данные
    input:
        generators="resources/" + RDIR + "osm/clean/all_clean_generators.geojson",
        lines="resources/" + RDIR + "osm/clean/all_clean_lines.geojson",
        substations="resources/" + RDIR + "osm/clean/all_clean_substations.geojson",
        country_shapes="resources/" + RDIR + "shapes/country_shapes.geojson",

    # Результаты правила
    output:
        lines="resources/" + RDIR + "base_network/all_lines_build_network.csv",
        converters="resources/" + RDIR + "base_network/all_converters_build_network.csv",
        transformers="resources/"
        + RDIR
        + "base_network/all_transformers_build_network.csv",
        substations="resources/" + RDIR + "base_network/all_buses_build_network.csv",

    # Лог файлы, где записываются все произведенные действия
    log:
        "logs/" + RDIR + "build_osm_network.log",

    # Опция для фиксирования времени выполнения правила
    benchmark:
        "benchmarks/" + RDIR + "build_osm_network"

    # Название кода Python, необходимого для получения результатов
    script:
        "scripts/build_osm_network.py"
```

Рисунок 3.1.1. Пример правила Snakemake.

Чтобы правило было успешно выполнено, необходимо наличие указанных вводных данных и кода Python, который может произвести перечисленные результаты. Если вводных данных нет в указанной локации на компьютере или сервере, то Snakemake ищет, есть ли правила, способные создать такой файл. Если правило найдено, то Snakemake ставит его в очередь выполнения задач перед тем правилом, которое использует его результат. Таким образом создается направленный ациклический граф процесса, согласно которому выполняются работы. Если какое-либо из правил создает цикличность, выполнение процесса будет невозможно. Граф выполнения симуляции для Казахстана показан на рисунке ниже.

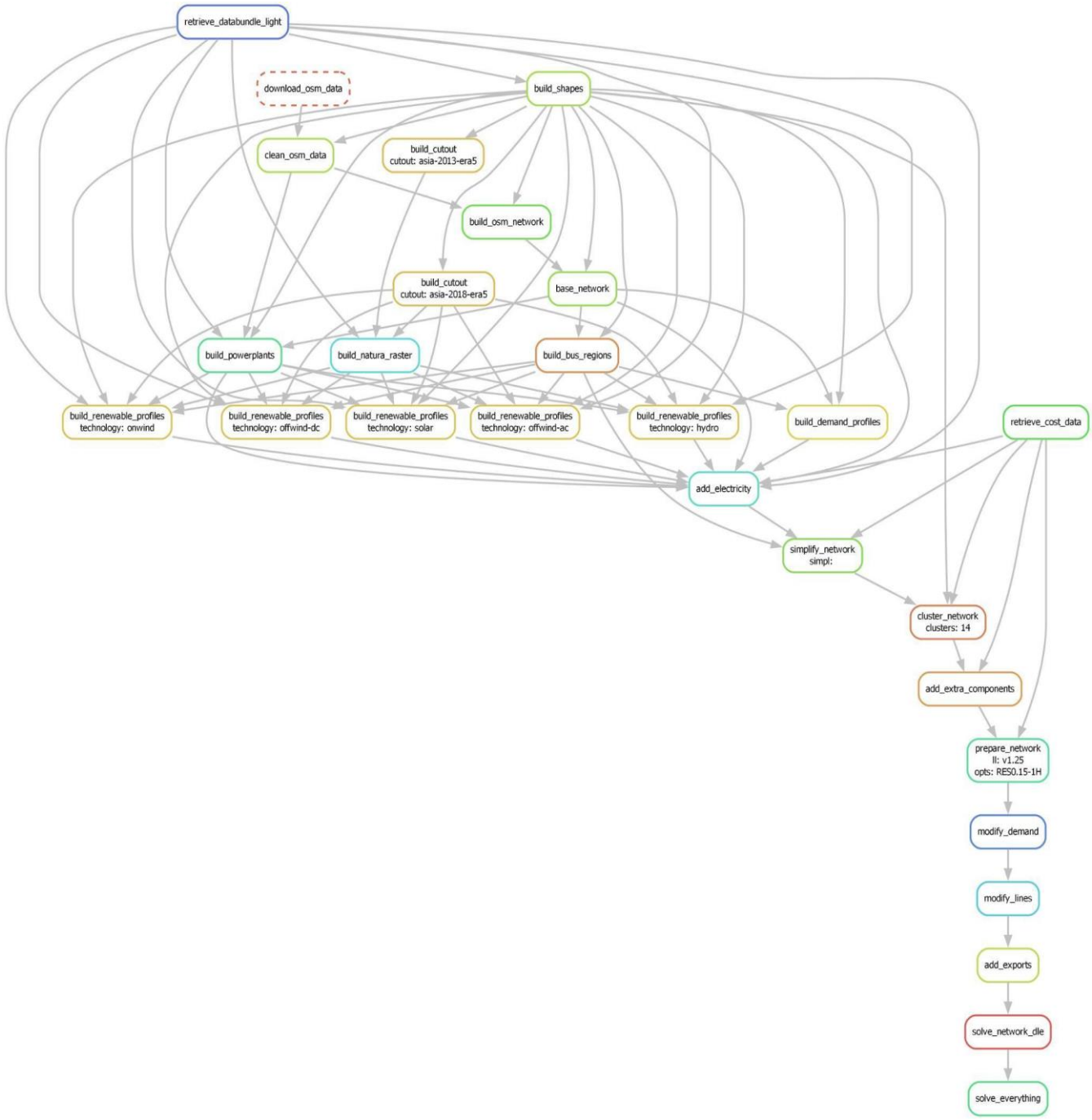

Рисунок 3.1.2. Направленный ациклический граф выполнения процессов для модели PyPSA Казахстан

Также в описании правил могут использоваться шаблоны постановки, позволяющие разделять результаты запусков с различными конфигурациями. Конфигурации, которые могут быть заданы таким образом, включают: количество узлов для предварительного упрощения системы, количество кластеров, лимиты по расширению линий электропередач, различные опции для оптимизации, например, шаг симуляции, требования по доле ВИЭ, снижению выбросов и т.д. Пример правила с шаблонами подстановки показан ниже. Шаблоны подстановки выделяются синим и берутся в

фигурные скобки. При запуске Snakemake, на место этих шаблонов будут подставлены необходимые значения.

```
rule solve_all_networks:
    input:
        expand(
            "results/" + RDIR + "networks/elec_s{simpl}_{clusters}_ec_l{ll}_{opts}.nc",
            **config["scenario"]
        ),
```

Рисунок 3.1.3.Пример правила Snakemake с шаблонами подстановки.

Всего процесс включает в себя 28 задач. Количество задач может меняться, если вводные данные для какого-либо правила уже доступны или если какие-либо правила отключены через файл конфигурации. Все правила можно поделить на условные 4 категории: извлечение данных, создание модели электрических сетей, упрощение модели, решение модели. Так как некоторые данные при создании модели для Казахстана не отражают действительность, перед решением модели запускаются специальные правила для модели Казахстана. Краткое описание всех правил представлено в таблице ниже.

Таблица 3.1.1 Краткое описание правил Snakemake для модели PyPSA KZ

Извлечение данных	retrieve_cost_data	Данные правила обеспечивают наличие нужных исходных данных (из интернета или копируют из существующих папок)
	retrieve_databundle_light	
	download_osm_data	
Создание модели электрических сетей	clean_osm_data	Стандартизирует и чистит данные
	build_shapes	Строит границы страны и административных регионов, добавляет данные о населении и ВВП для прогнозирования
	build_osm_network	Линии электропередач из открытых источников
	build_cutout cutout: asia-2013-era5	Данные о климате из Copernicus Climate Data Store
	build_cutout cutout: asia-2018-era5	
	base_network	Создает топологию электросети
	build_powerplants	Добавляет модели генераторов в сеть
	build_demand_profiles	Добавляет модель нагрузки в сеть

	build_natura_raster	Добавляет растровые изображения поверхности для определения зон, где возможно строительство новых станций и сетей
	build_bus_regions	Создает области Вороного для каждой шины, представляющие как сухопутные, так и прибрежные регионы.
	build_renewable_profiles technology: hydro	Рассчитывает на основе пакета Atlite для каждого узла сети (i) установленную мощность (на основе землепользования), (ii) доступный временной ряд выработки электроэнергии (на основе погодных данных) и (iii) среднее расстояние от узла для наземных и морских ветровых установок прямого и переменного тока и солнечных фотоэлектрических генераторов.
	build_renewable_profiles technology: offwind-ac	
	build_renewable_profiles technology: offwind-dc	
	build_renewable_profiles technology: onwind	
	build_renewable_profiles technology: solar	
	add_electricity	Добавляет существующие генерацию и технологии хранения в модель сети
Упрощение модели	simplify_network simpl:	Преобразует передающую сеть в сеть, эквивалентную 380 кВ
	cluster_network clusters: 14	Использует метод кластеризации на основе k-средних (k-means) для разделения сети на заданное количество зон, а затем сводит сеть к представлению с одной шиной на зону
	add_extra_components	Позволяет добавлять дополнительные компоненты
	prepare_network ll: v1.25 opts: RES0.15-1H	Подготавливает модель к решению
Правила для модели KZ	modify_demand	Перераспределяет нагрузку по регионам Казахстана согласно данным базового года
	modify_lines	Применяет максимальные лимиты на линии
	add_exports	Добавляет экспортируемую и импортируемую электроэнергию в модель

Решение модели	solve_network_dle	Решает модель
	solve_everything	Запускает полную цепочку процесса

Разделение процесса на правила помогает понять последовательность выполнения действий и определить, какие правила необходимо модифицировать для внесения изменений. Для моделирования различных сценариев будут меняться только вводные данные, которые задаются через файл конфигураций и правила извлечения данных.

3.1.2. Модель сетей и электростанций

Модель сетей Казахстана состоит из высоковольтных линий электропередач различного напряжения: 500кВ, 220кВ, 110 кВ, а также одной линии, пересекающей северный Казахстан, номиналом 1150 кВ. Западная зона - Атырауская, Мангыстауская и Западно-Казахстанская области, на данный момент изолирована от других. Поставки электроэнергии в этот регион происходят за счет собственной генерации и импорта из России. Модели сетей в PyPSA- Earth моделируются из открытого источника OpenStreetMaps, тем не менее хорошо повторяют модель имеющихся электросетей. В будущем, можно вручную внести данные о линиях электропередач для достоверности информации. На Рисунке ниже представлена полученная модель линий и генерации РК.

Данные о генерации для Казахстана собраны в отдельном файле “custom_powerplants.csv”. Основные данные, которые должен содержать этот файл: наименование, тип станции, тип топлива, мощность, год ввода и вывода из эксплуатации, страна, долгота и широта для соединения с линиями электропередач и последующей кластеризации. Также можно добавить данные о производительности, даты модернизации, привязать станцию к определенному узлу. В файле можно указывать как имеющиеся, так и планируемые станции.

Для следующего этапа моделирования обновленные данные будут внедрены в модель.

