



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE

РУКОВОДСТВО ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ИНСТРУМЕНТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА В АНАЛИЗЕ РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ



Сентябрь 2020

Настоящий документ предоставлен Агентству США по международному развитию (USAID) в целях ознакомления. Подготовлен Национальной ассоциацией членов комиссий по регулированию коммунальных предприятий (NARUC).

РУКОВОДСТВО ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ИНСТРУМЕНТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА В АНАЛИЗЕ РЫНКА ДЛЯ ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Название проекта:	Повышение эффективности рынка благодаря пониманию преимуществ рыночной интеграции для потребителя
Отделение-спонсор USAID:	Бюро USAID по Европе и Евразии
Соглашение о сотрудничестве №:	AID-OAA-A-16-00049
Получатель:	Национальная ассоциация членов комиссий по регулированию коммунальных предприятий (NARUC)
Дата публикации:	сентября 2020 г.
Авторы:	Божидар Радович, Вайсум Штейнборн-Ченг, Кристиан Хьюикер



Настоящая публикация подготовлена при поддержке Отдела энергетики и инфраструктуры Бюро по Европе и Евразии в соответствии с условиями Договора о сотрудничестве с Национальной ассоциацией членов комиссий по регулированию коммунальных предприятий, № AID-OAA-A-16-00049. Содержание публикации входит в сферу ответственности Национальной ассоциации членов комиссий по регулированию коммунальных предприятий и может не совпадать с точкой зрения USAID или правительства Соединенных Штатов Америки.

Фото на обложке: ©Francesco Scatena / Adobe Stock

Содержание

1	ВВЕДЕНИЕ	6
2	ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ И ДОСТУПНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ	9
3	ТРЕБОВАНИЯ К ВХОДНЫМ ДАННЫМ	12
4	РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ СЦЕНАРИЕВ	15
4.1	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЦЕНАРНОГО АНАЛИЗА И АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ	15
4.2	ОТДЕЛЬНЫЕ ТЕМАТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	21
5	ИНТЕРПРЕТАЦИЯ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ	26
6	РОЛЬ ОРГАНА РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	30
6.1	ПОДГОТОВКА ПРОЦЕССА МОДЕЛИРОВАНИЯ	30
6.2	ПРОЦЕСС МОДЕЛИРОВАНИЯ РЫНКА.....	31
6.3	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЫНКА В ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЕ ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ	32
7	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	35
8	ПРИЛОЖЕНИЕ.....	37
8.1	НАГЛЯДНЫЙ ПРИМЕР ИНСТРУМЕНТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЫНКА.....	37
8.2	ТИПЫ ВХОДНЫХ ДАННЫХ	39
8.3	СБОР И РАСЧЕТ ВХОДНЫХ ДАННЫХ.....	47

Рисунки

Рисунок 1. Обзор основных компонентов моделирования рынка.....	8
Рисунок 2. Основные области применения и типы имитационных моделей рынка.....	9
Рисунок 3. Различные типы входных данных для моделирования рынка.....	12
Рисунок 4. Входные данные и факторы влияния в сценарном анализе	17
Рисунок 5. Влияние различных факторов на инвестиционное планирование и оптимизацию диспетчерского управления.....	20
Рисунок 6. Ряд возможных подходов к разработке энергетических сценариев	21
Рисунок 7. Пути сокращения выбросов углекислого газа в сценариях МГЭИК	22
Рисунок 8. Общий обзор сценариев развития энергетики, подготовленных National Grid	24
Рисунок 9. Факторы влияния в сценариях развития электроэнергетики, подготовленных National Grid	25
Рисунок 10. Пример результатов, полученных с помощью модели в PLEXOS	26
Рисунок 11. Пример трехмерного графика недопоставленной энергии в программе Antares	27
Рисунок 12. График разработки «Десятилетнего плана развития сети – 2020».....	32
Рисунок 13. Показатели эффективности капиталовложений по методике ENTSO-E	34
Рисунок 14. Рабочий процесс модели Antares.....	38
Рисунок 15. Кривая длительности нагрузки и хронологический профиль нагрузки	43
Рисунок 16. Пример вводных технических данных для электростанции в PLEXOS	45
Рисунок 17. Типовые источники входных данных для моделирования рынка	48
Рисунок 18: Рост установленной мощности ВИЭ и энергопотребления в рамках NECP Хорватии	49
Рисунок 19. Динамика роста нормированной стоимости солнечной электроэнергии (LCOE) и договорных цен.....	55
Рисунок 20. Карта инсоляции стран Европы.....	57

Таблицы

Таблица 1. Схема соответствия источников данных и необходимых входных данных.....	14
Таблица 2. Примеры факторов влияния в исследованиях о переходе на новые ИЭ	17
Таблица 3. Факторы, необходимые для разработки сценария развития энергетики	18
Таблица 4. Краткий обзор основных факторов влияния в сценариях МГЭИК по сокращению выбросов углекислого газа	23
Таблица 5. Типовые результаты построения имитационных моделей рынка	27
Таблица 6. Влияние рыночной интеграции на общественное благосостояние в Юго-Восточной Европе.....	29
Таблица 7. Типовые рыночные модели с учетом ограничений электропередачи.....	40
Таблица 8. Классификация сегментов спроса оператора передующих сетей Германии	58
Таблица 9. Примеры параметров, используемых в параметрическом прогнозировании профиля нагрузки.....	58

Вставки

Вставка 1. Показатели общественного благосостояния по результатам моделирования рынка стран Юго-Восточной Европы	29
Вставка 2. Участие ACER в разработке ENTSO-E TYNDP	32
Вставка 3. Использование моделирования в анализе экономической эффективности проектов межсистемных соединений.....	34
Вставка 4. Национальный план в области энергетики и климата Республики Хорватия	49
Вставка 5. Сбор данных в целях планирования в соответствии с требованиями Сетевого кодекса Великобритании	52
Вставка 6. Доклад «Перспективы развития энергетических технологий» МЭА	55
Вставка 7. Прогнозирование профиля нагрузки для плана развития энергосетей Германии	58

I Введение

Национальные органы регулирования стран европейского и евразийского регионов¹ ведут активную работу, направленную на повышение эффективности рынков электроэнергии. Поскольку большинство этих стран являются участниками европейского «Договора об энергетическом сообществе», операторы передающих систем этих стран обязаны регулярно оценивать долгосрочную надежность производства электроэнергии, а также, в соответствии с правилами, установленными Евросоюзом. Национальные органы регулирования осуществляют надзор над этим процессом и в большинстве случаев рассматривают и утверждают соответствующие планы или оценки. Они также оказывают содействие развитию действующих рынков электроэнергии и региональной интеграции национальных рынков. Подобное содействие может включать анализ и моделирование рынка, то есть, оценку возможного влияния соответствующих изменений на издержки производства, рыночные цены, межграницные перетоки электроэнергии, конкуренцию и ликвидность рынка.

В рамках договора о сотрудничестве с Бюро по Европе и Евразии Агентства международного развития (USAID) Национальная ассоциация членов комиссий по регулированию коммунальных предприятий (NARUC) реализует Программу повышения стабильности и качества инженерно-технических знаний на европейских и евразийских энергетических рынках (ESTEEM), предназначенную для стран, получающих помощь от USAID, и представительств USAID. При финансовой поддержке USAID NARUC оказывает национальным органам регулирования стран европейского и евразийского регионов консультативную помощь по инженерно-техническим вопросам в целях повышения уровня знаний и потенциала в указанных областях.

Хотя преимущества интеграции рынков очевидны, принятие решений по дальнейшему продвижению к этой цели осложняется из-за проблем технического и политического характера. Поэтому крайне важно, чтобы государственные органы регулирования, операторы передающих систем и другие отраслевые участники этого процесса вели открытый диалог, а государственные органы регулирования имели четкое представление о преимуществах и недостатках объединения рынков с тем, чтобы подготовиться к последствиям реализации данного сценария. Аналогичным образом, органы регулирования стран Европы и Евразии должны уметь критически анализировать и оценивать долгосрочные планы развития, предложенные операторами передающих систем и другими сетевыми операторами.

В этой связи, NARUC поручил авторам подготовить краткие справочники, в которых рассматриваются принципы, методы использования и общие сведения об аналитических инструментах двух типов, которые часто применяются для этих целей операторами передающих систем и другими аналогичными структурами. В настоящем документе («Краткий справочник II») рассказывается об использовании инструментов моделирования рынка в разработке планов расширения производства электроэнергии и построении рыночных моделей. Параллельно был подготовлен еще один справочник («Краткий справочник I» или «Руководство по использованию инструментов анализа потока мощности в планировании

¹ В рамках данного проекта сюда относятся национальные органы Албании, Армении, Боснии и Герцеговины, Грузии, Косово, Молдовы, Черногории, Северной Македонии и Украины.

электропередачи для органов регулирования», в котором обсуждается применение инструментов анализа потока нагрузки для тех же целей.)

Как будет показано в следующей главе, моделирование рынка может проводиться с различными целями, например, в целях составления плана расширения производства электроэнергии или построения модели (ежедневной) работы рынков электроэнергии, диспетчерского управления генерацией и межгосударственного обмена потоками электроэнергии. На практике, для достижения этих целей могут использоваться различные инструменты или модели. В этой связи, важно различать термины *модель* и *инструмент моделирования*. Различие между этими терминами часто толкуется неверно. Для целей настоящего документа, термином *инструмент моделирования* или просто *инструмент* мы обозначаем программный пакет, который позволяет моделировать и оптимизировать рынки и производство электроэнергии. Этот инструмент, как правило, представляет собой набор алгоритмов и соответствующих пользовательских интерфейсов, которые, главным образом, позволяют работать с любым рынком или энергосистемой. В отличие от этого, под *моделью* мы понимаем инструмент, который имеет конфигурацию или заполнен заданной совокупностью данных, характеризующих конкретный рынок электроэнергии или энергетический комплекс. Другими словами, инструмент может использоваться для настройки различных моделей, в то время как модель всегда базируется на сочетании выбранного инструмента и заданного набора данных.

Как видно на Рисунок 1, настоящий краткий справочник построен таким образом, чтобы показать различные этапы и компоненты, задействованные в процессе конфигурации и применения модели, а также интерпретации результатов моделирования, а именно:

- в главе 2 (C2) описываются принципы применения различных инструментов моделирования рынка;
- в главе 3 (C3) дано описание входных данных, необходимых для использования инструмента;
- в главе 4 (C4) рассматриваются методы и преимущества разработки сценариев, а также использование анализа чувствительности;
- глава 5 (C5) дает представление о том, как интерпретировать результаты рыночного моделирования;
- в главе 6 (C6) объясняется роль органов регулирования в интерпретации результатов моделирования и передаче соответствующей информации руководителям, ответственным за принятие решений.



Источник: DNV GL

2 Основная цель и доступные инструменты

Применение рыночного моделирования со временем претерпело значительные изменения. Вертикально интегрированные энергокомпании начали применять моделирование в 1950-х годах, в основном для анализа расширения мощностей. Основная цель вертикально интегрированных коммунальных предприятий состояла в том, чтобы обеспечить необходимую мощность для покрытия спроса на электроэнергию при минимальных затратах (планирование увеличения выработки электроэнергии) с учетом внезапной потери нагрузки (Loss of Load Probability/LOLP). За последние десятилетия либерализация рынков электроэнергии и быстрый рост переменных возобновляемых источников энергии (ВИЭ) создали новые проблемы как для участников рынка, так и для органов регулирования. Это привело к необходимости разработки новых и более сложных инструментов моделирования. С учетом меняющихся требований и растущей вычислительной мощности были разработаны инструменты анализа рынка электроэнергии, предназначенные для моделирования работы энергетического сектора и количественной оценки рыночной ситуации для разных временных отрезков.



Источник: DNV GL

Как видно на Рисунке 2, при моделировании рынка решаются разнообразные вопросы, которые в широком смысле могут ассоциироваться с различными временными периодами. Для решения этих проблем в контексте различных горизонтов планирования были разработаны специальные инструменты. В целом, общим свойством инструментов моделирования рынка являются следующие три основные функции:

- **Инструменты планирования по расширению мощностей** помогают определить оптимальный баланс между строительством новых генерирующих мощностей и демонтажем устаревшего оборудования, а в некоторых случаях между модернизацией передающих сетей (и демонтажем устаревшего оборудования). Оптимизация

проводится с учетом экономических и инвестиционных решений с целью максимально снизить общие системные затраты, соблюдая при этом целевые показатели надежности и экологические показатели. Помимо инвестиций в производство, моделирование рынка также применяется в оценке инвестиций в линии электропередачи с целью повысить эффективность использования электростанций, расположенных в разных регионах². Как правило, эти модели ориентированы на оптимизацию таких показателей, как чистая текущая стоимость электроснабжения или нормированная стоимость электроэнергии. Кроме того, они обычно опираются на годовые интервалы и основаны на упрощенном представлении генерации, так называемых «гибких ресурсов» или общей энергосистемы.

- **Инструменты среднесрочного планирования** предназначены для решения таких задач, как оптимизация гидроэнергетики и топливной энергетики, планирование технического обслуживания или оценка достаточности ресурсов. Эти инструменты обычно ориентированы на недельные интервалы. Как и в случае с инструментами развития мощностей, анализ обычно основывается на упрощенном представлении эксплуатационных ограничений, особенно межвременных ограничений, таких как пределы нарастания напряжения и минимальное время работы/простоя. Точно так же, многие инструменты опираются на график нагрузки по продолжительности и другие упрощенные показатели нагрузки.
- **Методика составления графика нагрузки энергоблоков и оптимизации и распределения нагрузки** направлена на оптимизацию почасового планирования и эксплуатации генераторных установок и других гибких ресурсов. Для этого необходимо учитывать детальный (почасовой) профиль нагрузки и выработку электроэнергии переменными возобновляемыми ИЭ (например, ветровой и солнечной). Аналогичным образом, соответствующие инструменты обычно позволяют представить, в деталях, необходимые технические и коммерческие параметры, включая, в частности, межвременные ограничения. Поэтому важно, чтобы в решении проблем оптимизации учитывались эти временные ограничения, если нужно смоделировать реальную работу комплекса генерирующих мощностей с различными ИЭ.

Помимо меняющихся обстоятельств, на развитие рыночных моделей также оказало влияние совершенствование вычислительных средств. Первоначально, инструменты моделирования рынка должны были вынужденно опираться на множество упрощений, чтобы снизить сложность и время вычислений. Так, они часто основывались на **эвристической оптимизации**, используя заранее определенные правила принятия решений. Хотя такие инструменты могли найти «хороший» результат, им не всегда удавалось выработать оптимальное решение.

Сегодня большинство инструментов моделирования рынка основаны на методах **линейного программирования**, таких как смешанное целочисленное линейное программирование (MILP). Их главное преимущество заключается в том, что они в принципе способны найти оптимальное решение. Более того, в сочетании с мощными современными программами такие модели применяются даже для крупных рынков или энергетических систем национального, регионального и даже континентального масштаба. Однако несмотря на значительное

² Сравните ENTSO-E. ENTSO-E-2 "Основные принципы анализа экономической эффективности проектов развития электросетей". Окончательный вариант – одобрен Европейской комиссией. Брюссель, 27 Сентября 2018 г. Доступно по адресу <https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/tyndp-documents/Cost%20Benefit%20Analysis/2018-10-11-tyndp-cba-20.pdf>; последний просмотр: 18 июля 2020 г.

повышение вычислительной мощности, применять методы MILP для больших систем пока еще невозможно, поскольку время вычислений увеличивается экспоненциально, особенно для «целочисленных переменных», например, для решения о пуске или остановке генерирующего блока. По этой причине соответствующие инструменты все еще допускают определенные упрощения, такие как линеаризация целочисленных ограничений или эвристических элементов.

По той же причине были разработаны специальные инструменты и методы для **стохастической оптимизации**, то есть, для работы со стохастическими неопределенностями основных входных параметров. Традиционно, методы стохастической оптимизации применялись для гидросистем, то есть, для составления оптимального графика нагрузки гидроэнергетических систем, в состав которых входят большие водохранилища. В последние годы важное значение приобрели модели, предназначенные для решения проблем возобновляемых источников энергии с переменным характером выработки (переменные ИЭ) – ветровые, солнечные электростанции.

Для получения более подробной информации см. Приложение 8.1, где дано описание трех современных инструментов моделирования, основанных на различных подходах и широко применяемых в регионе.

3 Требования к входным данным

Качественные входные данные имеют решающее значение для построения точных и надежных моделей рынка. Более того, надежные входные данные часто имеют такое же важное значение, как и правильный выбор инструмента моделирования. То, какие данные необходимы, с одной стороны, определяет выбор инструмента моделирования, а с другой – объем и основное направление моделирования.



Рисунок 3. Различные типы входных данных для моделирования рынка

Источник: DNV GL

Как показано на Рисунок 3, различают следующие типы входных данных³.

- **Основная структура рынка и энергосетей.** Включает возможное разделение большой географической области на одну или несколько рыночных зон («тендерных зон»), соответствующие сетевые ограничения и рыночный подход к учету этих ограничений. В разных странах эту задачу решают, используя различные подходы – от метода определения двусторонней чистой пропускной способности энергосети (NTC) до узлового представления сети, основанного на оценке перетоков мощности («поточковый» подход).
- **Нагрузка.** Включает информацию об общем потреблении, пиковой нагрузке, профиле нагрузки и кривых продолжительности нагрузки, управлении спросом и географическом распределении нагрузки.
- **Генерация, хранение и другие гибкие ресурсы.** Включает общую информацию, технико-экономические характеристики, наличие ресурсов и другие эксплуатационные ограничения объектов производства, хранения и других аналогичных объектов.