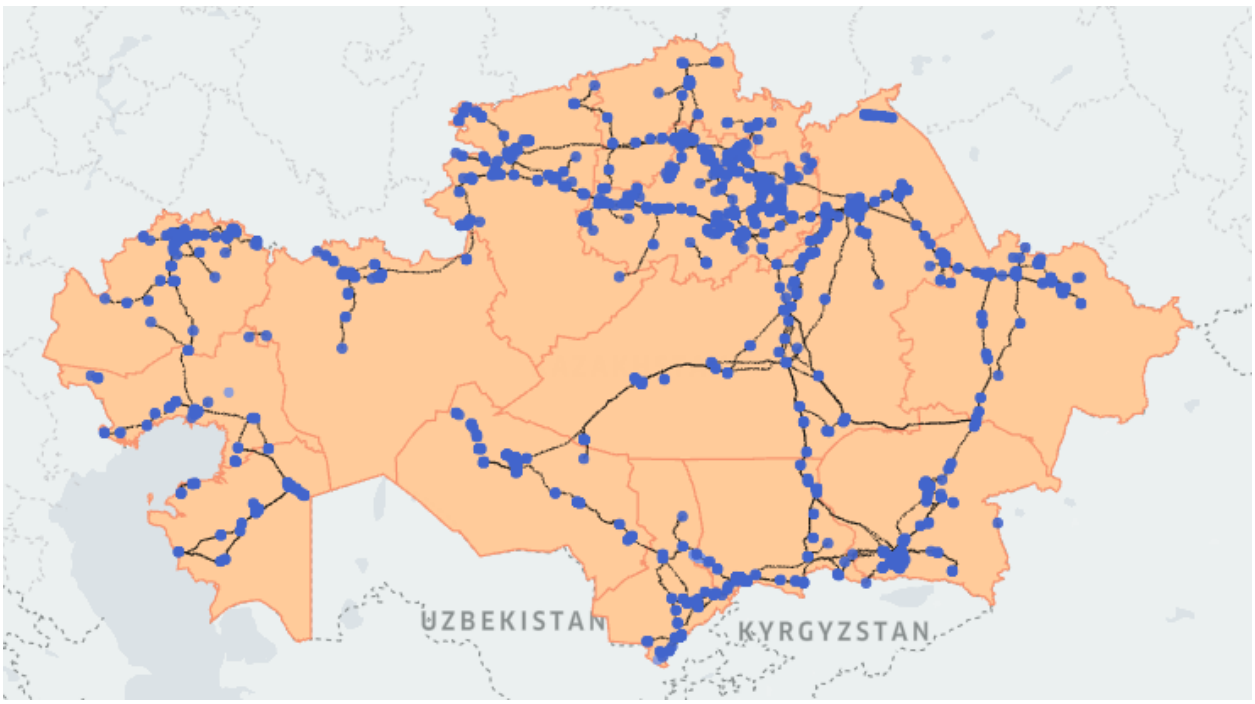

Рисунок 3.1.4. Географическое расположение электрических сетей и генерации

Следующие типы генерации были добавлены в модель:

- угольные электростанции (coal)
- газовые электростанции открытого цикла (OCGT)
- газовые электростанции комбинированного цикла (CCGT)
- гидроэлектростанции (run of river – RoR)
- ветровые электростанции (wind)
- солнечные электростанции (solar).

Из перечисленных типов электростанций, только угольные и газовые производят выбросы CO_2, а остальные типы относятся к ВИЭ. В целях оптимизации, технологии OCGT, ветровых и солнечных электростанций отмечены, как доступные к расширению, то есть новые мощности могут быть добавлены в решении оптимизационной задачи. Угольные электростанции, CCGT и гидроэлектростанции не могут быть увеличены в мощностях по следующим причинам: угольные из-за требования перехода на более чистые источники энергии, CCGT из-за того, что данная технология уступает по характеристикам OCGT, по гидроэлектростанциям предполагается, что уже потенциал достигнут. Данные предположения заложены в модель PyPSA-Earth для всех стран и регионов. Чтобы изменить эти предположения необходимо редактировать исходные коды, что возможно в дальнейшей работе с PyPSA.

Технологии хранения электроэнергии в модели присутствуют двух типов:

- гидрохранилища, определенные мощности которых уже установлены на территории Казахстана и не поддаются увеличению, как и гидроэлектростанции,
- аккумуляторные батареи, которые в масштабах страны пока не присутствуют в электрических сетях и доступны в модели для установки.

Математические модели и ограничения для каждого типа генерации и хранения представлены в Главе 3.2.1.

3.1.3. Возобновляемые источники энергии

Возобновляемые источники энергии, такие как временные ряды солнечной, ветровой и гидроэнергии, моделируются с помощью пакета с открытым исходным кодом Atlite. Atlite (i) создает сектора, которые определяют пространственно-временные границы, (ii) подготавливает сектора, добавляя данные об окружающей среде и погоде к геопространственным границам путем сопоставления различных баз данных (данные реанализа ERA5, спутниковые данные SARAH-2, и батиметрия GEBCO), и, наконец, (iii) применяет функции преобразования для получения временных рядов и потенциалов с пространственным разрешением для конкретных технологий.

В моделировании используются данные 2018 года как базового. С помощью модуля Atlite модель получает почасовые временные ряды профилей потенциалов солнечной и ветровой энергии для каждого узла, или области при кластеризации по областям. Для упрощения на графиках ниже представлены среднее, максимальное и минимальное значения суммарного суточного потенциала по всей стране. Для солнечной и гидроэнергии заметна сезонность по временам года с увеличением летом и уменьшением зимой, что является ожидаемым для данных ВИЭ. Для ветровой энергии в 2018 году нет четкого паттерна, кроме уменьшения потенциала в летнее время.

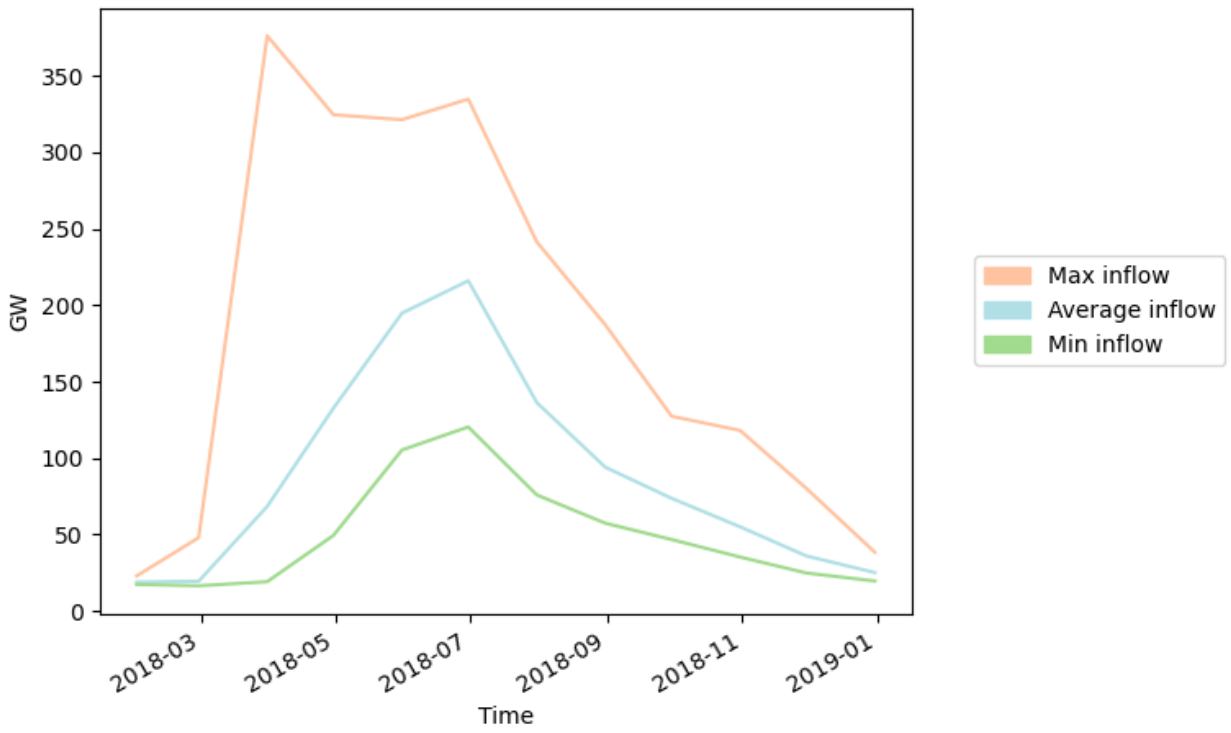

Рисунок 3.1.5. Профиль суточного потенциала гидроэнергии Казахстана на 2018 год.

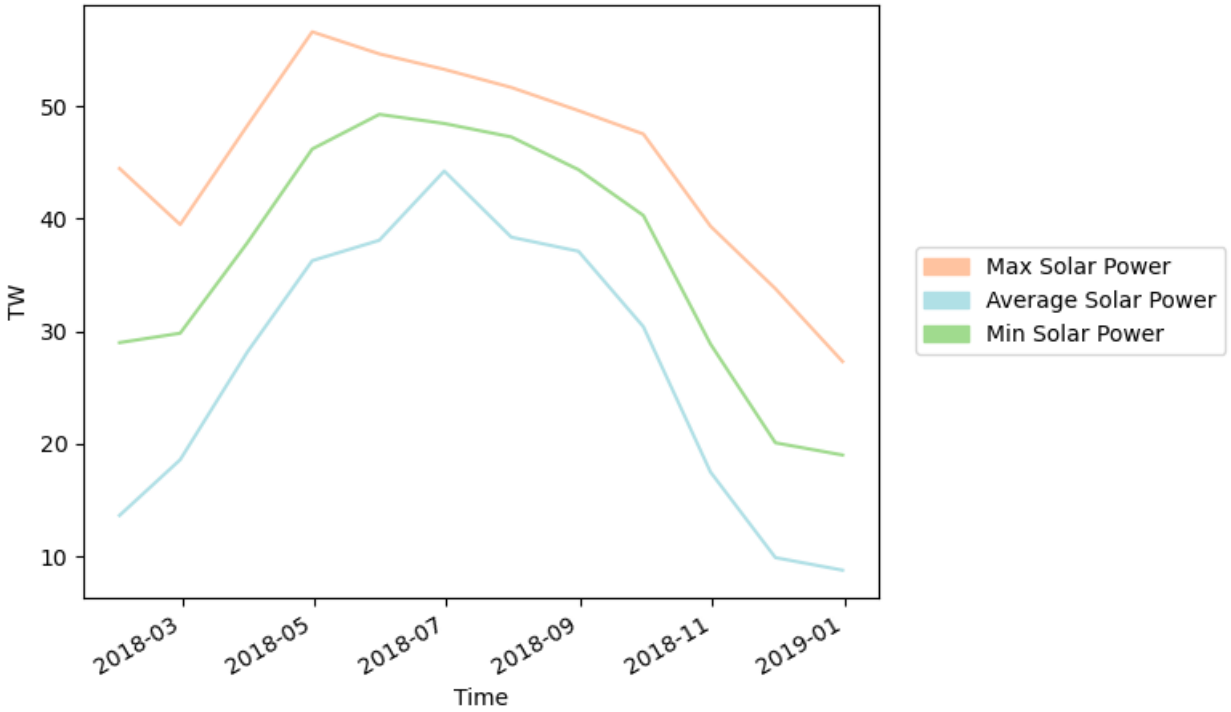

Рисунок 3.1.6. Профиль суточного потенциала солнечной энергии Казахстана на 2018 год.