³ Раздел 8.2 Приложения содержит более подробное обсуждение различных типов входных параметров и источников данных.

- **Цены на сырье и стоимость технологий.** Включает информацию о затратах на топливо, а также затраты на технологии, эксплуатацию и техническое обслуживание.
- **Целевые показатели и ограничения в области политики, экологии и надежности энергосистем.** Позволяет определить целевые показатели и ограничения, такие как целевые показатели сокращения выбросов углерода или минимальные значения показателей надежности системы.
- **Резервные требования и системные ограничения.** Содержит информацию о дополнительных системных ограничениях и резервных требованиях.

Не все источники информации подходят для получения всех типов данных. В Таблица I показано соответствие различных входных параметров типовым источникам данных⁴. Зеленое поле указывает на оптимальные источники данных, а желтое означает их ограниченную пригодность. Следует отметить, что экспертные оценки всегда рассматриваются как возможные источники данных и поэтому не включены в список.

⁴ Просьба обращаться к разделу 8.3 Приложения, где обсуждаются методы или подходы к сбору и/или оценке данных.

Таблица 1. Соотнесение источников данных и необходимых входных данных

	Государственные цели и стратегии	Правила, стандарты и критерии	Данные сетевого оператора и заинтересованных сторон	Общедоступная информация	Собственный анализ и расчеты
Основная структура рынка и энергосетей		(✓)	✓	✓	
Нагрузка	✓		✓	✓	(✓)
Генерация, хранение и другие гибкие энергоресурсы	✓		✓	✓	(✓)
Цены на сырье и стоимость технологий			(✓)	✓	(✓)
Целевые показатели и ограничения в области политики, экологии и надежности энергосистем	✓	✓	✓	✓	
Технические ограничения (например, резервы или локальные сетевые ограничения)			✓		(✓)

Зеленое поле указывает на оптимальные источники данных, а желтое означает их ограниченную пригодность.

Источник: DNV GL

4 Разработка и анализ сценариев

4.1 Использование сценарного анализа и анализа чувствительности

В рыночном моделировании анализ сценариев используется для оценки того, как различные допущения либо изменения повлияют на действующую или будущую энергосистему, а также для определения возможных путей достижения установленных результатов. Соответственно, энергетические сценарии можно разделить на группу директивных сценариев и описательных сценариев⁵:

- **Директивные (нормативные) сценарии** определяют конкретное (будущее) состояние и путь достижения указанного состояния. Этот тип сценариев также называют *стратегической концепцией, ретроспективным анализом, путем реализации решений и дорожной картой*. Стратегическая концепция – это сценарий, который представляет собой намеченную и в определенной степени достижимую модель будущего.
- **Описательные сценарии** используются для оценки последствий различных допущений или вариантов рыночного проектирования, таких как объединение рынков. В описательных сценариях нет заранее определенного результата. Скорее, результат определяется моделированием рынка с использованием исходных допущений.

По определению, основная цель использования директивных сценариев – это оценка последствий различных *проектных решений* (при условии различных путей их реализации) на определенные параметры, например, на системные издержки, потребительские издержки и рыночные цены. Подобно планированию расширения генерации, директивные сценарии ориентированы на долгосрочные структурные изменения. Однако в этом случае будущее состояние представляет собой скорее входные, чем выходные данные модели. Поэтому такой анализ носит несколько косвенный характер, то есть, моделирование производственных затрат или повседневных рыночных операций используется, чтобы понять, насколько эффективны будут те или иные варианты расширения или та или иная структура рынка.

Напротив, описательные сценарии в определенном смысле являются *открытыми*, поскольку конечное состояние заранее неизвестно. Поэтому они их используют для традиционного долгосрочного планирования расширения мощностей, а также для оценки влияния экзогенных изменений, которые находятся вне контроля органа регулирования или других субъектов. Возможные примеры включают технико-экономическую оценку будущих изменений цен на топливо, перспективы распространения ВИЭ, будущий спрос на генерацию, рыночные цены.

Основная цель сценарного анализа состоит не в том, чтобы предсказать будущее, а в том, чтобы выделить основные факторы, которые могут повлиять на направление будущего развития. Точнее, разработка сценариев помогает понять возможные будущие события и выявить основные факторы влияния.

⁵ T. Mai et al., “RE-ASSUME A Decision Maker’s Guide to Evaluating Energy Scenarios, Modeling, and Assumptions,” June 14, 2013, <https://doi.org/10.2172/1090954>; William McDowall and Malcolm Eames, “Forecasts, Scenarios, Visions, Backcasts and Roadmaps to the Hydrogen Economy: A Review of the Hydrogen Futures Literature,” *Energy Policy* 34, no. 11 (July 2006): 1236–50, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.12.006>.

В научной литературе обсуждался целый ряд определений и подходов к сценарному анализу (см., например, работы Meinert⁶ и Davis⁷). В соответствии с целями настоящего документа, далее описываются этапы и факторы, имеющие большое значение для моделирования рынка. В частности, далее будут выделены следующие четыре ключевые этапа:

1. Определение граничных условий и неопределенные факторы влияния.
2. Оценка и отбор необходимых факторов влияния.
3. Построение сценариев.
4. Анализ неопределенности и чувствительности.

4.1.1 Определение граничных условий по сравнению с неопределенными факторами влияния

Как указано в главе 3, каждая модель требует большого количества входных параметров. Хотя многие из таких параметров будут связаны со значительной степенью неопределенности, можно ожидать, что другие будут определены достаточно точно, как, например, структура генерирующих или сетевых мощностей, находящихся в эксплуатации. Аналогичным образом, некоторые граничные условия будут рассматриваться как данность, например, заранее установленные цели политики. Поскольку практически невозможно учесть все возможные варианты соответствующих входных данных и их сочетания, имеет смысл различать *известные входные данные* и *неопределенные факторы влияния* (см. Рисунок 4).

Точно так же, не все изменения будут иметь одинаковые последствия для результатов моделирования, как в целом, так и с точки зрения конкретной цели предстоящего анализа. Более того, представляется целесообразным проанализировать лишь те факторы, которые скорее всего окажут существенное влияние на результаты моделирования.

Типичным примером допущений, которые хорошо известны и предсказуемы для временного горизонта конкретного анализа, является стоимость проверенных технологий, таких как тепловые электростанции. В отличие от них, факторы влияния относятся остаются неопределенными на протяжении анализа. Типичным примером таких факторов являются цены на сырьевые товары и цены на новые технологии, такие как аккумуляторное хранение, снижение выбросов углекислого газа в атмосферу по технологии CCS, и т. д.

⁶ Sascha Meinert, *Scenario Building: Field Manual*, ETUI (ETUI - Brussels, 2014), <https://www.labourline.org/Record.htm?idlist=1&record=19116869124919340419>.

⁷ Ged Davis, *Scenarios: An Explorer's Guide* (The Hague: Shell International BV, 2008), https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/new-lenses-on-the-future/earlier-scenarios/_jcr_content/par/expandablelist/expandablesection_842430368.stream/1519772592201/f5b043e97972e369db4382a38434d4dc2b1e8bc4/shell-scenarios-explorersguide.pdf.

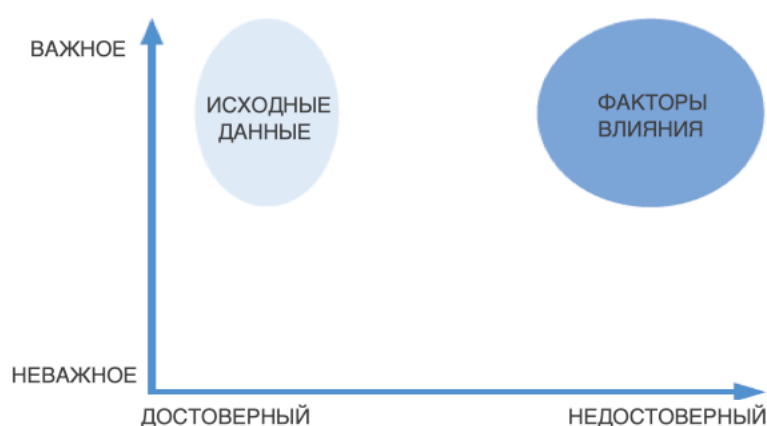


Рисунок 4. Входные данные и факторы влияния в сценарном анализе ⁸

В сценарном анализе основное внимание следует уделить оценке факторов, оказывающих наибольшее влияние на будущее развитие. В Таблица 2 показан пример основных факторов влияния в различных сценариях. Так, фактор «текущая и будущая политика» представляет описательный сценарий, а основной фактор «обеспечить 100% генерацию за счет ВИЭ» представляет директивный сценарий.

Таблица 2. Примеры факторов влияния в исследованиях переход на новые ИЭ⁹

Название сценария	Организация	Прогноз. период	Основной фактор влияния	Доля ВИЭ на конец прогноз. периода
Новая политика, согласно «Международным энергетическим перспективам» (WEO)(2012)	МЭА	2035	Текущие и заявленные стратегии	18%
WEO 450 (2012)	МЭА	2035	Стабилизация глобального потепления на уровне ниже 2°C	27%
Прогноз «Энергетические перспективы ВР» (2013)	Компания ВР	2030	«Наиболее вероятное будущее»	12%
Переосмысление прогноза на 2050 г.	Европейский совет по ВИЭ	2050	Цель - 100% генерация за счет ВИЭ	96%

Выбор соответствующих факторов влияния для проведения сценарного анализа показан в Таблица 3. Важно отметить, что инструменты моделирования рынка, как правило, основаны на принципе минимизации затрат. Поэтому можно ожидать, что любые факторы, связанные с

⁸ Meinert, *Scenario Building*.

⁹ Mai et al., "RE-ASSUME."

затратами, окажут наибольшее влияние на результаты моделирования. В отличие от этого, нетехнические факторы учитываются только косвенно, например, принимая экзогенные допущения об их влиянии на другие параметры.

Таблица 3. Факторы, необходимые для разработки сценария развития энергетики ¹⁰

Финансово-экономический	Технический	Проектирование, регулирование и стратегия рынка	Нетехнический
• Цена на энергоносители • Капитальные затраты и операционные расходы (генерация, расширение передачи) • Скидки и средневзвешенная стоимость капитала • Технологическое обучение (снижение затрат) • Затраты жизненного цикла технологий (решения о демонтаже оборудования)	• Рост нагрузки, вкл. ○ экономическое развитие, ○ рост населения, ○ энергетическая эффективность, ○ сохранение энергии «электричество-в-газ», power-to-gas (электролиз) ○ электрификация (тепло, транспорт) • профиль нагрузки (суточный, недельный, сезонный), • нормативы обязательных резервов, • топливно - энергетические ограничения или доступность, • «погодные годы» (например, гидрологические изменения)	• региональная рыночная интеграция (например, объединение рынков, балансировка, структура блоков управления нагрузкой и частотой) • Целевые показатели выбросов CO₂ • Целевые показатели уровня распространения ВИЭ • экологические издержки (например, внешние факторы) / стоимость снижения выбросов CO₂ • технологические / топливные субсидии	• Общественное противостояние ("Только не у меня дома") • проблемы получения разрешений (например, линии электропередач, плотины и т. д.) • проблемы рыночной цепочки поставок

4.1.2 Оценка и отбор необходимых факторов влияния

Значение отдельного фактора влияния зависит от основного фактора влияния в используемом сценарии развития энергетики и инструмента моделирования. Примерная оценка влияния различных факторов на инвестиционное планирование и оптимизацию диспетчерского управления показана на

¹⁰ Mai et al.

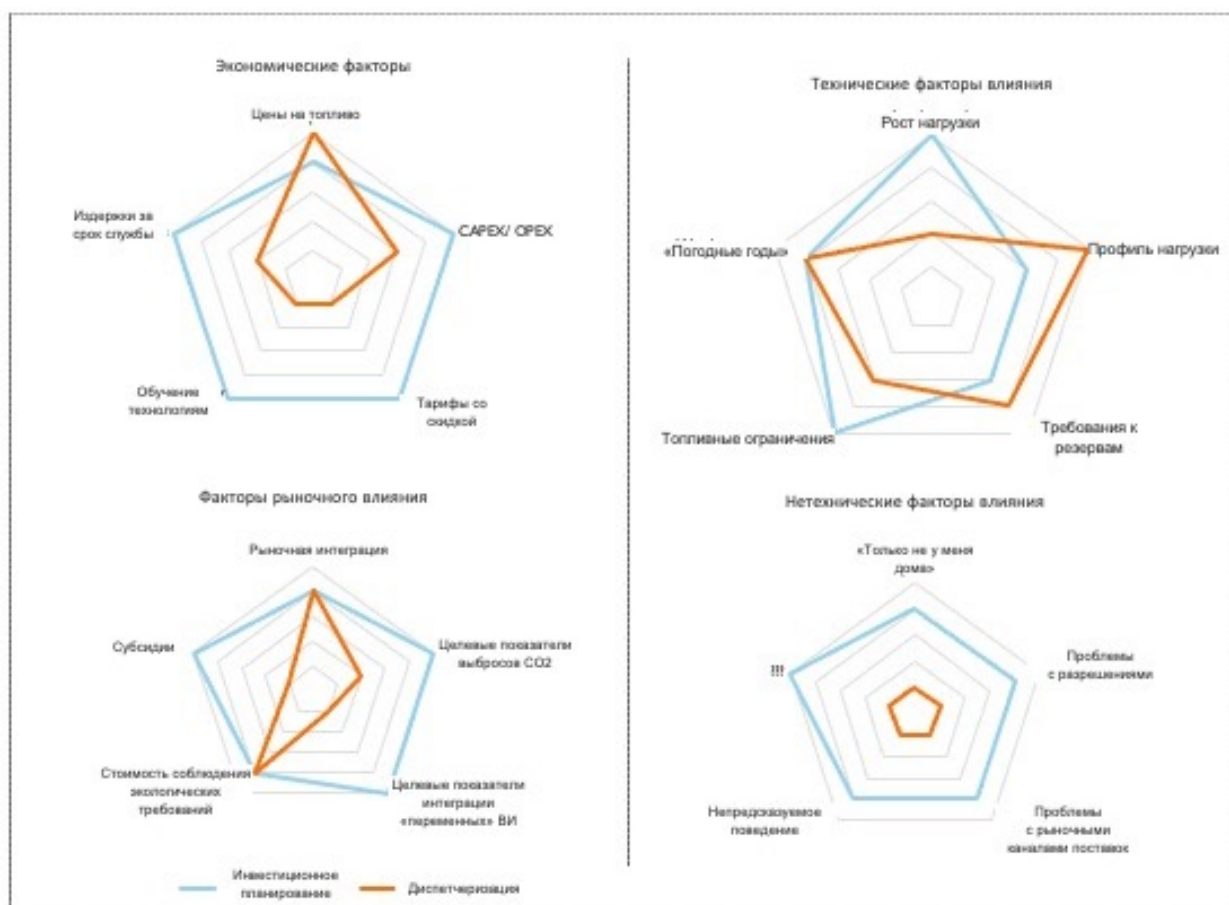


Рисунок 5.

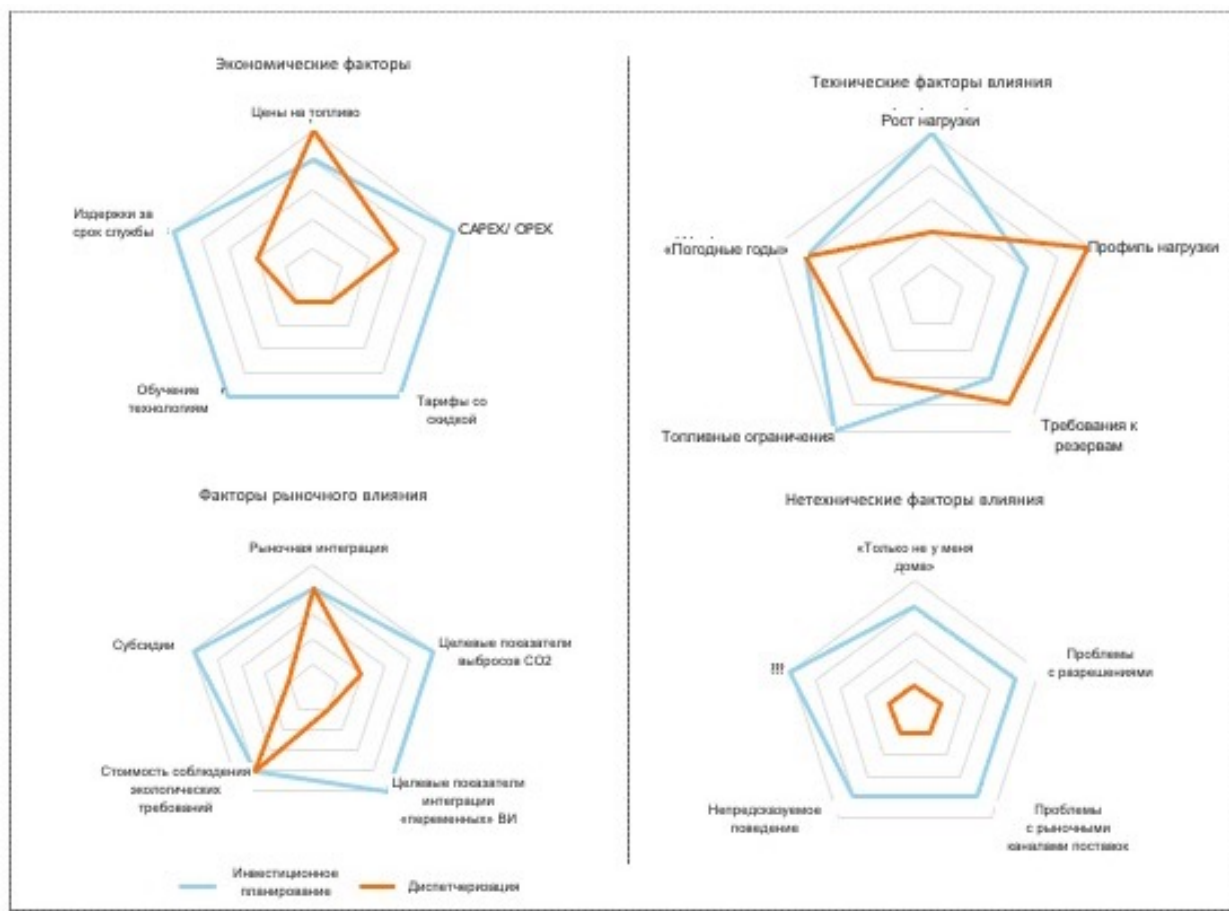


Рисунок 5. Влияние различных факторов на инвестиционное планирование и оптимизацию диспетчерского управления

Источник: DNV GL

4.1.3 Построение сценария

Для проведения надежного сценарного анализа, как правило, нецелесообразно полагаться на один сценарий. Скорее, сочетание различных сценариев, которые можно сравнить друг с другом, дает возможность достоверно оценить влияние, например, различных цен на нефть, прогнозов спроса и других факторов. На Рисунок 6 показаны различные подходы к разработке энергетических сценариев.