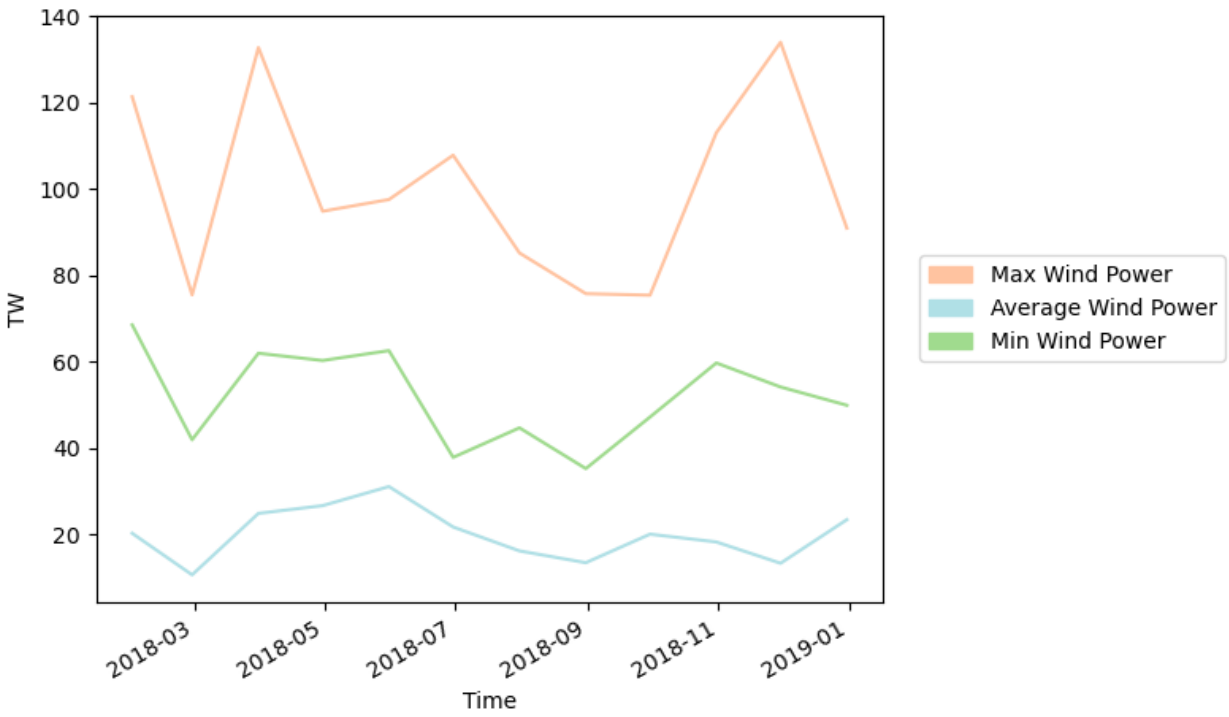

Рисунок 3.1.7. Профиль суточного потенциала ветровой энергии Казахстана на 2018 год

На рисунках ниже представлены потенциалы солнечной и ветровой энергии по стране с географическим разрешением примерно 20x20 км^2 на базе данных реанализа ERA5. Белые пятна показывают зоны, где невозможна установка новых мощностей солнечной и ветровой энергии из-за присутствия там водоемов, национальных парков, лесов и других территорий, непригодных для строительства. Оба показателя представлены, как максимальная устанавливаемая мощность в каждой ячейке.

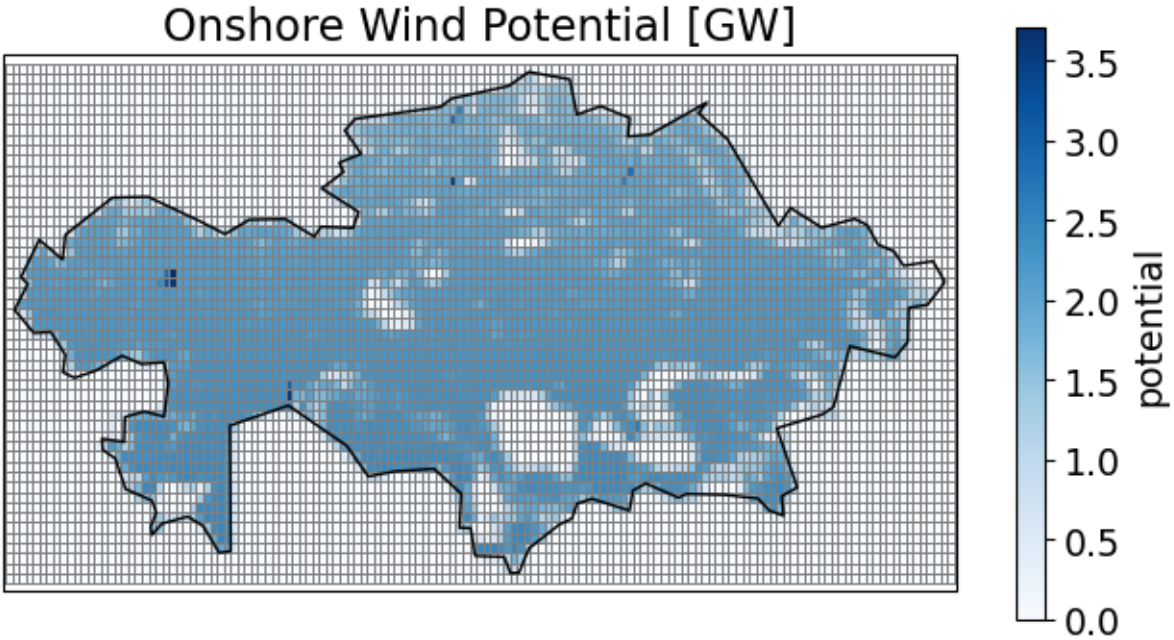

Рисунок 3.1.8 . Потенциал ветровой энергии.

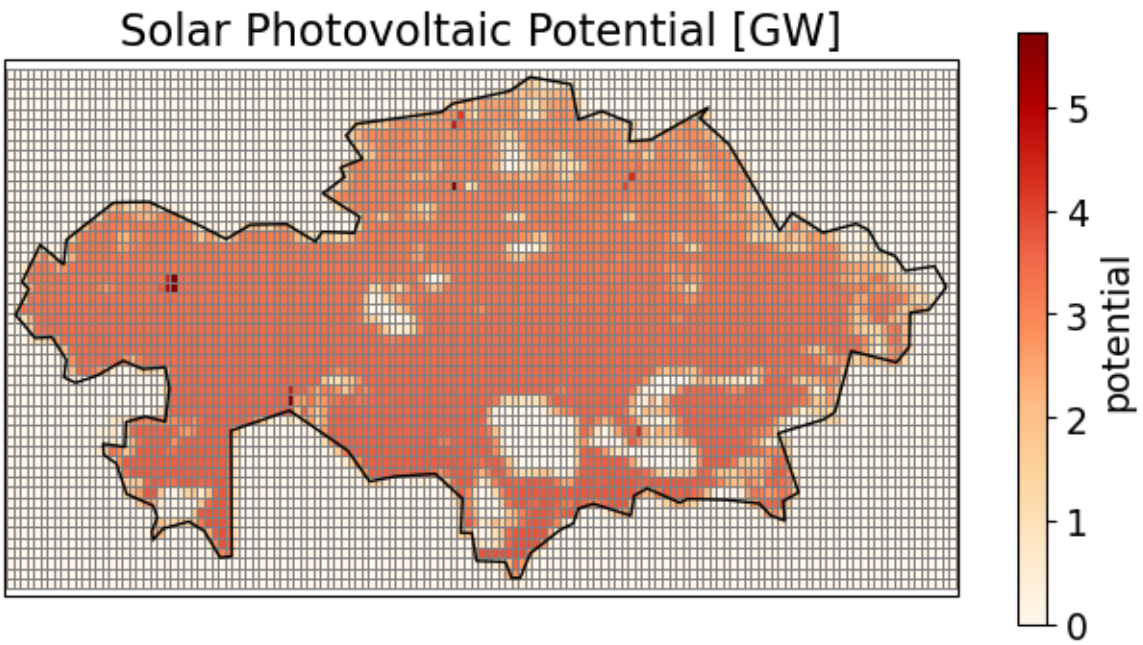

Рисунок 3.1.9. Потенциал солнечной энергии.

3.1.4. Метод пространственной кластеризации

В целях моделирования энергосистема Казахстана кластерирована на 14 кластеров, учитывая административное деление на базовый 2018 год. Для кластеризации используется широко известный алгоритм k-средних (k-means), который минимизирует суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центров кластеров.

Каждая область соединена с соседними существующими электросетями, пропускная способность которых ограничена согласно параметрам линий электропередач. Рисунок 3.1.10 показывает упрощенную модель электросетей Казахстана после кластеризации. Номера показывают номера линий передач, а Таблица 3.1.2 показывает соотношение узлов и областей или стран. Как мы видим, Западный Казахстан изолирован от других регионов и согласно модели самодостаточен. Географическая локация центров кластеров и соответственно линий была определена с помощью алгоритма. Как можно наблюдать, линии передач после кластеризации приближенно повторяют форму основных магистралей электропередачи по Республике.

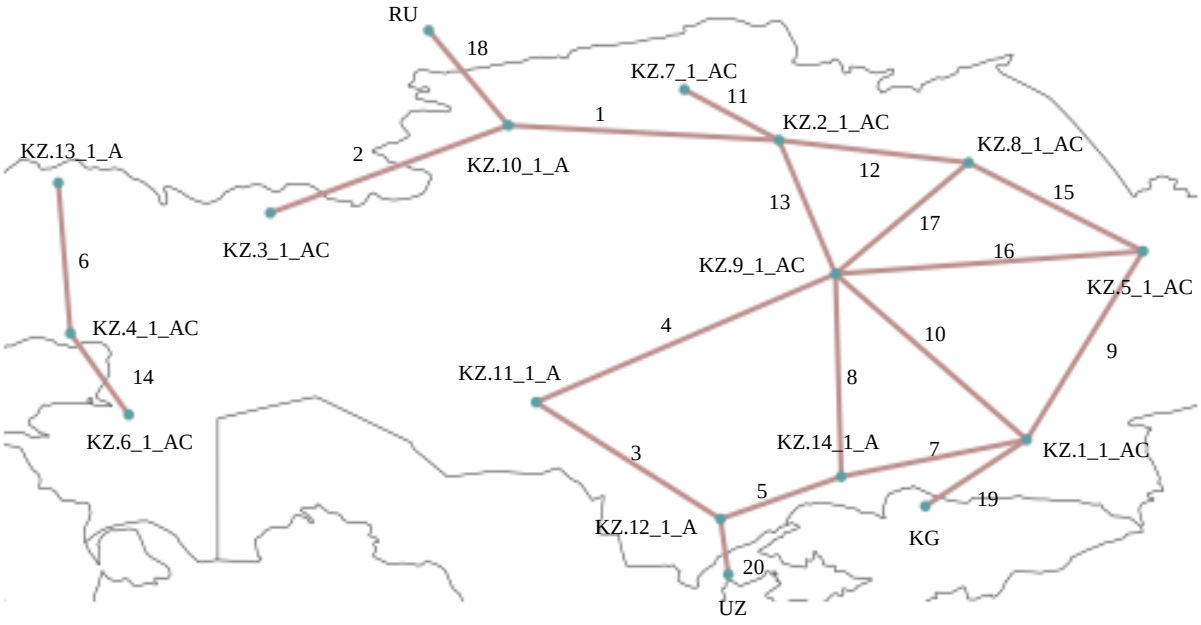

Рисунок 3.1.10. Модель сетей Казахстана после кластеризации

Таблица 3.1.2. Обозначения регионов

Обозначение узла	Регион
KZ.1_1_AC	Алматинская область
KZ.2_1_AC	Акмолинская область
KZ.3_1_AC	Актюбинская область
KZ.4_1_AC	Атырауская область
KZ.5_1_AC	Восточно-Казахстанская область
KZ.6_1_AC	Мангыстауская область
KZ.7_1_AC	Северо-Казахстанская область
KZ.8_1_AC	Павлодарская область
KZ.9_1_AC	Карагандинская область
KZ.10_1_AC	Костанайская область
KZ.11_1_AC	Кызылординская область
KZ.12_1_AC	Туркестанская область
KZ.13_1_AC	Западно-Казахстанская область
KZ.14_1_AC	Жамбылская область
RU	Россия
UZ	Узбекистан
KG	Кыргызстан

3.1.5. Горизонт планирования

В PyPSA горизонт оптимизации задается через файл конфигураций. Срез горизонта планирования может варьироваться от одного дня до года, а

временной шаг от одного часа до одних суток. Это дает большую гибкость при моделировании и решении оптимизации, так как пользователь может проверить перед запуском модель с большими временными шагами (например, шесть часов) и небольшим горизонтом планирования, что значительно ускоряет процесс оптимизации. В данной работе использовано максимальное временное разрешение с горизонтом планирования 1 год и временным шагом в 1 час.

Для многопериодной оптимизации в данной работе каждый срез для 2030, 2040, 2050, 2060 годов будет моделирован отдельно от другого с сохранением глобальных ограничений для достижения согласованности результатов моделирования каждого года.

3.1.6. Интерфейс модели и модуля расчета

Модель PyPSA-Earth объединяет структуру модели PyPSA с интерфейсами ПО для решения оптимизационных задач для выполнения исследований по планированию. Использование PyPSA имеет ряд преимуществ по сравнению с другими инструментами, которые кратко представлены ниже. Во-первых, PyPSA позволяет масштабировать задачи оптимизации на Python. Python хорошо известен своим удобством для пользователя, но при анализе потребления памяти и скорости решения задач оптимизации он был признан неконкурентоспособным по сравнению с инструментами на основе языка программирования Julia или C++. Для решения этой задачи был разработан пакет Linopy, который увеличивает скорость выполнения задач и улучшает потребление памяти на 50% по сравнению с формулировщиком задач оптимизации Pyomo, использованным ранее в PyPSA. Еще один момент, делающий PyPSA привлекательным для моделирования, заключается в том, что это один из самых популярных инструментов для энергосистем в открытом доступе, использующий стандартные объект-компоненты и имеющий непрерывно поддерживаемую документацию. Наконец, инфраструктура на основе Linopy совместима с несколькими ПО для решения оптимизационных задач, как с открытым исходным кодом, так и коммерческими (HiGHS, IBM CPLEX, Cbc, GLPK, Gurobi и др). В решении базового сценария для этой работы было использовано ПО IBM CPLEX, обеспечивающее быстрое и точное решение оптимизационных задач.

3.1.7. Базовый сценарий развития электроэнергетики

PyPSA уже имеет встроенные сценарии на основе SSP. Для Казахстана применены средние темпы роста и не учтены задачи, поставленные перед сектором электроэнергетики на 2030 год по доле ВИЭ. В связи с этим сценарии

моделирования были изменены. За основу взят базовый сценарий развития электроэнергетики, если Казахстан не будет внедрять дальнейшие стратегии по изменению климата и цели декарбонизации, помимо существующих.

На данный момент в стратегии государства предусмотрено снижение выбросов парниковых газов согласно Парижскому соглашению на 15% от уровня 1990 года к концу 2030 года. Уровень выбросов парниковых газов на 1990 равнялся 386,3 млн. тонн CO_2 -экв, что берется как базовый уровень выбросов (БУВ). На основе этих обязательств в сценариях низкоуглеродного развития предусмотрено повышение доли ВИЭ в секторе энергетики до 15% к 2030 году, а также сокращение выбросов в том числе за счет снижения потребления угля. В базовом сценарии не учтены цели снижения потребления угля до 40% к концу 2030 года, заявленные на COP26.

Базовый сценарий на последующие года предполагает постепенное снижение выбросов на основе имеющихся исторических данных. К 2060 году при таком темпе развития снижение уровня выбросов по прогнозам составит 30% от БУВ.

Рост потребления в базовом сценарии спрогнозирован, используя эконометрический подход, где потребление энергии прогнозируется как функция ВВП до 2035 года, и далее применен линейный рост. В базовом сценарии мы не учитываем электрификацию экономики, поэтому прогнозируется плавный рост потребления электричества. Тем не менее, в 2060 году потребление увеличится на 97% в базовом сценарии относительно 2018 года.

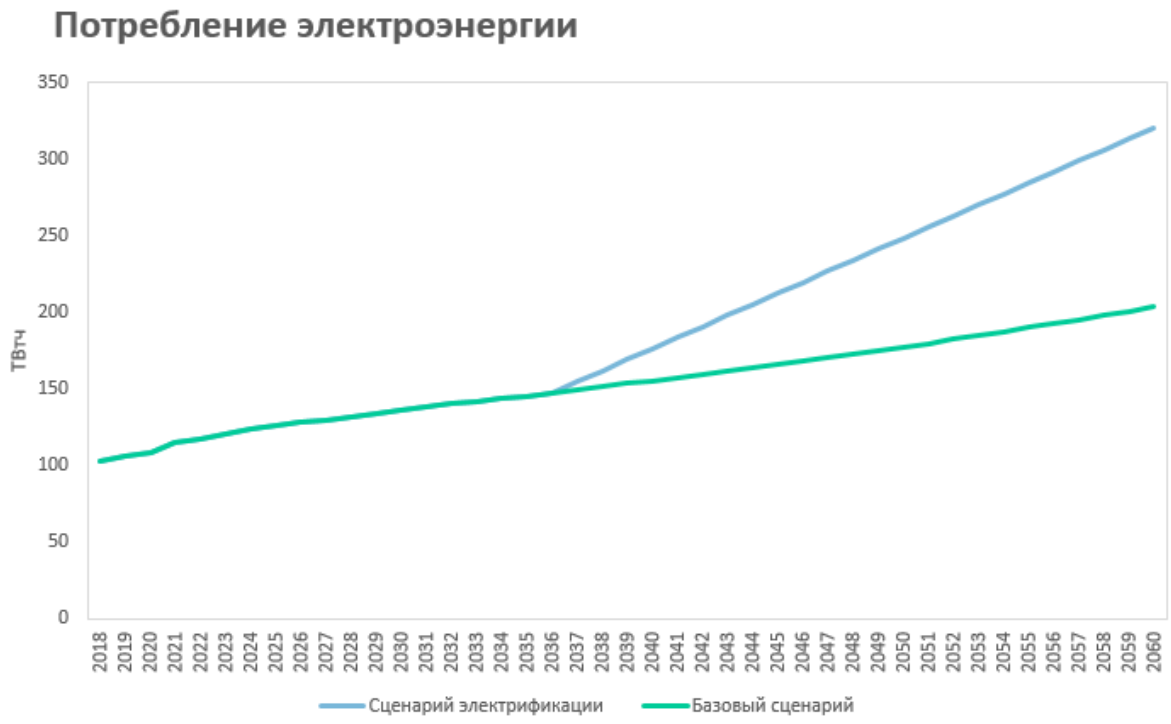

Рисунок 3.1.11. Прогноз потребления электроэнергии в РК.

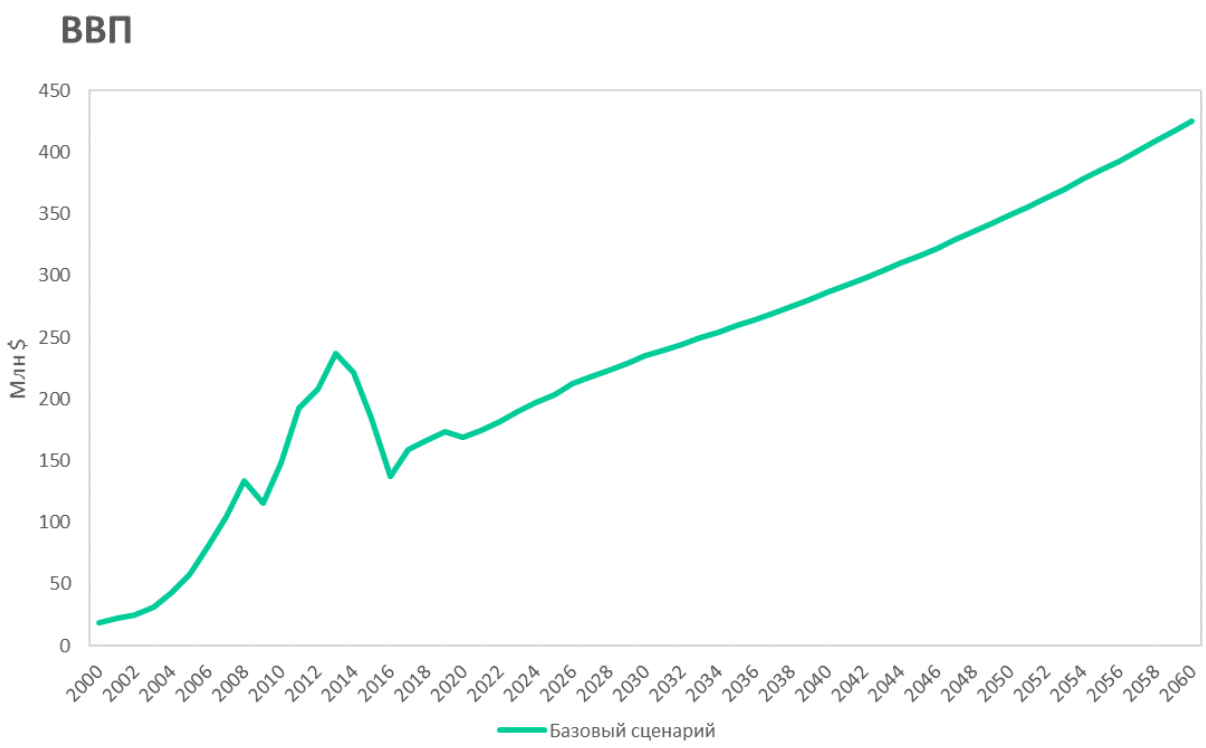

Рисунок 3.1.12. Прогноз изменения ВВП РК.