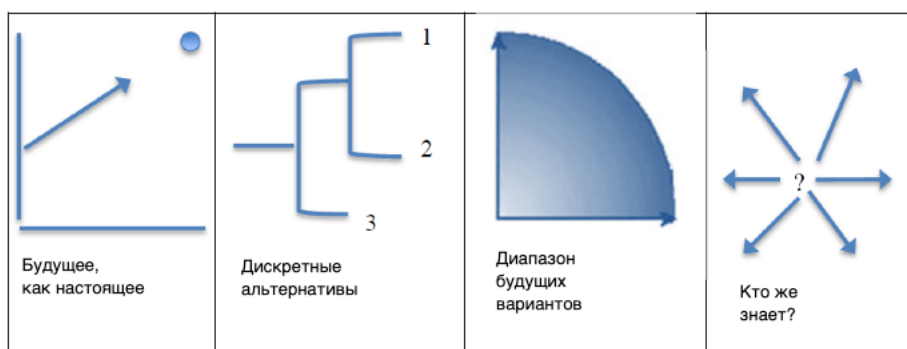


Рисунок 6. Ряд возможных подходов к разработке энергетических сценариев¹¹

4.1.4 Анализ неопределенности и чувствительности

Как показано в главе 3 и Таблица 3, энергетические системы подвержены влиянию множества различных факторов. Маловероятно, что разработчики сценария или модели имеют ясное представление обо всех особенностях каждого отдельного допущения. По этой причине разработка надежных сценариев часто дополняется анализом неопределенности и чувствительности:

- Анализ неопределенности используется для количественной оценки неопределенности входного параметра. Этот тип анализа также используется для исключения входных параметров с низким уровнем или отсутствием влияния на выходные данные сценария и для разделения входных параметров на входные данные и факторы влияния.
- При анализе чувствительности выясняют, какое влияние оказывают различные значения одной или нескольких входных переменных на результаты моделирования. Напротив, сценарии обычно предусматривают одновременное изменение множества различных исходных допущений. Таким образом, анализ чувствительности полезен для оценки специфического воздействия ключевых или крайне неопределенных переменных.

Ограничивающим фактором для анализа чувствительности является время вычислений. Например, анализ чувствительности с пятью (неопределенными) входными параметрами и тремя состояниями каждого параметра (высокий, базовый, низкий) привел бы к $3^5 = 243$ возможным комбинациям. В зависимости от времени вычислений, оценка всех этих комбинаций может оказаться невыполнимой. Точно также, может оказаться трудным или даже невозможным достоверно сопоставить и интерпретировать результаты, если не будут использованы очень простые и понятные системы показателей.

Наиболее распространенным подходом является ограничение числа вариантов при анализе чувствительности и одновременное изменение только одного входного параметра. Это, по существу, означает, что определяется и оценивается базовый вариант. Базовый вариант обычно содержит наиболее вероятные допущения для каждого параметра. Затем по каждому параметру анализируется менее вероятное допущение (например, высокое или низкое состояние). Этот простой подход позволяет учитывать относительное влияние отдельных параметров. Так, в предыдущем примере такой подход резко сокращает количество имитаций с 243 до 11 (1х моделирование базового варианта + 2х5 имитаций по каждому состоянию и параметру).

4.2 Отдельные тематические исследования

4.2.1 Сценарии МГЭИК по глобальному потеплению

Международная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) разработала четыре сценария оценки того, можно ли и с помощью каких мер сократить выбросы парниковых газов,

¹¹ Mai et al.

чтобы ограничить глобальное потепление до $1,5^{\circ}\text{C}$ ¹². На Рисунок 7 показаны предполагаемые пути сокращения выброса по четырем сценариям.

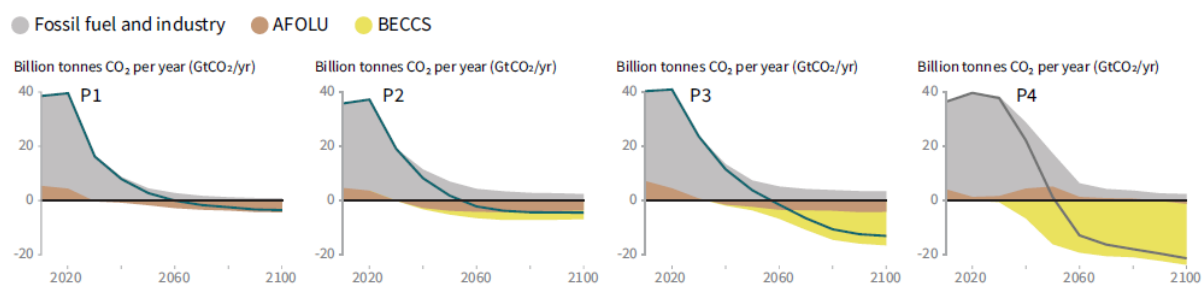


Рисунок 7. Пути сокращения выбросов углекислого газа в сценариях МГЭИК¹³

Все четыре сценария предполагают использование технологий удаления углекислого газа, таких как биоэнергетика с улавливанием и хранением углекислого газа (BECCS) и абсорбция в сельском хозяйстве, лесном хозяйстве и других видах землепользования (AFOLU). Несмотря на эти сходства, каждый из сценариев характеризуется различным набором факторов влияния, которые кратко перечислены в Таблица 4 ниже.

¹² Intergovernmental Panel on Climate Change, *Global Warming of 1.5°C* , 2019, <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>.

¹³ Там же.

Таблица 4. Краткий обзор основных факторов влияния в сценариях МГЭИК по сокращению выбросов углекислого газа ¹⁴

	P1	P2	P3	P4
Нарративный	Социальные, коммерческие и технологические инновации приводят к снижению спроса на электроэнергию при одновременном повышении уровня жизни, особенно, в странах т.н. «третьего мира».	Основной акцент на устойчивом развитии, включая энергоёмкость, развитие людского потенциала, экономическую конвергенцию и международное сотрудничество.	Социальное и технологическое развитие следует историческим закономерностям.	Экономический рост и глобализация приводят к широкому распространению образа жизни, связанного с интенсивным использованием парниковых газов, включая высокий спрос на транспортное топливо и продукцию животноводства.
Фактор декарбонизации	Сокращение масштабов энергосистемы и декарбонизация энергоснабжения.	Устойчивые и здоровые модели потребления, инновации в области низкоуглеродных технологий.	Декарбонизация энергоснабжения и производства, ограниченное сокращение спроса.	Технологии удаления углекислого газа
Общепринятые технологии удаления углекислого газа	Лесонасаждение	Ограниченное использование технологии улавливания и хранения углекислого газа (BECCS).	BECCS (Биоэнергетика с улавливанием и хранением углерода)	Интенсивное использование технологии BECCS

Источник: по материалам DNV GL

4.2.2 Сценарии развития энергетики оператора передающих систем британской National Grid

Для выполнения перспективного анализа, например, в связи с планированием расширения передающих сетей, британский оператор передающих систем National Grid разработал программу «Сценарии будущего развития энергетики» (FES). Предполагается, что эти сценарии отражают «вероятные пути развития энергетики на ближайшие 30 лет и далее»¹⁵. На практике эти четыре сценария используются оператором National Grid в качестве отправной точки для проведения анализов различного типа и моделирования рынка. FES – это примеры описательных сценариев, в которых определяется ряд факторов влияния и на их основе строятся допущения, связанные с распространением технологий, а также прочие допущения. FES включают в себя четыре сценария (Рисунок 8), которые характеризуются двумя основными группами факторов влияния¹⁶:

- *скорость декарбонизации*: переход на низкоуглеродные технологии, обусловленный стратегическими, экономическими и технологическими факторами, а также настроениями потребителей;

¹⁴ Там же.

¹⁵ National Grid, “National Grid ESO - Future Energy Scenarios; <http://fes.nationalgrid.com/>

¹⁶ Там же.

- *уровень децентрализации*: размещение сетей энергоснабжения в непосредственной близости от конечного потребителя. Описывает уровень централизации объектов генерации и таких технологий, как зарядка электромобилей.

Следует отметить, что указанные сценарии не предназначены для прогнозирования возможных путей развития энергетики. Напротив, National Grid прямо признает, что фактическое развитие, скорее всего, будет представлять собой сочетание компонентов каждого из четырех сценариев.



Рисунок 8. Общий обзор сценариев развития энергетики, подготовленных National Grid¹⁷

Каждый сценарий характеризуется сочетанием пяти внешних факторов, которые описывают ход развития по соответствующему сценарию в следующих областях:

- *Политическая поддержка*: уровень механизмов, стимулирующих внедрение низкоуглеродных технологий;
- *Участие со стороны потребителей*: изменение поведения в ответ на изменение стоимости электроэнергии и готовность использовать альтернативные варианты теплоснабжения и транспорта;
- *Экономический рост*: общая экономическая ситуация (рост ВВП);
- *Технологическое развитие*: темпы развития новых и совершенствования действующих технологий; и
- *Энергоэффективность*: энергосберегающие приборы и теплосберегающие технологии, используемые в новых и уже существующих зданиях и сооружениях.

На Рисунке 9 дан обзор допущений по каждому из этих факторов в четырех сценариях.

¹⁷ National Grid, "Future Energy Scenarios" (London: National Grid, 2019), <http://fes.nationalgrid.com/media/1409/fes-2019.pdf>.

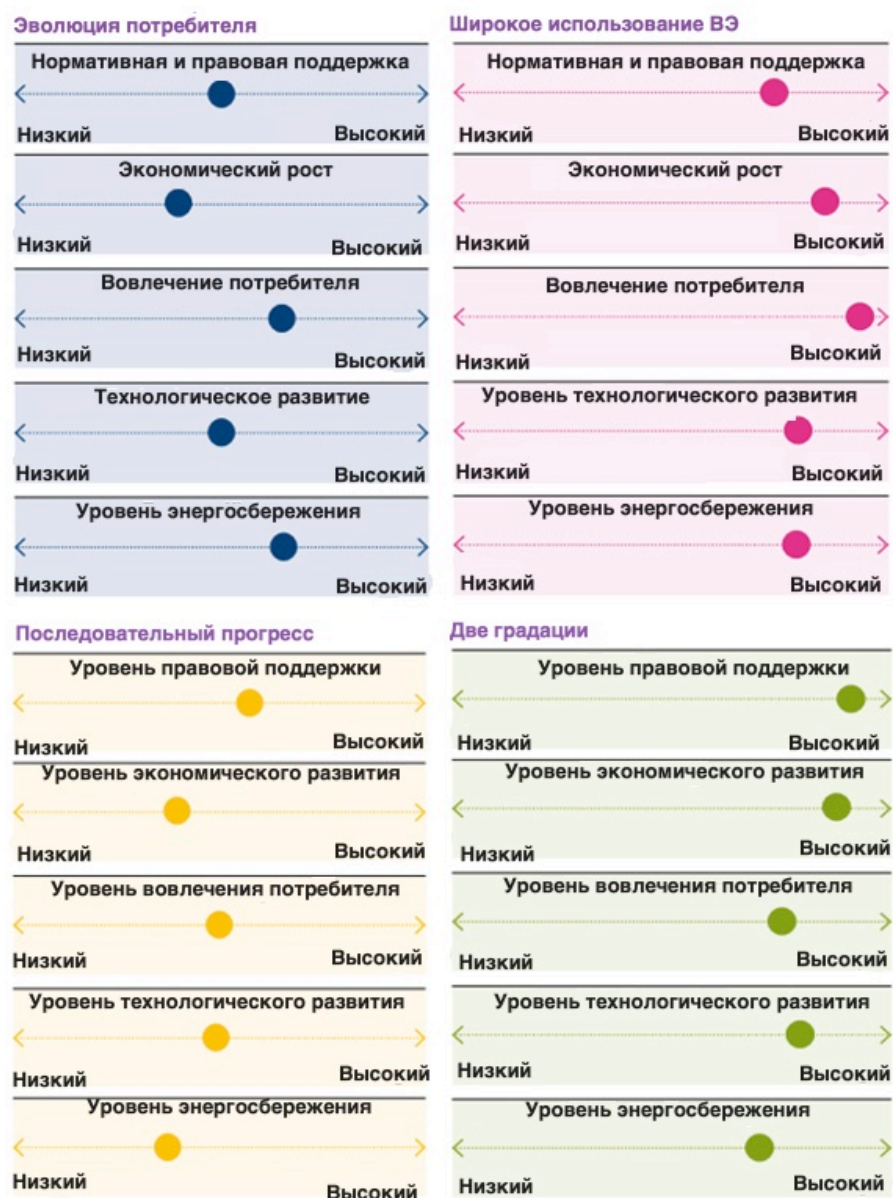
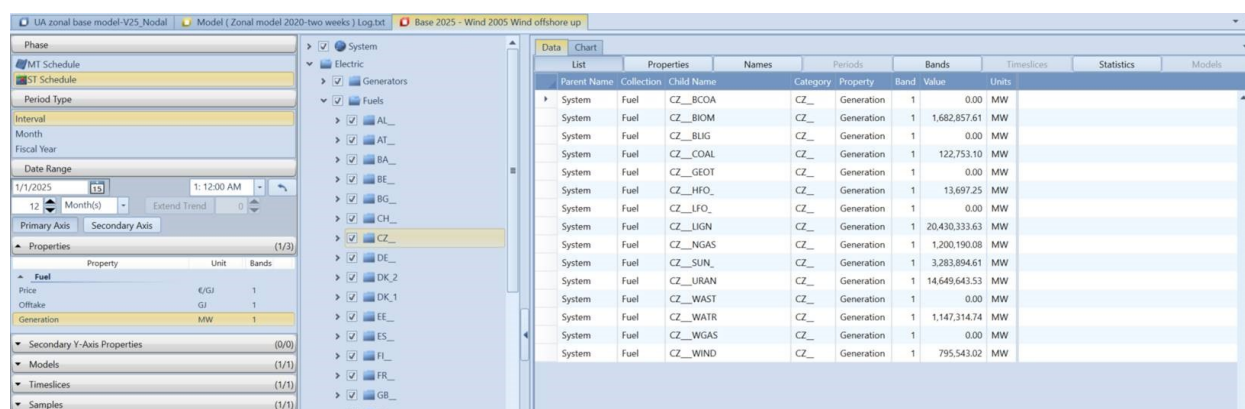


Рисунок 9. Факторы влияния в сценариях развития электроэнергетики, подготовленных National Grid ¹⁸

¹⁸ National Grid.

5 Интерпретация и оценка результатов

Моделирование рынка позволяет получить данные по множеству различных аспектов. Обычно, не все данные нужны для решения задач конкретного анализа, поэтому необходимо определить и отобрать нужные результаты. Результаты моделирования рынка можно наглядно отобразить в различных временных масштабах с помощью интерфейса программы моделирования. Конкретные выходные данные группируются и суммируются путем выполнения запросов, направленных через интерфейс. Наглядный пример дан на Рисунок 10, где показан интерфейс передачи данных PLEXOS, с помощью которого осуществляется доступ к результатам и их агрегирование. Затем отображаемые результаты можно извлечь или скопировать в файлы Excel.



Parent Name	Collection	Child Name	Category	Property	Band	Value	Units
System	Fuel	CZ_BCOA	CZ_	Generation	1	0.00	MW
System	Fuel	CZ_BIOM	CZ_	Generation	1	1,682,857.61	MW
System	Fuel	CZ_BLUG	CZ_	Generation	1	0.00	MW
System	Fuel	CZ_COAL	CZ_	Generation	1	122,753.10	MW
System	Fuel	CZ_GEOT	CZ_	Generation	1	0.00	MW
System	Fuel	CZ_HFO_	CZ_	Generation	1	13,697.25	MW
System	Fuel	CZ_LFO_	CZ_	Generation	1	0.00	MW
System	Fuel	CZ_LIGN	CZ_	Generation	1	20,430,333.63	MW
System	Fuel	CZ_NGAS	CZ_	Generation	1	1,200,190.08	MW
System	Fuel	CZ_SUN_	CZ_	Generation	1	3,283,894.61	MW
System	Fuel	CZ_URAN	CZ_	Generation	1	14,649,643.53	MW
System	Fuel	CZ_WAST	CZ_	Generation	1	0.00	MW
System	Fuel	CZ_WATR	CZ_	Generation	1	1,147,314.74	MW
System	Fuel	CZ_WGAS	CZ_	Generation	1	0.00	MW
System	Fuel	CZ_WIND	CZ_	Generation	1	795,543.02	MW

Рисунок 10. Пример результатов, полученных с помощью модели в PLEXOS

Источник: анализ DNV GL

Кроме того, большинство инструментов моделирования рынка позволяют получить наглядное представление результатов через интерфейс. На Рисунок 11 показано построение программным средством моделирования Antares графика, визуально отображающего недопоставленную электроэнергию; это пример графического представления результатов, полученных с помощью моделирования.

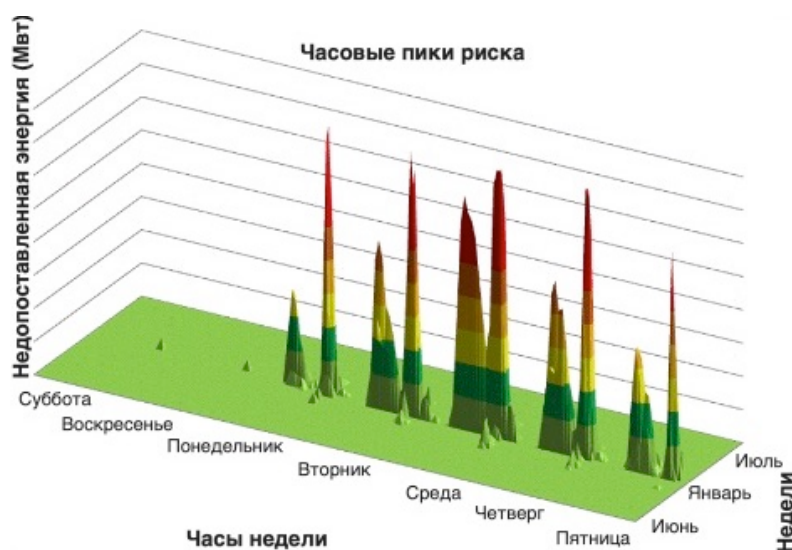


Рисунок 11. Пример трехмерного графика недоставленной энергии в программе Antares ¹⁹

Как обсуждалось в предыдущих главах, результаты моделирования рынка в значительной степени зависят от типа проведенного анализа, а также от выбранного инструмента моделирования. Некоторые из наиболее распространенных типов выходных данных показаны в Таблица 5.

Таблица 5. Типовые результаты построения имитационных моделей рынка

Инвестиционное планирование	Долгосрочное оперативное планирование	Краткосрочное оперативное планирование
• Новые производственные мощности (когда, где, какой тип/мощность) • Дата выхода из эксплуатации действующих электростанций • Перевооружение действующих генераторных блоков • Генерация и балансовая надежность энергосистемы • Капитальные затраты • Ожидаемая вероятность потери нагрузки	• Долгосрочный график работы гидроэлектростанций (гидроэнергетические ограничения) • Долгосрочный график топливных ограничений традиционном производстве электроэнергии • График технического обслуживания	• Производственные обязательства и экономичное распределение нагрузки • Расход топлива • Сокращение вынужденных потерь ВИЭ • Распределение резервов • Межгосударственный обмен электроэнергией • Затраты на производство электроэнергии • Резервные затраты • Коэффициенты мощности отдельных генераторов и электростанций • Сброс нагрузки

Источник: DNV GL

¹⁹ Rte, "Antares - Probabilistic Tool for Electric Systems. A New Tool for Adequacy Reports and Economic Simulations" (Rte, 2020).

Не все эти результаты нужны органам регулирования. С другой стороны, органам регулирования могут быть интересны дополнительные показатели, которые рассчитываются не всеми инструментами моделирования рынка. В таких случаях результаты должны проходить дополнительную обработку. Для органов регулирования наиболее важными являются результаты, перечисленные ниже.

- **Закономерности и характеристики распределения нагрузки.** Эти данные включают информацию о схемах диспетчеризации на уровне отдельных предприятий, а также на агрегированном уровне. Позволяют получить представление о структуре потребления электроэнергии, структуре производственных затрат и потреблении топлива на моделируемом рынке.
- **Коммерческий обмен электроэнергией между различными рыночными зонами.** Эти данные позволяют получить представление о влиянии взаимосвязанной инфраструктуры на коммерческий обмен электроэнергией между странами.
- **Уровень цен и затраты.** Эти данные дают возможность прогнозировать изменение уровней оптовых цен и цен на вспомогательные услуги. Более детальный анализ позволяет получить информацию о роли отдельных (генерирующих) мощностей в установлении цен.
- **Надежность системы.** Оценка надежности системы с использованием как детерминированных исходных показателей, так и вероятностных методов.
- **Общественное благосостояние и рента за перегруженность.** Результаты моделирования рынка можно проанализировать применительно к общественному благосостоянию, которое включает излишки производителя, излишки потребителя и ренту за перегруженность (см. Вставка I).
- **Маржа и рентабельность.** Моделирование рынка позволяет оценить маржу и рентабельность отдельных генерирующих блоков.
- **Концентрация рынка.** Рыночное моделирование позволяет прогнозировать потенциальную динамику концентрации рынка при различных сценариях будущей рыночной интеграции.
- **Внешние факторы окружающей среды.** Эти данные включают косвенные последствия для населения, например, последствия, связанные с выбросами парниковых газов.
- **Влияние на импорт топлива.** Влияние взаимосвязи рынков и других факторов на импорт топлива можно оценить с помощью методов рыночного моделирования.
- **Гибкость и интеграция ВИЭ.** Моделирование рынка позволяет оценить потребность электроэнергетической системы в резервных мощностях и дополнительной маневренности в будущем.
- **Стоимость передиспетчеризации.** Объединив несколько последовательных прогонов рыночного моделирования, можно рассчитать приростные издержки на передиспетчеризацию, которая потребуется для устранения перегруженности на зональных рынках.

Вставка I. Показатели общественного благосостояния по результатам моделирования рынка стран Юго-Восточной Европы

Цель проекта «Оценка последствий интеграции регионального рынка электроэнергии в Юго-Восточной Европе»²⁰ заключалась в анализе и количественной оценке последствий интеграции рынка электроэнергии в указанном регионе. В этой связи, для анализа и количественной оценки влияния различных уровней рыночной интеграции на период до 2025 г. применялась модель регионального рынка электроэнергии (с использованием программного инструмента Antares).

В рамках проекта было проанализировано, как различная степень объединения рынков повлияет на общественное благосостояние (частичное объединение, полное объединение). Как показывает Таблица 6, полное объединение рынков увеличит общественное благосостояние на 37 млн. евро по сравнению с 26 млн. евро при частичном объединении. Тем не менее несмотря на то, что регион в целом выигрывает от объединения рынков, указанные преимущества распределяются неравномерно. В некоторых странах наблюдается даже снижение уровня общественного благосостояния, что подчеркивает необходимость решения проблемы, связанной с неравномерным распределением преимуществ при рыночной интеграции.

Таблица 6. Влияние рыночной интеграции на общественное благосостояние в Юго-Восточной Европе²¹

Рынок	Частичное объединение рынков - Раздельные рынки				Полное объединение - Раздельные рынки			
Млн. евро	Δ Излишки производ.	Δ Излишки потребит.	Δ Рента за перегрузку	Общие излишки	Δ Излишки производ.	Δ Излишки потребит.	Δ Рента за перегрузку	Общие излишки
Албания	8.02	-4.52	-1.41	2.08	6.01	2.04	-4.37	3.68
Босн-Герц	30.06	-19.58	-3.24	7.24	17.08	-11.82	-0.08	5.18
Болгария	48.50	-32.13	-22.40	-6.03	102.05	-67.24	-44.08	-9.28
Греция	-182.28	244.03	-44.69	17.05	-238.53	324.82	-56.46	29.83
Венгрия	-10.56	10.41	-5.27	-5.42	-10.44	4.36	4.59	-1.49
Монтен.	7.88	-5.18	-3.06	-0.37	3.50	-2.69	-3.52	-2.71
Макед.	12.01	-13.09	-0.19	-1.27	0.55	2.14	-7.87	-5.18
Румыния	56.84	-50.40	-4.42	2.03	137.20	-120.37	-12.36	4.48
Сербия	60.13	-56.21	-1.38	2.54	46.89	-41.57	-5.10	0.22
Словения	-8.48	8.71	5.63	5.86	-12.48	12.83	14.09	14.44
Косово	4.86	-2.84	0.50	2.53	-0.10	1.71	-3.76	-2.14
ВСЕГО ЮВЕ	26.97	79.19	-79.94	26.23	51.72	104.22	-118.92	37.02

²⁰ USAID. 2019, «Оценка последствий интеграции регионального рынка электроэнергии в Юго-Восточной Европе», 25.11.2019

²¹ Там же.

6 Роль органа регулирования

Роль, которую играет орган регулирования в процессе моделирования, может быть различной в зависимости от страны. В этой главе перечислены возможные функции, которые орган регулирования может принять на себя в ходе подготовки и выполнения моделирования.

6.1 Подготовка процесса моделирования

Основная функция органа регулирования при подготовке к моделированию заключается в создании нормативной базы, которая облегчает и стандартизирует сбор и обмен данными между соответствующими заинтересованными сторонами, а также сам процесс моделирования рынка. Стандартизация гарантирует, что все организации (например, оператор передающих систем) имеют доступ к необходимым для их работы данным. Существует ряд задач, которые орган регулирования решает в ходе стандартизации:

- *Содействие взаимным контактам и участию заинтересованных сторон.* Необходимо следить за тем, чтобы правила сбора, подготовки и обмена данными соблюдались всеми заинтересованными сторонами. К ним относятся генерирующие компании, потребители, операторы энергосетей, системные операторы, а также операторы других аналогичных объектов энергосети, таких как компании-вставки и компании-хранилища.
- *Профильные данные.* Следует четко определить, какие заинтересованные стороны отвечают за сбор конкретных категорий данных и их обмен. Например, оператор энергоблока должен предоставлять системному оператору информацию о технических характеристиках и мощности энергоблока. Цель состоит в том, чтобы официально уполномоченная организация, осуществляющая моделирование, имела доступ ко всем необходимым данным.
- *Стандартизация инструментов и шаблонов.* Для облегчения стандартизированного обмена данными между участниками рынка и оператором передающих систем, орган регулирования должен разработать правила, касающиеся инструментов и шаблонов, которые будут использоваться для мониторинга, сбора и обмена данными.
- *Описание процесса.* Следует дать описание всего процесса моделирования. Это включает построение календарного плана с указанием сроков выполнения задач всеми задействованными сторонами. Кроме того, необходимо стандартизировать процесс утверждения, обсуждения и анализа ключевых допущений. При необходимости следует разработать процесс утверждения ключевых допущений, входных данных и результатов моделирования.
- *Координация между операторами передающих и распределительных сетей.* По мере растущего распространения переменных ВИЭ, все большее значение приобретает необходимость обеспечить полноценную координацию процессов планирования на уровне передачи и распределения электроэнергии, включая: сбор данных, разработку сценариев и допущений, а также анализ результатов моделирования. Национальный орган регулирования должен инициировать этот процесс и контролировать его выполнение.

Следует отметить, что стандартизация процессов обмена данными не всегда выполняется органом регулирования; в некоторых странах, например, в Великобритании, ведущую роль в

этом процессе берет на себя оператор передающих сетей. Однако функция органа регулирования состоит в том, чтобы обеспечить соответствие всех участников рынка действующим нормативным актам и сетевым кодексам.

6.2 Процесс моделирования рынка

Роль органов регулирования в процессе моделирования рынка может быть различной. В некоторых странах орган регулирования контролирует, анализирует, инструктирует и утверждает различные этапы этого процесса, в то время как в других странах его участие минимально. Виды деятельности, посредством которых орган регулирования принимает участие в процессе моделирования, включают:

- установление стандартов принятых допущений и сценариев;
- согласование или утверждение допущений или сценариев до начала моделирования (с консультациями или без консультаций с другими заинтересованными сторонами); при этом иногда орган регулирования имеет право предлагать или настоятельно рекомендовать дополнительные сценарии или изменения в допущениях и получать дополнительную информацию, причем если в сценарии внесены изменения, сроки их согласования с заинтересованными сторонами могут быть продлены;
- согласование или утверждение предварительных результатов (с консультацией или без консультации с другими заинтересованными сторонами); при этом иногда орган регулирования имеет право предлагать или настоятельно рекомендовать дополнительные сценарии или изменения в допущениях и получать дополнительную информацию, причем если в сценарии внесены изменения, сроки их согласования с заинтересованными сторонами могут быть продлены;
- согласование или утверждение итоговых результатов (см. Вставка 2).

В разных странах органам регулирования предоставляют разные данные. В одних странах органу регулирования представляют только отчет, в других предоставляют отчет и некоторую дополнительную информации в приложениях, а в отдельных странах орган регулирования имеет право получать всю информацию и результаты.

Вставка 2. Участие ACER в разработке ENTSO-E TYNDP²²

На Рисунок 12 показан график разработки Десятилетнего плана развития сети (TYNDP) Европейской сетью операторов передающих систем (ENTSO-E). Почти вся деятельность находится в исключительном ведении оператора. По крайней мере формально, Агентство по сотрудничеству органов регулирования энергетики (ACER) привлекается к участию лишь на поздней стадии, то есть, когда окончательный проект TYNDP представляется Европейской сетью операторов передающих систем (ENTSO-E) ACER для получения отзыва (см. строку, выделенную зеленым цветом).

2019	Октябрь-ноябрь	Период подачи проектов по передаче и хранению электроэнергии в программу «Десятилетний план развития сети - 2020».
	Ноябрь-январь	Открытие проектов сценариев для консультаций.
2020	Май	Публикация финального отчета о сценариях на 2020 г.
	Июль	Публикация проекта доклада «Определение системных потребностей на 2040 г.»
	Июль	Публикация проекта доклада «Региональные инвестиционные планы».
	Июль-август	Период подачи будущих проектов удовлетворения системных потребностей.
	Октябрь	Открытие проекта «Десятилетнего плана развития сети – 2020» для консультаций.
2021	Январь	Подача проекта «Десятилетнего плана развития сети – 2020» в Агентство по сотрудничеству органов регулирования энергетики (ACER) для согласования.
	Март	Публикация итогового пакета «Десятилетнего плана развития сети – 2020».

Рисунок 12. График разработки «Десятилетнего плана развития сети – 2020».

6.3 Использование результатов моделирования рынка в практической работе органов регулирования

Органы регулирования используют моделирование рынка в нескольких целях, как на национальном, так и на региональном уровне. Как рассказывалось в введениях к главам 1 и 2, возможные пути использования и дальнейший анализ могут быть связаны либо с инвестиционными мерами, либо с решением других технических задач, например, с задачей системной интеграции возобновляемых источников энергии. Аналогичным образом, органы регулирования используют рыночное моделирование для изучения возможных изменений в структуре рынка, включая, например, оптовые или балансирующие механизмы национальных

²² ENTSO-E, “TYNDP - Planning the Future Grid,” TYNDP, 2020, <https://tyndp.entsoe.eu/>.

рынков, рыночную интеграцию возобновляемых источников энергии или региональную интеграцию с другими странами, например, объединение рынков.

Одним из ярких примеров является использование результатов моделирования рынка для анализа эффективности планируемых капиталовложений. Как поясняется на примере Вставка 3, необходимую информацию обычно получают путем построения имитационных моделей рынка, то есть, путем расчета и сравнения соответствующих показателей в условиях выполнения проекта соединения энергосистем и в условиях его невыполнения. Как показано в приведенном выше примере Вставка 1, аналогичные модели также используются для оценки мер рыночной интеграции, таких как объединение рынков. Хотя последний тип анализа может потребовать несколько иной конфигурации модели, основной подход и ключевые показатели в целом сопоставимы.

На практике очень немногие органы регулирования сами занимаются моделированием рынка, хотя и используют некоторые результаты для внутреннего анализа. Тем не менее, чтобы обеспечить обоснованное согласование и оценку результатов моделирования, соответствующие служащие органа регулирования должны иметь представление об основных принципах, факторах влияния и функционировании имитационных моделей рынка, их ограничениях и используемых подходах. Эти требования к персоналу органа регулирования отвечают основным целям настоящего документа, поэтому для получения дополнительной информации рекомендуем обращаться к соответствующим главам.

Вставка 3. Использование моделирования в анализе экономической эффективности проектов межсистемных соединений

Часто результаты рыночного моделирования используются для анализа экономической эффективности новых инвестиционных проектов. Проведение анализа экономической эффективности официально предусмотрено при оценке проектов в рамках европейского «Десятилетнего плана развития сети», новых межсистемных ЛЭП и, во многих странах, крупных инвестиций общегосударственного масштаба.