По базовому сценарию газификация регионов будет проходить поэтапно:

- Акмолинская область, 2024г.
- Карагандинская область, 2024г.
- Северо-Казахстанская область, 2026г.
- Павлодарская область, 2032г.
- ВКО после 2040 г.

Базовый сценарий предполагает медленное снижение цен на технологии аккумуляторных батарей для электросетей, солнечных панелей и ветровых электростанций. В Таблица 3.1.3 и Рисунок 3.1.13 показаны тренды изменения цен в базовом сценарии.

Таблица 3.1.3. Прогнозируемые капитальные затраты на солнечные и ветровые электростанции и аккумуляторные батареи в базовом сценарии ($/МВт)

Год	Солнечные электростанции	Ветровые электростанции	Аккумуляторные батареи
2030	720 000	1 228 000	745 946
2040	520 000	1 163 000	634 234

2050	371 429	1 098 000	544 144
2060	300 000	1 033 000	536 937

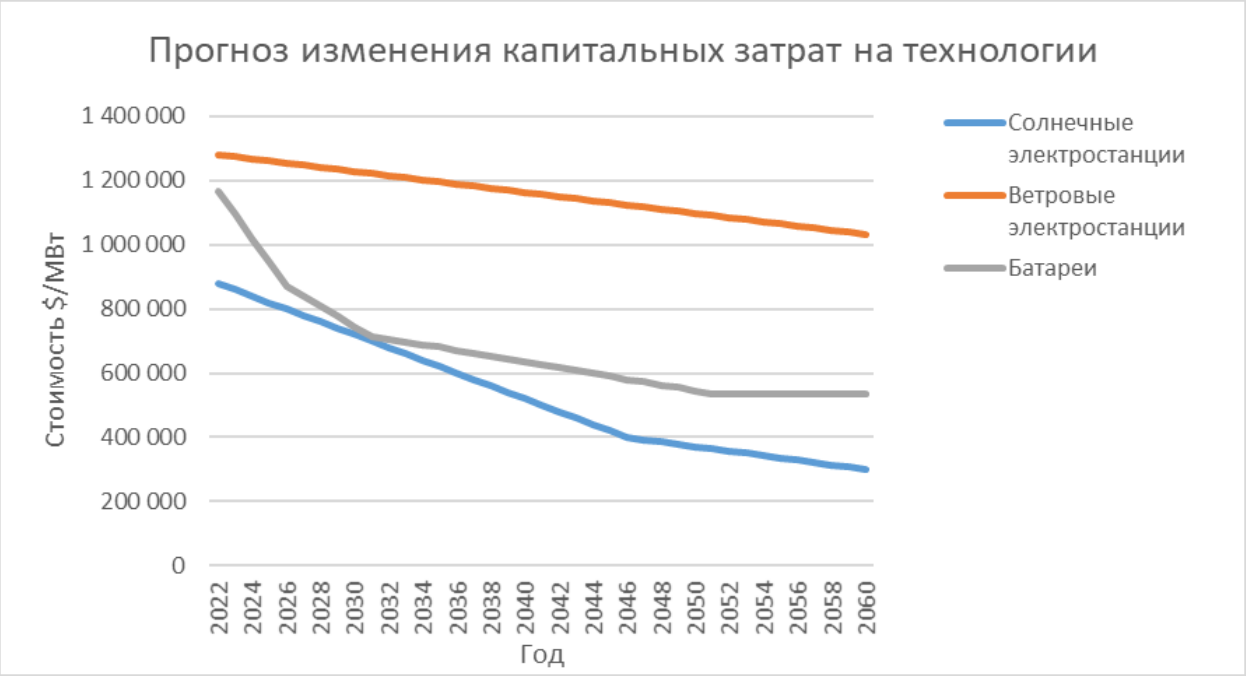

Рисунок 3.1.13. График изменения стоимости технологий

На данный момент в модели PyPSA нет возможности задавать значения выбросов каждой электростанции. Для расчета годового количества выбросов берется среднее значение для того или иного топлива. Выбросы CO_2 были рассчитаны на основе данных Министерства Экологии для РК и составили 0.275 тонн CO_2-экв. МВт*ч для угля и 0.201 тонн CO_2-экв. МВт*ч для газа. Лимиты по выбросам в оптимизации не установлены, так как

В модели был предусмотрен вариант расширения пропускной способности линий электропередач до 25%. При этом PyPSA только увеличивает пропускную способность там, где уже есть линии электропередач, но не предлагает строительство совершенно новых связей между кластерами. Для моделирования создания связи между кластерами пользователь должен задать необходимые параметры вручную.

3.2. Моделирование базового сценария

PyPSA способен решать линейные оптимизационные проблемы оптимального потока мощности (Linear Optimal Power Flow - LOPF) и LOPF, ограниченного безопасностью (Security Constrained LOPF - SCLOPF). В данной работе модель была сформулирована как LOPF. Вводные данные для LOPF перечислены ниже с их обозначениями в коде Python:

- network.{snapshot_weightings} – вес каждого временного интервала в целевой функции
- bus.{v_nom, carrier} – для узлов номинальный вольтаж и тип тока прямой или переменный
- load.{p_set} – потребление активной мощности
- generator.{p_nom, p_nom_extendable, p_nom_min, p_nom_max, p_min_pu, p_max_pu, marginal_cost, capital_cost, efficiency, carrier} – для генераторов номинальная мощность, возможность увеличения мощности, верхний и нижний лимиты по номинальной генерации, минимальная и максимальная мощности в интервал времени, предельные и капитальные затраты на данный тип генерации на МВтч, производительность, источник энергии.
- storage_unit.{p_nom, p_nom_extendable, p_nom_min, p_nom_max, p_min_pu, p_max_pu, marginal_cost, capital_cost, efficiency, standing_loss, inflow, state_of_charge_set, max_hours, state_of_charge_initial, cyclic_state_of_charge} - для систем хранения электроэнергии номинальная мощность, возможность увеличения мощность, верхний и нижний лимиты по номинальной мощности, минимальная и максимальная мощности в интервал времени, предельные и капитальные затраты на данный тип хранения на МВтч, производительность, потери при наличии заряда, приток, значения уровня заряда для каждого интервала для запуска оптимизации, максимальное время хранения электроэнергии, начальные значения заряда, цикличность уровня заряда.
- line.{x, s_nom, s_nom_extendable, s_nom_min, s_nom_max, capital_cost}, transformer.{x, s_nom, s_nom_extendable, s_nom_min, s_nom_max, capital_cost} – для линий электропередач и трансформаторов реактивное сопротивление, предел полной мощности, возможность увеличения мощности, нижний и верхний лимиты увеличения полной мощности линий, капитальная стоимость.
- carrier.{carrier_attribute} – источник энергии и его атрибуты.
- global_constraint.{type, carrier_attribute, sense, constant} – для каждого глобального ограничения тип ограничения, какие атрибуты задействованы, знак сравнения (больше, меньше или равно) и константа.

Далее будут представлены целевая функция и ограничения в виде линейных равенств и неравенств. Результатом оптимизации является следующий набор переменных:

- bus.{v_mag_pu, v_ang, p, marginal_price} – амплитуда и угол напряжения, почасовая мощность, локальная предельная цена электричества на каждом узле.
- load.{p} – почасовая потребность.
- generator.{p, p_nom_opt} – для каждого типа генерации на узле почасовая выработка электричества и оптимальная номинальная мощность.
- storage_unit.{p, p_nom_opt, state_of_charge, spill} - почасовая выработка электричества, оптимальная номинальная мощность, уровень заряда и переполнение технологий хранения на узле.
- line.{p0, p1, s_nom_opt, mu_lower, mu_upper} – для линий передачи мощности на обоих концах, оптимальная пропускная способность в МВА, нижняя и верхняя граница теневой цены.
- transformer.{p0, p1, s_nom_opt, mu_lower, mu_upper} – для трансформаторов входящее и исходящее напряжение, пропускная способность в МВА, нижняя и верхняя граница теневой цены.
- global_constraint.{mu} – теневая цена глобального ограничения оптимизации.

Таким образом, PyPSA способен оптимизировать обширный ряд переменных, которые помогут моделистам и лицам, принимающим решения, выработать наиболее эффективный сценарий декарбонизации в дальнейшем.

3.2.1. Математическая формулировка задачи

Модуль PyPSA включает в себя коды для формулировки задачи линейного математического программирования. Все вводные данные готовятся на начальных этапах (см. Таблица 3.1.1), а переменные, контролируемые пользователем, задаются в файле конфигураций. В зависимости от конфигураций модель будет включать в себя те или иные ограничения и параметры модели.

Целевая функция

Целевая функция состоит из капитальных затрат на каждый компонент и эксплуатационных затрат на генераторы:

$$\min_{\bar{g},\bar{h},F,g,h} \sum_{n,s} c_{n,s}\bar{g}_{n,s} + \sum_{n,s} c_{n,s}\bar{h}_{n,s} + \sum_{l} c_l F_l + \sum_{t} w_t\left[\sum_{n,s} o_{n,s,t} g_{n,s,t} + \sum_{n,s} o_{n,s,t} h_{n,s,t}\right] + \sum_{t} \left[suc_{n,s,t} + sdc_{n,s,t}\right] \quad (1)$$

Где:

$n \in N = \{0, \dots |N| - 1\}$ – индексы узлов

$t \in T = \{0, \dots |T| - 1\}$ – индексы времени

$l \in L = \{0, \dots |L| - 1\}$ – индексы линий электропередач

$s \in S = \{0, \dots |S| - 1\}$ – индексы различных генераторов и технологий хранения электроэнергии на каждом узле

w_t – коэффициенты веса каждого временного интервала t в целевой функции

$g_{n,s,t}$ – мощность генератора s на узле n в интервал времени t

$\bar{g}_{n,s}$ – номинальная мощность генератора s на узле n

$h_{n,s,t}$ - мощность технологии хранения s на узле n в интервал времени t

$\bar{h}_{n,s}$ – номинальная мощность технологии хранения s на узле n

$suc_{n,s,t}$ - пусковые затраты, если генератор s на узле n с обязательством установки запускается во время t

$sdc_{n,s,t}$ - стоимость остановки, если генератор s на узле n с обязательством установки запускается во время t

$c_{n,s}$- капитальные затраты на увеличение номинальной мощности генератора s на один МВт

c_l- капитальные затраты на увеличение номинальной мощности линии передач l на один МВА

F_l – дополнительная мощность линии электропередач l в МВА

$o_{n,s,t}$ - предельная стоимость производства электроэнергии генератором за один МВтч

В самой функции присутствуют переменные оптимальных номинальных и почасовых мощностей генерации, хранения и линий передач, остальные оптимизируемые переменные выявляются из ограничений линейного программирования.