Стандартная методика, разработанная ENTSO-E, основана на анализе различных показателей; см. Рисунок 13. Помимо прочего, анализ экономической эффективности должен учитывать изменения в общественном благосостоянии, которые связаны с предложенным проектом. Этот показатель определяется как «способность энергосистемы уменьшить перегрузку и тем самым обеспечить необходимую пропускную способность электросетей, что позволяет вести экономически эффективную торговлю электричеством на рынках электроэнергии»²³. В проектах объединения энергосистем общественное благосостояние часто определяется на базе изменения «сальдо производства» (доход от производства электроэнергии минус затраты на него), «сальдо потребления» (общая экономия на потреблении по оптовым рыночным ценам) и ренты за перегруженность. Соответствующие значения можно получить путем моделирования рынка либо стандартного, либо, в некоторых случаях, на основе обработки полученных фактических данных.

Моделирование может дать представление и о других показателях, например, надежность поставок (снижение нагрузки), интеграция ВИЭ (сокращение потерь ВЭ) и колебания в выбросах углекислого газа.

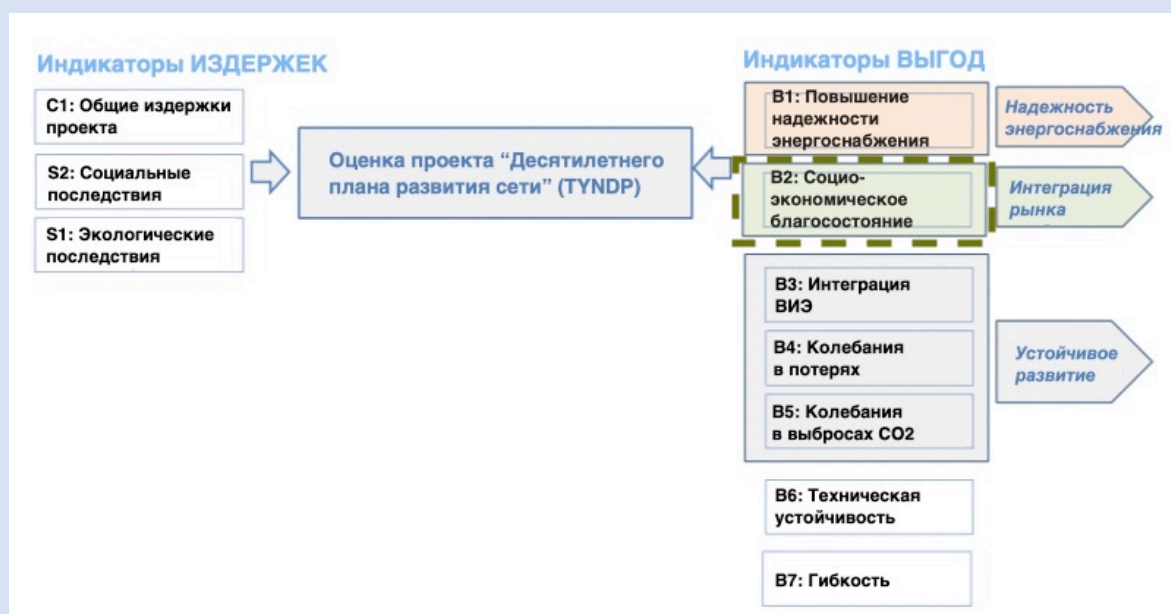


Рисунок 13. Показатели эффективности капиталовложений по методике ENTSO-E ²⁴

²³ ACER, «Методика проведения анализа эффективности для оценки инфраструктуры передающих электросетей и сценариев планирования энергетики и энергосистем» (на англ. языке), 2016 г., <https://www.acer.europa.eu/Events/ACER-workshop-on-scenarios-and-cost-benefit-analysis-methodology-for-assessing-cross-border-infrastructure-projects/Documents/Final%20Report%20-%20CBA%20and%20scenarios.pdf>

²⁴ Там же.

7 Заключение

В настоящем справочнике дан обзор использования имитационных моделей рынка применительно к нормативно-правовому регулированию в сфере энергетики. Моделирование рынка используется в самых различных целях от планирования расширения мощностей, прогнозирования текущих и будущих рыночных цен, межграничных перетоков электроэнергии, производства и сокращения потерь ВИЭ и сокращения производственных затрат – до оценки влияния различных изменений на структуру рынка.

В большинстве стран органы регулирования не занимаются моделированием рынка самостоятельно, но полагаются на системных или сетевых операторов, которые выполняют эту работу, либо заказывают проведение конкретного анализа у поставщиков специализированных услуг. В любом случае органы регулирования энергетики, должны иметь представление об основных принципах моделирования и роли входных данных, а также об оптимальных инструментах, методах интерпретации и дальнейшем использовании результатов моделирования. Точно так же очевидно, что органам регулирования следует иметь общее представление о ключевых особенностях, возможностях и ограничениях различных методов и инструментов моделирования, которые, как правило, основаны на линейном программировании, эвристическом подходе и стохастической оптимизации.

Помимо используемого инструмента моделирования и конфигурации модели, результаты моделирования в первую очередь зависят от принятых исходных допущений и конкретных масштабов анализа. По этой причине органы регулирования энергетики должны обращать внимание на то, как определены сценарии и исходные допущения, а также на источники получения входных данных и процесс их сбора у заинтересованных сторон там, где это предусмотрено. В частности, это относится к структуре производства электроэнергии, потреблению и нагрузке, часовым профилям нагрузки и переменной генерации на ВЭ, ценам на сырье и многим другим факторам. Следовательно, органу регулирования необходимо иметь хотя бы общее представление о важнейших категориях входных данных и их (обычном) влиянии на различные типы результатов рыночного моделирования.

Так же, органы регулирования должны понимать значение типовых результатов и уметь их интерпретировать. Как было указано выше, моделирование рынка позволяет получить широкий ряд выходных данных, причем факторы, актуальные для проведения анализа расширения производственных мощностей будут отличаться от тех факторов, которые необходимы для детальной краткосрочной оценки. Наконец, некоторые показатели потребуют проведения дополнительного анализа для получения данных, необходимых для определенных видов нормативного анализа и оценок.

В каждом конкретном случае роль органов регулирования может быть весьма разнообразной, в зависимости от масштабов их участия и уровня ответственности. В случае, если моделирование рынка осуществляется поднадзорными организациями, такими как сетевые операторы или операторы передающих систем, органы регулирования должны обратить особое внимание на три перечисленных ниже аспекта.

- **Подготовка процесса моделирования** с целью формирования основы, позволяющей облегчить и систематизировать сбор и обмен данными между заинтересованными сторонами, а также сам процесс моделирования рынка.

- При **моделировании рынка** роль органа регулирования в основном состоит в мониторинге этого процесса, анализе и согласовании ключевых входных данных, сценариев и (предварительных) результатов, а также в обеспечении необходимого участия заинтересованных сторон. Органам регулирования занять активную позицию в этих вопросах и проявлять готовность к сотрудничеству, вступая в процесс на ранней стадии, включая разработку сценариев.
- **Использование результатов моделирования рынка в практике регулирования**, связанной с инвестициями, технически-ориентированными оценками, либо с изучением возможных изменений в структуре рынка. В подобных случаях моделирование рынка используется в целях получения ключевых входных данных для последующего анализа эффективности капиталовложений.

8 Приложение

8.1 Наглядный пример инструментов моделирования рынка

8.1.1 Antares (новый инструмент отчетности о балансовой надежности электроэнергетических систем)

Программный пакет Antares — новый инструмент отчетности о балансовой надежности электроэнергетических систем — разработан французским оператором передающих систем RTE для собственных нужд²⁵, и позднее бесплатно предоставлен другим операторам передающих систем и прочим организациям²⁶. С тех пор программа Antares используется рядом операторов передающих систем, органами регулирования, учеными и консультантами в основном в целях технической оценки или оценки последствий планируемой политики.

Как следует из названия, программа Antares изначально разрабатывалась с целью оценки достаточности ресурсов. Со временем программа была доработана для моделирования краткосрочной работы рынков электроэнергии, главным образом, в качестве инструмента анализа планируемого расширения передающих сетей. Тем не менее, Antares в настоящее время не включает модулей, позволяющих разрабатывать наиболее экономичные подходы к наращиванию производства электроэнергии (генерации) и, по большому счету, мало подходит для краткосрочного и среднесрочного прогнозирования рыночных цен.

В настоящее время с помощью Antares выполняется оценка экономичной диспетчеризации на основе смешанного целочисленного линейного программирования (MILP), которая направлена на максимальное снижение общей стоимости при равновесии спроса и предложения с учетом определенных ограничений. Для этой цели программа конструирует ряд возможных операционных ситуаций, воспроизводящих различные события, которые могут произойти в течение одного года эксплуатации системы (например, доступность традиционной генерации; климатические и погодные явления, влияющие на нагрузку; ветровая и солнечная генерация; переменные дожди, влияющие на гидрогенерацию и т. д.).

Как показано на Рисунке 14, Antares строится на последовательном моделировании методом Монте-Карло (MC) с целью имитации экономичной работы энергосистемы. В этом смысле каждый MC-год строится на последовательности еженедельных оптимизаций подзадач. Модель рассчитывает рабочие параметры для всей системы (оптимальное еженедельное планирование пусков и остановок энергоблоков и графики работы тепловых ГЭС) с использованием определенных допущений (затраты на электростанцию, нагрузка, доступность и т. д.)²⁷.

²⁵ RTE предвидит перестройку электроэнергетики Европы и Франции с помощью Antares. RTE опубликован последний среднесрочный прогноз надежности на пятилетний период в условиях развития электроэнергетических систем с учетом увеличения удельной доли ВИЭ, теплового парка и ввода в эксплуатацию новых межсистемных ЛЭП.

²⁶ Программный пакет Antares-Simulator можно скачать бесплатно, установить на любой локальный компьютер или сервер и использовать без каких-либо ограничений.

²⁷ Antares позволяет по-разному формулировать проблемы оптимизации, предлагая ряд компромиссных решений, касающихся времени и сложности вычислений. Упрощенные версии энергосистемы могут просчитываться за очень короткое время.



Рисунок 14. Рабочий процесс модели Antares²⁸

8.1.2 PLEXOS – программный пакет для моделирования рынка

PLEXOS Integrated Energy – программный пакет, разработанный компанией Energy Exemplar (ранее Drayton Analytics) и первоначально предназначавшийся для моделирования рынка и оптимизации производства электроэнергии ТЭЦ. Сегодня PLEXOS превратился в один из наиболее распространенных пакетов моделирования рынка. В Европе он используется ENTSO-E, растущим числом операторов передающих систем, многими генерирующими предприятиями, коммунальными службами и трейдерами электроэнергии, а также инвесторами, органами регулирования, консультантами и учебными заведениями.

PLEXOS основан на концепции линейного программирования и поддерживает смешанную целочисленную оптимизацию (MILP). Он позволяет моделировать рынок электроэнергии и работу передающих энергосетей, включая анализ надежности нагрузки и передиспетчеризации и используя при этом узловое представление энергосистемы. Этот программный пакет обычно используется для анализа рынка, а также, планирования расширения производственных мощностей и портфельной оптимизации²⁹. Кроме того, PLEXOS постепенно расширяется и теперь включает в себя элементы стохастической гидрооптимизации и связи с теплоснабжающими и газовыми сетями.

8.1.3 Стохастическое двойное динамическое программирование

Стохастическое двойное динамическое программирование (SDDP), в отличие от предыдущих инструментов, представляет собой вероятностный многозональный инструмент оптимизации затрат на гидротермальное производство (диспетчеризация), разработанный в конце 1980-х годов бразильской компанией Power System Research (PSR). Он был специально разработан для оптимизации работы гидроаккумуляторов в среднесрочной перспективе в условиях стохастической неопределенности и ориентирован на определение так называемых «водяных значений», хотя также имеет (менее сложные) модули для оптимизации краткосрочной работы смешанных гидротермальных систем. Этот инструмент применяется более чем в 40 странах для оптимизации использования гидроресурсов (например, в Южной и Центральной Америке, США и Канаде, Австрии, Испании, Норвегии, Балканском регионе, Новой Зеландии и Китае). Обычными пользователями являются консультанты, генерирующие компании, сетевые операторы, органы регулирования и государственные организации по планированию в целях

²⁸ Antares Simulator, “Shedding Light on the Future of the Energy System,” 2020, <https://antares-simulator.org/>.

²⁹ Energy Exemplar, “Energy Exemplar - The Market Leader in Energy Simulation Software.”

проведения краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной оценки эксплуатационных характеристик энергосистем.

Моделирование системы, в которой преобладают гидроэлектростанции, представляет очень сложную задачу из-за неопределенности, связанной с притоком воды. Основная характерная особенность гидроэлектростанций состоит в том, что оператор может выбирать между использованием накопленной гидроэнергии сегодня (снижая непосредственные затраты на генерацию) или хранением гидроэнергии для использования в будущем. В ситуации, когда оператор решает использовать гидроэнергию сегодня, а будущий приток воды прогнозируется на высоком уровне (что позволяет повысить уровень водохранилищ), общая работа системы оптимизируется. Однако в случае будущей засухи стоимость тепловой генерации увеличится для покрытия дефицита гидроэнергии (неоптимальная работа системы). Таким образом, решение о хранении или использовании имеющихся гидроресурсов базируется на анализе последствий каждого из решений, основанных на будущих ценовых сценариях³⁰.

Построение детальных моделей режимов работы гидроэлектростанций представляет собой сложную проблему, которую нелегко решить в рамках линейного программирования (LP). Планирование режимов работы гидротермальных систем основано на методике сброса воды в течение планового периода, что сводит к минимуму эксплуатационные расходы (включая затраты на необслуживаемую энергию) на удовлетворение спроса в течение этого периода³¹. Методика сброса воды решает проблему поэтапной оптимизации, сводя к минимум текущие затраты на тепловую генерацию плюс ожидаемые будущие затраты на удовлетворение спроса. SDDP вычисляет наименее затратную стохастическую операционную методику гидротермальной системы³², а также несколько экономических индексов, таких как спотовая цена (на субрынок и на сборную шину), плата за транзит электроэнергии и за перегрузку передающих сетей, «водяные значения» (water values) по каждой гидроэлектростанции, предельные затраты на ограничение топлива и другие³³.

8.2 Типы входных данных

8.2.1 Основная структура рынка и энергосетей

В международной практике используются различные концепции учета сетевых ограничений. Как показано в Таблица 7, это в первую очередь связано с различием между зональным и

³⁰ PSR, “Software | PSR – Energy Consulting and Analytics,” Software | PSR – Energy Consulting and Analytics (PSR, 2020), <https://www.psr-inc.com/software-en/>.

³¹ Например, методика сброса воды для одного резервуара может задаваться ожидаемым предельным значением воды, измеряемым в евро/м³. Это определяется для каждого возможного уровня водохранилища и представляет собой альтернативные издержки сброса одной единицы воды. Методика оптимального сброса воды практикуется всеми тепловыми энергоблоками, которые не дороже (в евро/МВтч), чем ожидаемая предельная стоимость воды, умноженная на коэффициент пересчета (м³ на МВтч).

³² Методология, традиционно используемая для решения этой диспетчерской задачи, известна как стохастическое динамическое программирование (SDP). Однако SDP сталкивается с вычислительной проблемой при расчете систем с большим количеством гидроэлектростанций. Модель SDDP применяет новую методологию решения, представляя функцию будущих затрат традиционного SDP в виде кусочно-линейной функции. Двойное динамическое программирование позволяет вычислять методику сброса воды для нескольких различных водохранилищ с разным географическим положением, процессами притока и речными системами (многоколлекторный гидроэнергетический комплекс).

³³ Lohmann, Hering, and Rebennack, “Spatio-Temporal Hydro Forecasting of Multireservoir Inflows for Hydro-Thermal Scheduling.”

узловым ценообразованием и, в последнем случае, между использованием двусторонней чистой пропускной способности (NTC) и так называемым «потокowym» подходом в так называемых «странах центра» региона Центральной и Восточной Европы. В последнем случае ситуация еще более усложняется, поскольку в этих странах используются различные подходы к форвардной торговле (NTC) и торговле с суточным опережением в объединенных рынках («потокowy подход»). Как показывает европейская практика, рынок электроэнергии также может быть разделен на дополнительные зоны торгов, причем каждая такая зона соответствует отдельному рынку со своей собственной зональной ценой.

На многих зональных рынках электроэнергии ограничения на перетоки электроэнергии между странами учитываются на базе NTC, что на практике соответствует двум простым ограничениям для коммерческих межгосударственных обменов на каждой границе (т. е. по одному в каждом направлении).

В отличие от этого, «потокowy подход» требует наличия множества дополнительных входных данных³⁴, что может привести к появлению нескольких десятков или даже сотен дополнительных ограничений, которые необходимо учесть. Более того, большинство этих параметров могут изменяться в зависимости от ситуации на преобладающем рынке и (или) ситуации с диспетчеризацией, что обычно требует итеративного подхода, включая комплексный сетевой анализ.

Наконец, узловые рынки требуют детализированного представления электросети, включая узлы, ответвления (например, линии электропередачи и трансформаторы), а также состояния коммутации и технических параметров (например, импеданс, номинальные значения) последних. Требуются такие же данные, как и при детальном анализе электросети.

Таблица 7. Типовые рыночные модели с учетом ограничений электропередачи

Базовый подход	Учет ограничений передающих сетей	Зона торгов	Пример
Зональное ценообразование	Чистая пропускная способность (NTC)	Уровень страны	Испания, Португалия, Финляндия
		Внутригосударственный уровень	Дания, Италия, Норвегия, Швеция
	Потоковое распределение пропускной способности	Уровень страны ³⁵	Ключевой регион (Центральная и Восточная Европа)
Узловое ценообразование	Детальная модель электросети (DC или AC): локальное предельное ценообразование	Н/Д	США, Новая Зеландия, Россия, Сингапур

Источник: DNV GL

Эти проблемы указывают на ряд факторов, которые необходимо учитывать при моделировании рынка.

³⁴ Amprion et al., “Documentation of the CWE FB MC Solution As Basis for the Formal Approval-Request” (Brussels, September 5, 2014), https://www.acm.nl/sites/default/files/old_publication/bijlagen/I3001_I40530-cwe-fb-mc-formal-approval-request.pdf.

³⁵ В принципе, потокowy подход может применяться в равной степени и к внутригосударственным зонам торгов.

- В идеале, конфигурация модели должна отражать существующие условия, то есть, если на практике используется потоковая или узловая модель, их следует предпочесть и при конфигурации модели.
- Сложность и требования к данным при использовании как узловых, так и потоковых моделей значительно выше, чем у простых транспортных моделей, основанных на НТС. Кроме того, а в первую очередь с точки зрения потокового распределения пропускной способности, исходные расчеты требуют от пользователей принятия большого числа допущений, многие из которых, в конечном счете, носят произвольный характер. Такие допущения способны внести значительную степень неопределенности, особенно, если они относятся к будущему, для которого характерны изменения в электросети, генерации, а также в структуре рынка и рыночных условиях, тем самым сводя на нет более высокую «точность» детального подхода.
- Таким образом, как в Европе, так и, в меньшей степени, в США обычной практикой является использование упрощенных подходов к перспективному анализу, например, опираясь на моделирование на основе НТС и (или) используя упрощенную модель электросети, состоящую из нескольких зон меньшего размера. Следует отметить, что упрощение подхода к моделированию существенно влияет на результаты моделирования, что следует учитывать при принятии решений на основе таких результатов.

8.2.2 Нагрузка

Текущее и будущее развитие и структура нагрузки – один из ключевых исходных параметров, поскольку именно он непосредственно определяет потребности в производстве электроэнергии. Различные типы анализа, представленные в главе 2, различают, в соответствии со своими целями, между следующими факторами:

- потребление,
- максимальная нагрузка,
- кривые профиля нагрузки и длительности нагрузки,
- регулирование спроса (управление спросом) на электроэнергию со стороны потребителя; а также
- зональное и узловое распределение.

Потребление определяет общий объем производимой электроэнергии и обычно измеряется в ТВтч/год или ГВтч/год. Для моделирования рынка обычно необходимо учитывать валовое годовое потребление, т. е., включающее сетевые потери при передаче и распределении, которые учитываются либо как часть общего потребления, либо как отдельный компонент. Аналогичным образом, потребление производителем электроэнергии для собственных нужд либо включается в потребление, либо относится к генерации.

Пиковая нагрузка, напротив, определяет максимальную нагрузку, которая должна подаваться в любое время в течение текущего года (или аналогичного периода) и обычно измеряется в МВт. Определение и измерение пиковой нагрузки должно быть согласовано с определением и измерением потребления, то есть, с точки зрения учета сетевых потерь и собственного потребления производителя. Этот критерий имеет ключевое значение, особенно для

моделирования рынка и генерации, поскольку является ключевым фактором потребности в твердой мощности, то есть объеме (генерирующей) мощности, который должен надежно поставляться в условиях пиковой нагрузки для обеспечения спроса³⁶. Таким образом, пиковая нагрузка является основным входным параметром (среднесрочной) оценки генерации или адекватности системы, а также долгосрочного планирования генерации.

Однако для большинства типов анализа требуется дополнительная информация о временной структуре или структуре использования электроэнергии. Типичными показателями являются, например, детализированные профили нагрузки и кривые продолжительности нагрузки.

- **Профили нагрузки** определяют (почасовое) изменение нагрузки во времени, то есть, хронологически, и обычно измеряются либо в МВт, либо в виде доли пиковой нагрузки (например, в процентах или в системе относительных единиц). Временная изменчивость нагрузки является ключевым фактором в планировании режима эксплуатации энергоблоков и (почасовой) диспетчеризации, других гибких ресурсов и межгосударственных перетоках электроэнергии. В свою очередь, это оказывает влияние на рабочие режимы и среднее использование различных ресурсов, а в условиях либерализованных рынков – на профиль оптовых цен на электроэнергию. По этим причинам знание профилей нагрузки необходимо для моделирования ежедневных рыночных операций, а также для моделирования производственных затрат.
- **Кривые длительности нагрузки** в основном соответствуют другому представлению профилей нагрузки, то есть, представлению с классификацией уровней нагрузки в порядке убывания (см. Рисунок 15). Хотя кривые продолжительности нагрузки не позволяют определить подробные профили диспетчеризации, они дают информацию о количестве часов или времени, за которое определенный объем должен быть поставлен в систему, то есть, путем генерации, хранения или импорта. Это, в свою очередь, позволяет оценить средний расход ресурсов, используемых для этой цели, тем самым создавая связь между объемом требуемой мощности и ее средним использованием, расходом топлива и переменными затратами. Традиционно, кривые продолжительности нагрузки служат ключевыми вводными данными при анализе расширения генерации и среднесрочном планировании. Использование кривых длительности нагрузки становится все более сложным для взаимосвязанных систем или рынков, а также для систем с высоким уровнем распространения переменных возобновляемых источников энергии.

³⁶ В настоящее время рассматривается вопрос о возможном вкладе импорта электроэнергии или регулирования спроса.

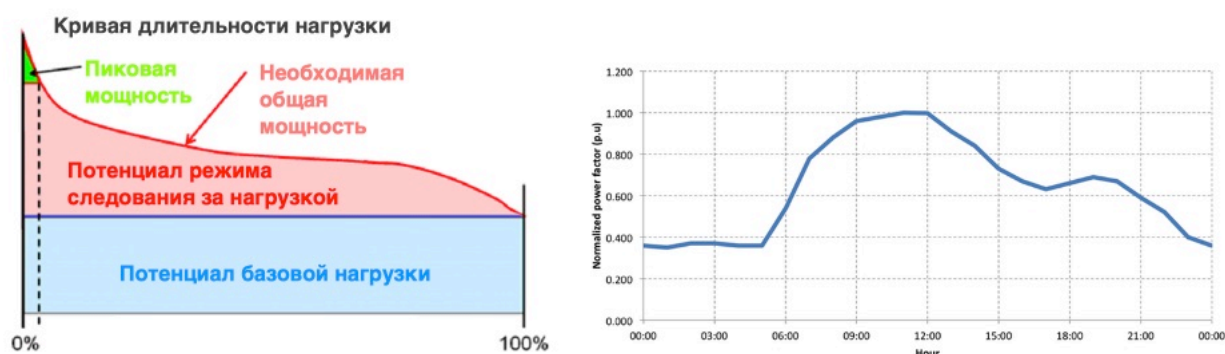


Рисунок 15. Кривая длительности нагрузки (слева³⁷) и хронологический профиль нагрузки (справа³⁸)

Помимо этих ключевых факторов важно учесть потенциальные возможности **регулирования спроса** и(или) краткосрочного **управления спросом со стороны потребителя**, то есть, в качестве критерия временного сокращения, увеличения и(или) временного сдвига спроса в периоды пиковой нагрузки или минимальной остаточной нагрузки (например, вызванной переменными ВИЭ). Поскольку такие возможности обычно ограничены определенными временными периодами, они в первую очередь важны для моделирования ежедневных рыночных и(или) системных операций, хотя могут быть также актуальны для инвестиционного планирования и анализа балансовой надежности системы.

Все данные о нагрузке обычно даются в разрезе зонального или узлового уровня, то есть, в соответствии с общими допущениями относительно основной структуры рынка, как это обсуждалось в 8.2.1 выше. Однако на практике это часто ограничивается потреблением, в то время как один и тот же (национальный) профиль нагрузки может использоваться для нескольких узлов или зон в пределах данной страны.

8.2.3 Генерация, хранение и другие гибкие энергоресурсы

Значительная часть требуемых входных данных связана со техническими характеристиками электростанций и других гибких ресурсов, включая, например, системы хранения энергии со стороны предложения. С точки зрения моделирования, к ним могут относиться различные категории ресурсов со стороны спроса, такие как механизмы регулирования спроса, энергоблоки, электролизеры и другие потребители, которые реагируют на сигналы со стороны рынка и(или) подлежат централизованной диспетчеризации. Помимо данных о действующих агрегатах, для перспективного анализа также требуется информация о выводе из эксплуатации действующих электростанций, вводе в эксплуатацию строящихся или планируемых электростанций и, для планирования расширения производства, информация о потенциальных электростанциях, которые могут участвовать в расширении (электростанции-кандидаты).

³⁷ J Carlsson et al., *Best Practices and Informal Guidance on How to Implement the Comprehensive Assessment at Member State Level* (Luxembourg: Publications Office, 2015).

³⁸ Paolo Lazzeroni et al., "Impact of PV Penetration in a Distribution Grid: A Middle-East Study Case," in *2015 IEEE 1st International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a Better Tomorrow (RTSI)*, 2015, 353–58, <https://doi.org/10.1109/RTSI.2015.7325123>.

Не вдаваясь в подробности, следующий список содержит примерный краткий перечень входных параметров, которые необходимо учесть при построении различных типов имитационных моделей рынка и анализа.

- **Общая информация:** включает название и местонахождение ресурсов, даты вывода из эксплуатации (ввода в эксплуатацию), а также информацию о том, подлежат ли ресурсы рыночной или централизованной диспетчеризации.
- **Технико-экономические характеристики:**
 - используемая технология и тип(ы) топлива, включая информацию о различных типах гидроэлектростанций (например, сток реки, пруд, (насосное) хранилище с естественными потоками или без них), технические или экономические сроки службы;
 - количество блоков, установленная либо максимальная мощность, минимальный стабильный уровень, тепловые расходы/КПД, КПД в оба конца (насос и накопитель), возможности разгона и запуска, минимальное время подъема и спада, емкость хранилища и т.д. (сравните с Рисунком 16);
 - частота и продолжительность плановых мероприятий по техническому обслуживанию, частота и продолжительность вынужденных отключений;
 - постоянные и переменные затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание;
 - капитальные (инвестиционные) затраты, процентные ставки и ставки по годовым облигациям (аннуитеты) для электростанций-кандидатов на участие в расширении генерации.
- **Доступность ресурсов и другие эксплуатационные ограничения:**
 - электростанции на традиционном топливе: ограничения на поставку топлива, контракты на покупку или выплату неустойки и т. д.;
 - гидроэнергетика: объем, временной профиль и изменчивость естественных притоков, гидрологические ограничения (например, для орошения, регулирования уровня воды и т.д.);
 - ВИЭ с переменным характером выработки электроэнергии: временной профиль и изменчивость доступности ресурсов, ошибки прогноза; а также
 - обязательный запуск или другие эксплуатационные ограничения, например, из-за сетевых ограничений, для теплоснабжения (ТЭЦ) и т.д.

Category	Generator	Template	Head Storage	Tail Storage
AT	AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Default_BIOM_GT		
AT	AT_BIOM_ST_GRATKORN MILL 1-2	Default_BIOM_ST		
AT	AT_BIOM_ST_LENZING ENERGY	Default_BIOM_ST		
AT	AT_COAL_ST_DURNROHR 2	Default_COAL_STOLD		
AT	AT_HFO_ST_SCHWECHAT REFINER			

Generator	Property	Value	Data File	Units	Band	D	Di	Ti	Action	Expression	Scenario	M	Category
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Must Report	Yes		Yes/No	1						Bird model - Zonal		AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Random Number Seed	1		-	1								AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Unit Commitment Optimality	Linear		-	1						LMP Run		AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Units	DF_GenLarge_Units		-	1								AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Max Capacity	DF_GenLarge_Max Capacity		MW	1								AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Heat Rate Base	DF_GenLarge_Heat Rate Base		GJ/hr	1								AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Heat Rate Incr	DF_GenLarge_Heat Rate Incr		GJ/MWh	1								AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Heat Rate Incr2	DF_GenLarge_Heat Rate Incr2		GJ/MWh ²	1								AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Start Cost	DF_GenLarge_Start Cost		€	1								AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Fixed Load	DF Fixed Generation		MW	1				x	VAR_NonDispat LF Run - Fix NTC generation			AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Fixed Load Penalty	1		€/MWh	1				x	VAR Fixed_Gen_			AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Commit	DF Units Generating (Commit)		-	1				x	VAR_NonDispat LF Run - Fix NTC generation			AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Commit	DF_GenLarge_Units		-	1						LMP Run		AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Commit	DF_GenLarge_Units		-	1						Redispatch		AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Max Energy Penalty	50000000		€/GWh	1								AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Offer Base	DF_RD_Off_Base		MW	1						Redispatch		AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Offer Quantity	DF_RD_Off_Quantity_1		MW	1						Redispatch		AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Offer Quantity	DF_RD_Off_Quantity_2		MW	2						Redispatch		AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Offer Quantity	DF_RD_Off_Quantity_3		MW	3						Redispatch		AT
AT_BIOM_GT_STEYRERMUHL	Offer Quantity	DF_GenLarge_Max Capacity		MW	4						Redispatch		AT

Рисунок 16. Пример вводных технических данных для электростанции в PLEXOS

Источник: DNV GL

В зависимости от используемого программного обеспечения, пользователи могут выбирать из нескольких сотен параметров. Например, PLEXOS содержит более 250 вводных параметров только для генераторов, даже без учета большого количества других параметров, которые могут использоваться для ввода информации о месте в энергосети, обеспечении топливом, водохранилищах гидроэлектростанций, теплоснабжении, опреснении и т. д.

На практике, однако, требуется лишь малая часть из 250 характеристик, причем значение различных категорий входных данных зависит от объема и целей моделирования. Дополнительные входные данные могут значительно увеличить время вычислений, что подчеркивает необходимость тщательно выстраивать баланс между желаемой «точностью» анализа с одной стороны – и требованиями к входным данным и сложностью модели с другой.

8.2.4 Цены на сырье и стоимость технологий

Некоторые из упомянутых выше параметров, например, стоимость капитала и затраты на эксплуатацию и обслуживание, очевидно, меняются под воздействием общеэкономических факторов и других условий, которые не всегда зависят от данной страны или рынка, либо, как минимум, зависят от них лишь частично. Так, эффективность капитальных затрат зависит от колебаний процентных ставок и обменных курсов, а стоимость эксплуатации и обслуживания – от степени развития местных трудовых ресурсов и других издержек. Аналогичным образом, технический прогресс может оказывать влияние как на капитальные затраты, так и на затраты на эксплуатацию и обслуживание, а также на ряд вышеперечисленных технических параметров. Как правило, вышеперечисленные параметры в первую очередь важны для долгосрочного планирования в контексте расширения производства или интеграции ВИЭ.

Та же логика применима к ценам на топливо и другим сырьевым товарам, например, к ценам на квоты углекислого газа в европейской системе торговли квотами на выбросы парниковых газов (ETS) и другим механизмам взимания штрафов и налогов в других регионах мира. Изменение цен на топливо и т.д. оказывает непосредственное влияние на переменные издержки производства электроэнергии. Кроме того, цены на топливо часто подвержены значительной волатильности и могут даже изменить рейтинг различных технологий, как это

произошло, например, на европейских рынках электроэнергии после финансового кризиса 2008-2009 годов и совсем недавно в результате реформы механизма европейской торговли квотами на выбросы парниковых газов. Таким образом, цены на топливо и сырье являются одним из основных исходных параметров как в долгосрочном планировании, так и в краткосрочном анализе рынка либо производственных издержек, но имеют меньшее значение для анализа балансовой надежности системы.

8.2.5 Целевые показатели и ограничения в области политики, экологии и надежности энергосистем

Долгосрочное планирование в области производства, расширения энергосистем, интеграции возобновляемых источников энергии и проч. должно соответствовать внешним целям и ограничениям, большинство из которых, как правило, устанавливаются директивными, регулирующими и другими органами власти. Типовые примеры включают:

- целевые показатели и ограничения в отношении топлива, технологии или местоположения будущих электростанций, например, как это определено в энергетической стратегии страны или аналогичных обязательных или необязательных планах, соглашениях и других документах национального, внутригосударственного и международного масштаба;
- экологические целевые показатели и ограничения, например, в отношении сокращения выбросов углекислого газа и других парниковых газов, либо доли электроэнергии, вырабатываемой за счет возобновляемых источников энергии и низкоуглеродных технологий; а также
- стандарты безопасности и надежности, например, по допустимому количеству, частоте или продолжительности перерывов в поставках (на системном уровне), в соответствии с требованиями к резервам, ограничениям удельного веса импортируемого топлива (или электроэнергии) и т.д.

Часто необходимо начинать с соответствующих исходных параметров, особенно, для последней категории. Примеры включают стоимость «упущенной нагрузки», то есть, расчетную стоимость, которую потребители были бы готовы оплатить, чтобы избежать перерывов в электроснабжении³⁹, вероятность потери нагрузки, недопоставленную энергию или проч.