Ограничения оптимизации

В ограничениях оптимизации есть несколько уровней: глобальные ограничения, касающиеся всех линий, генераций или других переменных, и локальные ограничения, которые применены к отдельно взятым переменным.

К глобальным ограничениям относится баланс генерации и нагрузки на каждом узле – закон сохранения энергии для электричества, который должен соблюдаться в любой интервал времени $t \in T$:

$$\sum_s g_{n,s,t} + \sum_s h_{n,s,t} - \sum_s f_{n,s,t} - \sum_l K_{nl} f_{l,t} = \sum_s d_{n,s,t} \quad \leftrightarrow \quad w_t \lambda_{n,t} \quad (2)$$

Где:

$f_{n,s,t}$ – потребление электроэнергии технологией хранения при зарядке

K_{nl} – матрица инцидентности, которая показывает, какие узлы соединены с каждой линией

$f_{l,t}$ – мощность потока по линии l в интервал времени t

$d_{n,s,t}$ – потребление на узле n в интервал времени t

$\lambda_{n,t}$ – теневая предельная стоимость электроэнергии на узле

Второе важное глобальное ограничение в модели базового сценария – доля возобновляемой энергии в общем потреблении энергии:

$$\frac{\sum_{s\in R,t,n}(g_{n,s,t} + h_{n,s,t})}{\sum_{s,n,t} d_{n,s,t}} \geq RES \quad (3)$$

Где:

$R = \{0, \dots |R| - 1\} \in S$ – подмножество индексов генераторов возобновляемой энергии и технологий хранения на каждом узле

RES - доля ВИЭ, указанная в файле конфигурации

Следующее глобальное ограничение для базового сценария – увеличение пропускной мощности линий передач:

$$\sum_{l} F_l \leq \mathrm{vol} \sum_{l} \bar{F}_l \quad (4)$$

Где:

$\bar{F}_l$ – установленная мощность линий передач

vol – лимит расширения мощности линий передач

К локальным ограничениям относятся все ограничения генераторов и технологий хранения по их емкостям, скорости зарядки и разрядки, скорости наращивания и сбавления генерации. Формула (5) показывает ограничение генерации в любой момент времени:

$$\tilde{g}_{n,s,t} * \bar{g}_{n,s} \leq g_{n,s,t} \leq \bar{g}_{n,s,t} * \bar{g}_{n,s} \quad \forall\, t \in T \quad (5)$$

Где:

$\tilde{g}_{n,s,t}, \bar{g}_{n,s,t}$ – доступность генератора s на узле n в интервал t на единицу номинальной мощности. Данные параметры даны на каждый интервал времени, так как для солнечной, ветровой и гидроэнергии доступность генерации зависит от погодных условий.

Помимо этого, есть возможность добавить лимиты на скорость увеличения или уменьшения генерации для контролируемых источников

энергии. В данной модели они не были внедрены, и могут быть рассмотрены в последующих работах.

Для технологий хранения электроэнергии также есть локальные ограничения. Максимальное состояние заряда не может быть оптимизировано независимо от максимальной выходной мощности (они связаны переменной максимального количества часов), а максимальная выходная мощность связана с максимальной входной мощностью. Это более реалистичная модель технологии хранения. В PyPSA также есть более гибкая модель накопителей, позволяющая оптимизировать эти переменные отдельно друг от друга. В данной работе учтены только технологии хранения, как аккумуляторные батареи и гидрохранилища. В отличие от генерации, технологии хранения имеют три переменных, зависящих от времени:

- Выходная мощность, когда аккумулятор или хранилище разряжается:

$$0 \leq h_{n,s,t} \leq \bar{h}_{n,s} \quad (6)$$

- Входная мощность, когда идет зарядка:

$$0 \leq f_{n,s,t} \leq \bar{h}_{n,s} \quad (7)$$

- И сам уровень заряда:

$$0 \leq soc_{n,s,t} \leq r_{n,s}\bar{h}_{n,s} \quad (8)$$

Где $r_{n,s}$ – количество часов при номинальной мощности до полной зарядки

Данные переменные связаны между собой следующим отношением:

$$soc_{n,s,t} = \eta_{\text{stand};n,s}^{w_t} soc_{n,s,t-1} + \eta_{\text{store};n,s} w_t f_{n,s,t} - \eta_{\text{dispatch;n,s}}^{-1} w_t h_{n,s,t} + w_t \text{ inflow}_{n,s,t} - w_t \text{ spillage}_{n,s,t} \quad (9)$$

$\eta_{\text{stand};n,s}^{w_t}$ – постоянные потери из-за различных причин, например, тепловые потери для тепловых хранилищ. $\eta_{\text{store};n,s}$ и $\eta_{\text{dispatch;n,s}}$ – потери производительности при зарядке и разрядке технологий хранения.

Следующее ограничение касается линий электропередач: каждая линия в любой интервал времени ограничена своей пропускной способностью, что выражается следующей формулой:

$$|f_{l,t}| \leq F_l \quad (10)$$

где и правая, и левая стороны уравнения являются переменными оптимизации при возможности увеличения пропускной способности линий передач.

Все ограничения и целевое уравнение обрабатываются модулем Linopy для репрезентации в виде линейного программирования и далее Snakemake запускает ПО для решения оптимизационной задачи вне среды Python на любом из доступных ПО.

3.2.2. Результаты моделирования

В данной главе представлены результаты моделирования для 2030-2060 годов с интервалом в 10 лет. Сравнение, где необходимо, идет с базовым 2018 годом. Некоторые графики даны в логарифмической шкале, так как присутствует значительная разница между технологиями по оптимальным мощностям и, соответственно, затратам.

Так как потребление электроэнергии растет линейно к 2060 году, установленные оптимальные мощности тоже возрастают к 2060 году. Рисунок 3.2.1 показывает рост мощностей для каждого типа генерации и хранения энергии, доступных к расширению. Наблюдается значительный прирост солнечных электростанций, что обусловлено потенциалом солнечной энергии в Казахстане и относительно невысокой стоимостью технологии. По аккумуляторным батареям незначительный прирост мощности, но тем не менее данная технология является критичной, так как оптимальным будет установка небольших мощностей в каждом регионе. Таблица 3.2.1 показывает увеличение мощностей каждой технологии по областям.

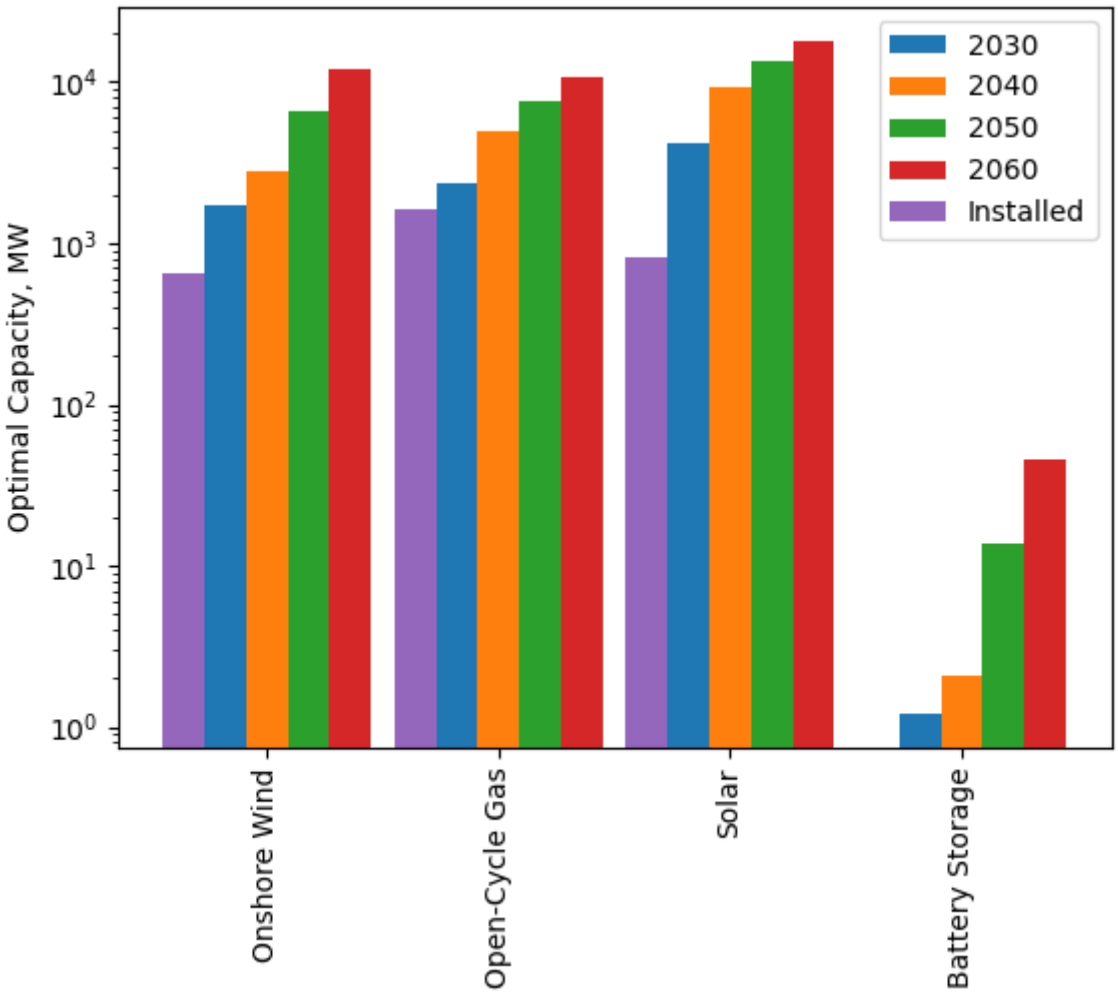

Рисунок 3.2.1. Оптимальный рост мощностей для разных технологий.