Обратите внимание, что типовые показатели надежности электроснабжения на розничном уровне и на уровне распределения, такие как средний индекс длительности перерывов в работе системы (SAIDI), средний индекс частоты нарушений работы системы (SAIFI) и т.д., обычно не учитываются в моделях рынка, поскольку они в первую очередь зависят от структуры и надежности распределительных сетей.

8.2.6 Требования к резервам и системные ограничения

В ряде стран, например, в Италии, Испании, Ирландии, Греции, России и большей части США, централизованные рынки электроэнергии обеспечивают поставки оптовой электроэнергии, а также резервы и иногда другие вспомогательные услуги. В других европейских странах

³⁹ IRENA, “Planning for the Renewable Future: Long-Term Modelling and Tools to Expand Variable Renewable Power in Emerging Economies,” 2017, /publications/2017/Jan/Planning-for-the-renewable-future-Long-term-modelling-and-tools-to-expand-variable-renewable-power.

оптовые рынки электроэнергии в значительной степени отделены от обеспечения резервов и предоставления других вспомогательных услуг. На первый взгляд может показаться, что это позволяет сосредоточиться только на производстве оптовой электроэнергии. Однако на окончательную диспетчеризацию производителей электроэнергии (и других ресурсов) могут влиять исходные технические потребности и требования. Так, электростанции должны либо не отпускать часть произведенной электроэнергии, либо держать в эксплуатации более дорогие агрегаты в качестве условия для предоставления таких услуг. В результате мощности, которые могли бы быть эффективно обслуживать рынок, будут сокращены, а некоторые более дорогие энергоблоки, возможно, придется эксплуатировать в режиме «обязательной генерации».

В результате, чтобы получить достоверные результаты моделирования рынка, часто необходимо учитывать вспомогательные услуги. Это может потребовать введения дополнительных функций и ограничений в модель, чтобы она смогла учесть закупки соответствующих продуктов, например, резервы для сдерживания частоты, резервы для восстановления частоты и резервов для замены. Для этого модели очевидно понадобятся данные о необходимых объемах резервов.

В некоторых странах эксплуатация отдельных электростанций и других производителей электроэнергии на определенных участках сети может быть сопряжена с дополнительными эксплуатационными ограничениями, например, из-за перегруженности «слабых» участков передающей сети или ограниченной маневренности. Таким образом, помимо ограничений, связанных со спецификой электростанций, о чем говорилось в 8.2.3 выше, может также возникнуть необходимость в применении аналогичных ограничений к группам электростанций или ресурсов.

8.3 Сбор и расчет входных данных

Для построения имитационной модели рынка необходимо собрать или рассчитать входные данные по всему спектру параметров, о которых говорилось в главе 3. Эти данные получают из различных источников. В настоящем разделе представлена дополнительная информация о возможных источниках получения входных данных. Кроме того, в этом разделе обсуждаются возможные подходы, которые можно использовать для получения входных данных, если их невозможно взять из существующих источников.

На Рисунок 17 дан обзор типовых источников, которые используются для сбора или расчета входных данных, необходимых для построения имитационных моделей рынка. Источники данных представлены ниже и проиллюстрированы на соответствующих примерах. Кроме того, обсуждается пригодность этих источников для получения различных категорий входных данных.

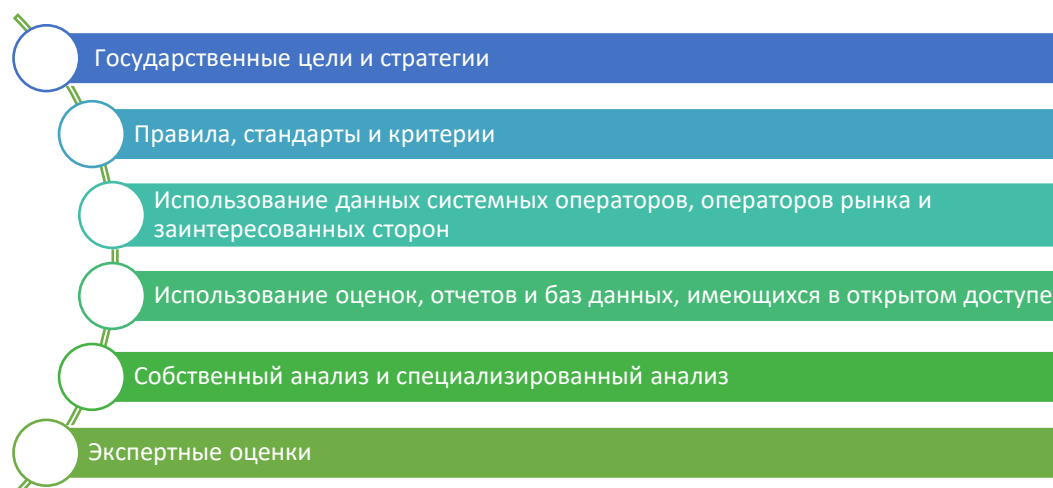


Рисунок 17. Типовые источники входных данных для моделирования рынка

Источник: DNV GL

8.3.1 Государственные цели и стратегии

Как обсуждалось в разделе 8.2.5, политические и экологические цели и ограничения, а также цели и ограничения, связанные с надежностью энергосистем, часто основываются на политических решениях, законодательных и нормативных требованиях. Как следствие, эти входные данные часто можно взять непосредственно из соответствующих правовых, административных и нормативных документов. Многие страны публикуют стратегии, касающиеся развития своего электроэнергетического сектора, главным образом, содержащие целевые показатели и прогнозы по сокращению выбросов углекислого газа и увеличению удельной доли ВИЭ в топливном балансе. Некоторые отчеты также содержат технологические прогнозы, включая распространение электромобилей или электрического отопления в жилом и промышленном секторах. Типичные примеры включают традиционные стратегии развития энергетики («программы развития»), аналогичные тем, которые используются во многих странах-участницах международной организации «Энергетическое сообщество». Аналогичные оценки, планы и программы выполняются многими государствами, входящими в Евросоюз.

Одним из показательных примеров национального планирования и стратегий являются национальные планы в области энергетики и климата (NECP)⁴⁰, которые должны иметь все государства-члены Евросоюза и участники Энергетического сообщества. NECP содержат подробное и наглядное отображение путей развития энергетической системы каждой отдельной страны на период с 2021 по 2030 гг. Среди прочего, NCEP также содержат информацию о достижениях в области энергосбережения, возобновляемых источников энергии, сокращения выбросов парниковых газов, межсистемных соединений, а также научно-исследовательских и инновационных работ. В результате эти планы также используются для получения входных данных в других областях, например, «нагрузка развития», установленная производственная мощность и трансграничная мощность.

⁴⁰ European Commission, “National Energy and Climate Plans (NECPs),” Text, Energy - European Commission, January 23, 2019, https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/national-energy-climate-plans_en.

Для иллюстрации в Вставка 4 на примере Хорватии приведены некоторые данные, которые можно получить из NCEP. В данном примере дана информация о развитии установленной мощности ВИЭ и энергопотреблении. Однако, как уже упоминалось ранее, полный план моделирования национального рынка электроэнергии также включает широкий спектр других допущений и потенциальных входных данных. Следует отметить, что эти планы обычно носят слишком оптимистичный и амбициозный характер в том, что касается внедрения новых низкоуглеродных технологий, направленных на достижение целевых показателей по сокращению выбросов углекислого газа.

Вставка 4. Национальный план в области энергетики и климата Республики Хорватия ⁴¹

В соответствии с требованиями ЕС, правительство Хорватии представило Национальный план развития энергетики и климата, который содержит подробную информацию о предстоящем развитии энергетической системы до 2030 года, например, установленной мощности различных типов генерирующих агрегатов, выработанной электроэнергии и ожидаемом потреблении электроэнергии. Кроме того, в докладе содержится прогноз развития энергосистемы Хорватии до 2050 года. На Рисунок 18 показаны, соответственно, прогнозируемая установленная мощность электростанций на ВИЭ и ожидаемый первичный и конечный спрос на электроэнергию в Хорватии.

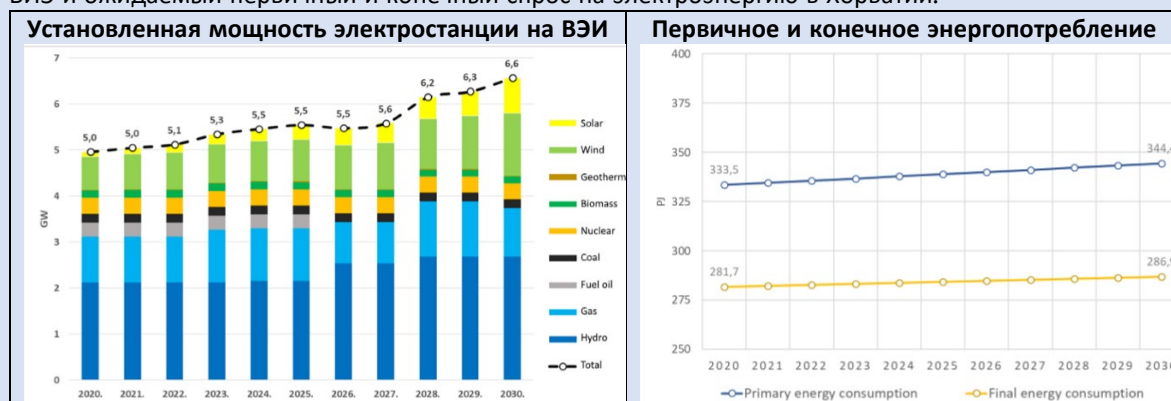


Рисунок 18: Рост установленной мощности ВИЭ и энергопотребления в рамках NECP⁴² Хорватии

8.3.2 Правила, стандарты и критерии

Другим возможным источником информации являются правила, стандарты и критерии национального и международного уровня. Примеры включают правила местного рынка, сетевой кодекс и аналогичные документы на уровне страны, стандарты NERC в США или сетевые кодексы ЕС в рамках Европейского союза и Энергетического сообщества.

Во многих случаях прямой связи между этими правилами и детальной конфигурацией модели нет. Тем не менее, обязательные стандарты надежности и требования электросетевого кодекса можно использовать для выработки входных данных по типам резервов и требованиям к резервам, либо минимальных возможностях различных ресурсов (нынешних и будущих) предоставлять такие услуги.

Косвенно, правила рынка, а также существующие договоренности, являются ключевым источником данных для определения базовой структуры рынка (сравните раздел 8.2.1).

⁴¹ Republic of Croatia - Ministry of Environment and Energy, "Integrated National Energy and Climate Plan for the Republic of Croatia for the Period 2021-2030," 2019, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/hr_final_necp_main_en.pdf.

⁴² Республика Хорватия, Министерство охраны окружающей среды и энергетики.

8.3.3 Использование данных системного оператора, оператора рынка и заинтересованных сторон

В тех случаях, когда моделирование рынка осуществляется оператором (передающей) системы, оператором (национального) оптового рынка электроэнергии и аналогичными организациями, у них есть возможность использовать большой объем собственных данных. Основные примеры включают информацию о трансграничных мощностях (или, где необходимо, подробные данные), текущие технические данные действующих электростанций и аналогичных активов, резервные требования, данные о нагрузке за прошлые периоды и, во многих случаях, производственные профили, обязательные целевые показатели безопасности и надежности и т.д.

Таким образом, при моделировании современного рынка большая часть информации оказывается уже собранной и доступной. Аналогичным образом, потребность в данных для перспективного анализа рынка, а также плана или анализа расширения генерации, тесно связана с работой сетевых операторов. Таким образом, в зависимости от последовательности и координации таких работ, можно использовать уже имеющуюся информацию.

В качестве еще одного источника входных данных для моделирования также используют сбор данных у участников рынка. Эти данные получают в ходе выборочных опросов или из документации, которая представляется в обязательном порядке. Данные можно получить у нынешних или будущих генерирующих компаний, (крупных) потребителей и розничных поставщиков. Часто информация собирается соответствующими сетевыми или системными операторами на уровне передачи или распределения, а затем, если необходимо, передается от оператора распределительных систем – оператору передающих систем.

В зависимости от потребностей, данные, которые обычно получают у заинтересованных сторон, могут включать:

- тип, пиковую мощность и годовое потребление объектов потребления (настоящих и будущих), включая распределительные отводы от передающей сети, где необходимо (то есть, в случае оператора распределительных сетей);
- тип, местоположение, мощность и другие необходимые технические характеристики действующих и планируемых объектов генерации и хранения, в том числе более крупных объектов распределительных сетей, информация или оценка со стороны оператора распределительных сетей соответствующих объемов (подлежащих подключению к их распределительным сетям);
- нагрузка за прошлые периоды и профиль нагрузки, включая прогнозные значения (ВИЭ) для объектов, подключенных к передающим сетям, крупных предприятий, подключенных к распределительным сетям или агрегированные данные по распределительным сетям;
- гибкое обслуживание, которое представляется крупным потребителям (например, регулирование спроса); а также
- существующие или ожидаемые эксплуатационные ограничения (т.е., также как при обмене при оперативном планировании).

Для упрощения этого процесса желательно предоставить право оператору передающих сетей или другим соответствующим субъектам (например, оператору распределительных сетей) запрашивать такие данные у третьих лиц, четко регламентировав порядок, а также разработать и внедрить стандартизированные форматы данных. Как и в случае Великобритании, этого можно добиться, например, с помощью принятия сетевого кодекса (сравните со Вставка 5) или аналогичных документов. В качестве альтернативы, такие стандарты и документы могут быть разработаны самим оператором передающих сетей, возможно, с последующим окончательным утверждением органом регулирования, т. е., в качестве меры, связывающей заинтересованные стороны соответствующими обязательствами.

По мере распространения распределенных ресурсов, все большее значение приобретает привлечение к этому процессу объектов, подключенных к распределительным сетям. В рамках Энергетического сообщества соответствующие обязательства могут частично опираться на применимые положения сетевых кодексов ЕС, такие как положения «Требований к генераторам ENTSO-E»⁴³. Точно так же, все большее значение приобретает установление и обеспечение бесперебойного обмена данными между операторами передающих и распределительных сетей, как объясняется в «Руководстве по использованию инструментов анализа потока мощности» в контексте сетевого планирования.

⁴³ ENTSO-E, “Requirements for Generators,” 2016, https://www.entsoe.eu/network_codes/rfg/.

Вставка 5. Сбор данных в целях планирования в соответствии с требованиями Сетевого кодекса Великобритании⁴⁴

«Кодекс планирования», являясь частью «Сетевого кодекса Великобритании», включает подробные положения о составе данных и порядке их передачи соответствующими лицами оператору передающих систем National Grid для долгосрочного сетевого планирования. Соответствующие требования применяются к организациям, имеющим действующие или перспективные объекты, подключенные (в настоящем или будущем) к передающей сети. По подключенным объектам необходимо предоставлять «данные о подключении для целей планирования». В зависимости от стадии планирования будущих проектов, заинтересованные стороны должны сначала предоставить менее детализированные «предварительные данные о проектном планировании», а затем, по мере достижения проектом более поздних стадий «обязательные данные о проектном планировании». По каждому из таких массивов данных имеется стандартизированный набор параметров, который передается National Grid в соответствии с установленным календарным графиком. Далее, в «Кодексе планирования» документально закреплены требования к предоставляемым данным.

Ниже кратко перечислены типовые требования к данным по генерирующим компаниям и крупным потребителям.

- **Генерирующие компании.** Генерирующие компании, которые хотят подключиться к энергосистеме, обязаны предоставить данные о технических характеристиках, таких как максимальная и минимальная выходная мощность, ограничения по распределению реактивной мощности или классификация генерирующего блока (например, работающий на природном буром угле, геотермальный, работающий на морском источнике энергии, либо морская ветроэлектростанция). Генерирующие компании также должны предоставить информацию о планируемой дате подключения, максимальной потенциальной мощности при подключении и объема генерируемой мощности при подключении. Кроме того, генерирующие компании должны предоставить прогнозы ожидаемой выработки электроэнергии. Для некоторых технологий, например, для морских ветроэлектростанций, существуют специальные требования по предоставлению данных, такие как «Сведения по развитию прибрежных ветрогенераторов» (Offshore Development Information Statement).
- **Промышленные и крупные потребители.** Промышленные и крупные потребители предоставляют сведения системному оператору при подключении к сети или изменении параметров подключения (например, при увеличении пропускной способности). Например, в Великобритании новые потребители электроэнергии должны предоставить стандартные данные планирования (например, подробный прогноз спроса), планируемую дату подключения и максимальную потребность в электроэнергии. Потребители, которые уже подключены к сети, предоставляют в компанию National Grid данные о потреблении за прошлые периоды, за текущий период и данные прогнозов, в том числе, прогнозируемый пиковый спрос и его продолжительность.

8.3.4 Использование оценок, отчетов и баз данных в открытом доступе

Источники, которые используются для формирования допущений в моделировании, включают исследования, отчеты и базы данных, находящиеся в открытом доступе, в том числе, составленные по специальным требованиям отчеты коммерческих поставщиков услуг. На практике разработчики моделей могут опираться на широкий спектр источников данных. В рамках настоящего руководства особенно актуальными представляются следующие категории:

- прогнозы будущего предложения и спроса в области энерго- и электроснабжения;
- прогнозы будущего развития технологий и затрат;
- прогнозы цен на сырье; а также

⁴⁴ National Grid, “Planning Code” (National Grid, 2020), <https://www.nationalgrideso.com/document/33871/download>.

- информация о наличии и характере ресурсов.