Таблица 3.2.1 Увеличение мощностей по областям

Область	Технологии	2018	2030	2040	2050	2060	% увеличение
Алматинская	Солнечные панели	152	152	3224.1	5662.5	8550.4	5525%
	Батареи	0	0.1009	0.1834	1.3076	2.7295	100%
Акмолинская	Батареи	0	0.1011	0.1836	1.2944	0.6962	100%
Актюбинская	Газовые турбины	296	667.43	2421.4	3059.6	3263.5	1003%
	Батареи	0	0.1011	0.1836	1.1243	0.3054	100%
Атырауская	Газовые турбины	803	803	803	818.67	823.4	3%
	Ветряные станции	101	198.18	310.24	271.84	395.36	291%
	Солнечные панели	0	324.01	343.86	348.01	519.66	100%
	Батареи	0	0.0316	0.0222	0.0858	0.1545	100%
Восточно-Казахстанская	Солнечные панели	30	30	30	30	296.09	887%
	Батареи	0	0.1011	0.1835	1.2973	0.9516	100%
Мангыстауская	Газовые турбины	120.4	120.39	120.4	272.21	516.42	329%
	Ветряные станции	43.2	857.91	1201.6	1807.7	2136.9	4846%
	Солнечные панели	0	2248	2247.4	2239.7	2524.6	100%
	Батареи	0	0.0328	0.0228	0.0906	0.163	100%
Северо-Казахстанская	Ветряные станции	10.5	10.5	10.5	10.5	10.56	1%
	Солнечные панели	0	0	0.0122	0.0266	0.0223	100%
	Батареи	0	0.1011	0.1836	1.2939	0.696	100%
Павлодарская	Ветряные станции	0	0	0.0331	265.55	1372.5	100%
	Солнечные панели	0	0	0.0169	0.0347	0.0344	100%
	Батареи	0	0.1011	0.1836	1.2936	0.746	100%
Карагандинская	Газовые турбины	189	329.33	1412	2831.3	5170.4	2636%
	Ветряные станции	48	48	228.61	2784.7	6397.3	13228%
	Батареи	0	0.1012	0.1836	1.2929	2.0822	100%
Костанайская	Солнечные панели	0	0	0.0223	0.0467	0.1025	100%
	Батареи	0	0.1011	0.1836	1.2943	0.696	100%
Кызылординская	Газовые турбины	19	243.77	19.347	181.32	261.74	1278%
	Ветряные станции	0	9.5217	362.51	470.29	556.52	100%
	Солнечные панели	78	252.03	236.03	354.92	474.01	508%
	Батареи	0	0.1057	0.1538	0.5352	0.9132	100%
Туркестанская	Солнечные панели	169.42	480.17	2387	4027.8	4747.1	2702%
	Батареи	0	0.1004	0.183	1.3739	31.624	100%
Западно-Казахстанская	Газовые турбины	198	198	198	358.84	564.28	185%
	Ветряные станции	0	148.24	246.74	462.26	627.22	100%
	Солнечные панели	0	337.23	408.14	513.25	601.78	100%
	Батареи	0	0.0366	0.0242	0.0965	0.1681	100%
Жамбылская	Ветряные станции	0	0	0.027	0.0986	9.2784	100%
	Батареи	0	0.1007	0.1832	1.3259	3.8596	100%

Капитальные затраты пропорциональны установленным мощностям. В графике ниже показаны итоговые годовые затраты на каждую технологию. Для технологий, где не предусмотрено расширение, стоимость остается одинаковой, независимо от года. В графике также представлены затраты на

сброс нагрузки (Load), но данная опция не предусмотрена в базовом сценарии. Также отсутствие затрат на сброс нагрузки показывает, что установленные мощности генерации и технологий хранения полностью обеспечивают потребность в электроэнергии, так как в противном случае системному оператору пришлось бы прибегнуть к этой мере для балансировки сети. Затраты на обслуживание и строительство линий электропередачи растут незначительно, что означает, что строительство линий оптимально произвести до 2030 года включительно.

Рисунок 3.2.3 показывает график роста суммарных затрат в годовом исчислении. Данный график был произведен моделированием каждого года оптимизации отдельно, и поэтому показывает завышенную стоимость. При многопериодном моделировании ожидается снижение капитальных затрат за счет установки генерации в разных временных срезах.

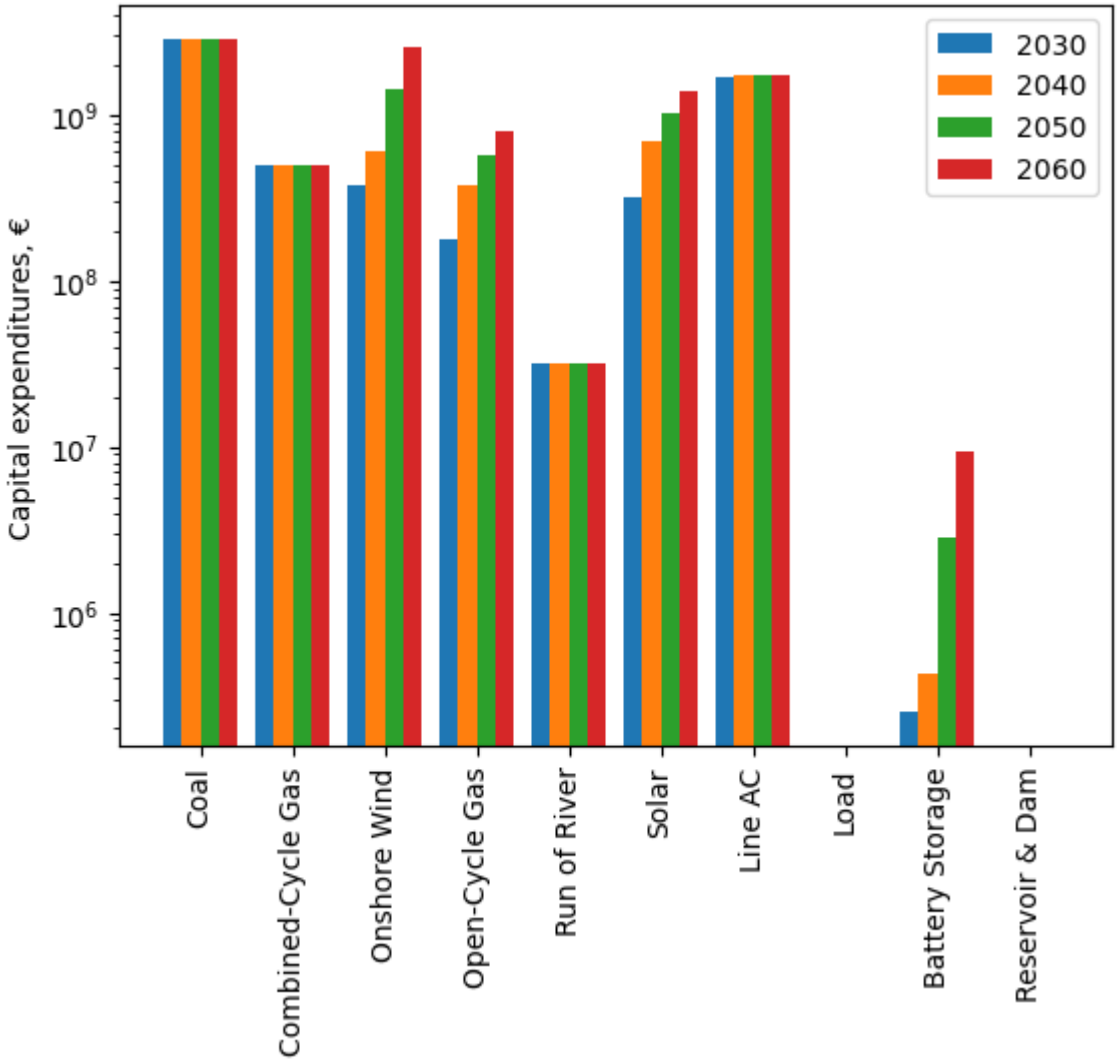

Рисунок 3.2.2. Капитальные затраты в годовом исчислении на каждую технологию

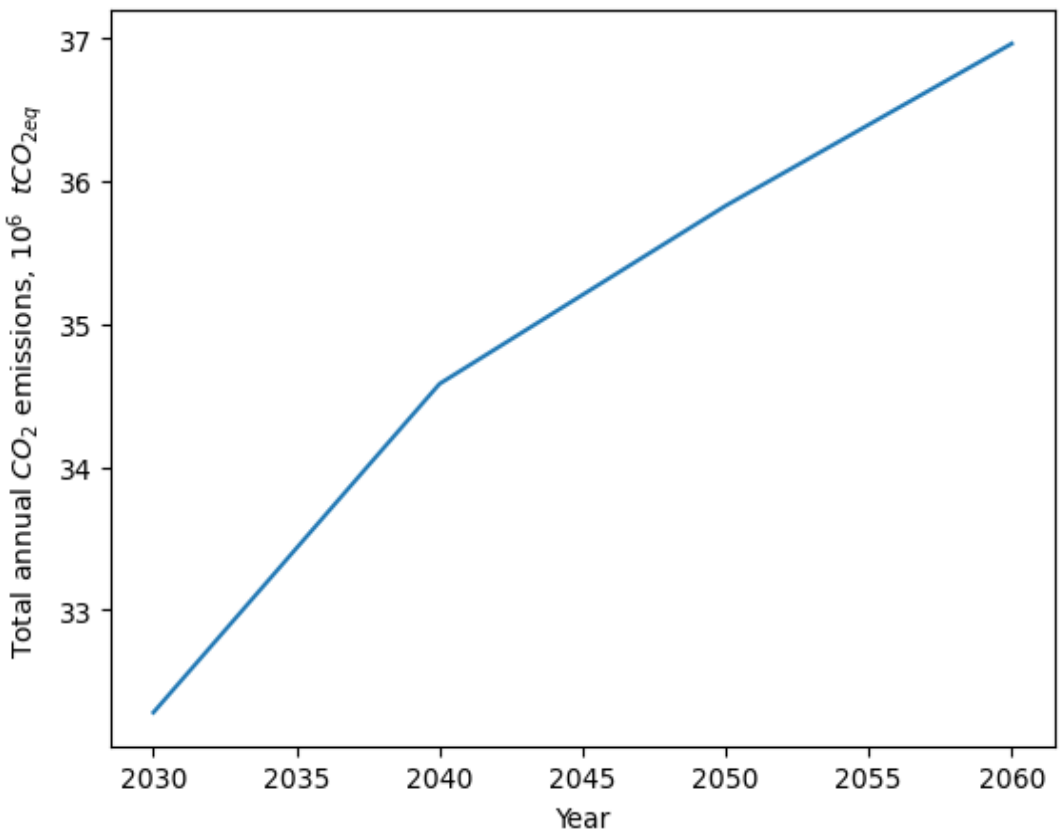

Рисунок 3.2.3. Годовой объем выбросов CO_2 сектора электроэнергии.

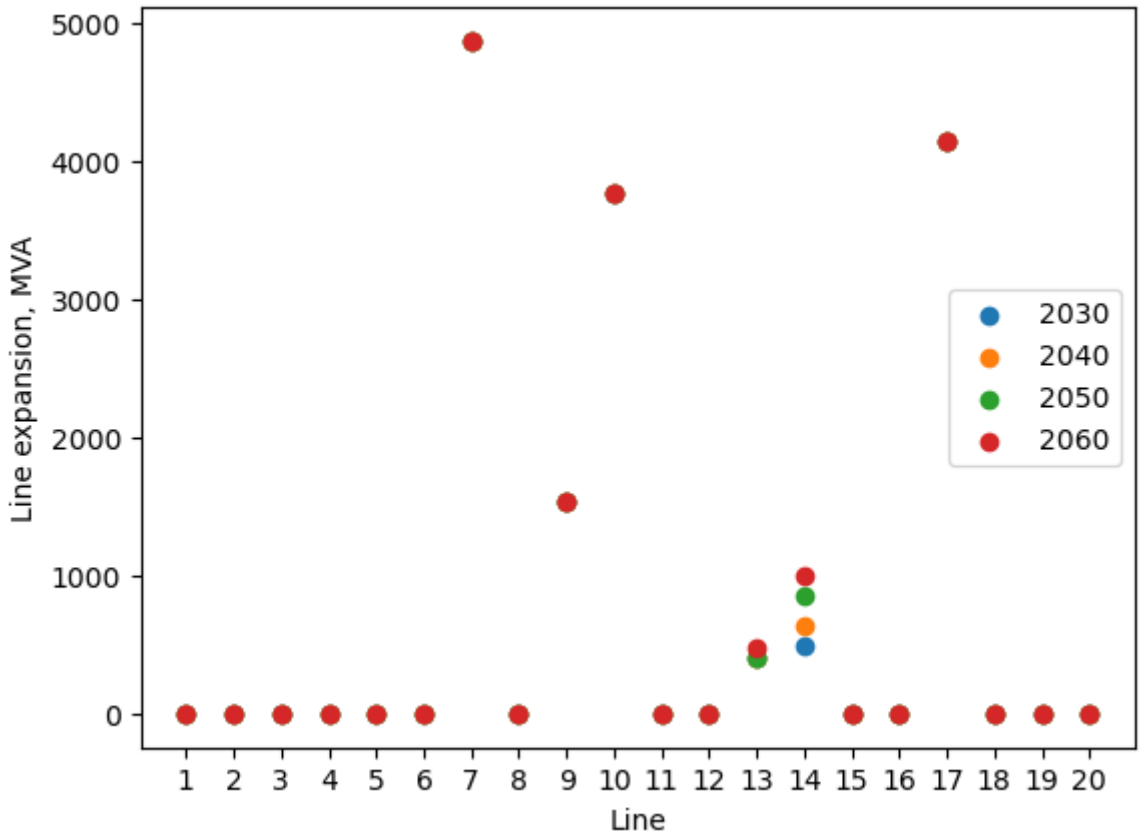

Рисунок 3.2.4. Оптимальное увеличение пропускной мощности линий электропередач между регионами.

На рисунке выше показано, какие линии требуют увеличения пропускной способности по годам. Самое большое увеличение пропускной способности требуется на линиях 7, 10, 17 – между Алматинской и Жамбылской, Алматинской и Карагандинской, Карагандинской и Павлодарской областями (см. Рисунок 3.1.10). Данный тренд обусловлен значительным приростом ВИЭ в Алматинской и Карагандинской областях, которые требуют балансировки за счет других генераций и нагрузок.

Рисунок 3.2.5. показывает общее количество выбросов CO_2 в каждом моделируемом году. За счет увеличения потребности в электроэнергии количество выбросов тоже увеличивается, что ожидаемо при базовом сценарии. С 2040 года заметно снижение темпа роста выбросов за счет увеличения производственных мощностей ВИЭ и газа, который более экологичен, чем уголь.

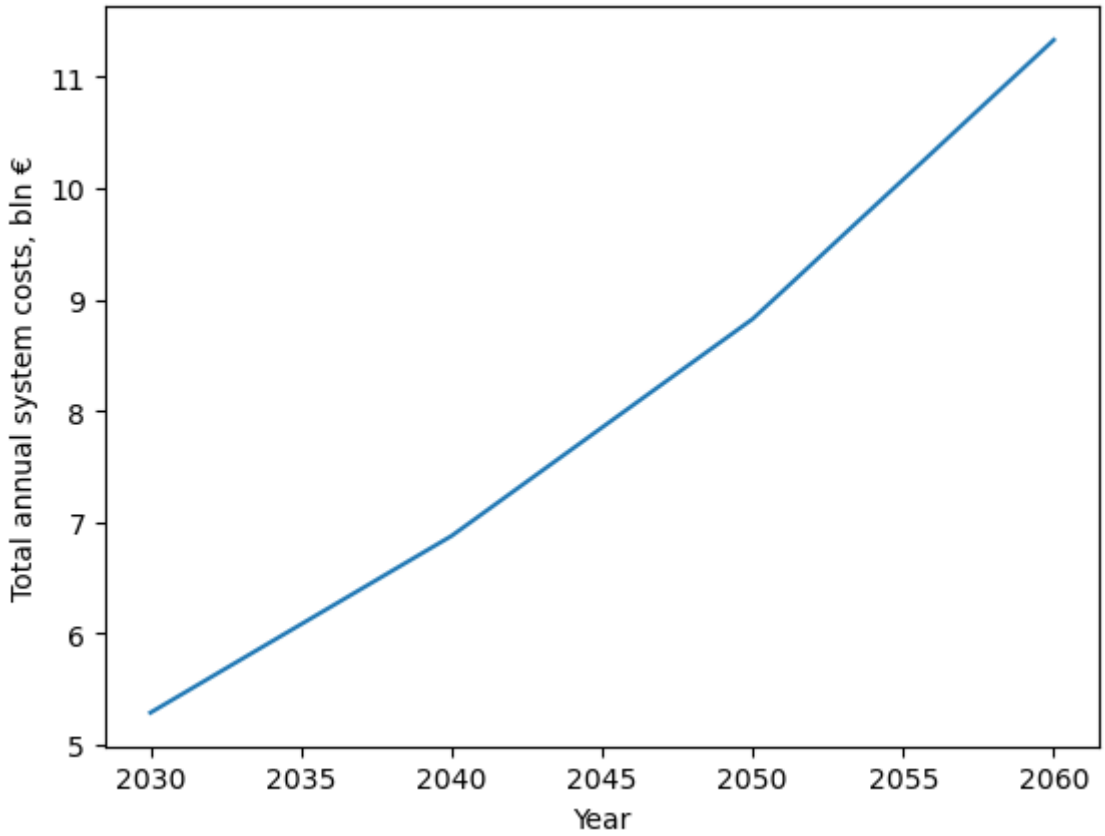

Рисунок 3.2.5. Общие капитальные затраты в годовом исчислении.

3.3. Заключение

PyPSA – активно развивающаяся среда для моделирования энергетики и электроэнергетики с открытым исходным кодом. Она обеспечивает прозрачность и удобство для пользователя, что делает ее более популярной среди сообщества моделистов. Для Казахстана модель PyPSA только на стадии разработки, но уже показывает свою универсальность и гибкость в плане формулировки задачи. Различные сценарии могут быть промоделированы и сравнены между собой для выведения оптимальных политик в отношении декарбонизации страны и региона Средней Азии.

Моделирование базового сценария показывает, что в Казахстане есть огромный потенциал для развития ВИЭ, и что Казахстан способен обеспечить растущую потребность в электроэнергии за счет имеющихся ресурсов. Также результаты подчеркивают необходимость капиталовложения в укрепление инфраструктуры для обеспечения перетоков мощностей между регионами с различными типами ВИЭ. Небольшие вложения в аккумуляторные батареи по всей территории Казахстана могут внести вклад в балансировку. Выбросы в базовом сценарии электроэнергетики ожидаемо возрастут к 2060.

Одна из задач для увеличения точности моделирования для пользователей PyPSA в Казахстане – обеспечение точных и актуальных данных и реалистичных сценариев.

PyPSA имеет широкий потенциал применения, в дальнейших работах планируется ввести многопериодное моделирование и промоделироавть сценарий Чистого Нуля, где будет учтена электрификация экономики. В дальнейшей работе с PyPSA для Казахстана есть возможность моделирования всего сектора энергетики, как это было сделано ранее для Европы, включая сектор транспорта, индустрии, ЖКХ и так далее.

4. Список литературы

[1] Altdorfer, F., (1981), "Introduction of price elasticities on energy demand in MARKAL", Memorandum No 345, KFA, Julich, July 1981.

[2] Berger, C., R. Dubois, A. Haurie, E. Lessard, R. Loulou, and J.-Ph. Waaub (1992), "Canadian MARKAL: an Advanced Linear Programming System for Energy and Environment Modelling", INFOR, Vol. 20, 114-125, 1992.

[3] Brooke, A, D. Kendrick, A. Meeraus, and R. Raman, 1998, The Solver Manual of the GAMS: A USER'S GUIDE, December 1998.

[4] Chen, K., M. Crucini (2012), "Comparing General and Partial Equilibrium Approaches to the Study of Real Business Cycles", Vanderbilt University Research paper, June 2012 (kan.chen@vanderbilt.edu, mario.crucini@vanderbilt.edu)

[5] Dantzig, G.B. (1963), Linear programming and Extensions, Princeton University Press, Princeton, New-Jersey, 1963.

[6] European Commission, The GEM-E3 Model, General Equilibrium Model for Economy, Energy and Environment, https://ec.europa.eu/jrc/en/gem-e3/model.

[7] G. Goldstein, G., 1991, “PC-MARKAL and the MARKAL User’s Support System (MUSS)”, BNL 46319, April 1991

[8] IPCC, 2007, Climate Change, Fourth Assessment Report, WG III: Mitigation, B. Metz, O. Davidson, P. Bosch, R. Dave, L. Meyer, editors, Cambridge: Cambridge.

[9] Kanudia, A., R. Gerboni, R. Loulou, M. Gargiulo, M. Labriet, E. Lavagno, R. De Miglio, L.Schranz, G. C. Tosato, “Modelling EU-GCC energy systems and trade corridors: Long term sustainable, clean and secure scenarios”, International Journal of Energy Management, 7, 2, 2013, 243 – 268.

[10] Loulou, R., and A. Kanudia (1999), “Minimax Regret Strategies for Greenhouse Gas Abatement: Methodology and Application”, Operations Research Letters, 25, 219-230, 1999.

[11] Brown, T., Hörsch, J., & Schlachtberger, D. (2018, January 16). PyPSA: Python for Power System Analysis. Journal of Open Research Software; Ubiquity Press. https://doi.org/10.5334/jors.188.

[12] Victoria, M., Zhu, K., Brown, T., Andresen, G. B., & Greiner, M. (2020). Early decarbonisation of the European energy system pays off. Nature Communications; Nature Portfolio.https://doi.org/10.1038/s41467-020-20015-4.

[13] Zeyen, E., Hagenmeyer, V., & Brown, T. (2021). Mitigating heat demand peaks in buildings in a highly renewable European energy system. Energy; Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120784.

[14] Glaum, P. (2022). Enhancing the German Transmission Grid through Dynamic Line Rating. arXiv.org. https://arxiv.org/abs/2208.04716.

[15] Parzen, M., Abdel-Khalek, H., Fedotova, E. V., Mahmood, M., Frysztacki, M., Hampp, J., Franken, L., Schumm, L., Neumann, F., Poli, D., Kiprakis, A., & Fioriti, D. (2023, July 1). PyPSA-Earth. A new global open energy system optimization model demonstrated in Africa. Applied Energy; Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121096.