Прогнозы будущего предложения и спроса в области энерго- и электроснабжения

Многие (международные) организации регулярно разрабатывают и публикуют общие прогнозы развития национальных, региональных или даже глобальных энергосистем и энергетики в долгосрочной перспективе. Примеры включают «Перспективу развития мировой энергетики» (World Energy Outlook) Международного энергетического агентства (МЭА)⁴⁵, «Мировые сценарии развития энергетики» (World Energy Scenarios) Всемирного энергетического совета (ВЭС)⁴⁶, дорожные карты Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA), прогнозы ЕС и большое количество отдельных работ вузов или исследовательских организаций, отраслевых ассоциаций и проч. Если тот или иной анализ носит региональный характер, его можно использовать в качестве источника (непротиворечивых) допущений по другим (в том числе, соседним) странам или для оценки собственных допущений в контексте более масштабного анализа (см. также обсуждение в главе 4 выше).

Другая важная категория источников данных включает национальные стратегии развития энергетики, долгосрочные сетевые разработки и аналогичные документы других стран или, для более крупных регионов, такие разработки, как «Десятилетний план развития сети» Европейской сети операторов передающих систем (ENTSO-E TYNDP).

Прогнозы будущего развития технологий и затрат

Многие организации, как в рамках участия в программах оценки перспектив энергоснабжения, так и самостоятельно, готовят регулярные отчеты о перспективах развития и стоимости различных технологий, в том числе для традиционных видов генерации, возобновляемых источников энергии, аккумуляторных хранилищ энергии и других. Аналогичным образом, некоторые отраслевые ассоциации, поставщики коммерческих услуг и международные организации предоставляют информацию о стоимости и надежности существующих технологий.

Ниже перечислены примеры источников данных из этой категории.

- *Технологические отчеты.* Технологические отчеты обычно содержат текущие и прогнозируемые изменения, касающиеся технических характеристик и цен на одну или нескольких технологий. Примеры включают: «Перспективы энергетических технологий» (Energy Technology Perspectives) МЭА (см. Вставка 6), отчет «О затратах на производство электроэнергии на возобновляемых источниках» (Renewable Power Generation Costs), публикации и базы данных IRENA⁴⁷, публикации национальных институтов, например, Национальной лаборатории по изучению возобновляемой энергии (NREL) в США⁴⁸,

⁴⁵ WORLD ENERGY OUTLOOK 2019. (S.I.: IEA, 2019).

⁴⁶ World Energy Council, “World Energy Scenarios | 2019: European Regional Perspectives,” 2019, <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-scenarios-2019-european-regional-perspectives>.

⁴⁷ IRENA, “Future of Wind,” 2019, /publications/2019/Oct/Future-of-wind; International Renewable Energy Agency, *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030* (International Renewable Energy Agency, 2017), /publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets; IRENA, “Renewable Power Generation Costs in 2018,” 2018, /publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018.

⁴⁸ Laura Vimmerstedt et al., “2019 Annual Technology Baseline ATB Cost and Performance Data for Electricity Generation Technologies” (National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States); Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States), 2019), <https://doi.org/10.11578/1544562>.

Общества содействия прикладным исследованиям им. Фраунхофера в Германии и проч. Кроме того, разработчики моделей могут полагаться на опросы и прогнозы коммерческих поставщиков услуг, например, Bloomberg New Energy Finance или Lazard, для получения данных по возобновляемым источникам или хранению энергии.

- *Затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание.* Затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание отдельных электростанций часто неизвестны даже заинтересованным сторонам. Поэтому предполагаемые издержки при моделировании рынка часто основываются на типовых издержках, которые публикуются различными институтами, такими как NREL в США⁴⁹. Некоторые отчеты также содержат прогнозы будущего роста затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание энергетических технологий.
- *Статистика надежности.* Грамотное моделирование рынка требует принятия допущений относительно надежности действующих и вводимых в эксплуатацию электростанций, включая электростанции, которых еще нет на местном рынке. В этих случаях можно опираться на статистику из внешних источников, например, статистику VGB PowerTech в Европе, NERC в США и статистику ряда других учреждений и компаний на национальном уровне. В качестве альтернативы соответствующие расчеты можно взять из аналогичных разработок, например, подготовленных ENTSO-E по поручению Европейской комиссии или осуществленных другими международными, национальными, научно-образовательными институтами и частными организациями.

Используя данные других стран и географических регионов, особенно, если моделирование носит достаточно масштабный характер, может возникнуть необходимость детального анализа и коррекции соответствующих параметров, поскольку в «сыром виде» использовать их при оценке изучаемого региона невозможно.

⁴⁹ NREL, “Distributed Generation Energy Technology Operations and Maintenance Costs | Energy Analysis | NREL,” 2020, <https://www.nrel.gov/analysis/tech-cost-om-dg.html>.

Вставка 6. Доклад «Перспективы развития энергетических технологий» МЭА⁵⁰

«Перспективы развития энергетических технологий» — доклад МЭА, в котором обсуждается, как можно использовать современные технологии для достижения задач в области сокращения выбросов углекислого газа. Доклад содержит прогноз развития мировой энергетики до 2050 года, включая стоимость и распространение таких технологий производства электроэнергии, как солнечная и прибрежная ветрогенерация. На Рисунок 19 показан пример типовой информации о технологиях выработки электроэнергии. Пример иллюстрирует ретроспективный и прогнозируемый рост нормированной стоимости выработки солнечной электроэнергии (LCOE) и обосновывает этот прогноз, исходя из тендерных цен на выполнение различных проектов по всему миру. Помимо технологий производства электроэнергии, в докладе также затронуто энергопотребление: в частности, прогнозируется развитие технологий энергосбережения и высокоэнергетических промышленных отраслях в различных регионах мира (например, в алюминиевой и химической промышленности). В докладе освещается развитие технологий и технологических процессов в промышленности и обсуждается, в том числе, как может измениться энергоёмкость производства алюминия в различных регионах мира. Наконец, в докладе также рассматриваются различные технологии хранения электроэнергии и содержатся соответствующие прогнозы, включая цены на них и их внедрение.

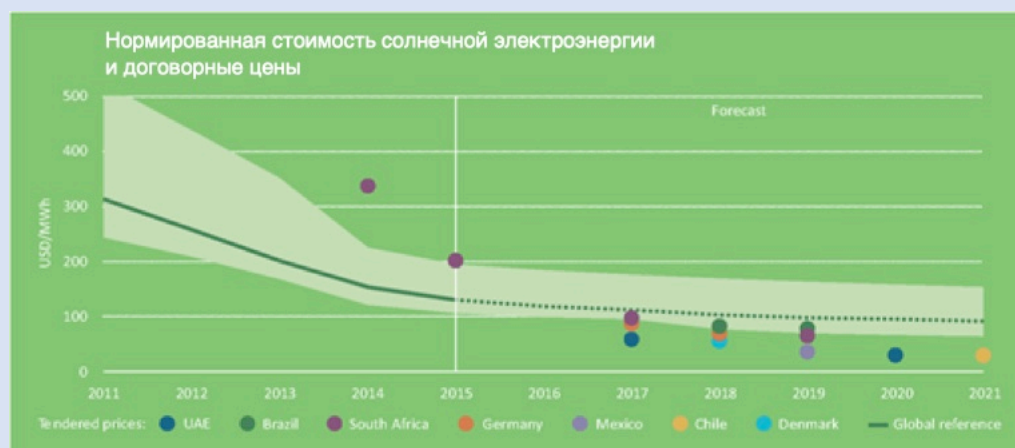


Рисунок 19. Динамика роста нормированной стоимости солнечной электроэнергии (LCOE) и договорных цен⁵¹

Прогноз цен на сырье

Что касается затрат на сырье и топливо, разработчики моделей обычно полагаются на перечисленные ниже типы источников данных.

- Особенно в отсутствие рыночных цен, краткосрочные разработки часто основываются на регулируемых ценах или тарифах.
- И наоборот, на либерализованных рынках и для товаров, которыми торгуют на глобальных рынках, часто возможно и даже желательно использовать форвардные котировки отдельных товаров. В зависимости от страны, это может быть особенно актуально для цен на нефть, газ или уголь, то есть, по крайней мере, для импортного топлива. Аналогичным образом, в ЕС имеются коммерческие прогнозы цен на углеродные квоты в Системе торговли квотами на выбросы парниковых газов (ЕТС).
- Как и в случае развития технологий и затрат, долгосрочные ценовые прогнозы часто можно получить из отчетов, опубликованных в открытом доступе. «Перспективы

⁵⁰ IEA, “Energy Technology Perspectives” (Paris, 2017), <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>.

⁵¹ IEA.

развития мировой энергетики» МЭА (World Energy Outlook)⁵² представляет собой один из наиболее популярных источников данных, но аналогичные оценки также можно найти в публикациях Всемирного банка и других организаций. Еще один возможный источник данных для стран Европы — сценарии, предложенные в Десятилетнем плане развития сети ENTSO-E и ENTSO-G⁵³.

При использовании международных источников необходимо корректировать предложенные цены с учетом ситуации на моделируемом рынке.

Информация о наличии и структурном составе ресурсов

Для действующих гидроэлектростанций, ветровых и солнечных электростанций доступность ресурсов может быть смоделирована на основе информации и измерений за прошлые отчетные периоды. Однако, особенно когда дело касается ветровых и солнечных электростанций, ретроспективные временные ряды обычно охватывают недостаточно продолжительные периоды, которые не позволяют репрезентативно отразить стохастическую изменчивость на протяжении нескольких лет. Кроме того, обычно отсутствуют данные по будущим электростанциям.

В таких случаях отчеты и оценки по конкретным ресурсам могут дать представление о их наличии или, как минимум, о средних коэффициентах нагрузки и выработки. Помимо конкретных прогнозов по отдельным объектам, при проведении анализа на национальном или региональном уровне целесообразно использовать источники данных аналогичного регионального масштаба, такие как атлас ветровых и солнечных ресурсов. Соответствующую информацию можно получить у коммерческих поставщиков услуг, а также в международных организациях, таких как IRENA.

В отношении более детализированных временных рядов ситуация иная. Некоторые входные данные можно получить бесплатно, например, через платформу Фотоэлектрической географической информационной системы (PV-GIS) Объединенного исследовательского центра Евросоюза (EC JRC) или на аналогичном веб-сервисе Национальной лаборатории по изучению возобновляемой энергии (NREL) США. Однако во многих случаях в таких источниках временное разрешение и охваченный период значительно ограничены, как, например, в глобальном атласе ветровых⁵⁴ и солнечных ресурсов⁵⁵, предоставленном Всемирным банком. Так, атлас ветровых и солнечных ресурсов обеспечивает практически глобальный охват общей доступности ветровых потоков и солнечного излучения, включая Европу (см. Рисунок 20). Кроме того, можно рассчитать временные ряды на уровне выбранных участков, но только за один год.

⁵² WORLD ENERGY OUTLOOK 2019.

⁵³ ENTSO-E and ENTSO-G, “TYNDP2020 Scenario Methodology Report,” 2020, 134.

⁵⁴ “Global Wind Atlas,” Global Wind Atlas, accessed April 21, 2020, <https://globalwindatlas.info>.

⁵⁵ “Global Solar Atlas,” accessed April 22, 2020, <https://globalsolaratlas.info/map?c=11.523088,8.4375,3>.

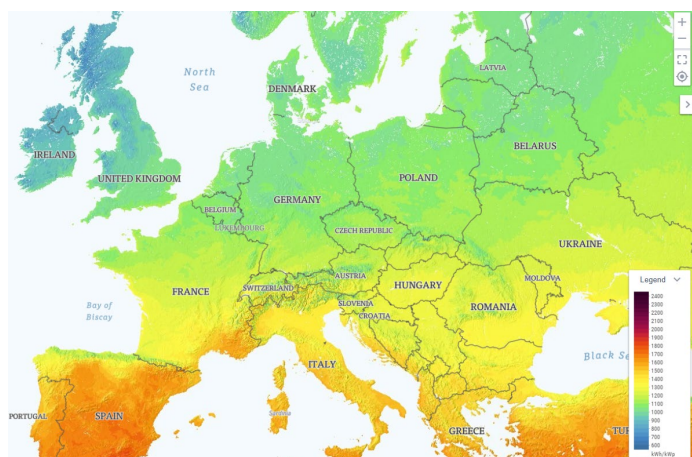


Рисунок 20. Карта инсоляции стран Европы⁵⁶

В качестве альтернативы, более подробную информацию и временные ряды можно приобрести у национальных метеорологических бюро и в аналогичных организациях, а также у коммерческих поставщиков услуг. Хотя немалое число таких компаний находится в Европе и США, включая Energy & Meteo (22), DNV GL⁵⁷, Meteomatics,⁵⁸ Meteonorm⁵⁹ или Solargis⁶⁰, многие из них оказывают услуги по всему миру. Тем не менее, следует отметить, что указанные входные данные поставляются не бесплатно, и могут стоить достаточно дорого.

8.3.5 Специализированный анализ

Некоторые входные данные, необходимые для моделирования, невозможно просто взять из отчетов, их получают с помощью специального анализа или расчетов.

В ряде случаев такую информацию может получить как производное параметрической функции или путем статистического регрессионного анализа. Часто возникает необходимость учитывать влияние множества факторов. Например, структура нагрузки зависит от конкретного потребления в различных секторах, таких как жилой и промышленный секторы. На этот показатель оказывает влияние множество факторов, включая распространение технологий. Этот тип переменных можно приблизительно рассчитать, используя внешние параметры и факторы, в том числе, прогнозируемый рост ВВП, прирост населения, урбанизацию, распространение технологий (электрификация транспорта, системы отопления и охлаждения и проч.) и ожидаемое развитие средств энергосбережения. Структуру нагрузки можно получить различными методами, которые отличаются друг от друга уровнем трудоемкости. Наиболее простым является экстраполяция данных о структуре нагрузки за прошлые отчетные периоды. Более современные методы включают одно- и многомерную регрессию, основанную одновременно на внешних параметрах и ретроспективных данных. Для некоторых видов анализа используются сложные эконометрические модели, например, модель частичного или полного равновесия. Пример расчета профиля нагрузки с использованием внешних параметров в сочетании с другими методами дан во Вставка 7.

⁵⁶ “Global Solar Atlas.”

⁵⁷ DNV GL, “Virtual Met Data,” DNV GL, 2020, <https://www.dnvgl.com/services/virtual-met-data-3964>.

⁵⁸ Meteomatics, “Energy Market | Meteomatics,” 2020, <https://www.meteomatics.com/en/energy/>.

⁵⁹ Meteonorm, “Meteonorm Software - Worldwide Irradiation Data,” Meteonorm, 2020, <https://meteonorm.com/en>.

⁶⁰ Solargis, “Bankable Solar Data for Better Decisions,” 2020, <https://solargis.com/>.

Вставка 7. Прогнозирование профиля нагрузки для плана развития энергосетей Германии⁶¹

Четыре оператора передающих систем Германии рассматривают различные сценарии плана развития энергосети. Они определили общее потребление и пиковую нагрузку по восходящему принципу, то есть, суммируя потребление в разных сегментах сети. Следует отметить, что некоторые технологии (например, электромобили, системы электронагрева) могут иметь гибкий профиль нагрузки. Операторы передающих систем различают традиционные сегменты спроса на электроэнергию и новые сегменты спроса, для которых выбран иной подход расчета профиля нагрузки: спрос на электроэнергию в традиционных сегментах определяли как производное параметрической функции, а потребление электроэнергии новыми сегментами спроса определяли с помощью других подходов (главным образом, путем консультаций с заинтересованными сторонами). Классификация сегментов по этим категориям показана в Таблица 8, а в Таблица 9 даны примеры учитываемых параметров для двух сегментов спроса.

Таблица 8. Классификация сегментов спроса оператора передающих сетей Германии

Традиционные сегменты спроса на электроэнергию	Новые сегменты спроса на электроэнергию
Определяется как производное параметрической функции	Определяется другими методами
Жилой сектор	Новые аккумуляторные, стальные, алюминиевые и химические заводы
Коммерческий сектор	Центр обработки данных
Общественный транспорт	Электромобили (электромобили, большегрузные автомобили)
Промышленность	Преобразование электроэнергии в тепло (промышленный и жилой секторы)
Перерабатывающая промышленность, добыча ископаемого топлива	Преобразование электроэнергии в газ

Таблица 9. Примеры параметров, учитываемых в параметрическом прогнозировании профиля нагрузки

Сегмент спроса	Параметры, учитываемые как производные параметрической функции
Жилой сектор	Текущий спрос на электроэнергию со стороны жилого сектора, рост населения, количество домашних хозяйств, динамика доходов, рост энергосбережения.
Промышленность	Текущий спрос на электроэнергию со стороны промышленности, повышение эффективности, новые процессы и технологии, повышение спроса на электроэнергию в связи с использованием цифровых технологий и отказа от угольной энергетики.

⁶¹ Tim Drees et al., “Szenariarahmen Zum Netzentwicklungsplan Strom 2035, Version 2021” (Amprion, 50Hertz, TenneT, TransnetBW, 2020), <https://www.netzentwicklungsplan.de/de/netzentwicklungsplaene/netzentwicklungsplan-2035-2021>.

По всем вопросам, касающимся данной публикации, просьба обращаться к Эрин Хаммел (Erin Hammel) (ehammel@naruc.org).

National Association of Regulatory Utility Commissioners (NARUC)

1101 Vermont Ave, NW, Suite 200

Washington, DC 20005 U.S.

Тел.: +1-202-898-2210

Факс: +1-202-898-2213

www.naruc.org